



SUSTAINABLE WATERWAY TRANSPORT, CLEAN AIR

Emissiemetingen aan het laboratoriumschip "Max Prüss" na uitrusting met een SCRT-systeem

**Deliverable Deel van Actie B1,
Emissiereductietechnologieën**

CLEAN INLAND SHIPPING

WWW.CLINSH.EU

Het doel van LIFE CLINSH is het verbeteren van de luchtkwaliteit in stedelijke gebieden die dicht bij havens en binnenwateren liggen, door een snellere vermindering van de uitstoot van de binnenvaart.

Referentie van het project: LIFE15 ENV/NL/000217
Looptijd: 2016 – 2021
Project website: www.clinsh.eu



CLINSH is een LIFE+-project van de EG dat wordt uitgevoerd met de bijdrage van het financieel instrument LIFE van de Europese Gemeenschap. Projectnummer LIFE15 ENV/NL/000217

Dit resultaat maakt deel uit van Actie B1, Emissiereductietechnologieën.

Bijdragers: LANUV NRW
Versie: Einde
Date: 22.06.2020
Auteurs: Dieter Busch (LANUV NRW)
Andreas Brandt (LANUV NRW)
Martin Kleinebrahm (TÜV-Nord)
Sergej Dreger (TÜV-Nord)



Emissiemetingen aan het laboratoriumschip "Max Prüss" na uitrusting met een SCRT- systeem

Projectmanagement:	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen Leibnizstrasse 10 45610 Recklinghausen
Technische dienst:	TÜV- Nord Mobilität GmbH & CO. KG Institut für Fahrzeugtechnik und Mobilität Adlerstrasse 7 45307 Essen
Installatiebouwer :	TEHAG Deutschland GmbH Gutenbergstrasse 42 47443 Moers
Scheepseigenaar:	Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV NRW) Nordrhein-Westfalen Leibnizstrasse 10 45610 Recklinghausen
Cover foto :	Eva Henneberger, Köln

Inhoudstafel

<i>Inhoudstafel</i>	4
1 UITGANGSSITUATIE	6
2 INLEIDING	8
3 PROJECTSCHIP	9
3.1 Motor en aandrijving	11
3.2 Uitlaatgasreinigingssystemen op de "Max Prüss" 1 Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.	
4 PROCEDURE	15
4.1 Algemeen	15
4.2 Uitlaatgasmeetprogramma	15
4.3 Meetprocedure	17
5 GEBRUIKTE MEETTECHNIEK	19
5.1 Meettechniek voor gasvormige emissies	20
5.2 Technologie voor deeltjes- en roetmeting	25
5.2.1 Meettechniek voor het bepalen van de roetconcentratie	25
5.2.2 Meettechniek voor de meting van gravimetrische deeltjes	28
5.3 Meettechniek voor gasvormige emissies stroomafwaarts AGN Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd. 0	
5.4 Verdere meettechniek.....	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i> 6
5.4.1 Temperatuurmeting.....	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i> 6
5.4.2 Meting van de milieugegevens	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i> 6

6 RESULTATEN	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>	7
6.1 Algemeen	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>	7
6.2 Vermogensbepaling	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>	8
6.3 Overweging van de individuele meting. <i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>		8
6.3.1 Concentratiesporen van de gasvormige emissies van de afzonderlijke meetpunten	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>	9
6.3.1.1 Meetpunt 1620 min ⁻¹	<i>Fout! Bladwijzer niet gedefinieerd.</i>	9
6.3.1.2 Meetpunt 1456 min ⁻¹		41
6.3.1.3 Meetpunt 1280 min ⁻¹		42
6.3.1.4 Meetpunt 1008 min ⁻¹		44
6.3.2 Deeltjesemissies.....		46
6.3.3 Roetuitstoot.....		48
6.3.4 Verlagingspercentages in de individu meetpunten		49
6.4 Evaluatie volgens ISO 8178 E3-cyclus.....		51
6.4.1 Evaluatie upstream AGN.....		51
6.4.2 Evaluatie downstream AGN.....		51
6.5 Resultaten voor NO ₂ -emissies		52
7 BESPREKING VAN DE RESULTATEN		53
7.1 Beoordeling van de gepresenteerde emissieresultaten		53
7.2 Resultaatrelevantie voor het CLINSH-project		58
8 SAMENVATTING		61
9 Literatuur		63
10 Cijferlijst		64
11 Lijst van tabellen		65
12 Projectpartners		66

1. UITGANGSSITUATIE

In de richtlijn van het Europees Parlement en de Raad van 21.8.2008 betreffende de luchtkwaliteit en schone lucht voor Europa (2008/50/EG) en in de Richtlijnen 2001/81/EG en 2004/107/EG zijn voor de hele EU bindende luchtkwaliteitsdoelstellingen vastgesteld voor het voorkomen of verminderen van schadelijke gevolgen voor de gezondheid van de mens en het milieu. Deze omvatten bindende doelstellingen voor concentraties van luchtverontreinigende stoffen in woongebieden (2008/50/EG), voorschriften voor de maximaal toegestane emissies in de afzonderlijke EU-lidstaten (2001/81/EG) en verplichte emissiegrenswaarden, bijvoorbeeld voor stikstofdioxide en deeltjes (PM₁₀) voor installaties en motoren. Richtlijn 2016/1628/EG (NWBMM) betreffende de herziene "Eisen inzake de emissiegrenswaarden voor verontreinigende gassen en deeltjes en de typegoedkeuring van verbrandingsmotoren voor niet voor de weg bestemde mobiele machines en apparaten" omvat bijvoorbeeld verplichte maximumemissiegrenswaarden voor de hoofdmotoren (IWP) en hulpmotoren (IWA) van binnenschepen. Deze gelden uiterlijk vanaf 01.01.2020, maar zijn alleen geldig voor nieuwbouwschepen of bij vervanging van machines in oudere schepen. een SCRT-systeem

De deeltjes- en stikstofdioxide-emissies van de huidige scheepsvoortstuwingssystemen dragen bij aan achtergrondconcentraties in de buurt van de scheepvaartroutes en in de stedelijke hotspotgebieden in de buurt van de waterwegen. Met name voor steden in de buurt van waterwegen met grote binnenvaartactiviteiten is het belangrijk om het onderzoek naar de emissies van mariene voortstuwingssystemen voort te zetten en manieren te vinden om de emissies van de belangrijkste verontreinigende stoffen PM en NO_x/NO₂ te verminderen door verbeteringen aan bestaande schepen.

Voor de Rijn met zijn intensieve scheepvaartverkeer spelen deze emissies een belangrijke rol in het beleid voor schone lucht. Naast Nederland en andere Rijnstaten is dit onderwerp met name relevant voor NRW omdat de grenswaarden van de EU-luchtkwaliteitsrichtlijn voor NO₂ (40 µg/m³, jaargemiddelde) op veel meetstations in de steden van NRW worden overschreden.

Voor de Rijksdienst voor Natuur, Milieu en Consumentenbescherming van de deelstaat Noordrijn-Westfalen (LANUV NRW) zijn de emissies van binnenschepen en de gevolgen daarvan voor de luchtkwaliteit al vele jaren een probleem. De LANUV heeft zich intensief beziggehouden met de nabehandeling van uitlaatgassen van dieselmotoren op vracht- en passagiersschepen. In een pilotproject is een installatie van een SCRT-katalysator en deeltjesfilter op het passagierschip "Jan von Werth" door de LANUV ondersteund. In een tweede project werd een olie-water emulsie-injectie geïnstalleerd op een vrachtschip. Met behulp van de "TÜV-Nord Mobilität

GmbH & Co KG" werden meetcampagnes en technische ondersteuning uitgevoerd. Een deel van de resultaten is al gepubliceerd in technische rapporten van de LANUV. (LANUV-Fachbericht 49 (2013), "Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxidemissionen auf dem Fahrgastschiff "Jan von Werth" durch Nachrüstung eines SCRT-Systems" en LANUV-Fachbericht 77 (2017) "Emissionen des Containerschiffs "MS Aarburg", Auswirkungen der Nachrüstung mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage").

Door de toenemende discussie over het aandeel van de verschillende emissiebronnen van de milieuvervuiling is het thema "binnenvaartschepen" steeds relevanter geworden. Het EU Life-project "Clean Inland Shipping" (CLINSH) heeft betrekking op de luchtverontreiniging door binnenvaartschepen en technische oplossingen voor emissiereductie.

Met het project "CLINSH" is de mogelijkheid ontstaan om de emissies van binnenvaartschepen intensiever te onderzoeken, met de nadruk op het zoeken naar de beste technische oplossingen om de scheepsgerelateerde luchtvervuiling te verminderen. In de eerste toepassingsfase van CLINSH en in het kader van de eerste toepassing van het project in 2015 was het de bedoeling om het laboratoriumschip "Max Prüss", dat tot de LANUV behoort, uit te rusten met een uitlaatgas-nabehandeling (SCRT-katalysator en deeltjesfilter) en deel te nemen aan het daaropvolgende meetprogramma.

Helaas werd de start van het project vertraagd, zodat de LANUV besloot om "Max Prüss" achteraf uit te rusten met een SCRT-systeem (combinatie van een deeltjesfilter en een downstream SCR-katalysator voor stikstofoxidereductie, gebouwd door TEHAG Deutschland GmbH). Dit gebeurde voordat het EU-project van start ging en werd gefinancierd met middelen van LANUV. Met de aanpassing van zijn laboratoriumschip speelt NRW een voortrekkersrol voor de Duitse Rijnvloot.

De LANUV neemt deel aan het project in het werkpakket B.3 "Emissie-inventarisatie en demoresultaten" met de achteraf geïnstalleerde "Max Prüss". Het belangrijkste onderwerp van het project is de data-acquisitie door middel van de lange termijn monitoring van de scheepsemissiegegevens en het effect van de technische emissiereductie gemeten onder reële scheepsomstandigheden.

De emissies van 41 binnenschepen die met verschillende emissiereductietechnologieën zijn uitgerust, worden onder reële bedrijfsomstandigheden onderzocht. De aldus gecreëerde databank moet de basis vormen voor de bepaling van de reële emissiefactoren en moet de lidstaten van de EU in staat stellen de effecten van de verschillende maatregelen op de reële emissie (RDE) van de Europese vloot te zien. Voor de continue metingen en de detectie van NOX-concentraties in de uitlaatgassensoren op alle schepen die aan het CLINSH-project deelnemen, werden door het bedrijf "Multronic" geïnstalleerd.



De uitlaatgasemissiemetingen van TÜV-Nord die na de retrofit van de "Max Prüss" zijn gepland, zullen in het CLINSH-project worden opgenomen om de geïnstalleerde bewakingstechnologie te valideren. Op basis van de discontinue metingen die TÜV-Nord uitvoert met behulp van de E3-cyclus (normaal gesproken gebruikt voor de typegoedkeuring van scheepsmotoren), is het mogelijk om de emissiefactoren voor "Max Prüss" met en zonder uitlaatgasretrofit te bepalen.

Aan het einde van het jaar moet het mogelijk zijn om na te gaan of de "Real Drive (Navigation) Emissions" een betere beoordeling van de werkelijke scheepsemissies mogelijk maken. Dit is al mogelijk met de discontinue meting van de E3-cycli op basis van de resultaten van de TÜV-Nord metingen.

2. INLEIDING

In oktober 2015 werd de "Max Prüss" uitgerust met een SCRT-uitlaatsysteem van "TEHAG Deutschland GmbH" op beide hoofdmotoren. De SCRT-systemen bestaan uit een continu regenererend wandstroompartikelfilter (2 filterpatronen) en een SCR-katalysator met een regelbare doseerinrichting voor de waterige ureumoplossing AdBlue® voor de reductie van NOX-emissies (beschrijving in hoofdstuk 3.2).

De deelname van "Max Prüss" biedt de volgende mogelijkheden voor het CLINSH-project: Op de commerciële vracht- en tankschepen die deelnemen aan het CLINSH-project is het over het algemeen zeer moeilijk om geschikte afspraken te maken voor de installatie van de juiste uitlaatgasbehandelingen, meetapparatuur en eventueel noodzakelijke technische aanpassingen. Aangezien de LANUV de eigenaar van het schip is, is het in staat om snel en eenvoudig toegang te krijgen tot de "Max Prüss" in het kader van het CLINSH-project. Ook het plannen en uitvoeren van installaties en meetcampagnes is eenvoudig. De LANUV bood het CLINSH-project daarom de mogelijkheid om de beoogde meettechniek vooraf te installeren en te testen, voordat deze techniek op alle andere deelnemende schepen geïnstalleerd had moeten worden.

De belangrijkste taak van de technische dienst van de "TÜV-Nord Mobilität GmbH & Co KG" in het project is het controleren en evalueren van de effectiviteit van het uitlaatgasreparatiesysteem in onbehandelde uitlaatgassen en uitlaatpijpen.

- Meting van de uitstoot van gasvormige vervuilende stoffen en
- Metingen van roet- en deeltjesemissies.

3. PROJECTSCHIP

Het laboratoriumschip "Max Prüss" (Fig. 1) van de LANUV wordt gebruikt om de toestand van de waterlopen in Noordrijn-Westfalen te controleren en brengt ongeveer 220 dagen per jaar door op de Rijn, de belangrijkste zijrivieren en de West-Duitse scheepvaartkanalen. De Max Prüss legt meer dan 16.000 kilometer per jaar af. Tabel 1 geeft de belangrijkste technische gegevens van het schip weer.



Figuur 1: Laboratoriumschip "Max Prüss"

Tabel 1: Technische gegevens "Max Prüss" (Bron: LANUV)

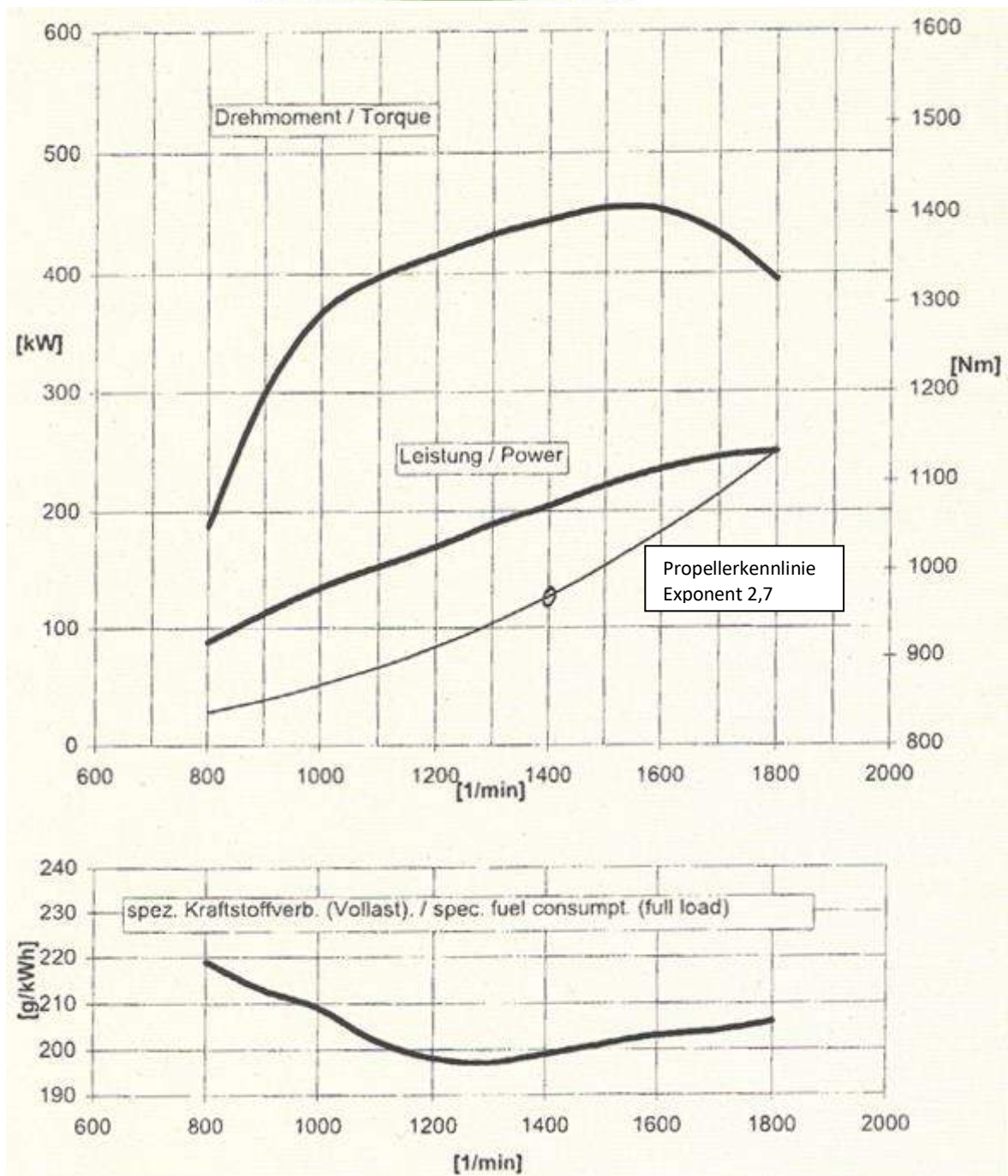
<i>Eigentümer:</i>	<i>Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz NRW</i>
<i>Heimathafen:</i>	<i>Essen</i>
<i>Bauwerft:</i>	<i>Deutsche Binnenwerften GmbH, Werft Genthin; Bau NR. 152</i>
<i>Kiellegung:</i>	<i>September 1998</i>
<i>Stapellauf:</i>	<i>07.04. 1999</i>
<i>Ablieferung:</i>	<i>07.05.1999</i>
<i>Hauptabmessungen:</i>	
<i>Länge über Alles:</i>	<i>33,00 Meter</i>
<i>Breite über Alles:</i>	<i>7,57 Meter</i>
<i>Seitenhöhe:</i>	<i>2,10 Meter</i>
<i>Tiefgang:</i>	<i>1,10 Meter</i>
<i>Maschinenanlage:</i>	
<i>Antriebsleistung:</i>	<i>2 x 250 kW (340 PS)</i>
<i>Antrieb:</i>	<i>konventionell</i>
<i>2 Schiffs-Diesel-Motoren; MAN Typ D 2866 LXE 43</i>	
<i>Zylinderzahl:</i>	<i>6</i>
<i>Drehzahl:</i>	<i>1.800 min⁻¹</i>
<i>Kühlung:</i>	<i>Wasserkühlung</i>
<i>Anlassung:</i>	<i>elektrisch; 24 V, 2-polig</i>
<i>2 Schiffs-Wendeuntersetzungsgetriebe</i>	
<i>Typ:</i>	<i>WAF 143L</i>
<i>Untersetzung:</i>	<i>3,522</i>
<i>2 Propeller</i>	
<i>Durchmesser:</i>	<i>1.000 mm</i>
<i>Geschwindigkeit:</i>	<i>20 km/h</i>

3.1 Motor en aandrijving

Het laboratoriumschip "Max Prüss" heeft twee 6-cilinder MAN D2866 LXE43 motoren, gebouwd in 1998. Het vermogen is gespecificeerd op 250 kW/1.800 min⁻¹ per motor op het identificatieplaatje. De totale cilinderinhoud van de motoren is 11.967 cm³. De motoren hebben een mechanische vermogensregeling en een uitlaat-turbolader met laadluchtkoeling. Figuur 2 toont de stuurboordmotor. Figuur 3 toont de belangrijkste prestatieschema's. De transmissie type WAF 143L is afkomstig van de firma "Reintjes" en vermindert het toerental in de verhouding 3.522 : 1.



Figuur 2: Stuurboordaandrijfmotor MAN D2866 LXE43

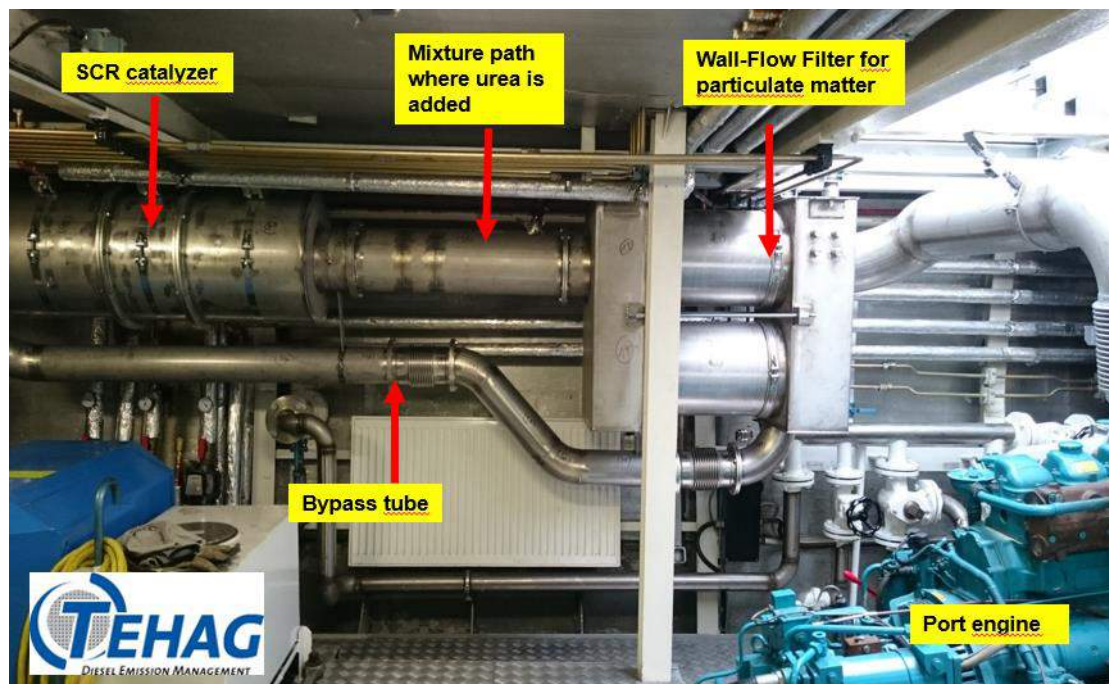


Figuur 3: Vermogensgrafieken van de motor MAN D2866 LXE43

3.2 Uitlaatgasreinigingssystemen van „Max Prüss“

De "Max Prüss"-motoren zijn achteraf uitgerust met een wandstroomfilter voor de deeltjesmassa en een SCRT-katalysatorsysteem van de firma "TEHAC". Beide aandrijfmotoren van de "Max Prüss" zijn uitgerust met een gecombineerd uitlaatgasreinigingssysteem bestaande uit CWF-roetdeeltjesfilters en een AdBlue NOX-reductiesysteem (SCR) elk. Voor de modificatie werden de bestaande uitlaatsystemen (geluiddempers, vonkenvangers en leidingen) volledig gedemonteerd. De nieuwe uitlaatgasreinigingscomponenten werden in de zo ontstane ruimte geïnstalleerd (fig. 2).

De ombouw begon op de bestaande compensator die direct achter de turbo werd gemonteerd. Van daaruit werd het leidingwerk aan de buitenwand van de bakboord- en stuurboordzijde van de machinekamer gelegd. De leidingen leiden naar de uitlaatgasinlaatcollectoren van de roetpartikelfiltersystemen, die elk bestaan uit 2 filtermodules, maat CWF 1700. Alle filtermodules zijn gecombineerd met een collectorconstructie en dus als één onderdeel in het betreffende uitlaatgaskanaal geïntegreerd. De filterelementen zijn gecoat met een katalytische coating voor de automatische regeneratie van de gefilterde deeltjes. Vanaf een uitlaatgastemperatuur van ca. 230°C worden de roetdeeltjes door een oxidatieproces geregenereerd.



Figuur 4: Algemeen overzicht van het nieuwe uitlaatsysteem (bakboordmotor)

Aan het plafond van de machinekamer zijn nieuwe beugels gemaakt voor de bevestiging van de roetfilterunit. Na de uitlaatcollector van de roetfilters werd een mengsectie geplaatst waarin de injector voor ureum en een statische mixer zijn geïntegreerd. De katalysator zelf bestaat uit drie metalen dragers die voorzien zijn van een reductiecoating. De posities van de originele geluiddempers werden gebruikt voor de bevestiging van de SCR-katalysatoren. Achter de SCR-katalysatoren werden de uitlaatleidingen naar het achterschip geleid. Door de vergroting van de pijpdiameter (219 mm) werden ook de uitlaatopeningen aan het achterschip vergroot.

Als extra veiligheidsmaatregel werden in beide systemen bypasses onder de hoofd uitlaatleiding geïnstalleerd. Deze werden aan de onderzijde van het inlaatspruitstuk aangesloten en met een Y-pijp achter de SCR-katalysatoren weer in het uitlaatsysteem geïntegreerd. De bypass wordt geopend via een elektrisch of handmatig bediende klep. Aan de bedieningszijde is deze zodanig geïntegreerd dat de bypass automatisch wordt geopend wanneer de retourtegendruk hoger is. Bij stroomuitval kunnen de kleppen ook handmatig worden geopend.

De besturingskasten van beide systemen zijn aan het einde van de machinekamer boven het roersysteem gemonteerd. De ureumpompen en andere regelaars zijn tussen de besturingskasten geplaatst. Achterin is een 450 liter ureumtank geïnstalleerd in een bestaande vrije ruimte tussen de frames. Daarnaast is een 1000 liter IBC-tank aan dek geplaatst. Deze tank kan als leveringscontainer worden uitgewisseld. De bemanning vult de 450 liter tank in de machinekamer regelmatig bij vanuit deze bron.

Een compressor voor de extra luchttoevoer is voor de tankunit in de machinekamer geplaatst. Alle leidingen voor de elektriciteits-, lucht- en ureumvoorziening zijn zo ver mogelijk aan het plafond gelegd, langs bestaande kabelgoten. Beide uitlaatgaszuiveringsinstallaties, inclusief bypasses, werden uiteindelijk verpakt met een zeer efficiënte thermische isolatie, zodat de temperaturen in de installatie behouden blijven en een optimaal regeneratievermogen van alle componenten gegarandeerd is. Tegelijkertijd vermindert de isolatie de stralingswarmte in de machinekamer.

Alle demontage- en montagewerkzaamheden werden in de aanlegplaats "Max Prüss" uitgevoerd door monteurs van "TEHAG".

4. PROCEDURE

4.1 Algemeen

In de periode voorafgaand aan de montage van de "Max Prüss" werd de meettechniek voor het vastleggen van de uitlaatgastemperatuur en de uitlaatgastegendruk, evenals de GPS-meettechniek op een motor aan boord geïnstalleerd en voorzien van een datalogger. Figuur 4 toont het dataloggersysteem. Op basis van de resultaten van deze metingen is de uitlaatgasmeettechniek aan boord van de "Max Prüss" ontworpen, gebouwd en geïnstalleerd door "TEHAG Deutschland GmbH".

De bemonsteringsbussen en meetflenzen, die nodig zijn voor een uitlaatgasmeting, werden bij de installatie van het SCRT-systeem afgestemd met de systeembouwer "TEHAG" en geïntegreerd in het uitlaatgasretrofitsysteem voor de meetcampagnes. De installatie van het systeem op de "Max Prüss" vond plaats in oktober 2015.

Als gevolg van aanzienlijke vertragingen in het CLINSH-project kon de bewakingstechniek voor het verzamelen van uitlaatgasgegevens op de "Max Prüss" pas in 2018 door de firma "Multronic Emission Systems" worden geïnstalleerd. De uitlaatgasmetingen voor de validatie van de bewakingsresultaten zouden door "TÜV-Nord" een redelijke tijd na de installatie van de continue bewaking moeten worden uitgevoerd en konden daarom pas in november 2018 worden uitgevoerd.

4.2 Uitlaatgasemissieprogramma

Voortstuwingsmotoren van binnenschepen worden onderworpen aan een testprocedure voor typegoedkeuring, die het emissiegedrag van de motor in verschillende stationaire testprocedures bepaalt. Voor motoren met vaste schroeven wordt de testcyclus E3 volgens ISO / FDIS 8178-4 gebruikt. Deze testcyclus definieert de te gebruiken testfasen per vermogen, belasting en toerental. Omdat in het echte rijbedrijf geen directe invloed op het vermogen of het koppel kan worden uitgeoefend, omdat dit voortvloeit uit de propellerkarakteristiek, dienen alleen de testtoerentallen als reproduceerbare instelvariabele. Deze zijn bij 100%, 91%, 80% en 63% van het nominale toerental. Vervolgens wordt het gewogen (0,2, 0,5, 0,15, 0,15) gemiddelde over de 4-stappen-test als testresultaat vermeld.

Uit de eerste evaluaties van de RDE-gegevens bleek dat een maximaal motortoerental van 1,620 tpm in bedrijf niet werd overschreden. Op basis hiervan en van bovenstaande ISO 8178 is het volgende meetprogramma uitgevoerd.

Gelijktijdige metingen van de gasvormige emissies zijn zowel boven als beneden de uitlaatgasuitstoot uitgevoerd op vier verschillende punten:

(1.008 min⁻¹, 1.280 min⁻¹, 1.456 min⁻¹ en 1.620 min⁻¹)

op de resulterende belastingscurve. Parallele seriële metingen met het PAAS-systeem (microrootsensor AVL 483) dat wordt gebruikt voor de detectie van de elementaire koolstofdeeltjesconcentratie en gravimetrische deeltjesmetingen in quasi stationaire rijomstandigheden met het deeltjesbemonsteringssysteem Micro-PSS stroomopwaarts en stroomafwaarts van de uitlaatgassen werden uitgevoerd.



Figuur 5: Gegevenslogger voor meetgegevensregistratie

4.3 Meetprocedure

Om de reductiepercentages van de uitlaatgasreparatie (AGN) te bepalen, moeten de onbehandelde emissies van de motor worden gerelateerd aan de emissies in de uitlaatpijp van het uitlaatsysteem. Voor gasvormige emissies gebeurde dit door gelijktijdige meting van de uitlaatgasconcentraties stroomopwaarts AGN (onbehandelde emissies) en stroomafwaarts AGN (uitlaatgasemissies) met twee uitlaatgasmeetsystemen. Er was slechts één instrument beschikbaar voor het meten van deeltjes- en roetemissies. Daarom konden de roetuitstoot en de uitlaatgasemissies niet tegelijkertijd, maar na elkaar worden gemeten. Het was belangrijk om dezelfde meetpuntinstelling na te bootsen voor de geldigheid van de resultatenmetingen.

Om de absolute emissiemassa's te bepalen, moet de uitlaatgasmassastroom in de respectieve meetpunten bekend zijn. Er zijn drie methoden mogelijk. 1. 1. Een directe meting van de uitlaatgasmassastroom. 2. 2. Een berekening met gegevens over het exacte brandstofverbruik. 3. 3. Een berekening met gegevens over de exacte inlaatluchtmassastroom. In dit project is de uitlaatgasmassastroom rechtstreeks bepaald met behulp van een meetbuis voor de massastroom (EFM).

Om de prestatiegerelateerde emissieresultaten te kunnen bepalen is kennis van het motorvermogen op de respectievelijke meetpunten noodzakelijk. Ook hier is een verscheidenheid aan methoden beschikbaar om het motorvermogen te bepalen. Een methode om de motorprestaties te meten is bijvoorbeeld de bepaling van het koppel op de uitgaande as met behulp van rekstrookjes. Nadelen van deze methode zijn de grote kosten voor het aanbrengen van meetstrips op de aandrijf-as, de moeilijkheidsgraad van de kalibratie en een onbekende beïnvloedingsfactor vanwege het overbrengingsrendement. Voor moderne, elektronisch gestuurde motoren bestaat nog steeds de mogelijkheid om het huidige motorvermogen te bepalen aan de hand van de gegevens van de ECU. Hiervoor is toegang tot de controller nodig via een bekende interface. Bovendien moet ervoor worden gezorgd dat de gegevens van de elektronische regeleenheid worden gevalideerd.

De motoren van de "Max Prüss" zijn zuiver mechanisch gestuurd, zodat de methode via de gegevens van de ECU niet toepasbaar is. Daarom werd een derde methode gebruikt om de prestatiegegevens te bepalen. Zoals reeds vermeld wordt de belastingstoestand van de motor beïnvloed door het gebruikte type propeller. Het benodigde vermogen bij een bepaald toerental kan worden bepaald aan de hand van de vermogenscurve van de propeller (zie fig. 3).

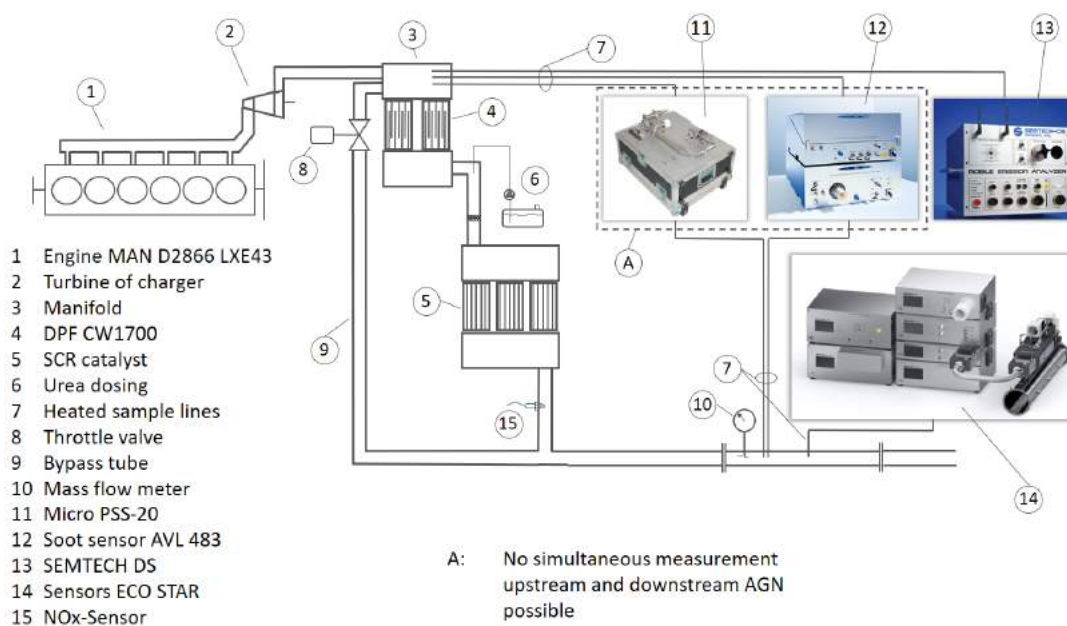
Onder Real Drive Conditioes wordt deze vermogensis nog steeds beïnvloed door factoren als waterstand, debiet, roerstand, enz. Deze onnauwkeurigheden in de prestatiebepaling zijn niet relevant voor het bepalen van de conversiewaarden van de SCR-katalysator, aangezien de gasvormige emissies gelijktijdig worden bepaald voor onbehandeld en voor uitlaatgassen. Alleen bij de bepaling van de deeltjesemissie heeft de reproduceerbaarheidsnauwkeurigheid van de belastingscorrectie invloed op het resultaat. De details van de prestatiegerelateerde uitlaatemissies zijn ook onderhevig aan de beschreven onzekerheid.

Aangezien de motor van "Max Prüss" zijn nominaal toerental van 1.800 tpm niet kan bereiken door middel van de regelaarinstellingen op de injectiepomp, kan slechts een maximaal toerental van 1.620 tpm worden bereikt. Daarom is de uitlaatgastest gedefinieerd voor de vier bovengenoemde toerentallen. De vermogenscurve van de propeller maakt gebruik van een exponent van 2,7, zoals gedocumenteerd op de vermogenskaart van de motor, om het benodigde vermogen voor het betreffende toerental te bepalen voor de berekening van de prestatiegerelateerde resultaten.

5. GEBRUIKTE MEETTECHNIEK

Om de gasvormige emissies te registreren, werden er tegelijkertijd metingen uitgevoerd vóór het uitlaatgasretrofitsysteem en in de uitlaatpijp van het uitlaatsysteem. Tegelijkertijd werd de uitlaatgasmassastroom bepaald met behulp van een meetsysteem. Naast de bepaling van de absolute emissiemassa's vóór en na de montage van het uitlaatgas kan de conversiesnelheid van de SCR-katalysator rechtstreeks worden bepaald door de gelijktijdige meting van de gasvormige emissies. De bepaling van de deeltjes- en roetemissies vond niet gelijktijdig plaats, omdat de desbetreffende meettechniek niet in tweevoud beschikbaar is. Hier is een tweevoudige meting van de overeenkomstige belastingspunten uitgevoerd met een meetsysteem voor en achter de uitlaatgasuitlaat achteraf.

De volgende hoofdstukken geven een gedetailleerde beschrijving van de gebruikte meettechnologieën voor de afzonderlijke parameters. Een schematische weergave van de meetopstelling is weergegeven in fig. 6.

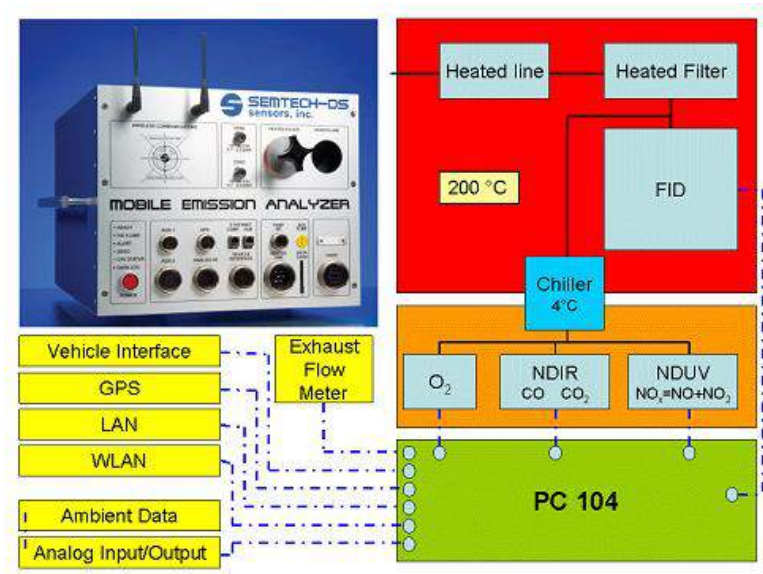


Figuur 6: Schematische weergave van de meetopstelling

5.1 Meettechnologie voor gasvormige emissies

Voor het meten van gasvormige componenten werd de SEMTECH-DS van "Sensors" gebruikt. Met uitzondering van de NO_x-analyzer is het basisontwerp van het systeem vergelijkbaar met de meettechniek die is beschreven in de EG-regelgeving voor het meten van dieselmotoren in onverdund uitlaatgas. Er is een verwarmd gedeelte dat de gasbemonsteringslijn en een verwarmd filter omvat en de FID (Flame Ionization Detector) om de totale hoeveelheid koolwaterstoffen te bepalen. De verwarming tot ten minste 180°C is noodzakelijk om de condensatie van koolwaterstoffen te voorkomen. Een deelstroom van het bemonsteringsgas wordt door een condensator voor het drogen overgebracht en vervolgens naar de NDIR-analysator (niet-dispersieve infraroodanalysator) voor de bepaling van de CO- en CO₂-concentratie, de elektrochemische O₂-analysator en de NDUV-meetbank (niet-dispersieve ultravioletmeetbank) voor de bepaling van NO en NO₂.

Drogen is noodzakelijk omdat deze parameters niet kunnen worden bediend met natte uitlaatgassen. Een computer (PC 104), gerangschikt in het meetsysteem, beheert het hele systeem en combineert de gegevens van de verschillende bronnen. Figuur 9 toont het SEMTECH-DS meetsysteem van "Sensors" en illustreert tegelijkertijd de basisstructuur van het systeem. De tabellen 2 tot en met 5 geven een overzicht van de specificatiegegevens van de gebruikte analysers. Naast het eigenlijke analysesysteem kunnen ook gegevens van een GPS-systeem, een uitlaatgasmassensor en diverse analoge en digitale ingangen worden verzameld. Ook zijn er sensoren aangesloten die atmosferische gegevens verzamelen. Om het systeem te bedienen wordt een externe computer met de juiste software via LAN aangesloten.



Figuur 7: SEMTECH-DS-Apperatuur en systeemconfiguratie

De gassen die nodig zijn voor de werking van het meetsysteem werden aan boord van het projectschip gebracht. Omdat het gasverbruik zeer laag is, kunnen over het algemeen kleinere gascilinders worden gebruikt, die gedeeltelijk ook in de SEMTECH-DS-behuizing kunnen worden ondergebracht. Voor uitgebreidere metingen is het noodzakelijk om grotere flessen te gebruiken. Aangezien het gehele gasbemonsteringstraject en een deel van het meetsysteem wordt verwarmd tot 190°C, is vanaf het moment dat de apparaten worden ingeschakeld tot de bedrijfstoestand minimaal twee uur opwarmtijd en voorbereidingstijd te verwachten. Aan het einde van deze voorbereiding wordt het systeem gekalibreerd. Dit moet voor en na elke meting gebeuren.

Tabel 2: Specificaties van de Vlamionisatie (THC-FID)

Range of Measurement	0 – 100, 0 – 1.000 and 0 – 10.000 ppmC User selectable	
	0 – 100 ppm Range	0 – 10.000 ppm Range
Accuracy	± 1,0 % of reading or ± 5 ppm whichever is greater	± 1,0 % of reading or ± 25 ppm whichever is greater
Resolution	0,1 ppm	1,0 ppm
Linearity	± 0,5 % of reading or ± 3 ppm whichever is greater	± 0,5 % of reading or ± 10 ppm whichever is greater
Repeatability	± 0,5 % of reading or ± 2 ppm whichever is greater	± 0,5 % of reading or ± 10 ppm whichever is greater
Noise	± 2 ppm	± 10 ppm
Span drift	± 0,5 % of reading or 3 ppm whichever is greater over 8 hrs	± 0,5 % of reading or 15 ppm whichever is greater over 8 hrs
Warm up time	60 minutes	60 minutes
Response time	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Flow rate	2 LPM	2 LPM
Data rate	Up to 4 Hz, configurable	Up to 4 Hz, configurable
Operating temperature	191 °C	191 °C

Tabel 3: Specificaties van de Niet-Dispersieve Infrarood Meetbankdetector

Gas	CO Low Range	CO High Range	CO ₂
Range of Measurement	0 – 5.000 ppm	0 – 8 %	0 – 20 %
Accuracy	± 3 % of reading or 50 ppm whichever is greater	± 3 % of reading or ± 0,02 % whichever is greater	± 3 % of reading or ± 0,1 % whichever is greater
Resolution	1 ppm	0,001%	0,01%
Linearity	± 1,0 % of reading or 20 ppm whichever is greater	± 1,0 % of reading or ± 0,01 % whichever is greater	± 1,0 % of reading or ± 0,05 % whichever is greater
Repeatability	± 1,0 % of reading or 20 ppm whichever is greater	± 1,0 % of reading or ± 0,01 % whichever is greater	± 1,0 % of reading or ± 0,05 % whichever is greater
Noise	± 20 ppm	± 20 ppm	± 0,02 %
Span drift	± 0,5 % of reading or 20 ppm whichever is greater over 8 hrs	± 0,5 % of reading or ± 0,01 % whichever is greater over 8 hrs	± 2 % of reading over 8 hrs
Warm up time	45 minutes	45 minutes	45 minutes
Response time	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds	T90 ≤ 3 seconds
Flow rate	2 LPM	2 LPM	2 LPM
Data rate	0,83 Hz	0,83 Hz	0,83 Hz
Operating temperature	5 to 50 °C	5 to 50 °C	5 to 50 °C

Tabel 4: Specificatie van de Niet-Dispersieve Ultraviolet Meetbank (NDUV)

	NO	NO ₂
Range of Measurement	0 to 5.000 ppm	0 to 500 ppm
Accuracy	± 3 % of reading or 15 ppm whichever is greater	± 3 % of reading or 10 ppm whichever is greater
Resolution	1 ppm	1 ppm
Linearity	± 1 % of reading or 5 ppm whichever is greater	± 1 % of reading or 5 ppm whichever is greater
Repeatability	± 1 % of reading or 5 ppm whichever is greater	± 1 % of reading or 5 ppm whichever is greater
Noise	± 2 ppm	± 2 ppm
Span drift	± 1 % of reading or 20 ppm whichever is greater over 8 hrs	± 10 ppm over 8 hrs
Warm up time	45 minutes	45 minutes
Response time	T90 ≤ 2 seconds	T90 ≤ 2 seconds
Flow rate	3 LPM	3 LPM
Data rate	Up to 2 Hz, configurable	Up to 2 Hz, configurable
Operating temperature	5 to 50 °C	5 to 50 °C

Tabel 5: Specificatie van de elektrochemische O₂-analyser

	O ₂
Range of Measurement	0 to 25 %
Accuracy	± 2 % of reading or ± % oxygen whichever is greater
Resolution	0,1 %
Linearity	± 0,5 % of reading or ± 0,5 % whichever is greater
Repeatability	± 0,25 % of reading or ± 0,3 % Oxygen whichever is greater
Noise	± 0,1 % Oxygen
Span drift	± 1 % of reading or ± 0,5 % Oxygen whichever is greater
Warm up time	5 minutes
Response time	T90 ≤ 6 seconds
Flow rate	0,5 to 3 LPM
Data rate	Up to 2 Hz, configurable
Operating temperature	5 to 50 °C

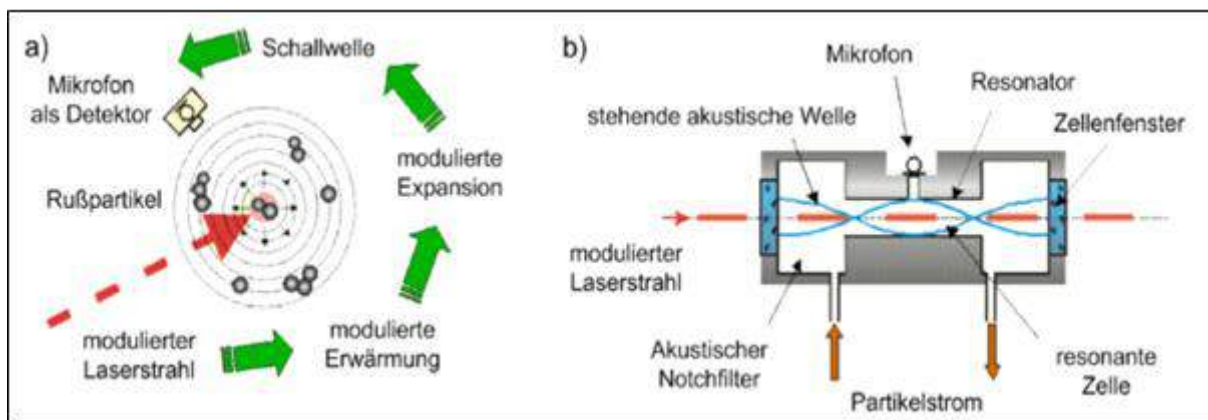
5.2 Technologie voor deeltjes- en roetmeting

5.2.1 Meettechniek voor het bepalen van de roetconcentratie

Om de deeltjesuitstoot (elementaire koolstof) stroomopwaarts en stroomafwaarts van de AGN te meten werd een microroetsensor van AVL 483 gebruikt. Figuur 6 toont het PAAS-systeem. Het meetprincipe is gebaseerd op foto-akoestische spectroscopie. Het monstergas wordt bestraald met gemoduleerd laserlicht. Hierdoor worden de zwarte, sterk absorberende deeltjes periodiek verhit en weer afgekoeld. De resulterende uitzettingen en inkrimpingen van het draaggas veroorzaken cyclische gastrillingen die met een gevoelige microfoon worden gedetecteerd. Deeltjesvrije lucht produceert geen signaal. Bij roetbelaste lucht is het signaal evenredig met de roetconcentratie in het monstergas. Omdat de sensor gevoelig is voor koolstof, wordt alleen het elementaire koolstof gedetecteerd, maar niet het geheel van de deeltjesemissies. De meetresultaten zijn niet direct vergelijkbaar met de waarden van de gravimetrische metingen. Figuur 7 toont het functionele principe van de foto-akoestische spectroscopie (a) en de constructie van een foto-akoestische cel (b). Tabel 6 geeft de specificaties van het meetinstrument weer.



Figuur 8: Microroetdetector Type 483 [Bron: AVL]



Figuur 9: Functie en structuur van een foto-akoestische meetcel

Tabel 6: Specificaties van de Micro Roet Sensor AVL 483. Deel 1

Measuring Device	
Measuring unit:	Soot concentration (mg/m^3 , $\mu\text{g}/\text{m}^3$) in diluted exhaust
Measuring range:	0 – 50 mg/m^3
Display resolution:	0,001 mg/m^3
Limit of detection:	~5 mg/m^3
Adjustment ratio:	1 : 5.000
Data transfer frequency:	Digital: 10 Hz
	Analog: 100 Hz
Rise time:	≤ 1 second
Operating temperature:	5°C up to 43°C
Flow rate probe/bypass:	~ 2 +2 l/min
Communication port:	RS232, Digital I/O, Analog I/O, Ethernet
Class of laser:	Laser class 1

Tabel 6: Specificaties van de Micro Roet Sensor AVL 483. Deel 2

Conditioning device	
Dilution rate (DR):	Adjustable 2 -10 and 10 - 20
	The real dilution ratio will be delivered with the below mentioned accuracy
Data transfer frequency:	Digital: max. 5 Hz
	Analog: 50 Hz
Accuracy (DR display):	Max. \pm 3% in the range of DR [2...10]
	Max. \pm 10% in the range of DR [10...20]
Power supply:	90 to 240V, 50/60 Hz, 500 VA
Pressure air:	Pressure of inlet $1 \pm 0,2$ bar relative
Flow rate:	> 4 l/min
Exhaust temperature:	Up to 1.000 °C
Exhaust back pressure:	Up to 2.000 mbar
Pulsation of pressure:	\pm 1000 mbar, but max. 50% of exhaust back pressure
Blow by volume flow:	Dependent on pressure, ~ 20 l/min at 1.000 mbar
Dimension:	Measuring device: W x H x D: ~ 19"x 5 Rack units x 530 mm
	Conditioning device: W x H x D: ~ 19"x 5 Rack units x 530 mm
Weight of device:	Measuring device: ~ 20 kg
	Conditioning device: ~ 12 kg

5.2.2 Meettechniek voor Gravimetrische Deeltjesmeting

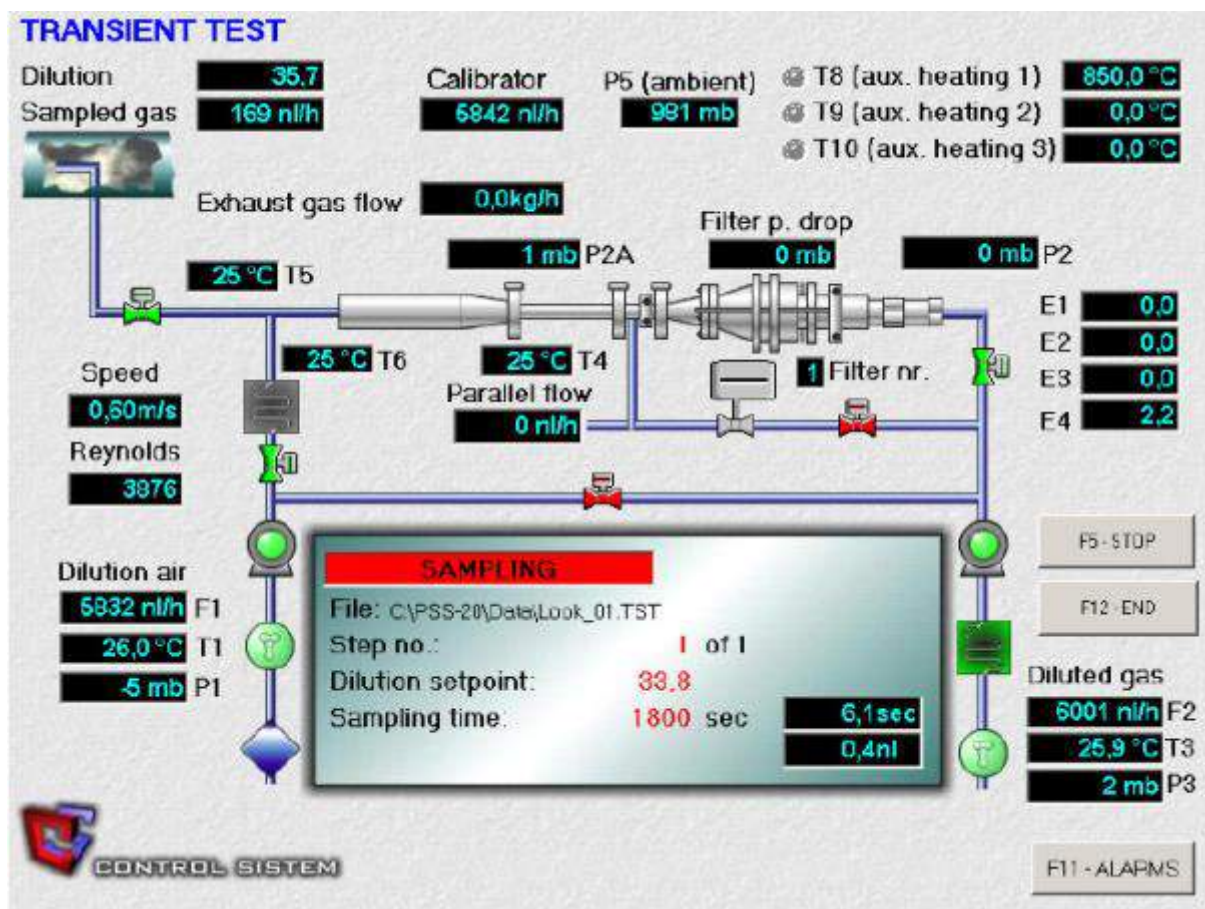
Gravimetrie is de wettelijke norm voor de bepaling van de deeltjesuitstoot van dieselmotoren. De uitgestoten deeltjesmassa wordt tijdens een bepaalde testcyclus of testfase op een filterpapier afgezet en bepaald. Deze meetmethode werd gebruikt in de op- en neerwaartse richting van de AGN.

Het deeltjesbemonsteringssysteem Micro PSS (figuur 8) zuigt een deel van de uitlaatgasmassastroom van de motor af en verdunt deze met gefilterde omgevingslucht. Het verdunde uitlaatgas stroomt door het opvangfilter (Pallflex Enfag 47mm) waar de met behulp van gravimetrie te bepalen deeltjes worden tegengehouden. Vervolgens vindt de massabepaling plaats via een differentiaalbeplating tussen het eerder geconditioneerde en lege gewogen filterpapier en na de lading weer geconditioneerd en gebalanceerd filterpapier.

De Micro PSS-20 is een partiële-stroomverduunningssysteem met totale bemonstering. Dit betekent dat het systeem slechts een deel van het uitlaatgas verdunt en vervolgens al het verdunde gas door het opvangfilter voert. Het doel van de verdunning is een verlaging van de uitlaatgastemperatuur, zodat het uitlaatgas zonder condensatie-effecten door het filter kan worden geleid. Figuur 9 toont een afbeelding van de gebruikersinterface (software).



Figuur 10: Deeltjesmeetsysteem voor gravimetrische bepaling



Figuur 11: Illustratie van de gastroom in de Micro PSS

5.3 Meettechnologie voor gasvormige emissies stroomafwaarts AGN

Technology for Gaseous Emissions downstream AGN

Voor het meten van de gasvormige emissies stroomafwaarts AGN werd het systeem EcoStar gebruikt, dat ook afkomstig is van het bedrijf "Sensors". Het gebruikt dezelfde analytische principes als de "SEMTECH-DS". Figuur 10 toont het meetsysteem en tabel 7 geeft informatie over de technische specificaties. Tabel 8 toont de technische specificaties van de verschillende maten van de flowmeter. Er is gebruik gemaakt van de gele deponeerde 5"-buis.



Figuur 12: Meetsysteemsensoren EcoStar met Flowmeter

Tabel 7: Specificaties van de sensoren EcoStar, Deel 1

ANALYTICAL SPECIFICATIONS		
Parameter	CO	CO ₂
Max Range (Full Scale)	8% vol.	18% vol.
Min. Span to meet Requirements	0.5%	6%
Resolution	10 ppm	0.01 % vol. CO ₂
Linearity	$ x_{min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 0.5\% \text{ of span}$ Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) $\leq 1\% \text{ of span}$ Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.998$	
Accuracy	$\leq \pm 2\% \text{ of reading or } \leq \pm 0.3\% \text{ of full scale, whichever is larger}$ As low as $\pm 50 \text{ ppm}$ As low as $\pm 0.1\% \text{ vol. CO}_2$	
Precision	$\leq 1\% \text{ of span}$	
Repeatability	$\leq 2\% \text{ of point or } \leq \pm 1\% \text{ of span, whichever is greater}$	
Noise	$\leq 2\% \text{ of span}$	
Zero Drift (Over 1 hour)	$\leq \pm 50 \text{ ppm}$	$\leq \pm 0.1\% \text{ vol.}$
Span Drift (over 8 hrs)	$\leq \pm 2\% \text{ of span value or}$ $\leq \pm 20 \text{ ppm, whichever is greater}$	$\leq \pm 2\% \text{ of span value or}$ $\leq \pm 0.1\% \text{ vol., whichever is greater}$

Tabel 7: Specificaties van de sensoren EcoStar, Deel 2

NOx ANALYTICAL SPECIFICATIONS		
Parameter	NO	NO ₂
Max Range (Full Scale)	0 to 3000 ppm	0 to 1000 ppm
Min. span to meet requirements	300 ppm	300 ppm
Resolution	0.1 ppm	0.1 ppm
Linearity	$ x_{min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 0.5\%$ of span Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) $\leq 1\%$ of span Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.998$	
Accuracy	$\leq \pm 2\%$ of reading or $\leq \pm 0.3\%$ of full scale, whichever is larger	
Repeatability	$\leq 2\%$ of point or $\leq \pm 1\%$ of span, whichever is greater	
Precision	$\leq 1\%$ span	
Noise	$\leq 2\%$ of span	
Zero Drift	≤ 4 ppm / hour with $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$ and using purified N ₂ as zero gas	
Span Drift	$\leq \pm 2\%$ of span value with $\Delta t \leq 10^\circ\text{C}$	
Rise Time (T ₁₀₋₉₀)	≤ 2.5 seconds	
System Response Time (T ₀₋₉₀)	≤ 10 sec with rise time ≤ 2.5 seconds	
Data Rate	5 Hz	
Sample Flow rate	1.5 l/min	

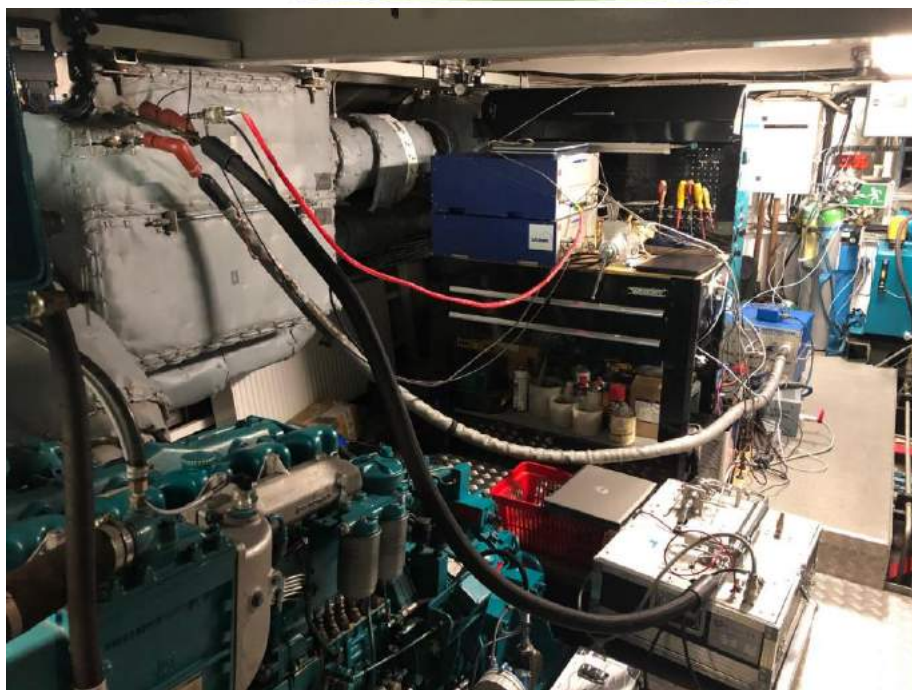
Tabel 7: Specificaties van de sensoren EcoStar, Deel 3

Gas	THC
Measuring ranges	freely adjustable
Smallest measurement range	0 - 90 ppm C ₁
Largest measurement range	0 - 30,000 ppm C ₁
Accuracy	± 1% of reading, or ±0.3% F.S. (± 1% F.S. for lowest measurement range)
Linearity	Intercept ≤ 0.5% of range (1% for lowest range) 0.990 ≤ Slope ≤ 1.010 SEE ≤ 1.0% of range R ² ≥ 0.998
Repeatability	± 1% of reading
Zero Drift	± 1% F.S. in 24 hr
Analyzer Response Time	T ₉₀ < 2.5 second
System Response Time	T ₉₀ < 3.5 second
Gas Requirements	
Fuel	He/H ₂
Fuel consumption	150 ml/min
Span Gas	C ₃ H ₈
Span Gas Consumption	500 ml/min
Zero Gas	N ₂ or air
Zero Gas Consumption	500 ml/min

Tabel 8: Specificaties van de Flowmeter

HTF MODULE SPECIFICATIONS									
Exhaust temperature range		-5 to 700°C							
Exhaust temperature accuracy		± 1% of reading or ± 2°C, whichever is greater							
Flow measurement linearity		$ x_{min} \times (a_1 - 1) + a_0 \leq 1\% \text{ of max}$ Slope a_1 between 0.99 and 1.01 Standard Error of Estimates (SEE) ≤ 1% of max. Coefficient of Determination $r^2 \geq 0.990$							
Flow measurement accuracy		± 2% of reading or ± 0.5% of full scale, whichever is greater							
Warm up time		≤ 5 minutes at 20°C ambient							
System response time _(T0 – T90)		≤ 2.5 seconds; synchronized to match rise time of gaseous analyzers							
Data acquisition rate		5 Hz							
Resolution		0.1 kg/hr							
Power requirements		12 VDC							
Communications		RS 232							
Control module dimensions W x D x H		36 x 18 x 10 cm 14.2 x 7.0 x 4.0 in							
Control module weight		4kg (9 lbs)							
Box dimensions W x D x H		38.4 x 14.5 x 8.4 1 cm 15.1 x 5.3 x 3.3 Inches							
Flow tube dimensions	OD X L (mm)	25 x 521	38 x 521	51 x 521	64 x 648	76 x 648	102 x 648	127 x 762	152 x 914
	OD X L (in)	1.0 x 20.5	1.5 x 20.5	2.0 x 20.5	2.5 x 25.5	3.0 x 25.5	4.0 x 25.5	5.0 x 30	6.0 x 36
Flow tube weight	Kg (lbs)	4.4 (9.6)	5.7 (12.6)	8.0 (17.6)	8.4 (18.6)	8.9 (19.6)	10.3 (22.6)	11.6 (25.6)	13.0 (28.6)

FLOW RATES				
Temp	100°C		400°C	
Nominal Tube Diameter (in.)	Min Flow (kg/hr)	Max Flow (kg/hr)	Min Flow (kg/hr)	Max Flow (kg/hr)
1	6.9	85.0	10.4	64.0
1.5	10.9	276.0	16.4	208.0
2	15.8	535.0	23.9	402.0
2.5	18.9	890.0	28.4	670.0
3	22.5	1250.0	34.0	930.0
4	30.7	2080.0	46.3	1550.0
5	38.6	3115.0	58.2	2345.0
6	46.2	4005.0	69.6	3015.0



Figuur 13: Opstelling voor meting stroomopwaarts AGN (gasvormig en deeltjes / roet)



Figuur 14: Opstelling van het systeem voor de meting stroomafwaarts AGN "End of Pipe" (gasvormige, deeltjes- / roet- en uitlaatgasmassastroom)

5.4 Verdere meettechniek

5.4.1 Temperatuurmeting

Voor de temperatuurmeting werden slechts 3 mm ingeschroefde thermokoppels NiCr-Ni van het type K gebruikt. Het meetbereik is door de fabrikant van het thermokoppel gespecificeerd van -90°C tot + 1.370°C. Verschillende sensorlengtes kunnen worden gebruikt om de noodzakelijke positionering in de uitlaatgasstroom te realiseren.

5.4.2 Meting van de milieugegevens

Om de correctiefactoren te bepalen die nodig zijn voor de berekening van de uitlaatgassen moeten de atmosferische milieugegevens worden bepaald. Temperatuur en barometerdruk alsmede de relatieve luchtvochtigheid worden door geschikte sensoren gedetecteerd. De opstelling van het meetpunt ligt zo dicht mogelijk bij de inlaat van de verbrandingslucht van de motor. Een in de handel verkrijgbare gecombineerde sensor wordt gebruikt om de luchttemperatuur en de relatieve vochtigheid te meten en de signalen worden via de analoge ingangen in de SEMTECH-DS ingelezen.

6. Resultaten

6.1 Algemeen

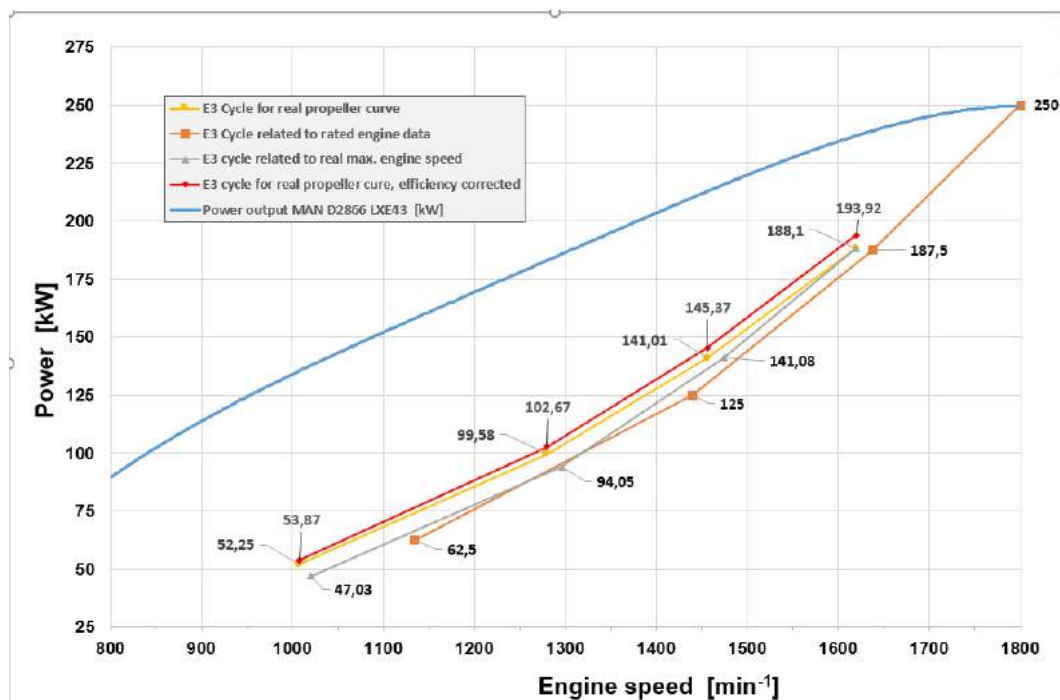
De metingen van de emissiegegevens voor de stuurboordmotor van de "Max Prüss" werden uitgevoerd op 22 en 23 november 2018. Vanwege de laagwatersituatie op de Rijn begon de proefrit in de Meidericher sluis van de haven van Duisburg. De eerste metingen in de E3-cyclus met deeltjes- en roetbepaling werden uitgevoerd op 22 november. De sensoren bevonden zich stroomopwaarts van de uitlaatgasnabehandeling. Op 23 november volgde een tweede meetcampagne waarbij de deeltjes- en roetbepaling in de uitlaat werd geplaatst. Voor delen van de metingen is een ritje stroomopwaarts op de Rijn absoluut noodzakelijk, omdat de hoogste snelheidspunten bij een afdaling stroomafwaarts tot te hoge snelheden zouden leiden. Een onderzoek in het binnenkanaalnetwerk is om soortgelijke redenen niet toegestaan. De hoogste meetsnelheden zouden de toegestane snelheidslimieten overschrijden.

Voor de gasvormige emissies werden de meetgegevens stroomopwaarts en stroomafwaarts van het AGN over een langere periode tegelijkertijd geregistreerd. Voor de evaluatie werden de gemiddelde waarden van de laatste minuut van de metingen gebruikt. Voor de deeltjesmeting werden per meetpunt twee monsters getrokken voor elke meetsituatie (stroomopwaarts of stroomafwaarts AGN).

6.2 Vermogensbepaling

Voor de prestatiegerelateerde evaluatie van de meetresultaten moet het vermogen van de motor worden bepaald. De bepaling van het vermogen vindt plaats, zoals beschreven in hoofdstuk 4.3, op de bekende gegevens van de schepsschroef. Figuur 13 toont de verschillende prestatiecurven. De bovenste blauwe curve geeft de volledige belastingskromme van de motor weer. Uit de prestatiegegevens resulteert een setpointcurve voor een E3-test volgens ISO 8178, zoals weergegeven door de vierkante markeringsymbolen. De regelaarinstellingen van de stuurboordmotor staan slechts een maximumsnelheid van 1.620 min⁻¹ toe, dus dit punt moet worden beschouwd als het maximumtoerental en het belastingspunt in een echte meting.

Als je het vermogen voor dit punt bepaalt met de bekende propellergegevens en vervolgens de meetpunten voor een E3-test volgens ISO 8178 bepaalt, resulteert dit in de grijze curve die met de driehoeken is gemarkeerd. De curve, weergegeven door de cirkelvormige markeringsymbolen, geeft de werkelijke vaarsnelheden weer met de vermogens die zijn bepaald op basis van de werkelijke schroefcurve. De vermogensniveaus, die tot op dit punt zijn bepaald, geven het benodigde vermogen aan de schroef weer. Aangezien de versnellingsbak tussen de schroefas en de motor is gemonteerd, moet het rendement van de transmissie worden geschat om het effectieve motorvermogen bij benadering te kunnen bepalen. Deze wordt verondersteld 97% te zijn en wordt dan gebruikt voor de berekening van het motorvermogen.



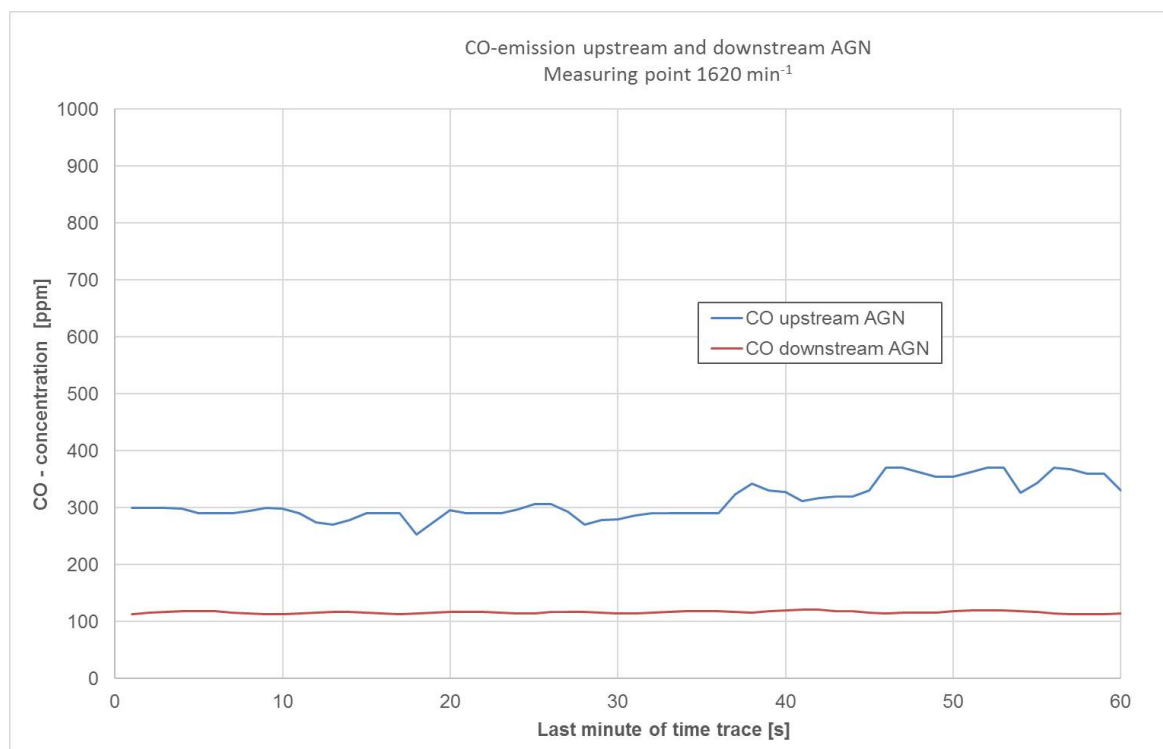
Figuur 15: Prestatiecurves, motortoerental

6.3 Overweging van de individuele meting

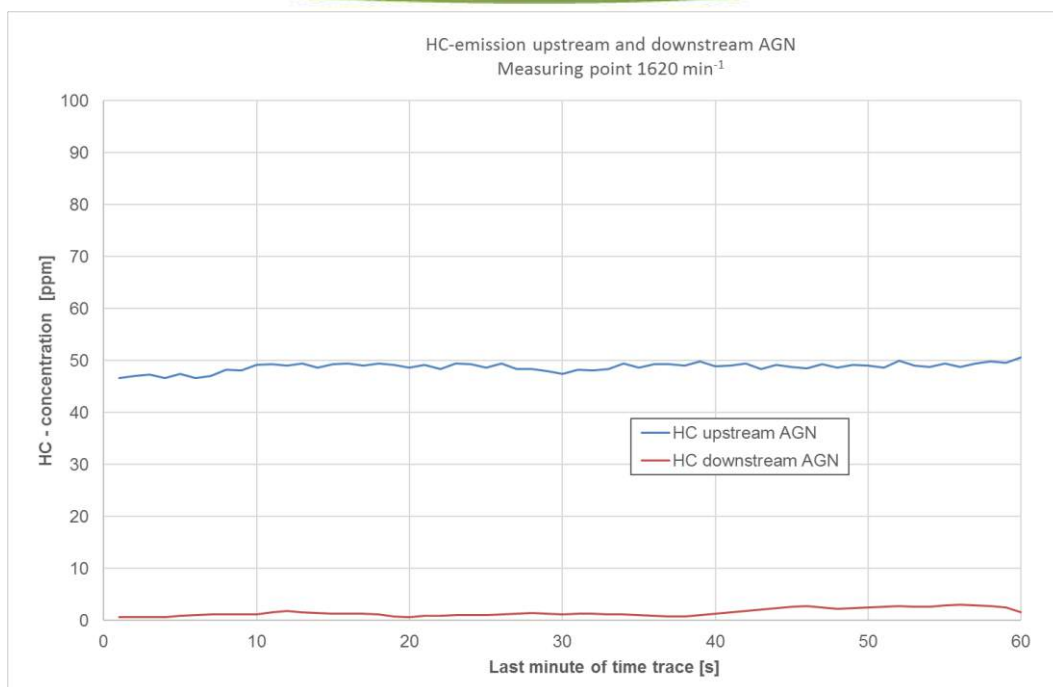
De evaluatie van de resultaten gebeurt in verschillende stappen. Eerst worden de resultaten van de afzonderlijke fasen geëvalueerd. Hiervoor wordt aan het einde van elke snelheidsstap het quasi-stationaire deel uitgefilterd, gemiddeld en weergegeven. Deze waarden worden gebruikt om het gewogen totaalresultaat te berekenen volgens de evaluatiecriteria van de ISO. Voor de deeltjesmetingen worden de gemiddelde waarden van de herhaalde metingen per meetpunt en meetsituatie (stroomopwaarts of stroomafwaarts AGN) gebruikt om het totale resultaat te bepalen.

6.3.1 Concentratiesporen van de gasvormige emissies van de afzonderlijke meetpunten

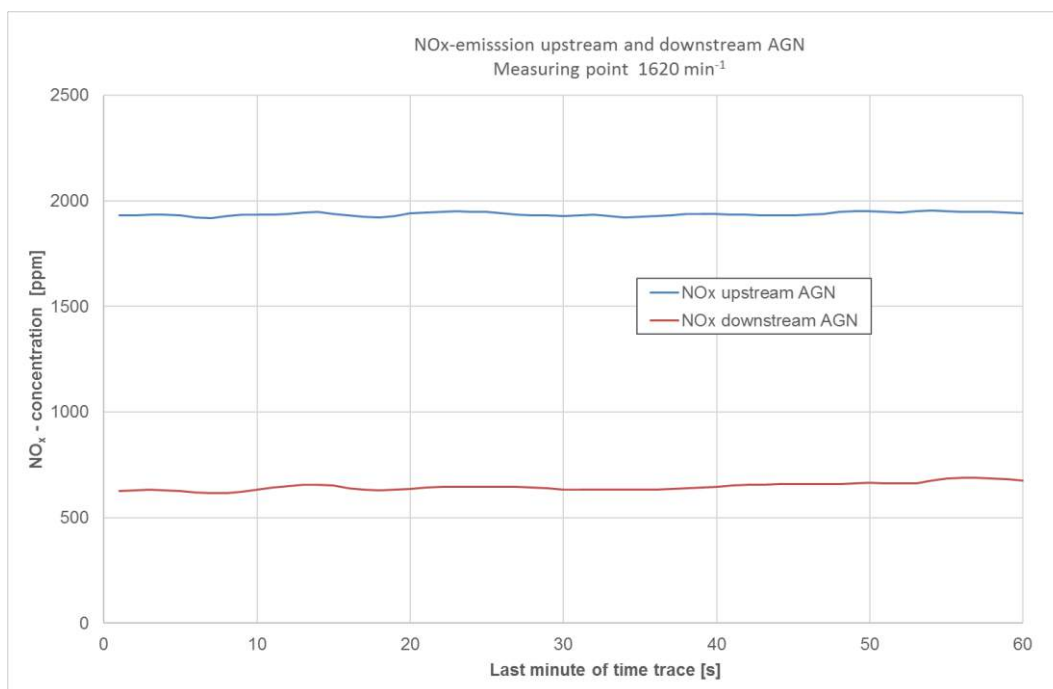
6.3.1.1 Meetpunt 1.620 min^{-1}



Figuur 16: CO-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

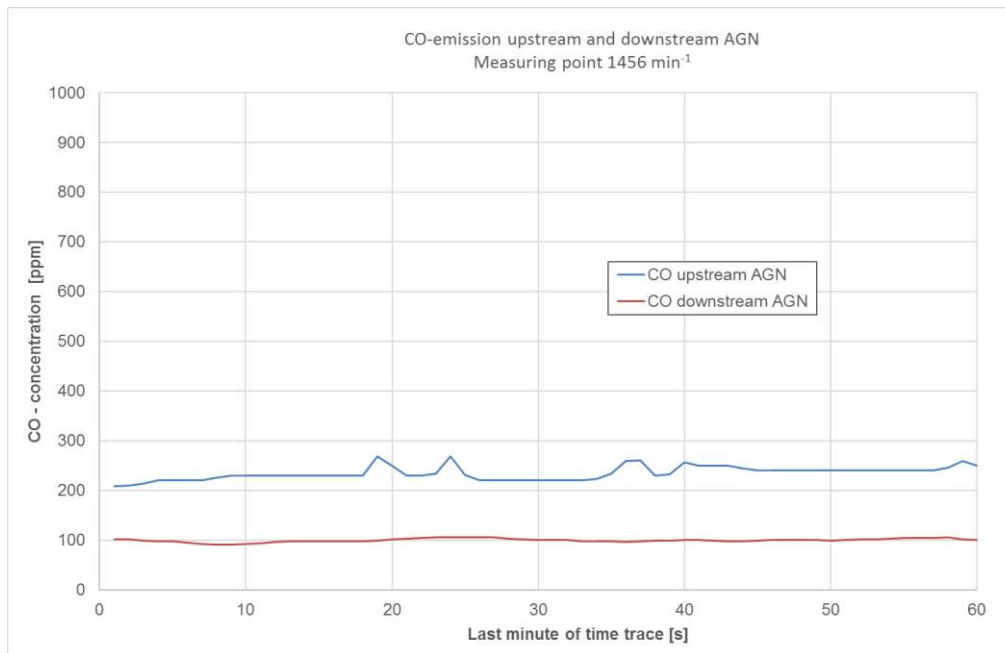


Figuur 17: HC-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

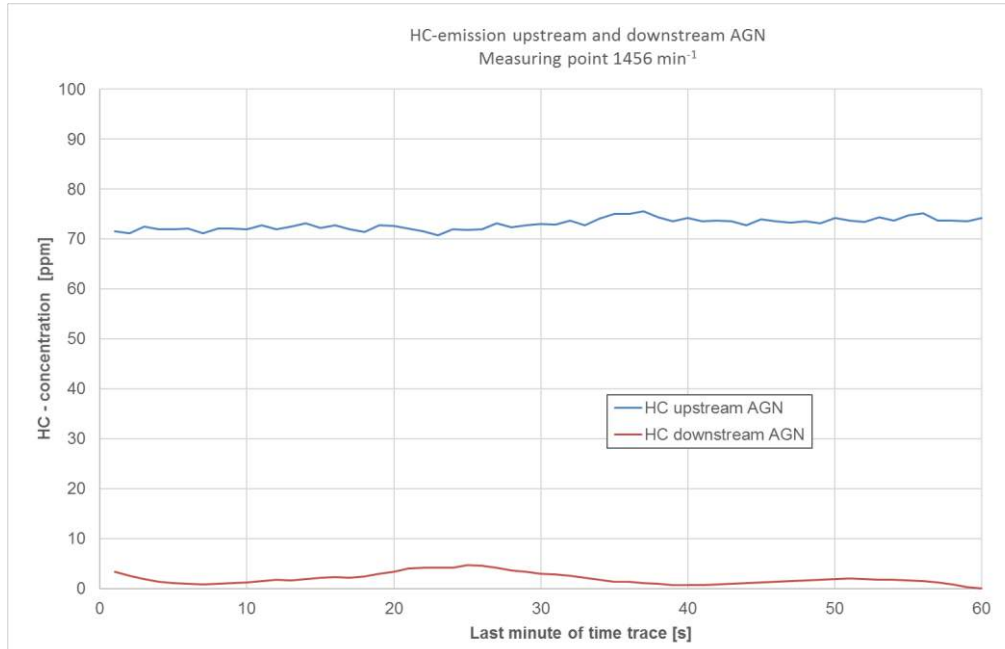


Figuur 18: NO_x-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

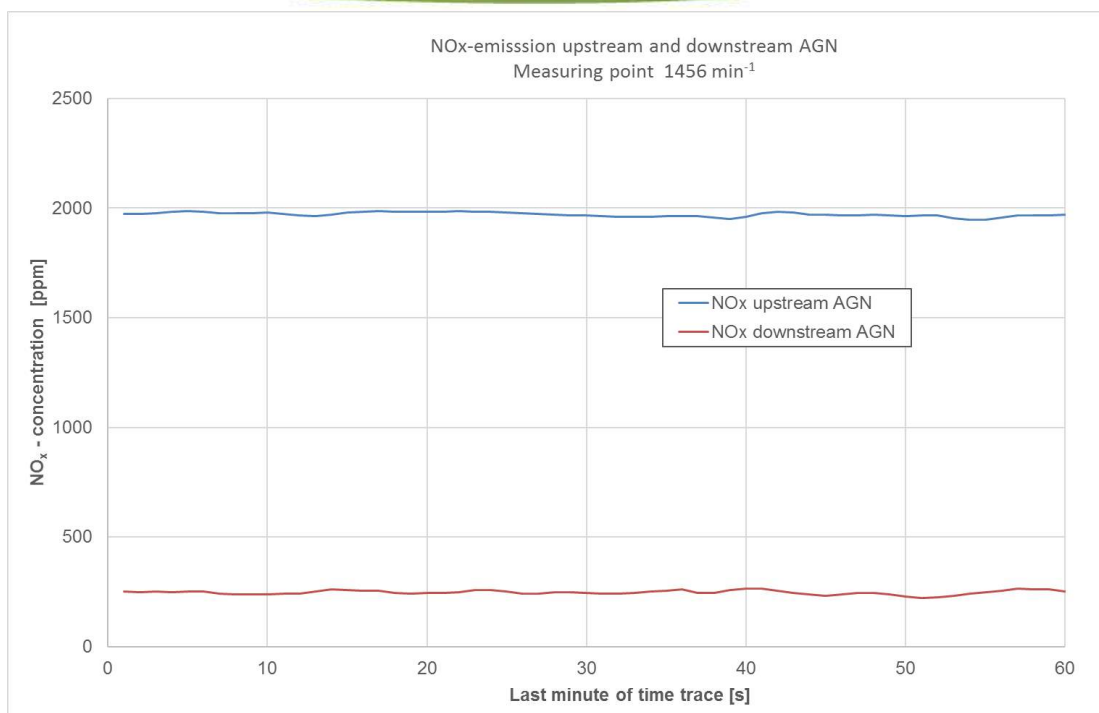
6.2.1.2 Meetpunt 1.456 min⁻¹



Figuur 19: CO-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

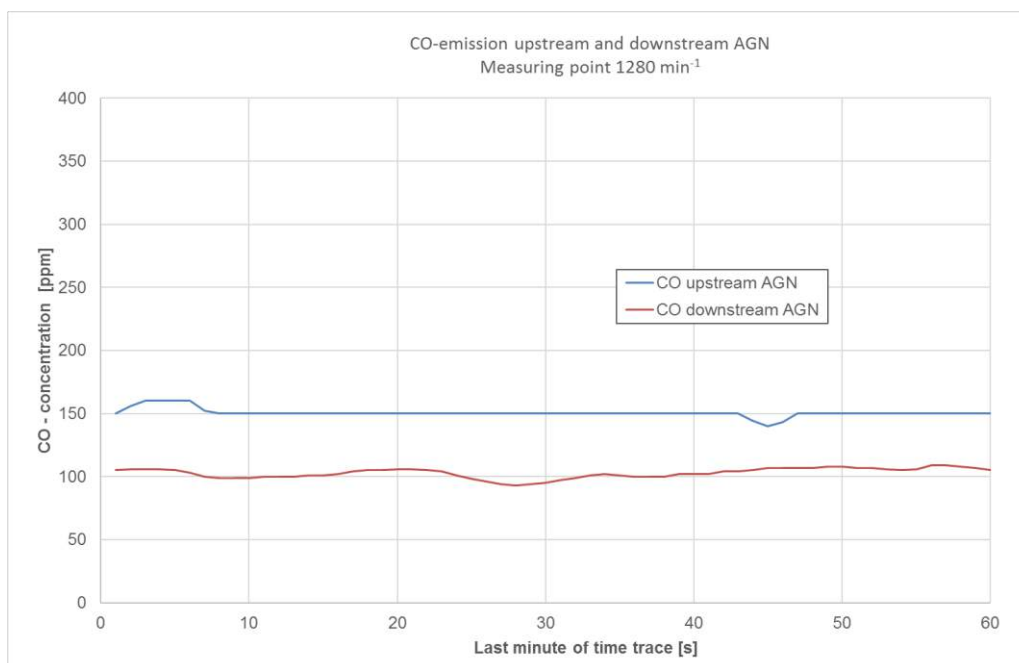


Figuur 20: HC-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

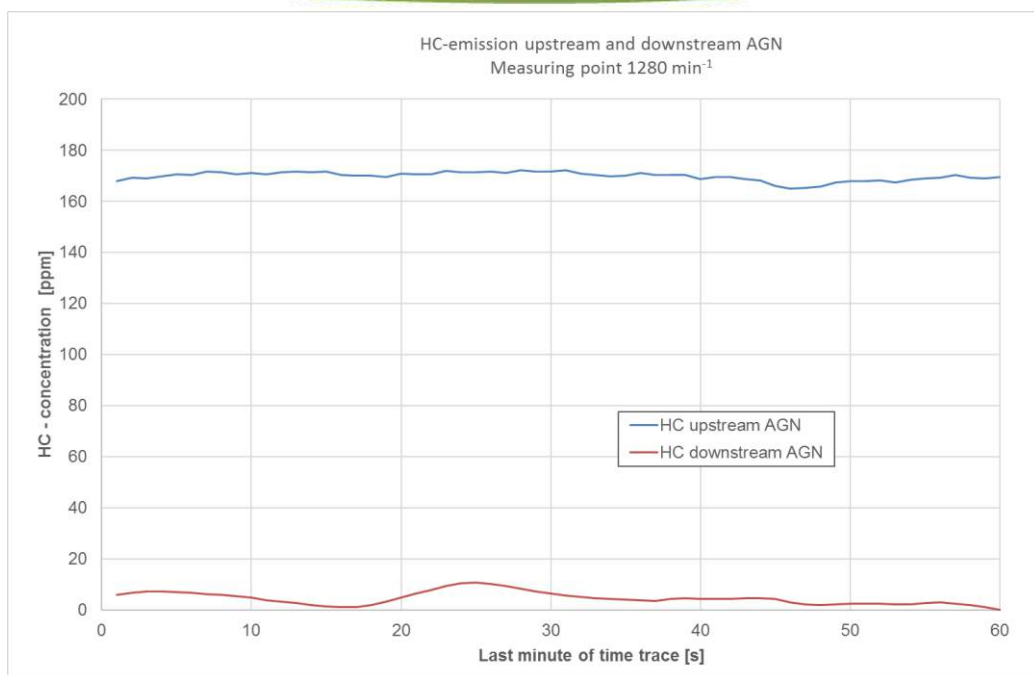


Figuur 21: NO_x-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

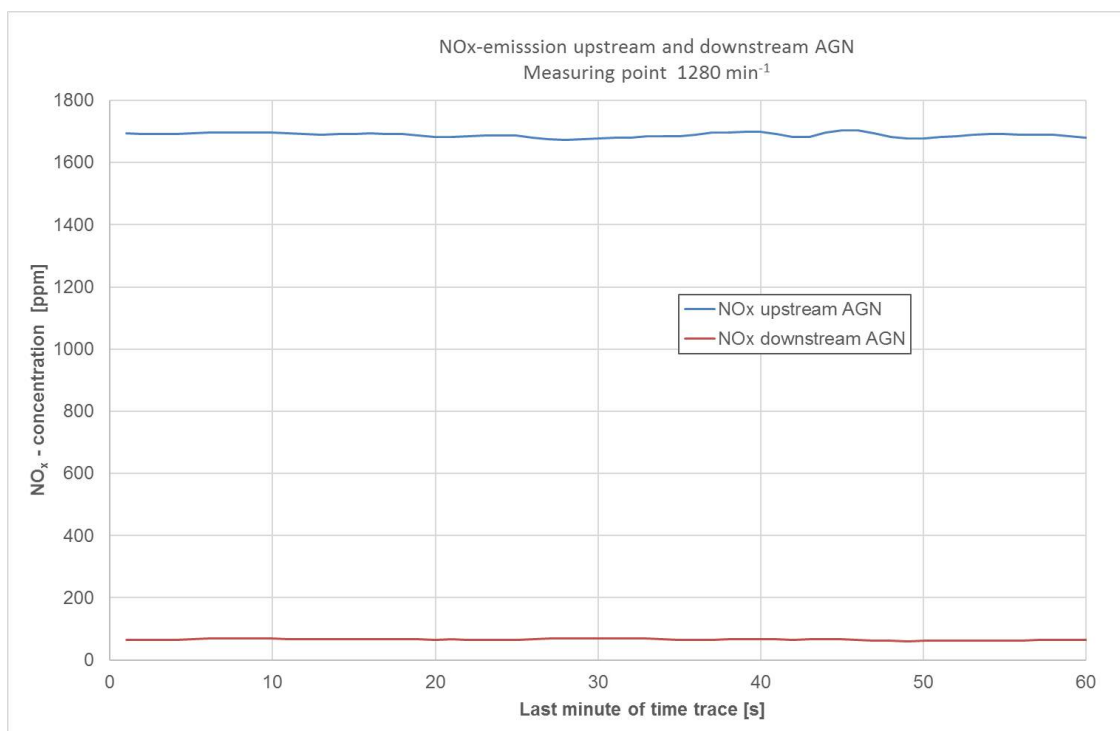
6.3.1.2 Meetpunt 1.280 min⁻¹



Figuur 22: CO-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

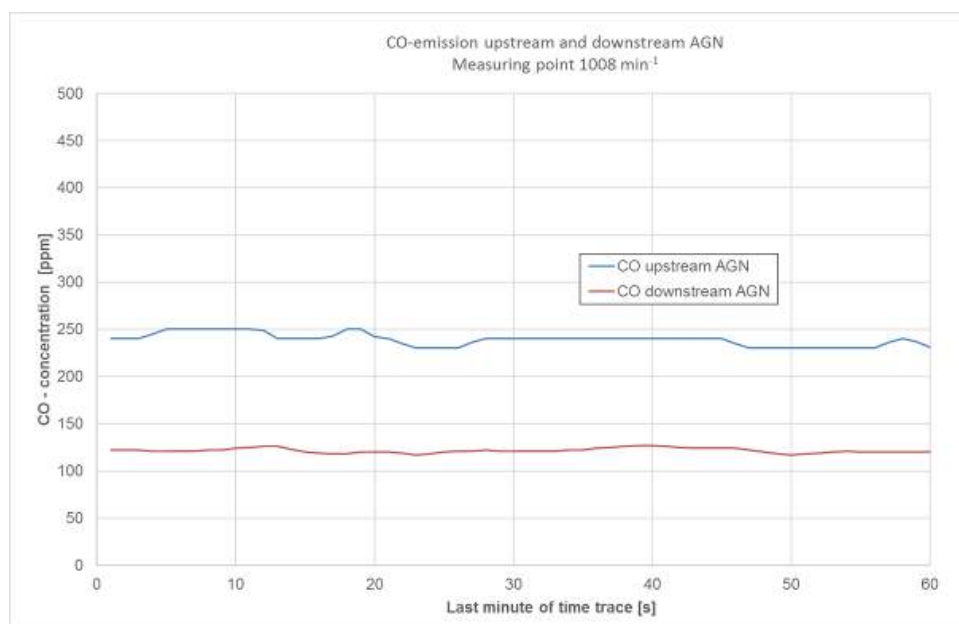


Figuur 23: HC-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

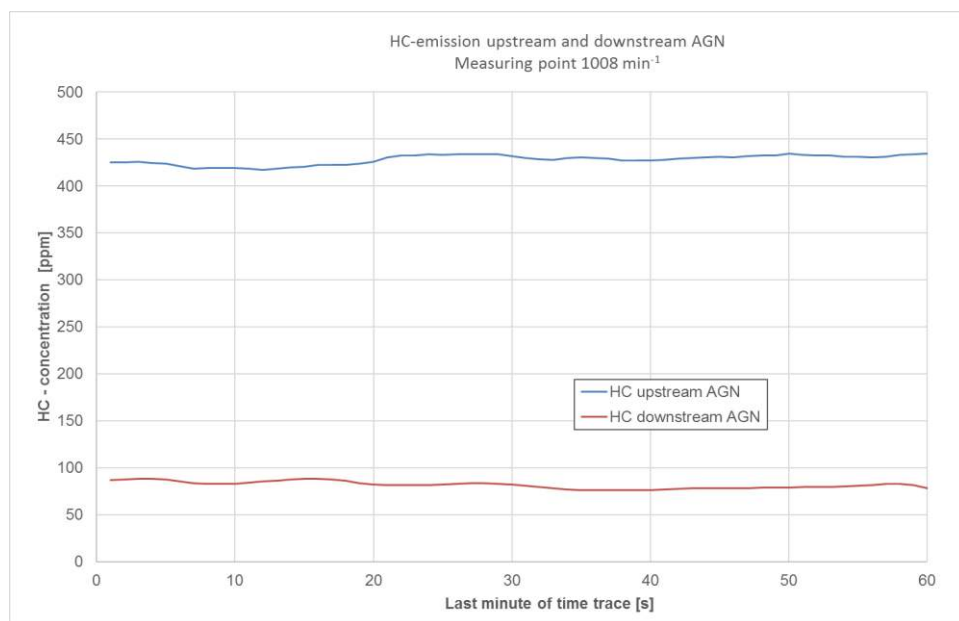


Figuur 24: NO_x-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

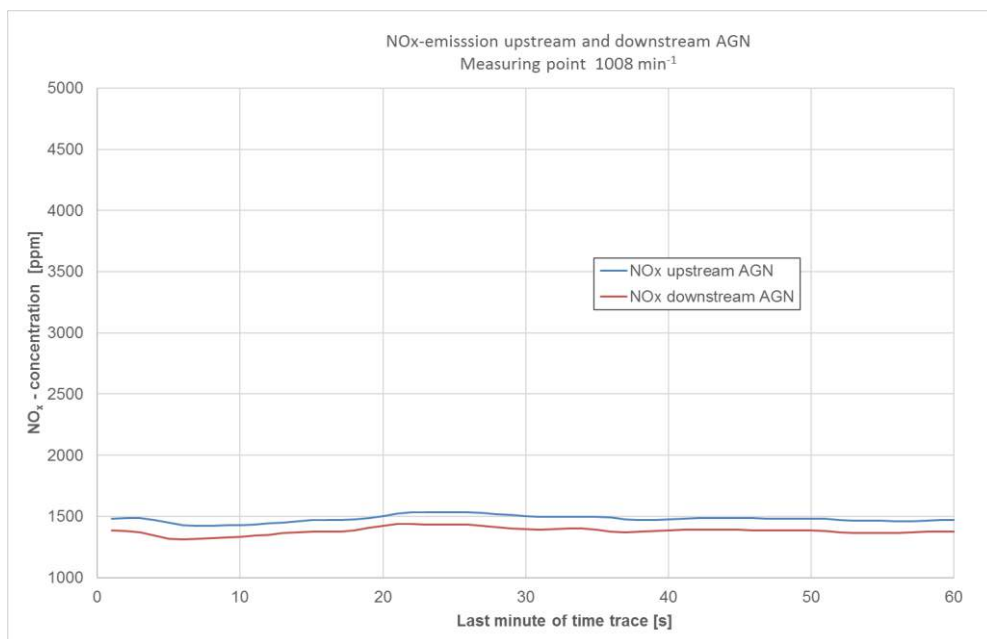
6.3.1.3 Meetpunt 1.008 min⁻¹



Figuur 25: CO-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN



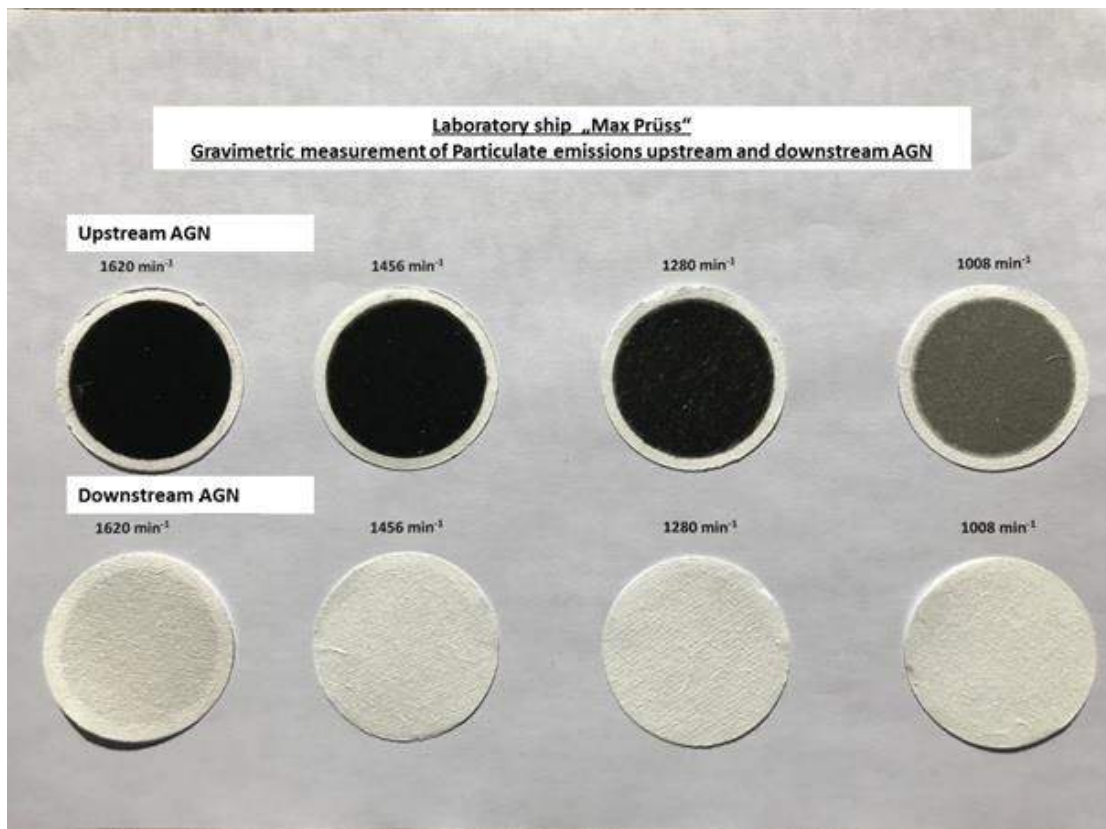
Figuur 26: HC-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN



Figuur 27: NO_x-concentratiespoor stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN

6.3.2 Deeltjesemissies

Voor de gravimetrische bepaling van de deeltjesemissie zijn op elk meetpunt vóór en na de montage van de uitlaatgassen twee monsters genomen met behulp van de in punt 5.2.2 beschreven meettechniek. Figuur 26 toont een voorbeeld in de testbelaste filterplaten.



Figuur 28: Deeltjesmonster filter up/downstream AGN

Tabel 9 en tabel 10 tonen de gemiddelden van de twee metingen per meetpunt stroomopwaarts en stroomafwaarts AGN.

Tabel 9: Resultaten van de deeltjesmeting stroomopwaarts AGN

Setpoint	Engine speed	Power output	Filter loading	G_{edf} *)	Particulate mass flow	spec. Particulate emission
	min ⁻¹	kW	mg	kg/h	g/h	g/kWh
1	1.620	193,9	1,0342	3.807,15	33,86	0,1746
2	1.456	145,4	0,6760	2.863,64	14,98	0,1030
3	1.280	102,7	0,6628	2.232,54	9,16	0,0892
4	1.008	53,9	0,7648	1.646,75	6,49	0,1206

*) equivalent diluted exhaust mass flow

Tabel 10: Resultaten van de deeltjesmeting stroomafwaarts AGN

Setpoint	Engine speed	Power output	Filter loading	G_{edf} *)	Particulate mass flow	spec. Particulate emission
	min ⁻¹	kW	mg	kg/h	g/h	g/kWh
1	1.620	193,9	0,3825	3.807,15	7,51	0,0387
2	1.456	145,4	0,0692	2.863,64	0,82	0,0056
3	1.280	102,7	0,0515	2.232,54	0,39	0,0038
4	1.008	53,9	0,0449	1.646,75	0,22	0,0040

*) equivalent diluted exhaust mass flow

6.3.3 Roetemissies

Voor de bepaling van de roetuitstoot is de in 5.2.1 beschreven meetmethode gebruikt. In tabel 11 en tabel 12 zijn de resultaten voor en na de montage van de uitlaatgassen weergegeven.

Tabel 11: Resultaten van de roetmeting vóór AGN

Setpoint	Engine speed	Power output	Soot concentration	G_{exh}^*	Soot mass flow	spec. Soot emission
	min ⁻¹	kW	mg/kg	kg/h	g/h	g/kWh
1	1.620	193,9	24,3033	951,79	23,1317	0,1193
2	1.456	145,4	14,6337	715,91	10,4764	0,0721
3	1.280	102,7	10,3337	558,14	5,7676	0,0562
4	1.008	53,9	1,9366	411,69	0,7973	0,0148

*) Exhaust mass flow

Tabel 12: Resultaten van de roetmeting stroomafwaarts AGN

Setpoint	Engine speed	Power output	Soot concentration	G_{exh}^*	Soot mass flow	spec. Soot emission
	min ⁻¹	kW	mg/kg	kg/h	g/h	g/kWh
1	1.620	193,9	0,0581	951,79	0,0553	0,0002853
2	1.456	145,4	0,0268	715,91	0,0192	0,0001320
3	1.280	102,7	0,0309	558,14	0,0172	0,0001679
4	1.008	53,9	0,0445	411,69	0,0183	0,0003403

*) Exhaust mass flow

6.3.4 Verminderingspercentages in de afzonderlijke meetpunten

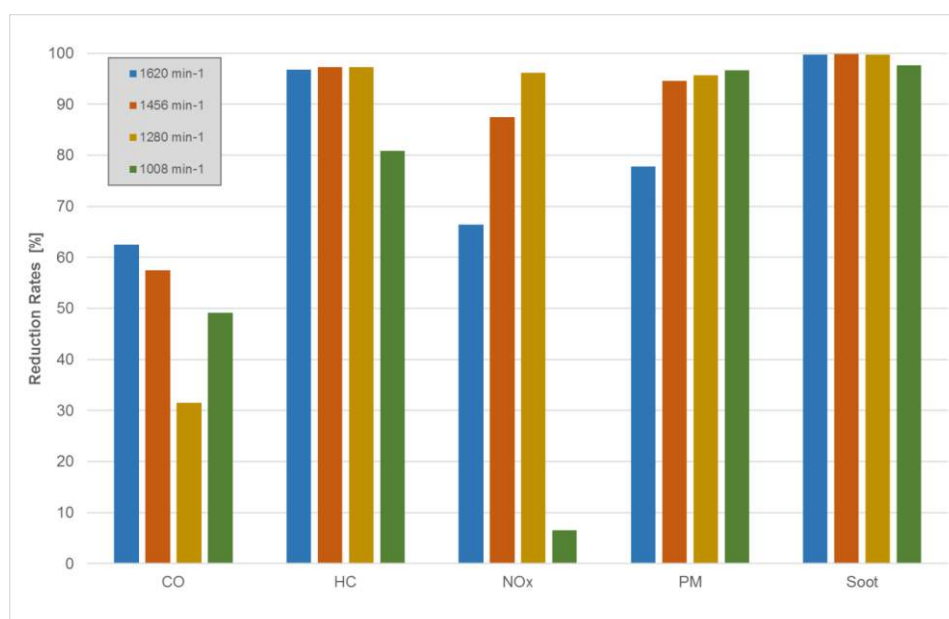
Voor de gegevens in 6.3.1 tot en met 6.3.3 worden de in tabel 13 weergegeven verminderingpercentages voor de afzonderlijke componenten verkregen. Figuur 27 toont de reductiepercentages in een grafiek.

Tabel 13: Reductiepercentages in de afzonderlijke meetpunten, Deel 1

CO	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	260,00	97,57	62,5
2	1.456	145,4	148,60	63,28	57,4
3	1.280	102,7	75,79	51,86	31,6
4	1.008	53,9	90,33	45,97	49,1
HC	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	66,70	2,15	96,8
2	1.456	145,4	75,11	2,01	97,3
3	1.280	102,7	136,22	3,64	97,3
4	1.008	53,9	253,19	48,29	80,9
NO _x	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	2.385,96	800,74	66,4
2	1.456	145,4	1.846,63	231,84	87,5
3	1.280	102,7	1.258,97	48,88	96,1
4	1.008	53,9	824,22	770,07	6,6

Tabel 13: Verminderingspercentages in de afzonderlijke meetpunten, Deel 2

PM	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	33,86	7,51	77,8
2	1.456	145,4	14,98	0,82	94,6
3	1.280	102,7	9,16	0,39	95,7
4	1.008	53,9	6,49	0,22	96,7
Soot	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	23,13	0,055	99,8
2	1.456	145,4	10,48	0,019	99,8
3	1.280	102,7	5,77	0,017	99,7
4	1.008	53,9	0,79	0,018	97,7



Figuur 29: Verminderingspercentages in de afzonderlijke meetpunten

6.4 Evaluatie in overeenstemming met ISO 8178 E3-Cyclus

Als men de meetgegevens van de afzonderlijke bedrijfspunten gebruikt voor een evaluatie op basis van ISO 8178 in de E3-cyclus, kunnen de volgende resultaten worden gevonden. De resultaten voor carbon black worden in deze analyse niet gebruikt omdat de gebruikte meetmethode geen deel uitmaakt van ISO 8178.

6.4.1 Evaluatie upstream AGN

Voor een E3-evaluatie met de gemeten uitlaatgaswaarden vóór het aanbrengen van de uitlaatgassen zijn de resultaten weergegeven in tabel 14.

Tabel 14: E3-resultaten stroomopwaarts AGN

E3 weighted results according ISO 8178		
CO	g/kWh	1,121
HC	g/kWh	0,810
NO _x	g/kWh	12,694
PM	g/kWh	0,134

6.4.2 Evaluatie downstream AGN

Voor de meetgegevens, gemeten in de uitlaat, wordt het resultaat in tabel 15 verkregen met behulp van de E3-weging (zie hoofdstuk 4.2). Deze resultaten leveren de volgende E3-gewogen verminderingpercentages op.

Tabel 15: Reductiepercentages met E3-weging

E3 weighted results according to ISO 8178			E3 weighted Reduction rates	
CO	g/kWh	0,488	%	56,5
HC	g/kWh	0,068	%	91,6
NO _x	g/kWh	2,956	%	76,7
PM	g/kWh	0,016	%	87,9

6.5 Resultaten voor NO₂-emissies

De resultaten van de NO₂-emissies zijn zoals weergegeven in tabel 16.

Tabel 16: NO₂-emissies

NO ₂	Engine speed	Power output	upstream AGN	downstream AGN	Reduction rate
	min ⁻¹	kW	g/h	g/h	%
1	1.620	193,9	42,65	23,84	44,1
2	1.456	145,4	49,13	44,42	9,6
3	1.280	102,7	62,12	31,48	49,3
4	1.008	53,9	69,07	244,32	-253,7*)

*) for a precise explanation of the negative rates see +in the following chapter 7.1

7. Bespreking van de resultaten

7.1 Beoordeling van de gepresenteerde emissieresultaten

In 2002 heeft de Centrale Commissie voor de Rijnvaart (ZKR) grenswaarden ingevoerd voor de uitstoot van gasvormige verontreinigingen en luchtverontreinigende deeltjes door dieselmotoren. De motoren van de "Max Prüss", gebouwd in 1998, zijn nog uit de tijd vóór de invoering van deze grenswaarden. De motoren zijn nog in hun oorspronkelijke staat en hebben nog geen grote revisie ondergaan. Voor een motor zoals geïnstalleerd in de "Max Prüss" zijn de grenswaarden van tabel 17, regel 3, die in 2002 zijn toegepast, verplicht:

Tabel 17: ZKR-grenswaarden van niveau I uit 2002, geldig voor de "Max Prüss".

P_N [kW]	CO [g/kWh]	HC [g/kWh]	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]
$37 \leq P_N < 75$	6,5	1,3	9,2	0,85
$75 \leq P_N < 130$	5,0	1,3	9,2	0,70
$P_N \geq 130$	5,0	1,3	$n \geq 2800 \text{ min}^{-1} = 9,2$ $500 \leq n < 2800 \text{ min}^{-1} = 45 \cdot n^{(-0,2)}$	0,54

Bij een nominaal toerental van 1.800 min⁻¹ en een vermogen van 250 kW zou dit resulteren in een NOX-grenswaarde van 10,05 g/kWh.

Zoals uit tabel 14 blijkt, ligt de motor van de "Max Prüss" (zonder inbouw achteraf) onder de grenswaarden van het ZKR-niveau I voor alle componenten behalve NOX. Er moet echter op worden gewezen dat de geteste motor zijn nominale toerental van 1.800 min⁻¹ in reële werking niet kan halen en dat de vereiste E3-test alleen met een toerental van 1.620 min⁻¹ kan worden uitgevoerd.

De NOX-emissies van de "Max Prüss"-motor (12,7 g/kWh zonder nabehandeling) liggen op een niveau dat overeenkomt met de regels van het bouwjaar. Maar deze waarden vormen naast de uitstoot van deeltjes ook de primaire uitdaging voor de uitlaatgasreparatie.

Het uitlaatgasnabehandelingssysteem dat is gekozen voor de "Max Prüss", de combinatie van een gesloten (wandstroom) deeltjesfilter met een SCR-katalysator

stroomafwaarts (Selectieve Katalytische Reductie), die een ureumoplossing (AdBlue©) als reagens gebruikt, is in principe in staat om alle beperkte uitlaatgascomponenten te reduceren. Hier wordt de oxidatiekatalysator van het deeltjesfilter stroomopwaarts gebruikt voor de oxidatie van koolwaterstofverbindingen en koolmonoxide. Tegelijkertijd heeft deze oxidatiekatalysator ook de taak om het aandeel van NO₂ in het ruwe uitlaatgas, dat meestal tussen 3 en 10 % in het ruwe (onbehandelde) dieseluitlaatgas ligt, te verhogen.

Dit is noodzakelijk omdat het deeltjesfilter stroomafwaarts van de oxidatiekatalysator een passiefregenererend systeem is. NO₂ bevordert de oxidatie van het opgevangen roet en maakt zo een succesvolle regeneratie van het deeltjesfilter mogelijk, zelfs bij lagere uitlaatgastemperaturen. Een andere reden om het NO₂-gehalte in de uitlaatgasstroom te verhogen is de functionaliteit van de SCR-katalysator. Hier is een NO₂/NO_x-verhouding van ongeveer 50% gewenst. De in dit project gebruikte meetopstelling geeft geen enkele meting van de emissiegegevens tussen het deeltjesfilter en de SCR-katalysator, zodat geen uitspraak kan worden gedaan over de werkelijke NO₂/NO_x-verhouding bij de inlaat van de SCR-katalysator.

De resultaten in hoofdstuk 6.3 worden gebruikt voor de bepaling van de verminderingpercentages voor de verschillende uitlaatgascomponenten, zoals in figuur 27 grafisch is weergegeven. Als we eerst kijken naar de roetitstoot, dan zien we dat de elementaire koolstof bijna volledig wordt uitgefilterd. Dit is een verwacht gedrag voor een hoogwaardig gesloten roetfilter. Het feit dat deze filtratiewaarden, zoals waargenomen voor het roet, niet volledig worden weerspiegeld in de gravimetrische deeltjesmeting is te wijten aan de meetmethode. Deeltjes zijn per definitie alle stoffen die bij temperaturen onder 52°C op het monsterfilter neerslaan. Naast koolstof kunnen dit bijvoorbeeld ook condensaten van verschillende verbindingen zijn. De resultaten zijn in lijn met de verwachtingen.

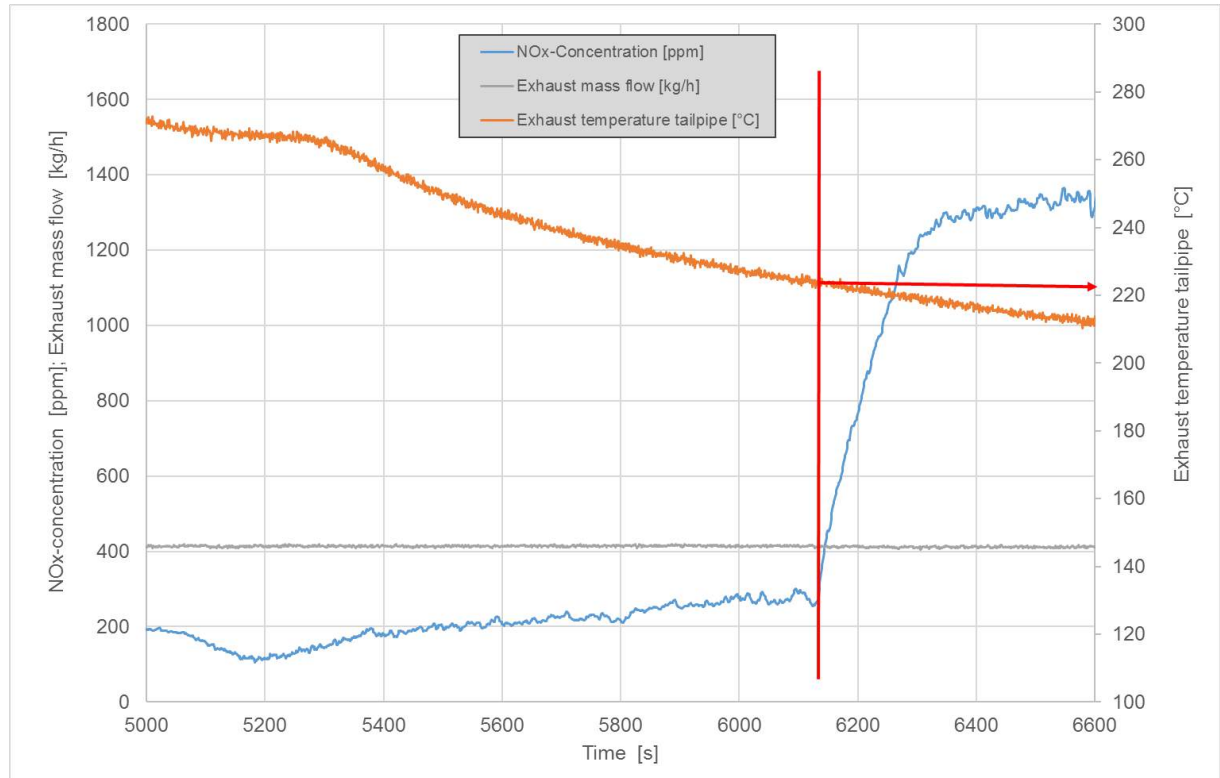
De reductie van de stikstofoxide-emissie varieert sterk over de belastingspunten heen, maar ligt binnen het verwachte bereik voor SCR-systemen (60% tot > 90%) voor de eerste drie belastingspunten. Opvallend is het resultaat voor het laatste meetpunt (laagste snelheid), dat gedocumenteerd is met reductiepercentages ver onder 10%. Voor de chemische omzetting van de Adblue© naar ammoniak zijn in de installatie minimumtemperaturen van 220°C vereist. Aan de systeemzijde wordt de Adblue© -injectie uitgeschakeld wanneer de op de SC-katalysator gemeten temperaturen lager zijn dan 220°C.

Figuur 30 toont een deel van het vierde meetpunt van de E3-cyclus (1,008 min⁻¹). De weergegeven NO_x-concentratie is de NO_x -concentratie na het aanbrengen van het uitlaatgas, de uitlaatgastemperatuur in de uitlaatpijp en de uitlaatgasmassastroom over een tijdsverschil van het meetpunt. De gestaag dalende uitlaatgastemperatuur op dit meetpunt is duidelijk te herkennen. Met de dalende uitlaatgastemperatuur

wordt waargenomen dat de NO_x-concentratie toeneemt. De concentratie neemt drastisch toe wanneer een temperatuur lager dan 220°C wordt bereikt. Op dit punt wordt de ureumtoevoer (AdBlue©) gestopt.

Als de meetpunten worden aangedreven totdat de stationaire omstandigheden zijn bereikt en de laatste minuut van het meetpunt wordt gebruikt voor de evaluatie, geeft dit meetpunt (zonder ureumtoevoer) lagere reductiepercentages aan dan de andere.

Deze reactie laat zien dat de verminderingpercentages in de praktijk altijd afhankelijk zijn van de belastingshistorie. Als bijvoorbeeld een manoeuvre is uitgevoerd na een stroomopwaartse vaart met een hoge belasting, waarbij slechts een kortstondig belastingspunt van bijv. 1008 min⁻¹ nodig is, zoals hier gepresenteerd, worden gedurende deze tijd hoge reductiepercentages bereikt vanwege de nog steeds hoge temperaturen in het systeem. Maar als men uitgaat van een langere operatie in zo'n laag belastingspunt, zouden de reductiepercentages uiteindelijk dalen tot de gedocumenteerde waarde en daar blijven. Opgemerkt moet worden dat een E3-test voor deze motor met 250 kW bij 1800 min⁻¹ een laag belastingspunt zou hebben van 1134 min⁻¹ met 62,5 kW vermogen, in tegenstelling tot 1008 min⁻¹ en 53,9 kW in de gereden test.



Figuur 30: Detail Meetpunt 1.008 min⁻¹

De beschreven effecten zijn van invloed op de NO₂-emissies, zoals ook blijkt uit hoofdstuk 6.5. De gespecificeerde reductiepercentages zijn aanzienlijk lager dan die voor NO_x. Dit is het gevolg van de drie verschillende reactietrajecten, die plaatsvinden in een SCR-katalysator en rechtstreeks worden beïnvloed door de NO₂/NO_x-verhouding in de katalysatorinlaat. De opvallend hoge negatieve waarde in het laatste meetpunt wordt verklaard door het gedrag van het systeem, zoals hierboven beschreven, met een dalende uitlaatgastemperatuur van minder dan 220 °C. Na het uitschakelen van de ureuminjectie is er geen verdere omzetting van stikstofoxiden, zodat de NO₂-concentratie in de katalysatorinlaat ongeveer gelijk is aan die in de katalysatoruitlaat. Aangezien het NO₂-gehalte ten opzichte van het ruwe uitlaatgas van de motor aanzienlijk wordt verhoogd door de oxidatiekatalysator vóór het deeltjesfilter (zie hierboven), vindt een aanzienlijke verhoging van het NO₂-gehalte van de totale NO_x-emissie plaats in het laagste belastingspunt, wat leidt tot de bovengenoemde negatieve verminderingspercentages.

Een belangrijke parameter voor het functioneren van een SCR-katalysator is de juiste reagensdosering afhankelijk van het belastingspunt. Het benodigde reagens in de SCR-katalysator is ammoniak (NH₃). Er zijn verschillende technieken beschikbaar om de katalysator van de juiste hoeveelheid ammoniak te voorzien. Met het oog op de veiligheid van het transport en de opslag is de injectie van een waterige ureumoplossing toegepast. Hierbij wordt een 32%-oplossing in de uitlaatgasstroom geïnjecteerd en daar door thermolyse of hydrolyse tot ammoniak verwerkt. Een te hoge dosering van het reagens leidt tot een NH₃-slip door de katalysator en dus tot NH₃-emissies. Dit moet ten koste van alles worden vermeden. Een te lage dosering leidt tot verliezen in de mogelijke reductiepercentages. Om een mogelijke NH₃-slip te voorkomen, kunnen SCR-systemen worden uitgerust met een ammoniak-slipkatalysator. Het systeem dat op de "Max Prüss" is geïnstalleerd heeft geen ammoniak slipkatalysator. Daarom moet in dit systeem een bepaalde veiligheidsafstand tot de maximaal mogelijke AdBlue® injectiehoeveelheid worden aangehouden om NH₃-emissies te voorkomen.

Het onderhoud voorafgaand aan de meetcampagne op de "Max Prüss" optimaliseerde de AdBlue® -injectie in het systeem voor een optimale NO_x-reductie met als gevolg een overdosering van AdBlue® met NH₃-slip.

Aan het begin van de meetcampagne werd een duidelijke NH₃-geur gedetecteerd bij de uitlaatgasuitlaat. Aangezien er geen geschikte meettechniek beschikbaar was voor de bepaling van de NH₃-emissies, was het niet mogelijk om deze emissies te kwantificeren. Een olfactometrische bepaling suggereert dat de bestaande emissies ver boven de toelaatbare niveaus liggen. Daarom moet er zeker actie worden ondernomen. Op de Max Prüss werd de AdBlue® injectie tijdens de meetcampagne zo sterk gereduceerd dat de vergelijking van de TÜV-Nord metingen met de

meetwaarden van de "Multronic" sensor (kruisgevoeligheid voor NH₃) geen NH₃-slip meer aangaf.

Deze aanpassing zorgde er ook voor dat de NOX-metingen van de kruisgevoelige "Multronic"-sensor niet beschadigd werden door NH₃-slip. Op alle schepen die deelnemen aan de CLINSH met AdBlue[®] injectie moet ervoor worden gezorgd dat de continue NOX-meetsignalen niet worden verstoord door NH₃-slip.

De koolwaterstofemissies worden, zoals verwacht, met een hoog percentage gereduceerd. Alleen bij het laatste bedrijfspunt daalt het reductiepercentage. Ook hier is de verklaring de afkoeling van het uitlaatgasreparatiesysteem en de volgende uitschakeling van de AdBlue[®] -injectie.

In een eerder project (zie technisch rapport LANUV 49 (2013), Reductie van de uitstoot van deeltjes, roet en stikstofoxide op het passagiersschip "Jan van Werth" door aanpassing van een SCRT-systeem, Duitse taal), waar een passagiersschip was uitgerust met een uitlaatgasreductie systeem van dezelfde fabrikant, was een toename van de CO-uitstoot gedetecteerd stroomafwaarts van de AGN. In het geval van de "Max Prüss"- worden de verminderingpercentages ook voor koolmonoxide waargenomen. Deze verschillen sterk tussen de afzonderlijke belastingspunten.

7.2 Resultaatrelevantie voor het CLINSH-project

In het CLINSH-project worden de NO_x-emissies continu gemonitord op 41 schepen die zijn uitgerust met een breed scala aan emissiereductietechnologieën. Met behulp van de continue monitoringresultaten worden real time emissiegegevens ("Real Shipping Emissions", RSE) verzameld tijdens de real time operatie en kan het effect van technische maatregelen ter vermindering van de emissies worden beoordeeld.

De emissiemeting, die in dit verslag wordt beschreven, moet enerzijds de reductiepercentages van de geïnstalleerde uitlaatgasnabehandelingsinstallatie aantonen, maar anderzijds ook worden gebruikt als een instrument om de technologie aan boord voor emissie monitoring te valideren. De nadruk ligt vooral op de uitstoot van stikstofoxide.



Figure 31: NO_x-Sensor [Source: TÜV-Nord]

De continue (permanente) emissie monitoring kan niet worden uitgevoerd met meettechnieken zoals die in de monitoringcampagne van TÜV-Nord zijn beschreven, omdat dit een dure laboratoriummeettechniek is.

Daarom worden voor de permanente bewaking sensoren gebruikt, zoals die bijvoorbeeld in de bedrijfswagentechniek zijn geïnstalleerd, als massaserieproduct. Figuur 31 toont een voorbeeld van een dergelijke NO_x-sensor.

Deze sensor wordt in de uitlaatpijp geschroefd na het uitlaatgasretrofitsysteem. De geschiktheid van dergelijke sensoren voor langdurige stabiele detectie van stikstofdioxideconcentraties in het uitlaatgas is onbetwistbaar. In deze toepassing zijn er echter risicofactoren voor een veilige werking, waarvan er hier twee moeten worden genoemd. De kwaliteit van de geregistreerde gegevens en dus ook de kwaliteit van de later bepaalde emissiefactoren zijn direct afhankelijk van de werking van de monitoringsensor. Om deze reden is het sterk aanbevolen om de sensorgegevens te valideren in systemen met SCR-katalyse met behulp van reagentia.

Een directe vergelijking van de meetresultaten van TÜV-Nord tijdens de testrit met de resultaten van de continue meting ("Multronic" sensor) leverde de volgende informatie op:

Het sensorprincipe dat voor de continue bewaking wordt gebruikt, heeft een duidelijke kruisgevoeligheid voor NH₃. Als er NH₃-slip optreedt in de SCRT-systemen op basis van reagentia, leidt dit tot hogere meetsignalen en geeft het dus de indruk dat er hogere NOX-concentraties in het uitlaatgas aanwezig zijn. Het effect van het achteraf aanbrengen van de uitlaatgasreductie zal worden onderschat. Bovendien veroorzaken NH₃-emissies ook milieuschade die ten koste van alles moet worden vermeden. Een bijstelling van de ureuminjectie tijdens de proefrit leverde vervolgens vergelijkbare meetresultaten op voor beide systemen.

Daarom moet ervoor worden gezorgd dat dergelijke sensoren, wanneer ze aan de kant van het ruwe gas worden geïnstalleerd, vóór de toevoer van het reagens worden geplaatst of, als ze na de installatie van het uitlaatgas worden geïnstalleerd, moet er een waarschuwingssysteem zijn dat NH₃-slip detecteert. Zoals reeds vermeld, kan NH₃-slip op verschillende manieren worden vermeden, afhankelijk van de systeemarchitectuur. Als er een systeem zonder ammoniak-slipkatalysator is geïnstalleerd, moet de toepassing ervoor zorgen dat er op geen enkel werkingspunt een overdosis van het reagens optreedt.

Met een ingebouwde ammoniak slipkatalysator kan de reagensdosering dicht bij de NH₃-slip drempel worden toegepast, aangezien een lage NH₃-slip door de slipkatalysator wordt geëlimineerd. Een van deze twee maatregelen vereist dat de fabrikant van het systeem een maatregel tegen NH₃-slip realiseert. Zoals beschreven in hoofdstuk 7.1 lijkt er in de eerste fase van de monitoringperiode een niet-tolereerbare NH₃-slip te bestaan, zodat meetsignaalverstoringen als gevolg van de beschreven kruisgevoeligheid te verwachten zijn.

De tweede risicofactor die hier genoemd moet worden is niet het gevolg van het sensorprincipe, maar bestaat uit vloeistofproblemen die kunnen leiden tot

inhomogeniteiten in de uitlaatgaspijp op het punt van de montage van de sensor. Een homogeen uitlaatgasmengsel achter de SCR-katalysator kan alleen worden verwacht als op alle werkingspunten een uniforme instroom door de katalysatorinlaat met uitlaatgas en reagens wordt bereikt. Als dit niet het geval is, ontstaan er "uitlaatpluimen" in de katalysatoruitlaat, die leiden tot een inhomogene concentratieverdeling over de leidingdoorsnede.

Een voldoende lang leidingtraject met turbulente stromingsomstandigheden kan de enige oplossing zijn. Gebruikte menglichamen kunnen hier nuttig zijn, maar kunnen een verhoging van de uitlaatgastegendruk veroorzaken, wat kan leiden tot problemen bij de grensinterpretatie. Om onjuiste metingen als gevolg van deze tweede risicofactor te voorkomen, moeten passende maatregelen worden overeengekomen tussen de fabrikant van het systeem en de persoon die verantwoordelijk is voor de monitoring .

Ten slotte moet worden opgemerkt dat een succesvolle monitoring van de uitlaatgassituatie onder reële vaaromstandigheden alleen kan worden gegarandeerd door middel van continue metingen als na de installatie van het systeem (AGN en monitoringsysteem) een validatie van de gemeten gegevens plaatsvindt in het gebruikelijke werkingsgebied van de motor. Er moet voor worden gezorgd dat NH₃-slip onder alle bedrijfsomstandigheden kan worden vermeden. Alleen dan kunnen risicofactoren voor foutieve metingen worden geïdentificeerd en geëlimineerd.

8. Samenvatting

De LANUV (Rijksdienst voor Milieu, Natuur en Consumentenbescherming van de deelstaat Noordrijn-Westfalen), eigenaar van het laboratoriumschip "Max Prüss", heeft het schip uitgerust met een uitlaatgasnabehandelingssysteem, waardoor de stikstofoxide-uitstoot van de aandrijfmotoren van de "Max Prüss" aanzienlijk wordt gereduceerd. Uit de verschillende systemen werd een combinatie van een passief regenererend roetfilter en een stroomafwaartse SCR-katalysator geselecteerd en gerealiseerd door "TEHAG". De "Max Prüss" is ook een van de projectschepen van het European Life project CLINSH (Clean Inland Shipping) en is uitgerust met technieken in dit project om een continue lange termijn monitoring van de uitlaatgassen mogelijk te maken.

Het project moet de effectiviteit van het uitlaatgasreductiesysteem aantonen en tegelijkertijd de mogelijkheid bieden om het geïnstalleerde monitoringsysteem te valideren. Het onderzoeksconcept voorziet in metingen van de emissies in de real time operatie van het schip. In dit project is het resultaat van de meting in vier belastingspunten vergelijkbaar met een E3-test van ISO 8178, zoals voorgeschreven voor binnenvaartmotoren. De onderzochte stuurboordmotor bereikte een maximum toerental van 1.620 min⁻¹ in reëel bedrijf door de instelling van het vermogen. Op basis van dit toerental worden de overige meetpunten op de schroefcurve van de gebruikte schroef bepaald.

Het meetprogramma voorziet in een gelijktijdige meting van de gasvormige emissies voor en na de uitlaatgasuitstoot. Daarnaast worden er gravimetrische deeltjesmetingen uitgevoerd en roetmetingen met een foto-akoestische aërosolsensor. Deze metingen worden uitgevoerd in afzonderlijke meetcampagnes voor en na de installatie van de uitlaatgassen, aangezien de meettechnologie slechts op een eenvoudige manier beschikbaar is.

De resultaten laten positieve reductiepercentages zien voor alle vervuilende stoffen op alle meetpunten. Voor de stikstofoxiden liggen deze tussen 66% en 96%, met uitzondering van het laagste meetpunt. Hier wordt door lage uitlaatgastemperaturen de injectie van het reagens gestopt. Het reductiepercentage daalt dan tot 6,6% tijdens de meettijd. Bij een roetreductie van 97,7% tot 99,8% wordt de deeltjesuitstoot verminderd met 77,8% tot 96,7%. Voor de totale koolwaterstoffen lagen de reductiepercentages tussen 81% en 97,3%. Voor koolmonoxide variëren de reductiepercentages tussen 31,6% en 62,5%. Als we kijken naar de directe uitstoot van NO₂, kunnen we in de eerste drie belastingspunten reductiepercentages van 9,6% tot 49,3% waarnemen. Voor het laatste meetpunt (laagste snelheid) resulteerde de lage uitlaatgastemperatuur en de daarmee stopgezette reagenstoevoer in een zeer significante toename van het NO₂-gehalte in het uitlaatgas.

Rekening houdend met de resultaten gewogen volgens ISO 8178 voor een E3-cyclus, resulteren de volgende reductiepercentages voor de afzonderlijke componenten: koolmonoxide 56,5%, koolwaterstoffen 91,6%, stikstofdioxide 78,7% en deeltjes 87,9%. Voor de vastgestelde roetwaarden wordt geen E3-weging gegeven. Voor de uitstoot van stikstofdioxide (NOX) worden de arbeidsspecifieke emissies in de E3-cyclus gereduceerd van 12,69 g/kWh tot 2,96 g/kWh.

Bij de validatie van de monitoringgegevens konden twee meetrisico's worden vastgesteld. Enerzijds kan tijdens de meting duidelijk NH₃-slip van het uitlaatsysteem worden gedetecteerd, wat kan leiden tot foutieve meetsignalen als gevolg van de kruisgevoeligheid van de monitoringsensor die het meetbedrijf "Multronic"-gebruikte voor de continue monitoring. De NH₃-slip kon tijdens de testvaart worden geminimaliseerd door het systeem bij te stellen. Aan de andere kant is er een meetonzekerheid door inhomogeniteiten in de uitlaatgasstroom achter de nabehandeling.

Uit de resultaten blijkt dat er maatregelen moeten worden genomen om deze twee meetrisico's uit te sluiten. Hier is het elimineren van NH₃-slip duidelijk de verantwoordelijkheid van de systeemfabrikant van het uitlaatgasreductie systeem. Voor een verbetering van de homogeniteit van het uitlaatgas en de bepaling van de optimale inbouwpositie van de stikstofdioxidesensor is een nauwe samenwerking tussen de systeemleveranciers van de uitlaatgasreductie installatie en de leveranciers van het continue monitoringsysteem noodzakelijk. Om een hoge kwaliteit van de continue monitoringgegevens te bereiken, is een validatie na de installatie van het systeem absoluut noodzakelijk om het risico van onjuiste metingen tot een minimum te beperken.

Erkenning:

Wij willen de bemanning van "Max Prüss" en het personeel van het bedrijf TEHAC bedanken voor de behulpzame ondersteuning van het projectwerk.

9. Literature

Directive 2008/50/EC of the European Parliament and of the Council of 21 May 2008 on ambient air quality and cleaner air for Europe, OJ L 152, 11.6.2008, p. 1–44
Directive 2001/81/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2001 on national emission ceilings for certain atmospheric pollutants, OJ L 309, 27.11.2001, p. 22–30

Directive 2004/107/EC of the European Parliament and of the Council of 15 December 2004 relating to arsenic, cadmium, mercury, nickel and polycyclic aromatic hydrocarbons in ambient air OJ L 23, 26.1.2005, p. 3–16

ISO 8178 E3 Cycle, Part 1-11; <https://www.iso.org/standard/37236.html>
International Standard ISO/FDIS 8178-4, Reciprocating internal combustion engines – Exhaust emission measurement – Part 4: Steady-state test cycles for different engine applications, Reference number: ISO/FDIS 8178-4:2007

LANUV-Fachbericht 49 (2013), „Minderung der Feinstaub-, Ruß- und Stickstoffoxid-emissionen auf dem Fahrgastschiff "Jan von Werth" durch Nachrüstung eines SCRT-Systems“, Eigenverlag LANUV, ISSN 1864-3930 Link :
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte

LANUV-Fachbericht 77 (2017) „Emissionen des Containerschiffs „MS Aarburg“, Auswirkungen der Nachrüstung mit einer Diesel-Wasser-Emulsionsanlage“, Eigenverlag LANUV, ISSN 1864-3930 (Print), 2197-7690 (Internet) Link :
https://www.lanuv.nrw.de/fileadmin/lanuvpubl/3_fachberichte

Regulation (EU) 2016/1628 of the European Parliament and of the Council of 14 September 2016 on requirements relating to gaseous and particulate pollutant emission limits and type-approval for internal combustion engines for non-road mobile machinery, amending Regulations (EU) No 1024/2012 and (EU) No 167/2013, and amending and repealing Directive 97/68/EC (Text with EEA relevance) OJ L 252, 16.9.2016, p. 53–117

ZKR (2002): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe I, Gültig seit 2002.

ZKR (2007): Richtlinie der Zentralkommission für die Rheinschifffahrt (ZKR), Stufe II bzw. Richtlinie 2004/26/EG, Gültig seit 06/2007

10. Cijferlijst

Figuur 1:	Laboratoriumschip "Max Prüss"	9
Figuur 2:	Stuurboordaandrijfmotor MAN D2866 LXE43	11
Figuur 3:	Vermogensgrafieken van de motor MAN D2866 LXE43	12
Figuur 4:	Algemeen overzicht van het nieuwe uitlaatsysteem (bakboordmotor)	13
Figuur 5:	Gegevenslogger voor meetgegevensregistratie	16
Figuur 6:	Schematische weergave van de meetopstelling	19
Figuur 7:	SEMTECH-DS-Apperatuur en systeemconfiguratie	20
Figuur 8:	Microroetdetector Type 483 [Bron: AVL]	25
Figuur 9:	Functie en structuur van een foto-akoestische meetcel	26
Figuur 10:	Deeltjesmeetsysteem voor gravimetrische bepaling	28
Figuur 11:	Illustratie van de gasstroom in de Micro PSS	29
Figuur 12:	Meetsysteemsensoren EcoStar met Flowmeter	30
Figuur 13:	Opstelling voor meting stroomopwaarts AGN (gasvormig en deeltjes / roet)	35
Figuur 14:	Opstelling van het systeem voor de meting stroomafwaarts AGN "End of Pipe" (gasvormige, deeltjes- / roet- en uitlaatgasmassastroom)	35
Figuur 15:	Prestatiecurves, motortoerental	38
Figuur 16:	CO-concentratiespoor op/neer AGN (1.620 min ⁻¹)	39
Figuur 17:	HC Concentratiespoor omhoog/omlaag AGN (1.620 min ⁻¹)	40
Figuur 18:	NO _x -concentratiespoor omhoog/omlaag AGN (1.620 min ⁻¹)	40
Figuur 19:	CO-concentratiespoor op/neer AGN (1.456 min ⁻¹)	41
Figuur 20:	HC Concentratiespoor omhoog/omlaag AGN (1.456 min ⁻¹)	41
Figuur 21:	NO _x -concentratie Trace up/downstream AGN (1.456 min ⁻¹)	42
Figuur 22:	CO-concentratiespoor op/neer AGN (1.280 min ⁻¹)	42
Figuur 23:	HC Concentratie Trace up/downstream AGN (1.280 min ⁻¹)	43
Figuur 24:	NO _x -concentratiespoor omhoog/omlaag AGN (1.280 min ⁻¹)	43
Figuur 25:	CO-concentratie Trace up/downstream AGN (1.008 min ⁻¹)	44
Figuur 26:	HC Concentratie Trace up/downstream AGN (1.008 min ⁻¹)	44
Figuur 27:	NO _x -concentratiespoor omhoog/omlaag AGN (1,008 min ⁻¹)	45
Figuur 28:	Deeltjesmonster filter up/downstream AGN	46
Figuur 29:	Verminderingspercentages in de afzonderlijke meetpunten	50
Figuur 30:	Detail Meetpunt 1.008 min ⁻¹	55
Figuur 31:	NO _x -Sensor	58

11. Lijst van tabellen

Tabel 1:	Technische gegevens "Max Prüss"	10
Tabel 2:	Specificaties van de Vlamionisatie (THC-FID)	21
Tabel 3:	Specificaties van de Niet-Dispersieve Infrarood Meetbankdetector	22
Tabel 4:	Specificatie van de Niet-Dispersieve Ultraviolet Meetbank (NDUV)	23
Tabel 5:	Specificatie van de elektrochemische O ₂ -analyzer	24
Tabel 6:	Specificaties van de Micro Roet Sensor AVL 483	26f
Tabel 7:	Specificaties van de sensoren EcoStar	31ff
Tabel 8:	Specificaties van de Flowmeter	34
Tabel 9:	Resultaten van de deeltjesmeting stroomopwaarts AGN	47
Tabel 10:	Resultaten van de deeltjesmeting stroomafwaarts AGN	47
Tabel 11:	Resultaten van de roetmeting stroomopwaarts AGN	48
Tabel 12:	Resultaten van de roetmeting stroomafwaarts AGN	48
Tabel 13:	Verminderingspercentages in de afzonderlijke meetpunten	49 f
Tabel 14:	E3 Resultaten stroomopwaarts AGN	51
Tabel 15:	Verminderingspercentages met E3-weging	51
Tabel 16:	NO ₂ -emissies	52
Tabel 17:	ZKR-grenswaarden van niveau I vanaf 2002, geldig voor de "Max Prüss"	53

12. Partners in CLINSH



Visiting address

Provinciehuis Zuid-Holland
Zuid-Hollandplein 1
2596 AW The Hague
The Netherlands

Mailing address

Provincie Zuid-Holland
Postbus 90602
2509 LP The Hague
The Netherlands





