

TNO-rapport**TNO 2018 R10465****De inzet van bouwmachines en de
bijbehorende NO_x- en CO₂-emissies****Traffic & Transport**Anna van Buerenplein 1
2595 DA Den Haag
Postbus 96800
2509 JE Den Haag

www.tno.nl

T +31 88 866 00 00

Datum	6 juli 2018
Auteur(s)	Norbert Ligterink, Renee Louman, Edo Buskermolen, Ruud Verbeek
Exemplaarnummer	2018-STL-RAP-0100314038
Aantal pagina's	40 (incl. bijlagen)
Aantal bijlagen	1
Opdrachtgever	Connekt en Emissieregistratie
Projectnaam	Emissies bouwmachines
Projectnummer	060.26646

Alle rechten voorbehouden.

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

Indien dit rapport in opdracht werd uitgebracht, wordt voor de rechten en verplichtingen van opdrachtgever en opdrachtnemer verwezen naar de Algemene Voorwaarden voor opdrachten aan TNO, dan wel de betreffende terzake tussen de partijen gesloten overeenkomst.

Het ter inzage geven van het TNO-rapport aan direct belanghebbenden is toegestaan.

© 2018 TNO

Samenvatting

Aanleiding

Non-Road Mobile Machinery (NRMM) is de verzamelnaam van alle machines met een verbrandingsmotor, die niet tot de wegvoertuigen, zeeschepen of vliegtuigen behoren. Deze groep omvat ook dieseltreinen, binnenvaartschepen, aggregaten en bouwmachines.

De mobiele werktuigen (NRMM zonder schepen, treinen en vliegtuigen) vormen een substantieel aandeel van de NO₂-luchtkwaliteitsproblemen. Inschattingen op basis van de emissielimieten, zoals gesteld in de emissiewetgeving, en een generieke verspreiding over Nederland geven aan dat ongeveer 10% van de NO₂-concentratie op knelpunten veroorzaakt wordt door mobiele werktuigen.

Over de emissies en de inzet van bouwmachines *in de praktijk* is nog weinig bekend. Daarom is het ook onbekend of de wetgeving de emissies bij normaal praktijkgebruik goed afdekt. De machines die in dit onderzoek getest hebben geen emissie eisen in de praktijk.

Aanpak

In dit project, dat is gefinancierd door de Topsector Logistiek en Emissieregistratie, zijn de inzet en emissies van vier moderne en gangbare bouwmachines tijdens normaal praktijkgebruik gemonitord. Dit gebruik kan sterk variëren bij verschillende inzet en operateurs. De monitoring is uitgevoerd met behulp van het Smart Emission Measurement System (SEMS), een monitoringsysteem dat is ontwikkeld door TNO. Voor de selectie van de machines is gekeken naar de geldende wetgeving, de leeftijd en het aantal van dat type bouwmachines in Nederland. De uiteindelijke selectie omvat twee graafmachines, een laadschop en een tractor. Voor twee bouwmachines geldt de Stage III b wetgeving (ingevoerd vanaf 2011), voor de andere twee bouwmachines geldt de nieuwere Stage IV wetgeving (ingevoerd vanaf 2014). Voor de wettelijke motortest in het laboratorium moeten nu de eerste motoren aan Stage V voldoen.

Resultaten

Tabel 1 geeft een overzicht van de resultaten van de vier gemonitorde machines. De laatste twee regels van Tabel 1 omvatten de gemiddelde NO_x-emissie in de praktijk in g/kWh en de limietwaarde voor de typekeurtest in een laboratorium. Zoals te zien ligt de NO_x-emissie in de praktijk circa 20% tot 350% hoger dan de limietwaarde voor de laboratoriumtest.

De hogere emissies in de praktijk hangen deels samen met de inzet. De machines draaien gedurende 18% tot 57% van de tijd stationair of lage last. Dat aandeel stationair draaien is veel hoger dan het percentage waar in de typekeuringstest rekening mee wordt gehouden. Bij stationair draaien (lage tot geen motorlast) is de NO_x-emissie relatief hoog, terwijl er geen of heel weinig arbeid geleverd wordt. Daardoor is het brandstofverbruik wel lager, maar zijn de NO_x-emissies per seconde in dezelfde orde als, of zelfs hoger dan, bij hogere belasting.

Het verschil tussen de emissielimieten en de praktijkemissies kan te maken hebben met het feit dat de typekeuringstest voor NRMM voornamelijk gericht is op de emissies gedurende constante hoge last, en wisselende dynamiek en lage last in de praktijk niet goed zijn afgedekt door de typekeuringstest.

De verschillen tussen de limietwaarde voor laboratoriumtesten en de praktijkemissies zijn voor NRMM nog niet wettelijk geregeld. Bij wegvoertuigen is dat vanaf 2017, in RDE (Real Driving Emissions) wetgeving, wel het geval: de emissies van deze voertuigen mogen in de praktijk tot 110% hoger liggen dan in de laboratoriumtest. Vanaf 2019 mag deze afwijking dat nog maar maximaal 50% zijn.

Tabel 1: Het overzicht van de inzet en emissie van de vier machines die zijn gemonitord.

Machine	1	2	3	4
Type	Graafmachine	Laadschop	Graafmachine	Tractor
Stage motor	IV	III B	III B	IV
Tijd idling [min/hr]	21	34	11	15
Gemiddelde CO ₂ -uitstoot [kg/hr]	42	18	53	30
Gemiddelde NO _x -uitstoot [g/hr]	34	141	149	70
Gemiddelde NO _x -uitstoot idling [g/hr]	49	106	91	64
Gemiddelde NO _x -uitstoot [g/kWh]	0.5	4.9	2.8	1.8
NO _x -limietwaarde (lab) [g/kWh]	0.4	3.3	2.0	0.4

Voor de emissieberekening van de mobiele werktuigen in de nationale emissieregistratie wordt tot dusverre een gemiddeld hogere last en mogelijk een kortere bedrijfsduur aangenomen. Ook zijn de emissies gebaseerd op de limietwaarden en niet de praktijkemissies. De omzetting naar deze g/kWh emissiefactoren gaat mank omdat een substantieel aandeel stationair draaien in de praktijk niet samenhangt met veronderstelde geleverde vermogens en kWh's.

Aanbevelingen

Op basis van deze metingen en de ervaringen bij wegtransport in het algemeen, blijkt dat de huidige emissiefactoren voor NO_x, gebaseerd op de wetgeving en korte testen, te laag zijn. Bij elke tot nu toe gemeten bouwmaschine, trein en schip worden vooral bij lage motorlast hogere emissiewaarden gezien.

Een voorlopige aanpassing van de emissiefactoren naar boven wordt aanbevolen. Beter inzicht in vooral de inzet van bouwmachines, maar ook de bijbehorende emissies zullen meer vertrouwen geven in de mate van verhoging.

Daarnaast is het van belang om voor de NRMM een gelijksoortige In Service Conformity (ISC) procedure te ontwikkelen en toe te voegen aan de typekeuringstest, zoals gebruikelijk is voor wegtransport. De huidige In Service Monitoring (ISM) procedure is daar een logische basis voor, maar de huidige metingen laten zien dat de ISM-procedure verbetering behoeft. De uitgevoerde metingen en dit rapport zullen ook onder de aandacht van de Europese Commissie gebracht worden, ter verbetering van de emissiewetgeving voor NRMM.

Gedurende de testperiode draaiden de gemeten vier machines tussen de 18% en 57% van de tijd stationair. Het brandstofverbruik en de CO₂-emissies bij stationair draaien vormen een relevant aandeel van het totaal. Daarnaast is het stationair draaien verantwoordelijk voor tot de helft van de totale NO_x-emissies.

Voor de gemeten modernere machines (Stage IV) is het aandeel tijdens stationair draaien groter geworden dan het voorheen was (Stage III b). Om deze redenen behoeven een efficiënte inzet (waarbij de wachttijden kort zijn en de motorbelasting uniform hoog is) en instructies voor het afzetten van de machine extra aandacht.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding.....	6
1.1	Achtergrond	6
1.2	Onderzoeksvragen	7
1.3	Aanpak	8
1.4	Leeswijzer	8
2	Methodologie	9
2.1	Selectie machines	9
2.2	Dataverzameling en -analyse	10
3	Graafmachine 1.....	11
3.1	Samenvatting bevindingen	11
3.2	Resultaten	12
4	Laadschop	18
4.1	Samenvatting bevindingen	18
4.2	Resultaten	19
5	Graafmachine 2.....	24
5.1	Samenvatting bevindingen	24
5.2	Resultaten	25
6	Tractor.....	30
6.1	Samenvatting bevindingen	30
6.2	Resultaten	31
7	Conclusies	36
8	Ondertekening	38
	Bijlage(n)	
	A Processing	

1 Inleiding

1.1 Achtergrond

In dit onderzoek wordt de inzet en emissie bepaald van vier bouwmachines, onderdeel van de groep Non-Road Mobile Machinery (NRMM). Tabel 2 geeft een overzicht van het park mobiele werktuigen in Nederland en de ingeschatte gemiddelde hoeveelheid CO₂ die zij gemiddeld jaarlijks uitstoten. Volgens de huidige inzichten zijn mobiele werktuigen verantwoordelijk voor 9% van de CO₂-uitstoot van mobiele bronnen in Nederland¹. Het totale aantal bouwmachines in Nederland is vergelijkbaar met de aantallen vrachtwagens en trekker-opleggers. Een verschil tussen deze groepen is dat bouwmachines over het algemeen voor langere periodes op één plek werken, wat leidt tot lokale emissies. Verder maakt een groot aandeel van deze machines veel draaiuren, en zijn de motoren relatief groot. Samen kan dat tot een substantiële verslechtering van de luchtkwaliteit leiden. In het bijzonder is de inzet van bouwmachines in grote en langdurige binnenstedelijke bouwprojecten een reden tot zorg.

Tabel 2: Het park van mobiele werktuigen in Nederland en de inschatting van het gemiddelde brandstofverbruik.²

Machine type	Aantal machines	CO ₂ jaar-gemiddeld [ton/stuk]
Landbouwtrekkers	80	10
Graafmachines	15000	30
Laadschoppen	800	50
Generatoren, HDO	1000	60
Generatoren, industrie	400	160
Generatoren, bouw	1600	30
Dumpers	500	60
Bulldozers	200	80
Bronbemalingspompen	700	1
Walsen	1000	10
Ruw terrein heftrucks	500	25
Asfalt afwerkinstallaties	200	40
Trilplaten/stampers	7600	1
Hoogwerkers	1000	6
Asfaltfreesmachines	20	110
Graaf-laadcombinaties	70	25

¹ Methods for calculating the emissions of transport in the Netherlands, Klein et al., 2018

² TNO-034-UT-2009-01782_RPT-ML en 2014-TM-NOT-0100007452

Luchtkwaliteitsmodel en lokale emissies

Mobiele werktuigen dragen volgens de Nederlandse luchtkwaliteitsmonitoring substantieel bij aan de NO₂-concentraties op binnenstedelijke knelpunten.³ Ongeveer 10% van de NO₂ wordt toegeschreven aan bouwmachines, tractors, pompen, en aggregaten die op diesel draaien. Bij veel van die knelpuntlocaties is er geen bouwmaschine te bekennen: de bijdrage van de werktuigen wordt in de modellering uitgesmeerd over de achtergrondconcentratie door heel Nederland. De verwachting is dat bij bouwlocaties waar deze machines daadwerkelijk opereren, de bijdrage aan luchtkwaliteitsproblemen veel hoger is. Omdat dit luchtkwaliteitsmodel geen afspiegeling is van de lokale situatie, kan het zijn dat bewoners van woonwijken naast bouwprojecten jarenlang blootgesteld worden aan hogere concentraties dan wordt berekend.

Wetgeving en de praktijk

De veronderstelde emissies van deze werktuigen zijn gebaseerd op de wettelijke eisen aan deze machines, waarbij er aannames zijn gemaakt voor de inzet van mobiele werktuigen in de praktijk. Op basis van onderzoek aan schepen⁴ en treinen⁵ wordt het mogelijk geacht dat bouwmachines anders worden ingezet dan momenteel wordt aangenomen voor de typekeuringstest en als gevolg daarvan ook hogere emissies hebben. Hierbij kan gedacht worden aan het percentage van de tijd dat de werktuigen stationair of lage last draaien; deze motorbelasting maakt slechts beperkt deel uit van de wettelijke testen.

Sinds enige jaren zijn er nieuwe emissielimieten van kracht in de wetgeving voor mobiele werktuigen: de Stage IV normen. In deze wetgeving zijn de emissielimieten ten opzichte van Stage III verlaagd, wat zou moeten leiden tot een vergelijkbaar effect in de praktijk. De toekomstige wetgeving, Stage V, krijgt nog een extra positief effect toegekend in de emissieramingen. Tot dusver zijn er nauwelijks praktijkgegevens verzameld om de problemen die met wetgeving opgelost moeten worden in kaart te brengen. Dit maakt het lastig om te bepalen of de wetgeving effectief is.

Het gebrek aan gegevens beperkt zich niet tot de wetgeving: over het algemeen is er weinig inzicht in de luchtkwaliteitseffecten en inzet van mobiele werktuigen, alsmede in duurzame alternatieven.

1.2 Onderzoeksvragen

De Nederlandse Emissieregistratie en de Topsector Logistiek hebben samen een onderzoek gefinancierd om meer inzicht in bouwmachines te verkrijgen. Voor de totale nationale emissies zijn de mobiele werktuigen een grote, en groeiende, bron. Beter inzicht in deze bron en betere onderbouwing van de huidige cijfers is een belangrijk verbeterpunt op de agenda van de Emissieregistratie. Het doel van dit onderzoek is om de inzet en emissies van bouwmachines bij normaal gebruik in kaart te brengen.

³ Aanpassing Nationaal Samenwerkingsprogramma Luchtkwaliteit 2018, www.platformparticipatie.nl

⁴ Europees project PROMINENT, www.prominent-iwt.eu

⁵ TNO 2017 R11414 Inzicht in het energieverbruik, de CO₂-uitstoot en de NO_x-uitstoot van het spoorgoederenvervoer

De opgedane kennis kan vervolgens gebruikt worden om:

1. De basis te vormen voor aanpassingen van de emissiefactoren die voor deze machines worden gehanteerd. Tot op heden is er in Nederland nog niet aan de uitstoot van mobiele werktuigen gemeten tijdens praktijkgebruik. Daarom zijn de huidige emissiefactoren gebaseerd op buitenlandse literatuur en de emissiewetgeving. Ervaringen bij het wegverkeer leren dat de wetgeving niet altijd een goede indicator is voor de emissies in de praktijk;
2. Aspecten van de inzet te identificeren die op eenvoudige wijze tot maatregelen voor CO₂-besparing en reductie van schadelijke uitstoot zouden kunnen leiden. Mogelijk bestaan er simpele maatregelen om het schadelijke effect van deze machines te minimaliseren.

1.3 Aanpak

In dit project zijn ondernemingen benaderd die veel gebruik maken van bouwmachines. Drie ondernemingen hebben uiteindelijk in totaal vier machines beschikbaar gesteld om SEMS op te installeren: TNO's Smart Emission Measurement System. SEMS gebruikt moderne sensoren om voor langere tijd onder andere NO_x-emissies (welke invloed hebben op de luchtkwaliteit) te meten en CO₂-emissies (welke invloed hebben op het klimaat) te bepalen. Deze data is vervolgens gecombineerd met inzetgegevens, om een zo compleet mogelijk beeld van de bouwmachines te schetsen.

1.4 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt de in dit project gebruikte methodologie besproken: het verschaft inzicht in de selectie van de machines, alsmede in het vergaren en analyseren van de data. In hoofdstuk 3 tot en met 6 worden de resultaten van de vier verschillende bouwmachines besproken. Elk hoofdstuk start met een samenvatting van de bevindingen, waarna dieper wordt ingegaan op de verschillende inzet- en emissieaspecten. Het rapport sluit van af met de gevonden conclusies en aanbevelingen aan de hand van deze conclusies in hoofdstuk 7.

2 Methodologie

2.1 Selectie machines

Non-Road Mobile Machinery (NRMM) is de verzamelnaam van alle machines met een verbrandingsmotor, die niet tot de wegvoertuigen, zeeschepen of vliegtuigen behoren. Deze groep van apparaten omvat naast bouwmachines ook dieseltreinen, binnenvaartschepen en aggregaten. De emissiewetgeving van de NRMM loopt in termen van de emissielimieten achter op die van het wegverkeer. Daarnaast zijn er zorgen dat de wetgeving de emissies bij normaal gebruik niet goed afdekt. De emissielimieten voor NO_x voor de belangrijkste categorieën mobiele werktuigen, zoals omschreven in de wetgeving, is weergegeven in * NO_x + HC. De praktijkemissies worden tot nu toe verondersteld ongeveer overeen te komen met de emissielimieten.

Voor het huidige project zijn er vier verschillende machines geselecteerd. Deze selectie is gebaseerd op het aandeel van de verschillende type werktuigen binnen de gehele vloot (zie Tabel 2), de leeftijd en de wetgevingsklasse. Om een beeld te krijgen voor de voorzienbare toekomst zijn voertuigen geselecteerd uit de laatste twee wetgevingsklasse: Stage III b en de huidige eis van Stage IV. Stage IV vereist een substantiële reductie van NO_x-emissies van 80%. Of dat in de praktijk ook wordt bereikt, is één van de vragen van dit onderzoek.

Tabel 3: Emissielimieten voor mobiele werktuigen.

Jaar	Stage	Power [kW]	NO _x [g/kWh]
2006	III A	130 - 560	4,0*
2007		75 - 130	4,0*
2011	III B	130 - 560	2,0
2012		75 - 130	3,3
2014	IV	75 - 560	0,4

* NO_x + HC

De uiteindelijke selectie bestaat uit twee graafmachines, een laadschop en een tractor. Hiervan zijn twee werktuigen uitgerust met een Stage IV motor en twee werktuigen met een Stage III B motor. De Stage III B motoren zijn uitgerust met een uitlaatgasrecirculatiesysteem (een EGR). De Stage IV motoren zijn uitgerust met SCR (selectieve katalytische reductie) als NO_x-reductietechnologie. Daarnaast zijn alle vier motoren voorzien van een roefilter om de PM-emissie te reduceren. Een overzicht van de geselecteerde werktuigen is gepresenteerd in Tabel 4.

Tabel 4: Overzicht van de geselecteerde werktuigen.

#	Type machine	Stage	Nabehandeling	Power [kW]
1	Graafmachine 1	IV	SCR, DPF en EGR	152 kW
2	Laadschop	III B	EGR en DPF	129 kW
3	Graafmachine 2	III B	EGR en DPF	159 kW
4	Tractor	IV	SCR en DPF	114 kW

2.2 Dataverzameling en -analyse

De inzet en de emissies van de vier geselecteerde bouwmachines zijn gemonitord met SEMS. SEMS, dat sinds 2012 ontwikkeld wordt door TNO, gebruikt moderne sensoren in de hete en natte uitlaatstroom om robuust en voor langere tijd onder andere de NO_x- en CO₂-emissies te bepalen.

Meten aan bouwmachines is, als gevolg van onder andere de moeilijk te bepalen totale uitstroom van het uitlaatgas, niet triviaal. Er zijn meerdere processing-stappen nodig om op basis van de meetdata een duidelijk en compleet beeld te scheppen van de inzet van de machines. Het toerental speelt daarin een belangrijke rol: bij mobiele werktuigen is een hoger toerental gekoppeld aan een hogere motorlast. Differentiëren naar toerental laat daarom een belangrijk deel van de variabiliteit zien van de schadelijke uitstoot.

De benodigde processing-stappen om tot een compleet beeld te komen, zijn afhankelijk van welke parameters uit het motormanagement kunnen worden uitgelezen en kunnen per bouwmaschine verschillen. In Bijlage A wordt een uitgebreider overzicht gegeven van de processing zoals deze in dit project gebruikt is.

3 Graafmachine 1

Na tractors zijn graafmachines de grootste groep mobiele werktuigen in Nederland. Graafmachine 1 voldoet aan de nieuwste eisen, Stage IV, en heeft daarvoor een SCR.



Hetzelfde type en model graafmachine als gemeten in het huidige project.

bron: https://www.cat.com/en_US/products/new/equipment/excavators/medium-excavators/1000024903.html

Type werktuig	Graafmachine
Stage motor	Stage IV
Vermogen motor	129 kW
Nabehandelingssysteem	SCR en EGR

3.1 Samenvatting bevindingen

Het monitoren van graafmachine 1 heeft geleid tot de volgende bevindingen:

1. De motor draait 35% van de tijd stationair. Bij langer dan een paar minuten stationair draaien lijkt de SCR niet meer te werken, en bereiken de NO_x-emissies hun hoogste waarde.
2. Boven de 1400 toeren per minuut voldoet deze graafmachine aan de emissie-eisen van Stage IV. Bij lagere toerentallen zijn de emissies niet alleen verhoudingsgewijs, maar ook absoluut hoger.

Het brandstofverbruik is bij stationair draaien ongeveer 10% van het maximale brandstofverbruik.

Dit leidt er in principe toe dat 35% van de tijd stationair draaien verantwoordelijk is voor tenminste 3.5% van het totale brandstofverbruik. In de praktijk is dat, echter, typisch een factor 2 hoger door de lagere motorlast: bijna 8% van het brandstofverbruik is het gevolg van stationair draaien, gegeven de inzet van deze graafmachine.

De kerngetallen van de uitgevoerde meting staan verzameld in Tabel 5.

Op de verschillende aspecten wordt uitgebreider ingegaan in de volgende secties.

Tabel 5: Kerngetallen resultaten werktuig 1 (graafmachine).

Hoeveelheid verzamelde data	131 uur
Tijd idling per uur	21 minuten/uur
Gemiddelde CO ₂ -uitstoot per uur	42 kilogram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per uur	34 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot idling (~900 en 1000 RPM)	49 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per kWh	0.5 gram/kWh

3.2 Resultaten

1. Inzet

Om de inzet te bepalen, wordt er gekeken naar het toerental van de motor (gegeven in RPM – revolutions per minute). Een histogram van het aantal RPM dat de motor draait wordt gegeven in Figuur 1. Hierop kunnen twee verschillende inzetprofielen onderscheiden worden: idling (RPM~900 en RPM~1000, waarbij het hogere toerental een stand-by modus is) en effectieve inzet (1400<RPM<1700). De idling-duur beslaat ongeveer 35% van de tijd, oftewel 21 minuten per uur.

2. NO_x-uitstoot

De gemeten gemiddelde NO_x-emissies per RPM-bin worden gepresenteerd in Figuur 2. Door deze waarden te combineren met de duur waarin de motor in een bepaalde RPM-bin draait, is de totale NO_x-uitstoot per RPM-bin bepaald (Figuur 3). Hierbij valt op dat tijdens het idlen op RPM~1000 een groot deel van de NO_x-emissie plaatsvindt: 30%. Ook het idlen op RPM~900 veroorzaakt met 20% nog een aanzienlijk deel van de NO_x-emissies. Dit leidt ertoe dat 51% van de totale NO_x-uitstoot het gevolg is van het idlen van de machine, en 49% het gevolg is van daadwerkelijke arbeid die door de machine geleverd wordt.

3. CO₂-uitstoot

De gemeten CO₂-waardes zijn op dezelfde manier weergegeven als de NO_x-waardes, zie Figuur 4 en Figuur 5. In Figuur 5 zijn dezelfde drie pieken zichtbaar. Doordat de CO₂-uitstoot direct afhankelijk is van de hoeveel brandstof die verbruikt wordt, en het brandstofverbruik laag is tijdens idling, is het aandeel van de idling bij de CO₂-uitstoot significant kleiner dan bij de NO_x-uitstoot: de twee idle-pieken hebben een bijdrage van minder dan 10% aan de totale CO₂-uitstoot.

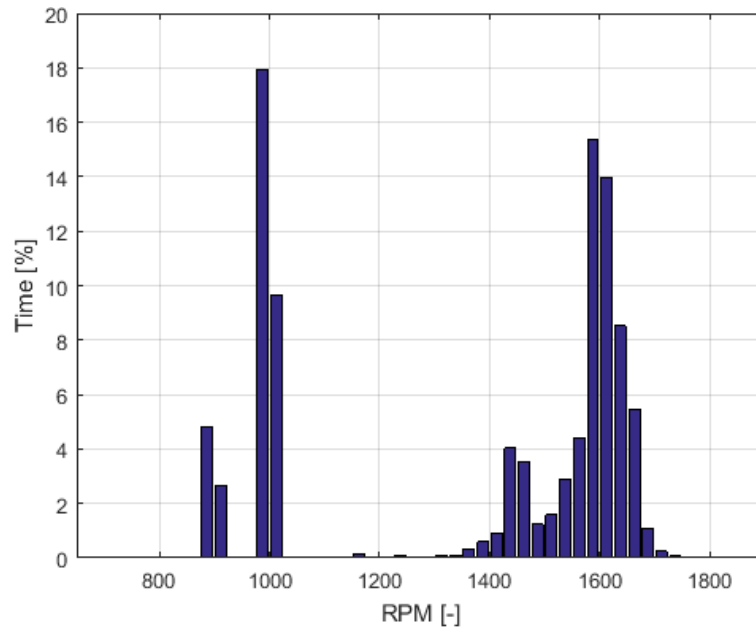
4. Verhouding NO_x uitstoot – CO₂ uitstoot

Figuur 6 geeft de verhouding tussen de NO_x-uitstoot en de CO₂-uitstoot weer. Dit is een goede parameter in relatie tot de typekeuringseisen. De gemeten graafmachine heeft een Stage IV motor; volgens de eisen van de Stage IV motor mag deze ongeveer 0.6 gram NO_x per kilogram CO₂ uitstoten op de test⁶. Boven de 1400 toeren per minuut lijkt de NO_x-emissie onder de limiet te zijn. Bij lage toeren en stationair draaien is het geleverde vermogen en de CO₂-uitstoot beperkt. De NO_x-CO₂-verhouding laat echter zien dat het NO_x-reductiesysteem onder de 1000 RPM weinig effectief is. Daardoor leveren deze toerentallen toch een grote bijdrage aan de totale NO_x-emissie (figuur 3). Vanaf ca. 1400 RPM functioneert het NO_x-emissiecontrolesysteem goed en zijn de emissies laag. Onder de 1400 RPM worden hogere emissies waargenomen.

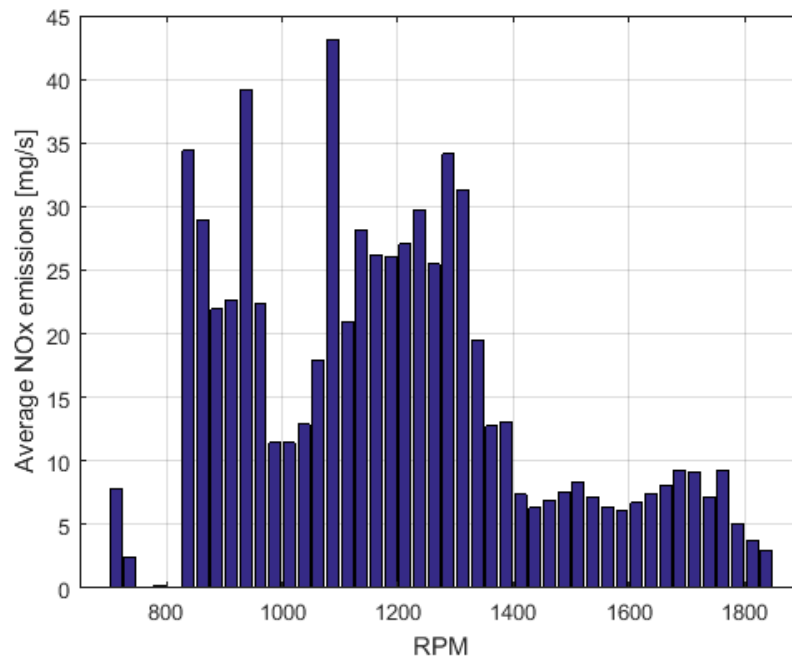
5. NO_x-uitstoot en toerental over tijd

In Figuur 7 is de NO_x-uitstoot en het bijbehorende toerental voor twee verschillende periodes geplot. Tijdens beide periodes is hetzelfde gedrag geobserveerd: wanneer de machine enige tijd idlet (150-250 secondes), gaat de NO_x-uitstoot omhoog. Dit gedrag is zowel bij de idle-stand van ~900 RPM gemeten, als bij de idle-stand van ~1000 RPM. De oorzaak van deze stijging is niet vastgesteld. Het lijkt erop dat de AdBlue-dosering van de SCR stopt bij idling. AdBlue-dosering bij idling is doorgaans lastig of onmogelijk omdat de uitlaatgastemperatuur te laag is. Na enige tijd is de ammonia-buffering van de SCR leeg. Daardoor kan geen NO_x meer omgezet worden naar onschadelijke componenten. Dit zou eventueel opgevangen kunnen worden met het EGR systeem; onder de huidige wetgeving is deze maatregel echter niet noodzakelijk.

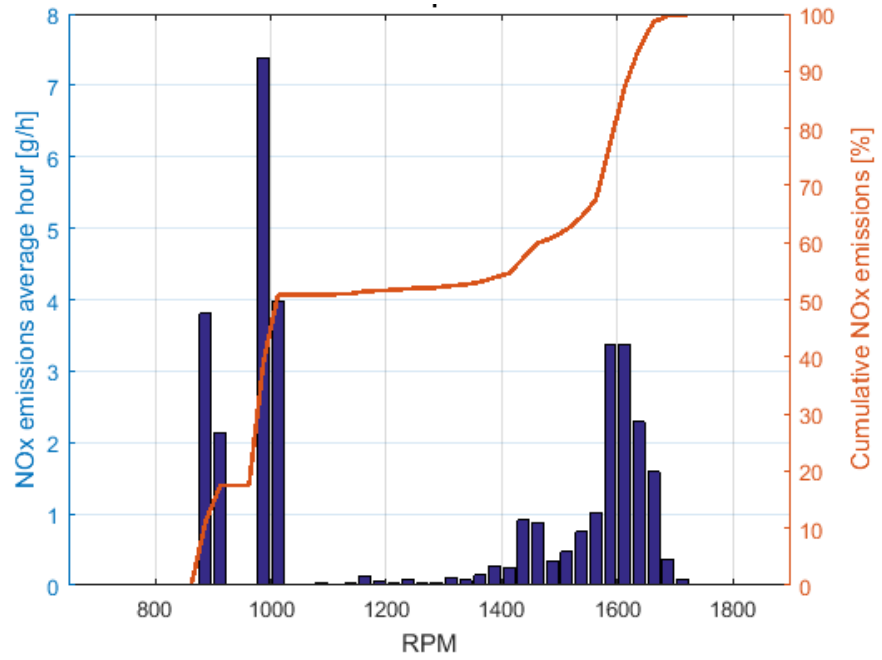
⁶ Berekend aan de hand van de limietwaarde van 0.4 g/kWh in combinatie met een gemiddeld motorrendement.



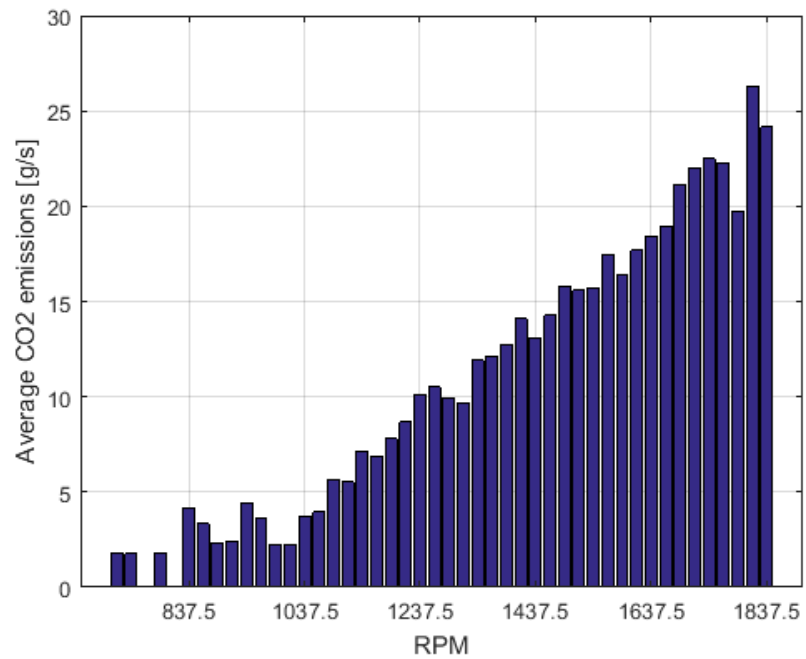
Figuur 1: Frequentie van toerentallen in de tijd. De totale meettijd bedraagt 131 uur. In een gemiddeld uur levert de graafmachine 65% van de tijd arbeid (35% van de tijd is idling).



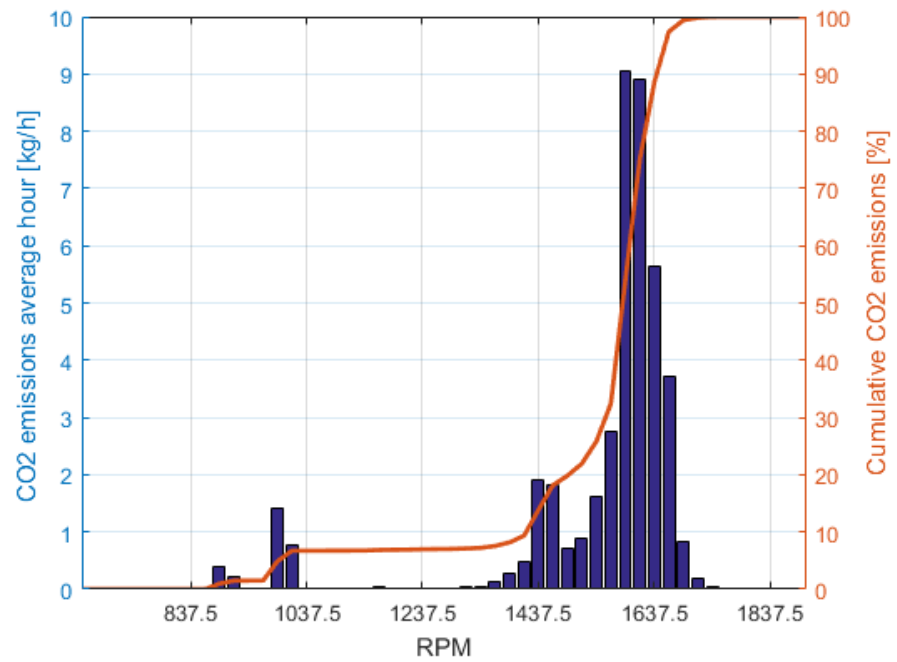
Figuur 2: Gemiddelde NO_x-emissies per RPM-bin.



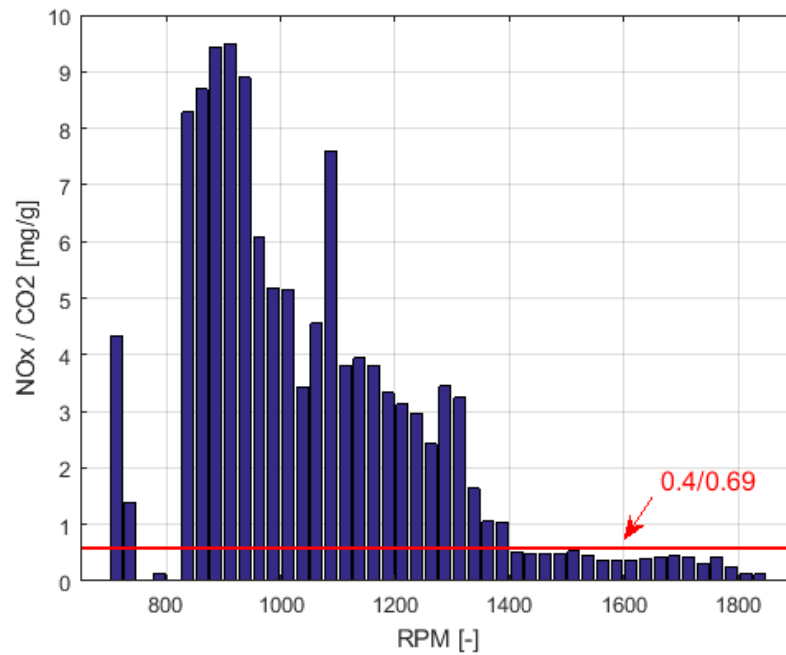
Figuur 3: NO_x-emissies en cumulatieve NO_x-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale NO_x-emissie per uur bedraagt gemiddeld 34 gram.



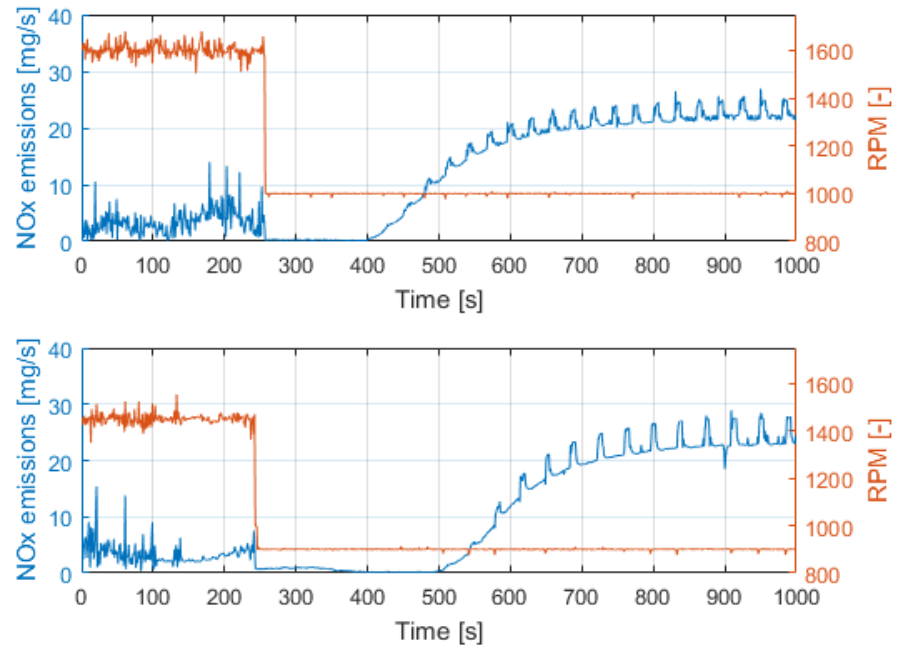
Figuur 4: Gemiddelde CO₂-uitstoot per RPM-bin.



Figuur 5: CO₂-emissies en cumulatieve CO₂-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale CO₂-emissie per uur bedraagt gemiddeld 42 kilogram.



Figuur 6: De verhouding tussen de NO_x-uitstoot en de CO₂-uitstoot per RPM-bin in de praktijk. De rode lijn geeft een indicatie van de NO_x-limiet voor deze motor op de wettelijk voorgeschreven laboratorium test behorende bij hogere last: 0.4 g is de limietwaarde voor de NO_x-emissie per kWh, 0.69 kg is de CO₂-emissie per kWh.



Figuur 7: De NO_x-uitstoot en het bijbehorende toerental over tijd, in twee instanties waarbij de motor begint te idlen. Dit gedrag kan mogelijk worden toegeschreven aan het stoppen van AdBlue injectie in de SCR.

4 Laadschop

Laadschoppen zijn de derde groep in aantallen van mobiele werktuigen in Nederland. De geselecteerde laadschop voldoet aan de voorlaatste wetgevingseisen: Stage III b.

Daarmee mag deze machine een hogere NO_x-uitstoot hebben dan de graafmachine besproken in het vorige hoofdstuk.



Hetzelfde type en model laadschop als gemeten in het huidige project.

bron: <https://www.flickr.com/photos/volvocena/sets/72157630607958352/>

Type werktuig	Laadschop
Stage motor	Stage III B
Vermogen motor	129 kW
Nabehandelingssysteem	EGR

4.1 Samenvatting bevindingen

Het monitoren van de laadschop heeft geleid tot de volgende bevindingen:

- De gemonitorde laadschop heeft geen SCR. Het gevolg hiervan is dat
- de verhouding tussen de NO_x-emissies bij belaste en onbelaste motor minder groot is dan bij de Stage IV graafmachine uit hoofdstuk 4.
- Omdat de laadschop meer dan de helft van de tijd stationair draait, leidt stationair draaien ook bij deze machine tot een groot deel van de uitstoot: 17% van het totale brandstofverbruik en bijna de helft van de totale NO_x-uitstoot.
- De verhouding tussen de NO_x-emissie en de CO₂-emissie neemt een factor 3 toe wanneer de last verlaagd wordt van hoge last tot nul. Met de Stage IV SCR technologie uit het vorige hoofdstuk was dit een factor 10. Voor Stage III b lijkt daarom, bij een vergelijkbaar aandeel stationair draaien, de bijdrage van idle draaien aan de emissie minder significant.

De kerngetallen van de uitgevoerde meting staan verzameld in Tabel 6.

Op de verschillende aspecten wordt uitgebreider ingegaan in de volgende secties.

Tabel 6: Kerngetallen meetresultaten van de laadschop.

Hoeveelheid verzamelde data	344 uur
Tijd idling per uur	34 minuten/uur
Gemiddelde CO ₂ -uitstoot per uur	18 kilogram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per uur	141 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot idling (~700 RPM)	106 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per kWh	4.9 gram/kWh

4.2 Resultaten

1. Inzet

Op basis van de gemeten toerentallen (zie Figuur 8), kan geconcludeerd worden dat de laadschop het merendeel van de tijd idle draait. De belasting van de laadschop varieert sterk, en dat vertaalt zich in een wijde range van toerentallen die allemaal vergelijkbaar voorkomen. Alleen het idle-toerental (rond de 700 toeren per minuut) springt eruit als een veel voorkomende motorsnelheid.

2. NO_x-emissies

In Figuur 9 worden de gemiddelde NO_x-emissies per RPM-bin gepresenteerd. Hierin is te zien dat bij het vrij constante idle-toerental van 700 RPM de NO_x-emissie lager is dan tijdens de dynamische operatie. Wanneer deze gegevens echter gecombineerd worden met de duur waarin de machine idlet (zie Figuur 10), bedraagt de NO_x-uitstoot tijdens idling alsnog 41% van de totale uitstoot.

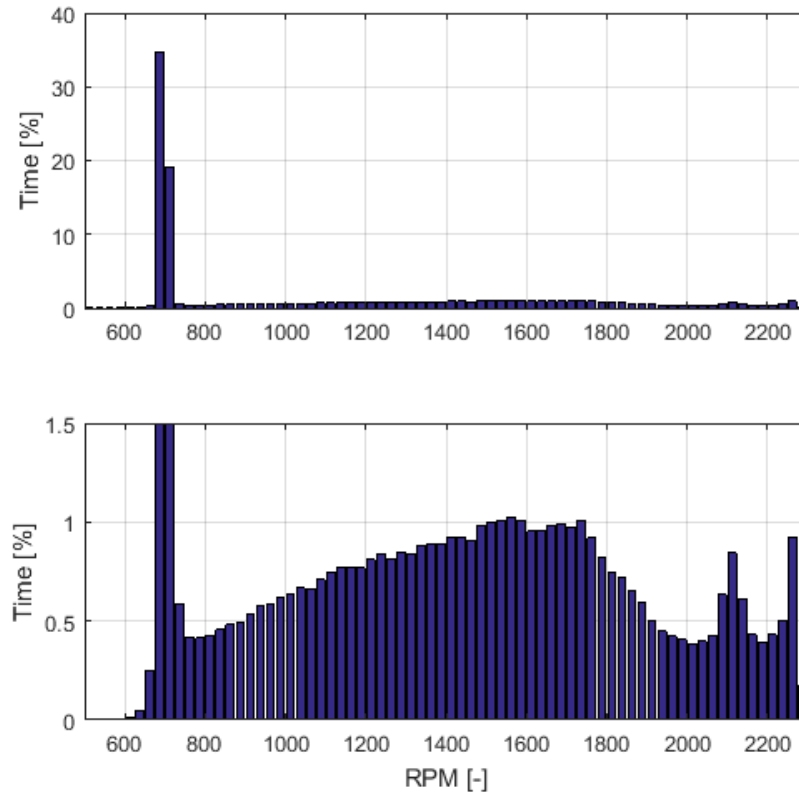
3. CO₂-emissies

De CO₂-emissies van deze laadschop laten een standaard plaatje zien (Figuur 11 en Figuur 12). De CO₂-uitstoot bij idling is ongeveer 10% van de maximale CO₂-uitstoot bij de hoogste vermogens. Bij inzet met een beperkt aandeel idling speelt daarom de CO₂-uitstoot gedurende idling een ondergeschikte rol. In dit geval is 3 kilogram CO₂ van de 18 kilogram CO₂ per uur het gevolg van idling. Dit is 18% van het totale brandstofverbruik. Een aandeel idling zal altijd onderdeel zijn van normale inzet, maar gezien het hoge percentage is een instructie voor het uitzetten van de motor bij langere periodes stilstand zeker te overwegen.

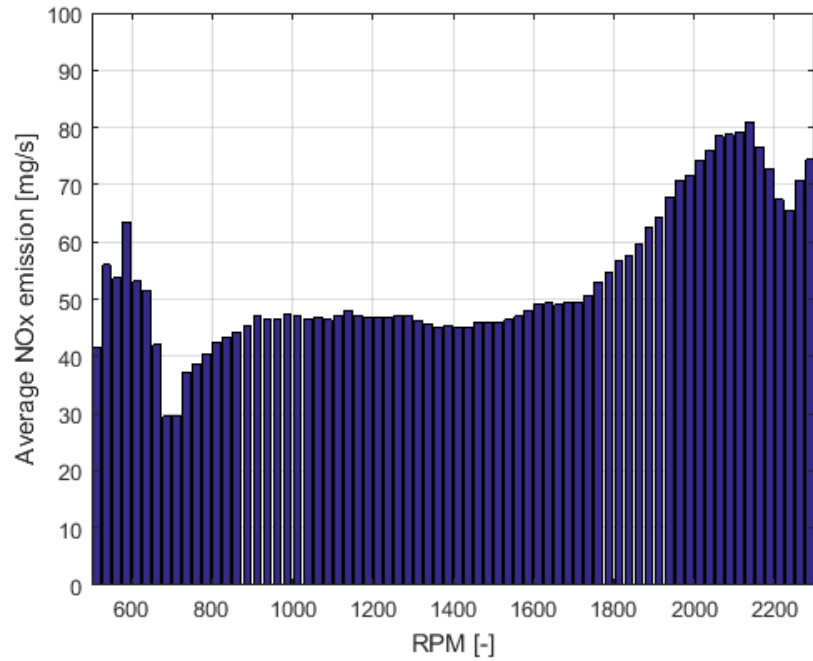
4. Verhouding NO_x-emissies tot CO₂-emissies

De toename in NO_x/CO₂ bij lagere toerentallen is duidelijk zichtbaar in Figuur 13. Zonder NO_x-emissiecontroletechnologie zou deze ratio constant zijn. De afname bij hogere toerentallen heeft mogelijk te maken met een regelstrategie die bij hogere last beter functioneert. De gladde lijn suggereert dat de regelstrategie ook bij dynamische wisselingen in motorlast redelijk functioneert. De lijn in de grafiek is gebaseerd op een verband tussen geleverd vermogen en CO₂. Bij hogere motorlasten levert 650-750 g CO₂ typisch één kWh arbeid in een grotere dieselmotor in normaal gebruik. Dat maakt het mogelijk om de emissielimiet van 3.3 g/kWh te vertalen naar gram NO_x per kilogram CO₂. Bij lagere motorlasten is de hoeveelheid CO₂ per kWh hoger en zou de lijn naar beneden af moeten buigen indien de emissielimiet voor alle motorlasten geldt. In plaats daarvan zijn lage lasten niet, of nauwelijks, in de wettelijke vereisten vertegenwoordigd. De consequentie van hiervan lijkt te zijn dat NO_x-emissies juist hoger worden.

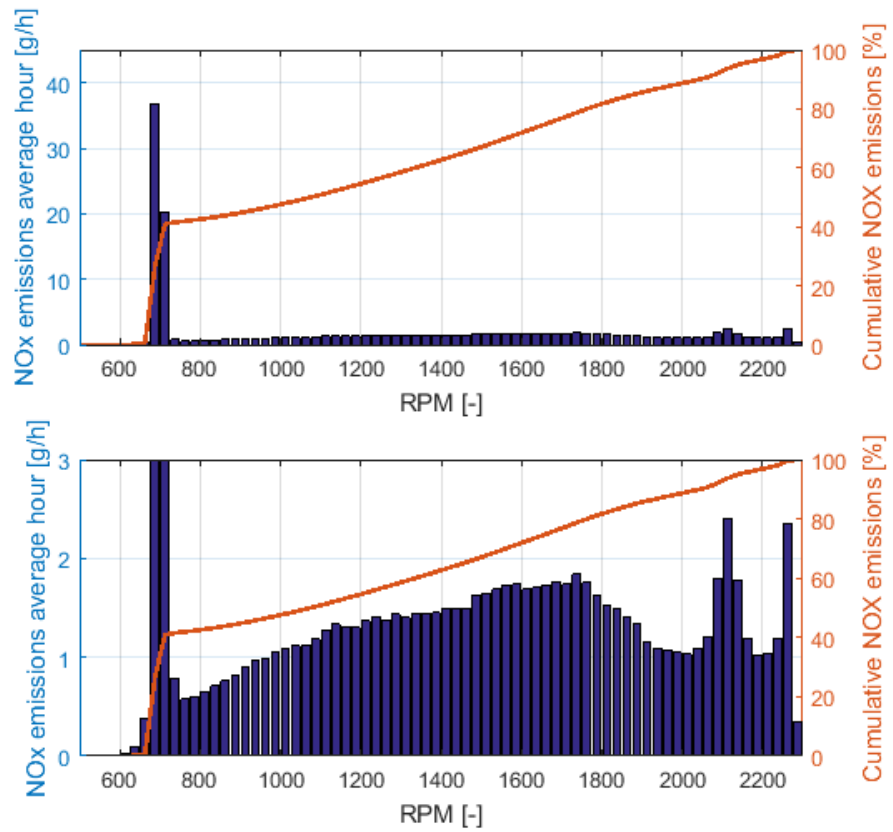
Voor sommige motoren is de dynamische belasting de oorzaak van hoge NO_x -emissies bij, bijvoorbeeld, het op-toeren van de motor. Dit is zichtbaar als een hogere NO_x/CO_2 verhouding bij toerentallen waarop de motor beperkte last draait. Voor deze motor lijkt dat niet zo te zijn. Slechts in enkele gevallen is er een korte verhoging van de NO_x/CO_2 boven het gemiddelde wanneer het toerental vanaf idling weer toeneemt.



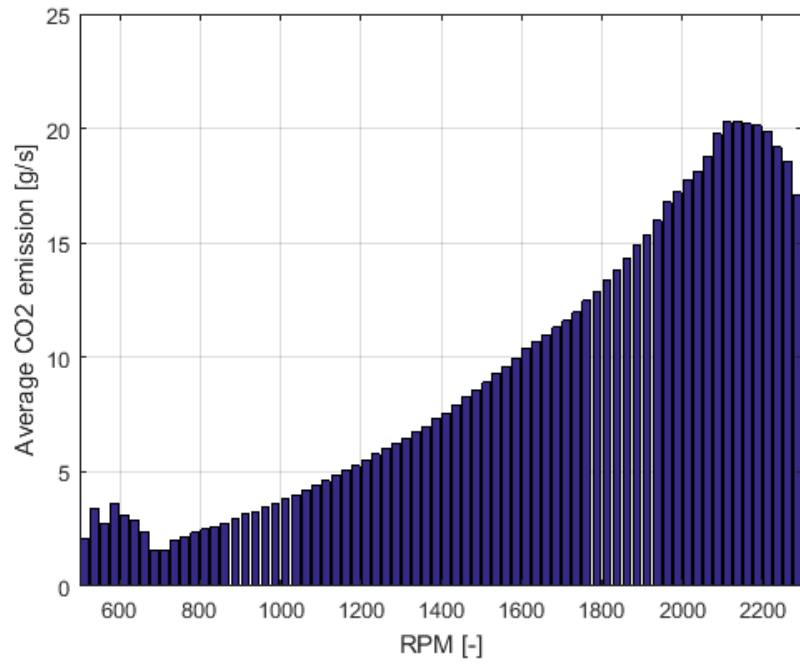
Figuur 8: Toerental vs tijd. De totale meettijd bedraagt 344 uur. In een gemiddeld uur levert de laadschop 43% van de tijd arbeid (57% van de tijd is idling).



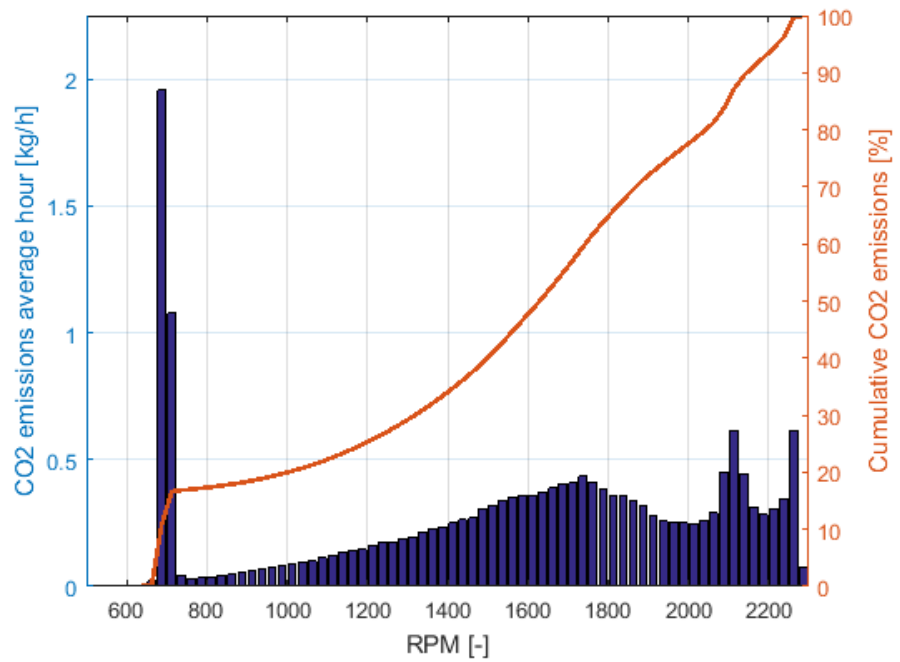
Figuur 9: Gemiddelde NO_x-emissies per RPM-bin.



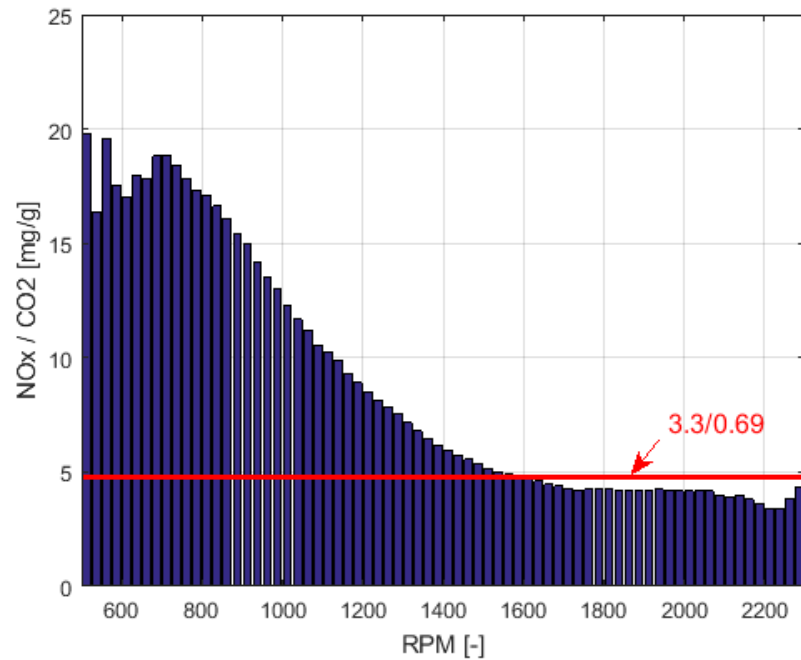
Figuur 10: NO_x-emissies en cumulatieve NO_x-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale NO_x-emissie per uur bedraagt gemiddeld 141 gram.



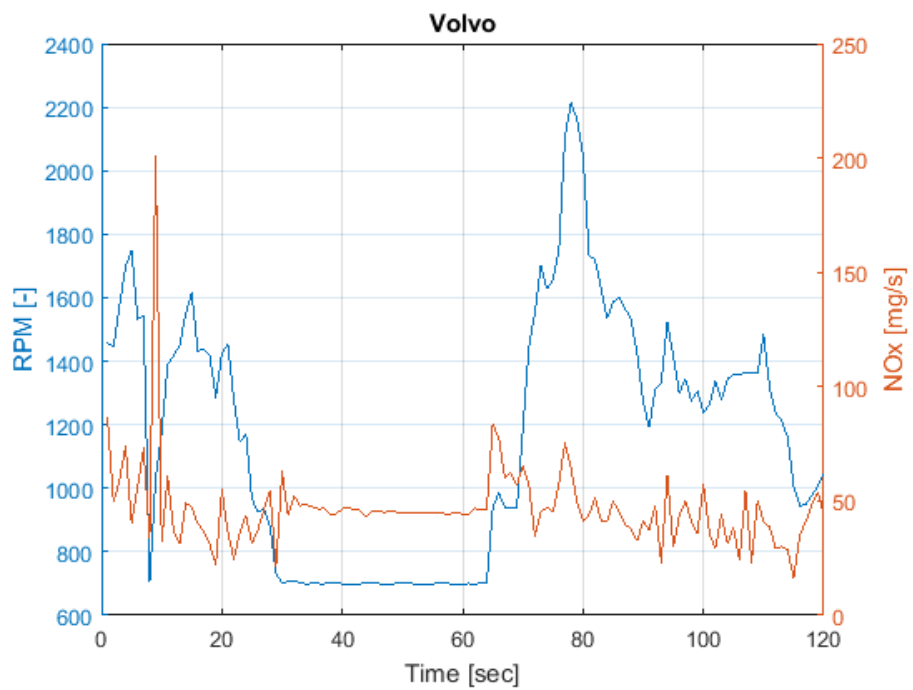
Figuur 11: Gemiddelde CO₂-emissies per RPM-bin.



Figuur 12: CO₂-emissies en cumulatieve CO₂-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale CO₂-emissie per uur bedraagt gemiddeld 18 kilogram.



Figuur 13: De verhouding tussen de NO_x-uitstoot en de CO₂-uitstoot per RPM-bin in de praktijk. De rode lijn geeft een indicatie van de NO_x-limiet voor deze motor op de wettelijk voorgeschreven laboratorium test behorende bij hogere last: 3.3 is de limietwaarde voor de NO_x-emissie per kWh, 0.69 kg is de CO₂-emissie per kWh.



Figuur 14: De NO_x-uitstoot en het bijbehorende toerental over tijd. Bij lage last zijn de NO_x-emissies stabiel hoog.

5 Graafmachine 2

Omdat de graafmachines een grote groep machines vormt is er een tweede graafmachine geselecteerd. Deze graafmachine voldoet aan Stage III b, zoals de laadschop uit het vorige hoofdstuk.



Hetzelfde type en model graafmachine als gemeten in het huidige project.

bron: <https://www.lectura-specs.com/en/model/construction-machinery/crawler-excavators-komatsu/pc290lc-10-1147798>

Type werktuig	Graafmachine
Stage motor	Stage III B
Vermogen motor	159 kW
Nabehandelingssysteem	EGR

5.1 Samenvatting bevindingen

Het monitoren van graafmachine 2 heeft geleid tot de volgende bevindingen:

- Globaal zijn de emissiekenmerken van deze Stage III b machine vergelijkbaar met tot iets lager dan de vorige Stage III b, maar het lijkt erop dat NO_x-emissies bij dynamische belasting hoger zijn dan bij de laadschop. De specifieke inzet, naast stationair draaien, is daarom belangrijk geweest voor de emissies.
- Ook hier lijkt de NRMM-emissiewetgeving bepalend voor het verschil in de emissies bij de verschillende motorbelasting. Voor motorbelasting bij constante toerentallen zijn de eisen strenger dan bij dynamische inzet.
- Het stationair draaien van deze machine is beperkt. De bijdrage van stationair draaien aan de totale NO_x-uitstoot is ongeveer 12%; de bijdrage ervan aan het totale brandstofverbruik bedraagt ongeveer 4%.

De kerngetallen van de uitgevoerde meting staan verzameld in Tabel 7.

Op de verschillende aspecten wordt uitgebreider ingegaan in de volgende secties.

Tabel 7: Kerngetallen meetresultaten van graafmachine 2.

Hoeveelheid verzamelde data	291 uur
Tijd idling per uur	11 minuten/uur
Gemiddelde CO ₂ uitstoot per uur	53 kilogram/uur
Gemiddelde NO _x uitstoot per uur	149 gram/uur
Gemiddelde NO _x uitstoot idling (~1050 RPM)	91 gram/uur
Gemiddelde NO _x uitstoot per kWh	2.8 gram/kWh

5.2 Resultaten

1. Inzet

Ook deze machine idlet een deel van zijn tijd, maar minder dan de machines besproken in de voorgaande hoofdstukken. Ongeveer 18% van de tijd draait deze motor stationair. Het gevolg voor de totale NO_x-uitstoot is nog steeds relevant: ongeveer 12% van de NO_x-uitstoot komt van idling.

Voor de CO₂-uitstoot is het aandeel van idling veel lager: ongeveer 4%.

2. NO_x-emissies

De tweede graafmachine lijkt meer moeite te hebben met dynamisch gedrag dan de laadschop in het vorige hoofdstuk. De NO_x-emissies zijn hoger bij toerentallen die minder voorkomen, en waarschijnlijk alleen in overgangen tussen verschillende werkpunten van de motor zitten (zie Figuur 16).

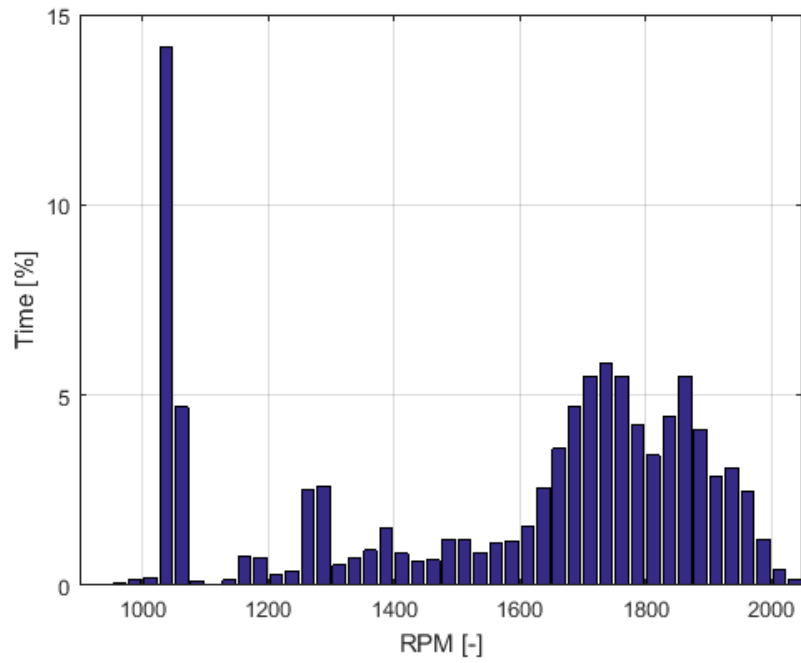
Het werkpunt bij 1700 toeren heeft een belangrijk aandeel in de tijd, maar zoals in Figuur 16 kan worden gezien geeft het op-toeren naar 1700 toeren bij 1600 toeren de hoogste NO_x-uitstoot van deze motor. Een tweede piek bij 1200 toeren hangt mogelijk samen met de overgang van idling naar motorbelasting, maar is door het beperkte aandeel in de tijd nauwelijks relevant voor de totale uitstoot (zie Figuur 17).

3. Verhouding NO_x-emissie tot CO₂-emissie

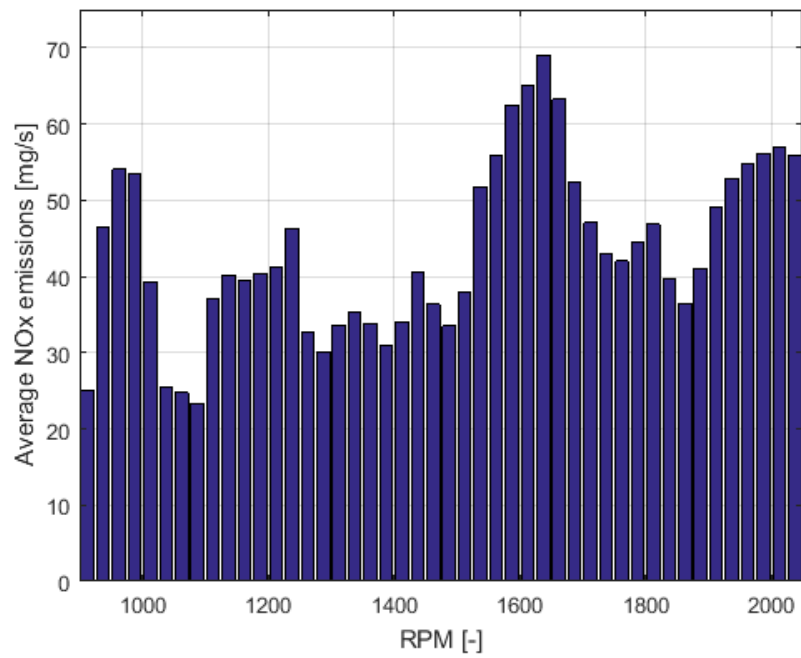
In alle hogere motorlasten voldoet deze machine aan de gestelde emissielimieten van Stage III b, zie Figuur 20. Bij lagere motorlasten zijn de emissies, in verhouding, 3 tot 5 keer hoger. Als deze lagere motorlasten beperkt voorkomen is dat geen probleem. De machine draait echter een kwart van de tijd op de lagere motorlast; dit is geen te verwaarlozen aandeel.

4. NO_x-uitstoot en toerental over tijd

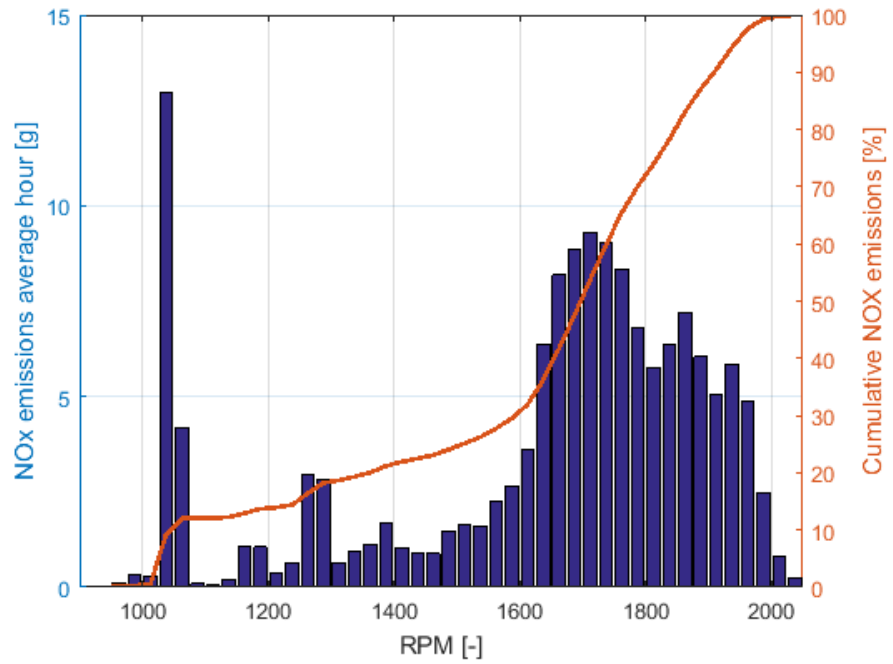
Het tijdsignaal van de motor (Figuur 21) laat zien dat de variabele belasting doorwerkt in de NO_x-emissies. De NO_x-uitstoot varieert bij hogere toerentallen, en bij wisseling van toerental en belasting kost het enige tijd totdat de NO_x-emissies lager zijn na de initiële piek.



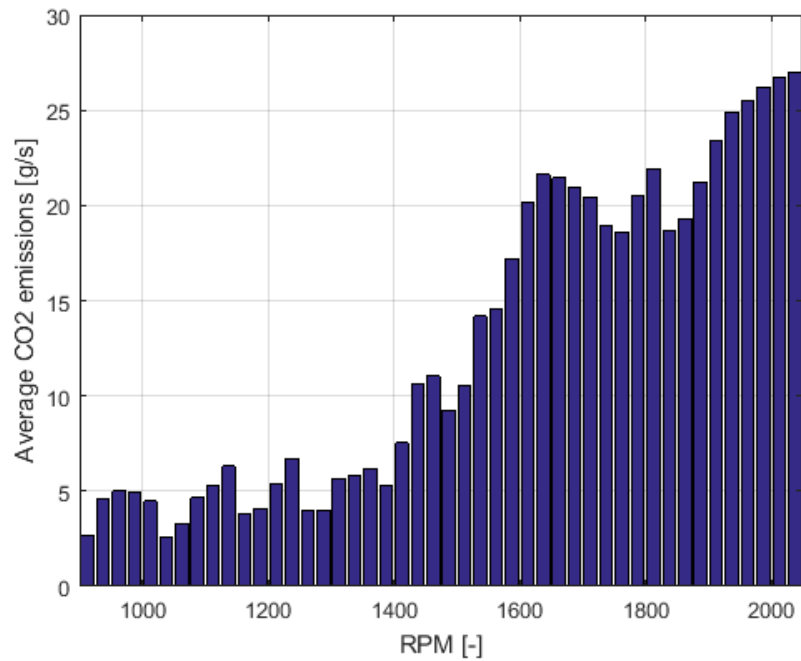
Figuur 15: Toerental vs tijd. De totale meettijd bedraagt 291 uur. In een gemiddeld uur levert de graafmachine 82% van de tijd arbeid (18% van de tijd is idling).



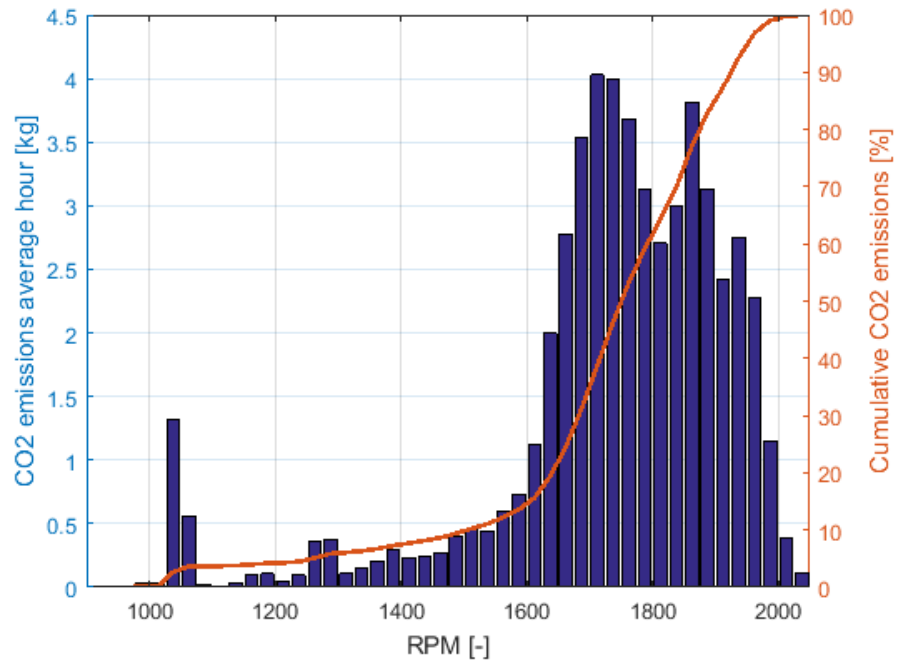
Figuur 16: Gemiddelde NO_x-emissies per RPM bin.



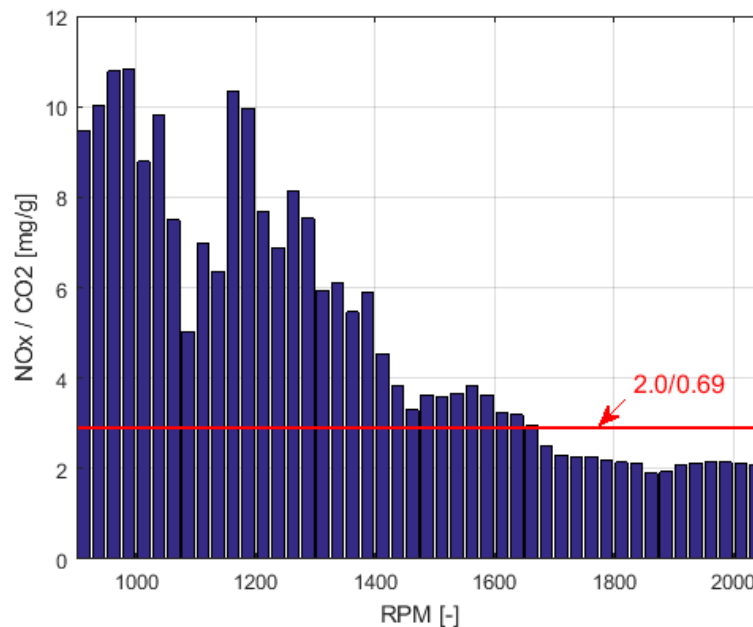
Figuur 17: NO_x-emissies en cumulatieve NO_x-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale NO_x-emissie per uur bedraagt gemiddeld 149 gram.



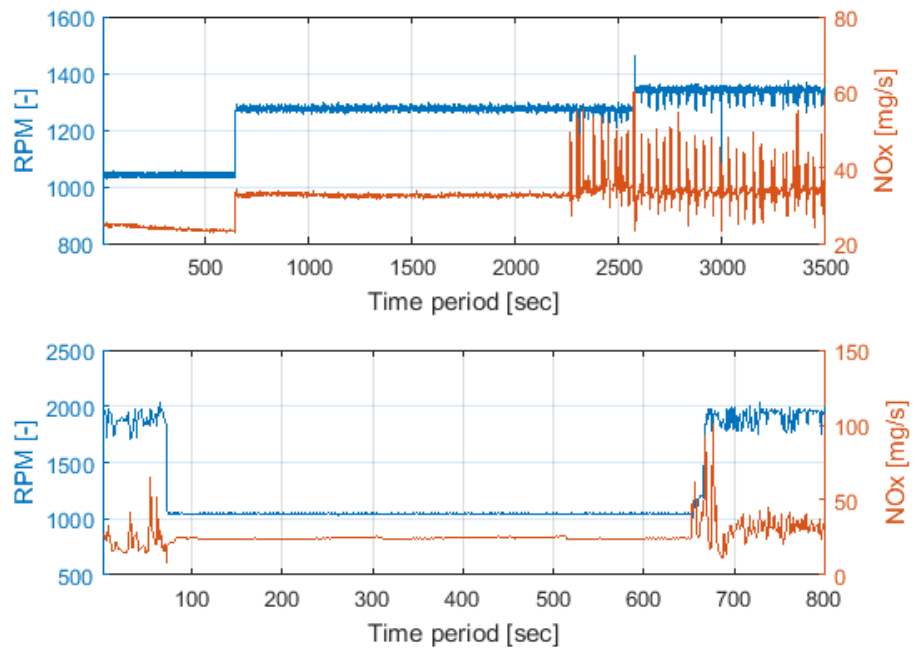
Figuur 18: Gemiddelde CO₂-emissies per RPM bin.



Figuur 19: CO₂-emissies en cumulatieve CO₂-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale CO₂-emissie per uur bedraagt gemiddeld 53 kilogram.



Figuur 20: De verhouding tussen de NO_x-uitstoot en de CO₂-uitstoot per RPM-bin in de praktijk. De rode lijn geeft een indicatie van de NO_x-limiet voor deze motor op de wettelijk voorgeschreven laboratorium test behorende bij hogere last: 2.0 g is de limietwaarde voor de NO_x-emissie per kWh, 0.69 kg is de CO₂-emissie per kWh.



Figuur 21: De NO_x-uitstoot en het bijbehorende toerental over tijd.

6 Tractor

Hoewel een tractor vooral bekend is van de landbouw, wordt deze bijvoorbeeld voor het verplaatsen van grond ook ingezet in de bouw. Het is één van de grootste groepen machines in Nederland. De tractor die gemonitord is, is van een loonbedrijf actief in de infra en grondverzet. De emissie-eisen van Stage IV zijn van toepassing.



Hetzelfde type en model tractor als gemeten in het huidige project. bron http://www.valtra.com/wwwresources/literature/com/N4_ENG_18092015.pdf

Type werktuig	Tractor
Stage motor	Stage IV
Vermogen motor	114 kW
Nabehandelingssysteem	SCR

6.1 Samenvatting bevindingen

De volgende bevindingen zijn gedaan tijdens het monitoren van de tractor:

- Deze tractor draait een kwart van de tijd stationair.
- Deze machine moet voldoen aan de strengste emissie-eisen van Stage IV. In de praktijk voldoet deze tractor gemiddeld gezien bij geen enkel toerental aan deze eisen. Waar de Stage IV graafmachine nog wel aan de emissie-eisen voldoet bij een hoog toerental en hoge last, is dit voor deze Stage IV tractor niet het geval.
- De emissies nemen verhoudingsgewijs (op basis van het brandstofverbruik) met een factor tien toe bij lagere motorlast. Dit heeft als gevolg dat de 25% van de tijd dat deze machine stationair draait, ook verantwoordelijk is voor een vergelijkbaar percentage van de totale NO_x-emissies.

De kerngetallen van de uitgevoerde meting staan verzameld in Tabel 8. Op de verschillende aspecten wordt uitgebreider ingegaan in de volgende secties.

Tabel 8: Kerngetallen meetresultaten van de tractor.

Hoeveelheid verzamelde data	44 uur
Tijd idling per uur	15 minuten/uur
Gemiddelde CO ₂ -uitstoot per uur	30 kilogram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per uur	70 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot idling (~1050 RPM)	64 gram/uur
Gemiddelde NO _x -uitstoot per kWh	1.8 gram/kWh

6.2 Resultaten

1. Inzet

Deze machine idlet een kwart van de tijd. Tijdens het idlen draait de motor ongeveer 700 toeren per minuut. Ook bij deze machine zijn bij 1600 toeren (geassocieerd met dynamische motorbelasting, ofwel op-toeren van de motor) de NO_x-emissies het hoogst.

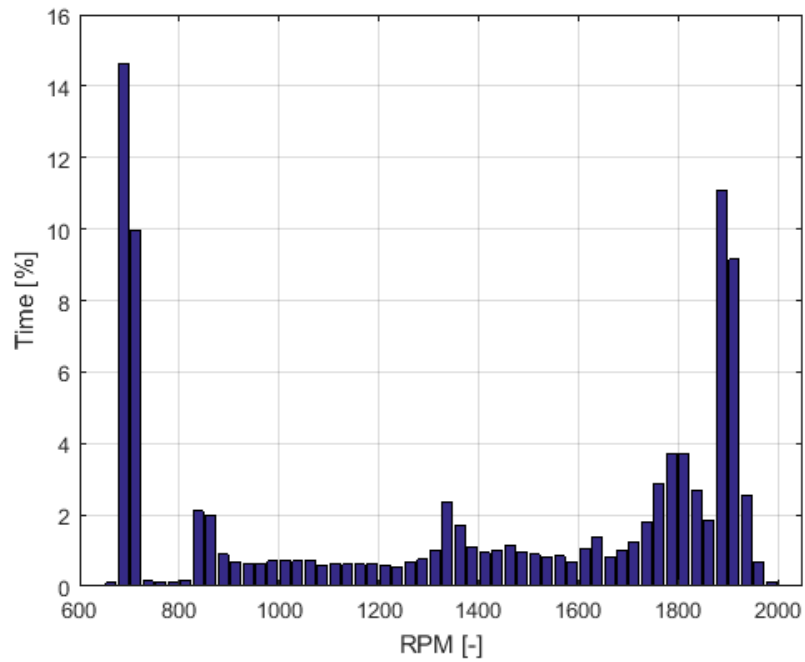
2. NO_x-emissies

De NO_x-emissie bij idling (zie Figuur 23 en Figuur 24) bedraagt een groter gedeelte van de totale NO_x-uitstoot dan bij de vorige machine het geval is, omdat de specifieke emissies bij idling hoger zijn. Absoluut zijn de emissies lager, omdat dit een kleinere motor is dan die van de graafmachine in het vorige hoofdstuk.

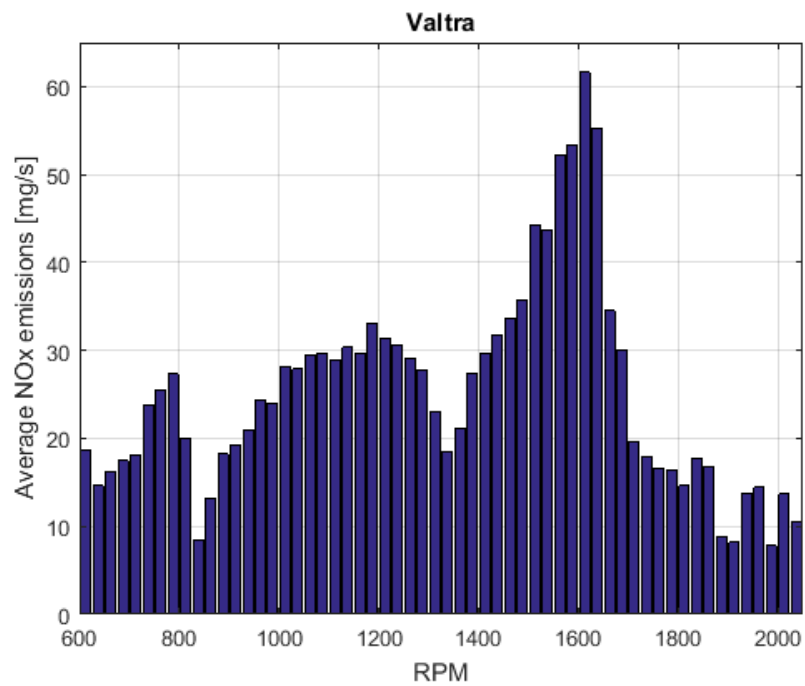
De pieken in de emissies bij 1000 en 1600 toeren zijn een gevolg van de dynamische belasting van de motor. Het aandeel in de tijd bij deze toerentallen is beperkt, maar het beeld van de twee pieken is duidelijk genoeg om het effect van dynamische belasting terug te zien. De NO_x-emissies van deze tractor zullen sterk afhangen van twee aspecten in de inzet: het aandeel idling en de dynamiek in de motorbelasting. Dat beeld wordt bevestigd door naar de signalen te kijken van de NO_x-uitstoot bij variaties in de toerentallen, zie Figuur 28. Het op-toeren wordt gevolgd door een minuut of langer met hogere emissies, voordat de NO_x-uitstoot stabiliseert rond een lagere waarde.

3. Verhouding NO_x-emissies tot CO₂-emissies

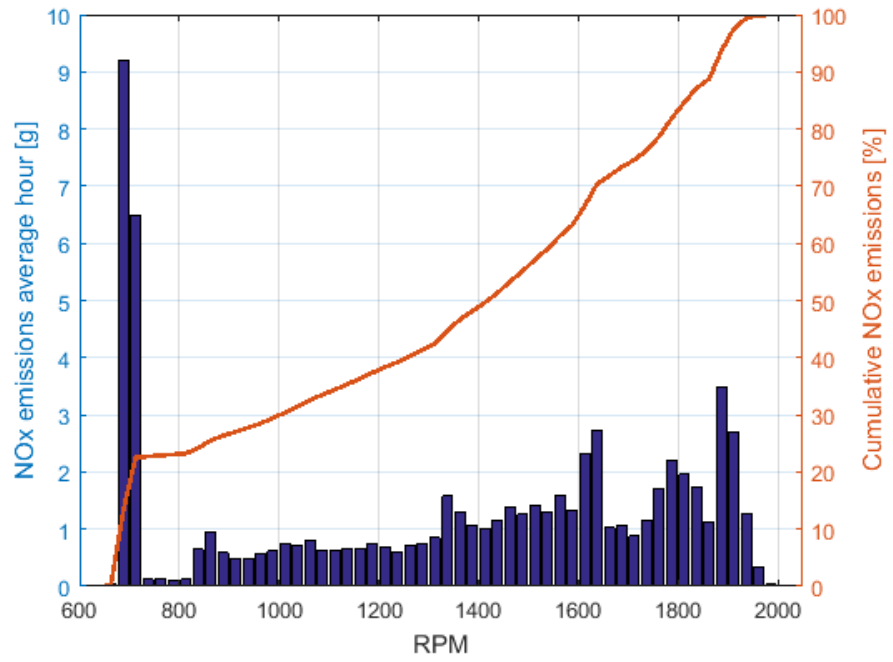
In Figuur 27 wordt de verhouding tussen de NO_x- en CO₂-emissies weergegeven. Zoals ook bij de andere machines het geval was, neemt deze waarde af met toenemend toerental. Rond de 1900 RPM, het toerental waarop deze machine het grootste gedeelte van de tijd last draait, benadert dit werktuig de emissielimiet. De variaties in de NO_x/CO₂-emissies over de toerentallen lijken samen te hangen met de dynamiek.



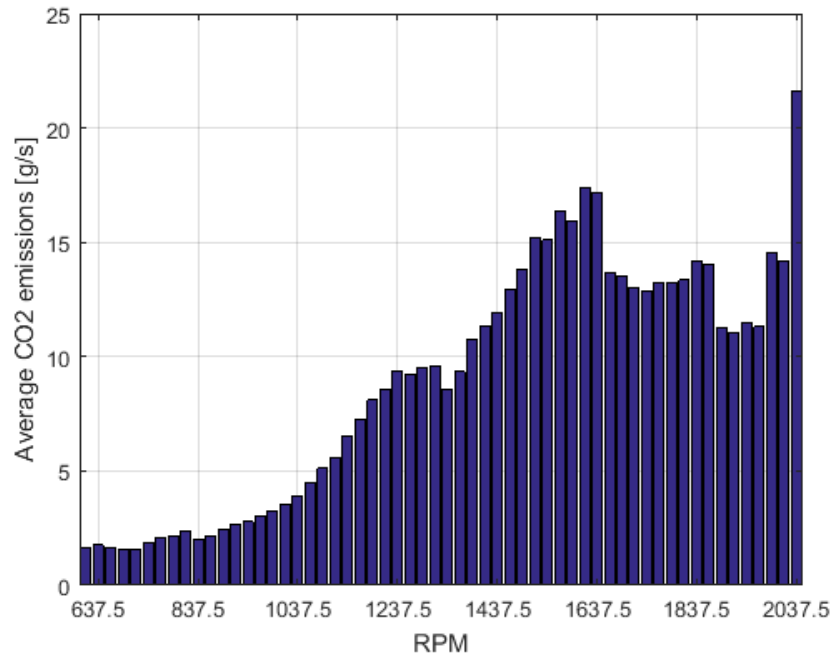
Figuur 22: Toerental vs tijd. De totale meettijd bedraagt 44 uur. In een gemiddeld uur levert de tractor 75% van de tijd arbeid (25% van de tijd is idling).



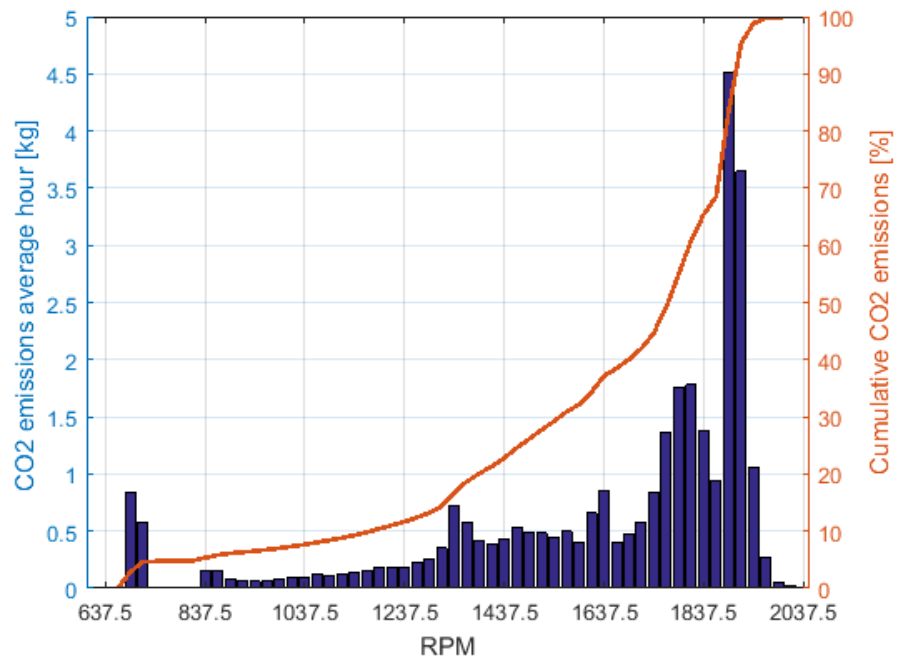
Figuur 23: Gemiddelde NO_x-emissies per RPM-bin.



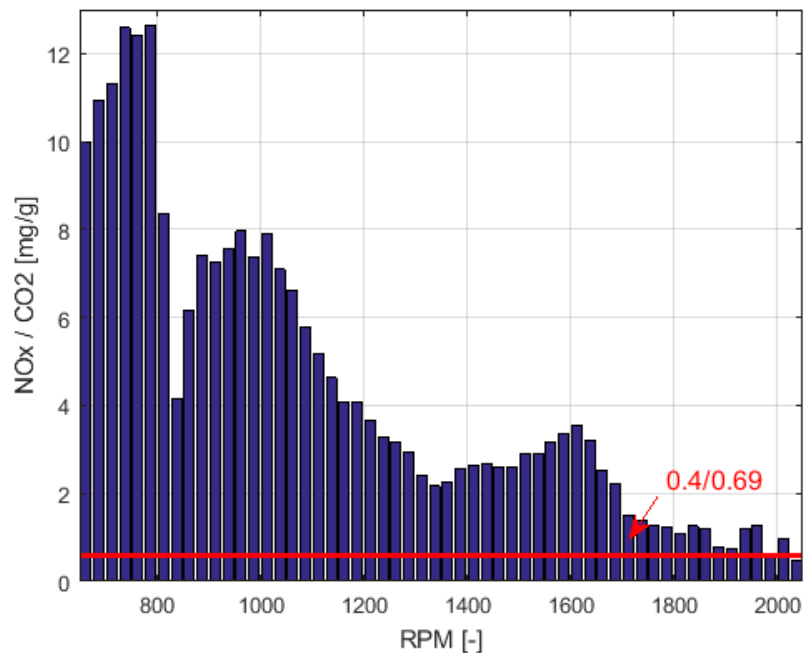
Figuur 24: NO_x-emissies en cumulatieve NO_x-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale NO_x-emissie per uur bedraagt gemiddeld 70 gram.



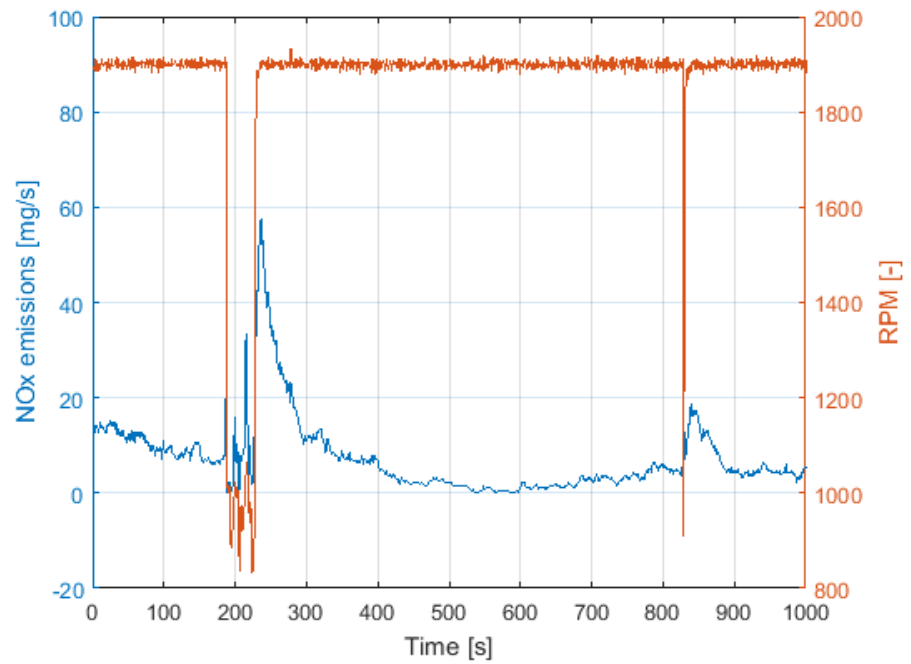
Figuur 25: Gemiddelde CO₂-uitstoot per RPM-bin.



Figuur 26: CO₂-emissies en cumulatieve CO₂-emissies vs toerental, voor een gemiddeld draaiuur. De totale CO₂-emissie per uur bedraagt gemiddeld 30 kilogram.



Figuur 27: De verhouding tussen de NO_x-uitstoot en de CO₂-uitstoot per RPM-bin in de praktijk. De rode lijn geeft een indicatie van de NO_x-limiet voor deze motor op de wettelijk voorgeschreven laboratorium test behorende bij hogere last: 0.4 g is de limietwaarde voor de NO_x-emissie per kWh, 0.69 kg is de CO₂-emissie per kWh.



Figuur 28: De NO_x-uitstoot en het bijbehorende toerental over tijd laat zien dat na een tijdelijk laag toerental de NO_x-emissies voor enkele minuten hoger zijn.

7 Conclusies

De vier geselecteerde machines komen uit de groepen met een groot aandeel in de totale emissies van machines in Nederland. Uit de metingen van enkele weken aan deze machines blijken de volgende zaken:

- De gemeten machines draaien een substantieel aandeel van de tijd stationair: het aandeel stationair draaien varieert tussen de 18% en 57% van de totale draaitijd.
- Bij stationair draaien stoten de machines een substantieel deel van hun totale NO_x-emissies uit: 12% tot 51% van de totale NO_x-uitstoot van deze werktuigen is toe te schrijven aan stationair draaien.

Op de verschillende bouwmachines zijn verschillende emissiecontrole-technologieën toegepast. Voor bouwmachines met dezelfde emissiecontrole-technologie zijn alsnog verschillen geconstateerd in de effectiviteit. De hoge emissies bij lage last zijn een uniform probleem dat groter lijkt te worden met voortschrijdende emissie-eisen. Dit heeft er waarschijnlijk mee te maken dat lage last voor het halen van de typekeuringstest van beperkt belang is. Hetzelfde verschijnsel heeft ook lange tijd gespeeld bij HD-voertuigen (vrachtwagens en bussen). In de wetgeving is dit uiteindelijk opgelost met de In Service Conformity praktijktest als onderdeel van de typekeuring. Maar ook bij zwaar wegverkeer blijft idling een kritisch geval, op de rand van de wetgevingseisen. Daarnaast lijken hogere emissies bij dynamische inzet, waarbij de motorlast varieert, in sommige gevallen ook een probleem te zijn.

Stationair draaien leidt nog steeds tot substantieel brandstofverbruik: van een paar procent tot twintig procent. Daarmee leidt deze studie ook tot beter inzicht in hoe op simpele wijze brandstof kan worden bespaard en emissies kunnen worden gereduceerd. Mogelijk zijn er verschillen tussen bedrijven en operators. Om dat in kaart te brengen vraagt een grotere studie.

Wetgeving en de praktijk

De NO_x-uitstoot van de vier bouwmachines ligt in de praktijk gemiddeld hoger dan de emissielimiet in de typekeuringstest in het laboratorium. Gegeven de lagere uitstootwaarden bij hoge last is de verwachting dat deze machines aan de wettelijke eisen voldoen. Bij de strengere Stage IV limiet ligt de absolute uitstoot wel lager dan bij de minder strenge Stage III b limiet, maar de relatieve afwijking van de limietwaarde is wel groter. Het kan dus gesteld worden dat de emissiewetgeving beperkt effectief is voor het verlagen van de NO_x-emissies. Een deel van de afwijking is het gevolg van de praktijkinzet van deze mobiele werktuigen. Vooral het aandeel stationair draaien draagt vergeleken met de typekeuring meer dan proportioneel bij aan de totale NO_x-uitstoot. Het reduceren van stationair draaien is daarom een effectieve maatregel om met de huidige vloot bouwmachines tot een reductie van de emissies te komen. Dat heeft ook een gunstig effect op de CO₂-uitstoot en het brandstofverbruik.

Voor de toekomstige wetgeving (Stage V) is het belangrijk om de inzet, zoals ze in deze studie naar voren komt, mee te nemen in de eisen. Natuurlijk zijn machines bedoeld om arbeid te leveren.

Maar aangezien de NO_x-emissies voor een groot deel samenhangen met stationair draaien (waarbij geen noemenswaardige arbeid wordt geleverd), moeten de daadwerkelijke operationele condities in beschouwing worden genomen. Dit is des te relevanter omdat bij de gemeten bouwmachines het aandeel NO_x-emissies tijdens stationair draaien groeit van Stage III b naar Stage IV.

Emissiefactoren

De nationaal gehanteerde emissiefactoren van mobiele werktuigen kunnen op basis van deze getallen worden aangepast. De in dit project gemeten praktijkemissies van de vier bouwmachines zijn hoger dan tot nu toe op basis van de wetgevingseisen wordt verondersteld. TNO raadt daarom aan om rekening te houden met een grotere toeslag op de limietwaarde dan nu het geval is. Een verhoging van de huidige emissiefactoren voor NO_x met 30% voor Stage III b en 60% voor Stage IV lijkt een minimale noodzakelijke aanpassing. De kans is groot dat dit beeld uniform is over alle NRMM, en niet uniek is voor de gemeten bouwmachines. Meer fundamenteel moet er rekening worden gehouden met de langere periodes stationair draaien van al deze machines. Het aandeel stationair draaien is hoog, maar varieert ook. Gegevens over de draaiuren, inzet, en brandstofverbruik van een grotere groep werktuigen, geeft mogelijk een betere onderbouwing van de huidige bevindingen over de inzet.

Door de onderschatting in de testprocedure van de periode dat een werktuig stationair draait, tijdens welke de NO_x-emissie nog steeds substantieel kan zijn, is de uitkomst van de testprocedure niet direct representatief voor de daadwerkelijke emissie van een werktuig. De testprocedure kan daarom ook niet langer de basis zijn voor de verwachte belastingprofielen van een mobiel werktuig. De testprocedure is afhankelijk van de wetgevingsklasse en de toepassing. Tot en met Stage II werd de motor alleen op constante toerentallen getest, typisch vanaf 25% motorbelasting. Vanaf Stage III is er ook een dynamische test, maar hierin ligt de focus ook op de hogere motorvermogens, terwijl in veel praktijkgevallen de gemiddelde motorbelasting nog geen 25% is. Dit heeft er mee te maken dat de emissielimiet in g/kWh effectief strenger wordt als de motorlast lager is.

De huidige methodiek om emissiefactoren uit te drukken in g/kWh is ontoereikend omdat bij stationair draaien geen vermogen wordt geleverd. Hier kan bijvoorbeeld rekening mee worden gehouden door de limieten uit te drukken in tijdsduur in plaats van in g/kWh; een formule zoals onderstaand zal beter van toepassing zijn:

$$NO_x [g] = \text{idle emissies [g/h]} * \text{idle duur [h]} + \text{werk emissies [g/kWh]} * \text{arbeid [kWh]}$$

Met gegevens over het totale brandstofverbruik, het percentage stationair draaien en de motorbelasting bij normaal belast praktijkgebruik, kan op deze manier een representatieve waarde van de emissies bepaald worden.

8 Ondertekening

Den Haag, 6 juli 2018



Renee Louman
Projectleider

TNO



Norbert Ligterink
Auteur

A Processing

Voor de verschillende bouwmachines zijn verschillende parameters beschikbaar voor het bepalen van de massastroom en de emissies. Algemene informatie over de processing van SEMS wordt besproken in het artikel *A smart and robust NOx emission evaluation tool for the environmental screening of heavy-duty vehicles*⁷. De voor de werktuigen uit dit project additionele stappen, worden onderstaand besproken.

- **Processing 1** (toegepast op machine 1 – graafmachine, en machine 4 – tractor)

De concentratie NO_x alsmede de concentratie O₂ in de uitlaat is direct gemeten met de sensoren van SEMS. Het brandstofverbruik, het toerental en de druk en temperatuur bij de motorinlaat worden verkregen middels de ECU (Engine Control Unit) van het werktuig. Met deze gegevens kan de standaard SEMS-processing toegepast worden om de massa van de emissies te bepalen uit, hoofdzakelijk, het brandstofverbruik en de concentratie CO₂ in het uitlaatgas.

- **Processing 2** (toegepast op machine 2 – laadschop)

De door SEMS gemonitorde parameters zijn gelijk aan de parameters van processing 1: de concentratie NO_x/CO₂. De ECU is gebruikt om het toerental, de druk en de temperatuur te bepalen, maar helaas kon het brandstofverbruik niet afgelezen worden. De volgende stappen zijn doorlopen om alsnog de massa van de emissies te bepalen:

1. Door de ideale gaswet toe te passen, is de gasdichtheid in de motor bepaald.
2. Deze dichtheid is gecombineerd met het toerental, de cilinderinhoud en de motorefficiëntie (waar een vaste waarde voor is gebruikt) om de massastroom door de motor te benaderen.
3. De massastroom is gecorrigeerd om de volumetoename als gevolg van
4. de chemische reacties in de cilinder mee te nemen. De correctiewaarde is afhankelijk van de instantaan gemeten O₂-concentratie, welke een indicatie is van de hoeveel verbrande brandstof.
5. De massastroom is gecorrigeerd met een vaste factor, om rekening te houden met de effectieve verlaging van de cilinderinhoud als gevolg van
6. de EGR en de vulling van de cilinder met lucht.
7. De massastroom en de gemeten concentraties zijn vervolgens gecombineerd om de massa van de emissies te bepalen.

- **Processing 3** (toegepast op machine 3 – graafmachine)

Voor machine 3 was wederom het brandstofverbruik niet beschikbaar. Daarnaast zijn er ook geen gegevens over de druk en de temperatuur in de motorinlaat; als gevolg is het niet mogelijk om de dichtheid in de cilinder te corrigeren.

⁷ A smart and robust NO_x emission evaluation tool for the environmental screening of heavy-duty vehicles, R.J. Vermeulen, N.E. Ligterink, W.A. Vonk, H.L. Baarbé (2012)

De massastroom is in dit geval als volgt bepaald:

1. Aan de hand van het koppel en het toerental is het instantaan geleverde vermogen van een machine bepaald.
2. Door de relatie van zowel het instantaan geleverde vermogen als de CO₂ massastroom met de hoeveelheid verbruikte brandstof, is het mogelijk om te schatten hoeveel CO₂ er vrij komt bij een geleverd vermogen.
3. De CO₂-concentratie is bepaald middels de stappen zoals omschreven
4. in het eerder genoemde artikel. Door de CO₂-concentratie te combineren met de CO₂-massastroom, kan de totale massastroom bepaald worden.
5. Door de totale massastroom te combineren met de gemeten NO_x-concentratie, kan de NO_x-massastroom bepaald worden.

In een aantal gevallen zijn meerdere processing methodes met elkaar vergeleken, om zo de meest robuuste en accurate methode te kiezen. Variaties tussen de methoden zijn maximaal in de orde van 20%. Vooral de massastroom bij het idling is een kritisch aspect die bijzondere aandacht vraagt, zeker gezien de uitkomsten uit het onderzoek.