

Ontwikkeling van meetmethoden voor emissietesten en NO_x- monitoring bij mobiele werktuigen

TNO 2025 R11083 – 5 juni 2025

Ontwikkeling van meetmethoden voor emissietesten en NOx- monitoring bij mobiele werktuigen

Auteurs

[Redacted]

Exemplaar nummer

2025-STL-RAP-100357435

Aantal pagina's

40 (excl. voor- en achterblad)

Aantal bijlagen

0

Opdrachtgever

Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat

Projectnaam

EMPK 2025 IenW

Projectnummer

060.62724

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.

© 2025 TNO

Samenvatting

In 2023 en 2024 heeft TNO in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat gerapporteerd over de mogelijke meetmethoden voor controle van de emissies van mobiele machines in de praktijk.^{1 2} De onderzoeken vonden plaats binnen het project “Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK)”. Bij deze onderzoeken is ervaring opgedaan met verschillende varianten van inzet- en emissie-monitoring, waaronder een variant waarbij een NO_x-sensor wordt geplaatst in de uitlaat. Daarnaast zijn toen eerste ervaringen opgedaan met korte emissietesten voor de controle van de juiste werking van de SCR-katalysator (katalysator voor NO_x-reductie) en het roetfilter (reductie fijnstof).

Uit de eerdere onderzoeken is gebleken dat NO_x-monitoring met een NO_x-sensor in de uitlaat een goed beeld geeft van de praktijkemissies. Voor de technische uitvoerbaarheid is het wenselijk om onafhankelijk van machine-eigen signalen de NO_x-emissies te monitoren. De eerste ervaringen met de korte emissietesten lieten zien dat de werking van het roetfilter goed beoordeeld kan worden met een korte deeltjesaantallentest. Ook werd geconcludeerd dat het waarschijnlijk goed mogelijk is om de werking van SCR-katalysatoren in de praktijk te controleren, al neemt deze test mogelijk meer tijd in beslag dan de roetfiltertest.

In 2024 en 2025 is een verder vervolg gegeven aan het EMPK-onderzoek naar meetmethoden voor controle van de emissies van mobiele machines in de praktijk. Goede controle op de inzet en emissies van mobiele machines biedt namelijk een waarborg dat de vooraf ingeschatte emissies niet worden overschreden. Door niet goed functionerende systemen voor emissiereductie kunnen de emissies namelijk flink toenemen. Voor de NO_x-emissies kunnen deze niveaus bij een niet-werkende SCR-katalysator zomaar 10 keer hoger zijn, in het geval van fijnstof, bij een defect roetfilter, wel 100 keer hoger.

In dit rapport wordt verslag gedaan van het onderzoek dat in 2024 en 2025 is uitgevoerd.

Onderzocht zijn:

1. Een korte emissietest en mogelijke afkeurgrens voor controle van de werking van roetfilters.
2. Een korte emissietest en mogelijke afkeurgrens voor controle van de werking van SCR-katalysatoren.
3. Continue monitoring voor controle van retrofit (achteraf ingebouwd) roetfilter.
4. Machine-onafhankelijke NO_x-monitoring, zowel volgens een methodiek waarbij gebruik wordt gemaakt van een luchtmassastroom-sensor (MAF) in combinatie met NO_x-sensor, als volgens een methodiek op basis van NO_x/CO₂ ratio.

Onderstaand zijn voor deze deelonderwerpen de onderzoeksresultaten samengevat.

Korte roetfiltertest

Als basis voor de korte emissietest ter controle van de werking van roetfilters is de APK-deeltjesaantallentest voor wegverkeer genomen. Hierbij worden bij stationair toerental de deeltjesaantallen (fijnstof) in de uitlaat gemeten gedurende ca. 30 seconden.

¹ TNO 2023 R10553 Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmaschinen.

² TNO 2024 R11077 Opties voor monitoring van de NO_x-emissies van mobiele werktuigen.

Tijdens dit onderzoek is de deeltjesaantallentest uitgevoerd bij 25 mobiele machines met een roetfilter, met name bij Stage V machines (Stage V is de meest recente emissieklasse voor mobiele werktuigen). De resultaten laten duidelijk zien dat machines met een goedwerkend, gesloten roetfilter lage aantallen deeltjes uitstoten, meestal ruim onder de afkeurgrens die wordt gehanteerd bij de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer. Machines waarop geen roetfilter is geïnstalleerd, of waarbij het roetfilter mogelijk defect is, kunnen direct gedetecteerd worden omdat deze veel hogere deeltjesaantallen uitstoten.

Het onderzoek bevestigt dat het protocol van de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer grotendeels overgenomen kan worden voor toepassing bij bouwmachines. Hierbij wordt een afkeurgrens van 250.000 deeltjes per cm^3 geadviseerd. Dit is gelijk aan het initiële TNO advies voor de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer. Bovendien kan in de basis dezelfde meetapparatuur worden toegepast. Wel worden daarbij voor meten in het veld kleine aanpassingen voorgesteld, zoals gebruik van een langere verwarmde leiding, een inwendige stroomvoorziening en een robuustere behuizing. Tot slot is het belangrijk om voldoende aandacht te hebben voor veiligheid bij het werken op hoogte (uitlaten zijn soms relatief hoog). Dit geldt ook voor de hieronder beschreven SCR-test.

Korte SCR-test

De SCR-test is een korte test van de werking van de SCR-katalysator waarbij de NO_x -concentraties aan de uitlaat worden gemeten. Voor dit onderzoek zijn metingen uitgevoerd bij 16 machines met een SCR-katalysator. Dit waren zowel Stage IV als Stage V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW. Het meten van NO_x -concentraties is complexer dan het uitvoeren van een deeltjesaantallen meting. In tegenstelling tot een roetfilter, werkt de SCR-katalysator alleen wanneer deze op bedrijfstemperatuur is. Om dit te bereiken moet de motor van de machine voorafgaand aan, of tijdens de meting, tot een bepaalde mate zijn belast.

Tijdens dit onderzoek is gebleken dat de SCR-katalysator niet altijd op bedrijfstemperatuur kwam gedurende de (eerste) meting in het veld. Indien dat het geval was, is de gebruiker gevraagd om werk te verrichten dat een hogere motorbelasting vraagt. Van de 16 machines waarbij een meting is gedaan, lukte het bij twee machines niet om de SCR-katalysator op voldoende temperatuur te krijgen. De andere 14 machines lieten tijdens de test (uiteindelijk) lage NO_x -concentraties zien.

Als afkeurgrens voor een SCR-katalysator wordt voorgesteld om een concentratiewaarde van 50 ppm NO_x te hanteren. Machines zonder een goedwerkende SCR zullen deze waarde normaliter niet halen en een veel hogere NO_x -concentratie aan de uitlaat vertonen. In het concept testprotocol wordt voorgesteld om de machine 10 minuten actief op te warmen om vervolgens de meting met 'handheld' apparatuur aan de machine uit te voeren binnen ca. 30 seconden (zodat de SCR tijdens de meting nog op bedrijfstemperatuur is). Indien dit niet lukt is een oplossing om de apparatuur op de machine te bevestigen om vervolgens gedurende een langere periode (ca. 30 minuten) de NO_x -concentraties te blijven monitoren. Hierbij wordt ook aanbevolen om de uitlaatgastemperatuur mee te meten, dit om te monitoren of de SCR op bedrijfstemperatuur komt.

Mobiele apparatuur om NO_x -concentraties te meten is commercieel verkrijgbaar. Dergelijke apparatuur is doorgaans echter niet bedoeld om (kortstondig en snel) op machines te monitoren. Daarnaast zijn er enkele extra eisen aan de apparatuur, zoals een extra lange meetsonde, om de plaatsing van de apparatuur makkelijker te maken.

Fijnstof-emissie-monitoring

Om te controleren of een roetfilter in een machine aanwezig is, kan drukmonitoring worden toegepast. Tijdens het onderzoek is geëxperimenteerd met een achteraf in een machine gemonteerd roetfilter in combinatie met drukmonitoring van het uitlaatgas vóór het roetfilter. De drukmonitoring liet duidelijk zien dat er een roetfilter aanwezig was vanwege de door het filter veroorzaakte tegendruk. Deze nam verder toe naarmate het roetfilter verzadigd raakte. Wanneer het roetfilter wordt verwijderd, vervalt de tegendruk in het uitlaatgas.

Machine-onafhankelijke NO_x-monitoring

Voor machine-onafhankelijke NO_x-monitoring zijn twee opties verder onderzocht. De eerste optie betreft de meest nauwkeurige: drie mobiele machines zijn in het veld uitgerust met een externe NO_x-sensor in de uitlaat en een externe MAF-sensor (Mass Air Flow) in de luchtinlaat. Met deze methodiek zijn succesvol absolute emissies gemeten, onafhankelijk van machine-signalen. De luchtinlaattrajecten van de machines waren echter te groot om een bestaande MAF-sensor direct te kunnen plaatsen, waardoor plaatsing relatief complex was. In een studie met Connekt in het Kennis-, Opschaling- en Praktijkervaringsprogramma wordt deze optie verder onderzocht. In dat programma wordt gewerkt aan de opschaling van NO_x-monitoring, waaronder die met de toepassing van de MAF-sensor.

De tweede optie betreft het plaatsen van alléén een NO_x-sensor. Door de afwezigheid van MAF- en/of machine-signalen kan de luchtstroom door de motor niet worden berekend om zo tot emissietotalen te komen. Om deze reden is onderzocht wat de mogelijkheden zijn met de eerder genoemde NO_x/CO₂ ratio. Met een NO_x sensor kunnen namelijk ook CO₂-concentraties worden bepaald.

Op basis van de NO_x/CO₂ ratio kan een inschatting worden gemaakt van NO_x-emissies in g/kWh. Deze inschatting is theoretisch van aard, maar is bij diverse machines geverifieerd aan de hand van metingen met een MAF-sensor. Daarnaast kunnen gemeten CO₂-concentraties worden gebruikt om van gNO_x/kWh tot absolute NO_x-emissiewaarden te komen. Al met al geeft deze optie een eenvoudiger (maar minder nauwkeurig) alternatief om met alleen een NO_x-sensor de NO_x-emissies in g/kWh of in gram per uur te berekenen.

Inhoudsopgave

Samenvatting	3
Inhoudsopgave	6
1 Inleiding	7
1.1 Relevantie van het onderzoek	7
1.2 Voorgaand onderzoek	8
1.3 Doel onderzoek	8
1.4 Aanpak	8
1.5 Leeswijzer	9
1.6 Dankwoord	10
2 Controle werking roetfilter	11
2.1 Overzicht gemeten machines met roetfilter	11
2.2 Meetmethode en apparatuur	12
2.3 Praktijkervaring en op de bouwplaats	12
2.4 Meetresultaten	13
2.5 Meetinstructies voor deeltjesaantallentest	15
2.6 Controle roetfilter als methode om Stage-norm vast te stellen	16
3 Controle werking SCR	18
3.1 Overzicht gemeten machines met SCR	18
3.2 Meetmethode en apparatuur	19
3.3 Gemeten NO _x -concentraties als functie van uitlaatgastemperatuur	19
3.4 Praktijkervaringen op de bouwplaats met de SCR-test	23
3.5 Meetinstructies SCR-test	24
4 Fijnstof-emissie monitoring	25
4.1 Roetfiltertechniek	25
4.2 Experiment met opsteekfilters en drukmonitoring	27
5 NO_x-emissie monitoring	30
5.1 Methodiek(en) en apparatuur emissie monitoring	30
5.2 Monitoringsresultaten 2024	31
5.3 Ervaringen met plaatsing van eigen MAF-sensor	33
5.4 NO _x -monitoring op basis van NO _x /CO ₂	34
5.5 Van NO _x /CO ₂ naar absolute emissies	36
6 Conclusies	38
Ondertekening	40

1 Inleiding

1.1 Relevantie van het onderzoek

Zonder controle op inzet en emissies is er geen waarborg of de vooraf ingeschatte emissies niet worden overschreden. 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 dan geldende normen. In het geval van NO_x kan dat zomaar 10 keer hoger zijn, in het geval van fijnstof wel 100 keer hoger.

Controle van mobiele machines kan op verschillende niveaus worden gedaan:

1. Controle van inzet van de juiste machines, zoals machines met een SCR-katalysator³ en/of gesloten roetfilter;
2. Controle van de juiste werking van de SCR-katalysator en roetfilter;
3. Controle op de hoeveelheid uitstoot.

Het eerste niveau, de controle van inzet van de juiste machines, kan uitgevoerd worden op diverse manieren, bijvoorbeeld door een check van gegevens op het motorplaatje. Voor machines met een SCR en roetfilter kan deze controle ook worden gedaan middels een korte emissietest. Dezelfde korte emissietest kan als basis dienen voor het tweede niveau, om te bepalen of SCR en het roetfilter daadwerkelijk functioneren. Voor het derde niveau zijn ook diverse mogelijkheden, zoals het monitoren van draaiuren, brandstofverbruik en AdBlue-verbruik, of een meer nauwkeurige methode door directe NO_x-monitoring op basis van sensordata.

Emissiemonitoring is relevant voor het maken van een goede inschatting van de stikstofdepositie bij een bouwproject. Volgens de Wet natuurbescherming is er een natuurvergunning nodig voor bouwprojecten als negatieve effecten van een project op een Natura 2000-gebied niet op voorhand kunnen worden uitgesloten. Eén van de aspecten die van invloed kan zijn op de natuur is de stikstofdepositie. Bouwmaterieel 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 rekeninstrument AERIUS. Hierbij wordt de stikstofuitstoot van een project berekend op basis van het AdBlue verbruik, draaiUren en het Brandstofverbruik, afgekort wordt dit ook wel de AUB-methode genoemd. Een andere optie in AERIUS is om de NO_x-uitstoot direct in te voeren, dit kan gedaan worden als er emissie-meetgegevens beschikbaar zijn. Emissiemonitoring met sensoren kan hier een belangrijke bijdrage aan leveren.

Naast stikstof, zorgt de uitstoot van fijnstof voor negatieve gezondheidseffecten. In het Schone Lucht Akkoord is daarom het streefdoel gesteld om in 2030 een reductie van de negatieve gezondheidseffecten van mobiele werktuigen van 75% ten opzichte van 2016 te realiseren.⁴

³ Katalysator voor NO_x-reductie

⁴ Schone Lucht Akkoord – Gezondheidswinst voor iedereen in Nederland, pagina 13

Dat kan bijvoorbeeld door de toepassing van machines met een roetfilter of door de inzet van uitstootvrije machines. Bij machines met een roetfilter is het wel van belang dat deze filters niet defect of verwijderd zijn. Voor wegvoertuigen is er daarom een deeltjesaantallen test opgenomen in de APK. Voor mobiele machines bestaat een dergelijke APK-test niet. De hierboven genoemde korte test kan potentieel als vergelijkbare controle ingezet worden.

1.2 Voorgaand onderzoek

In 2023 en 2024 heeft TNO gerapporteerd over de mogelijkheden voor monitoring van de inzet emissies van mobiele machines in de praktijk.^{5 6} Bij deze onderzoeken zijn ervaringen opgedaan met verschillende varianten van emissie- en inzetmonitoring alsook met korte testen voor de controle van de juiste werking van de SCR-katalysator en het roetfilter. In de rapportage van 2024 lag de focus met name op emissie-monitoring. Hiervoor zijn verschillende opties onderzocht. Met behulp van de externe NO_x-sensor, die geplaatst wordt in de uitlaat, kunnen emissieniveaus op verschillende manieren bepaald worden. Met behulp van deze NO_x-sensor kunnen de NO_x-concentraties in de uitlaat bepaald worden, en tegelijkertijd ook de CO₂-concentraties. De meest eenvoudige manier is om de NO_x/CO₂ verhouding te bepalen. Hiermee kan worden gecontroleerd of de SCR-katalysator naar behoren functioneert, en kan een redelijke indicatie worden gegeven van de emissieniveaus. Een meer nauwkeurige methode is NO_x-monitoring met een externe NO_x-sensor in combinatie met een mass-airflow (MAF)-sensor. Dit lijkt een goede optie om onafhankelijk van machine-eigen signalen emissies te monitoren. Het kunnen vermijden van machine-eigen (CANbus) signalen heeft de voorkeur vanwege het gebrek aan standaardisatie van deze signalen.

1.3 Doel onderzoek

Het onderzoek van 2025 bouwt verder op het voorgaande onderzoek, maar kent ook een verbreding en is gericht op de onderstaande onderwerpen:

- voorstel voor een korte emissietest ter bepaling van functioneren/aanwezigheid roetfilter
- voorstel voor een korte emissietest ter bepaling van functioneren/aanwezigheid SCR
- verkenning van continue monitoring van aanwezigheid retrofit (achteraf ingebouwd) roetfilter
- verder onderzoek naar machine-onafhankelijke NO_x-monitoring, zowel voor de meest eenvoudige methodiek (NO_x/CO₂), als de meer nauwkeurige methodiek (MAF).

1.4 Aanpak

Als basis voor de korte emissietest ter bepaling van het functioneren/aanwezigheid van het roetfilter is de APK-deeltjesaantallentest vanuit het wegverkeer genomen. Hierbij wordt bij stationair toerental de deeltjesaantallen (fijnstof) in de uitlaat gemeten. Tijdens dit onderzoek zijn meerdere bouwplaatsen, verhuurbedrijven en machine-eigenaren bezocht, en zijn dergelijke metingen uitgevoerd bij machines met een roetfilter, met name bij Stage V machines (Stage V is de meest recente emissieklasse voor mobiele werktuigen). Vanuit deze praktijkmetingen is een concept meetprotocol opgesteld.

Bij dezelfde bouwplaats bezoeken zijn de NO_x-concentraties gemeten in de uitlaat, ter bepaling van het functioneren van de SCR. Dit is alleen gedaan bij machines met een

⁵ TNO 2023 R10553 Pilot project Emissie Monitoring en Periodieke Keuring (EMPK) van bouwmaschinen.

⁶ TNO 2024 R11077 Opties voor monitoring van de NO_x-emissies van mobiele werktuigen.

SCR-katalysator. Dat kunnen zowel Stage IV als Stage V machines zijn met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW. Het meten van de NO_x-concentraties is complexer dan de deeltjesaantallen test. In tegenstelling tot een roetfilter, werkt de SCR-katalysator alleen wanneer deze op bedrijfstemperatuur is. Dat betekent dat de motor van de machine tot een bepaalde mate belast moet worden voorafgaand of tijdens de meting. Deze praktische ervaringen worden beschreven in de rapportage en zijn meegenomen in het concept meetprotocol.

De bovenstaande twee korte testen kunnen ook helpen in de bepaling van de emissieklasse van de machine. Wanneer een machine voor beide testen slaagt, is dat bijvoorbeeld minimaal een Stage IV met gesloten roetfilter.

De hierboven genoemde deeltjesaantallentest is met name bedoeld om periodiek vast te kunnen stellen of er een werkend roetfilter aanwezig is. Een vorm van continue monitoring kan helpen om te controleren of het roetfilter ook tussentijds aanwezig is. Zo bestaan er bijvoorbeeld ook toepassingen met achteraf ingebouwde opsteekfilters, waarbij het filterelement vervangen dient te worden als deze verzadigd is. Een manier van continue monitoring zou de monitoring van tegendruk kunnen zijn. Door de plaatsing van een roetfilter ontstaat er immers tegendruk in het uitlaatsysteem. Tijdens deze studie is onderzocht of een dergelijke monitoring toepasbaar is op mobiele machines. Hiervoor is een bronbemelingspomp uitgekozen die continu op dezelfde motorbelasting wordt ingezet.

Voor de machine-onafhankelijke NO_x-monitoring zijn twee opties verder onderzocht. De eerste optie gaat om de meest nauwkeurige; drie mobiele machines zijn in het veld uitgerust met een externe NO_x-sensor in de uitlaat en een externe MAF-sensor in de inlaat. Hierbij zijn praktijkervaringen opgebouwd met de praktische toepasbaarheid van de wijze van NO_x-monitoring, met name bij grotere machines. De inlaattrajecten van grotere mobiele machines hebben een dusdanig grote diameter, dat er soms geen geschikte MAF-sensor kan worden gekocht. Daarom zijn de MAF-sensoren op alternatieve wijze geïnstalleerd. Dit deel van het onderzoek overlapt met het onderzoek wat wordt uitgevoerd door Connexx (samen met TNO) in het Kennis-, Opschaling- en Praktijkervaringsprogramma (KOP, zie: [Kennis-, Opschaling- en Praktijkervaringsprogramma | Over SEB | Schoon en Emissieloos Bouwen](#)). In dat programma wordt gewerkt aan de opschaling van NO_x-monitoring.

De tweede optie betreft het plaatsen van alléén een NO_x-sensor. Door de afwezigheid van MAF en/of machine-signalen kan de luchtstroom door de motor niet berekend worden. Hierdoor kan de stap naar absolute emissies (in grammen NO_x) moeilijker gemaakt worden. Om deze reden is onderzocht wat de mogelijkheden zijn met de eerder genoemde NO_x/CO₂ ratio (met de NO_x sensor kan ook CO₂ bepaald worden).

1.5 Leeswijzer

Deze rapportage biedt een overzicht van de mogelijkheden voor controle en monitoring van emissies van bouwmaschinen met een SCR en/of roetfilter.

Na de introductie volgt hoofdstuk 2, over de mogelijkheden voor roetfilter-controle. Er wordt een overzicht gegeven van de gemeten machines, de gebruikte meetmethoden en apparatuur, en de praktijkervaringen die op de bouwplaats zijn opgedaan. Ook worden de meetresultaten besproken en zijn hier gedetailleerde meetinstructies te vinden. Tot slot wordt in dit hoofdstuk behandeld hoe de roetfilter-controle kan worden gebruikt om de Stage-norm vast te stellen.

Hoofdstuk 3 gaat in op de gemeten machines, de meetmethoden en de apparatuur die zijn ingezet voor controle van de SCR katalysator. Hiervoor wordt gekeken naar de relatie tussen de gemeten NO_x-concentraties en de uitlaatgastemperatuur, en worden praktijkervaringen met NO_x-metingen op de bouwplaats gedeeld. Tot slot worden ook meetinstructies gegeven, inclusief een voorstel voor grenswaarden, gepresenteerd in een concept meetprotocol.

In hoofdstuk 4 wordt de monitoring van fijnstofemissies besproken. Hier wordt gekeken naar de bijdrage aan de fijnstofemissies van machines zonder roetfilters, evenals de potentiële impact van retrofit roetfilters op deze emissies. Het hoofdstuk beschrijft ook de effectiviteit van het retrofitten van roetfilters.

Het onderwerp van hoofdstuk 5 is NO_x-emissie-monitoring. Dit hoofdstuk bespreekt de gebruikte methodiek en apparatuur voor het monitoren van NO_x-emissies, evenals de monitoringsresultaten uit 2024. Daarnaast wordt een theoretische onderbouwing gegeven voor het vertalen van een NO_x/CO₂-waarde in ppm/% naar een absolute NO_x-uitstoot.

Ten slotte wordt in hoofdstuk 6 een samenvatting gegeven van de belangrijkste conclusies van het onderzoek.

1.6 Dankwoord

Het succes van het onderzoekswerk is voor een belangrijk deel te danken aan de verkregen medewerking van de verschillende machine- en vlooteigenaren. TNO wil hen bedanken voor het beschikbaar stellen van hun machines.

2 Controle werking roetfilter

Dit hoofdstuk beschrijft de mogelijkheden voor een roetfilter-controle bij mobiele machines. Als het roetfilter niet functioneert, bijvoorbeeld vanwege een defect, kan de emissie van fijnstof zomaar 100 keer zo hoog zijn, daarom is controle op juiste werking belangrijk. De basis voor de controle van het roetfilter is de deeltjesaantallentest zoals opgenomen in de APK voor het wegverkeer. Om te onderzoeken of dezelfde procedure en afkeurgrens qua deeltjesaantallen kan worden gehanteerd, is een meetprogramma uitgevoerd. In dit hoofdstuk wordt eerst een overzicht gegeven van de gemeten machines. Daarna worden de gebruikte meetmethode en apparatuur kort beschreven. Uiteindelijk dient deze test in de praktijk toegepast te worden, daarom volgen ook de praktijkervaringen met deze vorm van controle op de bouwplaats. Hierna worden de meetresultaten besproken en worden gedetailleerde meetinstructies gegeven. Tot slot wordt in dit hoofdstuk behandeld hoe de roetfilter-controle kan worden gebruikt om de Stage-norm vast te stellen.

2.1 Overzicht gemeten machines met roetfilter

In de onderstaande Tabel 2.1 staan de 25 machines waarbij de deeltjesaantallentest is uitgevoerd. Het gaat hierbij om uiteenlopende machines, zoals graafmachines, asfalteermachines en wielladers. De focus bij de selectie waren machines met een roetfilter. In de meeste gevallen zijn dat Stage V machines met een motorvermogen boven de 19 kW. In sommige gevallen zijn dit Stage IV of TIER4 machines. TIER4 is de Amerikaanse wetgeving, en vergelijkbaar met Stage IV. Niet alle Stage IV en TIER 4 machines hebben een (gesloten) roetfilter.

Tabel 2.1: Machines waarbij deeltjesaantallenmetingen zijn uitgevoerd.

Machine naam	Type	Producent	Model	Vermogen (kW)	Emissieklasse
ATL_XAS188_NSTDNRE5	Lucht compressor	Atlas Copco	XAS 188-14	104	V (NRE-c-5)
DYN_SD1800_NWBDNRE4	Asfalteermachine	Dynapac	SD1800C	55.4	V (NRE-v-4)
DYN_SD2500_NWBDTIER4	Asfalteermachine	Dynapac	SD2500CS	149	TIER4
DYN_SD2500_NWBDTIER4	Asfalteermachine	Dynapac	SD2500CS	149	TIER4
BOM_BW138A_NWBDNRE3	Combinatie wals	BOMAG	BW 138 AC-5	33.6	V (NRE-c-3)
ATL_QAS045_NSTDNRE4	Generator	Atlas Copco	QAS 45	38	V (NRE-c-4)
DOO_G100_NSTDNRE5	Generator	Doosan	G100	80	V (NRE-c-5)
EUR_100TDE_NSTDNRE5	Generator	Europower generators	EPSR100TDE-5	83.2	V (NRE-c-5)
DOO_DX140W_NGMDST4R	Mobiele graafmachine	Doosan	DX140W-5	102.2	IV
ATL_140W_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Atlas GmbH	140W	90	V (NRE-v-5)
DOO_DX235L_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Doosan	DX235LC-7	129	V (NRE-v-5)
HIT_ZX135U_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Hitachi	ZX135US-7	74	V (NRE-v-5)
HIT_ZX140W_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Hitachi	ZX140W-6	105	V (NRE-v-5)
HYU_HW150A_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Hyundai	HW150Acr	129	V (NRE-v-5)
KUB_KX080-_NGMDNRE4	Mobiele graafmachine	Kubota	KX080-4a2	46.5	V (NRE-v-4)
LIE_A916CO_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Liebherr	A916 Compact	110	V (NRE-v-5)
LIE_R914-K_NGMDST4R	Mobiele graafmachine	Liebherr	R914 K STD	90	IV
CAT_M314_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Caterpillar	M314	100	V (NRE-v-5)
VOL_SD75B_NWBDNRE4	Wals	Volvo	SD75D	55.4	V (NRE-v-4)
BOM_154AP5_NWBDNRE4	Tandem trilwals	BOMAG	154 AP-5 AM	55.4	V (NRE-v-4)
BOM_154AP5_NWBDNRE4	Tandem trilwals	BOMAG	154 AP-5 AM	55.4	V (NRE-v-4)

HAM_DV70iV_NWBDTIER4	Tandem trilwals	HAMM	DV+70i V0 - S	54.6	TIER4
HAM_HW90B1_NWBD	Tandem trilwals	HAMM	HW90B/10	-	-
GIA_G3500X_NLSDNRE4	Wiellader	Giant	G3500 X-TRA	48.4	V (NRE-v-4)
CAT_930M_NLSDST4R	Wiellader	Caterpillar	930M	122	IV

2.2 Meetmethode en apparatuur

Voor de testen is gebruik gemaakt van de TEN AEM Deeltjesteller, inclusief een draagbare stroomvoorziening. Deze apparatuur wordt ook gebruikt tijdens de APK bij de deeltjestellertest. Met deze meter kan gemakkelijk het onderscheid gemaakt worden tussen een goed functionerend roetfilter en een defect roetfilter. De deeltjesaantallen worden aangegeven in $\#/cm^3$ en het meetbereik is van 5.000 tot 5.000.000 $\#/cm^3$. De APK afkeurgrens voor personenauto's ligt op 1.000.000 $\#/cm^3$. Het initiële TNO-advies voor de afkeurgrens van de APK deeltjesaantallentest was echter 250.000 $\#/cm^3$. Bij een goed functionerend roetfilter ligt de uitstoot nog een stuk lager.

De machines zijn gemeten zoals deze zijn aangetroffen op het (bouw)terrein. In de meeste gevallen werd de machine tot net voor de meting ingezet en was de motor warm, maar in enkele gevallen was de machine net begonnen met werken en was dus nog relatief koud. Verder zijn de testen uitgevoerd bij stationair toerental, zonder motorbelasting. In de meeste gevallen was de test binnen 3 minuten gereed. De meetmethode is vergelijkbaar aan de methode die gehanteerd wordt op personenwagens en lichte bedrijfswagens tijdens de APK.

2.3 Praktijkervaring en op de bouwplaats

De meeste metingen zijn uitgevoerd op verschillende bouwplaatsen verspreid door het land, maar ook zijn er metingen uitgevoerd op het terrein van aannemersbedrijven.

Doordat de gebruiker van een machine in de meeste gevallen werkzaamheden aan het verrichten was, moest gevraagd worden om de machine even op een rustige plek stil te zetten (met draaiende motor). Vervolgens is met de meetapparatuur (inclusief een draagbare stroomvoorziening) een deeltjesaantallentest uitgevoerd.

Bij het uitvoeren van de test bleek dat het vaak een uitdaging was om de meting uit te voeren: in veel van de gevallen zat de uitlaat op een behoorlijke hoogte en was die niet altijd goed bereikbaar. Bijvoorbeeld bij een graafmachine zit de uitlaat vaak rond een hoogte van 2 meter gemonteerd, bij een asfaltermachine kan dit ook wel richting de 3 meter gaan.

Het is mogelijk om de metingen uit te voeren met de gebruikte APK-deeltjesteller, maar ter bevordering van de praktische uitvoerbaarheid bij het meten aan bouwmachines zou aan een aantal toevoegingen gedacht kunnen worden zoals een eigen inwendige stroomvoorziening, een langere verwarmde leiding en een robuuste ombouw geschikt voor het werken op een bouwplaats.

2.4 Meetresultaten

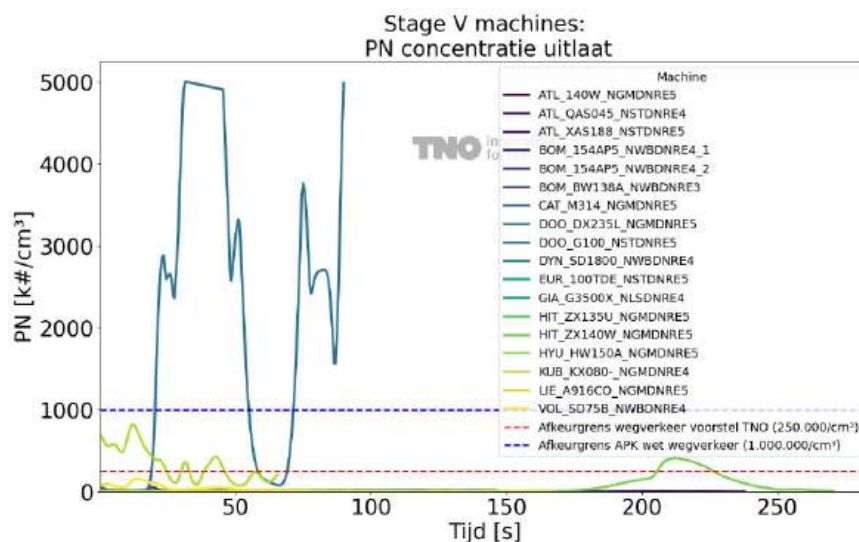
2.4.1 Stage V machines

Figuur 2.1 toont de fijnstofmetingen (deeltjesaantallen, ook wel PN-concentratie) aan de uitlaat van Stage V machines. Om aan Stage V emissieregelgeving (tussen de 19 en 560 kW) te voldoen zijn deze machines voorzien van een gesloten roetfilter.

Zoals eerder genoemd is bij het wegverkeer de deeltjesaantallentest onderdeel van de APK. Als afkeurgrens is tijdens de APK een limiet van 1 miljoen deeltjes per cm^3 ingevoerd ter bepaling van een goed werkende roetfilter. Zoals eerder beschreven heeft TNO in eerdere studies - vanuit technisch perspectief - een afkeurgrens van 250.000 deeltjes per cm^3 geadviseerd. In Figuur 2.1 zijn daarom beide limieten weergegeven.

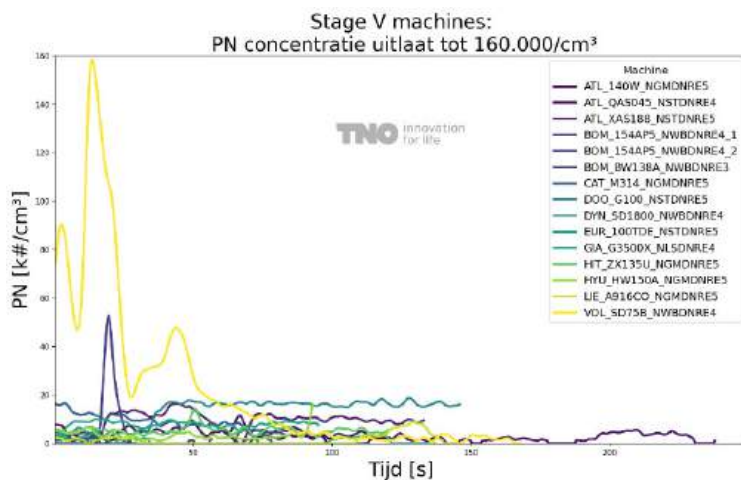
Van de 18 gemeten Stage V machines liggen de deeltjesaantallen van 17 Stage V machines onder de afkeurgrens van 1 miljoen deeltjes. De meeste machines in de test stoten ook significant minder uit dan de door TNO voorgestelde limiet van 250.000 deeltjes per cm^3 (rode lijn). Dit laat zien dat een goedwerkend roetfilter in staat is om de fijnstofuitstoot ver onder deze grens te houden tijdens stationair draaien.

Enkele machines stootten meer deeltjes uit, één tot over het maximumbereik van 5 miljoen/ cm^3 van de meetapparatuur (Doosan DX235LC-7). Dit voertuig is relatief nieuw (2022) en werd stationair gemeten. Een mogelijke oorzaak voor deze hoge fijnstofuitstoot is een beschadigd roetfilter. De fijnstofemissie van de Hitachi ZX140W verhoogde aan het einde van de meting, ook al bleef de machine stationair draaien.



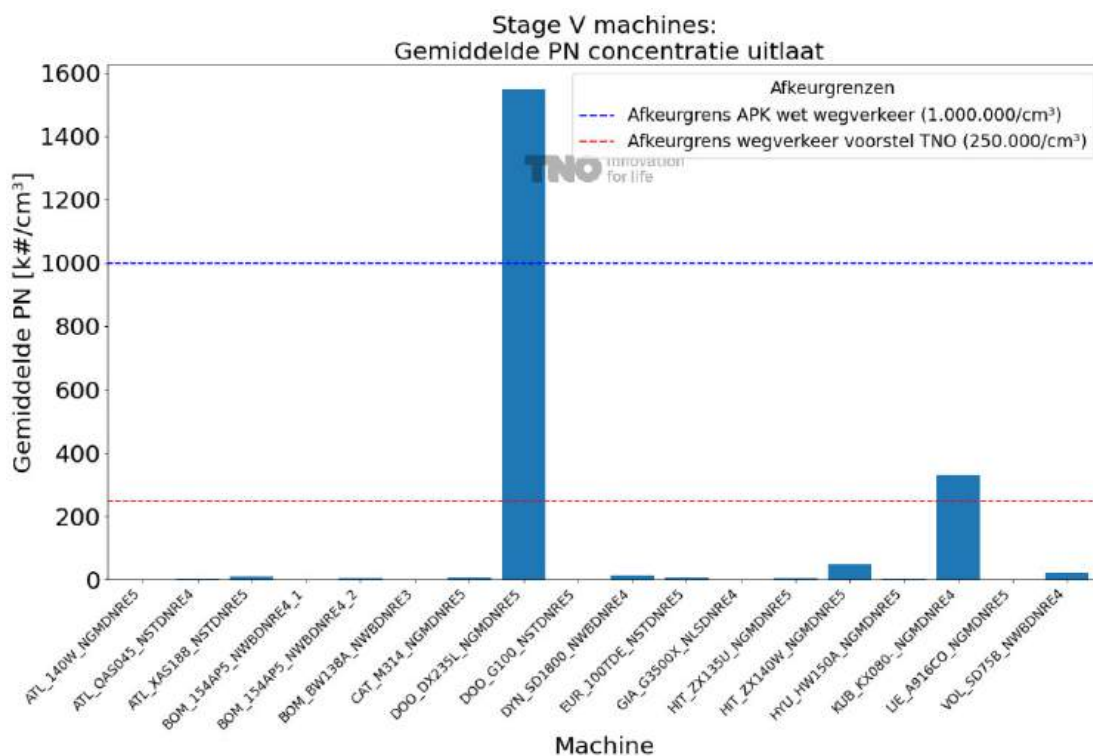
Figuur 2.1: PN-concentraties [$\text{k\#/cm}^3$] als functie van de tijd voor de gemeten Stage V machines.

Om de spreiding van de deeltjesaantallenmetingen inzichtelijk te maken is in Figuur 2.2 ingezoomd op de machines die onder de 250.000 deeltjes per cm^3 uitstoten. Het overgrote deel van de machines heeft een maximum uitstoot van onder de 50.000 deeltjes/ cm^3 . Dit laat zien dat de uitstoot van de meeste (15) machines ver onder de afkeurgrenswaarden blijven.



Figuur 2.2: Ingezoomd: PN-concentraties [k#/cm³] als functie van de tijd voor de gemeten Stage V machines onder de grens van 250.000 deeltjes per cm³.

Het onderstaande staafdiagram (Figuur 2.3) geeft de gemiddelde fijnstofuitstoot van de gemeten machines weer over de meetperiode. Twee van de 18 machines hadden gemiddeld een hogere uitstoot dan de grenswaarde van 250.000 #/cm³. De rest van de machines zit ver onder deze waarde. De uitstoot van de Doosan DX 235L was in werkelijkheid hoger dan aangegeven in het staafdiagram, aangezien de TEN deeltjesmeter niet meet boven een deeltjesaantallenconcentratie van 5 miljoen/cm³. Bij de machines onder de afkeurgrens variëren de waarden tussen de 0 tot 50.000 deeltjes/cm³. Deze variatie is binnen verwachting, en wordt mede veroorzaakt door de resolutie, nauwkeurigheid en precisie van de TEN-deeltjesmeter.

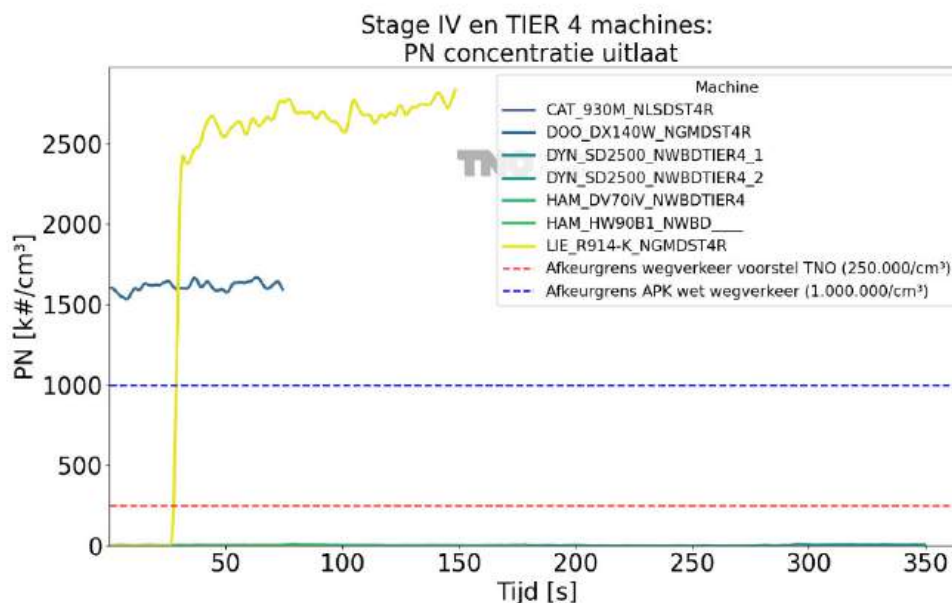


Figuur 2.3: Gemiddelde PN-concentraties van de gemeten Stage V-machines.

2.4.2 Stage IV en TIER 4 machines

Naast de Stage V machines zijn er ook Stage IV en Tier 4 machines gemeten. Mobiele machines kunnen aan stage IV en TIER 4 wetgeving voldoen zonder gesloten roetfilter [1]. Mogelijk is er wel een halfopen-roetfilter geplaatst. Deze zijn echter minder efficiënt dan een gesloten roetfilter.

Figuur 2.4 laat zien dat de uitstoot van twee stage IV machines boven de APK afkeurgrens van het wegverkeer ligt. De TIER 4 machines gemeten in dit meetprogramma blijven echter ver onder de voorgestelde 250.000 deeltjes/cm³.



Figuur 2.4: PN-concentraties [k#/cm³] als functie van de tijd voor de gemeten Stage IV machines.

Bovenstaande resultaten laten duidelijk zien dat machines met een goedwerkend gesloten roetfilter lage deeltjesaantallen uitstoten, meestal ruim onder de 250.000 deeltjes per cm³. Machines waar geen roetfilter op geïnstalleerd is, of waarbij het roetfilter mogelijk defect is (DX235L) vallen direct op na een korte meting.

Naast de hier gedocumenteerde meetresultaten zijn er ook meerdere machines gemeten zonder roetfilter. De deeltjesaantallen voor de machines zonder roetfilters kwamen direct op waarden boven het maximale meetbereik van de APK-deeltjesteller (5 miljoen deeltjes/cm³). Metingen met meer geavanceerde apparatuur (TSI NPET) aan machines zonder roetfilter, lieten zien dat de deeltjesaantallen in sommige gevallen wel kon oplopen tot boven de 20 miljoen/cm³.

De afkeurgrens van 250.000 deeltjes per cm³ lijkt ook voor mobiele werktuigen geschikt als afkeurgrens.

2.5 Meetinstructies voor deeltjesaantallentest

De meetinstructies voor deze test zijn eenvoudig, en kunnen gelijkgesteld worden aan de instructies voor APK-deeltjesaantallentest voor het wegverkeer.

In TNO rapport 2020 R10006 (januari 2020) is de procedure als volgt beschreven:

1. optioneel: opwarmen van de motor en eventueel afsluiten EGR-klep.
2. start deeltjesaantallen meting bij stationair toerental in de uitlaat.
3. minimaal 15 seconden de meetwaarden laten stabiliseren tijdens meting in de uitlaat
4. vervolgens nog minimaal 15 seconden blijven meten.

De gemiddelde waarde van meting vanuit Stap 4 dient onder de limietwaarde te liggen.

Als voorstel voor de limietwaarde wordt 250.000 deeltjes per cm^3 aangehouden. Indien de waarde boven de afkeurgrens komt, kan de test herhaald worden.

Voorafgaand aan de herhalende test kan specifiek gelet worden op de onderstaande condities:

1. warme motor (koelwater boven de 70 graden Celsius).
2. dichte EGR-klep (indien mogelijk en van toepassing).
3. voorkomen dat er een roetfilter-regeneratie bezig is.

In het voorstel van het hierboven genoemde TNO-rapport is ook nog een versnelde afkeur bepaald, namelijk wanneer de deeltjesaantallen tijdens de stabilisatiefase hoger dan twee keer de limietwaarde zijn. Om de test, en testinstructies, zo eenvoudig mogelijk te houden, wordt voorgesteld om dat criterium hier niet over te nemen.

Qua meetapparatuur kan in de basis dezelfde apparatuur worden gebruikt als bij het wegverkeer. Echter kennen bouwmachines wel extra uitdagingen ten opzichte van wegvoertuigen, met name rondom de uitlaathoogtes (zie paragraaf 2.3).

Toevoegingen op de bestaande apparatuur zijn wenselijk, zoals:

1. een eigen inwendige stroomvoorziening,
2. een langere verwarmde leiding,
3. een ombouw die geschikt is voor het werk op de bouwplaats.

Daarnaast is het belangrijk om voldoende aandacht te hebben voor veiligheid bij het werken op hoogte.

2.6 Controle roetfilter als methode om Stage-norm vast te stellen

Machines met een goedwerkend gesloten roetfilter zullen de hierboven beschreven test succesvol doorstaan. Hiermee kan worden vastgesteld dat een goedwerkend gesloten roetfilter is gemonteerd. Machines met een gesloten roetfilter zullen in de meeste gevallen een Stage V machine zijn met een motorvermogen tussen de 19 en 560 kW. In sommige gevallen kan dit ook een Stage IV of Stage IIIB motor zijn. Met de combinatie van bouwjaar (te zien aan het typeplaatje op de buitenkant van de machine) en de roetfiltertest kan met redelijke zekerheid bepaald worden of het om een Stage IIIB, IV of Stage V machine gaat.

De minimumeis die per 1 januari 2025 in de routekaart is opgenomen voor schone dieselmotoren tussen de 56 en 560 kW is "Stage IV + gesloten roetfilter".

Dat zijn machines uit het jaar 2014 of later. Om te bepalen of aan deze eis voldaan wordt, kan in de meeste gevallen worden voldaan met check op het bouwjaar en motorvermogen, en een geldige roetfiltertest. In uitzonderlijke gevallen kan het dan nog om een Stage IIIB-machine gaan die in de overgangsperiode geleverd is. Het zal geregeld voorkomen dat Stage IV machines niet aan de roetfiltertest voldoen (omdat deze simpelweg fabriek-af niet geïnstalleerd is).

Door ook de NO_x-test (voor een check van de SCR-katalysator) toe te voegen (zie volgend hoofdstuk), is een check van het bouwjaar en motorvermogen niet meer nodig. In dat geval volstaat een geldige roetfilter- en SCR-check.

3 Controle werking SCR

Dit hoofdstuk gaat in op een controletest voor de juiste werking van de SCR (katalysator voor NO_x-reductie). Een SCR-katalysator is (af-fabriek) geïnstalleerd bij Stage IV en V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW. Als de SCR niet functioneert, bijvoorbeeld vanwege een defect, kan de NO_x-emissie zomaar 10 keer zo hoog zijn, daarom is de controle op juiste werking belangrijk. De controle van de SCR gebeurt middels een korte test waarbij ter plekke de NO_x-concentraties in de uitlaat worden gemeten.

Het voordeel van deze 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.

Dit hoofdstuk begint met een overzicht van de gemeten machines, de toegepaste meetmethode en de bij de metingen toegepaste apparatuur. Daarna worden de resultaten beschreven. Hierbij wordt er gekeken naar de relatie tussen de gemeten NO_x-concentraties en de uitlaatgastemperatuur. De uitlaatgastemperatuur is relevant, omdat de SCR alleen effectief NO_x reduceert bij een voldoende hoge uitlaatgastemperatuur. Vervolgens worden de op de bouwplaats opgedane praktijkervaringen met deze metingen beschreven. Tot slot worden ook meetinstructies gegeven, inclusief een voorstel voor grenswaarden.

3.1 Overzicht gemeten machines met SCR

In de onderstaande Tabel 3.1 zijn de 16 machines benoemd waaraan de SCR-test is uitgevoerd. Het gaat hierbij om uiteenlopende machines, zoals graafmachines, gensets en wielladers. De focus bij de selectie waren vanzelfsprekend machines met een SCR. In de meeste gevallen zijn het Stage V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW, maar dit kunnen ook Stage IV machines binnen dezelfde vermogenscategorie zijn.

Tabel 3.1: Machines waarbij SCR-testen uitgevoerd zijn

Machine naam	Type	Producent	Model	Vermogen (kW)	Emissieklasse
ATL_XAS188_01_NSTDNRE5	Lucht compressor	Atlas Copco	XAS 188-14	104	V (NRE-c-5)
ATL_XAS188_02_NSTDNRE5	Lucht compressor	Atlas Copco	XAS 188-14	104	V (NRE-c-5)
DOO_G100_NSTDNRE5	Generator	Doosan	G100	80	V (NRE-c-5)
EUR_100TDE_NSTDNRE5	Generator	Europower generators	EPSR100TDE-5	83.2	V (NRE-c-5)
DOO_DX140W_NGMDST4R	Mobiele graafmachine	Doosan	DX140W-5	102.2	IV
ATL_140W_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Atlas GmbH	140W	90	V (NRE-v-5)
ATL_185W_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Atlas GmbH	185W	129	V (NRE-c-5)
DOO_DX235L_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine (rups)	Doosan	DX235LC-7	129	V (NRE-v-5)
HIT_ZX135U_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine (rups)	Hitachi	ZX135US-7	74	V (NRE-v-5)
HIT_ZX140W_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Hitachi	ZX140W-6	105	V (NRE-v-5)
HYU_HW150A_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Hyundai	HW150Acr	129	V (NRE-v-5)
LIE_A916CO_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Liebherr	A916 Compact	110	V (NRE-v-5)
LIE_A914LI_NGMDST4R	Mobiele graafmachine	Liebherr	A914	105	IV

CAT_M314_NGMDNRE5	Mobiele graafmachine	Caterpillar	M314	100	V (NRE-v-5)
CAT_323_05_NGMDST4R	Mobiele graafmachine (rups)	Caterpillar	323	122	IV
FEN_722VAR_NTRDST4Q	Tractor	Fendt	722 Vario	168	IV

3.2 Meetmethode en apparatuur

Voor kortstondige NO_x-metingen heeft TNO een draagbaar emissiemeetsysteem ontwikkeld, ook wel de BOEMkit genoemd, zie Figuur 3.1. De BOEMkit werkt met een automotive NO_x-O₂ sensor. Naast deze sensor, voor de emissiemeting, is ook een temperatuursensor aanwezig voor het monitoren van de uitlaatgastemperatuur. Het systeem heeft een eigen stroomvoorziening. Een verbinding met de machine voor het uitlezen van motorparameters is mogelijk en daarnaast kan ook het toerental worden opgenomen. De laatste twee functies zijn niet vereist en niet altijd bij deze metingen toegepast (maar kunnen wel nuttig zijn). De, met een frequentie van 1 Hz, gemeten data wordt opgeslagen op de datalogger van de BOEMkit.

De BOEMkit kan naast de machine worden gezet, maar kan ook met zuignappen vastgezet worden op de machine. In het laatste geval kan de machine (meestal) in operatie blijven. Mocht dit niet mogelijk of nodig zijn dan wordt de machine in stilstaande conditie gemeten. Daarbij dient de SCR wel op bedrijfstemperatuur te zijn. Om de SCR op bedrijfstemperatuur te krijgen moet de motor voldoende belast worden. Dit kan bijvoorbeeld door met de machine te rijden of te graven. Tijdens deze meetcampagne is, waar mogelijk, geprobeerd om de SCR op bedrijfstemperatuur te krijgen. De metingen vonden echter plaats tijdens reguliere werktijden, waardoor er niet altijd de mogelijkheid was tot (voldoende) opwarmen van de SCR (indien temperatuur niet voldoende was tijdens normale inzet). In de meeste gevallen is de apparatuur op de machine bevestigd. In enkele gevallen is de meting bij een stilstaande machine uitgevoerd, met de apparatuur naast de machine.



Figuur 3.1: De TNO BOEMkit, geïnstalleerd op een machine met zuignappen.

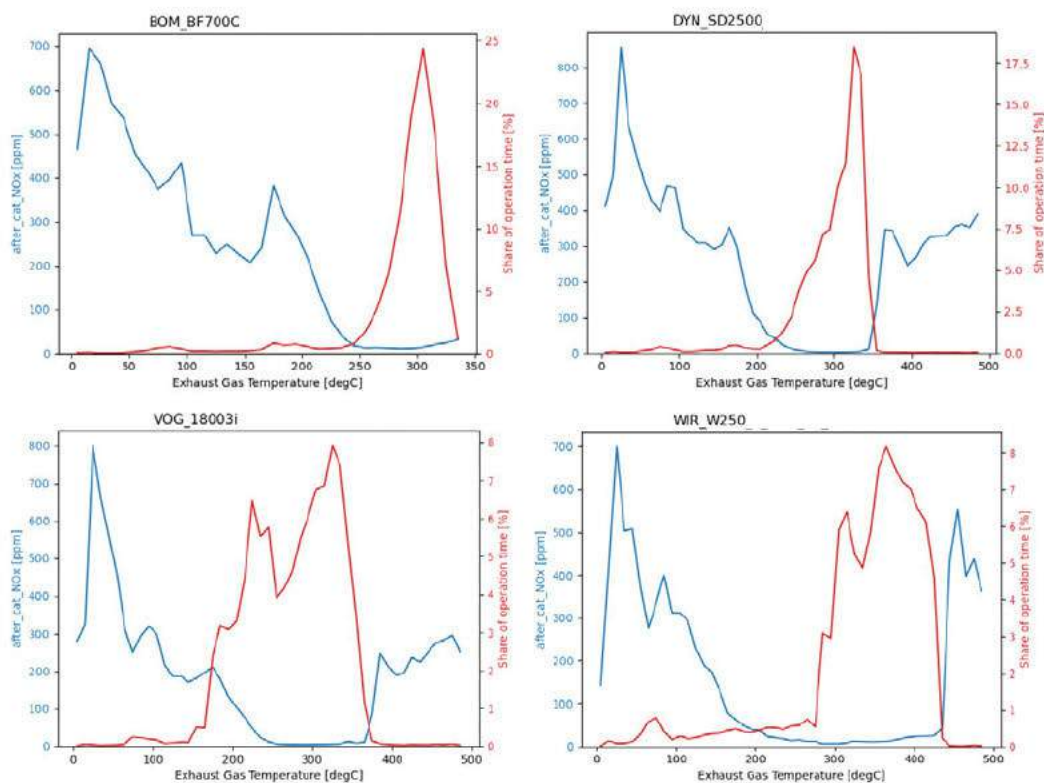
3.3 Gemeten NO_x-concentraties als functie van uitlaatgastemperatuur

Voor machines met een SCR-katalysator kan op basis van de NO_x-concentratie (ppm) duidelijk worden of de SCR wel of niet functioneert. Naast deze korte testen is tussen de jaren 2022 en 2024 door TNO ook emissie monitoring uitgevoerd aan diverse machines. In de volgende paragraaf zijn enkele emissie monitoringsresultaten gepresenteerd om de werking van de SCR inzichtelijk te maken. In de paragraaf daarna volgen de resultaten van de korte testen.

3.3.1 NO_x-concentraties tijdens emissie monitoring

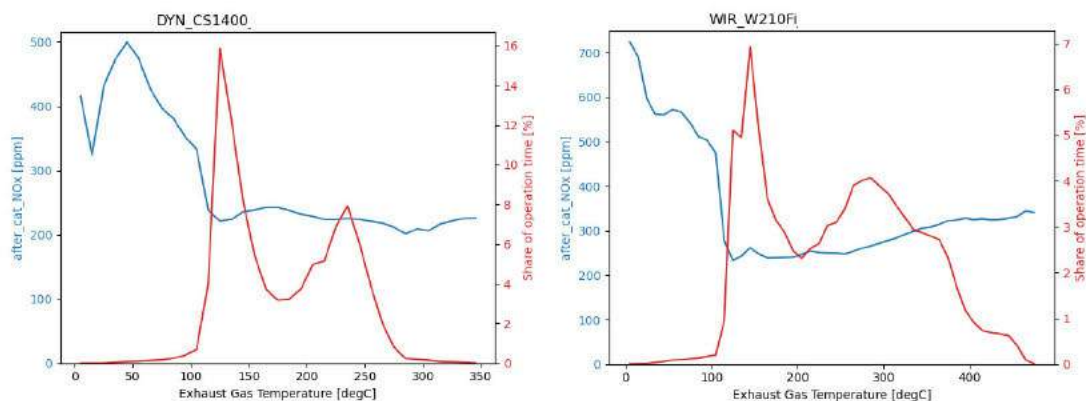
Voor emissie monitoring worden zowel een NO_x-O₂ sensor als een temperatuursensor voor langere tijd in de uitlaat gemonteerd. De absolute temperatuur is per machine niet volledig te vergelijken omdat de temperatuursensor niet altijd op dezelfde plaats is of kon worden gemonteerd. Hoe verder van de motor, hoe lager de temperatuur. Het blijft echter een goede indicatie van de uitlaatgastemperatuur.

Figuur 3.2 geeft voor vier Stage V machines met een SCR-katalysator de NO_x-concentratie (blauwe lijn) en het tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur weer. Vanaf 180 graden Celsius is een sterk dalende lijn in de NO_x-concentratie waarneembaar. Rond de 250 graden Celsius is de NO_x-concentratie gedaald naar waarden onder de 10 ppm, de SCR-katalysator werkt dan optimaal. Boven de 350 graden Celsius stijgt de NO_x-concentratie weer. Dat is hoogstwaarschijnlijk het gevolg van roetfilterregeneraties, deze gebeuren bij hoge uitlaatgastemperaturen (met een beperkt tijdsaandeel).



Figuur 3.2: NO_x-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor vier Stage V machines met een SCR-katalysator.

Figuur 3.3 geeft voor de twee Stage V machines zonder SCR-katalysator de NO_x-concentratie (blauwe lijn) en het tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur weer. Tot 100 graden Celsius is een sterk dalende lijn in de NO_x-concentratie waarneembaar. Rond de 100 graden Celsius is de variatie in NO_x-concentratie beperkt, waarden onder 200 ppm komen nauwelijks voor.



Figuur 3.3: NO_x-concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor twee Stage V machines zonder een SCR-katalysator.

Machines met functionerende SCR-katalysator zijn vanuit de NO_x-concentraties op basis van de externe (zelf gemonteerde) NO_x-sensor eenvoudig te herkennen. Bij een niet-functionerende SCR-katalysator blijven de NO_x-concentraties veelal boven de 200 ppm, terwijl een goedwerkende SCR-katalysator concentraties van onder de 10 ppm laat zien.

3.3.2 NO_x-concentraties tijdens de korte testen

De figuren in de voorgaande paragraaf zijn gebaseerd op honderden uren aan monitoringsdata, waardoor de NO_x-concentraties over het gehele temperatuurbereik inzichtelijk worden gemaakt. Tijdens de SCR-test is het van belang dat de SCR op bedrijfstemperatuur is of komt. Dat is niet bij elke machine eenvoudig te realiseren, zie hiervoor de volgende paragraaf. Zoals beschreven in paragraaf 3.2 is tijdens de meetcampagne geprobeerd om aan machines te meten met een SCR op bedrijfstemperatuur, maar was dit niet altijd mogelijk.

Figuur 3.4 geeft de NO_x concentraties als functie van de uitlaatgastemperatuur van de 16 mobiele werktuigen zoals gemeten tijdens de korte SCR testen. Hierbij dient opgemerkt te worden dat de uitlaatgastemperatuur aan het einde van de uitlaatpijp is gemeten. Hierdoor is de gemeten temperatuur lager dan de daadwerkelijke SCR temperatuur. Typische NO_x concentraties bij koud uitlaatgas, liggen bij de gemeten machines grofweg tussen de 100 en 600 ppm. Bij temperaturen boven de 175 graden Celsius liggen de NO_x-concentraties meestal onder de 50 ppm, dat geeft aan dat SCR hoogstwaarschijnlijk NO_x aan het reduceren is.

Er zijn diverse machines waarbij de NO_x-concentraties relatief hoog blijven gedurende de gehele meting. De “DOO_G100_NSTDNRE5”, een genset, kon niet actief belast worden. Deze is daarom alleen op het lastpunt gemeten waarop deze tijdens de meetdag werd ingezet, dat was een belasting van ca. 13%, ten behoeve van stroomvoorziening van de bouwkeet. Met een uitlaatgastemperatuur van 60 graden was dat duidelijk een te lage belasting om een actieve SCR te verkrijgen. De NO_x-concentraties bleven daarom net boven de 100 ppm. De andere stationaire machines (luchtcompressoren en gensets) bleven wel onder de 50 ppm.

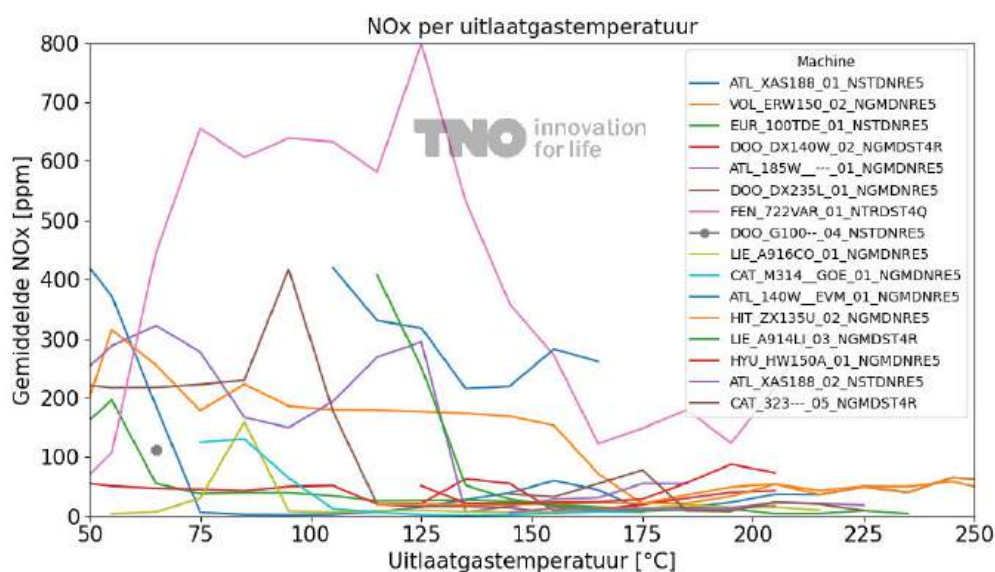
De gemeten NO_x-concentraties van “ATL_140W_NGMDNRE5”, een mobiele graafmachine, zijn tijdens de meeting niet onder de 200 ppm NO_x gekomen.

Tijdens de meetdag waren er alleen wat lichte bestratingswerkzaamheden, waardoor een motor met 90 kW aan vermogen niet voldoende belast kon worden voor een actieve SCR. Dit was de enige mobiele graafmachine op wielen waarbij het belasten niet is gelukt. Met alleen rijden kan de machine op temperatuur komen, maar dat was met deze “ATL_140W_NGMDNRE5” tijdens de meting niet mogelijk.

De “FEN_722VAR_NTRDST4Q”, een Stage IV tractor, liet wel een forse NO_x-reductie zien naarmate de uitlaatgastemperatuur toenam, van 600 ppm naar ca. 100 ppm. In Figuur 3.4 is de gemiddelde NO_x-concentratie als functie van de uitlaatgastemperatuur inzichtelijk gemaakt. Wanneer de data van de tractor echter in meer detail wordt bekeken, blijkt de NO_x-concentratie wel onder de 50 ppm te komen. Bij een hogere motorbelasting stijgt deze echter weer boven de 200 ppm. De SCR lijkt daarom wel te functioneren, maar niet optimaal. De SCR van de tractor kwam op bedrijfstemperatuur door te rijden op de openbare weg.

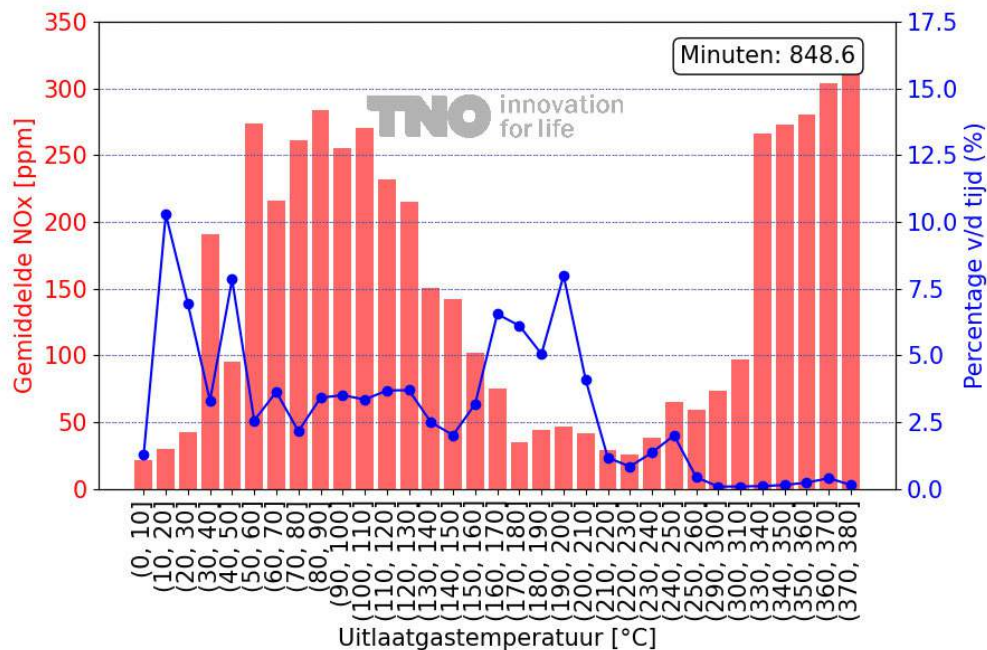
Een van de graafmachines is naast de machine gemeten (stilstaande conditie) nadat deze was opgewarmd, hiermee kon de test succesvol worden voltooid.

Hiermee zijn er twee van de 16 machines die tijdens de test niet onder de 50 ppm NO_x zijn gekomen. Er was ook een machine die bij hogere uitlaatgastemperaturen weer toenemende NO_x-concentraties liet zien, hierbij liep de temperatuur op tot boven de 350 graden Celsius. De NO_x-concentraties gingen van ca. 25 ppm naar boven de 300 ppm. Dit kwam omdat tijdens de meting een roetfilterregeneratie plaatsvond.



Figuur 3.4: De gemiddelde NO_x uitstoot als functie van de uitlaatgastemperatuur van 16 mobiele werktuigen, als resultaat van een kortstondige meting.

Figuur 3.5 geeft de gemiddelde NO_x-uitstoot als functie van de uitlaatgastemperatuur van alle 16 gemeten mobiele werktuigen bij elkaar, inclusief het aandeel van de tijd per temperatuur bin (blauwe lijn). In dit figuur is duidelijk te zien dat de gemiddelde NO_x-concentraties onder de 50 ppm liggen in het juiste temperatuurbereik.



Figuur 3.5: De gemiddelde NO_x uitstoot als functie van de uitlaatgastemperatuur van alle gemeten mobiele werktuigen bij elkaar, inclusief het aandeel van de tijd per temperatuur bin (blauwe lijn).

3.4 Praktijkervaringen op de bouwplaats met de SCR-test

Ook de kortstondige metingen voor de controle van het SCR systeem zijn grotendeels uitgevoerd op de bouwplaats tijdens normaal gebruik. Een enkele meting is uitgevoerd op het terrein van een aannemersbedrijf of op een machine van een verhuurbedrijf.

Bij deze metingen is de eerder benoemde BOEMkit in de meeste gevallen geplaatst op de machine tijdens normaal gebruik. Hiervoor moet de machine een kleine 10 minuten stilstaan zodat het systeem gemonteerd kan worden. Bij de meeste machines kan de apparatuur gemakkelijk op de motorkap of bovenop worden geplaatst. Bijvoorbeeld bij graafmachines kan gemakkelijk via de machine naar boven worden geklommen om de apparatuur te installeren of kan een ladder worden gebruikt. Ook bij stationaire machines is dit geen probleem. Bij sommige machines, zoals een tractor en een asfalteermachine, is de uitlaat zodanig geplaatst dat het moeite kost om de apparatuur op een degelijke manier te monteren. Tijdens het meetprogramma zijn er ook metingen uitgevoerd zonder de apparatuur te monteren, maar door deze naast de machine te plaatsen. Dit is goed werkbaar, mits de SCR op temperatuur is en de meting direct kan plaatsvinden.

De grootste uitdaging bij deze metingen is het op temperatuur krijgen van de SCR, mits dit niet al gebeurt tijdens de reguliere werkzaamheden. Voor machines die kunnen rijden, is rijden vaak voldoende motorbelasting om de SCR op temperatuur te krijgen, al moet dit wel op een veilige manier kunnen op de bouwplaats of op de openbare weg (binnen de bebouwde kom wil je dit bijvoorbeeld zoveel mogelijk vermijden). Een andere manier is bijvoorbeeld door intensief grondverzet. Voor stationair materieel, zoals gensets, kan het een grotere uitdaging zijn om de SCR op temperatuur te krijgen als er weinig vermogen wordt gevraagd.

3.5 Meetinstructies SCR-test

De meetinstructies voor de SCR test zijn complexer dan die voor de deeltjesaantallentest, met name omdat de SCR een voldoende hoge temperatuur dient te hebben.

De onderstaande stappen kunnen gevolgd worden om de test zo effectief mogelijk uit te voeren:

1. zet meetapparatuur klaar naast de machine.
2. machine gedurende ca. 10 minuten opwarmen met voldoende motorlast (boven de 20%).
3. start NO_x-meting bij stationair toerental in de uitlaat.
4. minimaal 15 seconden de meetwaarden laten stabiliseren tijdens meting in de uitlaat.
5. vervolgens nog minimaal 15 seconden blijven meten.

De gemiddelde waarde van de meting uit Stap 5 dient onder de limietwaarde te liggen.

Als eerste voorstel voor de limietwaarde wordt 50 ppm NO_x aangehouden. Indien de waarde boven de afkeurgrens komt, kan de test herhaald worden.

Voorafgaand aan de herhalende test kan specifiek gelet worden op de onderstaande condities:

- warme motor (uitlaatgas boven de 175 graden Celsius).
- voorkomen dat er tijdens de meting een roetfilterregeneratie plaatsvindt.

Indien de waarden nog steeds boven de afkeurlimiet zijn, dan wordt aanbevolen om de apparatuur op de machine te plaatsen, en de data te loggen tijdens inzet met voldoende motorbelasting voor ca. 30 minuten. Het wordt hierbij aanbevolen om ook de uitlaatgastemperatuur mee te meten. Dit is nodig om te bepalen of de SCR wel of niet op bedrijfstemperatuur is gekomen.

De BOEMkit is in eigen beheer van TNO, en voor deze toepassing, ontwikkeld. Een aanpassing aan de apparatuur, zoals een extra langere meetsonde, kan de plaatsing van de apparatuur makkelijker maken bij bepaalde machines met hoog geplaatste uitlaten. Mobiele apparatuur om NO_x-concentraties te meten is ook commercieel verkrijgbaar. Dergelijke apparatuur is doorgaans echter niet bedoeld om (kortstondig en snel) op machines te monteren.

Daarnaast is het belangrijk om voldoende aandacht te hebben voor veiligheid bij het werken op hoogte. Aanvullend is belangrijk dat het op temperatuur brengen van de SCR op een veilige manier gebeurt, met voldoende aandacht voor de omgeving.

4 Fijnstof-emissiemonitoring

In dit hoofdstuk wordt de monitoring van fijnstofemissies besproken.

Als achtergrondinformatie wordt eerst een korte toelichting gegeven over roetfilters, en de bijdrage aan emissies door machines zonder roetfilter. Daarna volgen de resultaten van de drukmonitoring bij machines met roetfilter, evenals een korte analyse van de effectiviteit van de geteste opsteekfilters.

4.1 Roetfiltertechniek

Bij de verbranding van diesel in motoren ontstaan roetdeeltjes. Deze roetdeeltjes worden via de uitlaat in de omgeving uitgestoten. Roetdeeltjes hebben een negatief effect op de gezondheid van mensen, omdat ze via de longen in het menselijk lichaam terecht kunnen komen. Om de uitstoot van roetdeeltjes door verbrandingsmotoren terug te dringen, zijn moderne motoren vaak uitgerust met een roetfilter. Roetfilters zijn zeer effectief: een goed werkend filter vermindert de uitstoot van roet met 95 tot 99%.

Een roetfilter wordt achter de motor in de uitlaat geplaatst en vangt daar de deeltjes op. Het filter laat de uitlaatgassen door, maar vangt de roetdeeltjes op. Er bestaan twee typen roetfilters: gesloten roetfilters en half-open roetfilters. Ook kunnen roetfilters achteraf worden gemonteerd, dit wordt “retrofit” genoemd.

Alle moderne dieselauto's en (diesel) vrachtwagens hebben af-fabriek een gesloten roetfilter. Voor mobiele machines is dat afhankelijk van het motorvermogen. Alle Stage V machines met een motorvermogen tussen de 19 en 560 kW hebben een gesloten roetfilter. Mogelijk zijn half-open filters toegepast op sommige Stage IIIB en Stage IV machines (vanwege de mildere eisen), al is hier geen onderzoek naar gedaan.

4.1.1 Impact van roetfilters op emissies van mobiele werktuigen

Wanneer de gezamenlijke fijnstofuitstoot van Stage V machines in Nederland wordt bekeken, dan is 55% van de totale uitstoot afkomstig van machines onder de 19 kW (zonder roetfilter). Dit terwijl de bijdrage aan de CO₂-uitstoot en het totale energiegebruik slechts 4% is binnen de totale Stage V groep.

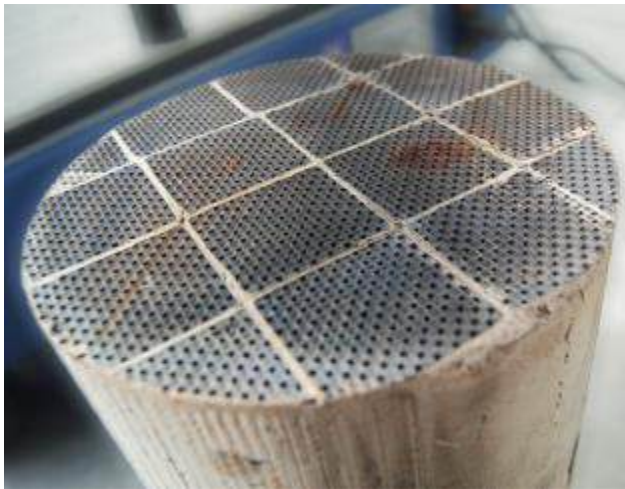
Het grootste deel van alle fijnstofuitstoot van mobiele werktuigen in Nederland is echter afkomstig van oudere machines. Stage IIIA en ouder zorgen voor 75% van de fijnstofuitstoot, terwijl dezelfde groep zorgt voor slechts 17% van de CO₂-uitstoot en het energiegebruik.

4.1.2 Gesloten roetfilter

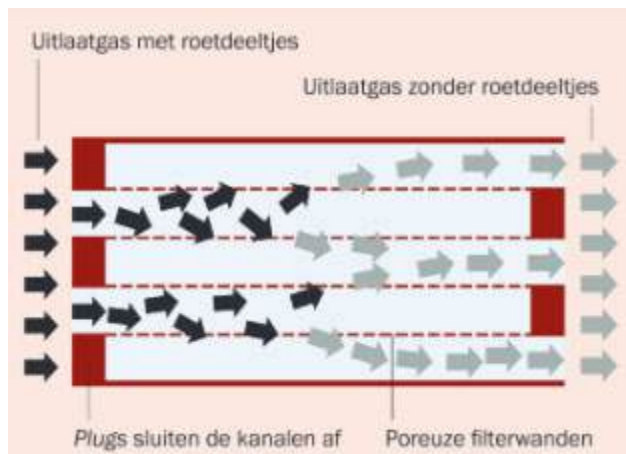
Gesloten roetfilters bestaan uit poreus keramisch materiaal met daarin kanalen die allemaal aan één zijde zijn afgesloten, zie Figuur 4.1 en Figuur 4.2. Hierdoor stromen alle

uitlaatgassen door de poreuze filterwanden. De roetdeeltjes worden tegengehouden door de wanden van de poriën van het filtermateriaal.

Omdat alle uitlaatgassen worden gefilterd, zijn gesloten roetfilters zeer effectief. De afgevangen deeltjes zorgen ervoor dat het filter steeds voller wordt en er vormt zich over tijd tevens een 'cake layer' op het oppervlak van het roetfilter waaraan roetdeeltjes blijven plakken en waarmee de filterefficiëntie toeneemt. Omdat het filter steeds voller wordt moet bij een gesloten roetfilter het opgevangen roet periodiek worden verbrand, dat wordt actieve regeneratie genoemd. Bij een actieve regeneratie wordt extra brandstof in het uitlaatgas ingespoten, die tot ontbranding komt. Zo wordt de temperatuur van het uitlaatgas verhoogd en worden de roetdeeltjes in het roetfilter verbrand.



Figuur 4.1: Ingezoomd beeld van het roetfilter: de kanalen zijn duidelijk te zien (foto: TNO)



Figuur 4.2: De schematische tekening laat zien dat een roetfilter is opgebouwd uit vele afgesloten kanalen. Door deze afsluitingen, ook wel plugs genoemd, kunnen de uitlaatgassen alleen door de filterwanden naar buiten stromen. De roetdeeltjes blijven 'plakken' in de filterwand.

4.1.3 Halfopen roetfilters

Het halfopen roetfilter laat altijd een deel van de uitlaatgassen ongefilterd door. Hierdoor ligt het rendement van een halfopen roetfilter met circa 30%, en vaak minder, een stuk lager dan dat van een gesloten roetfilter. Bij halfopen filters treedt alleen passieve regeneratie op.

Van actieve regeneratie is geen sprake en aansturing door het motormanagement is daarom evenmin noodzakelijk.

4.1.4 Retrofit roetfilters

Men kan overwegen om fijnstof emissies van dieselmotoren te verbeteren via retrofit, ofwel het achteraf installeren van een roetfilter. Retrofitoplossingen zijn met name relevant voor motoren die nog langdurig worden ingezet, veel draaiuren maken en waarbij de kosten van een retrofitsysteem redelijk zijn in verhouding tot de totale machinekosten. Bij retrofit is extra aandacht nodig voor de regeneratie van het roetfilter. Bij retrofit moet er niet alleen gekeken worden naar het aanbrengen van het roetfilter in het uitlaatsysteem, maar ook het toevoegen van bijbehorende sensoriek en het actief kunnen sturen op basis van signaalwaarden. Met name bij dieselmotoren is het belangrijk dat de vullingsgraad van het roetfilter gemonitord wordt en dat een actieve regeneratie plaats kan vinden voordat het filter verzadigd is. Bij af-fabriek roetfilters is dit mogelijk door bijvoorbeeld de motor in een speciale modus te laten draaien, echter toegang tot de aansturing van de motor is in geval van retrofit geen gegeven.

Er zijn ook (keramische) roetfilters verkrijgbaar die niet actief regenereren, maar alleen passief regenereren. Dat wil zeggen dat de uitlaatgastemperatuur voldoende hoog is voor regeneraties. De toepassing dient hier echter wel geschikt voor te zijn.

Een meer eenvoudige manier van roetfiltertechniek zijn zogenaamde opsteekfilters. Deze filters worden achter of in de bestaande uitlaat geplaatst. De filterelementen zijn van papier en vervangbaar. Het filterhuis kan eenvoudig geopend worden om een nieuw filterelement te plaatsen. Het vervangen van het filter wordt gedaan wanneer de tegendruk in de uitlaat tegen de grenswaarde aanloopt.

4.2 Experiment met opsteekfilters en drukmonitoring

Om te controleren of een roetfilter nog steeds aanwezig is, kan drukmonitoring worden toegepast. In deze studie is geëxperimenteerd met een opsteekfilter in combinatie met drukmonitoring. Het opsteekfilter is gemonteerd op een bronbemaalingspomp, zie Figuur 4.3. De pomp draait 24 uur per dag op een continue motorbelasting.



Figuur 4.3: Geplaatst opsteekfilter in bijbehorende behuizing.

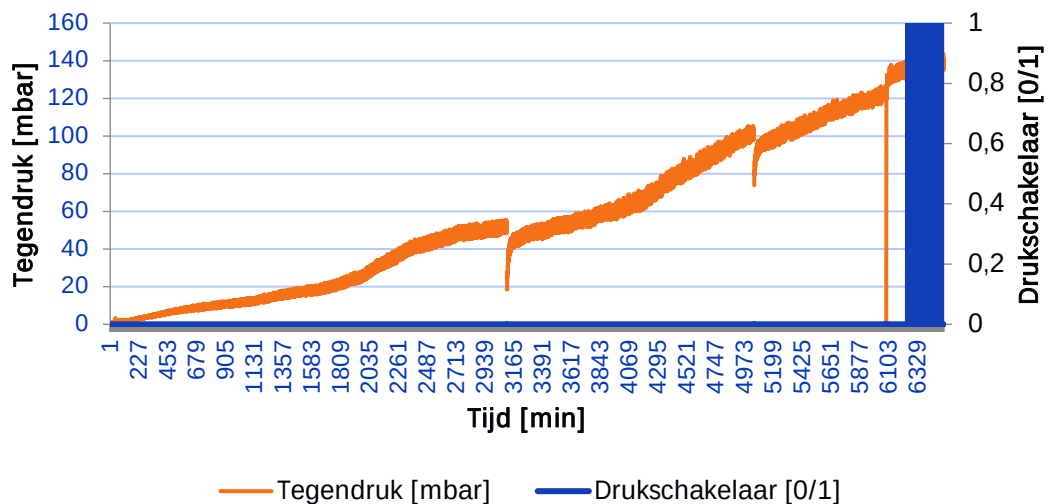
4.2.1 Drukmonitoring

Ten behoeve van de drukmonitoring is een druksensor geplaatst voor het roetfilter en verbonden met een TNO SEMS datalogger (zie hoofdstuk 5.1 voor een toelichting over SEMS). SEMS is onder andere voorzien van GSM 4G connectiviteit. Het systeem stuurt daarmee de ingewonnen gegevens meerdere keren per dag naar een database van TNO. Hiermee kan in dit geval de gemeten (relatieve) druk op afstand worden gemonitord.

Bij het opsteekfilter is een drukschakelaar meegeleverd. Deze bepaalt wanneer het filter vervangen dient worden op basis van de opgebouwde tegendruk. Vanuit TNO is geëxperimenteerd bij welke (relatieve) tegendruk de drukschakelaar werd geactiveerd, dit was bij ca. 130 mbar. Naast het signaal van de druksensor is ook het signaal van de drukschakelaar gelogd, zodat er dubbele check was voor de benodigde filterwissel. Wanneer de betreffende tegendruk werd bereikt, en de drukschakelaar een signaal gaf, werd het filter door TNO gewisseld. Dit is gedaan met drie filters.

Figuur 4.4 geeft van één filter het drukverloop tijdens de monitoringsperiode weer. De oranje lijn geeft de tegendruk voor het roetfilter weer. De blauwe balk geeft weer wanneer de drukschakelaar het signaal gaf dat het roetfilter verzadigd was. In dit geval was dat na ca. 100 uur. In de oranje lijn zitten enkele dips, deze hebben te maken met het herstarten van de SEMS datalogger.

De drukmonitoring laat duidelijk zien dat er een roetfilter aanwezig is vanwege de aanwezige en steeds verder oplopende tegendruk. Wanneer het roetfilter verwijderd is, vervalt de tegendruk (niet zichtbaar in figuur).



Figuur 4.4: Drukmonitoring van opsteekfilter bij bronbemalingspomp.

4.2.2 Effectiviteit opsteekfilters

De opsteekfilters zijn met name toegepast om te experimenteren met drukmonitoring. Aanvullend is met eenvoudige meettechnieken de effectiviteit van de opsteekfilters indicatief bepaald. Enerzijds is dat gedaan door een deeltjesaantaltest uit te voeren (met en zonder filter), en anderzijds door de geplaatste filters vooraf en achteraf te conditioneren en te wegen. Dit laatste is bij dit experiment niet onder nauwkeurige laboratorium-omstandigheden uitgevoerd, het resultaat van de weging is daarom indicatief.

De deeltjesaantallentest bij een bronbemalingspomp kon niet bij stationair toerental zonder motorbelasting worden uitgevoerd. De pomp was water aan het verpompen en draaide daarmee onder een bepaalde motorlast (vermoedelijk tussen de 30 en 50% last). De deeltjesaantallen zijn daarmee hoger dan tijdens stationair toerental zoals beschreven in hoofdstuk 2.

Zonder filter bedroegen de deeltjesaantallen ca. 35 miljoen per cm^3 . Na plaatsing van het filter is dit aantal reduceert tot ca. 250.000 bij een leeg filter en ca. 800.000 bij een vol filter. Dit is een reductie van meer dan 97%.

Qua gewicht is het filter in 100 uur ca. 160 tot 190 gram zwaarder geworden, dit betekent dat 1,6 tot 1,9 gram fijnstof per uur is afgevangen. Omgerekend in g/kWh zou dat ca. 0,5 tot 0,6 g/kWh aan fijnstof betekenen. De wettelijke limietwaarde voor deze categorie is 0,4 g/kWh tijdens de betreffende testcyclus.

Voor bronbemalingspompen lijkt de toepassing van opsteekfilters redelijk effectief in termen van emissiereductie, al reduceert een gesloten roetfilter meer. Bronbemalingspompen draaien in het algemeen echter 24 uur per dag, waardoor deze filters na ca. 4 tot 5 dagen vervangen dienen te worden. Dit is erg arbeidsintensief en ook prijzig. Opsteekfilters zijn daarom eerder relevant voor machines die minder draaiuren per dag maken.

5 NO_x-emissiemonitoring

Zoals in de inleiding van dit rapport beschreven was één van de doelen om verder onderzoek te doen naar machine-onafhankelijke NO_x-monitoring, zowel met de meest eenvoudige methodiek (NO_x/CO₂), als met de meer nauwkeurige methodiek (inclusief MAF). Dit hoofdstuk beschrijft de gebruikte methodiek en apparatuur voor het monitoren van NO_x-emissies, evenals de monitoringsresultaten uit 2024. Daarnaast wordt een theoretische onderbouwing gegeven voor het vertalen van een NO_x/CO₂-waarde in ppm/% naar een absolute NO_x-uitstoot.

5.1 Methodiek(en) en apparatuur emissiemonitoring

Deze paragraaf beschrijft de gebruikte apparatuur die is toegepast voor emissiemonitoring tijdens het project. Daarbij is gebruik gemaakt van een door TNO in de uitlaat aangebrachte NO_x-sensor, in combinatie met een door TNO ontwikkelde datalogger, deze wordt SEMS (Smart Emissions Measurement System) genoemd.

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_x-O₂ sensor (op basis van O₂ wordt CO₂ bepaald) wordt bij gebruik van SEMS in de uitlaat gemonteerd om de concentratieniveaus te meten met een logfrequentie van 1 Hz. Daarnaast kan het systeem verbonden worden met de 'CANbus' om machinedata te verkrijgen, o.a. om de gemeten concentraties (ppm) te vertalen naar massa (in grammen), zie hiervoor rapport TNO 2023 R10553. Om deze laatste stap machine-onafhankelijk te kunnen doen is in 2024 ook een 'mass-airflow' sensor (MAF) toegepast om de luchtstroom te meten. Hiermee kan het systeem zonder machine-signalen (CAN-bus) werken, deze signalen zijn namelijk niet altijd beschikbaar en ook de nauwkeurigheid daarvan wisselt.

SEMS is verder voorzien van een geïntegreerde GPS sensor, en GSM 4G connectiviteit. Ten behoeve van de installatie is vooraf bezichting 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.

Meer documentatie rondom SEMS toegepast in bouwmachines is terug te vinden in de EMPK rapportage van 2023: TNO 2023 R10553. SEMS kan ook vervangen worden door een universeel on-board emissiemonitoringsysteem.

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

- 1Hz log-frequentie;
- Lokale opslag ten behoeve van bufferen van meetdata;
- NO_x-O₂-sensor;
- 250 kbit CAN-bus met SAE J1939 protocol t.b.v. aansturen en uitlezen NO_x-sensor;⁷
- Achter schakelcontact of door middel van software gestuurde relaismodule:
 - 16-36 VDC voedingsspanning t.b.v. NO_x sensor⁵ (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;
- Optioneel: connectie met de CANbus en/of installatie van een MAF-sensor.

SEMS, inclusief een MAF-sensor, is in 2024 geïnstalleerd bij drie machines in dagelijks gebruik. Hierbij zijn praktijkervaringen opgebouwd met de praktische toepasbaarheid hiervan, met name bij grotere machines. De inlaattrajecten van grotere mobiele machines hebben een dusdanig grote diameter, dat er soms geen geschikte commercieel verkrijgbare MAF-sensor beschikbaar was. Daarom zijn de MAF-sensoren op alternatieve wijze geïnstalleerd.

Daarnaast zijn de mogelijkheden onderzocht voor het plaatsen van alléén een NO_x-sensor. Door de afwezigheid van MAF en/of machine-signalen kan de luchtstroom door de motor niet berekend worden. Hierdoor kan de stap naar absolute emissies (grammen) moeilijker gemaakt worden. Om deze reden is onderzocht wat de mogelijkheden zijn met de eerder genoemde NO_x/CO₂ ratio (met de NO_x sensor kan ook CO₂ bepaald worden). Hiervoor is het grootste deel van de met SEMS gemonitorde machines van de afgelopen drie jaar onderworpen aan een data-analyse.

5.2 Monitoringsresultaten 2024

In 2024 is SEMS geïnstalleerd bij drie rupsgraafmachines in het veld. Deze paragraaf beschrijft de monitoringsresultaten. Tabel 5.1 geeft een overzicht van de specificaties van de gemonitorde machines. De twee Volvo's zijn vergelijkbare modellen, waarvan eentje een Stage IV motor heeft en de andere een Stage V motor.

Tabel 5.1: Machines met SEMS-monitoring in 2024

Machine naam	Type	Producent	Model	Vermogen (kW)	Emissieklasse
CAT_323FL_NGMDST4R	Rupsgraafmachine	Caterpillar	323FL	122	IV
VOL_EC250E_NGMDNRE6	Rupsgraafmachine	Volvo	EC250EL	168	V (NRE-c-6)
VOL_EC250E_NGMDST4Q	Rupsgraafmachine	Volvo	EC250EL	160	IV

Tabel 5.2 geeft een overzicht van de monitoringsresultaten van deze machines. In totaal is de CAT 332 uur gemonitord en de Volvo's en 132 en 173 uur. De Stage V Volvo laat duidelijk de laagste NO_x-emissies zien van gemiddeld 0,10 g/kWh, tegenover 0,7 en 0,8 g/kWh voor de andere twee.

⁷ Bij gebruik van hetzelfde type NO_x-sensor

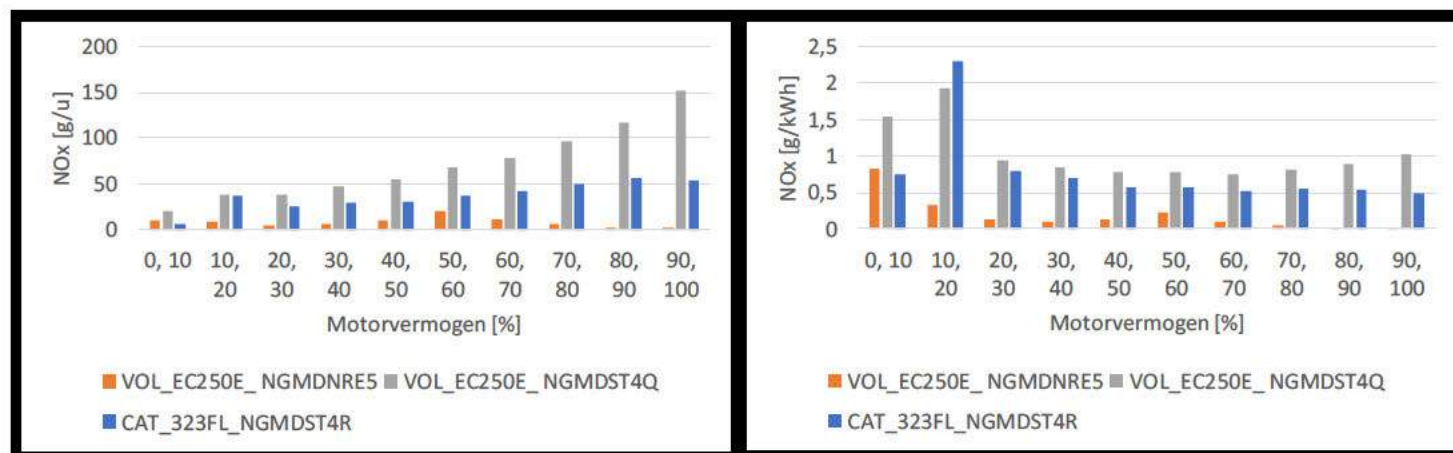
Ook boven de 20% motorbelasting is dezelfde trend zichtbaar, dit komt omdat alle drie de machines op een hoge motorbelasting ingezet worden. Met name het verschil tussen de twee Volvo's is opmerkelijk omdat dit hetzelfde type is, waarbij nagenoeg alleen de Stage-klasse verschilt. De wettelijke NO_x-emissielimietwaarde is immers gelijk voor Stage IV en V in deze vermogensklasse, namelijk 0,4 g/kWh. De NO_x-emissies van beide Stage IV machines zijn in de praktijk hoger dan de limietwaarde die geldt tijdens de wettelijke typegoedkeuringstest.

Ook in absolute emissies per uur (g/h) stoot de Stage V machine met 9 g/h veel minder NO_x uit dan de Stage IV modellen, die respectievelijk 43 en 64 g/h uitstoten tijdens de monitoringsperiode.

Tabel 5.2: Overzicht NO_x-monitoringsresultaten van drie rupsgraafmachines

	CAT_323FL_NGMDST4R	VOL_EC250E_NGMDNRE5	VOL_EC250E_NGMDST4Q
Monitoringsuren	332	132	173
NO _x avg g/kWh	0,7	0,10	0,8
NO _x avg g/kWh >20% power	0,5	0,09	0,8
NO _x avg g/h	43	9	64

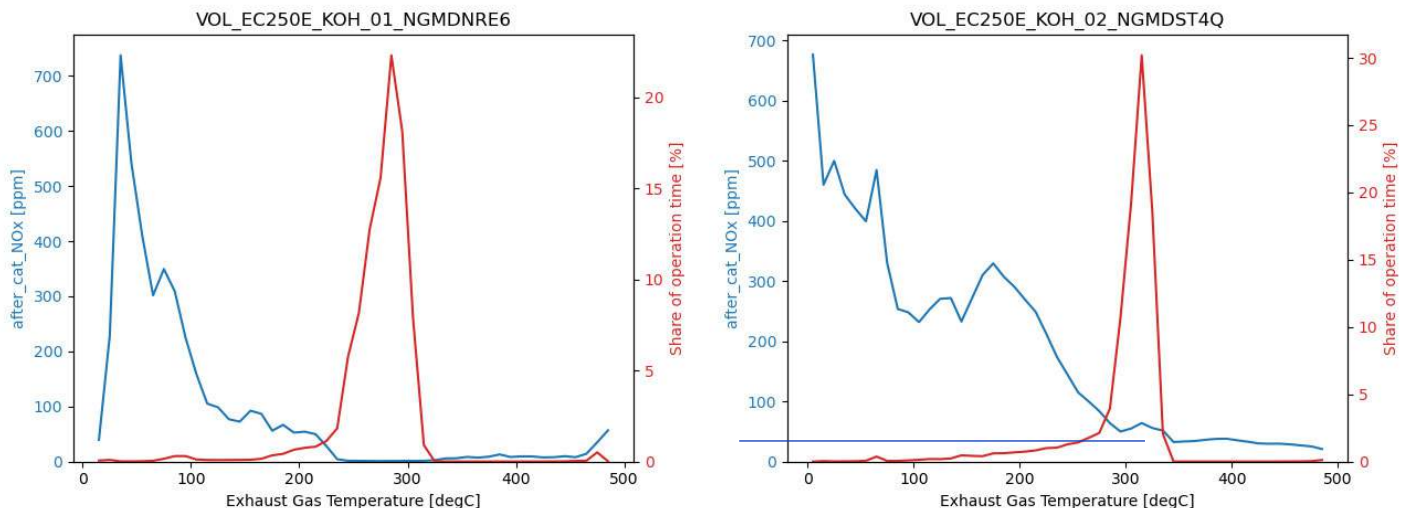
In Figuur 5.1 is hetzelfde beeld te herkennen, waarbij de emissies als functie van de motorbelasting zijn weergegeven. Bij elke motorlast heeft de Stage V veruit de laagste NO_x-emissies. In g/kWh zijn de NO_x-emissies van beide Stage IV machine relatief hoog, ook bij hogere motorlastpunten waarbij de temperatuur van de SCR geen probleem meer is.



Figuur 5.1: Links: NO_x-emissies in gram per uur als functie van de motorbelasting [%] voor de drie gemonitorde machines. Rechts: NO_x-emissies in gram per kWh als functie van de motorbelasting [%] voor de drie gemonitorde machines.

In Figuur 5.2 is de NO_x-concentratie (blauwe lijn) en het tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor de Volvo Stage V (links) en Volvo Stage IV (rechts) weergegeven. Beide machines worden ingezet bij een hoge uitlaatgastemperatuur, wat duidt op een hoge motorbelasting, en hiermee voldoende temperatuur voor een SCR-katalysator om effectief NO_x te kunnen reduceren.

De Stage V machine laat echter bij lagere temperaturen al forse reducties zien in de NO_x -concentraties, en vanaf 220 graden is de uitstoot zeer laag. Bij de Stage IV machine daalt de NO_x -concentratie pas bij hogere temperaturen, en dan blijft de concentratie alsnog relatief hoog (tussen de 25 en 50 ppm).



Figuur 5.2: NO_x -concentratie (blauwe lijn) en tijdsaandeel (rode lijn) als functie van de uitlaatgastemperatuur voor de Volvo Stage V (links) en Volvo Stage IV (rechts).

Meer onderzoek is nodig om te bepalen waar het verschil tussen de Stage IV en V machines vandaan komt. Mogelijk komt dit door veroudering. Een andere mogelijkheid zijn de aanvullende eisen in Stage V, zoals de “in-service-monitoring” (ISM). Bij ISM dient de fabrikant de emissies van enkele machines te monitoren, en deze te rapporteren aan de typekeuringsinstantie.

5.3 Ervaringen met plaatsing van eigen MAF-sensor

Bij de drie gemonitorde machines is een MAF-sensor geplaatst. Met deze methodiek zijn succesvol absolute emissies gemeten, onafhankelijk van machine-signalen. De inlaattrajecten van de machines waren echter te groot om een bestaande MAF-sensor direct te kunnen plaatsen.

Het plaatsen van de sensoren is daarom gedaan middels de volgende stappen:

- MAF-sensor aangeschaft.
- MAF-sensorelement uit bestaande behuizing gehaald.
- Montagegat in inlaattraject gemaakt.
- MAF-sensorelement direct in inlaattraject geplaatst.
- Kalibratie van deze MAF-sensor op de machine door middel van een externe MAF-sensor
 - o Kalibratie is nodig omdat het sensorelement uit zijn behuizing is gehaald en omdat plaatsing soms niet op de ideale locatie gedaan kon worden.
- Bij uitbouw is het inlaattraject gewisseld.
- Gedemonteerde inlaattraject met MAF-sensor is op TNO-locatie nogmaals gekalibreerd.

Zoals in de inleiding benoemd wordt dit deel van het onderzoek verder opgepakt samen met Connekt in het Kennis-, Opschaling- en Praktijkervaringsprogramma. In dat programma wordt gewerkt aan de opschaling van NO_x-monitoring, waaronder die met de toepassing van een MAF-sensor.

5.4 NO_x-monitoring op basis van NO_x/CO₂

Het monitoren van NO_x-emissies met behulp van SEMS, CANbus-signalen en eventueel een MAF-sensor is vanwege de complexiteit niet altijd een haalbare mogelijkheid. In deze paragraaf, en de volgende, worden de mogelijkheden beschreven om NO_x-emissies te monitoren door alleen een NO_x-sensor in de uitlaat te plaatsen. In deze paragraaf wordt een theoretische onderbouwing gegeven voor het vertalen van een NO_x/CO₂-waarde in ppm/% naar een NO_x-uitstoot in g/kWh.

Wanneer gebruik wordt gemaakt van het NO_x/CO₂-signaal voor NO_x-emissiemonitoring, zijn er verschillende theoretische benaderingen om dit te vertalen naar NO_x-emissies in g/kWh.

Eerst zijn een aantal omrekeningen en aannames nodig.

- **“1 liter diesel geeft 2630 gram CO₂.”** Deze aanname is licht afhankelijk van de dichtheid van diesel, ongeveer 832 g per liter, en de koolstofinhoud van ongeveer 86.1%.⁸
- **“1 liter diesel bevat 9,96 kWh aan energie.”** Deze aanname is licht afhankelijk van de dichtheid van diesel, ongeveer 832 g per liter, en chemische samenstelling van diesel.⁵

De bovenstaande regels staan toe om het motorrendement uit te drukken in grammen CO₂ per kWh.

$$\text{Motorrendement} \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \right] = \frac{2630 [\text{gCO}_2]}{\text{Motorrendement} [\%] * 9,96 [\text{kWh}]}$$

Rekenvoorbeeld

Stel dat de motor van een machine een motorrendement van 30% heeft gedurende de meetperiode, dan betekent dit dat deze machine een motorrendement van $2630 / (0,3 * 9,96) = 880 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$ heeft.

Daarnaast zijn de volgende feiten en aannames nodig om tot een vertaling naar gNO_x/kWh te komen.

- “De molaire massa van CO₂ is 44 g/mol.”
- “De molaire massa van NO₂ is 46 g/mol.”
- “Voor de molaire massa van NO_x wordt alleen met NO₂ gerekend.”
- “Eenheden van concentraties kunnen als volgt worden omgerekend: 10 000 ppm (parts per million) staat gelijk aan 1%.”

⁸ Deze aannames kunnen worden afgeleid uit de Excel bijlage voor diesel van het JEC Well-to-Tank report v5, zie: <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036> <https://publications.jrc.ec.europa.eu/repository/handle/JRC119036>

Deze aannames staan toe om de NO_x/CO_2 [ppm/%] om te rekenen naar gNO_x/kWh [g/kWh] via de volgende formule:

$$\frac{\text{NO}_x}{\text{kWh}} \left[\frac{\text{gNO}_x}{\text{kWh}} \right] = \text{Motorrendement} \left[\frac{\text{gCO}_2}{\text{kWh}} \right] * \frac{46}{44} \left[\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right] * \frac{\text{NO}_x/\text{CO}_2 \left[\frac{\text{ppm}}{\%} \right]}{10^4}$$

De schaalfactor 10^4 is nodig, omdat NO_x -concentraties worden uitgedrukt in ppm (parts per million) en niet in percentages.

Omdat de precieze waarde van het motorrendement vaak onbekend is, wordt gebruik gemaakt van de volgende aanname.

- **“1 liter diesel geeft 3,5 kWh geleverde energie”** Deze aanname is geldig bij hogere motorbelasting. Aangezien een liter diesel 9,96 kWh aan energie bevat, gaat deze aanname uit van een gemiddeld motorrendement van $3,5/9,96 = 35\%$.

Met behulp van deze aanname kan de bovenstaande formule worden vereenvoudigd tot de volgende simpele formule.

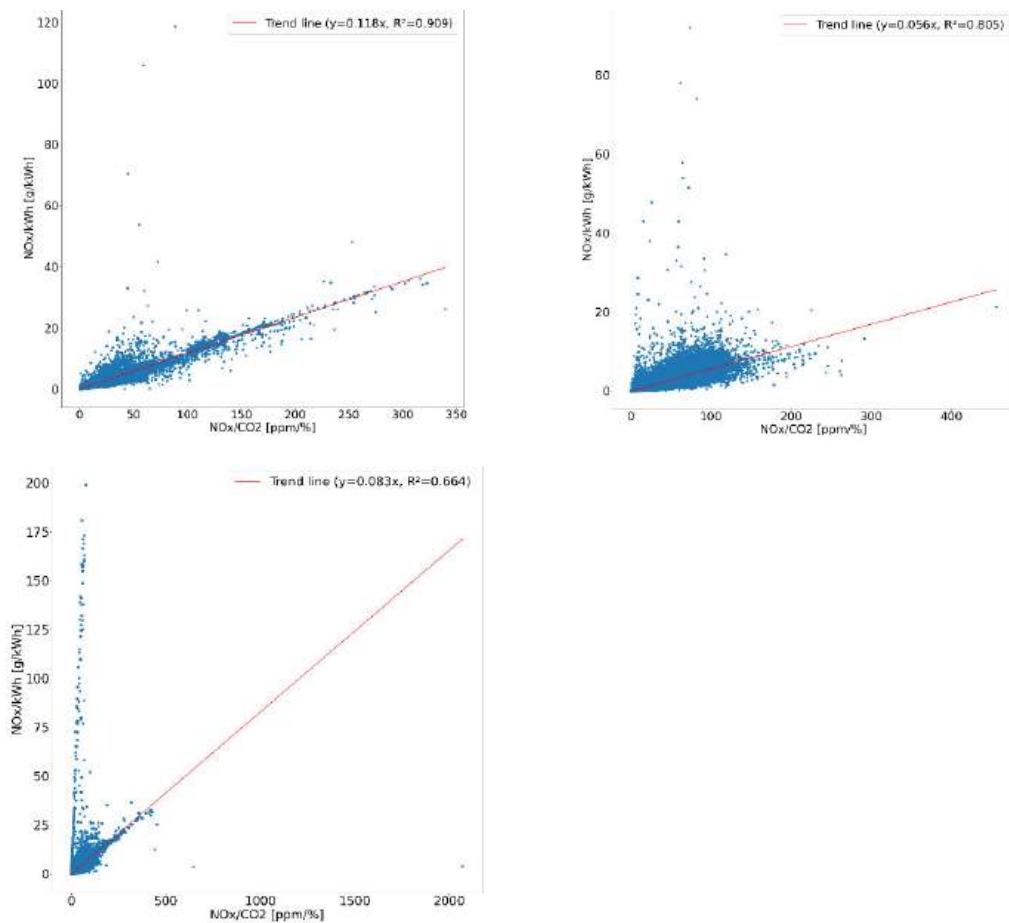
$$\frac{\text{NO}_x}{\text{kWh}} \left[\frac{\text{gNO}_x}{\text{kWh}} \right] = 0,08 * \text{NO}_x/\text{CO}_2 \left[\frac{\text{ppm}}{\%} \right]$$

Rekenvoorbeeld

Als 1 liter diesel 3,5 kWh aan geleverde energie geeft, dan geeft dat een motorrendement van $2630/3,5 = 751 \text{ gCO}_2/\text{kWh}$. In dit geval geeft een NO_x/CO_2 -verhouding van 6 ppm/% een uitstoot van $751 * (46/44) * (6/10^4) = 0,47 \text{ gNO}_x/\text{kWh}$. Een NO_x/CO_2 -verhouding van 5 ppm/% geeft een uitstoot van $751 * (46/44) * (5/10^4) = 0,39 \text{ gNO}_x/\text{kWh}$. Dit betekent dat de emissielimiet (0,4 gNO_x/kWh) bij dit motorrendement ligt op een NO_x/CO_2 -verhouding van iets boven 5 ppm/%.

SEMS en MAF metingen

Door gebruik van een MAF-sensor (ook wel, luchtmassameter) kan de massa van de luchtstroom gemeten worden in plaats van geschat. Door middel van deze SEMS en MAF-metingen, kunnen de bovenstaande omrekenfactoren worden geverifieerd.



Figuur 5.3: Voor drie machines die met SEMS en MAF zijn gemeten wordt per seconde de NO_x/CO₂-verhouding met de NO_x-uitstoot in g/kWh vergeleken. Het valt op dat er veel variatie in de data is en dat de gemiddelde omrekenfactoren (resp. 0,118, 0,056 en 0,083) voor de drie machines variëren. Wanneer meetsignalen (zoals het MAF-sigitaal) worden toegevoegd is het gebruikelijk dat de variatie toeneemt.

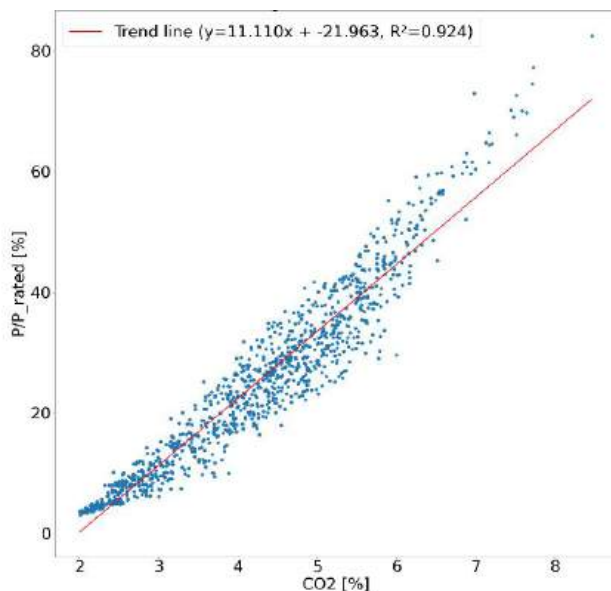
5.5 Van NO_x/CO₂ naar absolute emissies

Om NO_x-concentraties of NO_x-uitstoot per kWh te vertalen naar absolute NO_x-emissies in milligram per seconde, gram per uur of totale kg NO_x, mist een inschatting van de geleverde energie door de motor. CO₂-concentraties kunnen als proxy dienen voor motorbelasting. Om een inschatting te geven van de relatie tussen CO₂-concentraties [%] en motorbelasting [%] (dat wil zeggen) vermogen als percentage van het maximum vermogen), zijn voor alle gemeten machines overzichten gemaakt van de gemiddelde motorbelasting ten opzichte van de gemiddelde CO₂-concentraties. Om de variatie in de data te verkleinen, zijn deze gemiddelden berekend voor blokken van 15 minuten aan meetdata.

In Figuur 5.4 is een voorbeeld weergegeven van zo'n analyse voor een in 2023 gemeten asfaltrezenmachine. De gemeten CO₂-concentraties worden uitgezet tegen de motorbelasting. Voor veel gemeten machines is een goede correlatie te zien tussen motorbelasting en CO₂-concentraties. Voor een aantal machines is geen goede correlatie gevonden, bijvoorbeeld omdat gebruikt wordt gemaakt van uitlaatgasrecirculatie (EGR).

Op basis van deze correlaties, valt het vermogen, P [kW], te voorspellen aan de hand van de gemeten CO_2 -concentraties en het maximale motorvermogen, $P_{\max}$ [kW], door middel van de volgende formule.

$$P \text{ [kW]} = \left(\frac{10,9 * \text{CO}_2 \text{ [\%]} - 21,6}{100} \right) * P_{\max} \text{ [kW]}$$



Figuur 5.4: Een puntdiagram van de gemeten CO_2 -concentraties op de x-as ten opzichte van de motorbelasting op de y-as van een in 2023 gemeten asfaltfreenmachine. De weergegeven waarden zijn gemiddelden van blokken van 15-minuten. Daarnaast is ook de lineaire trendlijn weergegeven.

Rekenvoorbeeld

Stel dat een machine met een maximaal vermogen van 250 kW wordt gemonitord en er wordt een gemiddelde CO_2 -concentratie van 4,5% gemeten en een gemiddelde NO_x/CO_2 -verhouding van 5 ppm/%. Het gemiddelde vermogen is dan, via de bovenstaande formule, $(10,9 * 4,5 - 21,6) * 250/100 = 68,6$ kW. Dus de gemiddelde motorbelasting is $68,6/250 = 27\%$. Neem verder aan dat deze machine bij deze belasting een gemiddeld motorrendement heeft van 751 g CO_2 /kWh. Dat betekent dat de formule uit de vorige sectie gebruikt kan worden: $0,08 * 5 \text{ [ppm/\%]} = 0,4 \text{ gNO}_x/\text{kWh}$. Stel dat de machine voor een totale duur van 100 uur is gemeten. Daaruit volgt dat er $100 * 68,6 = 6860$ kWh aan arbeid is geleverd. Alles tezamen geeft dit een totale absolute uitstoot van $0,4 * 6860 = 2,7 \text{ kg NO}_x$.

6 Conclusies

In dit rapport wordt verslag gedaan van het onderzoek dat in 2024 en 2025 is uitgevoerd. Het gaat daarbij om meetmethoden en mogelijke afkeurnormen voor een kortdurende emissietest voor controle van de werking het roetfilter en de SCR-katalysator. Daarnaast worden verdere ontwikkelingen beschreven op het gebied van monitoring van de fijnstof- en NO_x-uitstoot van mobiele werktuigen.

Korte roetfiltertest

Als basis voor de korte emissietest ter controle van de werking van roetfilters is de APK-deeltjesaantallentest voor wegverkeer genomen. Hierbij worden bij stationair toerental de deeltjesaantallen (fijnstof) in de uitlaat gemeten gedurende ca. 30 seconden.

Tijdens dit onderzoek is de deeltjesaantallentest uitgevoerd bij 25 mobiele machines met een roetfilter, met name bij Stage V machines (Stage V is de meest recente emissieklasse voor mobiele werktuigen). De resultaten laten duidelijk zien dat machines met een goedwerkend, gesloten roetfilter lage aantallen deeltjes uitstoten, meestal ruim onder de afkeurgrens die wordt gehanteerd bij de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer. Machines waarop geen roetfilter is geïnstalleerd, of waarbij het roetfilter mogelijk defect is, kunnen direct gedetecteerd worden omdat deze veel hogere deeltjesaantallen uitstoten.

Het onderzoek bevestigt dat het protocol van de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer grotendeels overgenomen kan worden voor toepassing bij bouwmachines. Hierbij wordt een afkeurgrens van 250.000 deeltjes per cm³ geadviseerd. Dit is gelijk aan het initiële TNO advies voor de APK deeltjesaantallentest voor het wegverkeer. Bovendien kan in de basis dezelfde meetapparatuur worden toegepast. Wel worden daarbij voor meten in het veld kleine aanpassingen voorgesteld, zoals gebruik van een langere verwarmde leiding, een inwendige stroomvoorziening en een robuustere behuizing. Tot slot is het belangrijk om voldoende aandacht te hebben voor veiligheid bij het werken op hoogte (uitlaten zijn soms relatief hoog). Dit geldt ook voor de hieronder beschreven SCR-test.

Korte SCR-test

De SCR-test is een korte test van de werking van de SCR-katalysator waarbij de NO_x-concentraties aan de uitlaat worden gemeten. Voor dit onderzoek zijn metingen uitgevoerd bij 16 machines met een SCR-katalysator. Dit waren zowel Stage IV als Stage V machines met een motorvermogen tussen de 56 en 560 kW. Het meten van NO_x-concentraties is complexer dan het uitvoeren van een deeltjesaantallen meting. In tegenstelling tot een roetfilter, werkt de SCR-katalysator alleen wanneer deze op bedrijfstemperatuur is. Om dit te bereiken moet de motor van de machine voorafgaand aan, of tijdens de meting, tot een bepaalde mate zijn belast.

Tijdens dit onderzoek is gebleken dat de SCR-katalysator niet altijd op bedrijfstemperatuur kwam gedurende de (eerste) meting in het veld. Indien dat het geval was, is de gebruiker gevraagd om werk te verrichten dat een hogere motorbelasting vraagt. Van de 16 machines waarbij een meting is gedaan, lukte het bij twee machines niet om de SCR-katalysator op voldoende temperatuur te krijgen. De andere 14 machines lieten tijdens de test (uiteindelijk) lage NO_x-concentraties zien.

Als afkeurgrens voor een SCR-katalysator wordt voorgesteld om een concentratiewaarde van 50 ppm NO_x te hanteren. Machines zonder een goedwerkende SCR zullen deze waarde normaliter niet halen en een veel hogere NO_x-concentratie aan de uitlaat vertonen. In het concept testprotocol wordt voorgesteld om de machine 10 minuten actief op te warmen om vervolgens de meting met 'handheld' apparatuur aan de machine uit te voeren binnen ca. 30 seconden (zodat de SCR tijdens de meting nog op bedrijfstemperatuur is). Indien dit niet lukt is een oplossing om de apparatuur op de machine te bevestigen om vervolgens gedurende een langere periode (ca. 30 minuten) de NO_x-concentraties te blijven monitoren. Hierbij wordt ook aanbevolen om de uitlaatgastemperatuur mee te meten, dit om te monitoren of de SCR op bedrijfstemperatuur komt.

Mobiele apparatuur om NO_x-concentraties te meten is commercieel verkrijgbaar. Dergelijke apparatuur is doorgaans echter niet bedoeld om (kortstondig en snel) op machines te monitoren. Daarnaast zijn er enkele extra eisen aan de apparatuur, zoals een extra lange meetsonde, om de plaatsing van de apparatuur makkelijker te maken.

Fijnstof-emissiemonitoring

Om te controleren of een roetfilter in een machine aanwezig is, kan drukmonitoring worden toegepast. Tijdens het onderzoek is geëxperimenteerd met een achteraf in een machine gemonteerd roetfilter in combinatie met drukmonitoring van het uitlaatgas vóór het roetfilter. De drukmonitoring liet duidelijk zien dat er een roetfilter aanwezig was vanwege de door het filter veroorzaakte tegendruk. Deze nam verder toe naarmate het roetfilter verzadigd raakte. Wanneer het roetfilter wordt verwijderd, vervalt de tegendruk in het uitlaatgas.

Machine-onafhankelijke NO_x-monitoring

Voor machine-onafhankelijke NO_x-monitoring zijn twee opties verder onderzocht. De eerste optie betreft de meest nauwkeurige: drie mobiele machines zijn in het veld uitgerust met een externe NO_x-sensor in de uitlaat en een externe MAF-sensor (Mass Air Flow) in de luchtinlaat. Met deze methodiek zijn succesvol absolute emissies gemeten, onafhankelijk van machine-signalen. De luchtinlaattrajecten van de machines waren echter te groot om een bestaande MAF-sensor direct te kunnen plaatsen, waardoor plaatsing relatief complex was. In een studie met Connex in het Kennis-, Opschaling- en Praktijkervaringsprogramma wordt deze optie verder onderzocht. In dat programma wordt gewerkt aan de opschaling van NO_x-monitoring, waaronder die met de toepassing van de MAF-sensor.

De tweede optie betreft het plaatsen van alléén een NO_x-sensor. Door de afwezigheid van MAF- en/of machine-signalen kan de luchtstroom door de motor niet worden berekend om zo tot emissietotalen te komen. Om deze reden is onderzocht wat de mogelijkheden zijn met de eerder genoemde NO_x/CO₂ ratio. Met een NO_x sensor kunnen namelijk ook CO₂-concentraties worden bepaald.

Op basis van de NO_x/CO₂ ratio kan een inschatting worden gemaakt van NO_x-emissies in g/kWh. Deze inschatting is theoretisch van aard, maar is bij diverse machines geverifieerd aan de hand van metingen met een MAF-sensor. Daarnaast kunnen gemeten CO₂-concentraties worden gebruikt om van gNO_x/kWh tot absolute NO_x-emissiewaarden te komen. Al met al geeft deze optie een eenvoudiger (maar minder nauwkeurig) alternatief om met alleen een NO_x-sensor de NO_x-emissies in g/kWh of in gram per uur te berekenen.

Ondertekening

TNO) Mobility & Built Environment) Den Haag, 5 juni 2025

Jan Hoegee
Research Manager

Pim van Mensch
Auteur

Mobility & Built Environment

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