

Emissiewaarden voor
stikstofdepositieberekeningen

Emissiemetingen Stadler passagierstrein met diesel en HVO

TNO 2023 R12287 – 23 november 2023

Emissiemetingen Stadler passagierstrein met diesel en HVO

Emissiewaarden voor stikstofdepositieberekeningen

Auteurs	Norbert E. Ligterink, Pim van Mensch, en Mitch Elstgeest
Exemplaar nummer	2023-STL-RAP-100351262
Aantal bijlagen	0
Opdrachtgever	ProRail
Projectnaam	ProRail - rapportage emissies en HVO
Projectnummer	060.57607

Alle rechten voorbehouden

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

© 2023 TNO

Samenvatting

TNO heeft op verzoek van ProRail uitlaatemissies gemeten van een Arriva passagierstrein tijdens de dienstregeling in de Achterhoek. De emissiemetingen zijn uitgevoerd in het kader van een onderzoeksprogramma naar emissies van mobiele bronnen dat TNO uitvoert in opdracht van het ministerie van Infrastructuur en Waterstaat. In opdracht van ProRail zijn de meetresultaten verder uitgewerkt om specifieke onderzoeksvragen vanuit ProRail te kunnen beantwoorden. De focus in dit onderzoek waren de stikstofemissies (NO_x en NH_3). Er zijn zowel metingen uitgevoerd met reguliere diesel als met HVO.

De metingen in de meetcampagne zijn uitgevoerd aan een zogenaamd “drie-bak” treinstel. Deze treinstellen van Stadler GTW zijn uitgerust met twee Deutz dieselmotoren, met emissieklasse Stage IIIB. Ten behoeve van de meetcampagne van 16 augustus 2023 tot 8 september 2023 zijn in de uitlaat sensoren geplaatst. De data van deze sensoren zijn in de analyse gecombineerd met detailgegevens van de motor, waaronder het brandstofverbruik. De meetresultaten van het “drie-bak” treinstel zijn ook gebruikt om emissiecijfers voor een “twee-bak” treinstel af te leiden.

De meetresultaten zijn vertaald naar emissiefactoren die opgebouwd zijn uit een constante factor voor elke stop en een constante factor per kilometer. Zo wordt op een goede manier rekening gehouden met de hoge emissies bij het accelereren van de trein na een stop (uitgedrukt in g/stop), en met de lage emissies bij uitrollen en afremmen voor een stop (uitgedrukt in g/km). De emissies bij een lage motorlast zijn de basis voor de g/km factor. Bij lage motorlast zijn de motorgrootte en interne motorverliezen bepalend voor de emissies. Omdat de motoren van twee-bak en drie-bak treinstellen identiek zijn, is deze factor voor twee- en drie-bak treinstellen hetzelfde verondersteld.

- Drie-bak treinstel (gemeten):
 - Diesel NO_x : 12.3 g/km + 83.5 g/stop voor elk treinstel.
 - HVO NO_x : 10.1 g/km + 81.0 g/stop voor elk treinstel.
- Twee-bak treinstel (berekend):
 - Diesel NO_x : 12.3 g/km + 65.0 g/stop voor elk treinstel (op basis van gewichtsverschil).
 - HVO NO_x : 10.1 g/km + 63.1 g/stop voor elk treinstel.

De meetresultaten en daaruit afgeleide emissiefactoren laten zien dat bij constant rijden en afremmen de NO_x -emissies relatief laag zijn, en dat accelereren een belangrijk aandeel heeft in de totale emissies. Dat betekent dat stoppen van de trein, en daarna het optrekken, relevant is voor de totale emissies. Een doorgaande trein, zoals de RegioExpress, zal daarom een lagere uitstoot per kilometer hebben dan een stoptrein.

Voor dit type motor, met beperkte emissie-eisen en daarom beperkte nabehandelingstechniek voor emissiereductie, zorgt de toepassing van HVO voor 11% tot 17% lagere NO_x -emissies dan reguliere diesel. In tegenstelling tot reguliere (fossiele)diesel, is HVO van biogenetische aard. 'Well-to-tank' gezien vertaalt dit zich voor HVO in een lagere klimaatimpact.

De CO₂ emissies aan de uitlaat volgen direct uit het brandstofverbruik. Per liter brandstof, met nauwelijks verschil tussen diesel (B7) en HVO, wordt er 2650 gram CO₂ uitgestoten. Met 70 liter brandstof per 100 kilometer bij korte afstanden tussen de stops en tot 50 liter brandstof per 100 kilometer bij langere afstanden zonder stops, is de uitstoot van CO₂ uit de uitlaat tussen de 1300 g/km en 1800 g/km.

De motoren van dit treinstel zijn uitgerust met een SCR uitlaatgasnabehandelingssysteem. Een SCR systeem is een katalysator, die is bedoeld voor de reductie van NO_x-emissies. In sommige gevallen kan een SCR zorgen voor verhoogde NH₃-emissies. Voor deze trein zijn geen verhoogde NH₃ emissies ten gevolge van het gebruik van de SCR geobserveerd tijdens de meetcampagne. De gemeten niveaus liggen in het onderste meetbereik van de sensoren.

Inhoudsopgave

Samenvatting.....	3
Inhoudsopgave.....	5
1 Inleiding.....	6
2 Het treinstel en haar inzet.....	7
3 Meetprogramma en emissieresultaten.....	9
4 Analyses van de meetdata	12
4.1 Onderscheid HVO en diesel	12
4.2 Inzetafhankelijkheid; van stop-tot-stop.....	15
4.3 NO _x uitstoot op basis van brandstofverbruik.....	16
4.4 Uitstoot per motorlast en inzet	19
5 Kentallen voor emissieberekeningen	20
5.1 Treinstel met twee bakken.....	21
6 Discussie	23
7 Conclusies.....	24
Ondertekening.....	25

1 Inleiding

Op de spoorlijn Arnhem – Doetinchem – Winterswijk willen de provincie Gelderland en het Ministerie van Infrastructuur en Waterstaat (in samenwerking met andere spoor- en regionale partijen) de treindienstregeling uitbreiden met de RegioExpres.

In vergelijking met de huidige treinaantallen rijdt er in dit plan op werkdagen vanaf de start van de dienstregeling tot 20:00 uur per uur een extra trein, zonder stops tussen de stations Arnhem Centraal en Doetinchem. Deze trein staat op Arnhem Centraal langer stil dan in de huidige dienstregeling. Tussen Doetinchem en Winterswijk verandert de frequentie niet.

Bij deze toename in activiteit zullen de schadelijke emissies ook toenemen. Eerdere inschattingen van de emissies van deze treinen zijn echter niet op metingen aan de uitlaat gebaseerd. Het nu uitgevoerde onderzoek betreft concrete emissiemetingen van NO_x en NH_3 aan de uitlaat en een dekking van de normale praktijkomstandigheden van de trein. De NO_x (stikstofoxides) emissies ontstaan bij de verbranding, en NH_3 (ammoniak) is een mogelijk bijproduct van de toegepaste katalysatortechniek. Hoge NH_3 emissies ontstaan als slip bij een SCR katalysator (Selective Catalytic Reduction), herkenbaar als incidentele pieken in NH_3 emissies.

Het onderzoek zoals beschreven in dit rapport dient er toe betrouwbaar stikstofemissies te kunnen bepalen van de treinen in de huidige en in de nieuwe dienstregeling, als basis voor stikstofdepositieberekeningen. Aan het einde van het rapport worden daarvoor de kentallen en rekenregels gegeven.

Het is belangrijk om te realiseren dat rails ervoor zorgen dat de rolweerstand van treinen erg laag is in vergelijking met andere vervoerswijzen. Een trein rolt, zonder remmen, vanaf een beginsnelheid van 100 km/uur, waarschijnlijk 4 tot 8 kilometer uit. Dat is ongeveer drie keer zo lang als bij een wegvoertuig. De motorbelasting is daarom niet constant over de route, en vooral afhankelijk van hoe vaak een trein moet accelereren naar hogere snelheden. De afstand tussen de stops is medebepalend voor de gemiddelde uitstoot per kilometer.

Brandstofbesparing van een trein is vooral mogelijk door de trein meer te laten uitrollen en minder te remmen, waar mogelijk. De studie focust daarom op deelritten, van stop-tot-stop, op opeenvolgende stations, als de basiseenheid waarvoor totale emissies worden vastgesteld. De afstanden van stop-tot-stop zijn daarin een essentieel aspect.

De provincie Gelderland overweegt om de treinen op HVO (Hydrated Vegetable Oil) te laten rijden, in navolging van treinen in Noord-Nederland. Naast het klimaatvoordeel, heeft dat mogelijk ook effect op de uitstoot van NO_x . Dit onderzoek bepaalt de emissies bij het rijden op diesel (B7, EN590) en het rijden op HVO. Geconstateerde verschillen in emissies bij het rijden op HVO en diesel worden in dit rapport op verschillende manieren geduid. Uiteindelijk is het verschil in totale emissies bij het rijden van dezelfde dienstregeling de juiste maat voor de vergelijking. In het onderzoek is dat verschil afgeleid.

2 Het treinstel en haar inzet

Het 56 meter lange treinstel Stadler GTW “SPURT” (genaamd “Jhr. Huub van Nispen van Sevenaer”), bestaande uit 3 bakken, heeft 144 vaste zitplaatsen en 19 klapstoelen die ook ruimte geven voor een rolstoel, en een opgegeven brutogewicht van 104 ton. Er zijn drie sets deuren, en de trein loopt op vier onderstellen, met elk 2 Voith elektromotoren met 350 kW maximaal vermogen. De treincode is 95 84 5 012 373-1 NL-AN, bekend onder treinnummer 373. De trein heeft twee 8-cilinder Deutz dieselmotoren met intercooler-turbo en SCR-systeem (Selective Catalytic Reduction, ofwel, katalysator voor NO_x reductie). De SCR is vervangen of hersteld in eerder onderhoud. Volgens schema worden de motoren elke 20.000 uur gereviseerd, soms is er eerder onderhoud nodig en kiest men voor revisie. Halverwege de 20.000 uur is er groot onderhoud. Het motorplaatje geeft aan “exchanged” op 7/2019, maar de trein stamt uit 2012 (motoren hebben een Stage IIIB emissienorm) en is eind 2012 in de dienstregeling opgenomen. De eerste trein van dit type, van Stadler, stamt uit 2006 met een Stage IIIA motor. Mogelijk rijden er treinen die aan minder strenge eisen voldoen. De motoren hebben elk een maximaal vermogen van 480 kW (bij 1800 RPM, ofwel toeren per minuut), maar zijn tijdelijk teruggeschroefd geweest naar 450 kW. Tijdens de test was het vermogen weer 480 kW. De trein heeft geen roetfilter en de demper gebruikt dempingsmateriaal (niet dempingkamers). De verwachting is dat deze motoren zo rond de 100-200 mg fijnstof per liter diesel uitstoten, maar fijnstofmetingen zijn niet in het meetprogramma meegenomen. Wel heeft de bij de emissiemetingen gebruikte NH₃ sensor kruisgevoeligheid voor hoge fijnstofconcentraties waar rekening mee gehouden moet worden.



Figuur 2-1: Het treinstel 373 in de werkplaats.

De motoren zitten tussenin, in de achterste helft van de trein (op basis van de links/rechts aanduidingen), op passagiershoogte (met een loopgang tussen beide motoren).

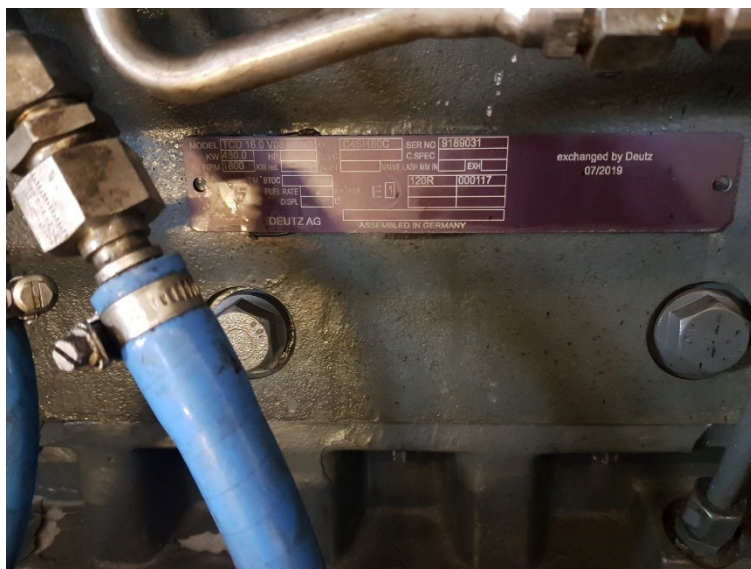
De trein remt met behulp van elektrische tractie (met remweerstand) en beperkt met remblokken om tot stilstand te komen bij lage snelheid. Het vullen van de brandstof en de AdBlue (benodigd voor NO_x reductie in SCR) wordt uitgevoerd tijdens schoonmaak en onderhoud in de avond en nacht.

Een deel van de treinen staat van 's ochtends tot 's avonds aan (16-17 uur totaal), een deel staat uit buiten de spits. Typische dienstregeling is ongeveer een uur, met een korte stoptijd aan het einde (Arnhem, Winterswijk, of Zutphen). Arriva heeft 24 van dergelijke treinen in de Achterhoek in gebruik. In gekoppelde samenstelling (wanneer meerdere treinstellen gekoppeld rijden) wordt het vermogen van de verschillende motoren gebalanceerd, zodat alle motoren vergelijkbaar vermogen leveren.



Figuur 2-2: Een van de twee Deutz motor van het treinstel 373

Naast het in dit onderzoek gemeten treinstel (drie-baks), is ook een kleiner type treinstel in gebruik, met twee bakken, 81 ton brutogewicht, en 84 vaste stoelen en 16 klapstoelen. Daarin zitten wel dezelfde motoren. In hoofdstuk 5 van het rapport worden de resultaten voor de gemeten trein gebruikt om een inschatting te maken van de emissies van deze twee-baks trein.



Figuur 2-3: Het motorplaatje van de Deutz motor.

3 Meetprogramma en emissieresultaten

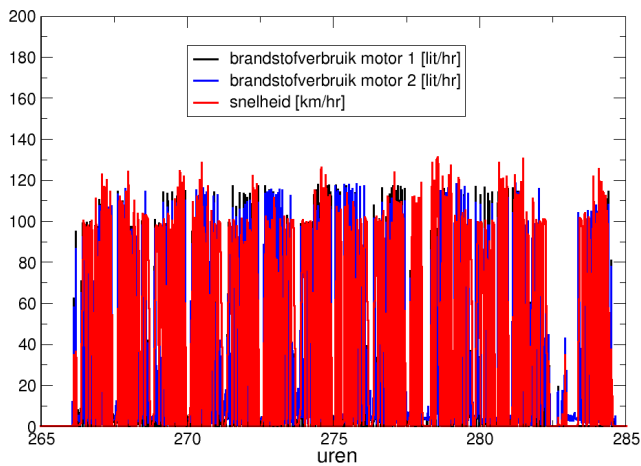
Voor de metingen, die zijn uitgevoerd met het 'SEMS' systeem van TNO, zijn beide motoren uitgerust met sensoren in de uitlaat, voor NO_x, NH₃, O₂ (zuurstof), en temperatuur.¹ De sensoren zijn geplaatst achter de SCR en voor de demper op het dak. Het gemeten O₂ signaal wordt omgerekend naar CO₂ (koolstofdioxide), omdat zuurstof bij verbranding in een vaste verhouding omgezet wordt naar water en koolstofdioxide. Er is vanuit SEMS ook verbinding gelegd met de elektronische unit van de verbrandingsmotor om signalen over brandstofverbruik, toerentallen, koppel, inlaatdruk en uitlaattemperatuur te kunnen meten. Verder hebben beide SEMS systemen (voor elke motor één) een GPS, voor bepaling van positie en snelheid. De data wordt per seconde (1 Hz) verzameld.



Figuur 3-1: De NO_x/O₂, NH₃, en temperatuursensor, zoals deze gemonteerd waren in de uitlaat van de motor voor de demper op het dak van de trein.

De inbouw van de meetapparatuur vond plaats tijdens een grote revisie. Na de eerste week, waarin motor 2 nog niet goed functioneerde en de trein nog terug is geweest naar de werkplaats, is vanaf 15 augustus 2023 begonnen met het tanken van HVO. De eerste dag zal de tank nog een mengsel van diesel en HVO hebben bevat. Vanaf 26 augustus is teruggeschakeld naar het tanken van gewone diesel. Omdat er tijdig resultaten nodig waren, is tot 8 september data verzameld. Per dag is een grote hoeveelheid data verzameld, met een regelmatig patroon van hoge rijnsnelheden tot 100 en 120 km/h tussen stops, met een aantal iets langere stops op de eindpunten, zie Figuur 3-2.

¹ Assessment of road vehicle emissions: methodology of the Dutch in-service testing programme, TNO rapport 2016 R11178

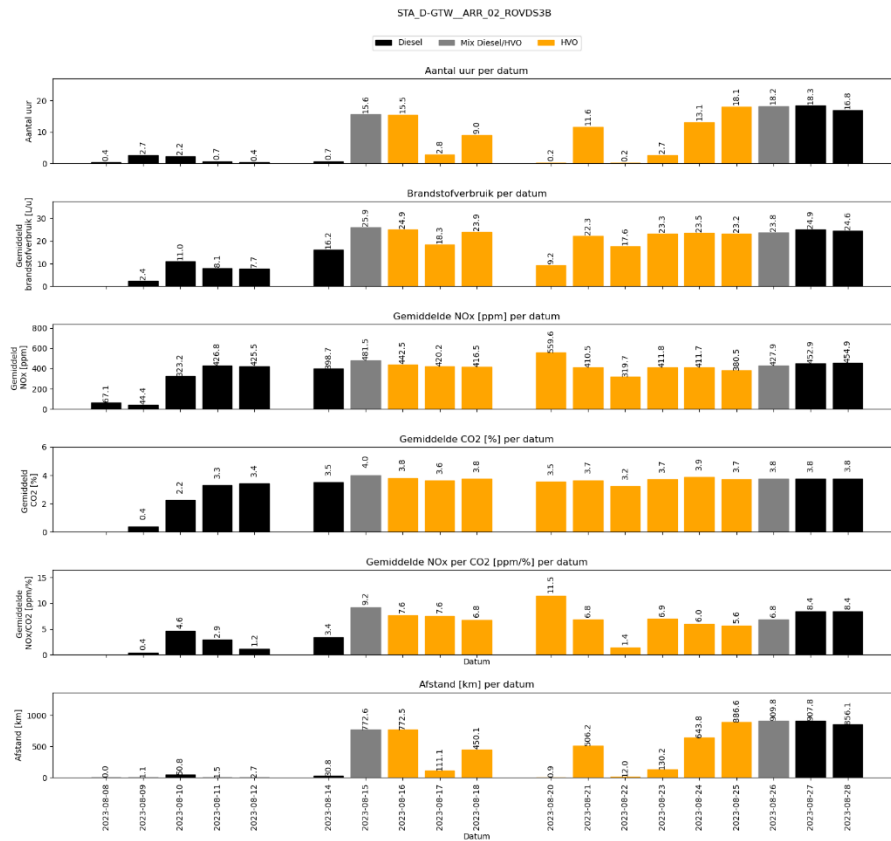


Figuur 3-2: Een typische dag treininzet, met stukken rijden bij maximaal 100 km/h, stukken rijden tot 120 km/h en korte pauzes tussen periodes van grofweg 50 minuten rijden. Op een dag met volle dienstregeling staan de motoren 18 uur aan.

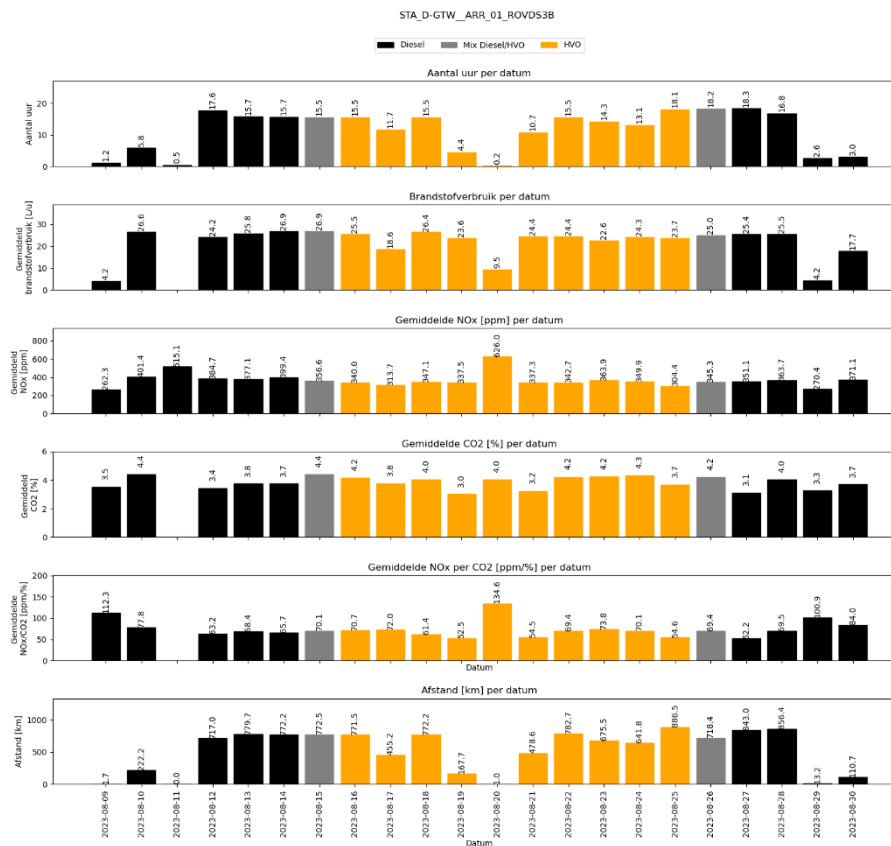
De trein heeft op een meerdere dagen volle diensten gedraaid, maar is op andere dagen beperkt ingezet. Indien een trein heel kort ingezet wordt, kunnen de specifieke omstandigheden meer afwijken van de gemiddelde inzet en daarmee kunnen de emissies tijdens deze een dergelijke korte inzet afwijken van de afgeleide emissie-formules.

Direct na afloop van de meetcampagne is begonnen met analyse van de data. In totaal zijn twee volle weken meetdata beschikbaar: ruim een week data waarbij is gereden op HVO en een week data waarbij op diesel is gereden.

De figuren 3-3 en 3-4 geven een overzicht van het aantal uren ingewonnen data per motor per werkdag. Daarnaast staan ook de ruwe meetresultaten per dag weergegeven. Met behulp van verschillende kleuren is aangegeven op welke brandstof de trein heeft gereden.



Figuur 3-3: Gemiddelde emissieresultaten van motor 2.



Figuur 3-4: Gemiddelde emissieresultaten van motor 1.

4 Analyses van de meetdata

De ingewonnen meetdata zijn geanalyseerd waarbij speciale aandacht is gegeven aan de volgende vier deelaspecten:

- het onderscheid in emissies bij diesel en HVO gebruik;
- inzetafhankelijkheid; van stop tot stop
- de NO_x emissie op basis van brandstofgebruik
- de uitstoot per motorlast en inzet.

In de analyse is duidelijk geworden dat het brandstofverbruik de bepalende variabele is, als verband tussen inzet en emissies. Onderstaand worden de analyses van de vier deelaspecten verder besproken.

4.1 Onderscheid HVO en diesel

Hydrated Vegetable Oil (HVO), van Used Cooking Oil (UCO), is een groeiende bron van biogenetische brandstof, die fossiele diesel kan vervangen. Dit is met name bedoeld om de klimaatimpact te verkleinen van bestaande verbrandingsmotoren. HVO heeft ook gunstige eigenschappen als brandstof, met minder aromaten en meer paraffine, waardoor de verbranding beter verloopt en er potentieel iets minder schadelijke stoffen worden geproduceerd. In combinatie met nabehandelingstechnologieën, zoals filters en katalysatoren, is de vraag hoeveel er overblijft van de gunstige effecten bij verbranding, omdat het grootste deel van de emissiereductie het gevolg is van uitlaatgas-nabehandelingstechnieken. Omdat HVO wordt geproduceerd van natuurlijke grondstoffen, zit er waarschijnlijk een sterkere variatie in de samenstelling en kwaliteit tussen verschillende HVO batches dan bij reguliere diesel.

Gedurende dit project is tijdelijk HVO volgens productklasse EN 15940-A gebruikt op het treinstel. Van de relevante eigenschappen voor verbranding is op het certificaat alleen de lagere dichtheid gegeven, van 780,8 gram per liter, en een afgeleid cetaangetal van 83,7. De energiedichtheid van de in dit project gebruikte HVO is niet bekend, maar HVO heeft typisch 1% tot 2% meer energie per gewichtseenheid (MJ/kg) dan B7 diesel, maar 2% tot 4% lagere dichtheid dan marktbrandstof B7 diesel. Per liter, in plaats van per kilogram, blijft de hoeveelheid energie vergelijkbaar, maar is mogelijk iets lager.

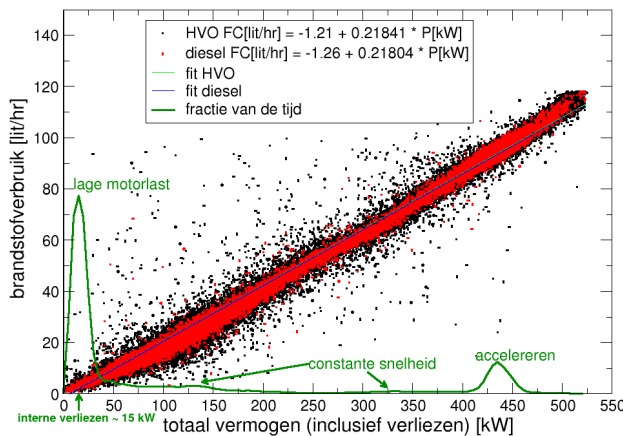
Naast een andere dichtheid dan die van diesel, heeft HVO ook een ander koolstof- en zuurstofaandeel.

Dat beïnvloedt verschillende aspecten van de metingen en berekeningen op verschillende manieren:

- Een lagere dichtheid vraagt meer liters brandstof voor dezelfde aantal kilogrammen brandstof;
- Een hogere energie-inhoud vraagt minder kilogrammen brandstof voor dezelfde arbeid;
- Een lager koolstofaandeel levert minder CO₂ per kilogram brandstof;
- Een lager zuurstofaandeel levert geeft lagere zuurstofconcentraties bij dezelfde brandstof-lucht verhouding.

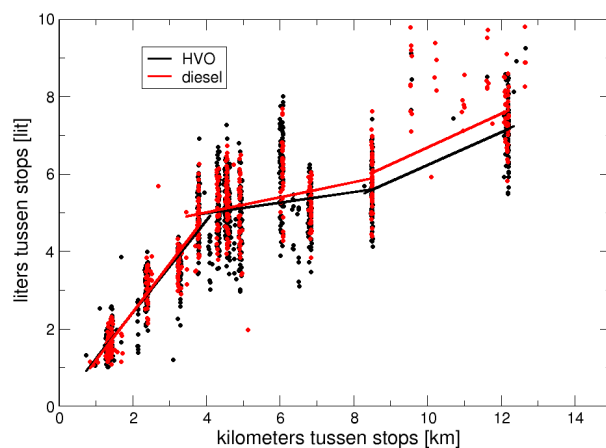
Het lijkt erop dat het verschil in dichtheid en het verschil in energie-inhoud elkaar nagenoeg verdisconteren voor diesel en deze HVO.

Het verband tussen motorkoppel en brandstofverbruik is, vanuit de beschikbare motorsignalen, voor beiden gelijk, zie Figuur 4-1. Maar de kans bestaat dat de motor zelf een verband legt tussen beiden. In dit onderzoek wordt gebruik gemaakt van het brandstofsignaal op de motor, dat gebaseerd is op de hoeveelheid geïnjecteerde brandstof. Dat volume, bepaald bij hogere temperatuur, kan mogelijk afwijken van de getankte liters. Een tweede controle is de daadwerkelijke inzet van brandstof. De hoeveelheid brandstof nodig voor een rit van stop-tot-stop. Let wel, voor het uiteindelijk resultaat maken deze verschillen niet uit, omdat er terugvertaalt wordt naar genormaliseerde brandstofeigenschappen.



Figuur 4-1: Het verband tussen toerental en motorkoppel (AET) en brandstofverbruik van beide brandstoffen liggen over elkaar heen.

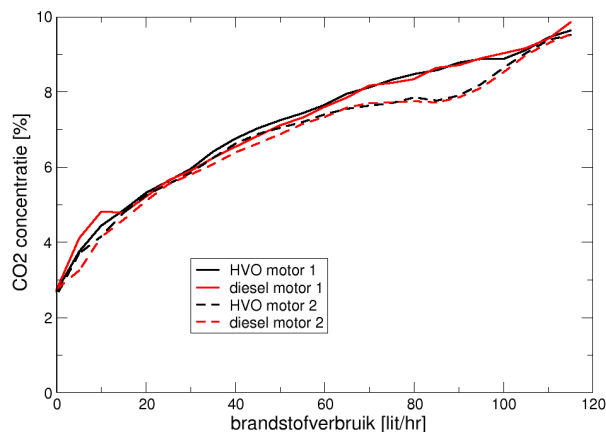
Als de data van alle stop-tot-stop ritten wordt geplot zit er spreiding in de data, maar de gemiddelden van diesel en HVO liggen over elkaar heen voor ritten tot 7 kilometer. Bij langere ritten lijkt er een klein, maar nauwelijks significant verschil. Dit geldt voor langere ritten waar het brandstofverbruik bij constant rijden een rol speelt. Mogelijk hangt dit verschil samen met de airconditioning of einde van de vakantieperiode en een hoger aantal forenzen, en daarmee dus niet per se ten gevolge van de brandstof.



Figuur 4-2: Verschil in brandstofverbruik tussen HVO en diesel als functie van de echte inzet: brandstofverbruik voor deelritten van een gegeven lengte.

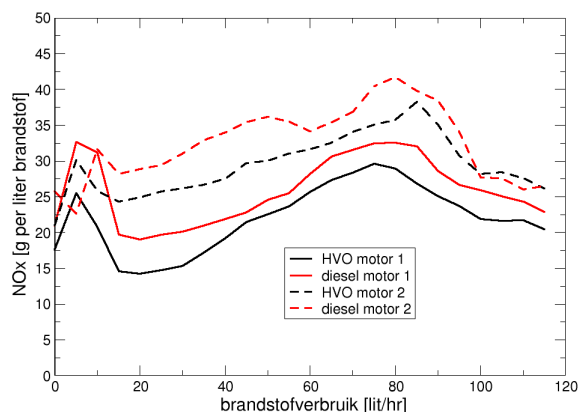
De conclusie is dat brandstofverbruik van de motor, voor dezelfde inzet, niet significant verschilt tussen HVO en diesel. Daarmee kan NO_x bepaald worden als functie van brandstofverbruik. Waarbij brandstofverbruik een maat is voor de verschillende inzetten van de trein.

De brandstofeigenschappen en hoe de motor daarop reageert, worden afgeleid uit CO_2 -concentraties als functie van brandstofverbruik. De hoeveelheid CO_2 , afgeleid uit de hoeveelheid O_2 , met een vaste omrekening, geeft aan dat er beperkt verschil is tussen de brandstoffen, maar dat de motoren wel van elkaar verschillen. De turbo, om inlaatlucht onder druk te brengen, lijkt bij motor 1 slechter te werken en er komt minder lucht in de motor, zie Figuur 4-3.



Figuur 4-3: De CO_2 concentratie, bepaald op basis van O_2 concentratie, in het uitlaatgas als functie van brandstofverbruik laat geen verschil zien tussen de brandstoffen, maar wel tussen de motoren.

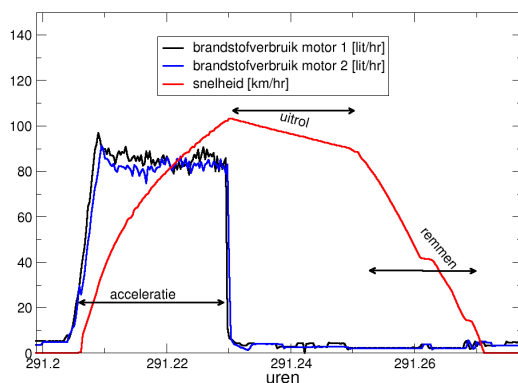
Omdat er geen significant verschil lijkt tussen de CO_2 concentraties bij de verschillende brandstoffen, kan de concentratieverhouding NO_x en CO_2 in het uitlaatgas gebruikt worden om de omrekening te maken van concentratie naar absolute uitstoot. Figuur 4-4 geeft de NO_x -uitstoot per liter brandstof, als functie van het brandstofverbruik. Hierbij lijkt HVO (in beperkte mate) lagere NO_x -emissies te geven dan reguliere diesel.



Figuur 4-4: De NO_x uitstoot per liter brandstof varieert tussen de 15 gram per liter en 40 gram per liter. Het verschil tussen de brandstoffen is kleiner dan het verschil tussen de motoren, maar HVO lijkt (in beperkte mate) lagere NO_x emissies te geven.

4.2 Inzetafhankelijkheid; van stop-tot-stop

Tijdens praktijkinzet van de trein is de motorbelasting vooral laag en hoog: er is weinig motorlast daartussenin. Als men naar de patronen in de meetdata kijkt wordt dat gelijk duidelijk. Voor ritten tot 9 kilometer, van stop tot stop, accelereert de trein, rolt dan uit en remt in de laatste fase. Vanwege de lage rijweerstand van de trein, vertraagt de trein beperkt (ca. $0,05 \text{ m/s}^2$) zonder aandrijving. Een vertraging van $0,05 \text{ m/s}^2$ bij uitrollen betekent dat de trein vanaf 100 km/h 9 minuten aan het uitrollen is, en in die tijd een afstand van 7 kilometer kan afleggen, mits de trein niet remt. In de praktijk zal de trein niet helemaal uitrollen naar stilstand. Figuur 4-5 geeft een voorbeeld van een typische korte rit.



Figuur 4-5: Een typische korte rit van stop tot stop. Met gelijke delen, accelereren, uitrollen, en remmen. Alleen in het eerste deel draaien de motoren op hoge last, gelijk verdeeld over beide motoren.

Bij langere ritten, zeker boven de 9 kilometer, rijden treinen ook een deel met constante snelheid, zie figuur 4-6 als voorbeeld. Door de lage rijweerstand is de motorbelasting laag. Een vertraging van 0.05 m/s^2 van een 100 ton wegende trein betekent een rijweerstand van 5000 Newton, en een gevraagd vermogen bij 100 km/h van 140 kW. Dat is 14% van het geïnstalleerd vermogen. Het brandstofverbruik komt gemiddeld goed overeen met deze rijweerstand. Bij 100 km/h is de luchtweerstand rond de 1000 Newton, op basis van het frontaal oppervlak, en daarmee een beperkt deel van de rijweerstand, die bij constante snelheid al laag is. Er wordt daarom geen rekening gehouden met het verschil in luchtweerstand in verschillende treinsamenstellingen. Het treinstel heeft in het meetprogramma in verschillende samenstellingen gereden, solo en gekoppeld aan een ander treinstel. Deze treincombinaties zijn niet onderscheidbaar in de meetdata.

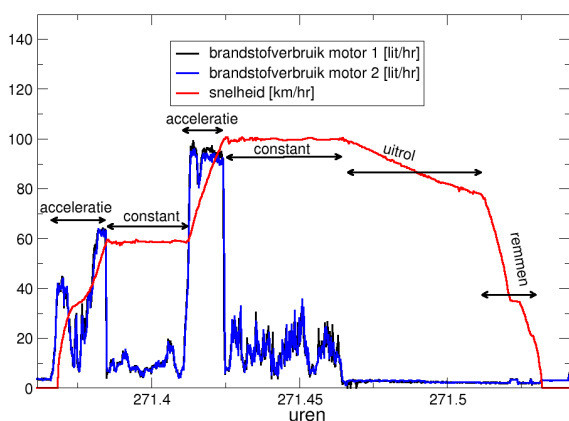
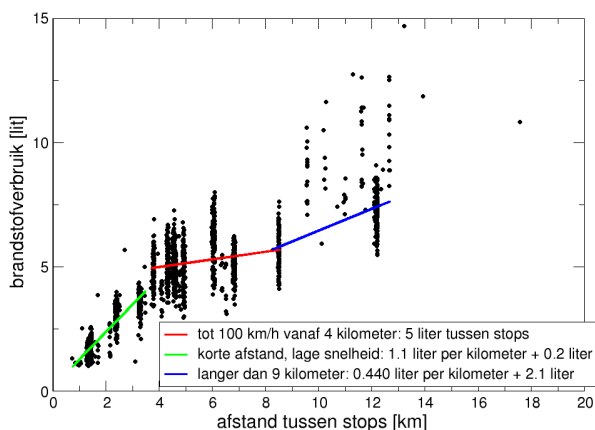


Figure 4-6: Een langere rit van stop tot stop, waarbij de trein een deel constante snelheid rijdt. Bij constant rijden is de motorbelasting en brandstofverbruik laag, maar variabel.

Met begrip van de opbouw van een rit en de motorbelasting, valt het brandstofverbruik uiteen in drie delen, voor korte (niet tot volle snelheid), middellange (geen constante snelheid) en lange ritten (met constant rijden) tussen stops. Het brandstofverbruik reflecteert dat. zie Fiauur 4-7.

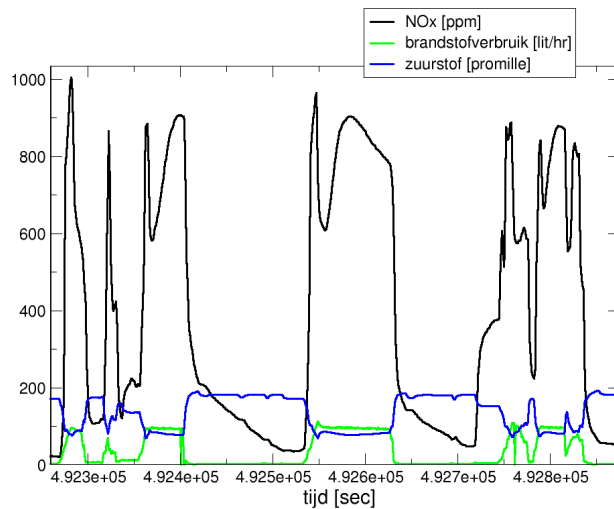


Figuur 4-7: Totaal brandstofverbruik tussen stops van verschillende lengte. De drie lijnen geven het gemiddelde brandstofverbruik van korte, middellange, en lange ritten. Bij toenemende afstand tussen de stops, nemen de totale liters toe vanwege de toenemende afstand, de liters per gereden kilometer nemen echter af vanwege de lagere liters per uur bij constant rijden en uitrollen.

4.3 NO_x uitstoot op basis van brandstofverbruik

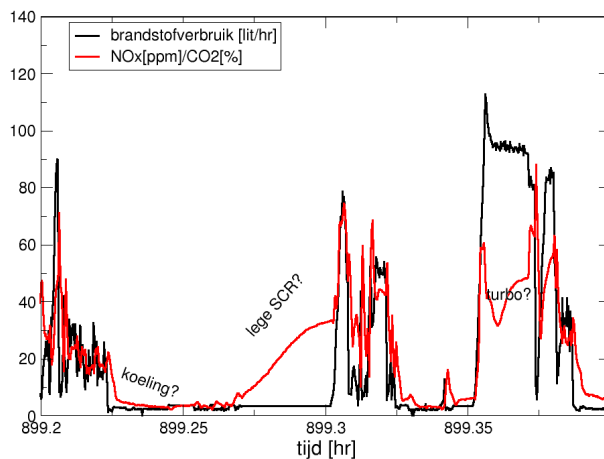
Na afronding van het meetprogramma is de meetdata geanalyseerd en is de relatie tussen de NO_x uitstoot en het brandstofverbruik onderzocht. De NO_x uitstoot (figuur 4-9) blijkt evenredig met het brandstofverbruik en dus ook met de CO₂ uitstoot. De NO_x uitstoot laat slechts een kleine variatie zien met de belasting van de motor. Dat is niet altijd het geval, maar voor deze motoren wel. Daarom kan brandstofverbruik de basis zijn voor de NO_x uitstoot voor een gegeven inzet van de trein.

De motoren laten wel een complex verloop zien van de NO_x concentratie bij wisselingen van de belasting (zie figuur 4-8), die pas bij middeling op een bruikbare resultaat komt. Dat hanat samen met de temperatuur bij verbranding, de turbo, en de werking van de SCR.



Figuur 4-8: Een voorbeeld van de data. De NO_x concentratie varieert met de motorbelasting en brandstofverbruik maar is niet constant. De zuurstof is lager bij hogere motorbelasting, omdat er meer zuurstof omgezet wordt in CO₂ en H₂O.

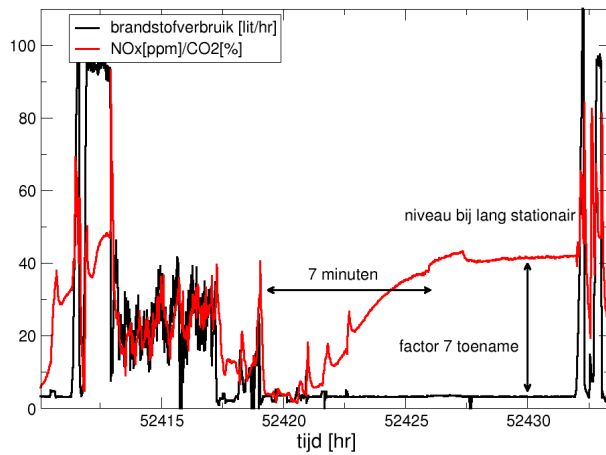
Het motorplaatje bevat weinig informatie, maar de Deutz TCD 16.0 V08 motor is een Tier 4/Stage IIIB motor van 15.900 cc, en een brandstofverbruiksnorm van 194 gram diesel per kWh, ongeveer 230 ml per kWh. Daarop kunnen naar wens 1 of 2 SCR systemen achter elkaar gemonteerd (“modulair”) worden. In dit geval is er een enkele SCR zichtbaar.



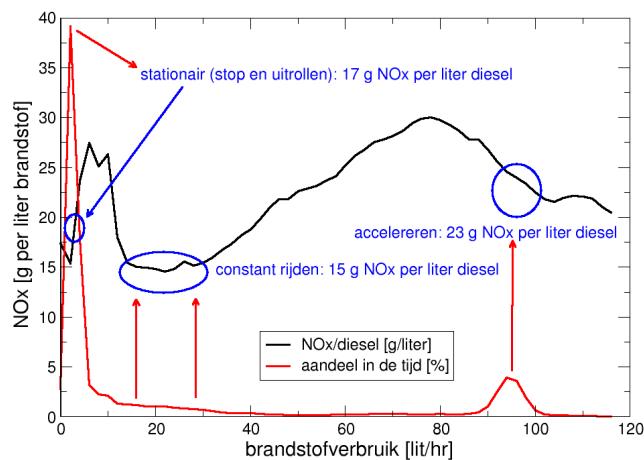
Figuur 4-9: De ratio van NO_x en CO₂ geeft aan hoeveel NO_x er bij een gegeven verbranding wordt omgezet. Deze ratio zou zonder emissiereductietechnologie nagenoeg constant zijn. Er zijn effecten herkenbaar van oplopende NO_x concentraties, na enige tijd lage motorlast, waarbij waarschijnlijk de SCR geen AdBlue meer heeft voor NO_x reductie.

Bij verbranding wordt er NO_x gevormd. De NO_x/CO₂ verhouding van concentraties in het uitlaatgas blijven gelijk bij vergelijkbare verbrandingsomstandigheden. Door naar deze verhouding te kijken krijgt men inzicht in NO_x emissies reducerende maatregelen.

De SCR wordt beperkt gebruikt in deze trein. De effecten van de SCR zijn zichtbaar in de oplopende NO_x concentraties op het moment dat de motor een tijdje lage motorlast draait. Binnen 7 minuten lopen de concentraties op (zie Figuur 4-10).



Figuur 4-10: Het oplopen van de concentraties in de 7 minuten nadat de motor naar lage motorlast gaat lijkt typerend voor het leegmaken van de buffer van de SCR.



Figuur 4-11: Resultaat van motor 1, het gemiddelde over beide brandstoffen laat zien op welke punten de motor veel draait en de grammen NO_x per liter meest relevant zijn.

Voor een correcte berekening van de emissies, speelt de variaties in NO_x-emissies (gram per liter) per specifiek brandstofverbruik (liter per uur) een belangrijke rol (Tabel 1). Daarom is de juiste middeling over de inzet van de trein erg belangrijk. Een weging van de NO_x emissies in gram per liter brandstof, voor de inzet, voor hoge, gemiddelde of lage motorlast, levert de gemiddelde waarden zoals gepresenteerd in Tabel 1. Afhankelijk van de motor of brandstof zijn verschillen van 20 a 25% t.o.v. een gemiddelde motorlast zichtbaar.

Tabel 1: De gemiddelde NO_x emissies per motor, brandstof en motorbelasting.

NO _x [g/liter]	Motor 1		Motor 2	
	HVO	Diesel	HVO	Diesel
Belasting				
Lage motorlast	18.7	24.3	22.3	24.4
Medium motorlast	18.8	24.1	27.2	31.6
Hoge motorlast	24.4	28.4	34.6	37.7

4.4 Uitstoot per motorlast en inzet

Als de resultaten van beide motoren worden gemiddeld, dan is de NO_x uitstoot van beide motoren tussen de 20 en 33 gram per liter, afhankelijk van motorbelasting en brandstof.

Tabel 2: De gemiddelde NO_x uitstoot bij verschillende motorbelastingen en brandstof.

NO _x [g/liter]	Gemiddeld	
	HVO	Diesel
Belasting		
Lage motorlast	20.5	24.4
Medium motorlast	23.0	27.9
Hoge motorlast	29.5	33.0

Bij lage motorlast verbruikt de motor ongeveer 5 liter brandstof per uur en beide motoren samen 10 liter per uur. Dat is iets hoger dan de opgave van de motor zelf. De berekening is gebaseerd op de cilinderinhoud van 15,9 liter, een toerental bij stationair draaien van 750 min⁻¹, en de CO₂ concentratie in het uitlaatgas van 3%. De genormaliseerde volumestroom van het uitlaatgas, naar buitenluchtcondities, is 90 liter per seconde. Dat betekent dat de interne verliezen rond de 3%-4% van het maximaal vermogen zijn. Dat is in de normale range, zeker voor een directe koppeling met de elektromotor. Deze waarde klopt ook goed met de 15 kW gebaseerd op de totale arbeid, inclusief verliezen.

Het gevolg is dat onbelast de NO_x uitstoot van de trein 200 tot 240 gram per uur is. Deze uitstoot is bij stilstand, uitrollen, en afremmen. Bij langere stoptijden dient daar rekening mee gehouden worden omdat de uitstoot dan specifiek is voor de locatie van stilstand.

Bij accelereren is er beperkt afwijking van het opgegeven brandstofverbruik (0,218 liter per kWh is iets lager dan de verwachte 0,238 liter per kWh), en is het brandstofverbruik een goede maat voor de emissies. Bij afstanden tussen stops van 4 tot 9 kilometer verbruiken de motoren 5 liter brandstof, ofwel 50 tot 120 liter per 100 km met een geassocieerde uitstoot van 150 tot 160 gram NO_x.

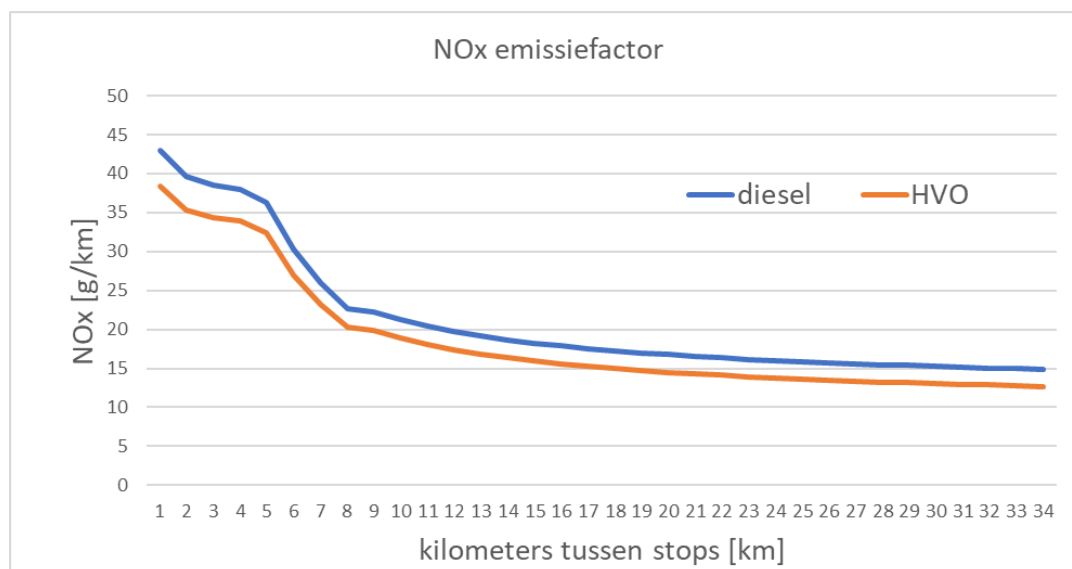
Bij langere afstanden tussen stops van 9 kilometer of meer, wordt de motor ingezet op lagere belasting met een geassocieerd brandstofverbruik van 44 liter per 100 kilometer, om de constante snelheid vast te houden. De extra uitstoot per kilometer, bij medium motorbelasting is 10 tot 12 gram per kilometer.

5 Kentallen voor emissieberekeningen

In AERIUS-berekeningen (voor stikstofdepositie) is het voor puntbron berekeningen nodig om – naast de uitstoot van NO_x en NH_3 – de warmte-inhoud en uittreedhoogte van het uitlaatgas te geven. De uitlaatgastemperatuur voor deze treinen is ongeveer 175°C . De warmte-inhoud varieert zeer sterk met de motorbelasting. De huidige verspreidingsmodellen en kentallen houden daar geen rekening mee. Een relevant onderscheid dat gemaakt moet worden is tussen stilstand en rijden. Bij stilstand is de warmte-inhoud van de uitlaatgassen van deze treinen ongeveer 25 kW. Bij het rijden, omdat de meeste uitstoot bij hoge motorbelasting plaatsvindt, is een warmte-inhoud van twintig keer zo hoog, namelijk 500 kW, een goede waarde voor verspreidingsmodellen. De uitwerphoogte is ongeveer 4 meter boven het maaiveld.

Ondanks dat de emissies van de trein niet continu zijn, maar vooral geassocieerd met accelereren, is een gelijkmatige verdeling van emissies over de route een goede benadering. Dit komt omdat treinen beide kanten op rijden, en de heengaande trein accelereert, en hoge emissies heeft na het station, maar de terugkerende trein uitrolt en afremt en daarmee lage emissies geeft. Een onderscheid maken in locaties in de uitstoot van emissies op langere stukken zonder stops is beperkt relevant als emissies al afhankelijk gemaakt worden van de afstanden tussen stops, zoals dat hieronder gedaan wordt.

De emissiefactor is afhankelijk van de lengte tussen de stops, omdat het hoge vermogen bij accelereren een belangrijk aandeel heeft in de totale emissies.



Figuur 5-1: De emissiefactoren per kilometer, afhankelijk van de brandstof en de ritlengte (tussen twee stops).

De complexiteit kan beperkt worden door de emissiefactor op te bouwen uit gereden kilometers en het aantal stops:

1. Diesel NO_x: 12.3 g/km + 83.5 g/stop voor elke treinstel
2. HVO NO_x: 10.1 g/km + 81.0 g/stop voor elke treinstel

De emissies tijdens korte stops op de tussenstations zijn in de bovenstaande formules verwerkt als gram per stop. Indien treinen langer dan gemiddeld stilstaan, neemt de g/stop toe, hiermee dient rekening gehouden te worden. Voor lang stilstaande treinen zijn de emissies 205 g/uur voor HVO en 244 g/uur voor diesel. Dit is het geval als de trein in de dalperiode niet wordt ingezet, maar de motor wel aanblijft.

Ondanks de SCR technologie zijn er geen extra NH₃ emissies geconstateerd, en zijn deze emissies laag. De SCR wordt niet sterk ingezet, en de NH₃ emissies zijn daarom naar verwachting rond de 25 mg per kilometer, lager dan het meetbereik in deze omstandigheden.

5.1 Treinstel met twee bakken

Naast het treinstel met drie bakken, waaraan gemeten is, zijn er ook treinstellen met twee bakken (Figuur 5-2). De resultaten van het gemeten drie-bak treinstel moet vertaald worden naar twee-bak treinstellen.

Daarvoor zijn bepaalde gegevens nodig:

1. De echte totaal gewichten (van twee-bak en drie-bak) waarmee de verschillende treinstellen rondrijden (met indien mogelijk met een schatting van het gewicht passagiers), inclusief onderstellen.
2. De motoren van de twee-bak zijn hetzelfde als voor de drie-bak, en daarmee zijn de emissies bij lage motorlast ook hetzelfde.



Figuur 5-2 Een tweebak treinstel met dezelfde motor op station Winterswijk.

Met deze gegevens is acceleratie en daarmee het gewicht maatgevend en de verhouding 81 ton / 104 ton (78%) geeft de lagere uitstoot van de twee-bak treinstel ten opzichte van het drie-bak treinstel. Voor lagere motorlast zijn waarschijnlijk de eigenschappen van de motor grotendeels bepalend, en daarmee de uitstoot van het twee-bak en drie-bak gelijk.

Op basis van het verschil in gewicht, dat leidt tot een verschil in gevraagd vermogen bij accelereren, is er een verschil in uitstoot gekoppeld aan het aantal stops:

Drie-bak treinstel (gemeten):

Diesel NO_x: 12.3 g/km + 83.5 g/stop voor elk treinstel

HVO NO_x: 10.1 g/km + 81.0 g/stop voor elk treinstel

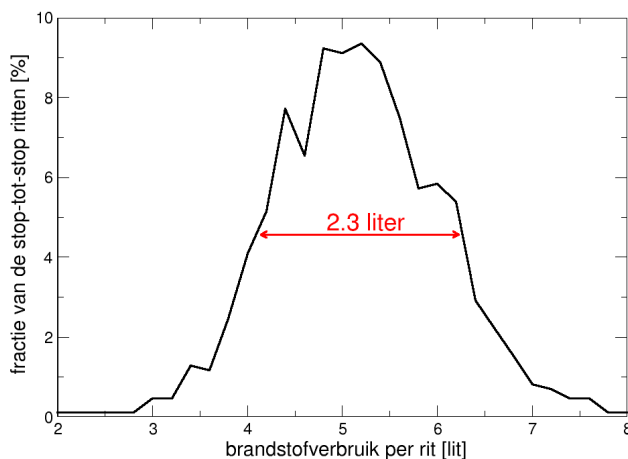
Twee-bak treinstel (berekend):

Diesel NO_x: 12.3 g/km + **65.0 g/stop** voor elk treinstel (op basis van gewichtsverschil)

HVO NO_x: 10.1 g/km + **63.1 g/stop** voor elk treinstel

6 Discussie

Zowel de verschillen tussen motoren, als de variaties in de emissies voor ritten van dezelfde lengte, geven een bandbreedte en onzekerheidsmarge voor de resultaten. Mogelijk presteren andere treinen iets anders, met de 15%-20% verschillen in de NO_x uitstoot van de twee motoren, bij dezelfde motorbelasting.



Figuur 6-1: De spreiding in het brandstofverbruik voor ritten tussen 3,8 en 9 kilometer, waar verbruik grofweg constant is met afstand. De bandbreedte is ongeveer 20%.

Gegeven de 1633 ritten waarop de analyses gebaseerd zijn, is de onzekerheid in het brandstofverbruik beperkt, met deze gemiddelde inzet. Als de instructies of het gedrag van de machinisten verandert kan dat wel aanleiding zijn voor hogere en lagere emissies. Gegeven de bandbreedte in brandstofverbruik lijkt dat mogelijk. Veranderingen kunnen gecontroleerd worden aan de hand van het brandstofverbruik. Met een verhoging of verlaging van het brandstofverbruik kan een vergelijkbaar effect op de NO_x uitstoot verwacht worden.

Het brandstofverbruik per treinstel is ongeveer 750 liter per dag, met 36 liter AdBlue per dag. Daarmee zijn de NO_x emissies 15 tot 22 kilogram per dag, per treinstel, afhankelijk van de inzet en de brandstof. De totale uitstoot van mobiele bronnen in Nederland wordt ingeschat op ruim 200 kton, een treinstel stoot daarvan welliswaar een beperkte fractie uit, maar is ook niet verwaarloosbaar. Zonder de SCR en de AdBlue zouden de NO_x emissies bijna het dubbele zijn geweest.² Het is daarom relevant om het AdBlue verbruik bij te houden om zicht te houden op de werking van de SCR van de verschillende treinstellen.

² AUB (AdBlue verbruik, Uren, en Brandstofverbruik): een robuuste schatting van NO_x en NH₃ uitstoot van mobiele werktuigen, TNO rapport 2021 R12305.

7 Conclusies

De NO_x emissies, in grammen per liter brandstof, van het gemeten treinstel variëren in beperkte mate met de belasting van de motor en het brandstofverbruik. Het is daarom de verwachting dat dit het normale beeld is voor dit type treinstellen. Daartegen varieert het brandstofverbruik sterk met de inzet van de trein. Het is daarom noodzakelijk gebleken het brandstofverbruik te koppelen aan de inzet van het treinstel. De NO_x emissies zijn daarmee een functie van afstand en aantal stops dat de trein maakt in de dienstregeling. De configuratie waarin de trein rijdt, solo of samengestelde treinstellen, is beperkt van invloed op de motorbelasting en de uitstoot. De samenstelling wordt daarom niet meegenomen, en de emissiekentallen zijn per treinstel.

Het verschil tussen HVO en diesel is zichtbaar in de uitstoot van NO_x, in de orde van 11% tot 17% lager voor HVO dan voor diesel. Dit effect is groter dan verwacht, waarschijnlijk door de beperkte effectiviteit van de SCR.

Een belangrijke conclusie is dat naarmate de afstanden tussen de stops groter zijn, de emissies per kilometer lager zijn. Een verandering van de dienstregeling waarin een deel van de treinen minder vaak stopt, geeft daarmee lagere emissies dan die waarbij alle treinen op alle stations stoppen.

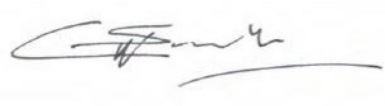
Dit onderzoek is de eerste keer dat bij dit type dieselpassagierstrein de uitstoot gemeten is direct aan de uitlaat en onder normale praktijkomstandigheden. Het geeft nieuwe inzichten in de emissies van deze treinen. Daaruit volgt dat emissiekentallen gebaseerd op de wettelijke eisen aan de motoren, geen goed beeld geven van de daadwerkelijke uitstoot in praktijk.

Het terugdringen van het brandstofverbruik, door treinen langer te laten uitrollen, minder te remmen, en bij korte afstanden tot een minder hoge snelheid te accelereren, heeft een positief (verlagend) effect op de CO₂ uitstoot. De NO_x uitstoot gaat evenredig met de CO₂ uitstoot omlaag, omdat voor deze treinstellen, anders dan voor andere motoren die onder dezelfde emissie-eisen vallen, de NO_x uitstoot sterk gekoppeld is aan het brandstofverbruik.

Aanbevolen wordt om het Adblue-verbruik in combinatie met het brandstofverbruik te monitoren, omdat hiermee de effectiviteit van het SCR-systeem in de gaten gehouden kan worden. Een lager AdBlue-verbruik (ten opzichte van het brandstofverbruik) wijst op een hogere NO_x uitstoot.

Ondertekening

TNO › Mobility & Built Environment › Den Haag, 23 november 2023



Chantal Stroek
Research Manager



Norbert E. Ligterink
Auteur

Mobility & Built Environment

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