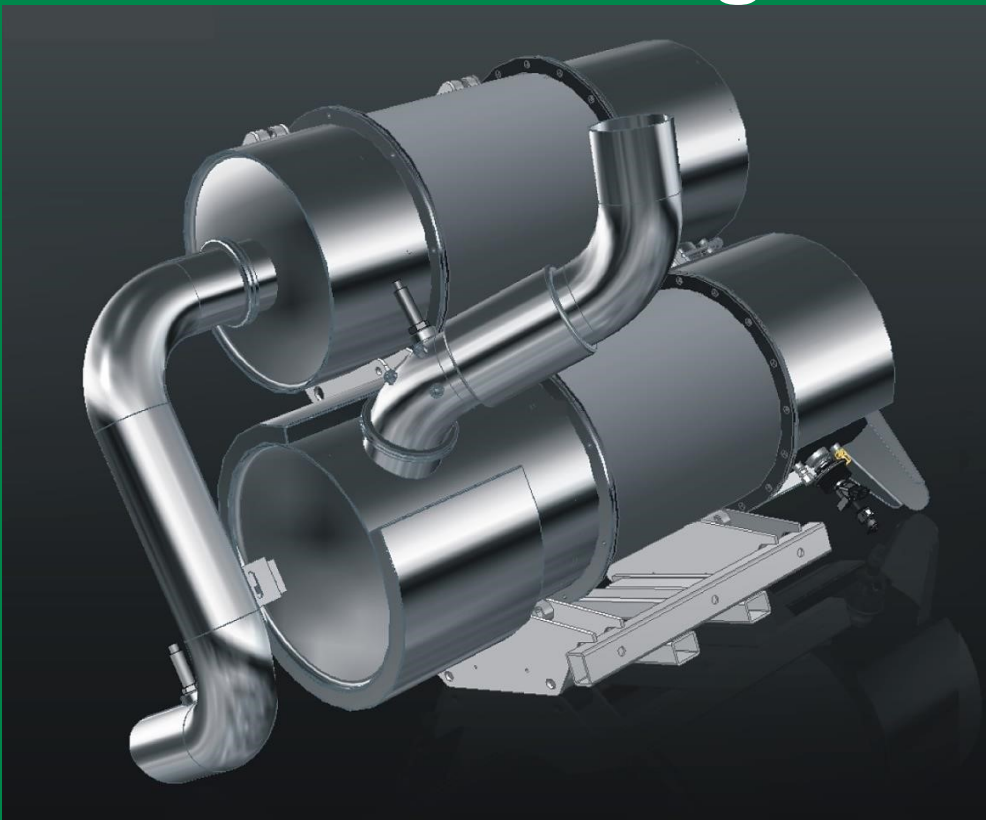




Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Montering og test af PUREFI DPF-SCR emissionsudstyr på DSB MR tog



Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Mende Trajkovski, Purefi A/S

Grafiker/bureau: Purefi A/S

Tryk: Purefi A/S

Fotos: Purefi A/S

ISBN: 978-87-7038-024-9

Miljøstyrelsen offentliggør rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, som er finansieret af Miljøstyrelsen. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Miljøstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at indlægget udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	4
2.	Ordforklaring	5
3.	Indledning	8
3.1.1	Arbejdspakke 1	8
3.1.2	Arbejdspakke 2	8
3.1.3	Arbejdspakke 3	9
3.1.4	Arbejdspakke 4	9
4.	AP1, Forundersøgelser	10
4.1	Resultat af målinger uden emissionssystem	11
4.1.1.1	Partikelfilteret	11
4.1.1.2	Katalysatoren DOC	12
4.1.1.3	SCR	12
4.1.1.4	DPF+SCR	14
4.2	Stationær test og beskrivelse	14
4.2.1	Resultater af målinger uden emissionsudstyr	16
4.2.2	Analyse af udstødningstemperaturen:	17
4.2.3	Analyse af NOx emissionen	17
4.3	Målinger under drift.	20
4.3.1	Resultater med datalogger	20
5.	AP2, udvikling af emissionssystemet	22
5.1	Indledning	22
5.2	Udvikling af Purefi DPF-SCR	24
5.2.1	Regenerering af DOC+DPF:	25
5.2.2	Reduktion af NOx:	26
5.2.3	Temperaturlagring og temperaturstyring	26
5.3	Testvogn med testudstyr	27
6.	Udførsel af målinger med emissionssystem	32
6.1	Formål	32
6.2	Montering af emissionssystem på toget	32
6.3	Emissionstesten	33
6.3.1	Resultater af målinger udført af FORCE TECHNOLOGY	33
6.3.2	Gældende EU's grænseværdier for tog sammenlignet med måleresultater opnået med Purefi DPF-SCR	35
6.3.2.2	Inspektion af emissionssystemet efter test	41
6.4	Sammenfatning og konklusion	42
7.	Hvad er de forventede forretningsmæssige resultater?	44
7.1	OEM projekt	44
7.2	DSB's andre tog	44
7.2.1	Opgradering af ME-lokomotiv	44

1. Forord

Forord

Dette er den afsluttende rapport for projektet med titlen "Emissionsudstyr til MR-tog" som er udført i perioden 2014-2017. Projekt er gennemført under Miljøstyrelsens tilskudsprogram MUDP.

Projektet er udført i et samarbejde mellem DSB A/S, FORCE Technology A/S samt PUREFI A/S. Det overordnede formål med projektet er at undersøge mulighederne for at eftermontere et emissionssystem et MR tog, samt at undersøge miljøgevinsten ved at montere et emissionssystem.

Purefi A/S

Juni 2018

2. Ordforklaring

ATC	Active Temperature Control
Adblue	Urea
ASC	Ammonia Slip Catalyst (Amoniak Slip Katalysator),
CO	Carbonmonooxid (kulilte)
DPF	Diesel Particulate Filter
DOC	Diesel Oxidation Catalyst
HC	HydroCarbon (Kulbrinter)
NOx	Nitrogen Oxide (Kvælstofoxid, består af NO og NO ₂)
NOx1 –	NOx i ppm målt på venstre side af motoren
NOx2 –	NOx i ppm målt på højre side af motoren som reference for NOx1
PM	Particulate Matter (sod partikler.)
Purefi DPF-SCR_ATC	Purefi partikelfilter og SCR med temperaturstyring
Purefi HC-injection	Purefi diesel indsprøjtning før emissionsystemet
SiC	Silicium Carbid
SCR	Selective Catalytic Reduction
T1	Udstødningstemperaturen lige efter motoren
T2	Udstødningstemperaturen lige efter lyddæmperen

Sammenfatning og konklusion

DSB fik omkring 1980 leveret en række dieseldrevne togsæt til regionaltrafikken. Togsættene med betegnelsen MR kører endnu på strækningen Roskilde – Køge - Næstved og på en række jyske strækninger. Togsættene skal være i drift frem til Banedanmark har gennemført Signalprogrammet og udskiftet signalerne i hele landet dvs. til ca. 2020.

Der er betydelige miljømæssige udfordringer med MR togsættene både i forhold til kunder, medarbejdere og naboer til stationer og banestrækninger, idet det fortsat er de originale dieselmotorer som sidder i togsættene. Motorerne har en alder og nogle driftsvilkår hvor mange traditionelle løsninger til rensning af udstødningsgasserne ikke umiddelbart kan implementeres, fordi de fleste løsninger på markedet ikke egner sig til motorer der har en meget høj sodudledning samt et relativt højt olieforbrug som et DSB MR-tog. Der er derfor behov for en speciel løsning som tager hensyn til alle de forhold som denne meget gamle og forurenende motor arbejder under.

DSBs målsætning med projektet var at afklare, om der findes eller kan udvikles løsninger, som kan sikre en markant reduktion i miljøpåvirkningen fra MR togsættene og som samtidig tager netop hensyn til alder og konstruktion af motor.

Luftkvaliteten på lukkede stationer, som stammer fra dieseldrevne tog eller skinnekørende materiel, er et kendt problem. Med eftermontering af udstyr til reduktion af emissionerne kan luftkvaliteten forbedres væsentligt. Togene har i dag ikke emissionsudstyr monteret og motorerne har en høj udledning af sodpartikler, HC, CO samt NOx.

Der er mange forskellige typer tog i Danmark. De nyeste tog er IC4, som er udstyret med Euro III motorer mens de helt gamle tog, MR-togene, er 30-50 år gamle, men de kører stadigvæk på de danske skinner. De ældste tog er også de tog, som bidrager til en stor del af den samlede luftforurening, som stammer fra DSB's tog, hvilket har været et varmt emne i medierne gennem flere år. Målet med dette projekt var derfor at udvikle et system, der kan reducere emissionerne fra togenes udstødningsgasser mest muligt.

Projektet er delt op i 4 arbejdsopgaver:

Arbejdsopgave 1 (AP1) omfattede en undersøgelse af mulighederne for at eftermontere et emissionssystem på et MR tog. Desuden blev der gennemført en undersøgelse af emissionerne fra udstødningsgassen uden efterbehandling af udstødningsgassen. Dvs. hvad kommer der ud af togets udstødningsgasser som togene kører i dag.

Resultaterne af emissionsmålingerne i arbejdsopgave 1 viste, at motorens udstødningsgasser havde høje koncentrationer af de skadelige partikler samt en høj koncentration af NOx. Udover emissionsmålinger var en væsentlig del af arbejdsopgaven at klarlægge driftsforholdene for toget, som skulle danne grundlag for, om det var muligt at få et emissionssystem til at fungere effektivt under drift. Der blev målt forskellige parametre over en periode på ca. ½ år og det kunne konkluderes at der var gode driftsbetingelser for at eftermontere et emissionssystem bestående af både et partikelfilter samt SCR, hvilket er den bedst mulige løsning.

Arbejdsopgave 2 (AP2) omfattede udviklingen af et emissionssystem baseret på de indsamlede driftsdata og emissionsmålinger fra AP1. Emissionssystemet blev udviklet med henblik på at opnå størst mulige miljømæssige gevinster. Dette blev opnået ved at montere en kombinationsløsning bestående af et dieselpartikelfilter (DPF) samt en NOx katalysator (SCR), som effektivt kan fjerne både sodpartiklerne samt HC, CO og NOx gasser fra udstødningsgasserne. Der blev lagt særlig vægt på at udvikle et system, som tager højde for det høje niveau af partikel samt NOx-udledning fra de gamle motorer. Der blev også lagt stor vægt på en høj virkningsgrad under alle driftsforhold, både under normal drift, hvor passager indånder den indtrængende luft i kupéen blandet med udstødningsgas, og ved standsning på stationerne, hvor mennesker opholder sig omkring toget og er stærkt udsat for røggasser fra toget. Det system, som blev udviklet i arbejdsopgave 2, under betegnelsen Purefi DPF-SCR_ATC, er derfor en kombinationsløsning af et partikelfilter med

aktiv regenerering, og et SCR-system med aktiv temperaturstyring. Med "aktiv temperaturstyring" optimeres NOx reduktionen specielt under tomgangskørsel (stop på stationerne), som normalt er meget vanskelige driftsforhold, da udstødningstemperaturene er lave og effektiviteten dermed aftager. Fokus på en kraftig forbedring af luftkvaliteten, hvor mennesker færdes (togstationer) og en høj effektivitet under normale driftsforhold for toget, resulterede i følgende reduktionsgrader:

- Partikelmasse reduceres med 99,99%
- Partikelantal reduceres med 98,3-99,99%
- NOx reduceres med 87-98%
- CO reduceres med 97-99,7%

Resultaterne viser, at eftermontering af et Purefi DPF-SCR_ATC emissionssystem på et MR-tog fra 1980'erne medfører, at emissionerne kan sammenlignes med nyeste emissionsstandarder eller bedre. Emissionsmålingerne viste, at det faktisk er muligt at komme under nuværende emissionsstandard STAGE IIIB og i mange af målepunkterne viste det sig, at selv de kommende STAGE V krav, som først træder i kraft om nogle år, kan imødekommes. Det er dermed muligt at opnå en stor miljøgevinst ved at opgradere ældre tog, hvad enten det er MR-tog eller DSB's andre tog som IC2, IC3 og IC4, til gavn for miljøet, og der kan sandsynligvis også opnås en samfundsøkonomisk gevinst ved at forlænge togenes levetid.

Arbejdsplan 3 (AP3) omfattede en genetableringsfase, hvor toget efter endt projekt bringes tilbage i samme stand som ved projektstart.

Arbejdsplan 4 (AP4), Denne arbejdsplan omfattede rapportering af projektet, samt formidling af indsamlet viden som f.eks. at overføre viden fra dette projekt til andre typer motorer eller andre typer DSB tog, som ligeledes med fordel kan eftermonteres med emissionssystem.

Den opnåede viden i projektet er bl.a. anvendt og tilbudt som en løsning til en mindre europæisk OEM producent, til opgradering fra Euro III til Euro VI normen.

Purefi har ligeledes været i dialog med DSB om opgradering af andre lokomotiver, og der er udarbejdet et løsningsforslag til opgradering af DSB's ME lokomotiver. Et designforslag til ME-lokomotivet findes sidst i denne rapport. Andre tog, hvor der også kan opnås en stor miljøgevinst ved at eftermontere et effektivt emissionssystem, er på IC2, IC3 og IC4 togene. De er alle udstyret med en "nyere" type motor og resultaterne vil derfor også kunne overføres til disse tog. På nuværende tidspunkt har DSB ikke taget stilling til om de vil udnytte resultaterne fra projektet til at afprøve en emissionsløsning til ME tog eller andre togtyper.

3. Indledning

Formålet med projektet er at udvikle emissionsudstyr til begrænsning af luftforureningen fra MR-tog, så luftkvaliteten omkring og i togene forbedres kraftigt og emissioner fra udstødningsgasser reduceres til meget lave niveauer. Dette er specielt ønskeligt i lukkede rum (undergrundsstationer, samt store delvist åbne stationer) hvor togene holder stille og hvor forureningen er til meget stor gene.

Kommende regulativer fra andre lande ses nu også rettet mod jernbane-materiel og de tekniske udfordringer i dette projekt kan vendes til en stor fordel, idet viden omkring tog er begrænset i forhold til viden om vejtrafikken.

Der skal derfor udvikles en helt speciel løsning til denne form for ældre motorer, som er en anderledes konstruktion end til On-Road (lastbiler og busser), specielt fordi der er tale om en stor luftkølet motor fra slutningen af 70'erne. Det er forventet at emissionsudstyr på disse motorer er svært at få til at fungere, mens en velfungerende emissionsteknologi, som fungerer effektivt på disse gamle motorer, lettere vil kunne overføres til nyere type motorer, som forurener mindre. Det vurderes derfor at en velfungerende teknologi vil kunne finde en bred anvendelse inden for området, og måleresultater kan derfor med fordel overføres til f.eks. IC2, IC3 og IC4 togene.

Målet inden projektstart for reduktion af udstødningsgasserne var følgende:

Mere end 96-98 % PM reduktion (Particulate Matter)

Mere end 70 % NOx reduktion (kvælstofoxid)

Mere end 70 % HC reduktion (kulbrinter)

Mere end 80 % CO reduktion

I nærværende rapport præsenteres udviklingen af emissionssystemet samt de væsentligste resultater, mens alle emissionsmålinger og måleresultater med og uden emissionssystem findes i en separatrapport: " Rapport_116-23832-Emissionsmålinger på MR-4018-final" udført af FORCE Technology. Interesserede kan rekvirere rapporten hos Purefi.

Projektet er opdelt i 4 arbejdsopgaver, AP1 til AP4:

3.1.1 Arbejdsopgave 1

Denne arbejdsopgave (AP1) omfatter en forundersøgelse af togets drift og motorens arbejdsgang under forskellige driftsforhold samt måling af emissionerne fra motoren uden nogen form for efterbehandling af udstødningsgasserne dvs. sådan som toget anvendes i dag. Med andre ord, hvad kommer der af udstødningsrøret fra et MR-tog som de forefindes i dag.

Resultatet af målingerne af emissionerne fra togets motor under drift blev efterfølgende anvendt til at kortlægge mulighederne for at eftermontere et røgrensningsanlæg på toget.

3.1.2 Arbejdsopgave 2

Denne arbejdsopgave (AP2) omfatter udviklingen af et emissionssystem på de indsamlede driftsdata og emissionsmålinger fra AP1. Emissionssystemet udvikles med henblik på at opnå størst mulige miljømæssige gevinster. Dette opnås ved at montere en kombinationsløsning bestående af et dieselpartikelfilter (DPF) samt en NOx katalysator (SCR), som effektivt kan fjerne både sodpartiklerne samt NOx fra udstødningsgasserne.

3.1.3 Arbejdspakke 3

Indledningsvis idenholdt denne arbejdspakke en driftserfaring, men grundet ændring i projektet undervejs, udgik denne arbejdspakke og er tilbage er kun en genetableringsfase, Toget bringes i samme stand som inden projektstart. Al udstyr fra testen afmonteres.

3.1.4 Arbejdspakke 4

Denne arbejdspakke har til formål at formidle resultaterne til relevante operatører, som har skinnekørende materiel og har behov for opgradering af deres materiel. Purefi har også besøgt en OEM fabrik mhp. at undersøge mulighederne for levering af emissionsudstyr til deres OEM køretøjer, samt tilbyde en opgraderingspakke til ældre køretøjer/maskiner.

Purefi har ligeledes været i dialog med DSB om DSB's andre typer tog som f.eks. IC2, IC3, IC4 men også de helt gamle ME lokomotiver.

I de følgende kapitler omtales resultatet af de enkelte arbejdspakker inklusive beskrivelser af det udviklede røgrensningssystem og den detaljeret redegørelse af målinger af emissionerne før og efter montering af emissionssystemet.

4. AP1, Forundersøgelser

For at være i stand til at designe et emissionsudstyr til en ukendt motor er det nødvendigt at være bekendt med motorens driftsprofil samt motorens rå-emissioner. Der er derfor udviklet en målemetode for udstødningsgasserne specielt til togdrift. I den indledende arbejdsopgave 1 (AP1) monteredes derfor en datalogger på toget, som skulle klarlægge driftsmønstret på toget under normal drift. De indsamlede data anvendes senere til at vælge, hvilken emissionsløsning, der er den bedst egnede i forhold til driften, motorens alder, motorens udledning af emissioner mv.

Det var også vigtigt at kende NO_x niveauerne, idet ekstrem høje NO_x værdier kan være uden for arbejdsområdet for de gængse NO_x sensorer og dermed ikke i stand til at måle og regulere doseringen af Urea.

Målet var derfor at implementere den bedst mulige emissionsteknologi ud fra de givne driftsforhold. Den mest optimale løsning er som tidligere beskrevet en løsning bestående af partikelfilter samt SCR.

Såfremt driftsforholdene ikke tillod denne løsning, ville der blive implementeret en mindre krævede katalysatorløsning, som også reducerer andelen af luftforurening fra togets motorer - dog langt fra den ønskede effekt. Derfor var målet en komplet reduktion af emissionerne fra udstødningsgassen, og en løsning med kun et partikelfilter eller en katalysator var alene en mulighed, hvis den bedste løsning ikke kunne lade sig gøre.

Arbejdsopgave 1 skulle derfor klarlægge driftsforholdene på MR toget med original lyddæmper, dvs. uden noget emissionsudstyr monteret.

Kort efter opstarten af denne arbejdsopgave viste det sig, at det desværre var nødvendigt at ændre projektet pga. uforudsete sikkerhedsprocedurer for test under kørsel med passagerer. Arbejdsopgaven har derfor været præget af mange opstartsvanskeligheder, primært på grund af, at den i arbejdsopgave 3 (udgået) planlagte kørsel med passagerer i en længere testperiode, hvor emissionsudstyret var påmonteret toget, ikke kunne gennemføres.

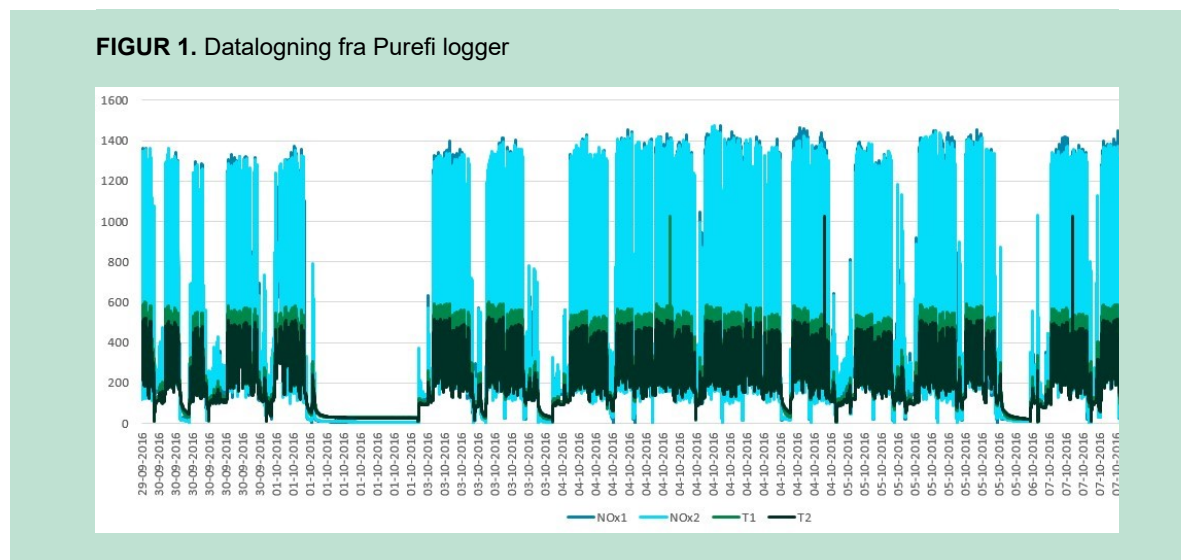
Det var planen at alle målinger på toget skulle foretages under helt normal drift, dvs. under normal kørsel med passagerer. Dette betød at alle måleapparater fra FORCE måtte placeres inde i toget, hvor passagererne også færdes. Efter mange timers indsats fra Purefi, FORCE samt DSB, var det ikke muligt at finde en løsning, så projektet kunne gennemføres som oprindeligt tiltænkt. Passagerkørsel er omfattet af ekstremt strenge sikkerhedskrav, og grundet en omfattende ansøgningsproces om sikkerhedsgodkendelse og lang behandlingstid i forhold til projektets varighed blev det endelig besluttet at ændre projektets indhold og gennemføre projektet uden passagerer samt med stillestående tog, dog med en reel belastning på motoren svarende til almindelig togdrift.

Det gav en række udfordringer mht. at dokumentere, om emissionsmålingerne ved stilstand fuldt ud kunne sammenlignes med virkelige driftsforhold. Det var derfor nødvendigt at gennemføre en omfattende forundersøgelse for at dokumentere, at denne type målinger er fuldt ud repræsentative. Arbejdsopgave 1 blev derfor ændret fra blot at være en forundersøgelse til at være en undersøgelse af, hvilken teknologi der skulle anvendes i arbejdsopgave 2. Arbejdsopgave 1 blev derfor meget omfattende med datalogning og analyse af kørecyklus mv. som senere skulle anvendes til at simulere de virkelige driftsforhold under målinger på toget under stilstand.

Til formålet blev der udviklet en avanceret datalogger som er i stand til at måle alle relevante parametre under normal kørsel på et tog i drift. Både måling af udstødningsstemperaturer, NO_x

niveauer, modtryk mv. blev udført på et tog i drift over en længere periode, og med en omfattende database for disse målinger kunne togets drift under normal kørsel endeligt fastlægges. Måleperioden strakte sig over en periode på ca. 6 måneder.

Nedenfor på FIGUR 1. **Datalogning fra Purefi logger**, ses et eksempel på hvordan en logfil ser ud.



Y-aksen viser temperaturen i °C samt NOx værdierne i ppm, mens x-aksen viser tiden. Farverne på graferne har følgende betydning:

- Grøn graf viser udstødningstemperaturen umiddelbart efter motoren.
- Sort graf viser udstødningstemperaturen ved lydæmper ca. 4 m fra motor.
- Lyseblå graf viser NOx i ppm målt på venstre side af V-motoren.
- Mørkeblå, den bagved liggende graf, viser NOx i ppm på højre side af motoren.

Motoren er opbygget således, at der både er en røggasafgang på højre og på venstre side af motoren, og for at være helt sikker på at der ikke er forskel, blev røggasserne fra begge sider af motoren målt. Målingerne på højre og venstre side af motoren skal helst være så tæt på hinanden som muligt.

4.1 Resultat af målinger uden emissionssystem

Som nævnt ovenfor har Purefi udviklet en datalogger specielt egnet til MR-togdrift, hvor en række særlige forhold tages i betragtning. Purefi og FORCE Technology udviklede sammen en målemetode, som simulerede almindelig togdrift. Denne test skulle klarlægge om et givent emissionssystem, eftermonteret på et MR-tog, kunne fungere tilfredsstillende under de givne driftsbetingelser hvad enten det er partikelfilter, katalysator, SCR eller kombination af alle.

4.1.1.1 Partikelfilteret

For at et partikelfilter kan fungere effektivt, er det en forudsætning at udstødningstemperaturen ikke er for lav under normale driftsforhold, således at partikelfilteret effektivt kan regenerere. Ligeledes skal partikelfilteret være i stand til at opsamle en vis mængde sod og kunne opnå en tilstrækkelig regenerering, så filteret ikke fyldes op og tilstopper.

Generelt kan det siges, at der både skal være en mindste udstødningstemperatur, og samtidig skal partikelfilteret kunne håndtere en regenerering baseret på den sodmængde, som skal afbrændes. Derfor skal både partikelfiltermateriale samt størrelse på filteret bestemmes ud fra de givne forhold, der svarer til normal drift for toget.

4.1.1.2 Katalysatoren DOC

Denne katalysator har til formål at reducere HC samt CO. Katalysatoren har i forbindelse med et partikelfilter en positiv indvirkning på regenerering af sodpartikler da NO/NO₂ balance forskydes mod større andel NO₂ som er et oxideringsmiddel til afbrænding af sodpartiklerne. Samtidig skal DOC'en reducere kulbrinterne ved dosering af diesel under processen for aktiv regenerering, når denne kombineres med et partikelfilter og/eller SCR.

4.1.1.3 SCR

SCR-katalysatoren har ligesom enhver anden katalysator behov for en vis temperatur for at starte en kemisk reaktion - i dette tilfælde omdannelsen af NOx som består af NO og NO₂ og ved samtidig tilsætning af Urea (ammoniak/NH₃):



Derudover skal den doserede ammoniak, som stadig er på væskeform inden doseringen, ligeledes nå at fordampe for at kunne reagere effektivt med NOx'en.

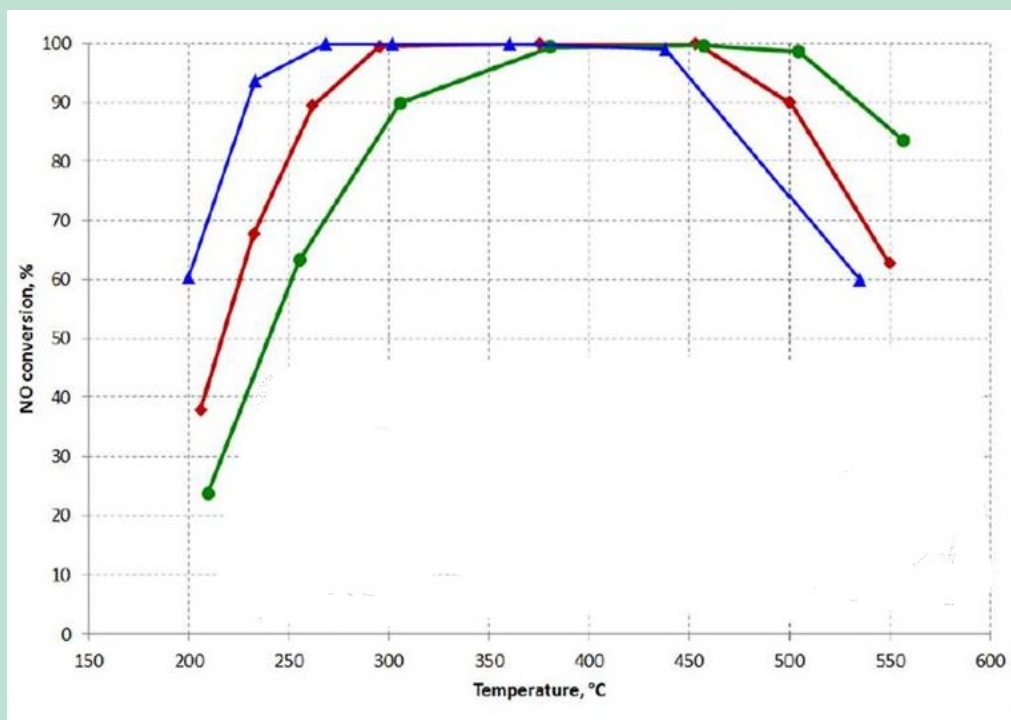
Udstødningstemperaturen skal derfor generelt ligge over ca. 240-250°C for at SCR-katalysatoren har en høj virkning. Men da der findes forskellige katalytiske belægningsarter til SCR-katalysatoren med forskellige egenskaber, hvor nogle er bedre til lavtemperatur drift og derfor mest effektive i de lave temperaturområder, mens andre er bedre til generelt høje temperaturer, er udstødningsgassernes minimumstemperatur i praksis afhængig af den valgte katalytiske belægning.

FIGUR 2. viser 3 forskellige SCR katalysator typer, med forskellige mekaniske samt kemiske egenskaber som enten er mere effektive i den lave temperaturende eller i den høje.

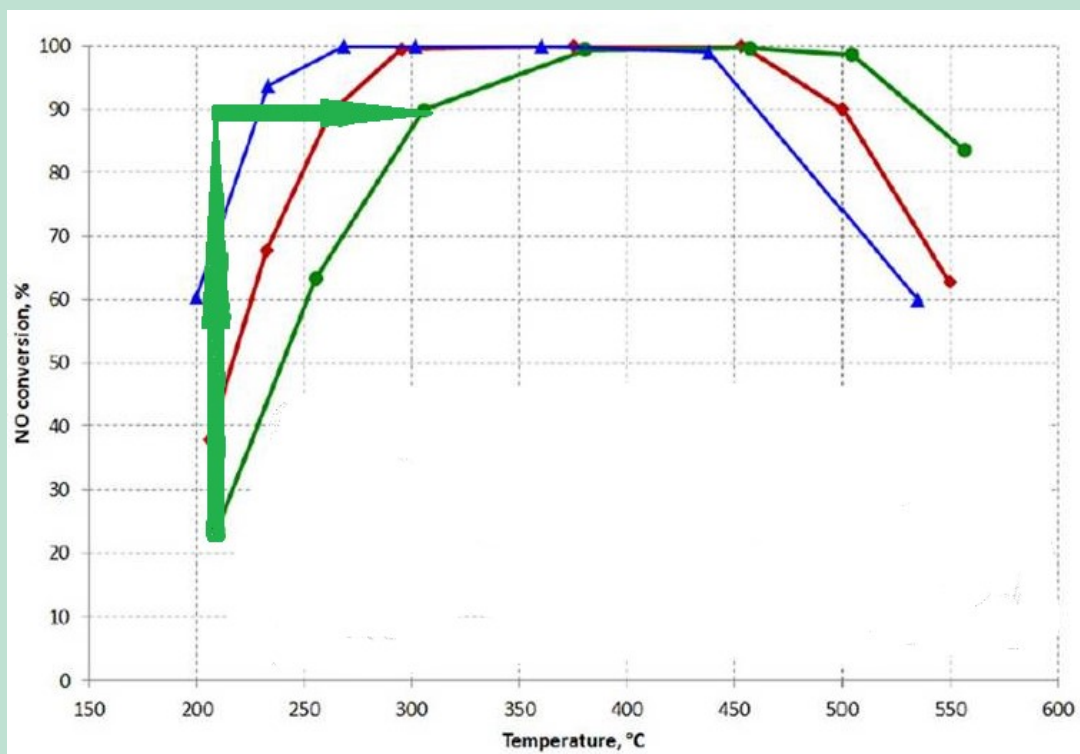
Datalogningen af udstødningstemperaturen på toget viste at udstødningstemperaturene kan nå op på ca. 500°C. Derfor er det vigtigt at den valgte SCR-katalysator er egnet til denne høje temperatur og ligeledes tage højde for at temperaturen er meget høj i det meste af tiden. Det betyder at katalysatoren skal have en mekanisk god stabilitet ved de høje temperaturer.

På FIGUR 3. ses netop den effekt, vi ønsker at opnå. Den grønne graf viser en katalysator type som mest egner sig til høje temperaturer. For at gøre katalysatoren mere effektiv i det lave temperaturområde er vi nødt til at tilføre varme til systemet. Dette kan gøres med Purefi ATC funktionen som er i stand til at løfte temperaturen fra ca. 200 til mindst 250-280 C, hvor der opnås en effektivitet for katalysatoren på over 90%. På denne måde opnås både høj effektivitet i de lave som i de høje temperaturområder.

FIGUR 2. Mulig NO_x reduktion som funktion af temperaturen



FIGUR 3. Mulig NO_x reduktion med Purefi Active Temperatur Control



De grønne pile viser hvordan kurven for effektiviteten ændres fra kun at være ca. 25% effektiv ved 200C til at den nu er helt oppe på en effektivitet svarende til ca. 90%.

For testsystemet til MR-toget vælges derfor denne "Højtemperatur katalysator". I testen vil denne funktion under målingerne beskrives som "målinger med temperaturstyring".

Det er naturligvis forventet, at det er de lave belastningstrin som bliver noget mere effektive, dvs. trin 1 samt trin 2 som begge er under ca. 200C. Udstødningstemperaturen for de 7 forskellige belastningstrin ses på FIGUR 6. **Test i forskellige motorbelastninger, testdag 1.**

4.1.1.4 DPF+SCR

Sammendrag af succeskriterier for en kombinationsløsning:

- Minimum udstødningstemperatur på ca. 200 °C
- Udstødningstemperaturer skal være over 200°C i ca. 30% af tiden.
- Valg af optimal SCR sammensætning for optimal reduktion i forhold til driftstemperaturen.
- NOx værdier skal være målbare for almindeligt tilgængelige NOx sensorer til automobil brug, dvs. under ca. 1500 ppm NOx.

4.2 Stationær test og beskrivelse

For udførelse af selve testen henvises til Force rapport samt til Purefis montering af datalogger. I denne beskrivelse er det specificeret, hvor målepunkterne/sensorerne er anbragt, og hele testen er beskrevet i Forces rapport under forskellige motorbelastninger mv.

En opsummering af rapporten:

Der er foretaget forskellige målinger svarende til de 7 forskellige belastningstrin, som motoren opererer i. Der er også lavet en simulering af en almindelig opstart/kørsel med toget i normal drift.

Dataloggeren har målt 4 variable:

- T1 – Udstødningstemperaturen lige efter motoren
- T2 - Udstødningstemperaturen lige efter lyddæmperen
- NOx1 – NOx i ppm målt på venstre side af motoren
- NOx2 – NOx i ppm målt på højre side af motoren som reference for NOx1.

Alle målinger, inklusive målingerne udført af Force Technology, er foretaget på venstre side af motoren, undtagen NOx2. FIGUR 4. herunder viser placering af følerne fra Purefi datalogger.

FIGUR 5. viser placering af Purefi datalogger i et af togets sideskabe.

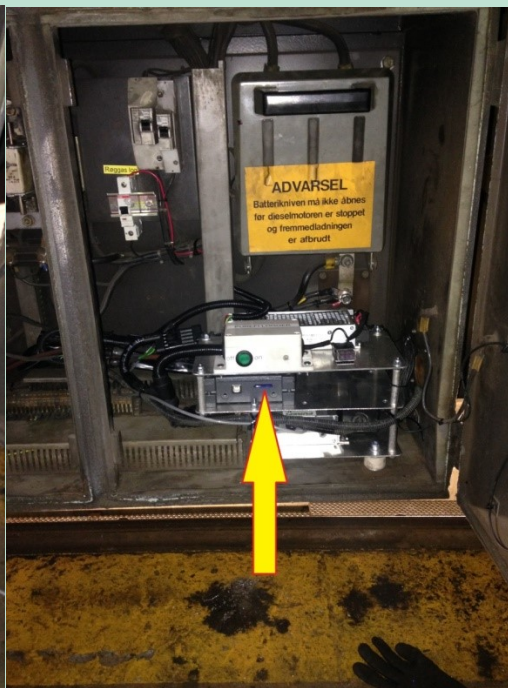
Da Purefi's datalogger kører på 24V, og togets elsystem kører på 110V jævnspænding anvendes en specielt converter som er godkendt til togkørsel. Converteren er også placeret sammen med dataloggeren.

Den gule pil viser enheden med SD kort hvor alle data som opsamles under kørsel bliver gemt. SD-kortet udskiftes blot til en nyt når dataene skal tømmes fra kortet.

FIGUR 4. Billeder fra montering af datalogger.



FIGUR 5. Billeder af Purefi datalogger, monteret i et af togets sideskabe.



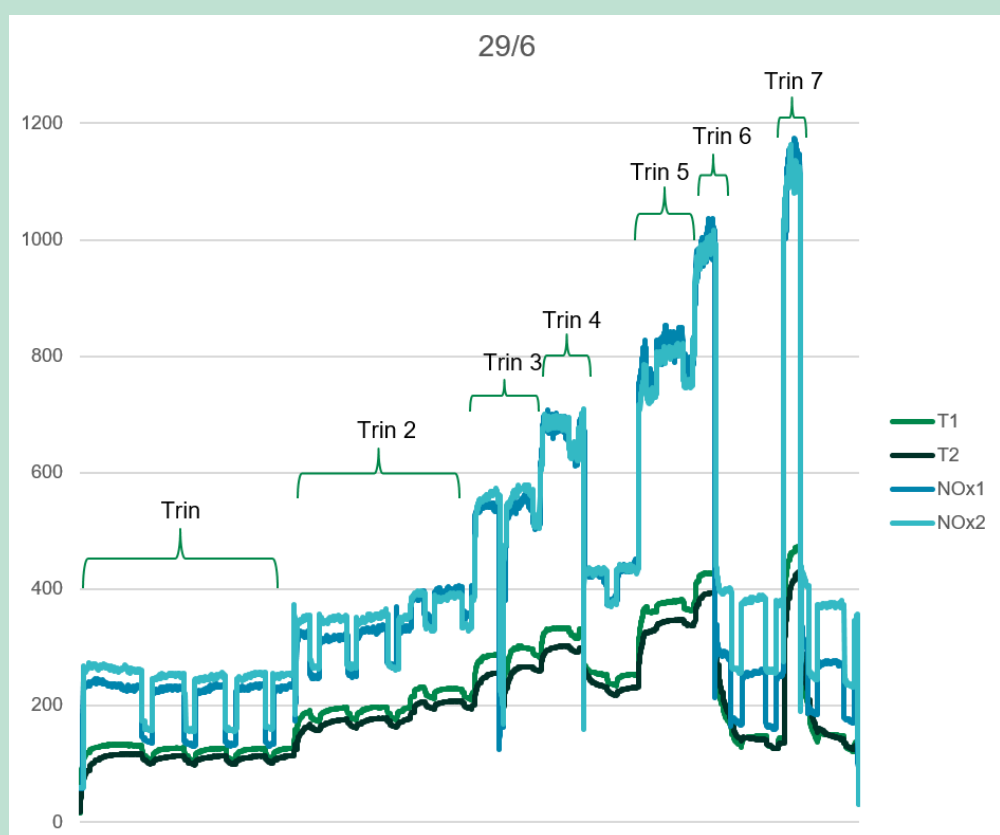
4.2.1 Resultater af målinger uden emissionsudstyr

For at give et bedre overblik, er graferne delt op, og viser en enkelt testdag hver. I forbindelse med opstart er der nogle høje fejlmålinger fra NOx sensorerne - disse er fjernet i de to grafer. En graf med alle rå-data fra de to testdage kan ses i bilag 1.

Test den. 29/6

Første test dag var målet at lave en måling for hver af motorens 7 belastningstrin. For hvert trin er der kørt test indtil udstødningstemperaturen (C°) og NOx forureningsniveauerne målt i ppm blev stabile som vist på FIGUR 6. Udstødningstemperatur og NOx værdierne er afbildet på Y-aksen, mens tiden er x-aksen.

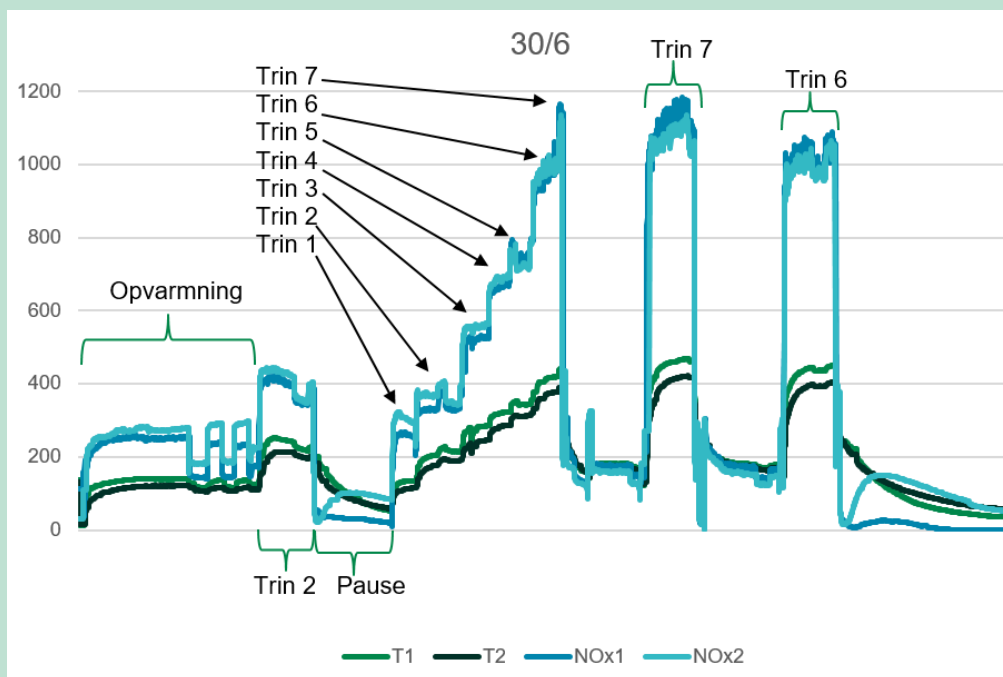
FIGUR 6. Test i forskellige motorbelastninger, testdag 1



Test den.30/6

På anden dagen var målet at lave en driftssimulering af toget ved normal anvendelse. Dette forløb består af: Opvarmning af motor – Kørsel til station – Pause før afgang – Kørsel ved forskellige belastningstrin. FIGUR 7. viser temperatur og NOx målt ved hjælp af Purefi datalogger. For hvert trin er der kørt test indtil udstødningstemperaturen (C°) og NOx forureningsniveauerne målt i ppm blev stabile som vist på FIGUR 6. Udstødningstemperatur og NOx værdierne er afbildet på Y-aksen, mens tiden er x-aksen.

FIGUR 7. Testdag 2



På denne graf ses også en typisk opstart af toget. Toget startes om morgenen, "opvarmning", igangsætning fra nattens holdeplads og kørsel frem til stationen hvor passagerer kan komme på, trin2 (men ikke forveksles med belastningstrin, trin 2), derefter en kort pause i tomgang, og efterfølgende test af forskellige testtrin fra trin 1 til trin 7.

Herefter simuleres stationsstandsning samt kraftig igangsætning til trin 7, pause og endnu en igangsætning til trin 6. Det er en meget typisk dagsdriftsprofil for toget, der er vist her.

4.2.2 Analyse af udstødningstemperaturen:

Udstødningstemperaturerne er den sorte samt den grønne graf. Det ses at temperaturen ved opvarmning og på belastningstrin 1 ligger på omkring 120°C. Allerede på belastningstrin 2 kommer temperaturen op og ligger stabilt omkring 200°C. Temperaturen stiger i takt med belastningen og toppe på ca. 460°C¹ ved belastningstrin 7.

4.2.3 Analyse af NOx emissionen

De to blå grafer viser NOx emissionen. NOx emissionen er stort set direkte sammenhængende med motorbelastningen. Højere motorbelastning medfører højere NOx værdi. NOx værdierne starter på omkring 250 ppm ved tomgang og ender på omkring 1200 ppm ved maksimal last. Alle værdier er indenfor den normale måleskala for NOx sensorerne, hvilket gør det muligt at måle niveauerne under alle forhold.

¹ Højeste temperatur blev målt til 473°C

4.2.4 Delkonklusion

Nærmere analyse af de målte data viser, at temperaturen ligger konstant over de 200°C med undtagelse af de perioder, hvor toget holder stille i længere tid. Partikelfilteret vil under alle omstændigheder fungere lige effektivt under hele driften. Det gælder både ved standsning på stationerne og under enhver form for kørsel.

For SCR katalysatorens vedkommende gælder det, at udstødningstemperaturen skal være over ca. 250°C, mens den målte temperatur ved standsning på stationer viser et fald mod slutningen af standsningen til omkring 200°C. Det er derfor her vigtigt at der tilføres varme i SCR-katalysatoren, således at den holdes konstant over 250°C for at opnå maksimal virkningsgrad af SCR'eren, som vist på FIGUR 3. Valget af SCR-katalysator går derfor på en højtemperaturkatalysator kombineret med Purefi ATC som er Purefi's temperaturstyring.

For perioden på 60 minutter er temperaturen over 230°C i 69,6%% af tiden, selvom der er et længere stop i samme periode. Kravet for SCR-systemet er, at det er mere end 50% af tiden. Konklusionen er at temperaturforholdene vurderes til at være yderst velegnede til et komplet emissionssystem.

Det kan derfor med stor sikkerhed konkluderes, at der er stort potentiale for reduktion af forureningen fra MR togene ved at eftermontere et emissionssystem.

4.2.5 Emissionsmålinger foretaget af FORCE Technology

Nu kan arbejdet med emissionsmålingerne endeligt sættes i gang, da forholdene beskrevet i de forrige afsnit viser, at både udstødningstemperaturen, partikeludledningen samt NOx udledningen har fornuftige værdier og er velegnede til efterbehandling af udstødningsgasserne. Force, Purefi og DSB har derfor i fællesskab udarbejdet flere ønskelige scenarier for, hvor det kunne være interessant at udføre emissionsmålinger. Alle målinger simulerer enten tomgangskørsel, acceleration, konstant kørsel, deceleration samt forskellige konstante motorbelastninger. Herunder på FIGUR 8. **Måleprogram for emissionsmålingerne**, ses de 7 udvalgte punkter hvor målingerne skal foretages.

FIGUR 8. Måleprogram for emissionsmålingerne

Tabel 1: Måleprogram for emissionstesten på MR 4018 den 29. juni 2016. De faktiske måletider var 20 minutter ved hvert trin, dog kun 7 minutter ved trin 6 og 7. Sidstnævnte skyldes, at gearkasseolien blev for varm (> 125°C), og testen måtte derfor afbrydes.

Måletid*	Belastnings-trin	Kommentarer
10:04:30 – 10:11:30	1	
10:30:30 – 10:38:30	2	
10:57:30 – 11:02:30	3	
11:08:30 – 11:15:30	4	
11:49:30 – 11:56:30	5	
12:03:30 – 12:07:30	6	Gearkasseolien overophedes (>125 °C), og testen må afbrydes. Motoren køles ned, indtil gearkasseolien er 80°C, hvorefter belastningstrin 7 testes.
12:33:30 – 12:37:30	7	Gearkasseolien overophedes (>125 °C), og testen må afbrydes.

*Måletiden angiver den periode, hvor emissionerne var stabil. Perioderne er anvendt i den senere beregning af koncentration, se afsnit 3.1.

Tabel 2: Måleprogram for emissionstesten på MR 4018 den 30. juni 2016. De faktiske måletider var 10 minutter ved hvert trin, dog kun 7 minutter ved trin 6 og 7. Sidstnævnte skyldes, at gearkasseolien blev for varm (> 125°C), og testen måtte derfor afbrydes. Den kortere måletid i forhold til testen den 29. juni skyldes et ønske om at tilpasse måletiden svarende til en kørsel mellem to stationer, når togsættet er i normal drift. Bemærk at rækkefølgen mellem trin 6 og 7 er byttet om.

Måletid*	Belastnings-trin	Kommentarer
09:34:30 – 09:35:30	Tomgang**	Koldstart - start
10:14:30 – 10:15:30	Tomgang**	Koldstart - slut
10:17:30 – 10:28:30	2	
Pause, der simulerer at togsættet holder og venter på stationen før afgang		
10:49:30 – 10:54:30	1	
10:57:30 – 11:01:30	2	
11:08:30 – 11:10:30	3	
11:13:30 – 11:16:30	4	
11:20:30 – 11:21:30	5	
12:26:30 – 12:34:30	6	Gearkasseolien overhedes (>125 °C), og testen må afbrydes. Motoren køles ned, indtil gearkasseolien er 80°C, hvorefter belastningstrin 7 testes.
11:55:30 – 11:59:30	7	Gearkasseolien overhedes (>125 °C), og testen må afbrydes.

*Måletiden angiver den periode, hvor emissionerne var stabil. Perioderne er anvendt i den senere beregning af koncentration, se afsnit 3.1.

**Emissionsmålinger i tomgang blev foretaget uden motorbelastning.

En mere fyldestgørende beskrivelse af målinger samt forholdene under testen kan læses i rapporten "DSB-Purefi Datarapport fase 1_FORCE"

Resultaterne fra målingerne er hentet fra ovennævnte rapport og er som vist i FIGUR 9. **Emissionsmålinger foretaget uden emissionsudstyr (råemissioner)**, værdierne er angivet i ppm.

FIGUR 9. Emissionsmålinger foretaget uden emissionsudstyr (råemissioner)

Tabel 5: Målinger på togsættet MR 4018 fra den 30/6 2016. Målested: Kobbervænget 55, Fredericia.

Controllertrin	Temp.	H ₂ O	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	NO ₂	N ₂ O	NH ₃	TVOC*	PM	PN
	°C	Vol% Våd	Vol% Tør	Vol% Tør	ppm Tør	ppm Tør	ppm Tør	ppm Tør	ppm Tør	ppm Tør	ppm C Tør	mg/m ³ (n,t) Tør	#/ cm ³ (n,t) Tør
Koldstart (start)	74	3,1	16,6	3,1	1096	220	169	50	< 2	< 1	41	28,6	1,4E8
Koldstart (slut)	102	3,8	18,5	1,8	598	233	152	81	< 2	< 1	40	12,0	5,8E7
Trin 2	193	5,3	15,63	3,82	718	396	304	92	< 2	< 1	30	36,8	1,8E8
Pause, der simulerer, at togsættet holder og venter på stationen før afgang													
Trin 1	108	4,1	17,7	2,3	594	308	217	90	< 2	< 1	27	22,6	4,6E7
Trin 2	172	5,1	15,9	3,6	760	372	271	101	< 2	< 1	31	23,3	1,1E8
Trin 3	233	6,1	14,2	4,9	512	528	448	80	< 2	< 1	23	22,9	1,1E8
Trin 4	272	6,7	13,3	5,6	343	653	596	57	< 2	< 1	17	20,7	9,9E7
Trin 5	298	7,7	12,9	5,8	286	693	648	45	< 2	< 1	13	23,5	1,1E8
Trin 6	369	6,7	11,5	7,5	200	1047	938	21	< 2	< 1	11	28,5	1,4E8
Trin 7	391	7,2	9,9	8,0	211	1054	1037	17	< 2	< 1	13	29,7	1,4E8

*TVOC (Total Volatile Organic Carbon). I praksis er det lig HC (Hydrocarbons).

Disse målinger kan nu sammenholdes med målingerne udført med Purefi's datalogger og det ses på tabellen ovenfor, at f.eks. maksimale NO_x værdier ligger på ca. 1000-1100ppm, mens Purefi's logger under reel kørsel viste værdier omkring 1200-1300ppm. Det er en afvigelse på ca. 10% og forklaringen skal nok findes i den måde motoren belastes på under reel drift i forhold til stillestående test. Vi har en forventning om, at motoren under drift belastes mere, da belastningen foregår over en længere periode end, hvad det er muligt at teste med stillestående tog. I starten af accelerationen ses der også NO_x værdier på ca. 1000-1100 ppm NO_x på Purefi's logger svarende til de af FORCE målte værdier, men en langvarig belastning øger sandsynligvis forbrændingstemperaturen i motoren pga. kraftig opvarmning af hele motorblok mv således at NO_x niveauet er en anelse højere efter nogle minutters kørsel med maksimal belastning.

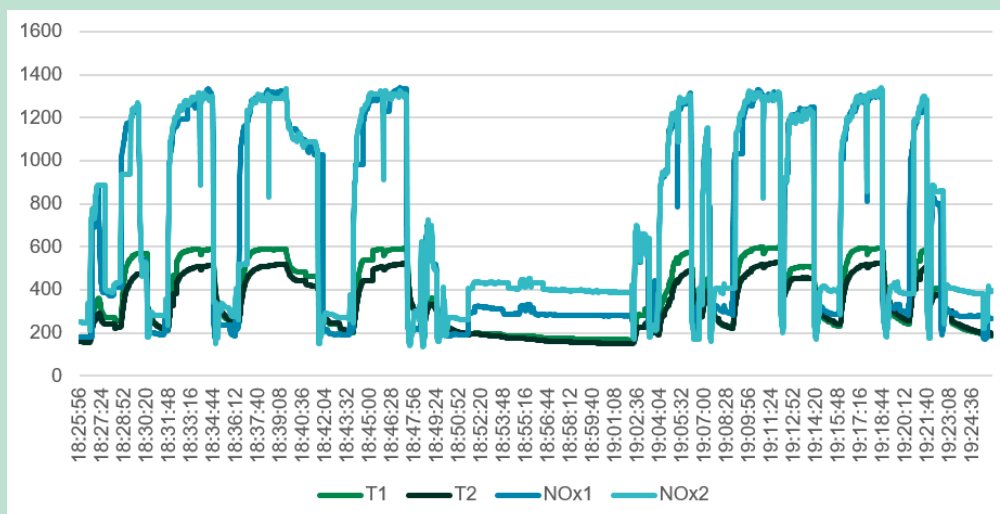
4.3 Målinger under drift.

Der er udført målinger på MR4018 under normal drift med Purefi datalogger. Disse målinger er foretaget uden at Force Technology's udstyr har været monteret. Det er derfor udelukkende **Purefi's** måleudstyr som har målt under normale driftsforhold på et kørende tog. Målingerne er foretaget i perioden 31/6 2016 til 29/8 2016. I denne periode har toget været på værksted nogle gange, grundet en overophedet motor.

4.3.1 Resultater med datalogger

De samlede resultater af målingerne under normale driftsforhold kan ses i bilag 2. Som et eksempel vises på FIGUR 10. **Datalogning med Purefi datalogger på MR-tog**, som er målinger for en 60 minutters drift den 29/8 fra kl. 18:25 til kl.19:25 Målingerne viser en høj temperatur i forhold til den stationære test. Her ligger udstødningstemperaturen oppe på omkring 590°C og den falder til ca. 172°C efter ca. 10 minutters stop.

FIGUR 10. Datalogning med Purefi datalogger på MR-tog



5. AP2, udvikling af emissionssystemet

5.1 Indledning

I arbejdsplan 1 blev togets driftsprofil fastlagt, hvor en række udstødningsvariable blev analyseret, og der blev udført emissionsmålinger på togets motor uden nogen form for efterbehandling af udstødningsgasserne. Alle disse data blev indsamlet og analyseret i arbejdsplan 1 og konklusionen var, at der med stor sikkerhed kan eftermonteres både partikelfilter samt SCR på togets motorer, da de opfylder de kriterier som er nødvendige for at et emissionssystem kan fungere under de givne forhold. I det efterfølgende fokuseres der derfor på valget af emissionsudstyret bestående af både partikler samt SCR, hvor partikelfilteret har til formål at reducere mængden af partikler mens SCR-katalysatoren samt de andre indbyggede katalysatorer har til formål at reducere de gasformige emissioner som HC, CO og NOx. Dette system markedsføres under navnet Purefi DPF-SCR_ATC og som betegnelserne angiver, består dette system både af et DPF (partikelfilter), samt af et SCR-katalysator (Selective Catalytic Reduction), som ved hjælp af tilsætning af Urea (AdBlue) i udstødningen reducerer NOx gasserne. Derudover ender navnet med betegnelsen ATC som står for Active Temperature Control. Denne funktion er specielt udviklet af Purefi, og formålet er at styre temperaturen i emissionssystemet til gavn for en mere effektiv reduktion af de gasformige udstødningsgasser.

Betydningen af forkortelserne er som følge:

- DPF (Diesel partikelfilter)
- SCR (NOx reduktions katalysator)
- ATC (Aktiv temperaturstyring af emissionssystemet)

Systemet er specielt velegnet til anvendelse under ekstreme forhold og udmærker sig ved både at kunne håndtere lavtemperaturdrift som højtemperaturdrift, men kan også håndtere gamle og forurenende motorer med høj udledning af sod. Partikelfiltret regenereres løbende men om nødvendigt også aktivt, hvis sodophobningen stiger utilsigtet og dermed også modtrykket i systemet. Både den aktive regenerering af partikelfilteret og den aktive temperaturstyring er fuldautomatisk og kan programmeres til via Purefi Software.

Purefi DPF-SCR_ATC er derfor et yderst effektivt system, som er specielt velegnet til togdrift, og de ældre motorer i togene kan netop håndteres med dette system.

Fra andre studier har Purefi DPF-SCR_ATC vist at følgende reduktionsgrader kan opnås:

- Partikler > 99.9 %
- HC > 90%
- CO > 95-98 %
- NOx >90-95%

Det forventes derfor at det er muligt at nærme sig disse værdier, selvom udgangspunktet ved projektansøgning er en smule mere konservativt grundet den meget gamle motor.

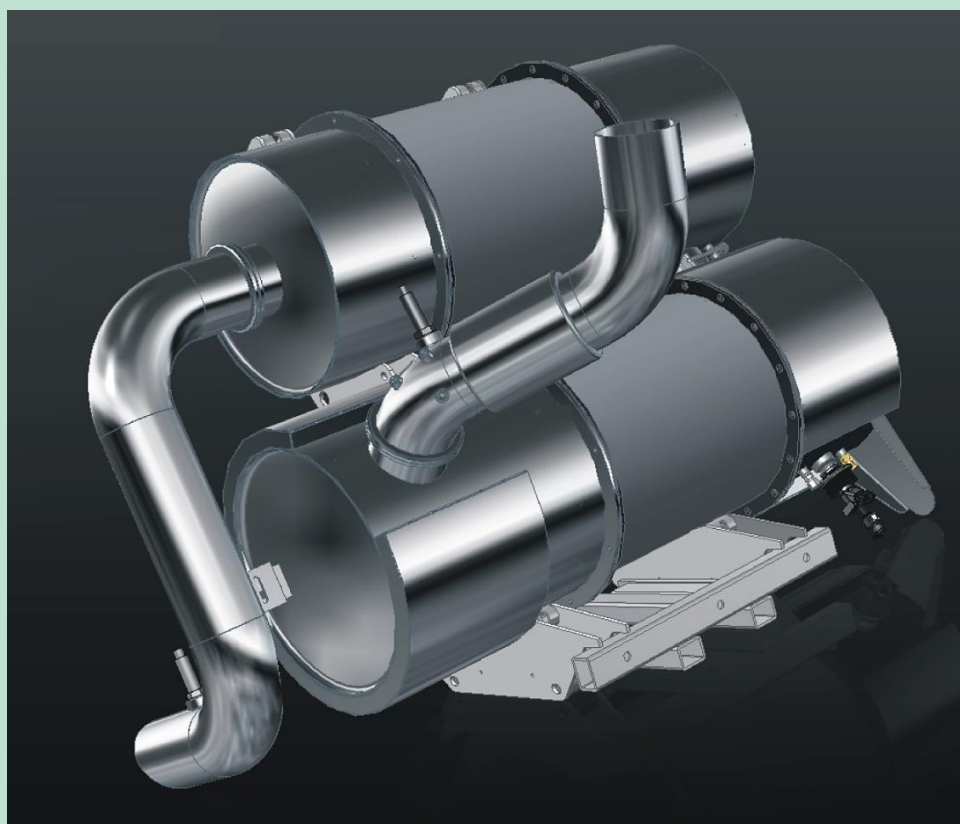
En lignende variant af dette system har været testet under meget svære driftsforhold, bl.a. ved buskørsel i København i forbindelse med et projekt gennemført i samarbejdet med et andet af Miljøstyrelsens projekter under navnet "Eftermontering af emissionsudstyr på busser" med

projekt nummer "Miljøprojekt nr. 1795, 2015". Dette projekt strakte sig over ca. 2 år og på intet tidspunkt blev der observeret nedbrud af partikelfilteret grundet tilstopning eller lignende. Der videreudvikles derfor på dette system i projektet, og det er forventet at lignende tilfredsstillende resultater kan opnås også i dette projekt.

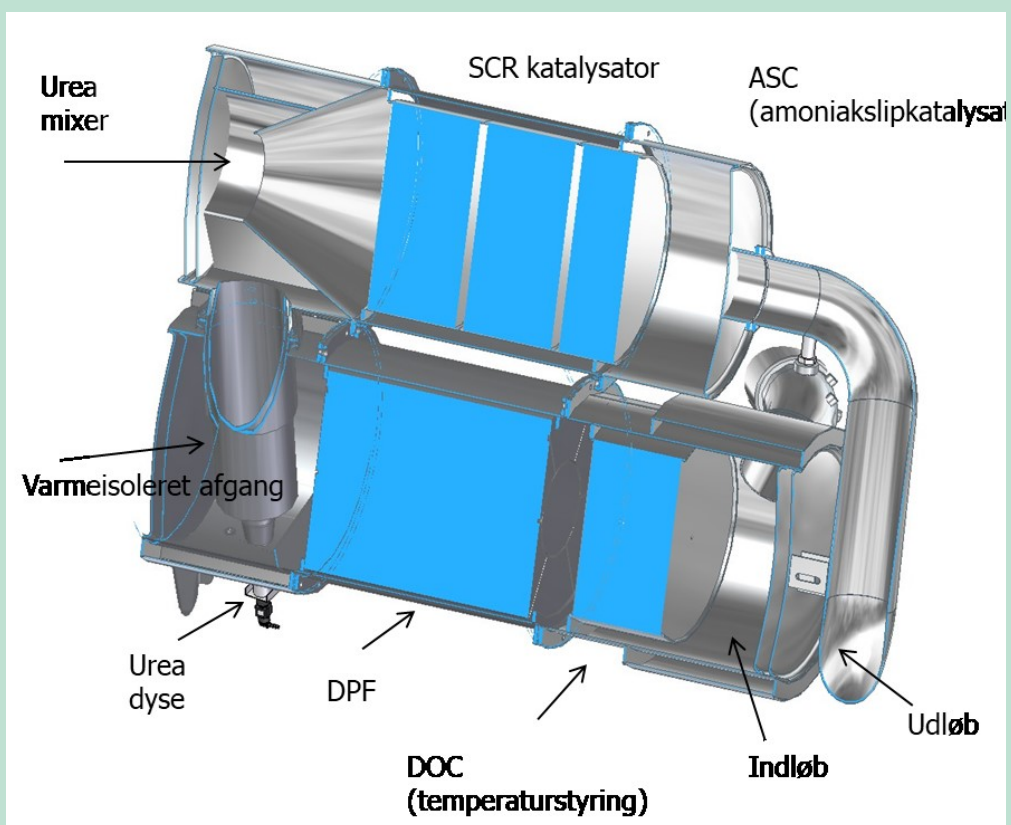
Nedenunder på FIGUR 11. **Purefi DPF-SCR ATC system, Purefi emissionssystem med temperaturstyring**. Emissionssystemet er delt i to enheder - forinden partikelfilteret og foroven SCR-katalysatoren.

På FIGUR 12. **Gennemskåret Purefi DPF-SCR_ATC** ses emissionssystemets indre komponenter samt beskrivelse af de enkelte dele.

FIGUR 11. Purefi DPF-SCR ATC system, Purefi emissionssystem med temperaturstyring



FIGUR 12. Gennemskåret Purefi DPF-SCR_ATC



5.2 Udvikling af Purefi DPF-SCR

Som beskrevet i forrige afsnit udvikles i denne arbejdsplanke et emissionssystem bestående af et dieselpartikelfilter samt af en SCR-katalysator med aktiv regenerering af partikelfilteret samt med aktiv temperaturstyring af SCR-katalysatoren. Det er derfor meget vigtigt at vælge systemets materialer ud fra de givne forhold som holdbarhed til ekstreme udstødningstemperaturer, samt håndtering af regenerering af partikelfilteret under vanskelige vilkår. Sådant en kombination er normalt ikke tilgængelig på markedet, og Purefi har derfor udviklet og testet forskellige sammensætninger af katalytiske overflader som belægges oven på filtermaterialer og på SCR-katalysatorerne. Da udstødningstemperaturerne normalt ikke forventes at overstige 4-500 grader, er sådanne teknologier normalt ikke udviklede og tilgængelige. Purefi har derfor i samarbejde med underleverandørerne udviklet nye sammensætninger af katalytiske belægninger som skal testes i dette projekt.

En vigtig faktor for design af Purefi emissionssystem til ekstreme udstødningsbetingelser er følgende:

- Valg af partikelfiltermateriale
- Valg af DOC til aktiv regenerering
- Valg af SCR-katalysator materiale samt katalytisk belægning

5.2.1 Regenerering af DOC+DPF:

Den første del af emissionssystemet, som udstødningsgassen møder, er et såkaldt DOC (Diesel Oxidation Catalysts). DOC'en består af en metalkerne med en række åbne kanaler som er belagt med ædelmetal, primært platin. Efter passage gennem denne katalysator findes partikelfilteret. Partikelfilteret er en keramisk SiC (Silicium Carbid) kerne, et såkaldt wall flow filter, som yderligere er belagt med en blanding af ædelmetaller, primært platin. Platin har den egenskab at kunne flytte balancen mellem NO og NO₂ i udstødningsgassen. I en normal sammensætning af udstødningsgas kan det forventes at der er ca. 10% NO₂ mens resten er NO. Da det er NO₂ som går i forbindelse med sodpartiklerne er det derfor en fordel mht regenerering af partikelfilteret at der er så meget NO₂ som muligt. Platinen gør at balancen nu kan ænders til at være i omegnen ca. 50/50 af forholdet mellem NO/NO₂. Dette er specielt ønskeligt når motoren er af ældre dato med meget høj sodudledning samt når udstødningstemperaturen er relativt lav. Forholdet er ikke konstant og kan endvidere stige til endnu højere andel af NO₂ ved højere temperaturer, men det er faktisk muligt at styre dette forhold meget præcist ved hjælp af tilsætning/dosering af meget små mængder diesel med Purefi HC-injection eller dieselsprøjtning bruges til opvarmning af emissionssystemet). En anden positiv sideeffekt, som NO₂ overskuddet har, findes i SCR katalysatoren. NO₂ er netop den gas som omdannes lettest i SCR-katalysatoren til en uskadelig gas og dermed opnås den ønskede reduktion af den samlede NO_x andel i SCR-katalysatoren. Netop pga. SCR katalysatorens behov for NO₂ er det derfor ligeledes vigtigt at der selv efter reaktionen af NO₂ med sodpartiklerne i partikelfilteret stadig er overskud af NO₂.

Som skrevet ovenfor aktiveres regenereringen af sodpartikler ved hjælp af NO₂ som passiv regenerering. Passiv regenerering er typisk optimal omkring 280-380°C, mens aktiv regenerering kan aktiveres allerede ved 180-200°C. En anden fordel ved den aktive regenerering er også at regenereringstiden er meget kortere (5-10min) end ved passiv regenerering som kræver en konstant højere udstødningstemperatur.

Det viser sig desværre i adskillige situationer, at passiv regenerering ikke altid er nok til at holde en fornuftig afbrænding af sodpartiklerne og dermed vil modtrykket i emissionssystemet stige. Højt modtryk over emissionssystemet kan medføre både en uønsket negativ effekt på brændstofforbruget, men kan også lede til mekaniske skader på motorkomponenter. Det er derfor ekstremt vigtigt at partikelfilteret kan regenereres under alle forhold, også når den passive regenerering ikke er tilstrækkelig. Med Purefi emissionssystemet kan dette klares med det såkaldte Purefi Active System, som anvender diesel som energikilde til at hæve udstødningstemperaturen. En meget lille mængde diesel doseres i udstødningssystemet umiddelbart før emissionssystemet og når denne dieseltåge af fine dieselpartikler passerer gennem den første del af emissionssystemet, den såkaldte DOC, vil der ved kontakt med det belagte ædelmetal starte en katalytisk proces eller afbrænding af diesel som under den katalytiske proces frigiver varme som netop opvarmer hele emissionssystemet.

Ved at kontrollere den doserede mængde af diesel kan der opnås en temperatur mellem 450-650°C som er tilstrækkelig til at sætte en regenereringsproces i gang. Efter opnået regenerering af filteret vil den aktive regenerering lukke ned for denne funktion indtil modtrykket på ny stiger til et niveau, så aktiv regenerering igen er nødvendig. Under denne proces skal filtermaterialet kunne modstå den kraftige temperaturstigning og efterfølgende afkøling uden at det revner eller smelte. Det er et stort problem for mange "standard" filtre og de egner sig derfor ikke til denne type driftsforhold. Det filtermateriale, som egner bedst til denne type drift, er silicium carbid (SiC). SiC er yderst robust og har et højere smeltepunkt end de mest gængse filtre på markedet.

5.2.2 Reduktion af NOx:

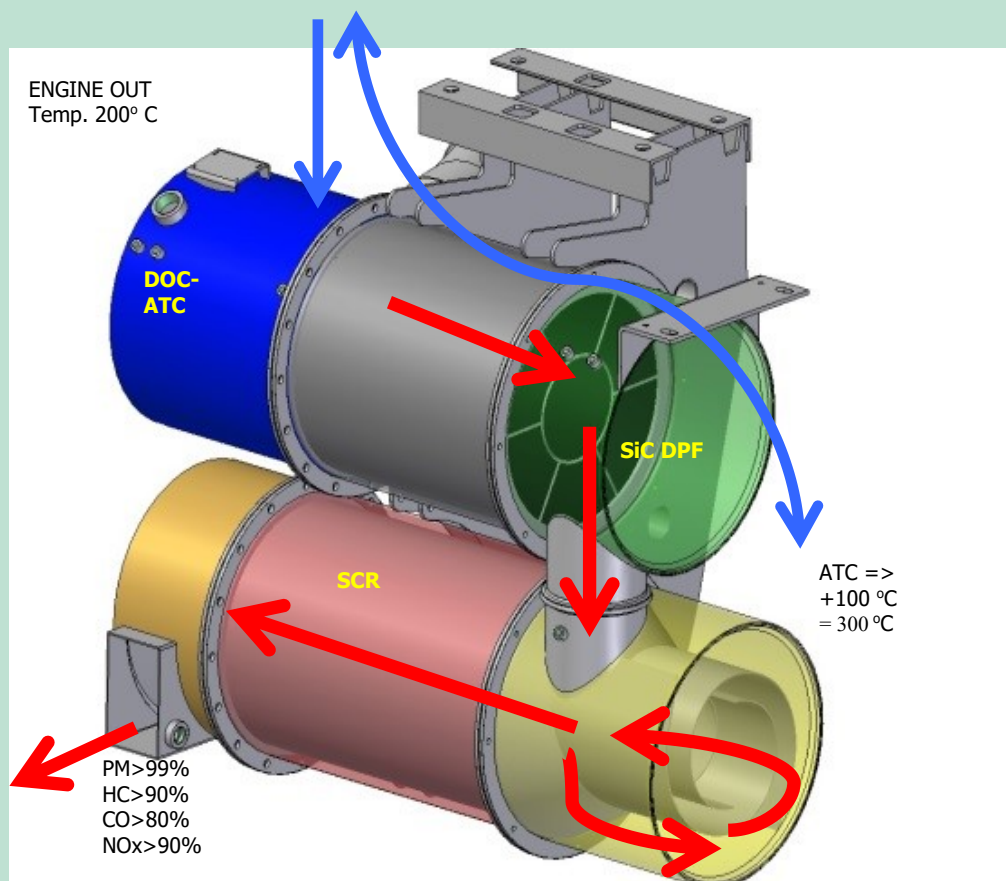
Succeskriteriet for et standard SCR system er, at udstødningstemperaturen ligger konstant over 250-260°C. For et Purefi SCR system er det dog tilstrækkeligt at temperaturen er over 200°C i ca. 50% af tiden. Dette er muliggjort med Purefi ATC (Active Temperature Control) som er i stand til at opvarme hele emissionssystemet til en temperatur, hvor SCR systemet kan reducere effektivt. Selvom udstødningstemperaturen fra motoren falder, kan temperaturen i emissionssystemet med ATC blive reguleret til at holde temperaturen høj selv ved lavere indløbstemperature.

Den efterfølgende skitse på FIGUR 13. Purefi DPF-SCR_ATC illustrerer, hvordan opvarmningen gennem systemet ser ud. Tallene på figuren er kun til illustration.

5.2.3 Temperaturlagring og temperaturstyring

Temperaturlagring er en faktor, som ikke ses på disse målinger. Målinger foretaget uden emissionssystem er ikke direkte repræsentative for målinger foretaget med et emissionssystem. Det skyldes at der i et emissionssystem er en masse, som opvarmes og virker som et varmelager, der holder en jævn temperatur. Dermed forbliver temperaturen i emissionssystemet jævn, selvom udstødningstemperaturen fra motoren varierer kraftigt.

FIGUR 13. Purefi DPF-SCR_ATC



Dette betyder at den maksimale udstødningstemperatur målt uden emissionssystem teoretisk er den samme som eller lidt over den maksimale udstødningstemperatur målt med et emissionssystem. Gennemsnitstemperaturen vil dog være væsentlig højere med emissionsudstyr, end den vil være uden (under nedkøling). Dette skyldes oplagring af varme i DPF monolitten samt i SCR monolitten. Dette er, specielt for SCR, en stor fordel, da udstødningstemperaturen her holdes jævn.

FIGUR 13. **Purefi DPF-SCR_ATC** viser det komplette system som består af både partikelfilter samt SCR.

5.3 Testvogn med testudstyr

For at lette arbejdet under testen byggede Purefi en mobil vogn, som vist på FIGUR 14. **Mobil testvogn med Purefi emissionsudstyr**. Testvognen er udstyret med alt det nødvendige udstyr for at systemet kan fungere når det sammenkobles med togets motor. Vognen har til formål nemt at kunne blive flyttet rundt, samt at al montering af både DPF-SCR samt hele den

elektriske styring kan sammenbygges på vognen og testes, inden systemet tages i brug under selve testen i Fredericia.

En tilsvarende model bygges til intern test hos Purefi, som stilles op i Purefi's testbænk (motorstander), hvor systemet kan afprøves samt indstilles før den egentlige test finder sted på toget.

FIGUR 14. Mobil testvogn med Purefi emissionsudstyr



På FIGUR 15. Indløbsdel på Purefi emissionsudstyr, ses føler samt indsprøjtningdyse til dosering af diesel i emissionssystemet til regulering af SCR temperaturen eller til aktiv regenerering af partikelfilteret.

FIGUR 15. Indløbsdel på Purefi emissionsudstyr



Den første del, som ses på FIGUR 15. **Indløbsdel på Purefi emissionsudstyr** er indløbsdelen til DOC'en, hvor der er indbygget en metalkatalysator specielt designet til aktiv regenerering. Det ses også på figuren at indløbsdelen har et ekstra isolerende lag som har til formål at mindske varmestrålingen samt reducere overfladetemperaturen.

FIGUR 16. Purefi testvogn



På FIGUR 16. **Purefi testvogn**, ses bl.a. de to hvide tanke som er hhv. fra venstre, Urea tank og i midten en dieseltank. I aluminiumsboksen til højre er al elektronik samt både Ureapumpe, dieselpumpe, datalogger indbygget i samme enhed.

FIGUR 17. Purefi emissionsudstyr i testbænk



På FIGUR 18. , ses opstillingen af emissionsudstyret i testbænk inden den fastlagte test i Fredericia hvor FORCE udfører målingerne på toget.

Under den indledende test kan alle funktioner testes, og der foretages også en funktionstest af hele systemet som f.eks. reduktion af NOx med et FTIR måleapparat, samt opvarmningsfunktionen for at sikre at alt virker, når den endelige test skal foretages. Det var også muligt at udføre en grovindstilling af doseringslogikken, mens finjustering foretages på selve toget. Efter denne test hos Purefi i Farum er der yderligere afsat 1 uge til test i Fredericia inden FORCE udfører de endelige emissionsmålinger.

Testen, som Purefi selv udfører ugen før FORCE Technology, er sammenlignelig med den test, som Force udfører under selve emissionsmålingerne og det forventes derfor, at det under denne test blot skal bekræftes at alt fungerer som det skal samt at de sidste finjusteringer skal foretages baseret på grovindstillingerne fra Purefi's testbænk.

6. Udførelse af målinger med emissionssystem

6.1 Formål

Formålet med denne test er at undersøge effekten af det påmonterede emissionssystem på MR toget. Som beskrevet i foregående afsnit, er emissionssystemet allerede finjusteret, først i testbænk og derefter på toget. Denne test skal derfor bruges til at dokumentere effekten, mens alle målinger nu foretages af FORCE Technology.

6.2 Montering af emissionssystem på toget

Nedenfor ses et billede af emissionssystemet (figur 18), som er tilkøbt motorens afgangsrør. Hele emissionssystemet er placeret på den i forvejen opbyggede "testvogn". Testvognen viste hurtigt sin fordel da systemet relativt hurtigt kunne tilsluttes motoren og testene kunne startes relativt kort efter.

FIGUR 18. Purefi emissionsudstyr sammenkoblet på MR-togets motor



6.3 Emissionstesten


I arbejdsplanke 1 blev emissionsmålingerne foretaget på MR togets motor uden nogen form for efterbehandling og efter den i arbejdsplanke 1 udarbejdet testprocedure, hvor der udføres en driftssimulering af forskellige motorbelastninger.

6.3.1 Resultater af målinger udført af FORCE TECHNOLOGY

Alle målinger, målemetoder, resultater, opstilling mv. findes nøje beskrevet i rapporten fra Force Technology, "Datarapport 116-23832.02". Som nævnt tidligere kan rapporten rekvireres hos Purefi. Det grundlæggende i disse målinger er, at de er udført på nøjagtig samme måde, dvs. under samme betingelser, som målingerne foretaget under arbejdsplanke 1, som var uden emissionssystem. Målingerne foretages i denne arbejdsplanke med påmonteret emissionssystem, og i rapporten findes også sammenligninger, som viser reduktionsgrad mv., således at effektiviteten af Purefi's emissionssystem direkte kan aflæses.

FIGUR 19. Emissioner med Purefi DPF-SCR med og uden temperaturstyring

Rapport 116-23832.05



Tabel 17: Målinger på togsættet MR 4018 fra den 1/3 2017. Målested: Kobbelvænget 59, Fredericia.
Resultaterne er gennemsnitsværdier taget over en stabil måleperiode under hver controllertrin. Gaskoncentrationer i mg/m³.

Controllertrin	Temp. °C	flow m ³ (n,t)/h	H ₂ O	O ₂	CO ₂	CO	NO _x	NO	NO ₂	N ₂ O	NH ₃	TVOC*	PM	PN	Effekt kW
			Vol% V@d	Vol%	Vol%	mg/m ³ (n,t)									
Tør															
Varm motor. Test med varmestyring på det emissionsreducerende udstyr															
Trin 1	232	249	4,2	15,9	3,6	4	25	16	<5	135	17	25	0,004	2,0E4	25
Trin 2	220	282	4,5	15,0	4,4	3	14	5	6	71	41	20	0,006	3,0E4	33
Trin 3	248	339	5,2	13,9	5,2	5	19	11	<5	45	19	16	0,007	3,5E4	47
Trin 4	275	367	5,8	12,9	5,9	5	41	27	<5	35	10	14	0,011	5,5E4	59
Trin 5	296	409	6,1	12,3	6,4	6	91	58	<5	53	6	11	0,017	8,3E4	70
Trin 6	340	432	7,1	11,4	7,0	5	118	72	8	24	4	12	0,12	6,0E5	80
Trin 7	343	502	7,9	9,6	8,3	5	304	177	33	7	3	11	0,63	3,0E6	120
Varm motor. Test uden varmestyring på det emissionsreducerende udstyr															
Trin 1	159	276	3,5	16,3	3,5	13	462	315	<5	67	59	6	0,004	2,3E4	28
Trin 2	193	330	4,0	15,6	4,0	15	181	119	<5	75	>100	10	0,004	1,9E4	39
Trin 3	241	382	5,1	14,0	5,1	5	11	5	<5	38	25	5	0,008	3,7E4	57
Trin 4	260	419	5,6	13,3	5,7	4	37	23	<5	46	10	4	0,007	3,3E4	69
Trin 5	295	453	5,9	12,5	6,2	4	367	160	123	41	6	4	0,016	7,9E4	80
Trin 6	331	484	6,7	11,2	7,2	4	505	260	106	21	5	4	0,403	1,9E6	99
Trin 7	335	505	7,3	10,0	8,1	4	163	95	18	26	4	4	0,78	3,7E6	120

*TVOC (Total Volatile Organic Carbon). I praksis er det lig HC (Hydrocarbons).
 **Beregnet motoreffekt med en antaget effektivitet på 40%

Ovenstående tabel på FIGUR 19. Emissioner med Purefi DPF-SCR med og uden temperaturstyring viser resultaterne fra testen i de forskellige kontroltrin, som er motorbelastninger fordelt fra tomgang, trin 1 og til maksimal motorbelastning, som er trin 7.

Herunder på FIGUR 20. Råemissioner fra MR-togets motor, udført under arbejdsplanke 1, dvs. uden emissionssystem.

FIGUR 20. Råemissioner fra MR-togets motor

Tabel 11: Målinger på togsættet MR 4018 fra den 29/6 2016. Målested: Kobbervænget 55, Fredericia. Gaskoncentrationer i mg/m³.

Controllertrin	Temp. °C	flow m ³ (n,t)/h	H ₂ O	O ₂	CO _x	CO	NO _x	NO	NO ₂	N ₂ O	NH ₃	TVOC*	PM	PN	
			Vol%	Vol%	Vol%										
			Våd	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør	Tør
Trin 1	166	310	4,8	16,4	3,3	915	735	342	211	< 2	< 1	18	26,8	1,3E11	
Trin 2	196	372	5,2	15,7	3,8	901	777	374	204	< 2	< 1	15	34,4	1,7E11	
Trin 3	255	441	6,0	14,2	4,9	567	1101	630	135	< 2	< 1	9,6	34,3	1,7E11	
Trin 4	286	494	6,4	13,3	5,6	404	1323	802	94	< 2	< 1	6,5	29,3	1,4E11	
Trin 5	329	516	6,9	12,3	6,2	300	1569	984	60	< 2	< 1	6,4	27,3	1,3E11	
Trin 6	368	567	7,7	11,0	7,2	259	1914	1224	36	< 2	< 1	5,9	29,0	1,4E11	
Trin 7	385	597	7,6	9,7	8,2	263	2165	1384	43	< 2	< 1	7,8	36,8	1,8E11	

*TVOC (Total Volatile Organic Carbon). I praksis er det lig HC (Hydrocarbons).

Tallene i tabellerne viser, at efterbehandlingen af udstødningsgasserne har været yderst effektiv, selv på denne meget gamle motor.

- Partikelreduktionen er over 99,9%, både vægt som antal partikler.
- NO_x reduktionen er ligeledes meget effektiv og værdierne ses at ligge mellem ca.86-98% reduktion.

Sammendrag af alle emissioner reduktionsgrader ses i efterfølgende tabel FIGUR 21. Reduktionsgrad af emissionerne med Purefi DPF-SCR_ATC.

FIGUR 21. Reduktionsgrad af emissionerne med Purefi DPF-SCR_ATC

Tabel 8: Reduktionsgrad for CO, NO_x, NO, NO₂, HC, PM og PN. Testen er foretaget på varm motor med temperaturstyring og sammenlignet med målinger uden kombinationssystem, fase 1. Enhed: %

Varm motor med temperaturstyring							
	CO	NO _x	NO	NO ₂	HC	PM	PN
Trin 1	99,59	96,65	95,29	98,06	-35,29	99,99	99,99998
Trin 2	99,72	98,15	98,57	96,97	-35,71	99,98	99,99998
Trin 3	99,12	98,32	98,30	96,97	-66,67	99,98	99,99998
Trin 4	98,76	96,89	96,66	95,65	-108,33	99,96	99,99996
Trin 5	97,92	94,24	94,15	93,10	-75,00	99,94	99,99994
Trin 6	98,07	93,88	94,20	77,78	-100,00	99,59	99,99958
Trin 7	98,10	85,97	87,23	23,81	-40,00	98,29	99,99831

HC emissionen ser umiddelbart ud til at være steget med en stor procentstigning. Grunden er dog, at HC emissionen uden emissionssystem er så lave, at selv små stigninger som følge af den aktive temperaturstyring og minimale HC udslip resulterer i et stort procentvis udslag. Regnet i ppm HC er stigningen dog ekstrem lav og helt uden betydning for HC udslippet.

6.3.2 Gældende EU's grænseværdier for tog sammenlignet med måleresultater opnået med Purefi DPF-SCR

For at kunne anvende de målte resultater anvendes en række antagelser samt omregningsfaktorer, således at det er muligt at anvende de målte værdier til sammenligning med gældende normer. Dette skyldes primært at gældende normer er baseret på udledning/motoreffekt i g/kWh, mens de målte værdier er f.eks. i ppm i røggasserne. For at kunne bruge disse værdier til sammenligning skal motoreffekten kendes. Dette gøres ved at beregne effekten ud fra en række faktorer. Derefter vil det være muligt at sammenligne målte værdier med dagens gældende standarder for tog. Man kan læse mere om metoder mv. i Force Technologys rapport, hvor fremgangsmåde er beskrevet nærmere.

Vigtig information om de efterfølgende sammenligninger:

Dagens gældende standard er Stage IIIB, men Purefi og Force vil yderligere lave sammenligning med endnu ikke gældende normer, med andre ord, den kommende norm som kaldes STAGE V. dvs. målet er at kunne imødekomme den kommende norm for 2021 som ses på FIGUR 22. EU's grænseværdier for udledning af udstødningsgasser.

FIGUR 22. EU's grænseværdier for udledning af udstødningsgasser.

Tabel 9: EU's grænseværdi, Stage III B samt Stage V for Rail Traction Engines (motorvogne)². Grænseværdierne er formelt set kun gældende ved typegodkendelse.

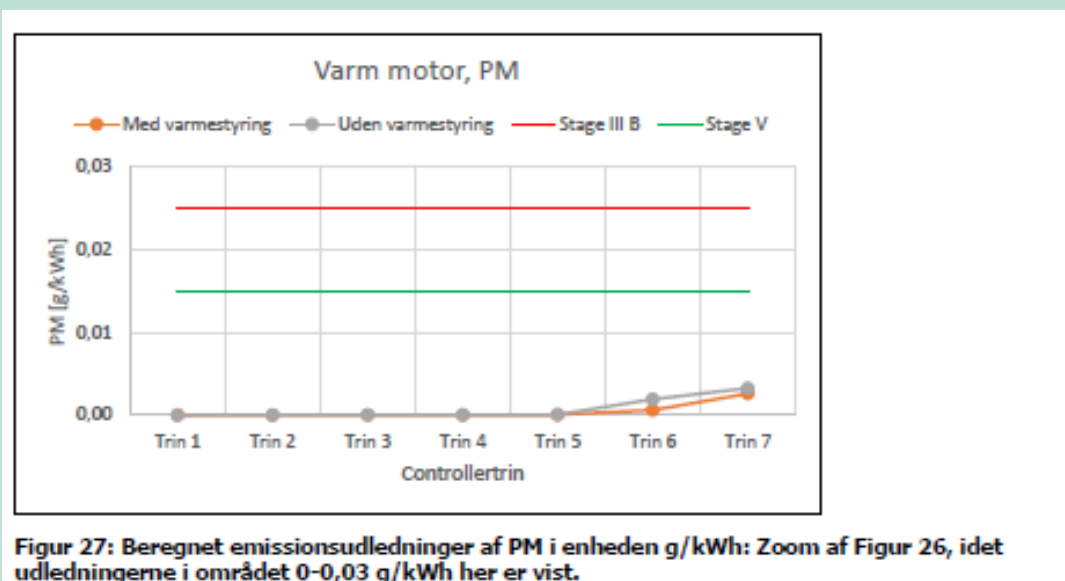
Motor-kategori	Stage	Nettoeffekt P	Dato*	CO	HC	NO _x	PM	PN
		kW		g/kWh				1/kWh
RC B	IIIB	130 < P	2012	3,50	0,19	2,00	0,025	-
RC B	V	P > 0	2021	3,50	0,19	2,00	0,015	1*10 ¹²

*Implementeringsdato

Sammenligningen skal tages som en indikation og ikke som fuldkommen sammenlignelige værdier da målemetoder mv. ikke er helt identiske.

Et eksempel af f.eks. PM udledningen ses på FIGUR 23. PM måling, varm motor .

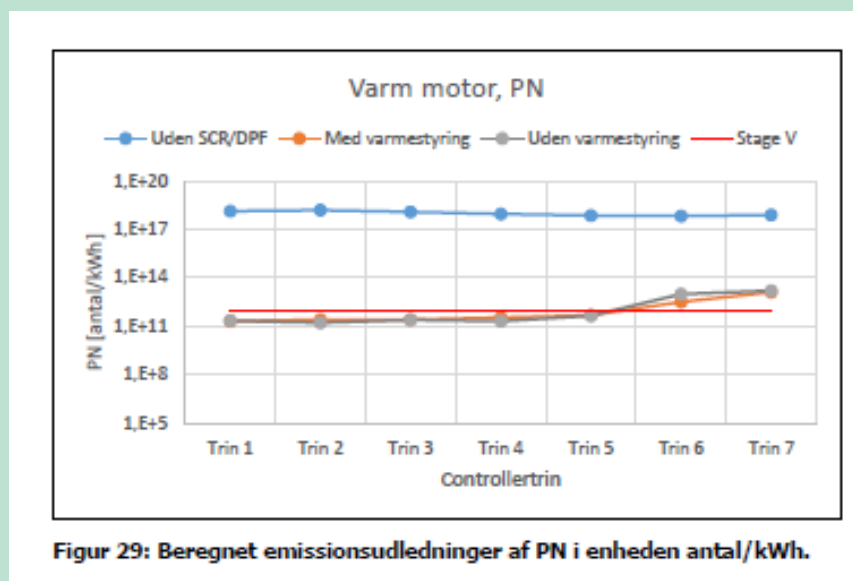
FIGUR 23. PM måling, varm motor



Purefi emissionssystemet ses at kunne overholde selv de strengeste krav for partikeludledningen målt i vægt. Værdierne ligger meget under selv den kommende Stage V norm og derfor også langt under Stage IIIB, som er den gældende emissionsnorm.

Samme billede ses mht. partikelantallet på FIGUR 224. PN måling, varm motor. Reduktionen i antallet af partikler er meget høj, og ligger på linje med kommende Stage V grænseværdier. Grunden til, at målte værdier sammenlignes med Stage V og ikke Stage IIIB er at der endnu ikke er krav om udledning af antallet af partikler i gældende norm. Derfor sammenlignes med kommende norm.

FIGUR 224. PN måling, varm motor



Grænseværdien for partikelantallet med varm motor er 1×10^{11} , og illustreres med den røde linje.

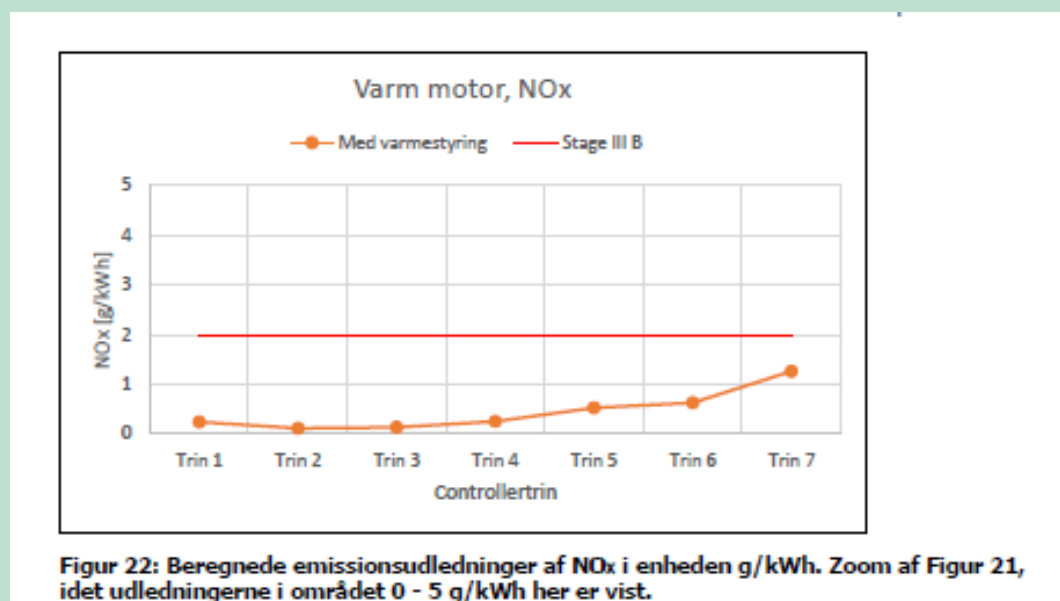
Det ses ud fra grafen, at uden partikelfilter er de målte værdier på ca. 1×10^{18} , dvs motoren udleder 1.000.000 gange flere partikler end gældende normer.

Med Purefi partikelfilter er målingerne på linje med gældende norm, dvs selv om motoren er gammel og slidt og gammel teknologi, så er det muligt at komme ned på værdier, der er sammenlignelige med helt nye motorer.

Dette skyldes at partikelfilteret kan filtrere over 99,999% og det vil derfor være yderst effektiv til reduktion af partikeludledningen fra togets motorer.

Et andet interessant måleresultat er NO_x værdierne. Et eksempel ses neden under på FIGUR 235. NO_x udledning med Purefi DPF-SCR_ATC, varm motor

FIGUR 235. NO_x udledning med Purefi DPF-SCR_ATC, varm motor



"Emissionsudledning af NO_x omregnet til g/kWh"

Ligesom partikelemissionen er også NO_x'erne under grænseværdien for helt nye motorer med Purefi emissionssystem.

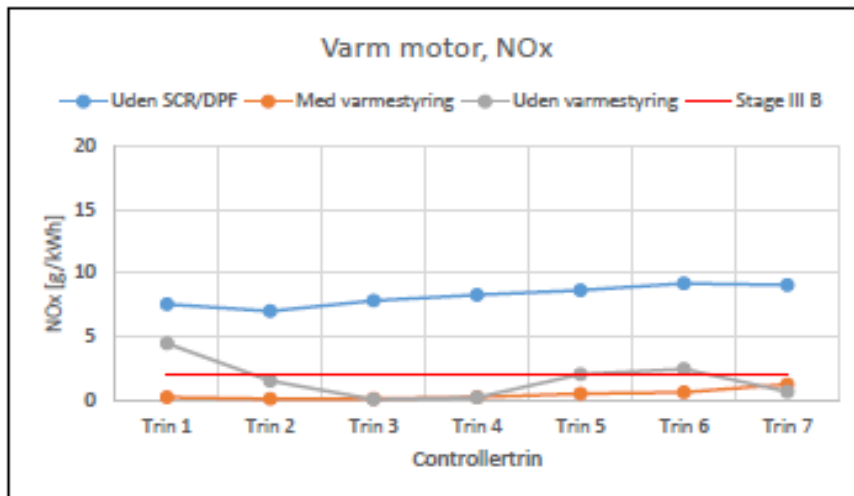
Det samme gælder HC emissionen selvom denne er steget en anelse i forhold til målinger uden emissionssystemet grundet varmestyringen (brændstofindsprøjtning).

6.3.2.1 Purefi DPF-SCR med og uden temperaturstyring

Purefi systemet er testet på identisk vis med og uden temperaturstyring. Temperaturstyringen giver hele emissionssystemet en højere gennemsnitstemperatur, hvor emissionssystemet er mere effektiv, specielt til reduktion af NO_x'er.

Et eksempel ses på FIGUR 26. NO_x udledning, varm motor, med og uden temperaturstyring.

FIGUR 26. NO_x udledning, varm motor, med og uden temperaturstyring.



Figur 21: Beregnede emissionsudledninger af NO_x i enheden g/kWh.

Generelt ligger de målte værdier lavere med Purefi DPF-SCR ATC emissionssystem med temperaturstyring sammenlignet med uden temperaturstyring, som svarer til et passivt system. Det gælder for samtlige emissioner på nær HC emissionerne, der skyldes minimal HC slip pga. temperaturstyringen.

Det er dog til enhver tid en fordel at anvende temperaturstyringen i Purefi emissionssystem specielt hvad NO_x reduktionen angår. Her er gevinsten meget stor, da systemet er mere effektivt, og der kan opnås yderligere reduktioner i NO_x udledningen med op til 50% i bestemte punkter.

Der er heller ingen tvivl om at temperaturstyringen kan blive endnu mere effektiv, når der er mulighed for en længere testperiode med mulighed for endnu bedre indkøring af ECU'en (Engine Control Unit) for dosering af Urea og temperaturstyring.

Effekten af varmestyringen ses specielt i de lave belastningstrin hvor udstødningstemperaturen er lav, dvs. under ca. 250 °C. I den situation vil Urea doseringen ikke være særligt effektiv, da effekten af reduktionen er lav og der er samtidig stor sandsynlighed for krystallisering af Urea i udstødningssystemet. Krystallisering kan medføre delvis eller total tilstopning af SCR-katalysatoren og skal derfor undgås.

Tabellen på FIGUR 27. Emissioner uden temperaturstyring FIGUR 28. , viser netop den ringe reduktionsgrad for en "almindelig fungerende" SCR-katalysator i de lave temperaturområder under 250°C. Det ses tydeligt, at reduktionen er lav i Trin 1 og Trin 2. Trin 1 og 2 svarer til tomgangskørsel svarende til, når toget står stille på stationen.

FIGUR 27. Emissioner uden temperaturstyring

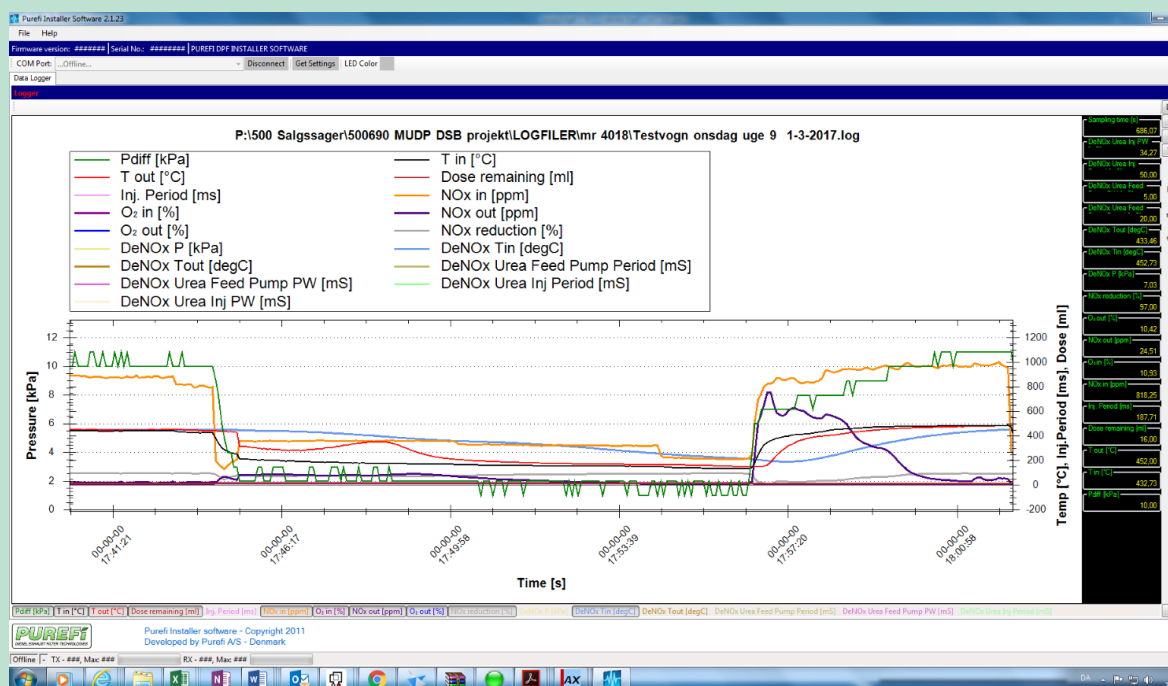
Tabel 7: Reduktionsgrad for CO, NO_x, NO, NO₂, HC, PM og PN. Testen er foretaget på varm motor uden temperaturstyring og sammenlignet med målinger uden kombinationssystem, fase 1. Enhed: %

Varm motor uden temperaturstyring							
	CO	NO _x	NO	NO ₂	HC	PM	PN
Trin 1	98,63	37,15	7,84	98,06	67,65	99,99	99,99998
Trin 2	98,33	76,78	68,10	97,98	35,71	99,99	99,99999
Trin 3	99,12	99,07	99,15	96,97	44,44	99,98	99,99998
Trin 4	99,07	97,20	97,16	95,65	41,67	99,98	99,99998
Trin 5	98,75	76,57	83,81	-103,4	41,67	99,94	99,99994
Trin 6	98,55	73,61	78,77	-183,3	36,36	98,61	99,99862
Trin 7	98,58	92,42	93,13	61,90	53,33	97,88	99,99793

Reduktionen med varm motor i trin 1 og 2 er på hhv. 37 og 76 %. Det er naturligvis ønskeligt at reduktionsgraden også i disse kontroltrin var på over 90%. Der er imidlertid en helt logisk forklaring på, at vi ser disse lave reduktionsgrader. På FIGUR 2. Mulig NO_x reduktion som funktion af temperaturen, findes svaret. Her ses det tydeligt hvor effektiv SCR-katalysatoren maksimalt kan blive for kontroltrin 1 samt 2 (med varm motor). Det er nemlig udstødningstemperaturen, der er afgørende for, hvor effektiv SCR-katalysatoren er, og med udstødningstemperaturer under ca. 250-260 °C, som netop hvad der svarer til kontroltrin 1 og 2, kan SCR-katalysatoren ikke blive mere effektiv end de opnåede resultater. Højere reduktion vil derfor kræve højere udstødningstemperatur.

Grafen nedenunder på FIGUR 28. **Udskrift fra Purefi datalogger** viser hvordan stilstand på en station ser ud. Udstødningstemperaturen falder til under de 250-260°C efter nogle minutter og NO_x reduktionen aftager som følge heraf. Denne situation svarer til kontroltrin 1 hvor motoren kører i tomgang.

FIGUR 28. Udskrift fra Purefi datalogger



Det er netop sådan en situation, som ønskes forbedret med Purefi ATC eller "temperaturstyring" af emissionssystemet. For at forbedre reduktionsgraden af NOx er det nødvendigt at løfte temperaturen før SCR til over 250-260°C, selvom motorens udstødningstemperatur kun er på f.eks. 180-200°. Dermed opnås en god fordampning af den doserede Urea, som bliver til ammoniak, og effektiviteten af SCR-katalysatoren stiger som vist på tidligere figurer.

FIGUR 27. viser systemets effektivitet uden temperaturstyring. Nu gentages samme målinger med temperaturstyring. Effekten ses tydeligt for trin 1 og for trin 2 på FIGUR 29. Emissioner med temperaturstyring.

FIGUR 29. Emissioner med temperaturstyring

Tabel 8: Reduktionsgrad for CO, NO_x, NO, NO₂, HC, PM og PN. Testen er foretaget på varm motor med temperaturstyring og sammenlignet med målinger uden kombinationssystem, fase 1. Enhed: %

Varm motor med temperaturstyring							
	CO	NO _x	NO	NO ₂	HC	PM	PN
Trin 1	99,59	96,65	95,29	98,06	-35,29	99,99	99,99998
Trin 2	99,72	98,15	98,57	96,97	-35,71	99,98	99,99998
Trin 3	99,12	98,32	98,30	96,97	-66,67	99,98	99,99998
Trin 4	98,76	96,89	96,66	95,65	-108,33	99,96	99,99996
Trin 5	97,92	94,24	94,15	93,10	-75,00	99,94	99,99994
Trin 6	98,07	93,88	94,20	77,78	-100,00	99,59	99,99958
Trin 7	98,10	85,97	87,23	23,81	-40,00	98,29	99,99831

Med temperaturstyring i trin 1 samt i trin 2 løftes reduktionen af NOx til følgende værdier:

- Trin 1 går fra 37% til 96%
- Trin 2 går fra 76% til 98%.

Temperaturstyringen af SCR-katalysatoren resulterer derfor i en meget kraftig forbedring af NOx reduktionen. Det betyder nu at reduktionen af de farlige NOx gasser selv ved stationsstandsning er reduceret med mere end 95%, til direkte gavn for de mennesker der indånder udstødningsgasserne omkring toget.

6.3.2.2 Inspektion af emissionssystemet efter test

Emissionssystemet er adskilt efter testen, og der er foretaget en analyse af elementernes tilstand. Systemet har under testen været testet i hele det normale driftsområde, og også over, hvad normal drift ville omfatte. Med varmestyringen er røggassernes temperatur i systemet hævet til over den normale maksimale temperatur for at undersøge holdbarheden af de enkelte elementer.

En anden visuel kontrol, der let kan foretages, er en "synstest" af indløbsrøret og hele indløbsdelen før filteret, og det ses tydeligt at være sort af sodudledningen, mens afgangsvist til venstre er fuldkommen ren, uden nogen form for sodbelægning hverken på filter, SCR eller afgangsrøret, som ses på billedet nedenunder på FIGUR 30. **Visuel kontrol af ind samt afgangsrør på Purefi emissionssystem.**

FIGUR 30. Visuel kontrol af ind samt afgangsrør på Purefi emissionssystem



6.4 Sammenfatning og konklusion

Alle projektets arbejdsplaner fra 1 til 4 er gennemført. Der er foretaget emissionsmålinger på et DSB MR-tog under arbejdsplan 1 uden nogen form for efterbehandling af udstødningsgasserne. Ligeledes blev der installeret en datalogger som havde til formål at indsamle driftsdata fra toget over en periode på ½ år. Disse måledata dannede grundlag for at fastlægge den mest hensigtsmæssige måde at simulere driften under emissionsmålingerne, som blev foretaget af FORCE Technology.

Efter arbejdsplan 1 blev det konkluderet, at der var et godt grundlag for at udvikle et emissionssystem til MR-toget. De indsamlede data viste, at driftsforholdene ikke er en forhindring og valget af emissionsudstyr faldt derfor på en kombinationsløsning bestående af et partikelfilter (DPF) samt en NO_x reducerende katalysator (SCR) kombineret med Purefi aktiv regenerering samt aktiv temperaturstyring af SCR-katalysatoren. Dette system er sammenligneligt med det, som anvendes i dag på de nyeste motorer indenfor On Road og som endnu ikke helt er slået igennem til Off-Road sektoren. Systemet kaldes Purefi DPF-SCR-ATC, og som navnet indikerer består dette system af både et partikelfilter samt en SCR-katalysator samtidig med, at systemet har en aktiv temperaturstyring, så det er muligt at opnå maksimal regenerering af partikelfilteret samt maksimal reduktion af NO_x som følge af en præcis styring af opvarmningen af SCR-katalysatoren. Systemet blev udviklet og testet på togets motor efter en "stationær test" hvor alle motorens effekt-trin testes. Der blev udviklet en test, hvor alle tænkelige scenarier, som repræsenterer togets drift, måles og sammenlignes før og efter montering af emissionssystem. Ligeledes blev alle målinger sammenlignet med dagens Stage IIIB-norm, men også med den kommende norm, som først træder i kraft om nogle år, den såkaldte STAGE V norm.

Reduktionen af partikler, både vægt og antal, er så høj, at togets motor efter montering af emissionssystemet vil kunne sammenlignes med helt nye motorer og er på nogle områder endnu bedre, da målingerne viste en reduktionsgrad på mere end 99,998% på partikelemissionen. De gasformige emissioner som HC samt CO er ligeledes så lave, at de vil kunne overholde de gældende normer. En af de mest skadelige emissioner er NO_x forureningen, som der blev lagt meget stor vægt på i dette projekt. NO_x reduktionen blev, ligesom alle andre emissioner, målt med og uden varmestyring. Målinger af NO_x emissionen både under tomgangskørsel, som svarer til stilstand på en station, samt ved normal kørsel, viste en meget stor NO_x-reduktion på mellem 95-98%.

Med det monterede emissionsudstyr vil toget overholde grænseværdierne i Stage IIIB og emissionerne vil dermed være på højde med dagens nyeste tog, som også er udstyret med røggasefterbehandlingsudstyr. Ligeledes er emissionssystemet så effektivt, at det også vil kunne overholde helt eller delvist den endnu ikke gældende norm, STAGE V som først træder i kraft om nogle år.

En eftermontering af et Purefi emissionssystem vil derfor kunne have en stor positiv indvirkning på luftforureningen omkring toget, inde i toget samt under kørsel og ikke mindst ved stationer, hvor mennesker udsættes for en meget kraftig luftforurening fra togene. Generelt kan det siges, at selv tog, som er mere end 30 år gamle, kan blive ligeså rene som helt nye tog.

Andre perspektiver efter afsluttet projekt er næste trin at undersøge, hvordan indsamlet viden fra projektet kan anvendes kommercielt. Her tænkes naturligvis på at undersøge, hvor der kører tilsvarende togsæt samt evt. andre både ældre samt nyere typer tog, hvor ikke alene motorkonstruktion men også togdriften antages at være identisk med det undersøgte tog. I undersøgelsen er der specielt tænkt på IKKE Euro V eller Euro VI, eller STAGE V motorer, men generelt ældre type motorer som kan opgraderes til dagens standard for emissioner og normer og levetiden forlænges.

7. Hvad er de forventede forretningsmæssige resultater?

Purefi ønsker at komme ind på området for efterbehandling af udstødningsgasser for tog og andet skinnekørende materiel. Det er et område som har et meget stort potentiale med stigende krav om bedre luftkvalitet. Eftersom dette område som tidligere beskrevet er stort set uberørt, er der af samme årsag heller ikke nogen konkurrence på området. Togene er af ældre dato og netop disse tog bidrager væsentligt til luftforureningen. Det vil derfor være muligt at opgradere eksisterende tog med et emissionsanlæg til rensning af udstødningsgasserne til et niveau, der kan sammenlignes med helt nye motorer eller bedre. Det giver en forlængelse af materialets levetid samt en stor besparelse, da udskiftning af materiel ikke længere er nødvendigt pga. luftforureningen. DSB vil kunne implementere denne teknologi på resten af deres tog af denne type, og det skulle være muligt at tilpasse samme teknologi til andre tog hos DSB eller hos andre togselskaber udenfor Danmark. Dermed vil DSB kunne dokumentere en positiv effekt på luftforureningen og ikke belaste miljøet med de gamle tog. En anden afgørende faktor er, at luftforureningen, som passagerer udsættes for, minimeres hvilket må betragtes som meget væsentlig i denne sammenhæng. Med positive resultater kan alle togselskaber med lignende tog kontaktes og informeres om den nye teknologi. Målgruppen er derfor alle togselskaber, der råder over ældre dieseldrevne tog.

7.1 OEM projekt

Purefi fik mulighed for at deltage i et OEM projekt, men det kan af hensyn til "Hemmeligholdelsesaftale" ikke oplyses, hvem den potentielle kunde er.

Projektet var egentlig sammenligneligt med dette, idet udgangspunktet dog var en EURO III motor som emissionsmæssigt skal opgraderes til EURO VI. Grunden til at dette kan lade sig gøre, skyldes at projektet kun har et begrænset styktal og dokumentationsarbejdet er derfor helt anderledes end ved serieproduktion af EURO VI.

Purefi har afholdt flere møde med fremlæggelse af opnåede resultater og der var stor interesse for projektet. Der kan desværre ikke oplyses yderligere om dette projekt på nuværende tidspunkt.

7.2 DSB's andre tog

Purefi har udover dette projekt ligeledes været i dialog med DSB om at undersøge muligheder og interesse for at afprøve systemet på andre togtyper og Purefi har udarbejdet flere løsningsforslag til både de helt gamle ME-lokomotiver og et løsningsforslag til de nyere IC4 togsæt.

7.2.1 Opgradering af ME-lokomotiv

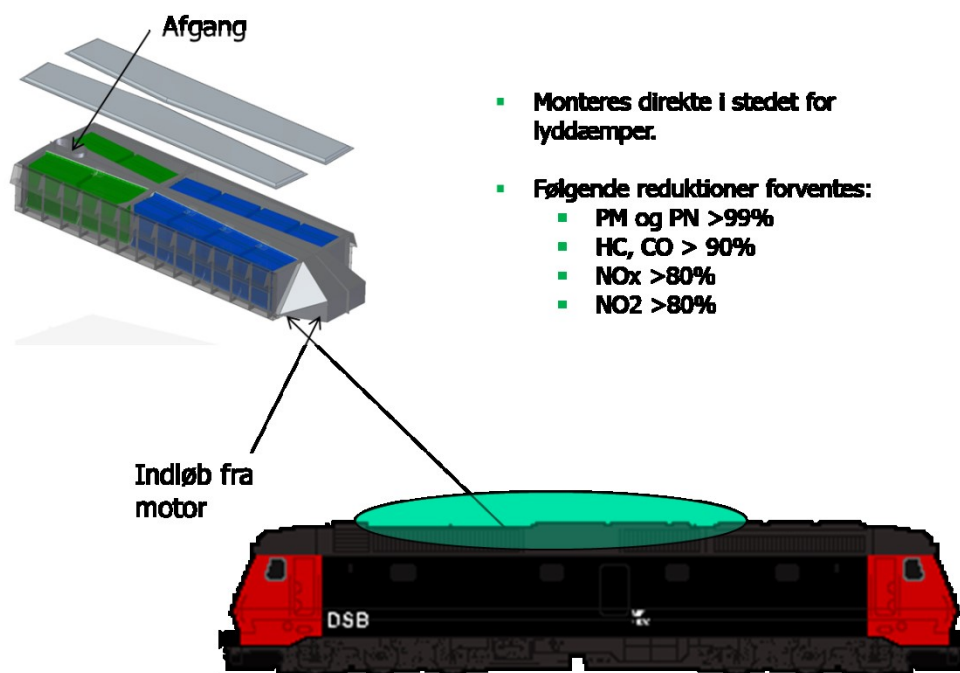
ME lokomotiver er en af de største synder til forurening fra togtrafikken. Det er derfor også meget interessant at se nærmere på en mulig løsning til dette tog.

Purefi's forslag består af en kombinationsløsning af et partikelfilter samt et SCR, altså samme type emissionssystem som det testede i dette projekt.

Der er naturligvis udfordringer med denne type tog, først og fremmest da togene er meget gamle samt at de alle er udstyret med en 2-takstmotor bygget til at køre med relativt lavt modtryk. Det stiller store krav til størrelsen på emissionssystemet, da pladsforholdene er givet, og der skal findes plads til systemet indenfor de eksisterende rammer.

Purefi og DSB har sammen gennemgået flere løsningsforslag og nedenstående forslag er nok det bedste, vi kan komme med i dette projekt.

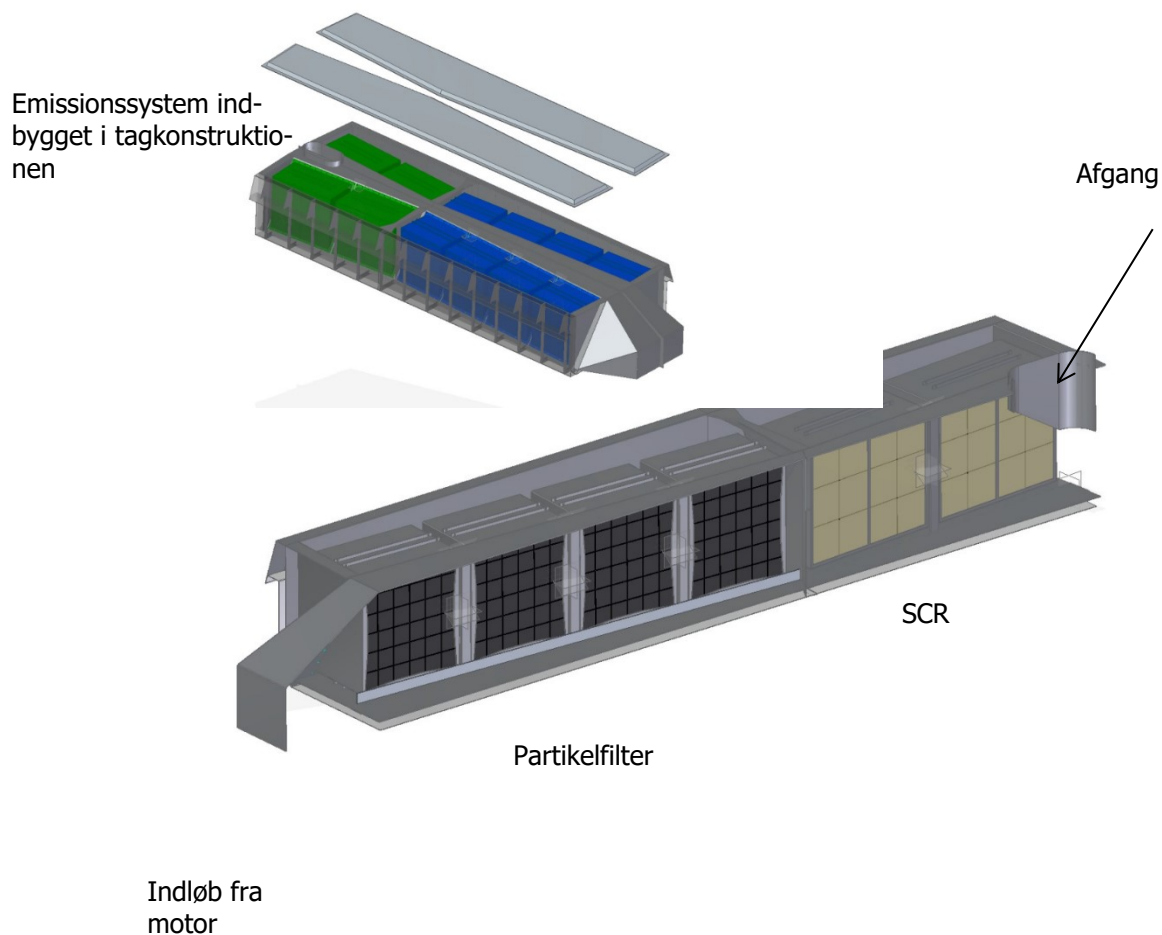
Her er der bl.a. taget højde for at hæve den maksimale højde på togets tagkonstruktion, og det lader til at der kan indarbejdes en løsning indenfor dette volumen.



Skulle ovenstående løsningsforslag stadig være "for småt" af hensyn til modtrykket, skal der bygges en højere tagkonstruktion end den eksisterende. Dette kræver dog en ændring af værkstedet for at toget kan køre gennem værkstedet. Der er flere bjælker som skal hæves med ca.20-30 cm for at toget frit kan passere under værkstedets loftskonstruktioner.

Ideen med denne løsning er at bygge hele emissionssystemet i en tagkonstruktion som er skruet på togets topsektion. Dermed kan der ganske let foretages service af systemet, da en ombytterløsning blot monteres i stedet for den brugte del.

Løsningsforslag til en ME-lokomotivet.



Purefi har forelagt DSB løsningsforslaget for ME lokomotivet, med DSB har endnu ikke taget stilling til om et evt. projekt kan finde sted. Ligeledes blev der drøftet muligheder for at kigge på andre typer DSB tog, hvor dette projekts erfaring samt resultater ville kunne overføres til specielt IC2, IC3 og IC4 togene.

Montering og test af Purefi emissionsudstyr, DPF-SCR på et DSB MR tog

Dette er den afsluttende rapport for projektet med titlen "Emissionsudstyr til MR-tog" som er udført i perioden 2014-2017. Projekt er gennemført under Miljøstyrelsens tilskudsprogram MUDP.

Projektet er udført i et samarbejde mellem DSB A/S, FORCE Technology A/S samt PUREFI A/S. Det overordnede formål med projektet er at undersøge mulighederne for at eftermontere et røgrensningsanlæg på et MR tog samt at undersøge miljøgevinsten ved at montere et røgrensningsanlæg.

Projektet har vist, at det er teknisk muligt at eftermontere et kombinationssystem bestående af et partikelfilter samt en SCR-katalysator på et gammelt MR tog fra 80'erne. Resultaterne viste at dette tog, efter montering af kombinationssystemet med et DPF samt en SCR, emissionsmæssigt kan sammenlignes med helt nye tog.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk