

Stikstofoxide emissies van Euro VI-vrachtwagens





Stikstofoxide emissies van Euro VI-vrachtwagens

Auteur(s)

A.J. Plomp
G.P.A. Kos
R. Rodink
E.P. Weijers

Disclaimer

Hoewel de informatie in dit document afkomstig is van betrouwbare bronnen en de nodige zorgvuldigheid is betracht bij de totstandkoming daarvan kan ECN geen aansprakelijkheid aanvaarden jegens de gebruiker voor fouten, onnauwkeurigheden en/of omissies, ongeacht de oorzaak daarvan, en voor schade als gevolg daarvan. Gebruik van de informatie in dit document en beslissingen van de gebruiker gebaseerd daarop zijn voor rekening en risico van de gebruiker. In geen enkel geval zijn ECN, zijn bestuurders, directeuren en/of medewerkers aansprakelijk ten aanzien van indirecte, immateriële of gevolgschade met inbegrip van gederfde winst of inkomsten en verlies van contracten of orders. Geen externe assurantie.

Verantwoording

Dit rapport, inclusief de beschreven metingen, is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Infrastructuur en Milieu en Rijkswaterstaat. Aan dit rapport is bijgedragen door Gerard Kos, Rob Rodink en Arjan Plomp. In eerder stadium van dit project is ook bijgedragen door Ernie Weijers. Bij ECN is dit project bekend onder projectnummer 5.4565.

Inhoudsopgave

Samenvatting	5
1. Inleiding	6
2. Opzet, proefmetingen en reproductie metingen	9
2.1 Opzet metingen	9
2.2 Proefmetingen	9
2.3 Reproductie van de metingen	12
3. Meetresultaten	15
3.1 Meetcampagnes	15
3.2 Totaalresultaat	17
4. Conclusies en aanbevelingen	19
5. Literatuur	20

Samenvatting

In dit rapport worden de resultaten beschreven van een eerste verkennend onderzoek, waarin metingen langs de weg worden uitgevoerd volgende de pluimmethodiek om verschil in stikstofoxide(NO_x)emissies van Euro VI-vrachtwagens te kunnen identificeren. Volgens berichtgeving zijn er voor sommige gebruikers redenen om nageschakelde technieken voor NO_x -reductie bij Euro VI-vrachtwagens af te schakelen. Het gevolg daarvan is een sterk verhoogde NO_x -emissie. Dergelijke manipulatie van nageschakelde technieken, waardoor de doelmatigheid van de emissiebeheersingssystemen vermindert, is verboden.

De uitgevoerde metingen laten zien, dat binnen randvoorwaarden, de pluimmethodiek succesvol en reproduceerbaar kan worden toegepast om de NO_x -profielen van passerende vrachtwagens te meten. De randvoorwaarden voor uitvoering van dit type meting hangen deels samen met de aandachtspunten voor verder onderzoek:

- Meetplek, windrichting en windsterkte: onder bepaalde omstandigheden is er te veel turbulentie waardoor pluimen te veel verdunnen en in de meetreeksen moeilijk te identificeren zijn;
- Intensiteit verkeer: bij veel passerende voertuigen blijken afzonderlijke pieken moeilijk te onderscheiden;
- Analyse van de gemeten pieken, met name analyse van de piekmaxima versus de integraal van de pieken.

Bij verdere automatisering kunnen de metingen van NO_x -emissies onbemand worden uitgevoerd.

Tenslotte blijkt uit de metingen dat een relevante minderheid van de Euro VI-vrachtwagens wel degelijk een verdacht hoge NO_x -emissie heeft. Het is op dit moment niet zeker of deze vrachtwagens normen overtreden. Dit kan bijvoorbeeld worden vastgesteld door deze vrachtwagens te controleren op manipulatie van het SCR-systeem.

1. Inleiding



In dit rapport worden de resultaten beschreven van een eerste verkennend onderzoek, waarin pluimmetingen langs de weg worden uitgevoerd om verschil en uitbijters ('high emitters') met betrekking tot stikstofoxide(NO_x)emissies van Euro VI-vrachtwagens te kunnen identificeren.

Op grond van de Richtlijn 2007/46/EG en de EU verordening 595/2009 moeten zware bedrijfsvoertuigen sinds 31 december 2013 voldoen aan emissienormen conform Euro VI voor koolstofmonoxide (CO), koolwaterstoffen (methaan en niet-methaan), stikstofoxide (NO_x), ammoniak (NH_3) en fijnstof (zowel massa als aantal). Voor NO_x geldt een norm van 400 mg NO_x /kWh: hierbij wordt NO_x uitgedrukt in NO_2 -equivalenten (EU verordening 595/2009). Deze norm varieert enigszins per type testcyclus, maar de norm van 400 mg NO_x /kWh is in ieder geval van toepassing voor de wereldwijd geharmoniseerde stationaire rijcyclus ('WHSC') (EU verordening 582/2011; EU verordening 133/2014; Dieselnet, 2017). De uiteindelijke toegestane emissie in de praktijk mag naar boven afwijken van de norm, zolang deze afwijking binnen de zogeheten 'conformiteitsfactor' valt. De eenheid kWh is gedefinieerd als motorarbeid (EU verordening 582/2011). Onder de definitie van zware bedrijfsvoertuigen, waarnaar wordt gerefereerd in de verordening, vallen voornamelijk vrachtwagens en bussen. Mobiele werktuigen, zoals landbouw- en bosbouwtrekkers en rupsvoertuigen, vallen hier niet onder (Richtlijn 2007/46/EG).

Vrachtwagens die voldoen aan de Euro VI normen, halen in de praktijk een lage NO_x -emissie door toepassing van nageschakelde technieken, in het bijzonder door Selectieve Katalytische Reductie (SCR) en veelal gecombineerd met recirculatie van uitlaatgas (EGR). Voor SCR geldt dat NO_x -reductie wordt gerealiseerd door NO_x te laten reageren met een reagens tot het onschadelijke N_2 en H_2O . Dit reagens is commercieel bekend als AdBlue.

SCR wordt veelvuldig toegepast bij zware bedrijfsvoertuigen: in ieder geval maken de Euro VI-vrachtwagens van DAF, Scania, Mercedes-Benz, Volvo, MAN en IVECO gebruik van SCR volgens de websites van deze fabrikanten. Tenminste een deel van deze fabrikanten heeft SCR toegepast om ook aan de eerdere normen te voldoen, met name de Euro V-norm. De laatstgenoemde norm was 2.000 mg NO_x /kWh (Dieselnet, 2017).

Het blijkt dat er voor sommige gebruikers redenen zijn om dergelijke systemen uit te schakelen, bijvoorbeeld uit oogpunt van kostenbesparing of om te voorkomen dat vrachtwagens in de zogenaamde 'noodloop' gaan door storing op de SCR (de vrachtwagen heeft dan nog circa 60% van het oorspronkelijke vermogen). Het gevolg daarvan is een sterk verhoogde NO_x -emissie.

Manipulatie van nageschakelde technieken, waardoor de doelmatigheid van de emissiebeheersingssystemen vermindert, is verboden (EU verordening 595/2009). Het Ministerie van Infrastructuur en Milieu wil de goede werking van die systemen kunnen handhaven middels het uitvoeren van NO_x-metingen langs de weg. Om dit mogelijk te maken is een detectiesysteem nodig dat in het normale verkeersbeeld kan identificeren of Euro VI-vrachtwagens verdacht veel NO_x uitstoten (de zogenaamde 'high emitters'). In deze studie is onderzocht of het mogelijk is 'high emitters' in het normale verkeersbeeld te identificeren met behulp van een stationair detectiesysteem langs de weg.

Het fundamentele principe van dit detectiesysteem is dat de rookgaspluimen van passerende voertuigen worden gemeten met analyseapparatuur langs de weg, waarbij zowel de concentratie NO_x als koolstofdioxide (CO₂) wordt bepaald. De concentratie CO₂ kan eenvoudig worden gemeten en is één van de voornaamste verbrandingsproducten bij volledige verbranding van brandstof. De CO₂-emissie komt daarmee terug in de controle van de Euro VI-norm, omdat de Euro VI-norm is gebaseerd op de motorarbeid. De motorarbeid wordt bepaald door de brandstofinzet in de motor gecombineerd met het motorrendement. Hierdoor kan de verhouding NO_x/CO₂ gebruikt worden om Euro VI-vrachtwagens te identificeren die verdacht veel NO_x uitstoten.

Uitgaande van de normstelling van 400 mg NO_x/kWh en een motorrendement van 40% (CAFEE, 2014), kan de norm worden omgerekend naar 44,4 mg NO_x/MJ (brandstofverbruik). Uitgaande van een CO₂-emissiefactor van 74,3 kg CO₂/GJ diesel (RVO, 2017) en de relevante molecuulgewichten voor CO₂ en NO₂ kan 44,4 mg NO_x/MJ diesel worden teruggerekend naar 0,57 mol NO_x/1.000 mol CO₂. Deze molaire verhouding van NO_x en CO₂ in het rookgas blijft gelijk, onafhankelijk van de uiteindelijke verdunning door de toegevoegde (overmaat aan) verbrandingslucht. Deze verdunning door verbrandingslucht bepaalt uiteraard de uiteindelijke concentratie van beide componenten in het rookgas. Door beide componenten in het rookgas te meten en de concentratie-verhouding te bepalen, is het dus mogelijk om manipulatie van NO_x-reductietechnieken bij Euro VI-vrachtwagens te detecteren. Omdat de concentratie in de rookgaspluimen is gemeten, wordt in dit rapport verder gerapporteerd in concentraties en niet in molaire verhoudingen¹.

Bij voorgaande berekening is het volgende relevant: het motorrendement kan variëren, bijvoorbeeld door actuele belasting van de motor ten tijde van de meting. Daarnaast geldt dat mogelijk niet alle brandstof volledig verbrandt tot CO₂. Het lijkt echter onwaarschijnlijk dat de theoretische verhouding tussen NO_x en CO₂ hierdoor op een wezenlijk ander niveau komt te liggen: enkele berekeningen laten zien dat verschuiving tot boven 1 mol NO_x/1.000 mol CO₂ onwaarschijnlijk is door variatie op deze parameters.

Er dient rekening gehouden te worden met de voorgeschreven norm, zoals deze wordt geëist voor een gegeven testcyclus, en de praktijkwaarden. De wetgeving staat afwijking van de praktijkwaarden ten opzichte van de norm ook toe binnen de zogeheten 'conformiteitsfactoren'. Daarnaast geldt dat er reeds vóór verbranding een relevante concentratie CO₂ aanwezig is in de buitenlucht. Er moet dus gerekend worden met de verhoging van CO₂ ten gevolge van verbranding ten opzichte van de achtergrondconcentratie CO₂ in de buitenlucht.

Tenslotte wordt deze verhouding, die direct aan de uitlaat actueel is, beïnvloed door verdunning, waardoor met name de verhoging van CO₂ in de rookgaspluim lastiger is te onderscheiden ten

¹ De eis van 400 mg NO_x/kWh is hier, onder enkele aannames, teruggerekend naar 0,57 mol NO_x/1.000 mol CO₂. Onder gelijke aannames komt 1 g/kWh dus overeen met 1,425 mol NO_x/1000 mol CO₂. Omdat de concentratieverhouding van deze verbrandingsemissies gelijk blijft in het rookgas, komt 1 g/kWh in theorie overeen met 1,425 [ppb]/[ppm].

opzichte van de (fluctuerende) achtergrondconcentratie in de buitenlucht. Deze factor werkt dus complicerend bij analyse van de meetresultaten.

Het is dus van belang om de rookgaspluim zo geconcentreerd mogelijk en dus zo dicht mogelijk bij de bron te meten. Voor metingen langs de weg is daarbij de afstand van monstername tot het passerende voertuig van belang. Ook de hoogte en locatie van de uitlaat van het passerende voertuig ten opzichte van het punt van monstername en de snelheid van het passerende voertuig zijn van belang. Gezien de snelheid van de passerende voertuigen is het van belang dat de analyseapparatuur een zo hoog mogelijke meetfrequentie heeft, zodat het verloop van de concentratieverhogingen zo goed mogelijk kan worden gemeten.

Naast ervaring met NO_x- en CO₂-metingen heeft ECN ook ervaring met modelstudies naar de verspreiding van rookgassen van binnenvaartschepen. In 2014 zijn succesvolle metingen aan rookgaspluimen van de binnenvaart verricht met de zogeheten pluimmethodiek. Hoewel voornoemde problemen van belang zijn, is het dus goed mogelijk om met deze analysemethode de emissie van passerende voertuigen goed te meten en afwijkingen in emissieprofielen te constateren (Hensen et al, 2014).

2. Opzet, proefmetingen en reproductie metingen

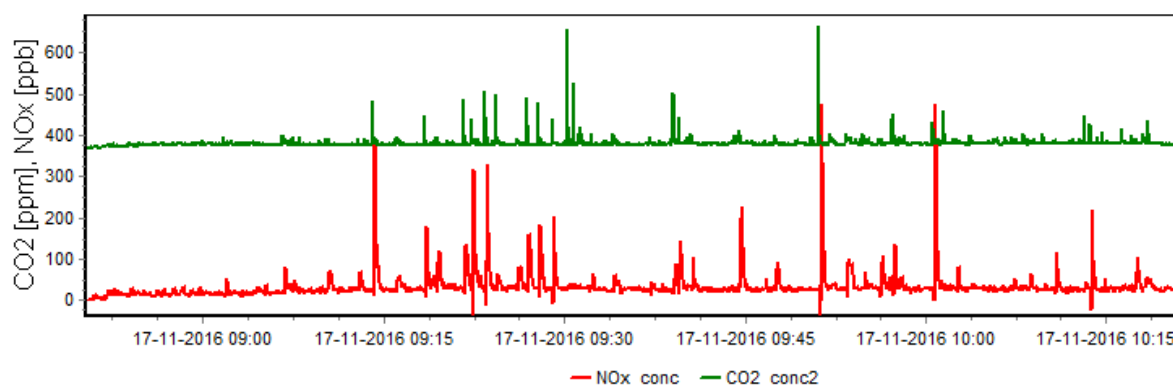
2.1 Opzet metingen

De NO_x -concentraties zijn gemeten met een monitor van ECO-physics, met een meetfrequentie van 1/3 Hz en een debiet van 0,7 l/min. Een LICOR6262 is gebruikt om de CO_2 -concentratie te meten met een meetfrequentie van 10 Hz en een debiet van 0,7 l/min. Van de CO_2 en de NO_x -monitor zijn de invoerleidingen via een T-verbinding aan elkaar gekoppeld, zodat via een enkele leiding buiten de meetauto de pluim wordt bemonsterd. De meetpositie benedenwinds van de weg moet zo worden gekozen dat de CO_2 -concentratie van de voertuigemissie voldoende boven de heersende achtergrondconcentratie in de buitenlucht uitstijgt. Dit legt een beperking op aan de afstand die tot de weg kan worden genomen. Ook de windsnelheid, de atmosferische stabiliteit, de windrichting en de positie van de uitlaat beïnvloeden de dispersie van de gassen. Om de kentekens van passerende voertuigen te registreren is een camera gebruikt.

2.2 Proefmetingen

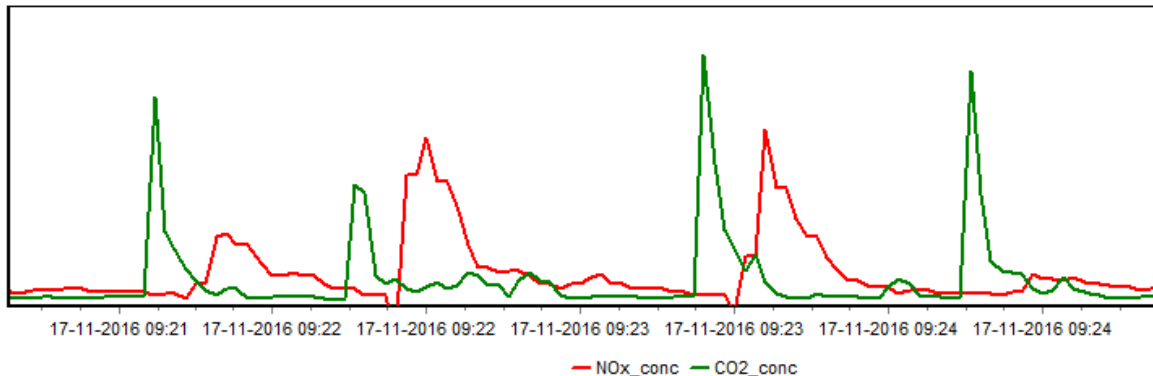
Voorafgaand zijn er proefmetingen uitgevoerd aan een vat met een NO_x/CO_2 -mengsel. Hiermee is de reactietijd van beide monitoren bepaald vanaf het moment dat het mengsel de ingang van de monsternamenleiding bereikt. De NO_x -monitor blijkt in deze setup een vertraagde reactie te hebben ten opzichte van de CO_2 -monitor van circa 7-12 seconden. Het is noodzakelijk om de juiste vertragingstijd te bepalen, zodat de correcte CO_2 - en NO_x -emissiepieken gekoppeld worden aan een passerend voertuig.

Vervolgens zijn drie proefmetingen van in totaal 4 uur uitgevoerd in de omgeving van Warmenhuizen (NH) op 15, 16 en 17 november 2016. In totaal zijn er 262 voertuigen gepasseerd, waarvan 69 vrachtwagens. In Figuur 1 is een voorbeeld gegeven van een meetreeks die gemeten is op 17 november.

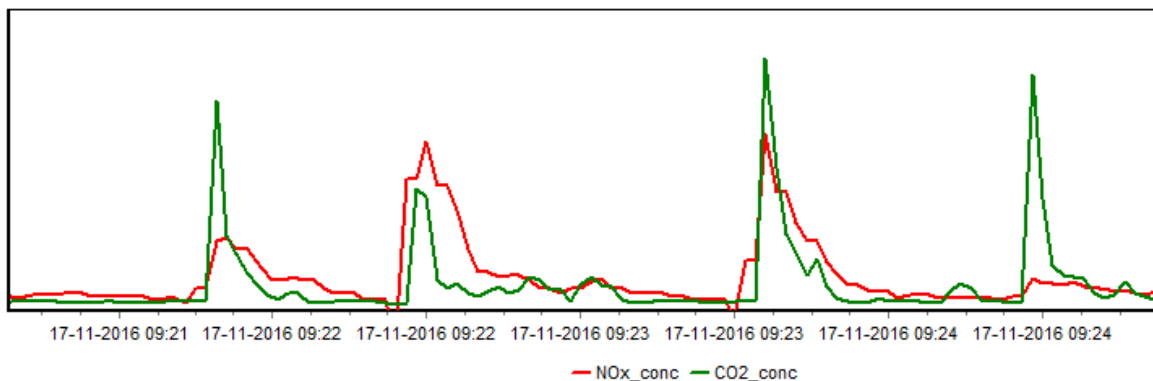


Figuur 1 Voorbeeld van een meetreeks, gemeten op 17 november 2016 in de omgeving van Warmenhuizen. Op de y-as de concentratie CO_2 (in ppm, rood) en NO_x (in ppb, groen) uitgezet tegen de tijd.

Zoals eerder beschreven, geldt voor zowel CO₂ als NO_x dat er in de atmosfeer een achtergrondconcentratie aanwezig is waarop de bijdrage van de voertuigemissie wordt gesuperponeerd. Deze achtergrondwaarden vormen in de meting de basislijn waarop de emissiepieken worden gemeten; deze worden uit dezelfde dataset bepaald. Door te corrigeren voor de tijdsvertraging tussen beide monitoren, waarmee de NO_x-piek ten opzichte van de CO₂-piek in de tijd is verschoven, worden de CO₂ en NO_x-concentratiepieken gevonden die bij de pluim van een voertuig horen. In Figuur 2 en Figuur 3 zijn voorbeelden gegeven van gemeten CO₂ en NO_x-pieken voor en na correcties in de tijd. Te zien is dat na de verschuiving de CO₂ en NO_x-pieken over elkaar heen vallen.

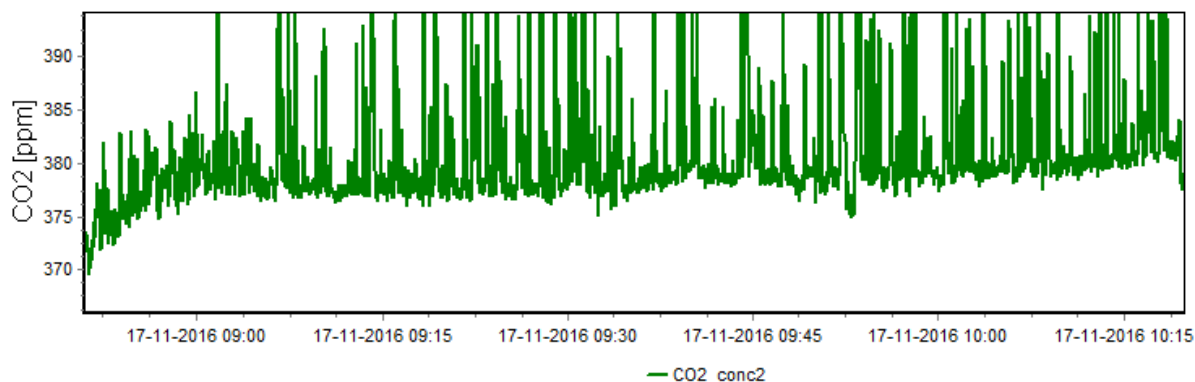


Figuur 2 Voorbeeld van CO₂ en NO_x-pieken, gemeten op 17 november 2016 in de omgeving van Warmenhuizen.



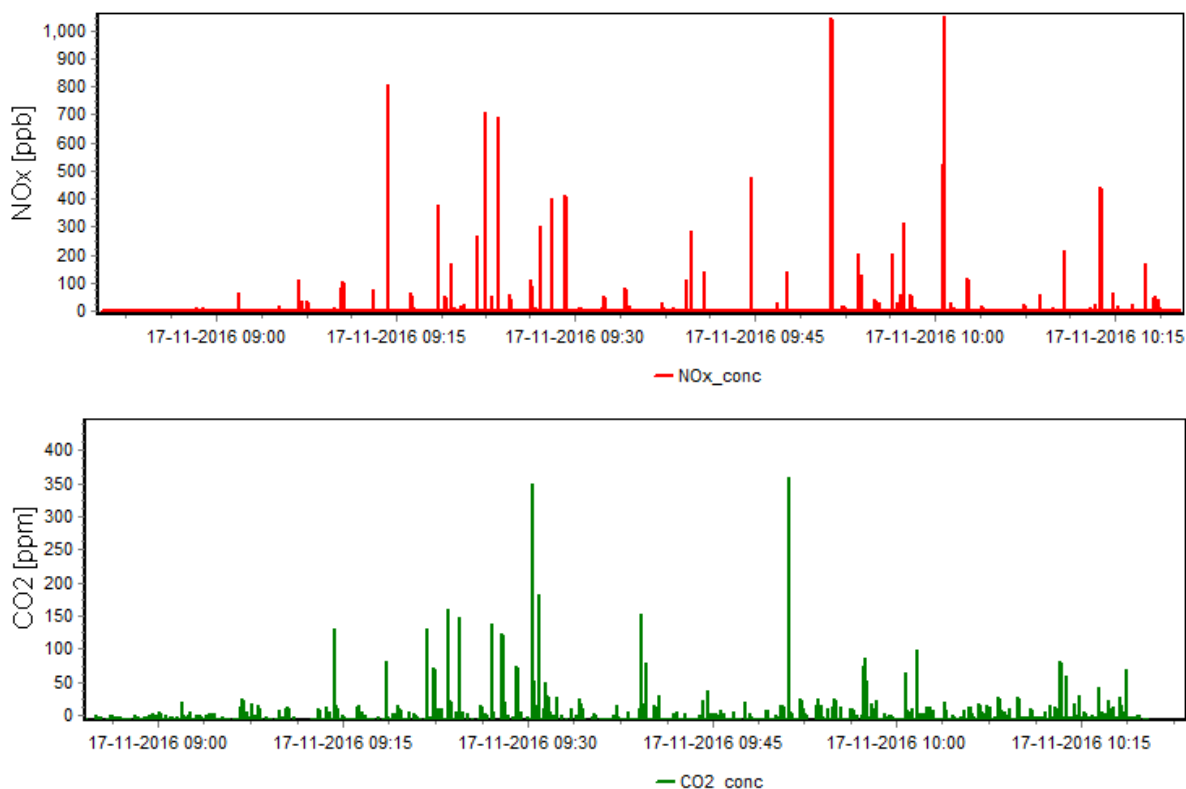
Figuur 3 Voorbeeld van CO₂ en NO_x-pieken, gemeten op 17 november 2016 in de omgeving van Warmenhuizen na correctie van het CO₂-signaal in de tijd.

De emissie van een voertuig wordt bepaald door van de emissiepiek de achtergrondwaarde in mindering te brengen. Het kenteken en voertuigtype zijn tegelijkertijd met een camera vastgelegd, om zo de gemeten NO_x/CO₂-verhouding aan een voertuigtype te koppelen. Omdat de CO₂-achtergrondconcentratie fluctueert zijn de lagere gevonden waarden van de CO₂-concentratiepieken onzeker, wat doorwerkt in de NO_x/CO₂-verhouding. Een voorbeeld van de fluctuerende achtergrond voor CO₂ is te zien in Figuur 4.



Figuur 4 Gemeten CO₂-concentratiepieken en achtergrondniveau. De fluctuerende achtergrondwaarde heeft invloed op de onzekerheid met betrekking tot de gemeten CO₂-concentratiepieken.

Figuur 5 geeft een voorbeeld van gevonden emissiepieken met een waarde voor CO₂ en NO_x, na aftrek van de achtergrond. Per meet sessie is zowel voor CO₂ als NO_x een constante waarde aangenomen voor de achtergrondconcentraties op basis van metingen. De gemeten pluimen hebben ter plaatse van de meetopstelling een passagetijd die ligt tussen 5 en 10 seconden; dit is de passagetijd van de pluim aan de gezamenlijke ingang van de meetinstrumenten voor CO₂ en NO_x.



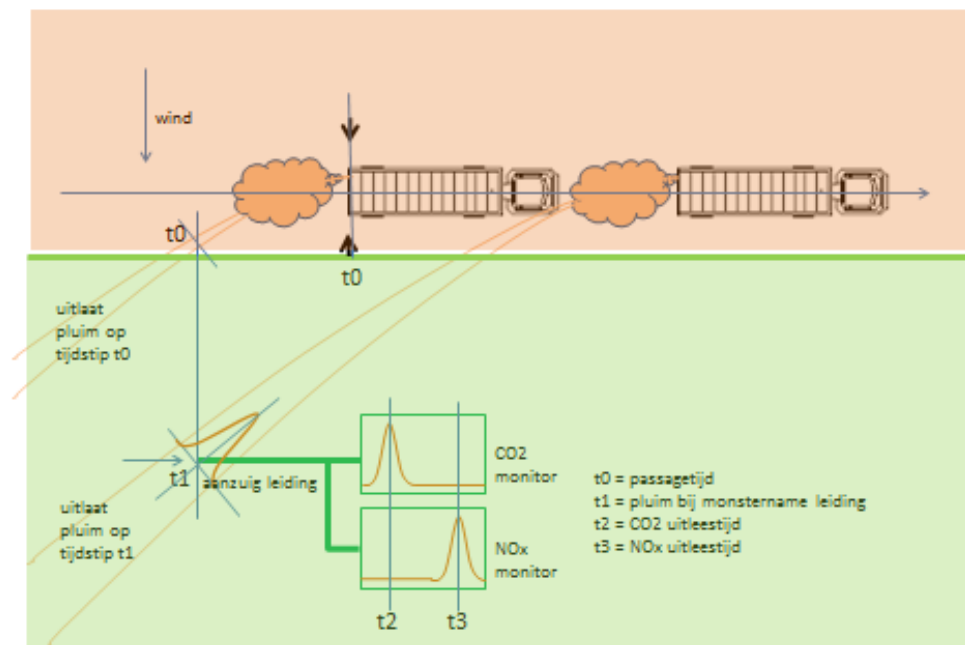
Figuur 5 Gemeten concentratiepieken voor CO₂ en NO_x, van de reeks van 17 november na aftrek van de achtergrondniveaus.

Bij analyse van de resultaten van deze proefmetingen is een minimum drempelwaarde gehanteerd voor CO₂ (met andere woorden de piekconcentratie CO₂ bovenop de achtergrond moest minimaal boven een bepaald niveau uitkomen om meegenomen te worden in de analyse). Als dit niveau op 5 ppm CO₂ wordt gesteld, dan voldoen 155 pluimen hieraan en worden NO_x/CO₂-verhoudingen gevonden van 0 tot >25 ppb/ppm. Als de drempelwaarde voor CO₂ naar 20 ppm wordt verhoogd

om een hogere betrouwbaarheid te realiseren, voldoet een lager aantal pluimen hieraan, in dit geval 39. De NO_x/CO_2 -verhoudingen liggen dan tussen 0 en 22 ppb/ppm.

De spreiding van NO_x/CO_2 -verhoudingen blijkt te verschuiven bij een keuze voor een CO_2 -drempelwaarde. Wordt 5 ppm CO_2 als drempelwaarde toegepast, dan blijkt dat 30% van de pluimen een verhouding heeft tussen 0 en 3 ppb/ppm. Als de drempelwaarde wordt verhoogd naar 20 ppm CO_2 , dan resulteert dat in 49% van de pluimen met een verhouding tussen 0 en 3 ppb/ppm. Dat deze verhouding verschuift ten gevolge van een andere keuze voor een CO_2 -drempelwaarde, wijst er op dat, als een lage CO_2 -concentratie wordt gemeten, veelal hoge NO_x/CO_2 -verhoudingen worden gevonden en dat hangt, tenminste deels, samen met de onnauwkeurigheid van de metingen.

Uit de proefmetingen bleek eveneens dat de wijze van registratie van voertuigen op moment van passeren van belang is, zodat de correcte kentekens aan de bijbehorende pluimen worden toegekend. Dit heeft te maken met de tijdvertraging tussen het moment van passeren (t_0), het moment van monsternamen door de aanzuigleiding (t_1) en de uitleestijden van CO_2 (t_2) en NO_x (t_3), zie ook Figuur 6.



Figuur 6 Schema met tijdstippen die van belang zijn voor de identificatie van de pluim in relatie tot het passerende voertuig, dat emitteert.

2.3 Reproductie van de metingen

Er zijn metingen uitgevoerd op 31 mei 2017 in de omgeving van Petten op de Hondsboscheweg door met eenzelfde voertuig diverse malen langs de analyseapparatuur te rijden met relatief hoge snelheid (circa 80 km/uur). Op deze manier is de reproduceerbaarheid en betrouwbaarheid van de metingen getest door met hetzelfde voertuig diverse malen langs dezelfde meetlocatie te rijden, terwijl de meteorologische omstandigheden vrijwel stabiel bleven. Het voertuig was een kleine vrachtwagen met toelatingsdatum uit mei 2005; overigens laten de voertuiggegevens van RDWdata.nl een onbekend Euro-label zien. Op de betreffende dag was de wind relatief zwak: noordwest, 3 tot 4 meter per seconde.

Er zijn 11 metingen uitgevoerd waarbij het voertuig op korte afstand langs de analyseapparatuur is gepasseerd, direct over de naastgelegen weghelft. De maxima van de gemeten CO₂- pieken resulteerden in tenminste 10 ppm en dat liep op tot 45 ppm ten opzichte van de achtergrondconcentratie, met een gemiddelde van 23 ppm. De maxima van de NO_x- pieken varieerden tussen 37 en 122 ppb, met een gemiddelde van 71 ppb. Berekening van de NO_x/CO₂-verhoudingen resulteert in een gemiddelde verhouding van 3,4 ppb/ppm (de standaarddeviatie is 1,1 ppb/ppm; de minimumverhouding is 2,1 en de maximumverhouding is 5,2).

Door de zwakke wind bleken de rookgaspluimen minder signaal te geven dan verwacht. Ook ander passerend verkeer bleek niet eenvoudig te detecteren. Toepassing van een vrij scherpe CO₂-drempelwaarde van 17 ppm laat zien dat er 6 metingen boven dit niveau uitstijgen; deze 6 metingen resulteren in een gemiddelde NO_x/CO₂-verhouding van 2,7 ppb/ppm (de standaarddeviatie is 0,5 ppb/ppm; de minimumverhouding is 2,1 en de maximumverhouding is 3,2). Opnieuw is zichtbaar dat, door toepassing van een (hoge) CO₂-drempelwaarde, de nauwkeurigheid van de metingen wordt verbeterd.

Tijdens deze meetdag bleek, dat als het voertuig passeerde op de andere weghelft, dus met een grote afstand tot de analyseapparatuur, de rookgaspluim van het voertuig moeizaam detecteerbaar was. Dit is vermoedelijk veroorzaakt door de zwakke wind. Wanneer de gemeten CO₂-concentratiepieken vanaf de andere weghelft worden bekeken, laten die een verhogingen zien vanaf 0,5 ppm en oplopend tot maximaal 6,5 ppm ten opzichte van de achtergrondconcentratie, met een gemiddelde piekconcentratie van 2,6 ppm. De NO_x-concentratiepieken resulteerden in maxima van 8 tot 41 ppb, met een gemiddelde van 20 ppb.

Berekening van de NO_x/CO₂-verhoudingen voor de andere weghelft resulteert in een gemiddelde verhouding van 10,7 ppb/ppm (standaarddeviatie is 8,8 ppb/ppm). Deze zeer hoge standaarddeviatie laat zien dat de pluimmetingen, afkomstig van de andere weghelft, erg onzeker zijn door de lage CO₂-concentratiepieken. In dit geval wordt het resultaat sterk negatief beïnvloed door twee metingen, waarvan de gemeten CO₂-concentratiepieken zeer laag zijn (<1 ppm). Als deze twee metingen worden genegeerd door een CO₂-drempelwaarde van tenminste 1,5 ppm aan te houden, verbetert het resultaat significant (namelijk een gemiddelde verhouding van 6,9 ppb/ppm met een standaarddeviatie van 1,6 ppb/ppm).

De metingen, zoals beschreven in paragraaf 2.2, laten zien dat, bij lage CO₂-concentratiepieken ten opzichte van de achtergrondconcentratie, de berekende NO_x/CO₂-factoren relatief hoog zijn. Waarschijnlijk heeft dit te maken met toenemende meetonzekerheid bij dergelijke lage CO₂-concentratiepieken, zoals waargenomen bij de metingen van de andere weghelft. Dit verklaart dan ook het verschil in de ratio bij de metingen tussen de naastgelegen en de andere weghelft. Dit toont ook het belang aan om een drempelwaarde te hanteren met betrekking tot de CO₂-pieken: bij te lage concentratiepieken boven het achtergrondniveau van CO₂ kunnen de metingen vanwege de meetonzekerheid beter worden genegeerd.

Alle berekeningen zijn uitgevoerd op basis van de piekmaxima ten opzichte van de achtergrondconcentratie. Naast deze berekeningswijze kan de NO_x/CO₂-verhouding ook worden berekend door de integraal (=piekoppervlak) van de meetsignalen te analyseren. De laatstgenoemde berekeningswijze is uitgevoerd voor de 11 metingen waarbij het voertuig op korte afstand langs de analyseapparatuur is gepasseerd, direct over de naastgelegen weghelft. Dit resulteerde in een gemiddelde NO_x/CO₂-verhouding van 8,5 ppb/ppm met een standaarddeviatie van 2 ppb/ppm. De berekeningsmethode op basis van de piekmaxima resulteerde in een

gemiddelde NO_x/CO_2 -verhouding van 3,4 ppb/ppm (de standaarddeviatie is 1,1 ppb/ppm). De NO_x -pieken zijn relatief breder in de tijd dan de CO_2 -pieken, wat vermoedelijk wordt veroorzaakt door de langere verblijftijd in de aanvoerleiding en mogelijk ook door de lagere kloksnelheid van de apparatuur. Daarom resulteert de berekeningsmethode op basis van piekintegralen in een verschoven (hogere) NO_x/CO_2 -verhouding. Daarnaast is de standaarddeviatie bij de berekeningsmethode op basis van piekintegralen relatief kleiner ten opzichte van berekening op basis van piekmaxima. Berekening op basis van piekintegralen levert dus waarschijnlijk robuustere resultaten. Door het aanzienlijke meerwerk van deze berekeningsmethode op dit moment is de verdere analyse in dit rapport uitgevoerd op basis van de piekmaxima.

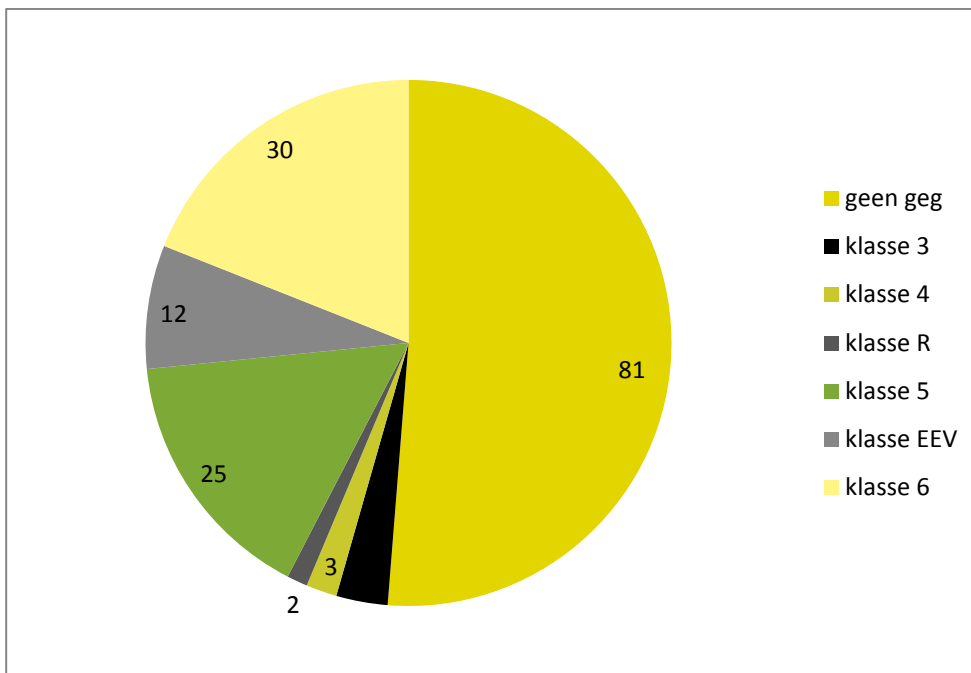
Hoewel de standaarddeviatie van de metingen op de naastgelegen weghelft laat zien dat er een significante spreiding is in de resultaten, ligt deze afwijking, zeker als er een CO_2 -drempelwaarde wordt gehanteerd, ruim binnen de totale bandbreedte van de gemeten NO_x/CO_2 -ratio's tijdens de proefmetingen. Bij gunstige meetomstandigheden kunnen dus ook de pluimemissies vanaf de overstaande weghelft worden gemeten.

3. Meetresultaten

3.1 Meetcampagnes

Nadat er gedurende enkele meetsessies ervaring was opgedaan met het uitvoeren van de metingen in combinatie met de registratie van de passerende voertuigen, maar ook het vinden van geschikte locaties waar niet teveel of te weinig voertuigen passeren, is er een succesvolle meetcampagne uitgevoerd op 1 maart 2017. Op deze dag is gemeten langs de N9 bij het Noordhollands Kanaal, ter hoogte van Burgervlotbrug, buiten de bebouwde kom. De meetsessie vond plaats tussen 13:00 uur en 16:30 uur, met een zuidwestelijke wind van middelmatige sterkte, circa 5 m/s.

In totaal zijn van 158 vrachtwagens de NO_x- en CO₂-concentratiepieken van de rookgaspluimen uit de uitlaat gemeten; daarnaast zijn de kentekens gefotografeerd. Het diagram in Figuur 7 toont de verdeling van deze vrachtwagens over de milieuklasse zoals die te vinden is op de RDW-site (met behulp van de kentekencheck). Van 81 vrachtwagens, circa de helft van het totaal, is geen milieuklasse gevonden. Dit waren voertuigen waarvan de kentekens wel in de database waren opgenomen, maar zonder bijbehorende milieuklasse, of voertuigen met een buitenlands kenteken. Van vrachtwagencombinaties, die vanaf de achterzijde werden gefotografeerd, waren de opleggers soms met een ander kenteken uitgerust dan de vrachtwagen; de Euroklasse van het trekkende voertuig kon dan niet meer worden bepaald.



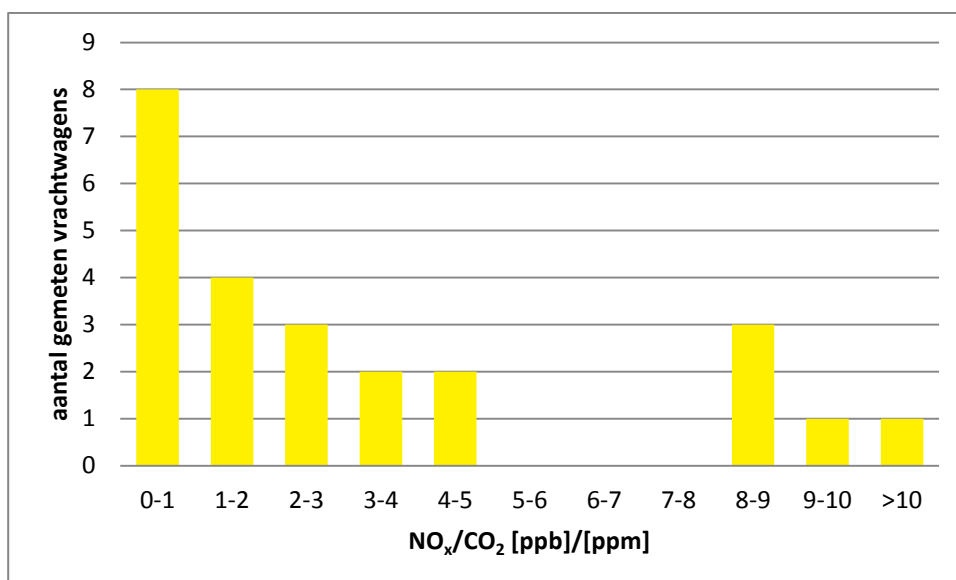
Figuur 7 Aantal gepasseerde vrachtwagens op 1 maart 2017, ingedeeld naar milieuklasse volgens gegevens van de RDW. Wanneer er geen milieuklasse beschikbaar was is dit aangegeven met 'geen geg'.

Van de resterende 77 vrachtwagens met bekende milieuklasse kon van 18 de verhouding NO_x/CO_2 niet worden bepaald. Dit was het geval als de CO_2 piek min de achtergrondconcentratie niet boven de CO_2 -drempelwaarde uitkwam of als het niet mogelijk was om de meetresultaten eenduidig aan een vrachtwagen toe te schrijven. De gekozen CO_2 -drempelwaarde voor deze meetsessie was 10 ppm CO_2 .

Van de 30 Euro VI-vrachtwagens kon voor 24 vrachtwagens een betrouwbare NO_x/CO_2 -verhouding berekend worden. Voor deze Euro VI-vrachtwagens is op basis van de metingen een frequentieverdeling bepaald, waarin de frequentie van de metingen voor verschillende NO_x/CO_2 -verhoudingen is weergegeven (ingedeeld naar intervallen op gehele waarden) (zie Figuur 8).

Opvallend is dat de meeste vrachtwagens een NO_x/CO_2 -verhouding laten zien tussen 0 en 5 ppb/ppm, maar dat er vijf vrachtwagens zijn gemeten met deze verhouding boven de 8 ppb/ppm². Deze verhouding is erg afwijkend en erg hoog voor vrachtwagens van deze milieuklasse. Daarnaast liggen NO_x/CO_2 -verhoudingen tussen 0 en 5 ppb/ppm binnen de verwachte bandbreedte van een vergelijkbare bron, op grond van de reproduceerbaarheidsmetingen (zie paragraaf 2.3), maar ligt een verhouding van >8 ppb/ppm zeker buiten de verwachte bandbreedte.

² Zoals beschreven in hoofdstuk 1 is, onder enkele aannames, 400 mg NO_x/kWh teruggerekend naar 0,57 mol $\text{NO}_x/1.000$ mol CO_2 . Onder gelijke aannames komt 1 g/kWh overeen met 1,425 NO_x/CO_2 [ppb]/[ppm]. Onder gelijke aannames komt 8 NO_x/CO_2 [ppb]/[ppm] overeen met 5,6 g/kWh NO_x .



Figuur 8 Aantal gemeten vrachtwagens op 1 maart 2017 in de Euro VI-klasse naar NO_x/CO₂-verhoudingen (ppb/ppm), ingedeeld naar intervallen op gehele waarden. In totaal zijn voor 24 vrachtwagens de verhouding NO_x/CO₂ bepaald.

Voor de overige euroklassen (Euro V en lager) zijn de NO_x/CO₂-verhoudingen eveneens bepaald voor 35 waarnemingen. Deze verhoudingen liggen over het algemeen hoger dan de meetresultaten voor de Euro VI-klasse vrachtwagens en zijn relatief gelijkmatig verdeeld over de emissieratio's van 0 tot en met >10.

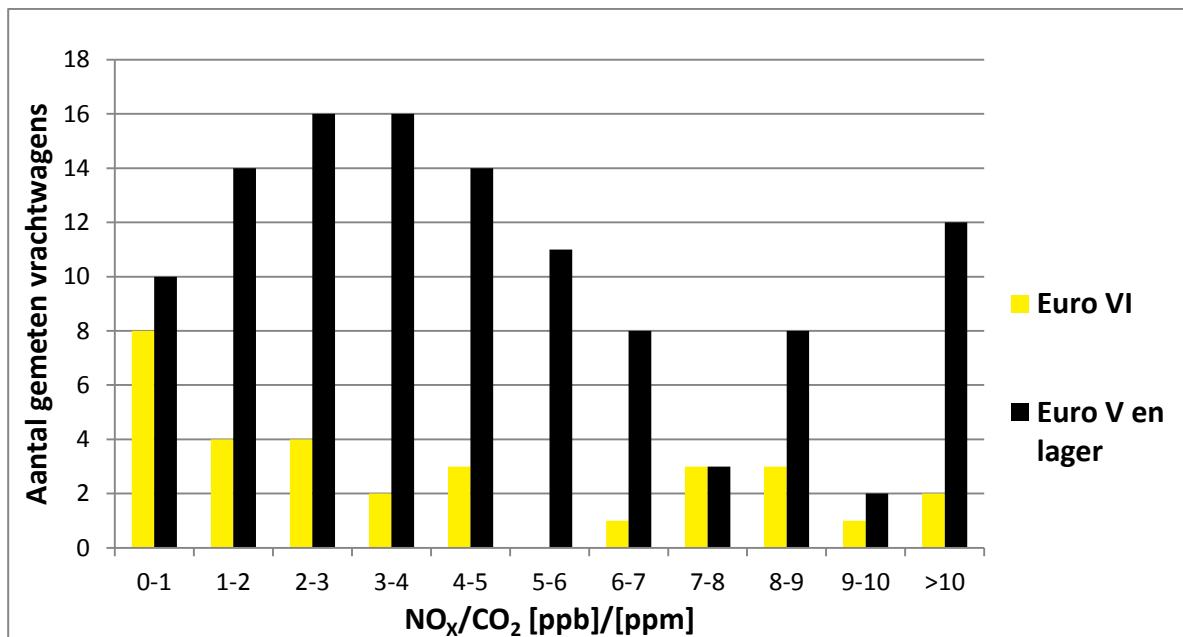
Naast voornoemde meetsessie is er een meetsessie uitgevoerd op 14 februari 2017 in de bebouwde kom van Burgervlotbrug. De resultaten van deze meetsessie bleken sterk beïnvloed te zijn door bebouwing boven- en benedenwinds van de meetopstelling, waardoor de gemeten CO₂-pieken relatief zwak waren. Daarnaast passeerde maar een beperkt aantal vrachtwagens in de Euro VI-klasse. Er zijn tijdens deze dag zeven vrachtwagens gemeten in de Euro VI-klasse; de resultaten van de gemeten NO_x/CO₂-verhoudingen zijn gegeven in Tabel 1. Ook tijdens deze meetsessie is in ieder geval één vrachtwagen gemeten met een sterk afwijkende emissieratio (van 10 ppb/ppm). Zoals voornoemd is de kwaliteit van deze meetsessie matig, doordat de gemeten CO₂-pieken relatief zwak waren. Hierdoor kunnen er minder robuuste conclusies aan worden verbonden.

Tabel 1 Aantal gemeten vrachtwagens in de Euro VI-klasse op 14 februari 2017 voor de gemeten NO_x/CO₂-verhoudingen (afgeronde getallen).

NO _x /CO ₂ -verhouding	Aantal gemeten vrachtwagens
2	1
4	1
6	1
7	3
10	1

3.2 Totaalresultaat

De afzonderlijke meetsessies (14 februari en 1 maart 2017) zijn met elkaar gecombineerd om alle meetresultaten in beeld te brengen voor vrachtwagens met Euro VI-klasse en voor vrachtwagens met een lagere milieuklasse. Het resultaat op genomen in Figuur 9.



Figuur 9 Aantal gemeten vrachtwagens op 14 februari en 1 maart 2017 naar NO_x/CO₂-verhouding (ppb/ppm), ingedeeld naar intervallen op gehele waarden. Er is onderscheid gemaakt in vrachtwagens in de Euro VI-klasse (geel) en de klasse Euro V en lager (zwart). Het totale aantal gemeten vrachtwagens in de Euro VI-klasse is 31 en klasse Euro V en lager is 114.

Er zijn veel meer vrachtwagens gemeten in de klasse Euro V en lager, namelijk 114 stuks, dan gemeten vrachtwagens in de Euro VI-klasse, namelijk 31 stuks. Dit laat zien dat het percentage vrachtwagens in de Euro VI-klasse nog niet erg hoog is, wat verwacht mag worden voor een norm die relatief recent van kracht is. Daarnaast laten de resultaten zien dat NO_x/CO₂-verhouding relatief lager is voor de Euro VI-vrachtwagens in vergelijking met de lagere Euro-classes. Dit resultaat is conform verwachting: emissieratio voor Euro VI-vrachtwagens is verhoudingsgewijs laag, behoudens een aantal uitzonderingen. De emissieratio voor vrachtwagens met een Euro-klasse lager dan Euro VI, is veel meer verdeeld over de hogere emissieratio's en laat een hoog aantal gemeten vrachtwagens zien voor een NO_x/CO₂-verhouding >10.

Voor Euro VI-vrachtwagens is het opvallend dat er veel vrachtwagens een emissieratio van 0 tot 5 laat zien en dat daarnaast waarnemingen zijn van emissieratio's van 6 en hoger. Omdat hier alleen vrachtwagens van dezelfde meetklasse zijn vergeleken, zou de karakteristiek van de emissiebron vergelijkbaar moeten zijn. Zoals is beschreven in paragraaf 2.3, liggen NO_x/CO₂-verhoudingen tussen 0 en 5 ppb/ppm binnen de verwachte bandbreedte van een vergelijkbare bron, op grond van de reproduceerbaarheidsmetingen. Een grenswaarde is niet eenvoudig aan te geven. Het 90-percentiel voor de metingen voor Euro VI ligt op 8,5 ppb/ppm; het 70-percentiel ligt op 6,5 ppb/ppm. De grenswaarde voor verdacht hoge emissies ligt ergens tussen deze waarden (zie ook de inleiding en voetnoot 2, pagina 16).

4. Conclusies en aanbevelingen

De uitgevoerde metingen laten zien dat de pluimmethodiek succesvol en reproduceerbaar kan worden toegepast om de NO_x/CO_2 -verhouding van passerende vrachtwagens te meten, mits onder geschikte omstandigheden uitgevoerd. Bij verdere automatisering kunnen de metingen onbemand worden uitgevoerd. Uit de metingen blijkt dat een relevante minderheid van de Euro VI-vrachtwagens wel degelijk een verdacht hoge NO_x -emissie heeft: bij één van de meetsessies bleek dat bij 5 van de 24 Euro VI-vrachtwagens een verdacht hoge NO_x -emissie is gemeten. Het is op dit moment niet zeker of deze vrachtwagens normen overtreden. Dit kan bijvoorbeeld worden vastgesteld door deze vrachtwagens te controleren op mogelijke manipulatie van het SCR-systeem. Emissieratio's boven 6,5 tot 8,5 ppb NO_x /ppm CO_2 zijn verdacht hoog en vallen buiten de bandbreedte van de uitgevoerde reproduceerbaarheidsmetingen.

Een aantal aandachtspunten en aanbevelingen die relevant zijn voor vervolgonderzoek:

- Meetplek, windrichting en windsnelheid: onder bepaalde omstandigheden is er te veel turbulentie waardoor pluimen te veel verdunnen en in de meetreeksen moeilijk te identificeren zijn. Ook neemt de onzekerheid significant toe als met name de gemeten CO_2 -concentraties beperkte pieken laten zien op de achtergrondconcentratie. Een belangrijke factor hierbij is de aanwezigheid van obstakels die de wind beïnvloeden. Wellicht is de wijze van monsternamen ook nog voor verbetering vatbaar. De wind is bij voorkeur niet te sterk of te zwak (bij 5 m/s worden relatief veel pluimen gemeten met CO_2 -pieken boven de CO_2 -drempelwaarde) en bij voorkeur zoveel als mogelijk haaks op de rijrichting en niet beïnvloed door obstakels. Daarnaast worden bij voorkeur monitoren ingezet met een zo hoog mogelijke meetfrequentie. Verdere verbetering en automatisering van dit type metingen is eveneens mogelijk, bijvoorbeeld middels geautomatiseerde verwerking van de meetgegevens en automatische koppeling aan het kentekenregistratiesysteem.
- Intensiteit verkeer: bij veel passerende voertuigen blijken afzonderlijke pieken moeilijk toe te kennen aan bepaalde passerende vrachtwagens. Dit geldt zowel voor vrachtwagens als voor andere type voertuigen. Meer ideale meetlocaties kunnen ontworpen worden, bijvoorbeeld door het verkeer gedoseerd langs de meetapparatuur te laten rijden, zoals bij sommige opritten het verkeer gedoseerd wordt toegelaten tot snelwegen.
- Gezien de recente inwerkingtreding van de Euro VI-normen, is het aantal Euro VI-vrachtwagens nog niet erg groot, 10 tot 20% van de passerende vrachtwagens blijkt in deze klasse te vallen. Het is wellicht zinvol om ook Euro V-vrachtwagens te analyseren, want ook in deze Euro-klasse is door tenminste een deel van de fabrikanten SCR toegepast, die mogelijk gemanipuleerd kan worden.
- Door de integraal van de pieken te analyseren in plaats van de piekmaxima, wordt de ruis in de meetresultaten omlaag gebracht en neemt de meetonzekerheid af.

5. Literatuur

CAFEE (2014): *Heavy-Duty Vehicle Diesel Engine Efficiency Evaluation and Energy Audit*. Center for Alternative Fuels, Engines & Emissions, West Virginia University. A. Thiruvengadam et al, October 2014.

Dieselnet (2017): *EU: Heavy-Duty Truck and Bus Engines*. Online informative:
<https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php#intro> (laatst bezocht 12 juli 2017).

Hensen, A.; Bulk, W.C.M. van den; Blom, M.J.; Vermeulen, A.T.; Kos, G.P.A.; Berkhout, A.J.C.; Hoff, G.R. van der; Wesseling, J.; Nguyen, L.; Erbrink, J.J.; Wolff, J. de; Hooghwerff, J. (2014): *Rapportage Scheepvaartmetingen Loenen 2014*. ECN-E--14-044, 12 december 2014.

RVO (2017): *Nederlandse lijst van energiedragers en standaard CO₂ emissiefactoren, versie januari 2017*. Door P.J. Zijlema, projectnummer 109749/BL2017, januari 2017, RVO.



Energy research Centre of the Netherlands

Postbus 1

1755 ZG PETTEN

Contact

088 515 4949

info@ecn.nl

www.ecn.nl