

Van Mourik Broekmanweg 6
2628 XE Delft
Postbus 49
2600 AA Delft
Nederland

www.tno.nl

T +31 88 866 30 00
F +31 88 866 30 10

TNO rapport

TNO 2014 R10588

Beoordeling van verontreinigende emissies met Shell GTL Fuel bij middelzware en zware voertuigen, binnenvaartschepen en mobiele machines

Datum	16 september 2014
Auteur(s)	Ruud Verbeek
Exemplaarnummer	2014-TM-RAP-0100154462
Aantal pagina's	21 (incl. appendices)
Sponsor	Shell Downstream Commercial Nederland
Projectnaam	Shell
Projectnummer	060.07597

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.

Shell heeft toestemming het rapport met potentiële klanten te delen. Zie brief 2014-TM-LTR-0100154460.

© 2015 TNO

Samenvatting

De afgelopen jaren staan alternatieve brandstoffen volop in de belangstelling, vooral als middel om verontreinigende emissies van voertuigen, schepen en machines te verminderen. Vooral gemeentes tonen interesse in alternatieve brandstoffen en elektrische vervoersmiddelen om zo de luchtkwaliteit te verbeteren voor de mensen die met dieselmotoren werken.

In dit kader heeft Shell aan TNO gevraagd onderzoek te verrichten naar beschikbare informatie over de mogelijke voordelen die Shell GTL Fuel ("Gas-to-Liquids") kan hebben als drop-in-fuel voor bestaande en nieuwe commerciële dieselmotoren, binnenvaartschepen en niet voor de openbare weg bestemde mobiele machines.

In dit onderzoek werd de volgende beschikbare technische informatie geëvalueerd:

- Informatie uit eerdere TNO-publicaties
- Externe technische publicaties
- Technische rapporten met de resultaten van testen met GTL Fuel

Op basis van deze evaluaties kan het volgende worden geconcludeerd over Shell GTL Fuel als vervanging voor reguliere dieselbrandstof (EN590):

- GTL zorgt voor verlaging van alle gereguleerde verontreinigende emissies van NO_x (stikstofoxide), PM (fijnstof), CO (koolstofmonoxide) en HC (koolwaterstof). De testresultaten lieten variaties tussen de testprogramma's zien. Dit is gezien de verschillen tussen de motoren te verwachten.
- Voor relatief eenvoudige systemen als Euro III-motoren wezen de metingen op een NO_x-reductie van 5% tot 19% en een PM-reductie van 10% tot 34%.
- Voor motoren met een meer geavanceerd emissiebeperkingsstelsel kunnen de relatieve variaties in NO_x en PM groter zijn. Voor Euro V SCR-motoren gaven metingen een NO_x-reductie van 5% tot 37% en een PM-reductie tot 33% aan, afhankelijk van het motortype en de testcyclus. De relatief grote variaties zijn het gevolg van het lage niveau en het feit dat emissiebeperkingsstelsels, zoals toevoeging van AdBlue, afhankelijk van het exacte systeemontwerp verschillend op GTL kunnen reageren. Er is geen informatie gegeven voor Euro VI-motoren.
- Voor de relatief conventionele scheepsmotoren wezen metingen op een NO_x-reductie van 8% tot 13% en een PM-reductie van 15% tot 60%.
- Voor mobiele machines was slechts zeer beperkt informatie beschikbaar. Het is echter hoogstwaarschijnlijk dat hier een soortgelijke emissiereductie als bij zware voertuigmotoren kan worden behaald. Dit kan worden afgeleid uit de positieve resultaten van testen met GTL op een brede reeks motoren, in combinatie met de eigenschappen van GTL en het daardoor positieve effect op de verbranding.

De conclusie luidt daarom dat verontreinigende emissies van bestaande vloot aanzienlijk kunnen worden verminderd door toepassing van GTL Fuel. Deze reductie is direct meetbaar en kan worden gezien als aanvullende maatregel of als alternatief voor vervanging door nieuwere of schonere voertuigen, schepen of machines. In absolute zin is de emissiereductie het grootst als GTL Fuel wordt ingezet bij relatief 'vervuilende' motoren, zoals bij oudere voertuigen, schepen of mobiele machines.

Inhoudsopgave

	Samenvatting	2
1	Inleiding	4
2	Effect van GTL op de verbranding en emissie	5
2.1	Specificatie van Shell GTL Fuel	5
2.2	Effect van GTL op de verbranding	5
2.3	Resultaten uit eerdere onderzoeken	5
2.4	Effect van GTL Fuel op scheepsmotoren	7
2.5	GTL Fuel bij geavanceerde emissiebeperkingsystemen	7
3	Emissies van middelzware en zware voertuigen	9
3.1	Wetgeving ten aanzien van emissies	9
3.2	Technologieën voor emissiebeperking	9
3.3	Effect van GTL Fuel op de emissie	10
4	Emissies van binnenvaartschepen	12
4.1	Wetgeving ten aanzien van emissies	12
4.2	Technologieën voor emissiebeperking	12
4.3	Effecten op de emissie	13
5	Emissies van mobiele machines	15
5.1	Wetgeving ten aanzien van emissies	15
5.2	Technologieën voor emissiebeperking	16
5.3	Effecten op de emissie	16
6	Conclusies	18
7	Referenties	19
8	Ondertekening	21

1 Inleiding

De afgelopen jaren staan alternatieve brandstoffen volop in de belangstelling, vooral als middel om verontreinigende emissies van voertuigen, schepen en machines te verminderen. Vooral gemeentes tonen interesse in alternatieve brandstoffen en elektrische vervoersmiddelen om zo de luchtkwaliteit voor de mensen die met dieselmotoren werken te verbeteren.

TNO heeft de afgelopen jaren deelgenomen aan diverse Nederlandse onderzoeken waarin GTL Fuel als een van de brandstofopties fungeerde:

- Natural gas in transport: evaluation of all transport modalities
- Factsheets 'brandstoffen voor het wegvervoer'
- Factsheets 'rondvaart Amsterdam'

Shell is van mening dat GTL-Fuel een goede optie vormt om de verontreinigende emissies afkomstig van een breed gamma aan bestaande en nieuwe voertuigen, schepen en machines terug te dringen. Om haar klanten onafhankelijke informatie te kunnen verstrekken, heeft Shell TNO opdracht gegeven bestaande en nieuwe technische informatie te onderzoeken en de effecten van GTL Fuel samen te vatten in een rapport waarin drie marktgebieden aan bod komen:

- Commercieel vervoer
- Binnenvaartschepen
- Niet voor de openbare weg bestemde mobiele machines (terreinmachines)

In dit onderzoek werd de volgende technische informatie geëvalueerd:

- Informatie uit eerdere TNO-publicaties, met name:
 - o Natural gas in transport: an assessment of different routes. [TNO/ECN/CE Delft 2013].
 - o Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles [TNO/CE 2009], [TNO/CE 2008].
- Technische publicaties door Shell, zoals SAE-publicaties.
- Technische rapporten met de resultaten van testen met GTL-brandstoffen Deze werden grotendeels uitgevoerd door onafhankelijke partijen.

In sectie 2 van dit rapport wordt algemene informatie over GTL en een overzicht van de resultaten uit eerdere GTL-onderzoeken gegeven. De secties 3, 4 en 5 bevatten specifieke informatie over zware voertuigen, binnenvaartschepen en mobiele machines. Dit wordt gevolgd door enkele algemene conclusies in sectie 6.

De evaluaties in dit rapport concentreren zich op de invloed van GTL op emissies wanneer GTL wordt gebruikt als drop-in-fuel¹.

¹ Een motor kan ook speciaal worden geoptimaliseerd voor GTL-brandstof. In dat geval kunnen extra voordelen worden behaald, zoals een lager verbruik van brandstof en/of AdBlue en mogelijk grotere voordelen wat emissies betreft. Deze voordelen hoeven echter niet gelijktijdig plaats te vinden.

2 Effect van GTL op de verbranding en emissie

2.1 Specificatie van Shell GTL Fuel

GTL Fuel is een paraffinische dieselbrandstof. In 2012 is er een speciale Technische Specificatie voor paraffinehoudende dieselbrandstoffen opgesteld. Deze specificatie, TS 15940, diende als opvolger van de eerdere CEN Workshop Agreement CWA 15940 (2009). TS 15940 is onlangs bijgewerkt naar een prEN 15940-specificatie. Dit was de laatste stap in het proces om tot een 'EN'-specificatie te komen. CEN prEN 15940 is van toepassing op een reeks paraffinehoudende fossiele en hernieuwbare brandstoffen zoals GTL, CTL (Coal-to-Liquid), BTL (Biomass-to-Liquid) en HVO (Hydrotreated Vegetable Oil).

Tabel 1: Typische eigenschappen van EN590-diesel (0% FAME) en GTL Fuel. Bron [Kind 2010]

Eigenschap	Eenheden	EN 590-diesel	GTL Fuel
Dichtheid (15 °C)	kg/m ³	830	775*
Viscositeit (40 °C)	mm ² /s	2,9	2,45
Cetaangetal	CFR	56	> 70
IBP	°C	170	200
FBP	°C	360	310
Zwavel	mg/kg	< 10	0
Waterstofgehalte	%w	13,6	14,7
Koolstofgehalte	%w	86,3	85,2
Calorische waarde	MJ/kg	42,9	44,0
	MJ/l	35,6	34,1
FAME-gehalte	%	0	0

* Het typische gemiddelde van de huidige productie is 778 kg/m³

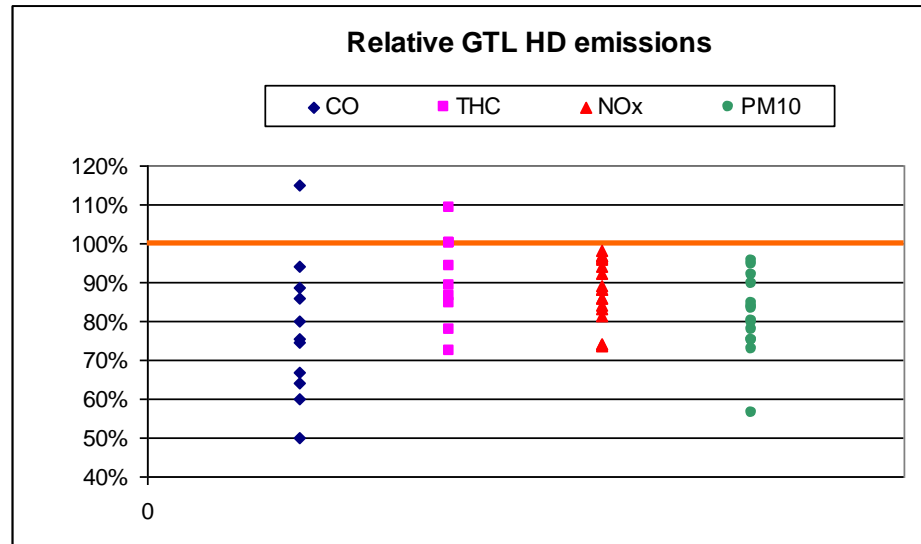
2.2 Effect van GTL op de verbranding

Shell GTL Fuel is een Fischer Tropsch-diesel die wordt geclassificeerd als een 'paraffinische dieselbrandstof'. HVO (gehydrogeneerde plantaardige olie) is een ander voorbeeld van een paraffinische dieselbrandstof. Tal van publicaties tonen aan dat paraffinische dieselbrandstoffen een gelijksoortig effect op de verbranding van dieselmotoren lijken te hebben. Al deze brandstoffen beschikken over een hoog cetaangetal dat de 'ontstekingsvertraging' van de verbranding inkort. Als gevolg hiervan begint de verbranding eerder en verloopt deze gelijkmatiger gedurende de brandstofinjectie. Deze meer gelijkmatige verbranding leidt meestal tot een betere mix, een meer homogene verbranding en daardoor tot lagere NO_x- en PM-emissies en een lager motorgeluid [Kitano 2005].

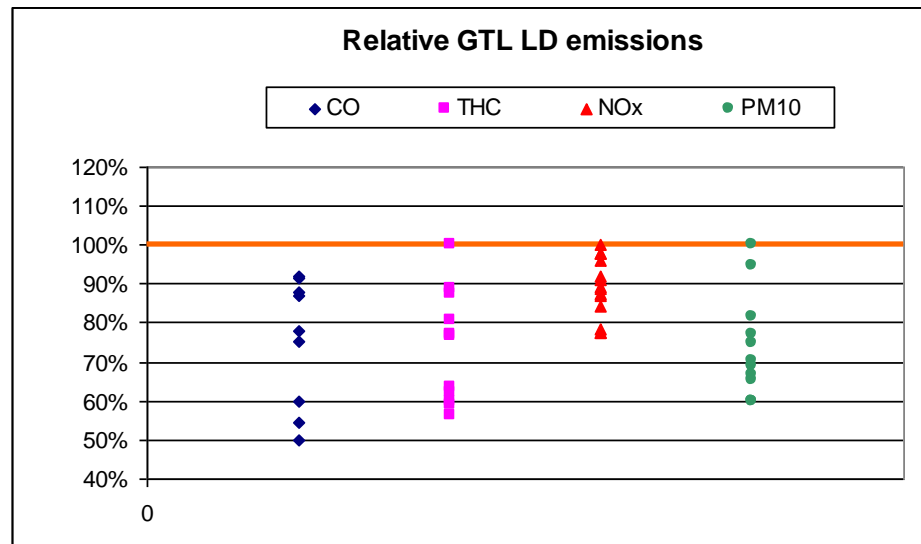
2.3 Resultaten uit eerdere onderzoeken

In 2008 en 2009 werd een groot aantal publicaties over GTL- en Fischer Tropsch-brandstoffen geanalyseerd in het kader van de Nederlandse 'BOLK'-projecten [TNO/CE 2009], [TNO/CE 2008]. De resultaten van deze analyse zijn weergegeven

in onderstaande Figuren 1 en 2 voor respectievelijk zware en lichte (personenwagen) motoren. Dit waren allemaal relatief conventionele motoren tot Euro V. Figuren 1 en 2 laten zien dat de toepassing van GTL leidt tot een reductie van alle gereguleerde componenten: NOx, PM (roetdeeltjes/fijnstof), CO en HC. Voor PM en CO is de reductie doorgaans 0% tot 40% en voor NOx en HC is dit meestal 0% tot 20%.



Figuur 1: Emissie van uitlaatgassen door HD-motoren met GTL [Alleman 2003], [Clark 2005], [Krahl 2005], [Thompson 2004], Bron [TNO/CE 2008].



Figuur 2: Emissie van uitlaatgassen door LD-motoren met GTL Fuel [Alleman 2003], [Kitano 2007], [Schaberg 2005]. Bron [TNO/CE 2008].

Later werd een aantal referenties geëvalueerd (deels met behulp van dezelfde publicaties) om inzicht te krijgen in de emissierespons op GTL met behulp van andere geavanceerde emissiereductietechnologieën, zoals EGR en SCR (met toevoeging van AdBlue). In onderstaande Tabel 2 worden de resultaten

weergegeven. Zie Alleman 2003, Krahl 2005, Thompson 2004, Clark 2005a, Clark 2005b, Clark 2001. Zie Tabel 2.

Vanuit een theoretisch standpunt zijn er verschillen te verwachten tussen EGR (ingrijpen in de motor/verbranding zelf) en SCR (ingrijpen via nabehandeling). Met SCR zou, als gevolg van de nabehandeling, een sterkere verandering van de NO_x-emissie te verwachten zijn, indien de SCR-motoren een relatief eenvoudige regeling hebben voor de dosering van AdBlue (dit is meestal het geval bij Euro IV en V). Tabel 2 laat voor SCR-motoren inderdaad een relatief hoge gemiddelde NO_x-reductie van 19% zien.

EURO IV EGR-motoren laten een soortgelijke respons wat NO_x betreft zien als Euro III- en eerdere motoren. Bij deze motoren is de PM-reductie behoorlijk hoog, namelijk gemiddeld 29% voor de geëvalueerde twee motoren.

Tabel 2: Gemiddelde emissiereductie met GTL ten opzichte van diesel bij Euro III en eerder, Euro IV met EGR en Euro V met SCR.

Gemiddelde emissie*	CO	HC	NO _x	PM10
Euro III en ouder	14%	23%	11%	21%
Euro IV EGR	19%	15%	12%	29%
Euro V SCR	25%	NVT.	17%	23%

* Zie tabel 5, sectie 3.3 voor reductiepercentages.

2.4 Effect van GTL Fuel op scheepsmotoren

Er werden metingen verricht met Shell GTL Fuel op twee schepen met hetzelfde type motor. Deze meetresultaten werden vervolgens beschikbaar gesteld [SGS 2013, 2014]. De metingen werden gedeeltelijk uitgevoerd met twee NO_x-kalibraties die typisch voor respectievelijk CCRI- en CCRII-motoren zijn.

De metingen lieten de volgende emissiereductie met GTL ten opzichte van EN590 zien:

- NO_x: 8% tot 13%
- PM: 15% tot 60%

Voor een volledige beschrijving, zie sectie 4.3.

2.5 GTL Fuel bij geavanceerde emissiebeperkingsystemen

In [Liebig 2009] werd uitgebreid onderzoek verricht naar de invloed van GTL en BTL op de regeneratie van het diesel-deeltjesfilter of roetfilter van een personenwagen. Het onderzoek was gericht op de belading van het roetfilter, de intervallen tussen regeneraties en de bereikte temperatuurniveaus. De conclusie was dat voor de roetfilter van de Volkswagen de intervalperiode tussen regeneraties met 70% kon worden verlengd. Dit had waarschijnlijk te maken met de lagere roetbelasting na verloop van tijd. De temperatuur tijdens regeneratie was vrijwel hetzelfde bij standaarddiesel als bij GTL. Een minder frequente regeneratie heeft een positieve invloed op het brandstofverbruik en mogelijk (of waarschijnlijk) op de kosten voor motoronderhoud. Dit laatste komt doordat regeneraties de motor blootstellen aan een relatief hoge thermische belasting en de kwaliteit van de motorolie kunnen aantasten. De positieve invloed op de regeneratie van roetfilters kan met name belangrijk zijn voor mobiele machines met motoren die voldoen aan Stage IIIB-emissie (zie sectie 5). Voor Stage IIIB-motoren worden over het algemeen roetfilters gebruikt. De werking van mobiele machines wordt gekenmerkt door grote variaties in de gemiddelde belasting, en ook door lange periodes van

lage belasting. Onder deze omstandigheden moeten de roetfilters vaker worden geregenereerd. Deze frequentie kan mogelijk worden verlaagd door gebruik te maken van GTL. Er bestaat behoefte aan specifieke testgegevens om deze aanname verder te ondersteunen.

Diverse fabrikanten van zware voertuigen zijn formeel akkoord met het gebruik van GTL in hun motoren. Een van de grootste wereldwijde leveranciers van brandstofinjectiesystemen heeft Fischer Tropsch (GTL) in hun injectiesysteem getest. Deze leverancier kwam op basis van de resultaten tot de conclusie dat F-T-brandstof minstens net zo goed presteerde als conventionele brandstoffen en op een aantal gebieden zelfs beter presteerde [Delphi 2010].

3 Emissies van middelzware en zware voertuigen

3.1 Wetgeving ten aanzien van emissies

In onderstaande Tabel 3 staat een overzicht van de Europese wetgeving ten aanzien van de emissie van middelzware en zware voertuigen. Zware motoren worden gebruikt in vrachtwagens en bussen met een brutovoertuigmassa van meer dan 3,5 ton. Euro VI is momenteel van toepassing op alle nieuwe voertuigen die op de markt komen.

Tabel 3: Overzicht van Europese emissiegrenzen voor zware CI vrachtwagen- en busmotoren (BVM > 3.500 kg)

Datum	Test-cyclus	Eenheid	CO	NMHC	NO _x	PM	PN (#/kWh)
Euro-IV-2005	ESC	g/kWh	1,5	0,46	3,5	0,02	
	ETC	g/kWh	4,0	0,55	3,5	0,03	
Euro-V-2008	ESC	g/kWh	1,5	0,46	2,0	0,02	
	ETC	g/kWh	4,0	0,55	2,0	0,03	
Euro-VI-2013 ¹⁾	WHSC	mg/kWh	150 0	-	400	10	8x10 ¹¹
	WHTC	mg/kWh	400 0	160	460	10	6x10 ¹¹

1) Voor nieuwe typegoedkeuringen is de officiële datum 31-12-2012. Voor alle nieuwe voertuigen is dit 1 jaar later.

3.2 Technologieën voor emissiebeperking

Tabel 4 geeft een overzicht van de emissiebeperkingstechnologieën die bij zware voertuigen worden gebruikt. Voor ieder van de drie getoonde Euro-klassen worden de twee belangrijkste technologie-opties genoemd.

Selectieve katalytische reductie (SCR) van NO_x, met inspuiting van AdBlue in de katalysator wordt overwegend voor emissieklassen Euro IV, Euro V en Euro VI gebruikt. Uitlaatgasrecirculatie (EGR) wordt gebruikt voor een kleiner gedeelte van de Euro IV- en Euro V-voertuigen, zoals in de tabel te zien is. Bij het gros van de Euro VI-voertuigen worden deze technologieën samen gebruikt om NO_x te reduceren. Hierbij wordt er tevens een gesloten roetfilter (*wall-flow* partikelfilter) geïnstalleerd.

Tabel 4: Emissiebeperkingstechnologieën voor zware voertuigen

Emissieklasse	Technologie-opties voor emissiebeperking	Geschat marktaandeel
Euro IV	SCR	75%
	EGR + oxi-katalysator of roetfilter	25%
Euro V	SCR	95%
	EGR + oxi-katalysator of roetfilter	5%
Euro VI	EGR + SCR + DPF	90%
	SCR + DPF	10%

SCR = Selectieve katalytische reductie (Selective Catalytic Reduction) van NO_x. EGR = Uitlaatgasrecirculatie (Exhaust Gas Recirculation). DPF = Roetfilter/dieselpartikelfilter (Diesel Particulate Filter).

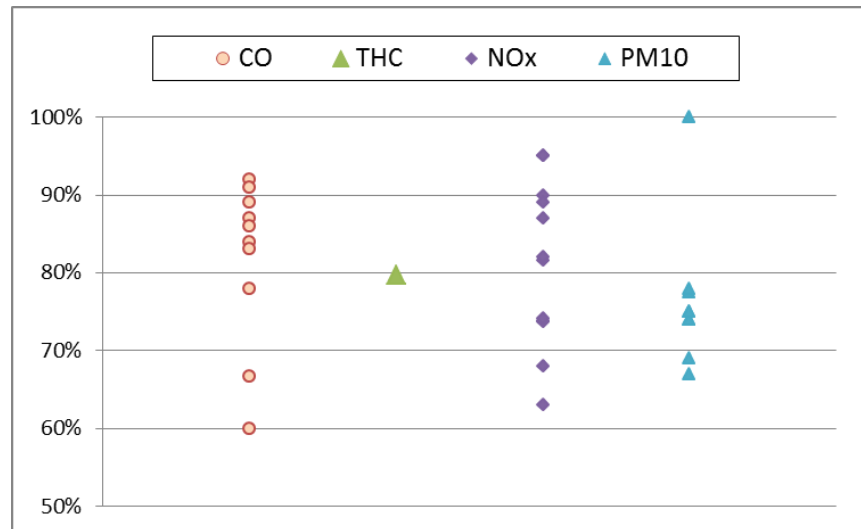
3.3 Effect van GTL Fuel op de emissie

Onderstaande Tabel 5 geeft een overzicht van het effect van Shell GTL Fuel op verontreinigende emissies. Dit overzicht omvat de Euro-klassen Euro III, IV en V. Weergegeven wordt het reductiepercentage ten opzichte van standaarddiesel. Voor zowel NO_x- als PM-emissies worden twee kolommen gegeven. In de eerste kolom staan de resultaten van de motor in de testcel en de tweede kolom geeft een gemodelleerde projectie van echte rijomstandigheden in Nederland. De resultaten weerspiegelen daarom niet alle rijomstandigheden. De berekening is gebaseerd op de gemiddelde emissiereductie in combinatie met de geschatte NO_x-reductie van de SCR-katalysator. De testresultaten van de motor worden doorgaans tijdens typegoedkeuringstesten gemeten. Deze testen worden gekenmerkt door een redelijk hoog belastingspatroon (hoger dan tijdens een gemiddelde rit). Toch lijken de resultaten van de geprojecteerde rijomstandigheden sterk op de resultaten van de testopstelling.

Tabel 5: Reductie van de NO_x- en PM-emissie met GTL ten opzichte van standaarddiesel. Weergegeven worden de reductiepercentages voor de testcelmetingen en voor de geprojecteerde Nederlandse rijomstandigheden

Reductiepercentage met GTL	NO _x		Fijnstof	
	Testcel	Geprojecteerde rijomstandigheden	Testcel	Geprojecteerde rijomstandigheden
Euro III	5 – 19	12	10 – 34	21
Euro IV	5 – 22	14 – 19	20 – 38	20
Euro V	5 – 37	15 – 23	22 – 33	18

Meer informatie voor Euro V-motoren is te vinden in Figuur 3. Hierin wordt een overzicht gegeven van de verontreinigende emissies met GTL Fuel ten opzichte van standaarddiesel, EN590 (met in de meeste gevallen 10 ppm zwavel). Zie [Shell 2013], [Thompson 2004], [Clark 2005a] en [Clark 2005b].



Figuur 3: Emissies met GTL ten opzichte van standaarddiesel voor Euro V-motoren (EN590 = 100%). PM-punt 100% (0% reductie) refereert aan één uitzonderlijke cyclus (vuilniswagencyclus).

In Tabel 5 en Figuur 3 is te zien dat de relatieve variaties in emissies, met name voor NOx, groter zijn voor Euro V-motoren dan voor Euro III- en Euro IV-motoren. Dit komt omdat de absolute niveaus lager zijn en waarschijnlijk ook door verschillen tussen de motoren wat betreft de regelstrategie van de SCR-katalysator (vooral de exacte respons van AdBlue-dosering op GTL Fuel).

Voor Euro VI-motoren werden er geen resultaten met GTL Fuel beschikbaar gesteld. De NOx-eisen voor Euro VI zijn bijna vijfmaal zo strikt als voor Euro V. Euro VI zal hoogstwaarschijnlijk een gesloten regelkring voor NOx hebben, waardoor eventuele voordelen van NOx mogelijk worden uitgesloten. Door een gesloten regelkring zullen waarschijnlijk niet alle potentiële verschillen worden uitgesloten².

In dit geval zal GTL naar verwachting nog altijd een kleine NOx-reductie opleveren. Zonder enig bewijs van echte metingen, wordt er in dit stadium geconcludeerd dat GTL waarschijnlijk een kleine NOx-reductie oplevert. Hoe groot die reductie is, is echter niet duidelijk. Er wordt wel opgemerkt dat de NOx-niveaus met Euro VI echt heel laag zijn. Deze NOx-reductie legt daarom minder gewicht in de schaal dan de reductie met oudere motoren.

² Er werden enkele projecties opgesteld. Deze gaven aan dat een gesloten regelkring waarschijnlijk 75% tot 90% van de variaties in NOx-uitstoot zou compenseren. De resterende 10-25% leidt tot een reductie van NOx-uitstoot aan de uitlaat van circa 10%.

4 Emissies van binnenvaartschepen

4.1 Wetgeving ten aanzien van emissies

In onderstaande Tabel 6 wordt een overzicht gegeven van de wetgeving voor Rijn- en binnenvaartschepen. Er wordt een NOx-bereik aangegeven voor motoren met een motorvermogen van meer dan 560 kW. Het NOx-niveau is afhankelijk van de max. motorsnelheid (n_{max}) die wordt berekend met behulp van de volgende formules:

- CCNR1: NOx-limiet is $45 n_{max}^{-0,2}$ (g/kWh)
- CCNR2: NOx-limiet is $45 n_{max}^{-0,2} - 3$ (g/kWh)

Het hoogste getal in de tabel komt overeen met een motor met een maximaal toerental van 600 rpm. De NOx-limiet daalt naarmate de maximale motorsnelheid stijgt.

Tabel 6: Overzicht van emissiegrenzen van het rijnschip 'RheinSchUO'

Datum	Stage	Max. vermogen (kW)	CO (g/kWh)	HC (g/kWh)	NOx (g/kWh)	PT (g/kWh)
2003	CCNR 1	130 - 560	5,0	1,3	9,2	0,54
		>560	5,0	1,3	9,2 - 12,5	0,54
2007	CCNR 2	130 - 560	3,5	1,0	6,0	0,2
		>560	3,5	1,0	6 - 9,5	0,2

In de toekomst zal de wetgeving ten aanzien van de emissie van binnenvaartschepen binnen Europa in een afzonderlijke paragraaf worden ondergebracht onder Richtlijn 97/68/EG voor mobiele machines (niet voor de openbare weg bestemde mobiele machines). Er wordt al enige tijd gesproken over toekomstige emissiegrenzen. In (Quispel 2013) worden onder meer Stage IVB- en Stage V-emissiegrenzen voorgesteld voor respectievelijk 2017 en 2022. De NOx-limiet bedraagt respectievelijk 1,2 en 0,4 g/kWh en de PM-limiet is respectievelijk 0,02 en 0,01 g/kWh. Mochten deze grenzen inderdaad gaan gelden, dan worden de emissiegrenzen voor binnenvaartschepen in 2022 zeer vergelijkbaar met die voor zware voertuigen en mobiele machines.

4.2 Technologieën voor emissiebeperking

Tot 2003 waren de motoren feitelijk geoptimaliseerd voor brandstofverbruik. Dit resulteerde in een relatief hoog NOx-cijfer van 9 tot 12 g NOx/kWh. Voor CCNR2 was een NOx-reductie van 25% tot 30% noodzakelijk. Dit werd grotendeels bereikt door optimalisering van de parameters voor brandstofinjectie om verbranding met de lagere vereiste NOx mogelijk te maken. Er waren geen specifieke technologieën voor beperking van de NOx-uitstoot nodig, zoals EGR (uitlaatgasrecirculatie) of een deNOx-katalysator.

Met de voorgestelde Stage IV- en Stage V-wetgeving gaat dit veranderen.

Dan worden, in lijn met de technologieën voor zware Euro V- en Euro VI-voertuigen, de volgende technologieën voor emissiebeperking verwacht:

- Voor Stage IVB: SCR deNOx-katalysator
- Voor Stage V: SCR deNOx met roetfilter (dieselpartikelfilter)

4.3 Effecten op de emissie

Er waren gedetailleerde meetrapporten met Shell GTL Fuel beschikbaar voor de hoofdmotoren van twee binnenvaartschepen en van twee hulpmotoren. Deze twee schepen zijn de MS INVADO en de NOVAMENTE. Dit zijn Nederlandse binnenvaartschepen met een respectievelijke lengte van 110 en 135 meter. De metingen werden uitgevoerd door een onafhankelijke serviceprovider, SGS Environmental Services, in opdracht van Shell Global Solutions en VIDOL Marine [SGS 2013], [SGS 2014]. Beide schepen werden getest met GTL en EN590. De originele motor van de INVADO is geclassificeerd als CCNR0, maar voldoet aan CCNR1. De NOVAMENTE is geclassificeerd als CCNR1. In onderstaande Tabel 7 staan de emissiereducties met GTL Fuel ten opzichte van standaarddiesel EN590 voor alle metingen.

Tabel 7: Emissiereductie met GTL Fuel ten opzichte van diesel bij scheepsmotoren. Bron [SGS 2013], [SGS 2014], [Pon 2008]

		Motor-klasse	Meting	Jaar	CO	HC	NOx	PM	Rook
Binnenvaartschip: MS Invado, Caterpillar 3512B, 1119 kW bij 1600 rpm	hoge NOx	CCR0	SGS	2013	0%	10%	8%	37%	
	lage NOx	CCR2*	SGS	2013	0%	10%	13%	16%	
Binnenvaartschip NOVAMENTE, Caterpillar 3512B, 1014 kW bij 1600 rpm		CCR1	SGS	2013	11%	≈ 50%	10%	≈ 60%	
Caterpillar D3408 hulpmotor voor schepen, 250kW bij 1500 rpm		-	PON	2008	17%	-	≈ 4%	-	32%
Caterpillar 3408 hulpmotor voor schepen, 320kW bij 1500 rpm		-	PON	2006	15,3%	-	8,9%	20,7%	

* Feitelijk geclassificeerd als CCNR0, maar voorzien van speciale software waarmee aan CCNR2 wordt voldaan.

Tabel 7 laat voor alle componenten een aanzienlijke variatie in reductiepercentages met GTL zien. Dit is qua gemiddeld niveau en variatie echter te vergelijken met de respons van zware voertuigmotoren, zoals in Figuur 1 te zien is. Op basis van de scheepsmetingen zou de PM-reductie wat hoger kunnen zijn dan bij zware voertuigmotoren, hoewel de redenen hiervoor nog niet duidelijk zijn. Als kanttekening dient te worden opgemerkt dat het aantal metingen op schepen nog altijd gering is en beperkt is tot verschillende modellen Caterpillar-motoren. Op basis van deze resultaten (Tabel 7) kan worden geconcludeerd dat met scheepsmotoren (CCNR0 - CCNR1) met GTL de volgende emissiereductie behaald werden:

NO_x: ~ 8% - 13%
PM: ~ 15% - 60%
CO: ~ 0 - 20%
HC: ~ 10% - 50%

5 Emissies van mobiele machines

5.1 Wetgeving ten aanzien van emissies

De regelgeving ten aanzien van mobiele machines (niet voor de openbare weg bestemde machines) staat vermeld in Richtlijn 97/68/EG en daarop volgende Richtlijnen. Deze richtlijn omvat een groot aantal motorcategorieën en bevat afzonderlijke paragrafen voor locomotieven en binnenvaartschepen. Stage I/II (Richtlijn 97/68/EG) is de eerste Europese wetgeving voor de regulering van emissies van mobiele machines. Stage III/IV (Richtlijn 2004/26/EG) omvatte Stage IIIA/B voor de railvoertuigen. Richtlijn 2010/22/EU is een amendement op eerdere wetgeving voor landbouw- en bosbouwtractoren.

De verschillende stages in Richtlijn 2004/26/EG zijn als volgt:

- Stage III A heeft betrekking op motoren van 19 tot 560 kW, waaronder motoren met een constant toerental, railvoertuigen, locomotieven en binnenvaartschepen.
- Stage III B heeft betrekking op motoren van 37 tot 560 kW, waaronder railvoertuigen en locomotieven.
- Stage IV heeft betrekking op motoren van 56 tot 560 kW.

Er gelden tot dusver geen grenswaarden voor een motorvermogen hoger dan 560 kW. Voor een volledig overzicht van motorcategorieën en grenswaarden, zie <http://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>.

Bij mobiele machines bestaat er veel variatie in de grenswaarden en de data voor de inwerkingtreding. Dit is afhankelijk van de motorcategorie, en ook de motorcategorieën variëren per emissiestage. Onderstaande Figuur 4 geeft een grafische weergave van de data voor inwerkingtreding voor de verschillende stages en vermogenscategorieën.

Engine categories Net Power (kW)	Stage III A			Stage III B		Stage IV			
	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
19 ≤ P < 37	7.5 (NO _x +HC) / 5.5 (CO) / 0.6 (PM) [g/kWh]					under development			
37 ≤ P < 75	4.7 (NO _x +HC) / 5.0 (CO) / 0.4 (PM) [g/kWh]			4.7 (NO _x +HC) / 5.0 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]					
75 ≤ P < 130	4.0 (NO _x +HC) / 5.0 (CO) / 0.3 (PM) [g/kWh]		3.3 (NO _x) / 0.19 (HC) / 5.0 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]			0.4 (NO _x) / 0.19 (HC) / 5.0 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]			
130 ≤ P < 560	4.0 (NO _x +HC) / 3.5 (CO) / 0.2 (PM)	2.0 (NO _x) / 0.19 (HC) / 3.5 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]			0.4 (NO _x) / 0.19 (HC) / 3.5 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]				
P > 560 *	6.0-7.4 (NO _x) / 0.4-0.5 (HC) / 3.5 (CO) / 0.2 (PM) [g/kWh]		aligned with US limits (Tier 3)			4.0 (NO _x +HC) / 3.5 (CO) / 0.025 (PM) [g/kWh]*		under development - to be aligned with US emission limits (Tier 4)	

Figuur 4: Emissiegrenzen en data voor inwerkingtreding voor vijf motorcategorieën van mobiele machines [bron Shell].

* Uitsluitend voor railvoertuigen, hoofdlocomotieven en rangeerlocomotieven

5.2 Technologieën voor emissiebeperking

Onderstaande Tabel 8 geeft een overzicht van de toegepaste technologieën voor emissiebeperking. In de laatste kolom wordt een vergelijking gemaakt met de wetgeving voor zware voertuigen. Hierbij wordt de overeenkomende Euro-klasse bij benadering weergegeven. De technologieën voor emissiebeperking voor mobiele machines komen over het algemeen overeen met die voor zware voertuigen. Eén verschil is dat bij mobiele machines vaker gebruik wordt gemaakt van EGR als de belangrijkste technologie voor NOx-beperking. Bij zware voertuigen is dit eerder katalytische nabehandeling via SCR deNOx. De OEM's van sommige locomotiefmotoren maken bijvoorbeeld gebruik van EGR & SCR en optionele DPF-systemen. Andere fabrikanten gebruiken alleen EGR en een tweetraps turbocompressor (zonder SCR & DPF) om Stage IIIB te bereiken. Over het algemeen worden hier vaker deeltjesfilters toegepast dan bij het wegvervoer (tot en met Euro V).

Tabel 8: Emissiegrenzen en technologieën voor emissiebeperking voor twee categorieën motoren van mobiel machines

Jaar	Stage	Vermogen kW	NOx g/kWh	PM g/kWh	Technologie	≈ Zware vrachtwagen
2006	III A	> 130	4*	0,2	EGR of SCR (optioneel) Verbranding opt.	Euro III
2007		< 130	4*	0,3		
2011	III B	> 130	2	0,025	SCR, EGR, EGR + SCR, EGR + DPF	Euro V
2012		< 130	3,3	0,025	EGR, EGR + DPF	Euro IV
2014	IV		0,4	0,025	EGR + SCR DPF optioneel	Euro VI

* NOx + HC

5.3 Effecten op de emissie

Er waren diverse rapporten beschikbaar over de toepassing van Shell GTL Fuel bij mobiele machines. Deze rapporten waren echter gericht op de praktische toepassing van GTL, waaronder de werking bij koud weer en geluids- en rookmetingen. De (zwarte-)rookmetingen geven een goede indicatie van het aandeel zwarte rook in de totale deeltjesemissie, maar ze vormen geen officiële deeltjesmeting.

Voor mobiele machines waren de volgende rapporten beschikbaar:

- Shell-rapport over Hitachi-graafmachines: gericht op prestaties bij koud weer.
- DB Schenker-rapport over rookmetingen bij diverse (rangeer)locomotieven.

De werkzaamheden met de Hitachi-graafmachines werden in nauwe samenwerking met Hitachi uitgevoerd. De hoofdconclusie was dat het startvermogen bij extreem lage temperaturen (-20°) in orde was en dat er geen negatieve effecten op de levensduur van de motor te verwachten zijn.

De rookmetingen bij DB Schenker werden met locomotieven uitgevoerd. Eén rangerlocomotief werd uitgerust met een roetfilter. In een eenmalige meting liet het gebruik van GTL Fuel ten opzichte van standaarddiesel een aanzienlijke verlaging in rook zien. Deze reductie bedroeg over het algemeen circa 60% tot 85%. In één geval werd met het roetfilter een toename in rook gemeten. Dit is niet heel opmerkelijk vanwege het zeer lage rookniveau bij een roetfilter en het feit dat deeltjesfilters een grote hoeveelheid sulfaten en koolwaterstoffen kunnen opslaan.

Een rookmeting verschilt aanzienlijk van een officiële deeltjesemissiemeting. Deze laatste meting is gebaseerd op de massa van deeltjes, terwijl bij een rookmeting meestal gebruik wordt gemaakt van een methode van lichtabsorptie of een zwarte-rookmeting met behulp van een papierfilter. Als gevolg daarvan is de rookmeting meer gericht op de zwarte rook in rookdeeltjes. Deze meting heeft dus geen betrekking op alle deeltjes. Als gevolg hiervan wordt alleen het effect van GTL op zwarte rook gemeten. Het feitelijke reductiepercentage van GTL op de totale deeltjesemissie kan hoger of lager zijn.

Er zijn nauwelijks resultaten van emissiemetingen voor mobiele motoren voorhanden. Toch wordt er een positief effect van GTL op de verontreinigende emissies verwacht vanwege de specifieke samenstelling en eigenschappen van GTL en het daaruit voortvloeiende positieve effect op de verbranding. Deze verwachting wordt ondersteund door de positieve experimentele resultaten met een groot aantal uiteenlopende motoren (zie secties 2, 3 en 4). De verwachtingen zijn net zo positief als de effecten die gevonden werden met zware motoren uit andere segmenten die gebruikmaken van soortgelijke motor- en emissiebeperkings technologieën.

6 Conclusies

TNO evalueerde een groot aantal publicaties en rapporten met meetgegevens over emissies met GTL Fuel ten opzichte van standaarddiesel (EN590). De publicaties met complete emissiemetingen (NOx, PM, CO en HC) betroffen voornamelijk zware voertuigmotoren en scheepsmotoren. Daarnaast was er beperkte informatie beschikbaar over rookmetingen met locomotiefmotoren.

Op basis van deze evaluaties kan het volgende worden geconcludeerd over Shell GTL Fuel als vervanging voor reguliere dieselbrandstof (EN590):

- GTL zorgt voor verlaging van alle gereguleerde verontreinigende emissies van NOx (stikstofoxide), PM (fijnstof), CO (koolstofmonoxide) en HC (koolwaterstof). De testresultaten lieten variaties tussen de testprogramma's zien. Dit is gezien de verschillen tussen de motoren te verwachten.
- Voor relatief eenvoudige systemen als Euro III-motoren wezen de metingen op een NOx-reductie van 5% tot 19% en een PM-reductie van 10% tot 34%.
- Voor motoren met een meer geavanceerd emissiebeperkingsstelsel kunnen de relatieve variaties in NOx en PM groter zijn. Voor Euro V SCR-motoren gaven metingen een NOx-reductie van 5% tot 37% en een PM-reductie tot 33% aan, afhankelijk van het motortype en de testcyclus. De relatief grote variaties zijn het gevolg van het lage niveau en het feit dat regelsystemen, zoals voor de dosering van AdBlue, afhankelijk van het exacte systeemontwerp verschillend op GTL kunnen reageren. Er werd geen informatie beschikbaar gesteld voor Euro VI-motoren.
- Voor de relatief conventionele scheepsmotoren wezen metingen op een NOx-reductie van 8% tot 13% en een PM-reductie van 15% tot 60%.
- Voor mobiele machines was slechts zeer beperkt informatie beschikbaar. Het is echter hoogstwaarschijnlijk dat hier een soortgelijke emissiereductie als bij zware voertuigmotoren kan worden behaald. Dit kan worden afgeleid uit de positieve resultaten van testen met GTL op een brede reeks motoren, in combinatie met de eigenschappen van GTL en het positieve effect dat deze brandstof op de verbranding heeft.

De conclusie luidt daarom dat verontreinigende emissies van bestaande vloten aanzienlijk kunnen worden verminderd door toepassing van GTL Fuel. Deze reductie is direct meetbaar en kan worden gezien als aanvullende maatregel of als alternatief voor vervanging door nieuwere of schonere voertuigen, schepen of machines. In absolute zin is de emissiereductie het grootst als GTL Fuel wordt ingezet bij relatief 'vervuilende' motoren, zoals bij oudere voertuigen, schepen of mobiele machines.

7 Referenties

[Alleman 2003] Alleman, McCormick: FT-dieselbrandstoffen - eigenschappen en uitlaatemissies (FT diesel fuels - properties and exhaust emissions). SAE 2003-01-0763

[DBSRNL 2014] Verslag roetmeting rangeerlocomotieven DBSRNL op Chemelot (Report smoke measurements shunting locomotives on Chemelot)

[Delphi 2010] Evaluatie van de prestaties van Fischer-Tropsch-brandstof in geavanceerde diesel common-rail FIE (Evaluation of Fischer-Tropsch Fuel Performance in Advanced Diesel Common Rail FIE). Paul Lacey, Jean Marc Kientz, Sandro Gail en Nebojsa Milovanovic. Paul Stevenson, Richard Stradling en Richard H. Clark
Ratchatapong Boonwatsakul. SAE 2010-01-2191

[Clark 2009] Clark, Stephenson, Wardle: Emissiemetingen van Shell GTL-brandstof met behulp van wegstesten en laboratoriumonderzoeken (Emissions measurements of Shell GTL Fuel in the context of on-road trials and laboratory studies). 7th Int. Colloquium on Fuels. 14-15 jan. 2009.

[Clark 2005a] Clark, Wedlock, Cherrillo: Toekomstige brandstoffen en smeeroliën uit Shell GTL-technologie (Gas-to-Liquids) (Future fuels and lubricant base oils from Shell Gas to Liquids (GTL) technology). SAE 2005-01-2191

[Clark 2005b] Clark, Louis, Stradling: Gas-to-Liquids van Shell in de context van toekomstige motoren en brandstoffen (Shell Gas to Liquids in the context of future engines and future fuels). 5th Int. Colloquium Fuels, 2005.

[Clark 2001] Clark, Virrels, Maillard, Schmidt: De prestaties van dieselbrandstof geproduceerd door de GTL-technologie van Shell in de nieuwste voertuigmodellen (The performance of Diesel fuel manufactured by Shell's GTL technology in the latest technology vehicles). 5th Int. Colloquium Fuels, 2001.

[Kind 2010] Speciaal GTL-voertuig: een onderzoek naar de optimale kalibratie (Dedicated GTL vehicle: a calibration optimization study). Michael Kind, Andreas Kolbeck, Matthias Lamping, Dorothea Liebig, Richard Clark, Andrew Harrison, René van Doorn. SAE 2010-01-0737

[Kitano 2005] Koji Kitano, Ichiro Sakata, Richard Clark: Effecten van GTL-brandstofeigenschappen op DI-dieselvebranding (Effects of GTL Fuel Properties on DI Diesel Combustion).

[Krahl 2005] Krahl et al.: Euro 3 Impact van verschillende fossiele en biogenische brandstoffen op het uitlaatgas en de gezondheidseffecten (Impact of different fossil and biogenic fuels on the exhaust gas and the health effects). Fuels 2005

[Liebig 2009] Voordelen van GTL-brandstof in voertuigen met dieselpartikelfilters (Benefits of GTL Fuel in Vehicles Equipped with Diesel Particulate Filters). Dorothea Liebig, Richard Clark, Juliane Muth en Ingo Drescher. SAE 2009-01-1934

[Pon 2008] Dokter Wagemaker D3408 DITA-distillaatbrandstof vergeleken met GTL (Dokter Wagemaker D3408 DITA distillate fuel compared to GTL). Pon-rapport 2008.

[SGS 2013] Resultaten van emissiemetingen op de MS INVADO (Results of the emission measurements performed of MS INVADO). Shell EN 590 versus Shell GTL. SGS Environnemental Services, rapportnr. EZMO/13/0111-1_rep. datum 27 november 2013. Metingen van 21 en 22 november 2013

[SGS 2014] Resultaten van emissiemetingen op de NOVAMENTE (Results of the emission measurements performed of NOVAMENTE). Shell EN 590 versus Shell GTL. SGS Environmental Services conceptrapportnr. EZMO/13/0111-2_rep, 14 januari 2014. Metingen van 20 december 2013.

[Shell 2013] informatie uit Shell GTL-kennisgids

[Thompson 2004] Thompson et al.: Brandstofeffecten op gereguleerde emissies van geavanceerde dieselmotoren en -voertuigen (Fuel effects on regulated emissions from advanced diesel engines and vehicles). SAE 2004-01-1880

[TNO/ECN/CE Delft 2013] Natural gas in transport: An assessment of different routes. Ruud Verbeek, Norbert Ligterink, Jan Meulenbrugge, Gertjan Koornneef, Pieter Kroon, Hein de Wilde, Bettina Kampman, Harry Croezen, Sanne Aarnink. Gezamenlijk rapport CE Delft, ECN, TNO, Publicatiecode: 13.4818.38. Mei 2013

[TNO/CE Delft 2012] Ruud Verbeek, Bettina Kampman: Factsheets: Brandstoffen voor het wegtransport (Factsheets fuels for road transportation), september 2012

[TNO/CE 2009] Verbeek, R., B. Kampman, G. L. M., Rabé, S. Bleuanus, X. Rijkee 2009 (dec). Impact van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies van wegvoertuigen, fase 2 (Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles, phase 2). TNO-rapport MON-RPT-033-DTS-03967A. TNO Science and Industry. Projectnummer 033.21296.

[TNO/CE 2008] Verbeek, R., Smokers, R. T. M., Kadijk, G., Hensema, Amber, Passier, G. L. M., Rabé, E. L. M., Kampman, B., & Riemersma, I. J. 2008 (juni). Impact van biobrandstoffen op luchtverontreinigende emissies van wegvoertuigen (Impact of biofuels on air pollutant emissions from road vehicles). TNO-rapport MON-RPT-033-DTS-2008-01737. TNO Science and Industry. Projectnummer 033.16166.

[Verbeek 2012] Factsheets van technische mogelijkheden voor het verlagen van de milieubelasting van passagiersschepen in Amsterdam (Factsheets of technical options to reduce the environmental pollution of passenger vessels in Amsterdam). TNO 2012 R10327, 7 december 2012.

8 Ondertekening

Delft, 16 september 2014

A handwritten signature in blue ink, consisting of several overlapping loops and a central vertical stroke.

Nico Zornig
Manager STL

A handwritten signature in blue ink, featuring a series of horizontal and diagonal strokes.

Ruud Verbeek
Auteur