

**TNO-rapport****TNO 2017 R11414v2****Inzicht in het energieverbruik, de CO<sub>2</sub>-uitstoot  
en de NO<sub>x</sub>-uitstoot van het  
spoorgoederenvervoer****Earth, Life & Social Sciences**

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

[www.tno.nl](http://www.tno.nl)

T +31 88 866 00 00

Datum	6 april 2018
Auteur(s)	Dr. N.E. Ligterink Drs. T. Smit. Ir. J.S. Spreen
Exemplaarnummer	2017-STL-RAP-0100310158
Aantal pagina's	20 (incl. bijlagen)
Opdrachtgever	Connekt
Projectnaam	Verdere karakterisering CO <sub>2</sub> -uitstoot spoorgoederenvervoer
Projectnummer	060.24395

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.

© 2017 TNO

# Inhoudsopgave

<b>Samenvatting</b> .....	<b>3</b>
<b>1 Inleiding</b> .....	<b>5</b>
1.1 Achtergrond .....	5
1.2 Aanpak en afbakening van het onderzoek .....	6
1.3 Leeswijzer .....	6
<b>2 Marktverkenning en dataverzameling</b> .....	<b>7</b>
2.1 Achtergrond .....	7
2.2 Benaderen vervoerders .....	8
<b>3 Opbouw meting</b> .....	<b>9</b>
3.1 Inleiding .....	9
3.2 Meten van CO <sub>2</sub> en NO <sub>x</sub> .....	9
3.3 Meten van het energiegebruik (kWh).....	10
<b>4 Resultaten meting</b> .....	<b>11</b>
4.1 Resultaten diesellocomotief.....	11
4.2 Resultaten Electriche locomotief.....	16
<b>5 Conclusie</b> .....	<b>18</b>
<b>6 Ondertekening</b> .....	<b>20</b>

## Samenvatting

### ACHTERGROND

De Topsector Logistiek heeft de ambitie om de CO<sub>2</sub>-uitstoot die voorkomt uit logistieke activiteiten te reduceren. Hiervoor is onder meer inzicht nodig in de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de verschillende modaliteiten. Tot op heden bestaat beperkt inzicht in aspecten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het spoorgoederenvervoer.

Goederentreinen worden aangedreven door een combinatie van elektrische en diesellocomotieven. Diesellocomotieven worden vaak ingezet voor het rangeren in het Rotterdamse Havengebied; elektrische locomotieven worden ingezet voor het overbruggen van (grensoverschrijdende) spoortrajecten van lange afstand met bestemmingen in het achterland.

TNO heeft, in opdracht van Connekt, het energiegebruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een elektrische locomotief en twee diesellocomotieven in kaart gebracht. Van de diesellocomotieven is tevens de NO<sub>x</sub>-uitstoot bepaald.

### AANPAK

Het energiegebruik en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de elektrische locomotief zijn berekend aan de hand van het logboek van de locomotief, waarin onder andere het totale gewicht van de trein met en zonder lading en de treinlengte worden vermeld. De berekeningen zijn gekalibreerd met de gegevens van de energiemeter van de locomotief, die op de trajecten in Duitsland gegevens registreerde.

De CO<sub>2</sub>-uitstoot en NO<sub>x</sub>-uitstoot van twee diesellocomotieven zijn gemeten met behulp van het door TNO ontwikkelde Smart Emission Measurement System (SEMS).

### CONCLUSIES

#### ***Conclusies ten aanzien van de gemeten diesellocomotieven***

- Waar een rangeerprofiel<sup>1</sup> werd verwacht (en gepland stond), wordt in beide metingen de diesellocomotief ook soms ingezet buiten het Rotterdamse Havengebied.
- Tussen 75% en 84% van de tijd dat de motor van de diesellocomotief aanstaat, draait deze stationair.
- Ongeveer de helft van de CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-uitstoot vindt plaats tijdens het stationair draaien.
- De CO<sub>2</sub>-uitstoot van één diesellocomotief over de gehele meetperiode is 60,7 ton. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van één diesellocomotief gedurende een jaar is vergelijkbaar met dat van vier trekker-opleggers gedurende een jaar. De NO<sub>x</sub>-emissie in een jaar is vergelijkbaar met dat van 200 moderne Euro-VI trekker-opleggers in een jaar.

Aannemende dat er 40 actieve diesellocomotieven in Nederland rijden betekent dat er op jaarbasis 2.428 ton CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten.

---

<sup>1</sup> Hiermee wordt bedoeld dat de diesellocomotief wordt ingezet tussen emplacementen en terminals in het Rotterdamse Havengebied

**Conclusies ten aanzien van de gemeten elektrische locomotief**

- Het typische energiegebruik van een elektrische locomotief is 0.02 kWh per ton\*km. Dat is substantieel lager dan van wegtransport. Voor een zware trekker-oplegger is het energiegebruik per gewicht en afstand een factor twee hoger.
- Met name bij het transport van groot-volume-lading met lage dichtheid wordt dit voordeel in energiegebruik tenietgedaan door de zware uitvoering van treinwagons en de bijbehorende rijweerstand. Deze rijweerstand ligt namelijk hoger dan bij vrachtwagens.
- Meer dan het gewicht van de trein, blijkt de lengte van de trein een bepalende factor voor het energiegebruik van de elektrische locomotief die de wagons trekt. Het effect van de lengte van de trein is sterker dan verwacht. Blijkbaar geldt het volgende: hoe langer de trein, hoe meer assen en hoe meer frictie er ontstaat. Dat bepaalt waarschijnlijk in belangrijkste mate de toenemende vraag naar vermogen en een hoger elektriciteitsgebruik voor dezelfde transportvraag in tonnen lading over kilometers. Het reduceren van de frictie van de assen van de wagons lijkt dus een belangrijke factor in het reduceren van het energiegebruik van elektrische locomotieven.

**De CO<sub>2</sub>-uitstoot van een treinrit**

De CO<sub>2</sub>-uitstoot van een treinrit blijkt moeilijk te koppelen aan de transportbehoefte: het vervoer van een ton lading over een vaste afstand. De voornaamste oorzaak is dat een groot deel van de emissies van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> bij diesellocomotieven en van het elektriciteitsgebruik bij elektrische locomotieven niet direct is gekoppeld aan het vervoer van lading. Een belangrijk deel van de uitstoot van diesellocomotieven vindt plaats bij stilstand, en het elektriciteitsverbruik bij elektrische locomotieven blijkt meer afhankelijk van het getrokken materieel dan van de vervoersvraag.

# 1 Inleiding

## 1.1 Achtergrond

De Topsector Logistiek heeft de ambitie om de CO<sub>2</sub>-uitstoot die voorkomt uit logistieke activiteiten te reduceren. Hiervoor is inzicht nodig in de opbouw van logistieke activiteiten en de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de verschillende modaliteiten.

Tot op heden bestaat beperkt inzicht in de prestaties van het spoorgoederenvervoer met betrekking tot de CO<sub>2</sub>-uitstoot. Er is onvoldoende rekening gehouden met de karakteristieken van het spoorgoederenvervoer. Het goederenvervoer per spoor is aanbod-gedreven en dat maakt dat een trein met fluctuerende tonnages rijdt. Daarnaast worden goederentreinen aangedreven door (een combinatie van) elektrische en diesellocomotieven die vaak worden ingezet voor het rangeren in het Rotterdamse Havengebied dan wel het overbruggen van grensoverschrijdende spoortrajecten met bestemmingen in het achterland. Door verstoringen op het spoor moeten vervoerders soms omrijden. De extra treinkilometers die dat tot gevolg heeft, hebben impact op de CO<sub>2</sub>-uitstoot van de treinrit.

In opdracht van Connex heeft TNO een analyse gemaakt van het energiegebruik van een elektrische locomotief en de uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> van een diesellocomotief.

Het onderzoek bestond uit drie fasen:

1. Marktverkenning onder spoorgoederenvervoerders
2. Meting energiegebruik en NO<sub>x</sub>-uitstoot
3. Analyse van de data en rapportage

De oorspronkelijke onderzoeksvragen zijn aangepast naar aanleiding van de marktverkenning. Zo kon de CO<sub>2</sub>-uitstoot voor een specifieke treinrit niet worden vastgesteld bij gebrek aan gegevens en wilde men graag inzicht in de NO<sub>x</sub>-emissies, iets waar in het oorspronkelijke plan van aanpak nog niet was voorzien.

De definitieve onderzoeksvragen zijn:

1. Wat is de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een diesellocomotief over een bepaalde meetperiode, rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en het gewicht dat door de diesellocomotief is getrokken?
2. Wat is de NO<sub>x</sub>-uitstoot van een diesellocomotief over een bepaalde meetperiode, rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en het gewicht dat door de diesellocomotief is getrokken?
3. Wat is het energiegebruik (kWh) van een elektrische locomotief over een bepaalde meetperiode, rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en gewicht dat door de elektrische locomotief is getrokken?

## 1.2 Aanpak en afbakening van het onderzoek

In dit onderzoek kijken we uitsluitend naar containervervoer per spoor. In tegenstelling tot bulkvervoer kent het containervervoer meer dynamiek in de uitvoering en diversiteit aan soorten goederen en volume dat wordt vervoerd. Deze diversiteit biedt meer mogelijkheden om eventuele verschillen in de CO<sub>2</sub>-uitstoot en NO<sub>x</sub>-uitstoot te kunnen karakteriseren.

Om antwoord te kunnen geven op de onderzoeksvragen is de volgende aanpak gevolgd:

1. Het betrekken van spoorgoederenvervoerders bij dit onderzoek. Dit onderzoek staat of valt met de deelname van één of meerdere spoorgoederenvervoerders die bereid zijn middelen (locomotief, mensen, data) en tijd beschikbaar te stellen. Een marktverkenning onder de spoorgoederenvervoerders die actief zijn op de Nederlandse spoorinfrastructuur moet de interesse voor deelname toetsen en inzicht geven in:
  - a. het dienstenaanbod per spoor dat wordt gereden, met frequentie en bestemming(en);
  - b. beschikbaarheid van data;
  - c. specifieke behoeften van de spoorgoederenvervoerder.
2. Het meten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot en NO<sub>x</sub>-uitstoot. Op basis van de uitkomst van de marktverkenning wordt met de participerende vervoerder(s) een meetplan opgesteld. Met elke vervoerder worden afspraken gemaakt over o.a.:
  - a. doorlooptijd van de meting;
  - b. gebruik en beschikbaarheid van data.
3. Het analyseren van de data. In de analysefase van het onderzoek worden de resultaten geanalyseerd. Uit de analyse kan de CO<sub>2</sub>-uitstoot worden bepaald. Ook moet op basis van deze analyse antwoord kunnen worden gegeven op de vraag welke factoren bepalend zijn voor eventuele onderlinge verschillen in de CO<sub>2</sub>-uitstoot.

## 1.3 Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt verslag gedaan van de marktverkenning die TNO heeft uitgevoerd. Hoofdstuk 3 laat vervolgens zien hoe de metingen aan de elektrische en diesellocomotieven zijn uitgevoerd. De resultaten van de metingen worden in hoofdstuk 4 uitgewerkt. Het rapport besluit met de conclusies in hoofdstuk 5.

## 2 Marktverkenning en dataverzameling

### 2.1 Achtergrond

Spoorgoederenvervoerders (hierna genoemd vervoerders) die in Nederland actief zijn met het vervoeren van lading over het spoor moeten hiervoor spoorcapaciteit (een treinpad) aanvragen bij de spoorinfrastructuurbeheerder ProRail. Voor het soort goed dat wordt vervoerd en het type locomotief (elektrisch of diesel-aangedreven) dat hiervoor wordt ingezet gelden verschillende rij- en inzetkarakteristieken. Deze rijkarakteristieken bepalen de snelheid waarmee een vervoerder mag rijden in relatie tot het tonnage van de trein, maar ook de capaciteit uitgedrukt in de tijd die gepland moet worden voor het gebruik van de spoorinfrastructuur. In Figuur 1 is de Nederlandse spoorinfrastructuur weergegeven.



Figuur 1: De Nederlandse spoorinfrastructuur (bron: ProRail).

Vervoerders kunnen voor het vervoer van hun lading gebruik maken van de Betuweroute (160 km), die zich uitsluitend leent voor het spoorgoederenvervoer, of het gemengde net (6.570 km). Het gemengde net leent zich voor zowel het reizigers- als het goederenvervoer.

Ongeveer 85% van het spoorgoederenvervoer dat gebruik maakt van de Nederlandse spoorinfrastructuur heeft een bestemming buiten de grens. In 2014 gingen er 25.300 goederentreinen via de Betuweroute de grens over tussen Nederland en Duitsland en ongeveer 16.860 goederentreinen deden dit via het gemengde net.

## 2.2 Benaderen vervoerders

Voor het daadwerkelijk kunnen meten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot is de participatie van de vervoerders nodig. Hiertoe zijn acht vervoerders benaderd. Vervolgens heeft TNO gesprekken gevoerd met vier vervoerders waarbij inzicht is ontstaan in:

1. De diensten die de vervoerders aanbieden op het spoor;
2. Frequentie van de diensten op weekbasis met gemiddeld aantal containers (TEU<sup>2</sup>) dat wordt vervoerd;
3. Opbouw van de diensten onderverdeeld naar soort tractie (elektrisch dan wel diesel-aangedreven of een combinatie van beiden);
4. Organisaties betrokken bij uitvoering van de treinrit. Een treinrit bestaat vaak uit verschillende deelprocessen, die niet per definitie door de vervoerder zelf worden uitgevoerd;
5. Type data dat beschikbaar kan worden gesteld. Elke vervoerder had beschikking over de volgende type data:
  - a. Gereden treinkilometers;
  - b. Getrokken gewicht uitgedrukt in tonnen per treinrit;
  - c. Dieselverbruik in liter per maand per diesellocomotief;
  - d. Energiegebruik in kWh per maand per elektrische locomotief;
  - e. Doorlooptijd van de treinrit (in uren/minuten).
6. Behoeften van de vervoerders. Alle vervoerders gaven aan meer te willen inzetten op duurzaamheid, naast kosten en betrouwbaarheid van de treinen. Het meten van de CO<sub>2</sub>-uitstoot draagt hieraan bij en stelt vervoerders in staat om verladers antwoord te geven op vragen hieromtrent. Twee vervoerders hebben aangegeven dit onderzoek als kans te zien om naast de CO<sub>2</sub>-uitstoot ook de uitstoot van stikstofoxiden (NO<sub>x</sub>) te meten.

Voor het onderzoek is de beschikbaarheid van dit soort data relevant, omdat hiermee een eventueel verband tussen getrokken gewicht, gereden treinkilometers enerzijds en de uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> en het energiegebruik anderzijds kan worden vastgesteld.

Uiteindelijk hebben twee vervoerders zich gecommitteerd aan het onderzoek, waaronder Rotterdam Rail Feeding.

---

<sup>2</sup> Twenty Foot Equivalent Unit, de standaardmaat voor containers



## 3 Opbouw meting

### 3.1 Inleiding

Dit onderzoek is uitgevoerd in samenwerking met twee vervoerders. Voor het kunnen uitvoeren van een meting naar uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> is met beide vervoerders een afweging gemaakt tussen de beschikbare type locomotieven enerzijds en de inzet daarvan voor het uitvoeren van hun diensten anderzijds.

Die afweging heeft ertoe geleid dat met vervoerder 1 metingen zijn verricht aan het energiegebruik in kWh van een elektrische locomotief en de uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> van een diesellocomotief. Met vervoerder 2 is eveneens de uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> gemeten van een diesellocomotief.

CO<sub>2</sub> is het belangrijkste broeikasgas. De hoeveelheid CO<sub>2</sub> die vrijkomt is proportioneel met de koolstof in de diesel. Daarom kan op basis van het brandstofverbruik worden bepaald hoeveel CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten. De uitstoot van NO<sub>x</sub> kan sterk variëren met de motortechnologie en inzet. De NO<sub>x</sub>-uitstoot van dieselmotoren zorgt voor verhoogde NO<sub>2</sub>-concentraties in de lucht en is daarmee een belangrijke oorzaak van luchtverontreiniging.<sup>3</sup>

### 3.2 Meten van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>

Om het emissiegedrag en brandstofverbruik van voertuigen in de praktijk goed in beeld te brengen heeft TNO een meetinstrument ontwikkeld, genaamd Smart Emissions Measurement System, kortweg SEMS. SEMS is geschikt voor het meten van de CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-emissies van voertuigen terwijl deze in de dagelijkse praktijk worden ingezet. Met behulp van sensoriek wordt de gemeten data draadloos van het meetinstrument naar een database verstuurd vanuit waar de data wordt geanalyseerd en verwerkt. Met de resultaten van de analyse kunnen uitspraken worden gedaan over de uitstoot van het onderzochte voertuig. SEMS is eerder al ingezet in de binnenvaart en bij het wegtransport. In dit onderzoek is SEMS ingezet om de CO<sub>2</sub>-uitstoot en NO<sub>x</sub>-uitstoot van twee diesellocomotieven te meten binnen een bepaalde meetperiode.

Om een zo goed mogelijke registratie van de uitstoot te realiseren, zijn de SEMS-sensoren bij beide diesellocomotieven in de uitlaat geplaatst. Eén sensor meet de concentratie NO<sub>x</sub>, terwijl de andere de concentratie zuurstof meet. Met de zuurstofconcentratie kan vervolgens de CO<sub>2</sub>-concentratie worden berekend. De concentraties laten zich niet direct vertalen naar de uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> in grammen, maar geven wel een indicatie van de milieuprestatie ten opzichte van andere voer- en vaartuigen. Voor wegtransport geldt voor dieselpersonenauto's, bestelauto's en vrachtwagens van rond 2015 (Euro-5/V) een uitstoot van ongeveer 4 gram NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub>. De huidige Nederlandse wagenparksamenstelling komt op dit moment gemiddeld ook neer deze 4 gNO<sub>x</sub>/kgCO<sub>2</sub>. Hoe hoger het aantal grammen NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub>, hoe meer NO<sub>x</sub> het voertuig uitstoot per hoeveelheid uitgestoten CO<sub>2</sub> en/of de hoeveelheid verbruikte brandstof.

---

<sup>3</sup> Emissions of transboundary air pollutants in the Netherlands 1990-2014 RIVM Report 2015-0210 B.A. Jimmink et al.

Een voertuig dat per verbruikte liter brandstof relatief veel NO<sub>x</sub> uitstoot, draagt zo meer bij aan luchtkwaliteitsproblemen dan een voertuig dat relatief weinig NO<sub>x</sub> uitstoot per eenheid verbruikte brandstof. Moderne Euro-VI vrachtwagens laten een fors lagere NO<sub>x</sub>-uitstoot zien dan Euro-V vrachtwagens. Het is mede daarom de verwachting dat de gemiddelde NO<sub>x</sub>-uitstoot betrokken op de verbruikte brandstof van het Nederlandse wagenpark in de nabije toekomst zal dalen onder de 4 gNO<sub>x</sub>/kgCO<sub>2</sub>.

De brandstofverbruikscijfers over de hele meetperiode van de eerste diesellocomotief geven een indicatie van de totale uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>. Vanwege een verouderd motormanagementsysteem was het bij de eerste diesellocomotief echter niet mogelijk om de motorgegevens uit te lezen. Daarom was het bij deze locomotief niet goed mogelijk om het aandeel van de uitstoot tijdens stationair draaien te bepalen. Bij de metingen aan de tweede diesellocomotief zijn de motorgegevens wel uitgelezen. Zo kon voor de tweede locomotief wel een goed onderscheid worden gemaakt in de uitstoot bij verschillende omstandigheden.

### **3.3 Meten van het energiegebruik (kWh)**

Het energiegebruik van de elektrische locomotief is berekend aan de hand van het logboek van de locomotief, waarin onder andere het totale gewicht van de trein met en zonder lading en de treinlengte worden vermeld. Deze methode is gehanteerd omdat de energiemeter in de elektrische locomotief alleen goed werkte in Duitsland. Om toch de gegevens over de gereden kilometers in Nederland mee te laten wegen, is voor deze analyse gekozen. De gegevens van de energiemeter (in Duitsland) zijn wel gebruikt om de op het logboek gebaseerde berekening te kalibreren.

Het energiegebruik van de elektrische locomotief wordt weergegeven op een energiemeter. Omdat de energiemeter ook andere waarden aangeeft naast energiegebruik, is het energiegebruik niet continu zichtbaar op het display. Om het energiegebruik te bepalen, is gebruik gemaakt van een GoPro-camera die gedurende de treinrit werd gericht op het display van de energiemeter. Aan het einde van de meetperiode zijn de opgenomen beelden vertaald naar data, op basis waarvan analyses zijn uitgevoerd om het energiegebruik in kWh te bepalen.

## 4 Resultaten meting

Dit hoofdstuk beschrijft de resultaten van het onderzoek per type locomotief. Het onderzoek is uitgevoerd in de periode van november 2016 t/m oktober 2017.

### 4.1 Resultaten diesellocomotief

Beide vervoerders hebben aangegeven de diesellocomotieven die in dit onderzoek zijn gemeten met name in te zetten voor rangeerwerkzaamheden in het Rotterdamse Havengebied. Rangeerwerkzaamheden kenmerken zich door de relatief korte afstanden die worden afgelegd. Zo rijden ze bijvoorbeeld tussen een emplacement en een terminal. Daarnaast worden ze gebruikt voor het samenstellen van een trein waarbij veel locomotiefbewegingen worden gemaakt.

#### Meting 1

De eerste meting is uitgevoerd bij vervoerder 1 en kent de volgende details:

- Meetperiode: 29 november 2016 t/m 16 februari 2017
- Bedrijfsuren: er zijn in de periode 656 motoruren gelogd door SEMS, gemiddeld 11,5 uur per werkdag
- Type locomotief: diesel hydraulische locomotief, type G1206 van het merk MaK

#### *Inzet van de trein*

Wat direct opvalt bij het analyseren van de resultaten is dat de diesellocomotief niet alleen wordt ingezet in het Rotterdamse Havengebied, maar ook rijdt richting bestemmingen elders in Nederland en over de grens in Duitsland. Een deel van de tijd rijdt de trein bij hogere snelheden. De dunne rode lijn in

Figuur 2 geeft dit beeld goed weer.

Uit gesprekken met vervoerder 1 komt naar voren dat de locomotief soms wordt ingezet ter vervanging van vertraagde dan wel uitgevallen elektrische treinen. Er wordt continu een afweging gemaakt hoe de locomotief, gegeven de omstandigheden, het meest efficiënt kan worden ingezet.



Figuur 2: Inzet van de diesellocomotief bij vervoerder 1 – de dunne rode lijnen op de kaart geven aan waar de locomotief tijdens de meetperiode heeft gereden.

### *Uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>*

Ondanks het feit dat de locomotief buiten het Rotterdamse Havengebied wordt ingezet, laat het wel een rangeerprofiel zien, van wisselende en beperkte motorlast.

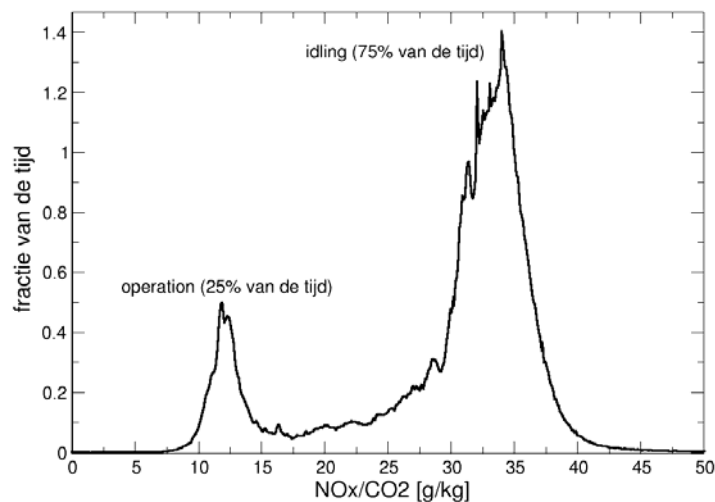
Als we de rijsnelheid als volgt indelen:

- Stilstand (0 km/u);
- Rangeren (10-40 km/u);
- Lange-afstandrijden (>40 km/u);

dan kan worden geconstateerd dat de locomotief 50% van de tijd stilstaat met de motor aan en 34% van de tijd beperkt vermogen levert ('Rangeren'). Daarnaast blijkt dat de locomotief weinig constante snelheid laat zien en veel remt en optrekt, wat aansluit bij het profiel van een rangeerlocomotief.

Als we deze inzet van de locomotief vertalen naar uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> zien we het volgende beeld ontstaan (Figuur 3):

- 1) Gedurende de meetperiode heeft de locomotief 75% van zijn tijd stationair gedraaid. Dit betekent dat de motor aanstond, terwijl er geen optrekkende, remmende of rijdende beweging is gemaakt, oftewel: terwijl de locomotief stil heeft gestaan. Over de meetperiode betekent dit dat de locomotief gemiddeld 35 gram NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub> heeft uitgestoten. Dit is vergelijkbaar met een vrachtwagen met een Euro 0 motor (1990), en 10 keer zo hoog als voor Euro-V dieselvrachtwagens uit 2010-2015.
- 2) Gedurende de meetperiode is de locomotief 25% van de tijd in operatie geweest en heeft daarbij gemiddeld 12 gram NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub> uitgestoten.



Figuur 3: De hoeveelheid NO<sub>x</sub> per CO<sub>2</sub> over de tijd laat zien dat er twee soorten operatiemodi bestaan bij deze diesellocomotief. Een groot deel van de tijd (de hoogte en breedte van de piek) is de uitstoot 35 gNO<sub>x</sub>/kgCO<sub>2</sub>, die is geassocieerd met stationair draaien en lage last. Een kleinere piek bij 12 gNO<sub>x</sub>/kgCO<sub>2</sub> is van het aandeel in de tijd dat de motor hoog vermogen levert. De NO<sub>x</sub>-uitstoot is dan relatief lager, maar absoluut waarschijnlijk hoger.

### Meting 2

De tweede meting is uitgevoerd met Rotterdam Rail Feeding en kent de volgende details:

- Meetperiode: 26 juni 2017 t/m 16 september 2017 (82 dagen)
- Bedrijfsuren: er zijn de in periode 820 motoruren gelogd door SEMS, gemiddeld 9,5 uur per werkdag
- Type locomotief: type BR203 van het merk Alstom

### *Inzet van de trein*

In tegenstelling tot de locomotief van vervoerder 1 komt de locomotief van vervoerder 2 niet verder dan het Rotterdamse Havengebied en de Betuweroute tot aan Zevenaar.

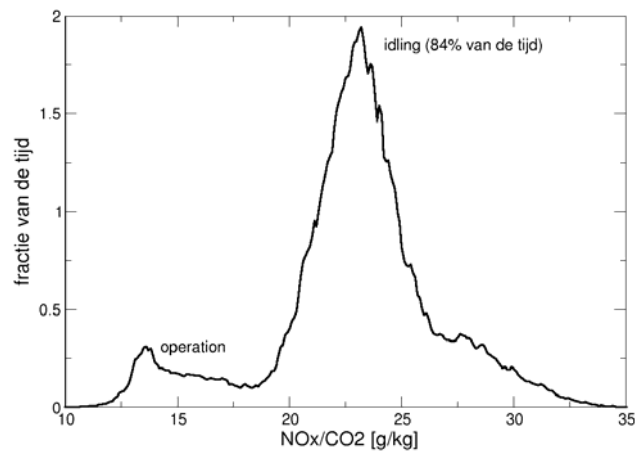
Hoewel de diesellocomotief ook op de Betuweroute rijdt, wordt deze meestal ingezet voor rangeerwerkzaamheden in het Rotterdamse Havengebied. Een trein die uit het achterland komt is meestal elektrisch aangedreven. Op een emplacement vindt dan een locomotiefwissel plaats, van elektrisch naar diesel-aangedreven. Op het moment dat de diesellocomotief is gekoppeld aan de trein vindt een controle plaats van de wagons. De diesellocomotief draait op dit moment stationair voor de luchtopbrengst van de pneumatische installaties, zoals de remmen van de wagons. Na controle vervolgt de trein zijn rit richting (meestal) een terminal om de wagonlading te brengen dan wel te halen (of een combinatie van beiden). De motor draait nu een laag toerental, omdat weinig vermogen wordt gevraagd. Indien de trein nog een terminal aandoet om wagenlading te lossen dan wel te laden, blijft de grote diesellocomotief wederom stationair draaien. Zodra de wagonlading is geplaatst op de terminal controleert de machinist de remmen en draait de diesellocomotief stationair voor de luchtopbrengst. Als het proces van laden en lossen op de terminal is afgerond vertrekt de trein op vol vermogen richting het achterland.

Om het stationair draaien te verminderen heeft Rotterdam Rail Feeding op eigen initiatief op alle diesellocomotieven van type BR203 een vernieuwde hulpdieselmotor aangebracht, die samen met een kleine elektrische compressor de pneumatische installatie verzorgt zonder dat de hoofdmotor hoeft te draaien.

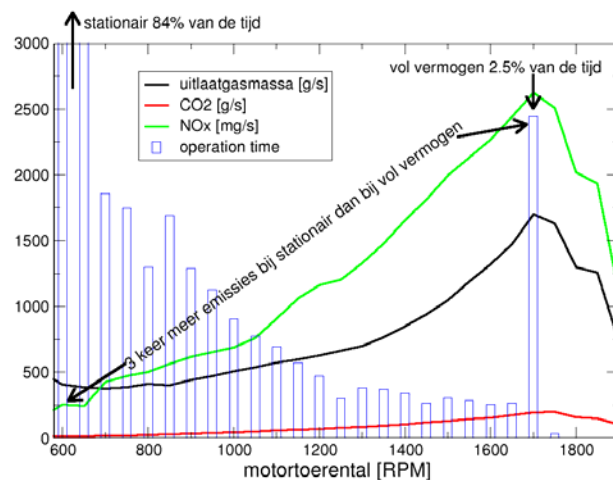
### *Uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub>*

Als we deze inzet van de locomotief vertalen naar uitstoot van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> zien we het volgende beeld ontstaan:

- 1) Gedurende de meetperiode heeft de locomotief 84% van zijn tijd stationair gedraaid. Over de meetperiode betekent dit dat de locomotief gemiddeld 24 gram NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub> heeft uitgestoten. Dit is te zien in Figuur 4.
- 2) Gedurende de meetperiode is de locomotief 16% in operatie geweest en heeft daarbij gemiddeld 12 gram NO<sub>x</sub> per kilogram CO<sub>2</sub> uitgestoten. Dit is de linker piek in Figuur 4.



Figuur 4: Deze figuur geeft aan dat het beeld van de tweede diesellocomotief vergelijkbaar is met dat van de eerste locomotief. Het grootste deel van de emissies vindt plaats bij stationair draaien ('idling'). Figuur 5 geeft aan hoe dat verdeeld is voor verschillende toerentallen.

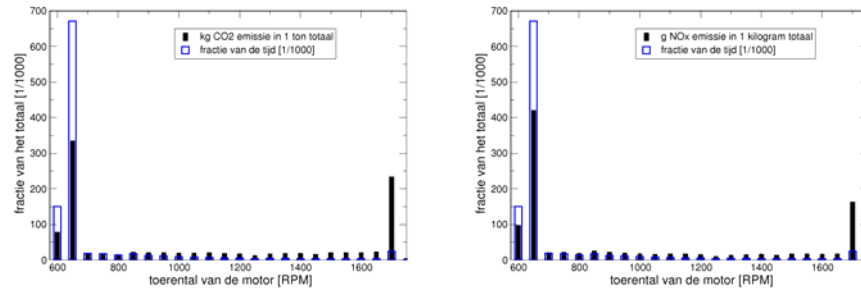


Figuur 5: De variatie van emissies van  $\text{NO}_x$  en  $\text{CO}_2$  per seconde over het motortoerentalbereik, met in blauw de verdeling van de tijd.

Bij de tweede locomotief zijn de operaties vergelijkbaar met die van de eerste locomotief: veel stationair draaien en een beperkte tijd op hoge last werken. Bij stationair draaien is het brandstofverbruik lager, dus rijst de vraag in hoeverre stationair draaien bijdraagt aan de totale  $\text{CO}_2$ - en  $\text{NO}_x$ -uitstoot. Omdat er genoeg gegevens beschikbaar zijn voor de tweede diesellocomotief, kan dat ook bepaald worden.

In Figuur 6 is de totale emissie van  $\text{CO}_2$  (links) en  $\text{NO}_x$  (rechts) weergegeven over

het toerental. Een hoge kolom betekent dus dat de motor ofwel veel tijd bij dit toerental heeft gedraaid, ofwel dat de emissies per seconde hoog zijn bij dit toerental, of beide. Om dit beter te kunnen duiden, is in de 'holle' kolommen de fractie van de tijd weergegeven.



Figuur 6: In de linker figuur is de verdeling van kilogrammen CO<sub>2</sub> verdeeld over de verschillende toerentalen van de motor per ton CO<sub>2</sub>. In de rechter figuur het vergelijkbare beeld voor NO<sub>x</sub>. Voor CO<sub>2</sub> vindt iets minder dan de helft van de uitstoot plaats bij stationair draaien, Voor NO<sub>x</sub> is dat iets meer dan de helft.

Het grootste aandeel in tijd draaien de diesellocomotieven stationair.

Het brandstofverbruik - en daarmee de CO<sub>2</sub>-emissie - is laag, maar door het grote aandeel in de tijd veroorzaakt stationair draaien bijna de helft van het totale brandstofverbruik en meer dan de helft van de totale NO<sub>x</sub>-uitstoot. Het draaien bij het hoogste toerental levert, ondanks het beperkte tijdsdeel, toch een bijdrage van ongeveer 30% aan de CO<sub>2</sub>-emissie en ongeveer 20% aan de NO<sub>x</sub>-emissie.

De totale CO<sub>2</sub>-uitstoot van de tweede locomotief (over de hele periode) is 60.7 ton. Dat komt overeen met 22.300 liter diesel, ofwel 272 liter per dag. Per seconde is de gemiddelde CO<sub>2</sub>-uitstoot 20.6 gram. Dit is vergelijkbaar met de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een trekker-oplegger op de autosnelweg. Qua CO<sub>2</sub>-uitstoot per dag is deze diesellocomotief daarmee vergelijkbaar met 4 trekker-opleggers in normale inzet. Voor de NO<sub>x</sub>-uitstoot is het beeld anders. In wegtransport daalt de NO<sub>x</sub> uitstoot snel, met de nieuwe wetgeving. Een moderne Euro-VI trekker-oplegger (bouwjaar vanaf 2015) heeft een NO<sub>x</sub>-uitstoot van 0.5 g/kg CO<sub>2</sub>. Voor de diesellocomotieven, met deze inzet over het jaar, is dat een factor 50 hoger. Voor NO<sub>x</sub>-emissies is de uitstoot per jaar van één diesellocomotief vergelijkbaar met 200 trekker-opleggers. Er zijn in Nederland ongeveer 70.000 trekker-opleggers.

De dieselafzet voor railverkeer ligt rond de 1 PJ per jaar.<sup>4</sup> Dat komt overeen met 23 miljoen kg diesel, en 84 kton CO<sub>2</sub>. Als de gemeten diesellocomotieven maatgevend zijn voor de gemiddelde NO<sub>x</sub>-uitstoot per kilogram CO<sub>2</sub> (rond de 25 g NO<sub>x</sub>/kg CO<sub>2</sub>), dan is het totaal per jaar 2.1 kton NO<sub>x</sub>. Dat komt goed overeen met de inschatting van CBS van 1.8 kton NO<sub>x</sub> voor spoorwegen.

<sup>4</sup> CBS, transport en mobiliteit 2015.

## 4.2 Resultaten Electriche locomotief

### Meting 3

De derde meting is uitgevoerd bij vervoerder 1 en kent de volgende details:

- Meetperiode: 29 november 2016 t/m 16 februari 2017
- Type locomotief: type BR189 van het merk Siemens

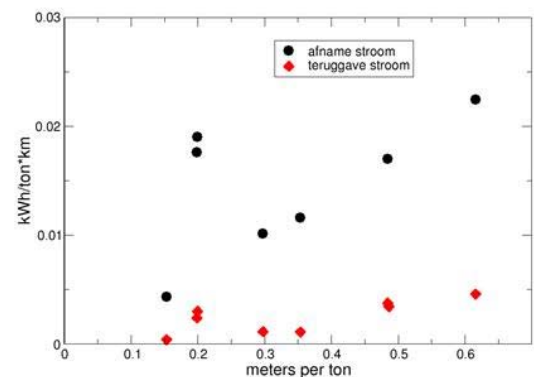
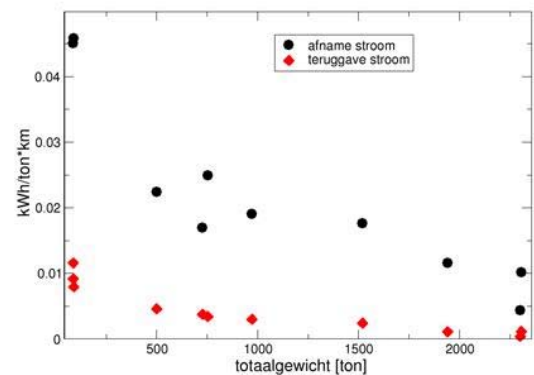
### *Inzet van de trein*

Vervoerder 1 zet de elektrische locomotief in bij het vervoer van goederen tussen Nederland en Duitsland. De resultaten zijn gebaseerd op de in Duitsland afgelegde treinkilometers.

Over het algemeen wordt aangenomen dat het elektriciteitsgebruik (kWh) per gewicht en afstand (ton\*kilometer) constant is. Dat blijkt niet zo te zijn. De lengte van de trein is van grote invloed op het totale elektriciteitsverbruik. Dit heeft vooral te maken met het feit dat langere treinen meer wagens meetrekken die voor meer frictie zorgen. Dit zal resulteren in een toenemende vraag naar vermogen (kW) en arbeid (kWh).

Het aandeel van optrekken en remmen in het totale elektriciteitsverbruik is niet groot (5%-10%). Hierbij is meegerekend dat energie wordt teruggaveerd aan het spanningsnet bij remmen.

Het optimale verbruik van een elektrische trein is 0,01 kWh/ton\*km, maar veel hogere verbruiksfactoren komen ook voor. De veronderstelling dat elektrische locomotieven op lange afstanden een vast energiegebruik per ton\*kilometer hebben kan in deze studie niet worden bevestigd. De variatie in verbruik is meer dan 100%. Deze variatie is groter dan voor wegtransport.



De aanname dat er vaste kWh per ton\*kilometer zou zijn, zou betekenen dat de punten in de figuren horizontaal zouden zijn. In werkelijkheid is het verschil tussen de hoogste en de laagste waarde een factor 3.

Het typische energiegebruik van 0.02 kWh per ton\*km is wel substantieel lager dan van wegtransport. Voor een trekker-oplegger is het energiegebruik een factor twee hoger. Voor kleinere voertuigen is deze verhouding nog ongunstiger.



Het gewicht van het materieel, in verhouding tot de vervoerde lading, bepaalt of dit kengetal in alle concrete situaties van toepassing is. Voor een vrachtwagen is het ladingsgewicht typisch 60% of minder van het totaalgewicht. De zware uitvoering van treinwagons en de bijbehorende rijweerstand zorgt ervoor dat voor lichtere, vooral groot-volume lading met lage dichtheid, het treintransport niet gepaard gaat met een lager energiegebruik.

Gegeven het energiegebruik, elektrisch of via vloeibare brandstof, variëren de CO<sub>2</sub>-emissies. In de toekomst is de verwachting dat elektriciteitsproductie door vergroeningsmaatregelen gemakkelijker tot lagere CO<sub>2</sub>-uitstoot kan leiden.

## 5 Conclusie

### *Overkoepelende conclusie*

**De CO<sub>2</sub>-uitstoot van een treinrit is moeilijk te koppelen aan de transportbehoefte: het vervoer van een ton lading over een vaste afstand. De voornaamste oorzaak is dat een groot deel van de emissies van CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> bij diesellocomotieven en van het elektriciteitsgebruik bij elektrische locomotieven niet direct is gekoppeld aan het vervoer van lading. Een belangrijk deel van de uitstoot van diesellocomotieven vindt plaats bij stilstand, en het elektriciteitsverbruik bij elektrische locomotieven blijkt meer afhankelijk van het getrokken materieel dan van de vervoersvraag.**

### *Hoofdvragen van het onderzoek*

Dit onderzoek heeft zich in eerste instantie gericht op het verder karakteriseren van de CO<sub>2</sub>-uitstoot van het spoorgoederenvervoer door rekening te houden met de verschillende deelprocessen van een specifieke treinrit. Hierin bestond tot dusver onvoldoende inzicht. Vanwege drie redenen is uiteindelijk besloten om de onderzoeksvragen anders te formuleren:

- 1) Uit de resultaten van de marktverkenning is gebleken dat de beschikbare data niet voldoende geschikt is om de deelprocessen te analyseren
- 2) De locomotieven die worden gemeten, worden niet of kunnen niet altijd volgens planning worden ingezet waardoor het continu meten van een specifieke treinrit niet is te realiseren
- 3) Mede op verzoek van de deelnemende vervoerders en in overleg met Connekt is besloten ook de NO<sub>x</sub>-uitstoot van diesellocomotieven in kaart te brengen

Daarmee zijn in dit onderzoek de volgende vragen beantwoord:

1. Wat is de CO<sub>2</sub>-uitstoot van een diesellocomotief over een bepaalde meetperiode rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en het gewicht dat door de diesellocomotief is getrokken?
2. Wat is de NO<sub>x</sub>-uitstoot van een diesellocomotief over een bepaalde meetperiode rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en het gewicht dat door de diesellocomotief is getrokken?
3. Wat is het energiegebruik (kWh) van een elektrische locomotief over een bepaalde meetperiode rekening houdend met het aantal treinkilometers dat is gereden en gewicht dat door de elektrische locomotief is getrokken?

### *Resultaten meting 1 en 2 aan de diesellocomotief*

Voor beide metingen hebben we gebruik gemaakt van het meetinstrument SEMS waarmee we hebben kunnen herleiden waar de diesellocomotief is geweest, hoe de locomotief is ingezet en dus hoe de motor is belast, en welke concentraties CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> als direct gevolg daarvan zijn uitgestoten. Voor meting 1 hebben we alleen concentraties CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> kunnen meten als gevolg van het niet uit kunnen lezen van bepaalde motorsoftware. In meting 2 was de juiste motorsoftware wel aanwezig, waardoor naast concentraties CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> ook de uitstoot CO<sub>2</sub> en NO<sub>x</sub> is bepaald.

De conclusies zijn:

- Waar een rangeerprofiel<sup>5</sup> werd verwacht (en gepland stond), wordt in beide metingen de diesellocomotief ook soms ingezet buiten het Rotterdamse Havengebied
- Tussen 75% en 84% van de tijd dat de motor van de diesellocomotief aanstaat, draait deze stationair
- Ongeveer de helft van de CO<sub>2</sub>- en NO<sub>x</sub>-uitstoot vindt plaats tijdens het stationair draaien
- De CO<sub>2</sub>-uitstoot van één diesellocomotief over de gehele meetperiode is 60,7 ton. De CO<sub>2</sub>-uitstoot van één diesellocomotief gedurende een jaar is vergelijkbaar met dat van 4 trekker-opleggers gedurende een jaar. De NO<sub>x</sub>-emissie in een jaar is vergelijkbaar met dat van 200 moderne Euro-VI trekker-opleggers in een jaar.

Aannemende dat er 40 actieve diesellocomotieven in Nederland rijden betekent dat er op jaarbasis 2.428 ton CO<sub>2</sub> wordt uitgestoten.

#### **Emissiewetgeving voor Non-Road Mobile Machinery (NRMM)**

Voor Non-Road Mobile Machinery (NRMM), waar treinen, binnenvaart, maar ook graafmachines en aggregaten onder vallen, gelden andere emissie-eisen dan voor vrachtwagens. De emissielimieten zijn minder streng, maar ook de testprocedure is beperkt. Lage last en dynamische belasting van de motor worden nauwelijks afgedekt door de NRMM-testprocedures. Dat de emissies bij stationair draaien relatief hoog zijn, en daardoor een belangrijke bijdrage hebben aan de totale NO<sub>x</sub>-uitstoot van diesellocomotieven, heeft waarschijnlijk te maken met deze beperkingen van de huidige NRMM-wetgeving. Toekomstige NRMM-wetgeving, bekend als "Stage V", moet deze problemen oplossen, maar mogelijk wordt het stationair draaien van de motor nog steeds onderbelicht in de wetgevingseisen.

#### **Resultaten meting elektrische treinen**

- Het typische energiegebruik van een elektrische locomotief is 0.02 kWh per ton\*km. Dat is substantieel lager dan van wegtransport. Voor een trekker-oplegger is het energiegebruik een factor twee hoger.
- Met name bij het transport van groot-volume-lading met lage dichtheid wordt dit voordeel in energiegebruik tenietgedaan door de zware uitvoering van treinwagons en de bijbehorende rijweerstand. Deze rijweerstand ligt namelijk hoger dan bij vrachtwagens.
- Meer dan het gewicht van de trein, blijkt de lengte van de trein een bepalende factor voor het energiegebruik van de elektrische locomotief die de wagons trekt. Het effect van de lengte van de trein is sterker dan verwacht. Blijkbaar geldt het volgende: hoe langer de trein, hoe meer assen en hoe meer frictie er ontstaat. Dat bepaalt in belangrijke mate de toenemende vraag naar vermogen en een hoger elektriciteitsgebruik voor dezelfde transportvraag in tonnen lading over kilometers. Het reduceren van de frictie van de assen van de wagons lijkt dus een belangrijke factor in het reduceren van het energiegebruik van elektrische locomotieven.

<sup>5</sup> Hiermee wordt bedoeld dat de diesellocomotief wordt ingezet tussen emplacementen en terminals in het Rotterdamse Havengebied

## 6 Ondertekening

Den Haag, 6 april 2018



Jordy Spreen  
Projectleider

TNO



Dr. N.E. Ligterink  
Auteur