



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Røgrensning til entreprenørmaskiner

Miljøprojekt nr. 1881

September 2016

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Morten Køcks, Teknologisk Institut

Troels Dyhr Pedersen, Teknologisk Institut

Thomas Nørregaard Jensen, Teknologisk Institut

Mende Trajkovski, Purefi A/S

Grafiker/bureau: Teknologisk Institut

Tryk: Teknologisk Institut

Fotos: Teknologisk Institut

ISBN: 978-87-93529-10-6

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 Miljøstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Indhold	3
Forord	5
Ordforklaring	6
Sammenfatning og konklusion	7
Summary and conclusion	11
1. Introduktion	15
1.1 Projektets formål.....	15
1.2 Projektets udførelse	16
2. Arbejdsopgave 1: Vidensindsamling, udvælgelse af maskiner og udvikling af målemetode	17
2.1 Formål	17
2.2 Motivation for reduktion af emissionerne	17
2.2.1 Partikler.....	17
2.2.2 NOx.....	17
2.2.3 CO	18
2.3 Lovgivning og emissionsniveauer	18
2.3.1 Stage krav til emissioner fra entreprenørmaskiner	18
2.3.2 Projektets målsætning	19
2.3.3 Udviklingen for emissioner i andre sektorer	20
2.3.4 Udvikling og udfordringer ved regulering af NOx.....	20
2.3.5 Udviklingen i reguleringen af partikler.....	22
2.4 Principiel virkemåde for kombinerede systemer til røggasrensning.....	22
2.5 Udvælgelse af maskiner	24
2.6 Udvikling af målemetode til karakterisering af emissioner	25
2.6.1 Partikelmålinger	25
2.6.2 Gasmålinger	26
2.7 Konklusion	27
3. Arbejdsopgave 2: Udvikling af kombinationsløsning	28
3.1 Formål	28
3.2 Kortlægning af maskinernes driftsmønster og pladsforhold	28
3.3 Indledende karakterisering af emission fra udvalgte maskiner under drift.....	29
3.3.1 Partikelmålinger	30
3.3.2 Gasmålinger	30

3.3.3	Erfaringer fra første målekampagne.....	31
3.4	Detaljeret beskrivelse af kombinationsløsningen.....	32
3.5	Optimering af egenskaber, dimensionering og fremstilling af kombinationsløsning nr. 1 33	
3.5.1	Afsluttende bemærkninger fra Purefi	34
3.6	Konklusion	34
4.	Arbejdspakke 3: Montering og overvågning på udvalgte maskiner	36
4.1	Formål	36
4.2	Montering af kombinationsløsning på udvalgt maskine.....	36
4.2.1	Installation af det færdige system	36
4.3	Overvågning af kombinationsløsning ved normal drift og test af robusthed.....	37
4.4	Optimering af egenskaber under normale driftsforhold.....	37
4.4.1	Partikelmålinger	38
4.4.2	Gasmålinger	38
4.5	Dimensionering og fremstilling af kombinationsløsning nr. 2	39
4.6	Konklusion	40
5.	Arbejdspakke 4: Dokumentation af effekt af den udviklede kombinationsløsning	42
5.1	Formål	42
5.2	Onlinekarakterisering af emission ved typisk driftsmønster	42
5.3	Måling på kombinationsløsning 1	42
5.3.1	Bemærkninger til sammenligning med Stagekravene	44
5.4	Måling på kombinationsløsning 2.....	44
5.4.1	Partikelmåling.....	44
5.4.2	Gasmåling.....	47
5.5	Teknologioverførsel og mulig udbredelse.....	48
5.6	Konklusion	49
	Bilag 1: FTIR-kalibrering	50
	Bilag 2: Omregning fra målte til ydelsesspecifikke koncentrationer	51

Forord

Dette er afslutningsrapporten for projektet med den officielle titel ”Emissionsbegrænsende teknologi til ikke-vejgående maskiner” under Miljøstyrelsens tilskudsordning ”Program for Grøn Teknologi 2013”. Projektet løb i perioden april 2014 til og med marts 2016 og havde det overordnede formål at videreudvikle og implementere løsninger til reduktion af luftforurening fra entreprenørmaskiner. Herunder også udvikling af en mobil måleplatform til brug ved on-site målinger, så det sikres, at de målte emissioner reflekterer realistiske driftsforhold.

Projektet er gennemført i et samarbejde mellem NCC Roads A/S, Purefi A/S, LiqTech International A/S og Teknologisk Institut. Denne rapport giver et samlet overblik over det arbejde, der er udført i løbet af projektet.

Teknologisk Institut

Aarhus, april 2016

Ordforklaring

Nedenfor er vist en kort oversigt over forkortelser, som anvendes i denne rapport.

Forkortelse	Engelsk betegnelse	Dansk betegnelse
ASC	Ammonia slip catalyst	Ammoniakslip-katalysator
CO	Carbon monoxide	Kulmonooxid
CO ₂	Carbon dioxide	Kuldioxid
CPC	Condensation Particle Counter	
DOC	Diesel Oxidation Catalyst	Diesel oxidations-katalysator
DPF	Diesel Particulate Filter	Dieselpartikelfilter
FBC	Fuel borne catalyst	Brændstoffbåren katalysator
FTIR	Fourier Transform Infrared	
NH ₃	Ammonia	Ammoniak
NO	Nitrogen oxide	Kvælstofoxid
NO ₂	Nitrogen dioxide	Kvælstofdioxid
NO _x	Sum of NO and NO ₂	
N ₂ O	Nitrous Oxide	Lattergas
PM	Particulate mass	Partikelmasse
PMP	Particle Measurement Program	
PN	Particulate number	Partikelantal
SCR	Selective catalytic reduction	Selektiv katalytisk reduktion
SMPS	Scanning Mobility Particle Sizer	
THC	Total hydrocarbons	Kulbrinter

Sammenfatning og konklusion

Emissioner fra ikke-vejgående (*non-road*) maskiner, herunder entreprenørmaskiner, kan påvirke luftkvaliteten i negativ grad, ikke mindst i nærmiljøet, og forurening fra maskinerne udgør en væsentlig kilde til den samlede luftforurening. Entreprenørmaskiner skal i dag alene leve op til de såkaldte Stagekrav, som er mindre restriktive end emissionskravene til vejgående køretøjer (biler, lastbiler og busser) defineret i EURO-norm-kravene. Som konsekvens heraf udsættes især de medarbejdere, som til daglig betjener maskinerne, for en øget sundhedsrisiko. I modsætning til lastbiler og busser, som altid er på vej væk fra udledningsstedet, er scenariet ofte ganske anderledes for entreprenørmaskiner. Her er det særligt brugerne og arbejderne omkring maskinerne, der eksponeres.

Projektet har haft det overordnede formål at videreudvikle og implementere efterbehandlingsteknologier til reduktion af luftforurening fra entreprenørmaskiner. Herunder også udvikling af en mobil måleplatform til brug ved on-site målinger, så de målte emissioner reflekterer realistiske driftsforhold. Fokus har været på maskiner, der benyttes i tæt bebyggelse og/eller på byggepladser, herunder i lukkede rum ved fx etablering af parkeringskældre og parkeringshuse. I lukkede rum er luftkvaliteten særlig vigtig, da den forurenede luft ikke fortyndes naturligt, som det er tilfældet udenørs. Desuden opleves sjældent, at mekanisk ventilation i de lukkede rum afhjælper problemet på tilfredsstillende vis. Ved at udvikle en forbedret teknologi målrettet entreprenørmaskiner har projektet således kunnet medvirke til at forbedre luftkvaliteten for de medarbejdere, som til daglig betjener maskinerne. Projektet har samtidig medvirket til en begrænsning i udledningen af sundhedsskadelige partikler og gasser til det omgivende miljø. De deltagende parter er herudover blevet klædt bedre på til at kunne imødekomme forventede skærpede lovkrav til ikke-vejgående maskiner. Effekten af de udviklede løsninger, som er målrettet NCC's entreprenørmaskiner, er dokumenteret ved omfattende målekampanjer på maskinerne under normale og realistiske driftsforhold i felten. Der er i udviklingsfasen blevet stilet mod overholdelse af de såkaldte Stage IV-emissionskrav.

Projektet har været inddelt i fire arbejdsplaner med forskellige formål:

- Arbejdsplan 1 (AP 1): At lægge fundamentet for det videre forløb, herunder udvælgelse af et antal relevante maskiner som potentielt kunne eftermonteres med en kombinationsløsning af partikelfilter (DPF) + NO_x-reducerende teknologi (fx urea-SCR). Desuden har Teknologisk Institut, med input fra de øvrige parter, arbejdet på at udvikle en mobil målemetode, så emissionsmålinger vil afspejle emissionsniveauer under normal drift.
- AP 2: At udvikle selve kombinationsløsningerne til udvalgte maskiner, fra det i AP 1 indsnævrede felt af maskiner, målrettet NO_x- og partikelreduktion. Parallelt hermed foretages indledende emissionsmåling på forskellige maskiner til brug for fremadrettet reference.
- AP 3: At montere de udviklede DPF/SCR-løsninger på udvalgte maskiner samt overvåge systemet ved normal drift. Desuden optimering af egenskaber under realtidsmålinger på systemet under realistiske driftsforhold.
- AP 4: At gennemføre onlinekarakterisering af emission ved typisk driftsmønster samt efterfølgende, afsluttende dokumentation af effekt over for begge de udviklede kombinationsløsninger. Desuden undersøges, hvorvidt teknologien kan overføres til andre maskiner.

I **AP 1** blev der udvalgt fire maskiner, der opfyldte de grundlæggende kriterier (passende alder, motorstørrelse, plads til eftermontering og fleksibilitet ift. øvrig, daglig drift). Dette udvalg af maskiner blev der arbejdet videre med i projektet, og udvalget blev yderligere indsnævret. Før designet

af kombinationsløsningen med DPF og SCR kunne fastlægges, skulle maskinerne have installeret temperaturloggere, hvorefter emissionerne skulle karakteriseres. I AP1 blev der ligeledes gjort grundige overvejelser omkring, hvilken målemetode der skulle benyttes i projektet. På partikeldelen blev udviklet en metode, som er målrettet PMP (Particle Measurement Program), men som samtidig er af en mere fleksibel natur, også hvad angår opnåelse af information om størrelse og om antal af partikler helt ned til 10 nm i størrelse. Til gasmålinger anvendes en FTIR, som udover at måle de regulerede gasser også kan måle koncentrationen af ammoniak (NH₃) og lattergas (N₂O), hvilket især er relevant ved optimering af urea-doseringen til den NO_x-reducerende SCR-katalysator.

I **AP 2** blev den første kombinationsløsning designet med henblik på robusthed og driftssikkerhed. Særligt blev der fokuseret på, at der ikke måtte opstå for højt modtryk i filteret, og der er valgt et silicium-karbid filter (SiC) af hensyn til systemets robusthed. Den udviklede kombinationsløsning opfyldte ligeledes kravet fra NCC gående på, at det ikke måtte optage for meget plads eller begrænse udsynet, samt at der skulle være adgang til motoren fra siderne og fra toppen. Den udviklede målemetode blev samtidig anvendt ved indledende emissionsmålinger i oktober 2014 på en asfaldudlægger og to asfaltfræsere. Selve opsætningen med en varevogn kørende ved siden af entreprenørmaskinerne forløb problemfrit, og sideløbende med udviklingen af DPF + SCR-løsningen blev emissionsdata i realtid opnået under realistiske driftsforhold. De målte emissioner viste, at der er stor forskel på maskinernes emissioner, som kan tilbageføres dels til maskinernes alder, dels til deres respektive Stagecertificering.

Effektiviteten af den udviklede, første kombinationsløsning og potentiale blev i **AP 3** demonstreret under projektets anden målekampagne, som blev succesfuldt gennemført medio 2015. Målinger herfra blev samtidig benyttet i en iterativ proces til optimering, særligt af SCR-delen, og også med henblik på udvikling af en nedskaleret udgave af det samlede system. Det blev motiveret, at der var mulighed for at optimere løsningen – bl.a. i forbindelse med optimal urea-dosering, hvilket der blev arbejdet på ved udvikling af en nedskaleret DPF/SCR-løsning (kombinationsløsning 2).

Der blev målt på en kombinationsløsning med DPF både med og uden platinbelægning, installeret på udvalgt asfaldudlægger, og partikelkoncentrationen var meget sammenlignelig for de to partikelfiltertyper. Det viste sig, at filteret uden platinbelægning også kunne regenerere kontinuert under drift, kun med tilsætning af *fuel borne catalyst*. Det blev derfor besluttet ikke at benytte filtre belagt med platin til den anden kombinationsløsning. Partikelkoncentrationer målt før partikelfilteret var sammenlignelige med målingerne på samme asfaldudlægger uden partikelfilter (målekampagne 1 oktober 2014), og generelt blev partikelemissionen fra maskinen observeret til at være meget stabil og stort set uafhængig af de respektive SCR indstillinger under optimeringsfasen. Systemet har en partikelreduktion på over 99,9 %, beregnet på baggrund af i alt seks udlægninger af asfalt, med forskellige SCR-indstillinger og for faste partikler (*solid particles*) >23 nm (jf. PMP).

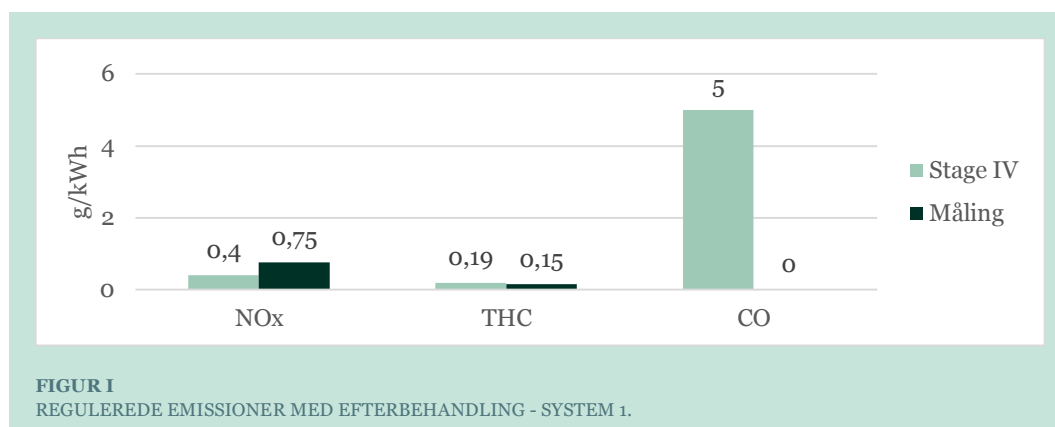
Kombinationsløsning 1 har fungeret pålideligt og har ikke fejlet under drift. Der manglede dog fra start en slip-katalysator til oxidation af overskydende ammoniak, hvilket har medført, at systemet kunne komme til at overdosere urea på basis af en for høj NO_x-måling efter SCR-katalysatoren. Efterfølgende målekampagne var dog her med til at belyse problemet, hvilket førte til, at der blev tilføjet en slip-katalysator. Erfaringer fra det første system blev brugt i designet og dimensioneringen af det nye system. Samlet set blev system 2 væsentlig billigere i fremstilling, hovedsageligt fordi der kunne undværes katalytisk belægning på partikelfilteret, men også fordi komponenterne kunne nedskaleres. Kombinationsløsning 2 nåede ikke at få så mange driftstimer i projektet som system 1, men har ligeledes fungeret upåklageligt og med meget positive tilbagemeldinger fra NCC Roads.

Målsætningen for det eftermonterede system var at nedbringe motorens emissioner til et niveau svarende til Stage IV-kravet. Sammenligningen må dog kun betragtes som vejledende for systemets effektivitet, idet Stage IV-certificering kræver måling i hele motorens lastområde efter Iso 8178-standarden. Sammenligningen er her kun gældende for det målte lastpunkt, som vurderes at være

tæt ved fuld nominel belastning af motoren. Motoren vil dog oftest arbejde ved denne belastning, hvorfor det også giver mest mening at vurdere emissionerne her.

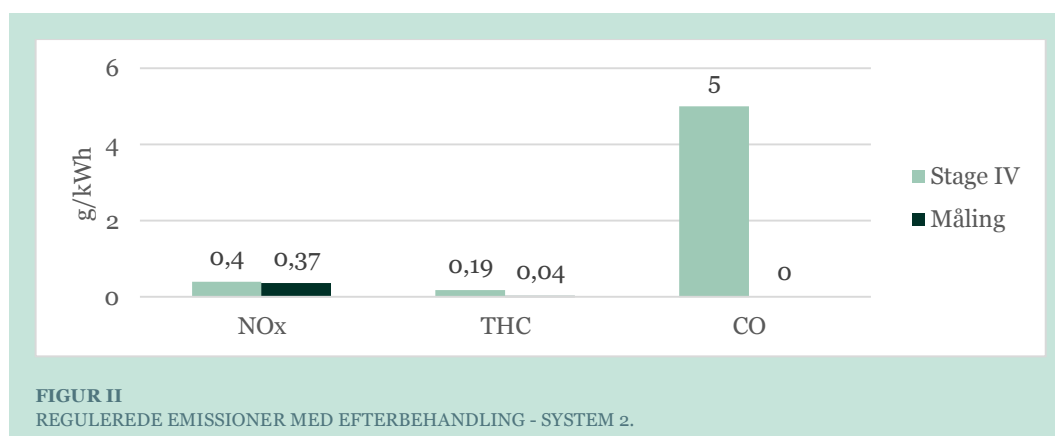
I **AP 4** blev effekten af de to forskellige kombinationsløsninger dokumentet. Kombinationsløsning 1 leverede en effektiv reduktion i emissionerne, idet THC blev reduceret med omkring 90 %, mens CO blev fjernet helt. NOx blev reduceret med ca. 78 %. Systemets NOx-reduktion levede dog ikke helt op til Stage IV-kravet i det målte lastpunkt, se også Figur I.

Partikelreduktionen var på >99,9 %, og den målte partikelkoncentration lå omkring en faktor 3 under såvel den foreslåede grænseværdi i Stage V som den foreslåede referenceværdi fra Schweiz.



Kombinationsløsning 2 leverede ligeledes en meget effektiv reduktion i emissionerne af CO og THC, og reduktionen af NOx blev yderligere forbedret til ca. 89 %. Dermed opfyldte systemets emissioner Stage IV-kravet i det målte lastpunkt, se også Figur II.

Partikelreduktionen var igen på >99,9 %, og den målte partikelkoncentration lå omkring en faktor 6 under såvel den foreslåede grænseværdi i Stage V som den foreslåede referenceværdi fra Schweiz. Samtidig blev der observeret en mindre gennemsnitlig partikeldiameter ved måling efter DPF+SCR end ved måling før DPF. Det er interessant, at en væsentlig andel af partiklerne, målt efter SCR, også er mindre i størrelse end den nedre grænse på 23 nm, som er defineret i PMP.



Begge systemer havde desuden som følge af den installerede NH₃-slip-katalysator meget lave emissionsniveauer af ammoniak og havde ingen problemer med at overholde grænseværdien på 25 ppm.

Endelig konkluderes det, baseret på kommentarer og erfaringer fra de i projektet involverede parter, at en bred udbredelse af kombinationsløsninger til entreprenørmaskiner i Danmark forudsætter, at der bliver indført lovkrav herom.

Summary and conclusion

Emissions from non-road mobile machinery, including construction machinery, can have a negative effect on the air quality, not least in the immediate environment, and the release of harmful pollutants linked to non-road machinery greatly contributes to the total air pollution. Today, construction machinery must only live up to the so-called Stage regulations that are less restrictive than the emissions standards for on-road vehicles (cars, lorries and buses) defined in the EURO emissions standards. Therefore, especially employees who daily operate the machines are exposed to increased health risks. Compared to lorries and buses that always drive away from the source of emission, the scenario is often completely different for construction machinery, where employees who use and work near the machines are exposed.

The main objective of this project has been to further develop and implement after-treatment technology that can reduce air pollution from the construction machinery. That also includes the development of a mobile measurement platform for use of on-site measurements, so the measured emissions reflect realistic operating conditions. Focus has been on machines that are used in densely built areas and/or at construction sites, including closed rooms during, e.g., the establishment of cellar car parks or multi-storey car parks. In closed rooms, the air quality is very important, as the polluted air is not naturally rarefied as it is outdoors. In addition, it is rarely experienced that mechanical ventilation in closed rooms can solve the problem satisfactorily. By developing improved technology for construction machinery, the project has contributed to improved air quality for the employees who daily operate the machines. At the same time, the project has contributed to reduced discharge of health hazardous particles and gases to the surrounding environment. In addition, the participating parties will be better prepared for future expected stringent legal requirements to non-road mobile machinery. The effect of the developed solutions that are aimed at NCCs construction machinery has been documented through comprehensive measuring campaigns on the machinery during normal and realistic operating conditions in the field. During the development phase, an attempt was made to comply with the so-called Stage IV emissions regulations.

The project was divided into four work packages with different objectives:

- Work package 1 (WP 1): To lay the foundation for the further course of events, including the selection of a number of relevant machines that potentially could be retrofitted with a combination solution of particle filter (DPF) + NO_x reducing technology (e.g., urea SCR). In addition, with input from the other partners, Danish Technological Institute has aimed at developing a mobile measuring method, so emission measurements will reflect emission levels during normal operation.
- WP 2: To develop actual combination solutions for selected machinery from the outline of machinery narrowed down in WP 1, focused on NO_x and particle reduction. In parallel, initial emission measurements were carried out on various machines to be used for reference.
- WP 3: To mount the developed DPF/SCR technology on selected machines and carry out system monitoring during normal operation. Also optimisation of properties during real time measurements on the system during realistic operating conditions.
- WP 4: To carry out online characterization of emissions during typical operating patterns and concluding documentation regarding the effect of both of the developed combination solutions. It was also investigated to which extent the technology can be transferred to other machines.

In **WP 1**, four machines that met the basic criteria (suitable age, engine size, room for retrofitting and flexibility in relation to daily operation) were selected. In the project, further work was carried out on the selected machines, and the selection of machinery was further narrowed down. Before the design of the combination solution with DPF and SCR could be determined, temperature loggers had to be installed on the machines, and then the emissions had to be characterised. In WP1 it was also considered, which measuring method should be used in the project. A method was developed for particles, and it was based on PMP (Particle Measurement Program), although it was more flexible also with regard to obtaining information about size and number of particles way down to 10 nm. A FTIR was used for gas measurements, and in addition to the regulated gases, it can also measure the concentration of ammonia (NH₃) and nitrous oxide (N₂O), which especially is relevant when optimising the urea dosage for the NO_x reducing SCR catalytic converter.

In **WP 2**, the first combination solution focused on robustness and reliability. Special focus was on not obtaining a too high backpressure in the filter, and a silicon carbide filter (SiC) was chosen to make the system more robust. The developed combination solution also met the requirements from NCC as they did not want the solution to take up too much space or limit the view, and there had to be access to the engine from the sides and the top. At the same time, the developed measuring method was used during the initial emission measurements in October 2014 on one asphalt paving machine and two milling machines. The setting with a van driving beside the construction machinery was unproblematic, and concurrent with the development of the DPF + SCR solution, emission data in real time was obtained during realistic operating conditions. The measured emissions showed that there is a big difference between the emissions from the machines, which partly have to do with the age of the machinery and partly with their respective Stage certification.

In **WP 3**, the efficiency of the developed, first combination solution and its potential was demonstrated during the second measuring campaign of the project that was successfully carried out in mid-2015. The measurements were also used in an iterative process for optimisation, especially of the SCR part, and for development of a downscaled version of the total system. The measurements showed that it would be possible to optimise the solution – i.a., in connection with optimum urea dosage, which was attempted during the development of a downscaled DPF/SCR solution (combination solution 2).

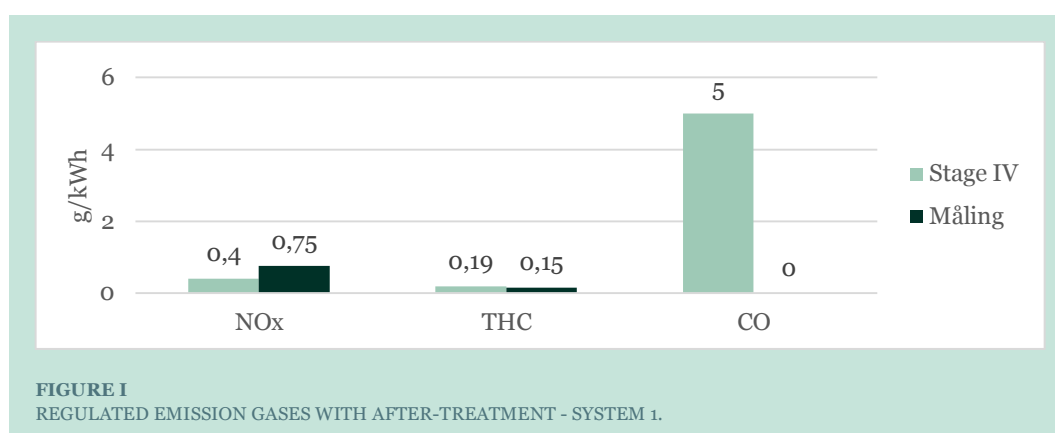
Measurements were carried out on a combined solution with DPF with and without platinum coating, installed on a selected asphalt paver. The particle concentration was very comparable for the two types of particle filters. It turned out that the filter without platinum coating also could regenerate continuously during operation only by adding a fuel borne catalyst. Therefore, it was decided not to use filters with platinum for the other combination solution. Particle concentrations measured before the particle filter were comparable with the measurements on the same asphalt paver without particle filter (measuring campaign 1 October 2014), and in general, the particle emissions from the machine were observed to be very stable and rather independent of the respective SCR parameters during the optimisation phase. The system has a particle reduction of more than 99.9%, calculated on the basis of a total of six asphalt pavings with different SCR parameters and for solid particles >23 nm (cf. PMP).

Combination solution 1 was reliable and had no defaults during operation. However, from the beginning, an ammonia slip catalyst was missing for the oxidation of surplus ammonia, and therefore the system sometimes overdosed urea due to a too high NO_x measurement after the SCR catalyst. The subsequent measuring campaign illustrated the problem, which resulted in the addition of an ammonia slip catalyst. Experience from the first system was used to design and dimension the new system. Overall, the production of system 2 was less expensive mainly because it was possible to omit catalytic coating on the particle filter, and because it was possible to downscale the components. Combination solution 2 did not have as many working hours in the project as system 1, but it also worked satisfactorily, and very positive feedback from NCC Roads was received.

The objective of the retrofitted system was to reduce the emissions of the engine to a level that corresponded to the Stage IV regulations. However, the comparison must only be regarded as informative for the efficiency of the system, as Stage IV certification requires a measurement of the entire engine load range according to the ISO 8178 standard. The comparison only applies to the measured load range that is assessed to be close to the complete nominal load of the engine. However, the engine will in most cases work at that load, and therefore it makes sense to assess the emissions there.

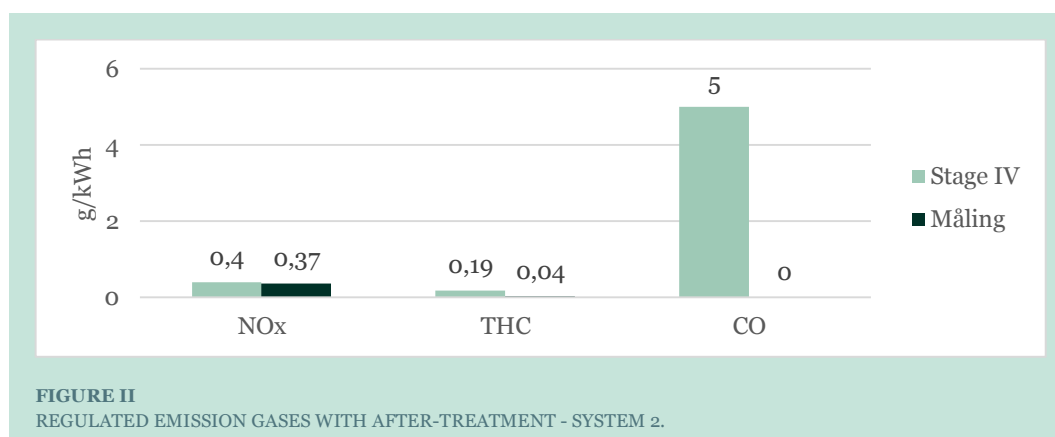
In **WP 4**, the effect of the two different combination solutions was documented. Combination solution 1 gave an efficient emission reduction as THC was reduced by app. 90%, whereas CO was completely removed. NOx was reduced by app. 78%. However, the NOx reduction of the system did not fully meet the Stage IV regulations in the measured load area; please refer to Figure 1.

The particle reduction was >99.9%, and the measured particle concentration was app. a factor 3 below the suggested limit value in Stage V and the suggested reference value from Switzerland.



Combination solution 2 also gave a very efficient reduction in the CO and THC emissions, and the NOx reduction was additionally improved to app. 89%. That means that the emissions of the system met the Stage IV regulations in the measured load area; please refer to Figure II.

The particle reduction again amounted to >99.9%, and the measured particle concentration was app. a factor 6 below the suggested limit in Stage V and the suggested reference value from Switzerland. At the same time, a minor average particle diameter was observed during measurement after DPF+SCR than before DPF. It is interesting that a substantial amount of the particles, measured after SCR, also have a smaller size than the lower 23 nm limit, as defined in PMP.



In addition, due to the installed NH₃ slip catalyst, both systems had very low ammonia emission levels and had no problems meeting the limit value of 25 ppm.

Finally, according to comments and experience from the parties involved in the project, it is concluded that a wide propagation of combination solutions to construction machinery in Denmark presupposes the introduction of statutory requirements.

1. Introduktion

For at forbedre luftkvaliteten er der behov for at reducere partikelforureningen og mængden af NO_x der udledes fra dieselmotorer. Der findes bl.a. sundhedsrelaterede grænseværdier for NO₂, der som årsmiddelværdi flere gange er blevet overskredet lokalt på H.C. Andersens Boulevard i København. Desuden er det generelt anerkendt og veldokumenteret,¹ at forbrændingspartikler er sundhedsskadelige og særligt er de ultrafine partikler, herunder sodpartikler fra diesel, i fokus, da de kan trænge dybt ind i lungerne (alveolerne), hvorfra de kan optages i blodet. Dermed kan partiklerne transportere sundhedsskadelige og potentielt kræftfremkaldende forbindelser ind i kroppen.

Ikke-vejgående (*non-road*) maskiner, herunder entreprenørmaskiner, uden emissionsbegrænsende teknologi kan påvirke luftkvaliteten i negativ grad, ikke mindst i nærmiljøet,² og kan således være ansvarlig for en væsentlig del af den samlede luftforurening. De ikke-vejgående maskiner skal i dag alene leve op til de såkaldte Stagekrav, som er mindre restriktive end emissionskravene til vejgående køretøjer (lastbiler og busser), som er defineret i EURO-norm-kravene. Som konsekvens heraf udsættes både lokalbefolkningen og de medarbejdere, som til daglig betjener maskinerne, for en øget eksponering og sundhedsrisiko. Samtidig er lastbiler og busser altid på vej væk fra udledningsstedet, mens scenariet er ganske anderledes for entreprenørmaskiner, hvor brugeren, arbejderne omkring maskinerne og også lokalbefolkningen i højere grad eksponeres. NCC Roads prioriterer medarbejdersikkerhed og -sundhed højt, og på trods af at NCC Roads til fulde lever op til eksisterende lovgivning, ønskes fra NCC's side en begrænsning af emissionerne fra den eksisterende maskinpark med særligt fokus på maskiner, der anvendes i lukkede rum, men også med fokus på maskiner, der benyttes i baggårde, i tæt bebyggelse og/eller på byggepladser. I lukkede rum ved fx etablering af parkeringskældre og parkeringshuse er luftkvaliteten særlig vigtig, da den forurenede luft ikke fortyndes naturligt, som det er tilfældet udendørs. NCC oplever desuden sjældent, at mekanisk ventilation i de lukkede rum afhjælper problemet på tilfredsstillende vis.

Ved at udvikle en forbedret teknologi målrettet entreprenørmaskiner vil dette projekt således kunne medvirke til at forbedre luftkvaliteten for de medarbejdere, som til daglig betjener maskinerne. Projektet vil samtidig medvirke til en begrænsning af udledningen af sundhedsskadelige partikler og gasser til det omgivende miljø. NCC vil herudover blive klædt bedre på til at kunne imødekomme eventuelle fremtidige krav om eftermontering af partikelfiltre og andet efterbehandlingsudstyr til ikke-vejgående maskiner. Purefi A/S og LiqTech International A/S vil kunne forbedre deres i forvejen gode indgreb i markedet for partikelfiltre og katalysatorer til i højere grad også at omfatte *non-road*-markedet. Anvendeligheden af den udviklede teknologi sikres således ved at involvere både teknologiproducenter og en teknologiaftager i projektet.

1.1 Projektets formål

Projektet har til formål at videreudvikle og implementere simple og forbedrede retrofit-løsninger (eftermonterede systemer til røggasrensning) til 2-3 udvalgte entreprenørmaskiner, der, udover at blive benyttet til udendørs anlægsarbejde, også benyttes i lukkede rum. Således vil løsningerne potentielt kunne nå bredt ud, herunder imødekomme NCC's behov for røggasrensning på maskiner, der benyttes i lukkede rum.

¹ WHO opgraderede i 2012 risikovurderingen af dieselemmissioner til "kræftfremkaldende"

² *Luftforurening fra mobile ikke-vejgående maskiner i byområder*, National Center for Miljø og Energi (DCE), 2013

Samtidig har en væsentlig del af formålet været at udvikle en mobil måleplatform til brug ved on-site målinger, så det sikres, at de målte emissioner reflekterer realistiske driftsforhold.

Effekten af de udviklede løsninger, målrettet NCC's entreprenørmaskiner, dokumenteres ved omfattende målekampagner på maskinerne under normal drift i felten. Der er blevet stilet mod overholdelse af de såkaldte Stage IV-emissionskrav, som blev indført i oktober 2014. Endvidere sammenlignes partikelemissionen med de kommende Stage V emissionskrav, hvor der er indført grænseværdier på antallet af partikler per kWh.

1.2 Projektets udførelse

Projektet løb fra 1. april 2014 til 31. marts 2016 og blev i det store hele gennemført i henhold til den oprindelige tidsplan.

I stedet for at montere efterbehandlingsudstyr på 2-3 forskellige maskiner, hvilket var den oprindelige plan, blev det i efteråret 2014, i samråd med projektets parter og Miljøstyrelsen, besluttet at udstyre en udvalgt maskine med to forskellige teknologier og således tidsmæssigt have forskudte monteringer/tests. Vurderingen blandt projektets parter var, at det var kritisk at have adgang til den samme maskine, for direkte at kunne sammenligne effekten af de to teknologier direkte uden indflydelse af forskelle i motorernes driftsmønster og emissioner. Første installation (kombinationsløsning) forløb hen over vinteren 2014-2015 med kørsel/indvirkningstid i foråret/sommer 2015. Den anden installation blev udviklet/monteret i sommer/efterår 2015 og monteret på samme maskine.

I de følgende kapitler beskrives arbejdet udført i de enkelte arbejdsopgaver.

2. Arbejdspakke 1: Vidensindsamling, udvælgelse af maskiner og udvikling af målemetode

2.1 Formål

Formålet med arbejdsopgave 1 (AP 1) har været at lægge fundamentet for det videre forløb, herunder at udvælge et antal relevante maskiner, som potentielt kan eftermonteres med en kombinationsløsning af partikelfilter (DPF) + NO_x-reducerende teknologi (fx urea-SCR). Udgangspunktet har været at se på løsninger til maskiner, såsom traktorer, asfaltudlæggere og tromler. Desuden har Teknologisk Institut, med input fra de øvrige parter, arbejdet på at udvikle en mobil målemetode, så emissionsmålinger, der foretages i projektet, vil afspejle emissionsniveauer under normal drift.

2.2 Motivation for reduktion af emissionerne

Den vigtigste grund til at anvende efterbehandlingsudstyr er at sænke koncentrationerne af emissioner, som er skadelige for mennesker. WHO har udgivet en kort oversigt over emissioner og deres skadelighed for mennesker³.

2.2.1 Partikler

Forbrændingspartikler, herunder sodpartikler, dannes ved ufuldstændig forbrænding af bl.a. kulbrinter. Dieselmotorer uden partikelfiltre udgør en af de største kilder til disse partikler i tæt befolkede områder. Det er generelt anerkendt og efterhånden veldokumenteret, at forbrændingspartikler er sundhedsskadelige og kan forårsage bl.a. kredsløbssygdomme, kronisk nedsættelse af lungefunktion og øget dødelighed. Særligt er de ultrafine partikler (nanopartikler) i fokus, da de kan trænge dybt ind i lungerne (alveolerne). En stor del af de ultrafine partikler udgøres af sodpartikler, som typisk har en partikelstørrelse på 30-40 nm.

2.2.2 NO_x

De nitroser gasser NO og NO₂ dannes ved de høje temperaturer, som forekommer under forbrændingen. Typiske niveauer for NO_x er 150 til 1000 ppm i ubehandlet udstødning fra mindre dieselmotorer under normal drift. Niveaulet af NO₂ afhænger af belastningen, idet NO og NO₂ er i en kemisk ligevægt, som er bestemt af temperaturen. Højere temperaturer sænker niveaulet af NO₂, så niveaulet af NO₂ falder typisk med belastningen på en motor. Således udgør NO₂ op til 30 % af NO_x ved lav last, mens andelen af NO₂ udgør ca. 5 % eller mindre ved højere last. NO er ikke i sig selv sundhedsskadelig, men oxideres i løbet af kort tid i atmosfæren til NO₂, som er en relativt giftig gasart med en karakteristisk lugt. I lave koncentrationer virker NO₂ irriterende og kan påvirke lungefunktionen. Længere tids påvirkning af høje NO₂-koncentrationer øger antallet af sygdomstilfælde og forøger dødeligheden, særligt for mennesker der i forvejen har problemer med lunger og vejrtrækning.

³ WHO: Ambient (outdoor) air quality and health. Fact sheet N°313. Updated March 2014

2.2.3 CO

CO er en giftig gas selv i lave koncentrationer, idet gassen optages i blodet, hvor den blokerer hæmoglobinets optagelse af ilt. Længere tids eksponering for udstødning med højt indhold af CO kan medføre CO-forgiftning. Forgiftning medfører utilpashed, svimmelhed og kvalme ved lave koncentrationer, mens højere koncentrationer fører til bevidstløshed og kan i værste fald være dødeligt. CO dannes ved partiel oxidation (ufuldstændig forbrænding) af kulstof. Niveaue af CO er normalt meget lavt i dieseldstødning, da motorerne kører med luftoverskud og høje temperaturer under forbrændingen. Der vil typisk måles langt under 100 ppm CO i udstødningsgassen ved normal drift. Under nogle omstændigheder kan der dog dannes høje koncentrationer af CO. Dette gælder særligt ved fejljusterede og defekte motorer, hvor der indsprøjtes for meget diesel i forhold til luftmængden. Dette giver anledning til synlig røg, med tydelig lugt af uforbrændt diesel og et højt indhold af CO.

2.3 Lovgivning og emissionsniveauer

2.3.1 Stage krav til emissioner fra entreprenørmaskiner

Tilladte emissioner fra entreprenørmaskiner reguleres via de såkaldte Stagekrav⁴ for ikke-vejgående maskiner. Stagekravene er gældende for motorer som installeres i nye maskiner med henblik på salg og anvendelse indenfor EU. Disse krav har løbende strammet udledningen af særligt partikelmasse (PM) og NOx. Grænseværdierne er givet i gram per kilowatt-time (g/kWh), som motoren producerer, hvor det for personkøretøjer normalt angives i gram per kilometer (g/km). I fremtidige Stage V-krav forventes desuden regulering af partikelantal (PN).

I tabel 1, 2 og 3 herunder ses Stage III A/B, Stage IV samt forslag til Stage V.

TABEL 1
STAGE III A/B EMISSION STANDARDS FOR NONROAD DIESEL ENGINES⁴

CAT.	NET POWER	DATE [†]	CO	HC	HC+NOX	NOX	PM
STAGE III A	KW		G/KWH				
H	130 ≤ P ≤ 560	2006.01	3.5	-	4.0	-	0.2
I	75 ≤ P < 130	2007.01	5.0	-	4.0	-	0.3
J	37 ≤ P < 75	2008.01	5.0	-	4.7	-	0.4
K	19 ≤ P < 37	2007.01	5.5	-	7.5	-	0.6
STAGE III B							
L	130 ≤ P ≤ 560	2011.01	3.5	0.19	-	2.0	0.025
M	75 ≤ P < 130	2012.01	5.0	0.19	-	3.3	0.025
N	56 ≤ P < 75	2012.01	5.0	0.19	-	3.3	0.025
P	37 ≤ P < 56	2013.01	5.0	-	4.7	-	0.025

[†] DATES FOR CONSTANT SPEED ENGINES ARE: 2011.01 FOR CATEGORIES H, I AND K; 2012.01 FOR CATEGORY J.

TABEL 2
STAGE IV EMISSION STANDARDS FOR NONROAD DIESEL ENGINES

CAT.	NET POWER	DATE	CO	HC	NOX	PM
	KW		G/KWH			
Q	130 ≤ P ≤ 560	2014.01	3.5	0.19	0.4	0.025
R	56 ≤ P < 130	2014.10	5.0	0.19	0.4	0.025

⁴ <https://www.dieselnet.com/standards/eu/nonroad.php>

TABEL 3
PROPOSED STAGE V EMISSION STANDARDS FOR NONROAD ENGINES

CATEGORY	IGN.	NET POWER	DATE	CO	HC	NOX	PM	PN
		KW						
NRE-V/C-1	CI	P < 8	2019	8.00	7.50 ^{A,C}		0.40 ^B	-
NRE-V/C-2	CI	8 ≤ P < 19	2019	6.60	7.50 ^{A,C}		0.40	-
NRE-V/C-3	CI	19 ≤ P < 37	2019	5.00	4.70 ^{A,C}		0.015	1×10 ¹²
NRE-V/C-4	CI	37 ≤ P < 56	2019	5.00	4.70 ^{A,C}		0.015	1×10 ¹²
NRE-V/C-5	ALL	56 ≤ P < 130	2020	5.00	0.19 ^C	0.40	0.015	1×10 ¹²
NRE-V/C-6	ALL	130 ≤ P ≤ 560	2019	3.50	0.19 ^C	0.40	0.015	1×10 ¹²
NRE-V/C-7	ALL	P > 560	2019	3.50	0.19 ^D	3.50	0.045	-
^A HC+NOX								
^B 0.60 FOR HAND-STARTABLE, AIR-COOLED DIRECT INJECTION ENGINES								
^C A = 1.10 FOR GAS ENGINES								
^D A = 6.00 FOR GAS ENGINES								

Med indfasningen af Stage IIIB fra 2011 blev grænsen for udledning af partikelmasse sænket fra 0,6-0,2 g/kWh (afhængigt af motorydelsen) til 0,025 g/kWh, hvilket betød, at de fleste maskiner nu skulle udstyres med partikelfiltre for at kunne overholde grænseværdien.

Med indfasningen af Stage IV fra 2014 blev grænsen for nye motorers udledning af NO_x sænket til 0,4 g/kWh, hvilket er omkring 80 % lavere end i Stage IIIB. Dette har i praksis betydet et ufravigeligt krav om, at maskinerne leveres med SCR, eller tilsvarende NO_x-reducerende teknologi i kombination med sænkning af motorens ubehandlede emission af NO_x.

Med Stage V forventes en yderligere skærping af grænseværdierne, særligt for partikler hvor der også indføres begrænsning på antal partikler per kWh for motorer over 19 kW, samtidig med at maskiner under 19 kW nu også er omfattet af Stage kravene.

Selvom de løbende reguleringer har medført en kraftig reduktion i nye maskiners udledninger er der fortsat mange ældre maskiner med Stage IIIA/B motorer eller endnu ældre i drift. Dertil kommer at maskiner med motorer under 19 kW hidtil ikke har været omfattet af Stage kravene, og først ventes at blive omfattet når Stage V træder i kraft. Da levetiden for maskinerne samtidig sagtens kan være langt over 10 år, giver det derfor netop i disse år mening at fokusere på emissionerne fra disse maskiner. Ud over medarbejder- og miljøhensyn opleves også til tider krav fra bygherrer om, at entreprenøren skal benytte maskiner, som lever op til gældende lovgivning for nye maskiner.

2.3.2 Projektets målsætning

I nærværende projekt sammenlignes de opnåede reduktioner med den antalsbaserede grænseværdi i Stage V, eftersom fokus i dag er på partiklernes antal og størrelsesfordeling, mere end på den samlede partikelmasse. Af samme årsag er antalsbegrænsning på partikler allerede implementeret i Euro VI-krav for bl.a. lastbiler og busser⁵.

Det skal bemærkes at grænseværdierne i Stage IV kun er gældende for nye motorer over 56 kW. Da motoren som indgår i dette projekt er på 45 kW vil køretøjer med denne motorstørrelse indtil Stage V kun være omfattet af Stage IIIB, hvor det kun er partikelmassen som er reduceret ift. Stage IIIA. Vi har dog valgt at fokusere på overholdelse af Stage IV, da projektet blev formuleret ud fra denne forudsætning.

Ved projektets start var der som udgangspunkt fokus på retrofit til maskiner, som er 2-4 år gamle, dvs. maskiner fra omkring 2010 med Stage IIIA motorer. Det har den fordel, at et efterbehandlings-

⁵ <https://www.dieselnet.com/standards/eu/hd.php>

system vil have en lang indvirkningstid i forhold til ældre maskiner, som løbende udfases. Dette er naturligvis centralt for udbredelsen af løsningen og for omfanget af effekten. Desuden vil retrofit opnå yderligere gennemslagskraft på disse maskiner, når skærpede lovkrav ventes indført for helt nye maskiner.

Fra et lovgivningsmæssigt synspunkt er Schweiz pionerer inden for regulering af emissioner fra entreprenørmaskiner. I Schweiz stilles der således krav om, at alle entreprenørmaskiner >37 kW, nye som gamle, har installeret DPF.⁶ Maskiner i området 18-37 kW er ligeledes omfattet af krav til DPF, hvis de er fremstillet efter 2010.

Ligeledes undersøges og afprøves der i Schweiz teknologi til hurtigt og effektivt at kunne måle virkningsgraden af DPF i felten,⁷ så den daglige drift af maskinerne forstyrres mindst muligt. Denne type teknologi til feltmålinger vil samtidig være langt mere præcis end en traditionel opacitetsmåling, som udelukkende er et mål for den lys-absorberende effekt af røggassen og derfor ikke er effektiv over de mindste partikler, som er mindre end lysets bølgelængde. Således arbejdes på at udvikle simpelt, mobilt udstyr til at tælle partiklerne i felten. Flere producenter har i dag allerede kommercielt tilgængeligt udstyr, som også potentielt kan tages med i felten. Det bør nævnes, at der allerede opereres med en antalsbaseret grænseværdi i Schweiz for nye maskiner (OEM) (1×10^{12} partikler/kWh), og faktisk er Schweiz også gået skridtet videre og arbejder hårdt på at implementere en referenceværdi (*comparison value*), som kan bruges ved målinger på DPF-virkningsgrad direkte i felten (antal partikler/cm³ i stedet for antal partikler/kWh). Det er meningen, at denne værdi skal være af generisk karakter for at kunne vurdere, om et DPF er tilpas effektivt eller ej. Se mere i Bilag 2.

2.3.3 Udviklingen for emissioner i andre sektorer

Personbiler

Den første Euroregulering, Euro 1, for personbiler trådte i kraft i juli 1992 for både benzin og dieslbiler. Fokus for personbiler var i første omgang på emissioner af kulbrinter og CO samt PM for dieslbiler, idet den skadelige effekt af NOx ikke var så velkendt på dette tidspunkt. Siden Euro 1 er kravene blevet strammet ca. hvert 4-5 år, og der er kommet fokus på NOx.

Med indførslen af trevejskatalysatorer på benzinbiler er emissionerne herfra praktisk taget elimineret. Desværre kan teknologien ikke anvendes på dieselmotorer, hvilket betyder, at disse fortsat er udfordret, især hvad angår udledning af NOx.

Tunge køretøjer – Lastbiler og busser

I lighed med reguleringen for personbiler er lastbiler og busser blevet underlagt skærpede krav i Eurostandarderne. I reguleringen af emissioner fra tunge køretøjer er det motorerne, der testes og godkendes efter standarderne. Derfor angives emissionerne i g/kWh, og standarderne benævnes med romertal, så man kan skelne dem fra personbilernes standarder.

Stramminger i Eurostandarderne for lastbiler og busser har betydet, at flere nye tunge køretøjer er blevet udstyret med både DPF og SCR siden 2008. Med Euro VI, som trådte i kraft fra 2014, blev det i praksis nødvendigt at anvende både DPF og SCR. Dette har betydet, at tunge Euro VI-køretøjer i dag stort set har lige så lave emissioner af NOx og partikler som nye personbiler. Der er endda flere undersøgelser, som har dokumenteret, at emissionerne fra tunge køretøjer faktisk er lavere end for personbiler, primært fordi systemerne til tunge køretøjer er udviklet og testet under realistiske forhold, hvor personbiler endnu kun testes under kontrollerede forhold på rullefelt.

2.3.4 Udvikling og udfordringer ved regulering af NOx

⁶ Ordinance on Air Pollution Control (OAPC), se også (side 19 og 72): <https://www.admin.ch/opc/en/classified-compilation/19850321/201511160000/314.318.142.1.pdf>

⁷ *Feldmessung der Partikelanzahl von verschiedenen Off-Road-Maschinen mit DPF*, BAFU (Bundesamt für Umwelt), Sept. 2014

NO_x bliver første gang reguleret fra år 2000 med Euro 3, men først ved Euro 5 bliver anvendelsen af NO_x-reducerende efterbehandlingsudstyr nødvendigt for at leve op til kravet. Udfordringen i at reducere NO_x har været stor for bilproducenterne, der længe har kæmpet med at udvikle løsninger, der kunne leve op til de strenge krav, uden at det medførte høje omkostninger for køberne. Flere producenter har i første omgang anvendt såkaldte Lean NO_x Traps (LNT), som absorberer NO_x under lav belastning og omsætter det ved høj belastning. Disse har vist sig at være mindre effektive end urea-baseret SCR, som i dag er mere almindelige, på trods af at det er en væsentligt dyrere teknologi.

I 2015 blev der under stor mediebevågenhed sat fokus på, at dieselmotorer fra flere producenter havde meget høje udledninger af særligt NO_x under kørsel på vej, selvom de var udstyret med NO_x reducerende systemer. Bilernes emissioner blev målt af et uafhængigt firma i USA. Det blev efterfølgende påvist, at særligt én større producent havde omgået lovgivningen. I denne producents biler var motorstyringen programmeret til at opfylde NO_x-kravet under test, hvor specielle indstillinger sørgede for en optimal reduktion. På vejen skiftede motorstyring imidlertid til indstillinger, som favoriserede brændstofforbruget, hvorved reduktionen af NO_x blev sænket eller helt bortfaldt⁸.

Reglerne er primært blevet omgået, fordi det er en meget kompleks opgave at sikre en lav NO_x-udledning under realistiske forhold. Særligt er lave temperaturer et stort problem, da urea kan krystallisere i systemerne ved lave temperaturer. Aktiv anvendelse af SCR medfører som hovedregel også et større brændstofforbrug, som følge af at temperaturen skal være høj før systemerne virker. I kølvandet på afsløringen af forhøjede NO_x udslip har det da også vist sig, at flertallet af producenterne har benyttet sig af retten til at undlade NO_x reduktion under nogle forhold, med henvisning til at dette sker for at beskytte motoren imod skadelige og uønskede påvirkninger fra særligt den tilførte urea⁹. Således slår flere producenters systemer automatisk fra, når omgivelsernes temperatur kommer under en bestemt grænse, som vælges af producenten. Dette betyder i praksis, at en stor andel af de nyere dieselmotorer i Nordeuropa kører med inaktive SCR katalysatorer en stor del af året¹⁰. Fremover skal dette problem løses ved indførelsen af Real Driving Emissions (RDE), som blandt andet fastlægger hvor effektiv NO_x reduktion skal være i fastlagte temperaturintervaller.

Endelig pålægger forbruget af urea forbrugeren en ekstra udgift og besvær med at efterfylde urea-tanken regelmæssigt. For større køretøjer skønnes det, at forbruget af urea udgør ca. 4-6 % af dieselbrændstofforbruget. For mindre biler er forbruget noget mindre, omkring 2,5 %. Men mens tunge køretøjer kan tanke urea fra standere til omtrent samme pris som diesel, må ejere af mindre køretøjer betale overpris for opfyldning af deres tanke, enten i forbindelse med service af bilerne eller når de selv køber urea på dunke. Dette modvirker generelt set det miljømæssige incitamentet, mens ulovlige metoder til omgåelse af urea-doseringen eller de-aktivering af systemerne vinder udbredelse.

Mens personbiler således har vist sig at være problematiske i forhold til efterlevelse af Euro normernes skærpede krav til NO_x, har det for tunge køretøjer vist sig at være en nemmere opgave. Bortset fra at de ekstra systemer har medført øgede produktionsomkostninger samt øget vedligehold, har implementeringen af DPF og SCR på tunge køretøjer været en succes. Dog er der fortsat mistanke om at særligt østeuropæiske vognmænd deaktiverer urea-doseringen på lastbilerne, for at undgå udgiften ved at efterfylde urea¹¹.

⁸

https://events.ccc.de/congress/2015/Fahrplan/system/event_attachments/attachments/000/002/812/original/32C3_-_Dieselgate_FINAL_slides.pdf

⁹ Miljøstyrelsens notat om emnet med sagsnummer: 2016-221. 2. juni 2016

¹⁰ <https://www.transportenvironment.org/press/three-new-illegal-defeat-devices-go-unpunished-europe>

¹¹ <https://ing.dk/artikel/oesteuropaeiske-lastbiler-slaar-nox-filtrering-fra-spare-penge-183278>

2.3.5 Udviklingen i reguleringen af partikler

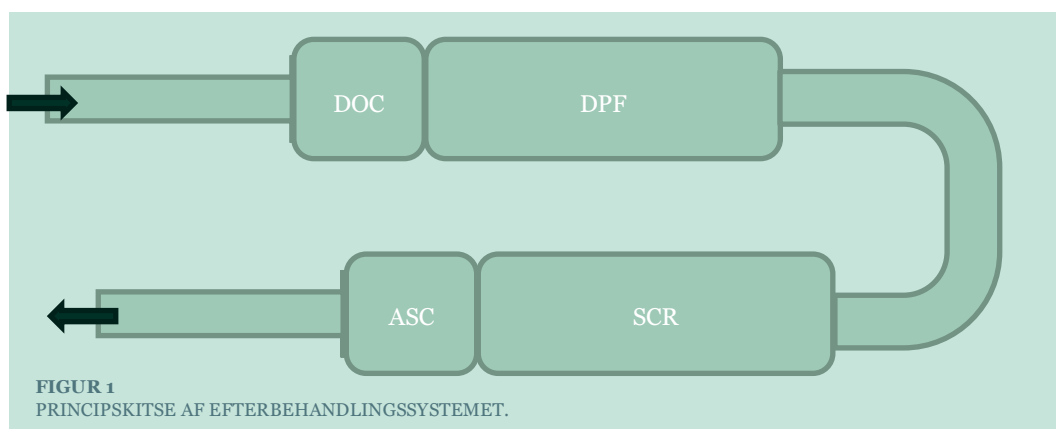
Med Euro 4/5 (personbiler) og Euro V (tunge køretøjer) blev det i praksis nødvendigt at anvende DPF på de fleste dieselmotorer. Udviklingen i dieselmotorteknologien har dog også medført løbende forbedringer i særligt indsprøjtningen, som er gået mod højere tryk og finere forstøvning¹². Dette har reduceret partikelstørrelsen drastisk, således at mange motorer fortsat har kunnet leve op til de massebaserede emissionskrav uden DPF. Forbedringen i indsprøjtningssystemerne har dog ikke resulteret i en tilsvarende reduktion af de fine og ultrafine partikler. Da disse partikler betragtes som de mest sundhedsskadelige, kan emissionerne fra nye dieselmotorer uden DPF ikke betragtes som markant mindre sundhedsskadelige end tidligere¹³.

Med Euro 5B og Euro VI blev der indført begrænsning på antallet af partikler, hhv. per km og per kWh. Således er det ikke længere muligt at undgå partikelfiltre alene ved at optimere motorerne mod lavere soddannelse, da kravene kun kan opfyldes ved at opsamle langt størstedelen af partiklerne – uanset størrelse.

Koncentrationen af partikler kan måles med avanceret udstyr, som tæller partikler ned til omkring 23 nm. Udstyr til måling af partikelkoncentration i dieseludstødning er dog stadig forbeholdt forskningsinstitutioner og videns baserede virksomheder. Autoværksteder og synshaller har ikke adgang til udstyret, og kan derfor indtil videre ikke verificere, at biler og lastbiler rent faktisk overholder disse krav. Det er således heller ikke muligt at opdage defekte partikelfiltre. Der arbejdes dog på at udvikle passende og mere simpel teknologi til dette.

2.4 Principiel virkemåde for kombinerede systemer til røggasrensning

Systemer til reduktion af NO_x og partikler består af fire aktive komponenter, som hver har en specialiseret opgave i rensningen af udstødningen. Rækkefølgen fremgår af Figur 1, som er en principskitse for systemet.



FIGUR 1
PRINCIPSKITSE AF EFTERBEHANDLINGSSYSTEMET.

Funktionen af de fire vigtigste komponenter forklares på et generelt niveau i det følgende. I kapitel 3 uddybes egenskaberne ved det specifikke system.

DOC – dieseloxidationskatalysator

Første komponent i udstødningssystemet er en dieseloxidationskatalysator, forkortet DOC. I katalysatoren forbrændes CO og kulbrinter, som derved omdannes til CO₂ og vand. Katalysatoren oxiderer også op mod halvdelen af udstødningens NO til NO₂, som er aktivt i oxidation af sod i partikelfilteret.

¹² "Particulate emissions from diesel engines: correlation between engine technology and emissions." Michael Fiebig, Andreas Wiartalla, Bastian Holderbaum and Sebastian Kiesow

¹³ Partikeludslip fra nye tunge køretøjer (Euronorm IV og V). Jørgen Jordal-Jørgensen, Anne Ohm og Eva Willumsen, COWI A/S. Arbejdsrapport fra Miljøstyrelsen Nr. 4 2008

DPF – dieselpartikelfilter

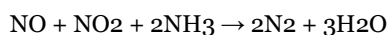
Efter DOC passerer udstødningssgassen gennem dieselpartikelfilteret (DPF). Filteret er konstrueret i et porøst keramisk materiale. Processen, hvor sodpartiklerne brændes af, kaldes regenerering. Der skelnes normalt mellem to typer af regenerering: aktivt (periodisk) og passivt (kontinuert). Idet temperaturen i udstødningen er omkring 400° C, når maskinen bruges, fungerer filteret altså primært ved passiv regenerering. Kun ved opstart af maskinen vil der være en akkumulering af sodpartikler, som afbrændes igen når filteret er blevet varmet op.

Afbrændingen af sodpartikler er ofte assisteret af et additiv (fuel borne catalyst, FBC), som løbende tilsættes dieselbrændstoffet med et doseringsanlæg. Additivet indeholder organisk bundet jern, som frigøres under forbrændingen. Jernatomerne indlejres i sodpartiklerne, hvor de fungerer som katalysatorer. Således forbrændes sodpartiklerne ikke kun på overfladen af partikelfilteret, men også i de aflejrede lag af sod. Dette giver en hurtig og effektiv regenerering af filteret. Endelig kan filteret regenereres aktivt ved at tilsætte diesel i udstødningen, som brændes af i DOC-katalysatoren. Dette kan på kort tid hæve temperaturen så meget, at soden i filteret antænder og brændes af.

SCR – selektiv katalytisk (NO_x)-reduktion

Efter partikelfilteret tilføres udstødningssgassen en vandig opløsning af urea ved forstøvning gennem en doseringsdyse, som styres elektronisk. Gassen ledes herefter gennem en sektion, hvor der sker opblanding og fordampning af den indsprøjtede urea. En mindre del af den tilførte urea vil undervejs omdannes til ren ammoniak, mens størstedelen føres med gassen uden at reagere. Når udstødningssgassen ledes gennem SCR-katalysatoren afsættes urea på indersiden, hvor den høje temperatur sikrer en hurtig omdannelse til ammoniak. Den frigjorte ammoniak adsorberes på overfladen af katalysatoren, hvor den kan reagere med NO og NO₂. Processen danner primært vand og nitrogen, idet ilten reagerer med brinten fra ammoniakken, mens nitrogen-atomerne finder sammen parvis og danner fri nitrogen.

Omdannelsen af NO og NO₂ til nitrogen er den mest komplicerede del af efterbehandlingssystemet, da der foregår mange parallelle kemiske processer, som omdanner NO og NO₂. Nedenstående er et eksempel på en af de dominerende reaktioner, som er særligt vigtig, når der er høje koncentrationer af NO₂:



Den samlede virkningsgrad er primært afhængig af temperaturen, sammensætningen af katalysatoren og koncentrationen af reaktanterne – herunder hvor meget den ammoniak der findes adsorberes på overfladen af katalysatoren. Hvis disse parametre er afstemt fornuftigt, kan der ofte opnås omkring 80 - 85 % reduktion af NO_x i det driftsområde, som systemet er designet til.

For at sikre en høj omsætning af NO_x skal doseringen af urea ske i det rigtige forhold med NO og NO₂. Overordnet set reagerer NO og NO₂ med ammoniak i forholdet 1:1 på molbasis, og det tilstræbes derfor at ramme dette forhold under doseringen. Doseringen bestemmes typisk af en algoritme på baggrund af information om temperaturen og NO_x niveauet, som måles før DOC. Algoritmens dosering justeres efterfølgende ved måling på NO_x-niveauet efter systemet. Luftmassemålingen foretages normalt ved hjælp af tryktabet over SCR-katalysatoren, da dette er ligefrem proportionalt med lufthastigheden. En ekstra NO_x-sensor efter SCR-katalysatoren anvendes til at korrigere den indsprøjtede mængde.

Ved anvendelse af urea vil doseringssystemet først blive aktiveret, når katalysatoren er opvarmet til over ca. 200 °C. Dette skyldes en begrænsning i den kemiske omdannelse af urea til ammoniak, såvel som risikoen for udkrystallisering af ammonium-sulfat ved lav temperatur, som kan deaktivere katalysatoren midlertidigt. Doseringssystemet vil ligeledes blive deaktiveret, hvis temperaturen falder under 200 °C, hvilket vil ske, hvis motoren står længere tid med meget lav belastning eller i tomgang.

ASC – ammoniakslip-katalysator

Ammoniakslip-katalysatoren har til formål at omdanne overskydende ammoniak, som undslipper fra SCR-katalysatoren. Dette er især nødvendigt, når temperaturen i SCR-katalysatoren stiger over kort tid, da dette frigiver en del af den adsorbereede ammoniak, som derved undslipper katalysatoren uden at reagere. Slip-katalysatoren sikrer også, at den NO_x-sensor, som sidder efter SCR-katalysatoren, ikke påvirkes af ammoniak, hvilket betyder, at doseringsalgoritmen får et mere præcist feedback.

De primære produkter i omdannelsen af ammoniak i ASC er nitrogen og vand, men der dannes også NO, NO₂ og N₂O (lattergas). Således kan overdosering af urea sænke effektiviteten af SCR, idet NH₃ omdannes til NO og NO₂ i slip-katalysatoren.

2.5 Udvalgelse af maskiner

Med henblik på at udvælge entreprenørmaskiner i projektet på det mest optimale grundlag blev der foretaget en inspektionstur ved NCC Roads i juni 2014. Både maskiner i drift samt maskiner i garage (Glostrup) af forskellige typer og størrelser blev observeret. Efterfølgende blev fordele/ulemper med henblik på retrofit grundigt diskuteret blandt projektets parter. Se Figur 2.



I overensstemmelse med alle parter ønsker i projektet blev der set nærmere på muligheden for at udstyre en eller flere af fire forskellige maskiner med et efterbehandlingssystem. Alle fire maskiner er asfaltudlæggere af forskellige størrelser, lig de viste på Figur 2. Det blev konkluderet, at der som udgangspunkt er for lidt plads på bl.a. tromler og traktorer til retrofit af en kombinationsløsning med DPF+SCR. Maskinernes alder skal også tages med i betragtningen og også i den henseende var det mest oplagt at gå videre med udlæggere. Der skulle også tages hensyn til den daglige drift af maskinerne, så der i projektet blev set på maskiner, som det var muligt at tage ud af driften til test og montering.

Forud for den endelige udvælgelse blev der installeret temperaturloggere på maskinerne. Temperaturprofilerne var med til at afgøre, hvilke maskiner der blev udvalgt til en indledende emissionsmåling, som beskrevet i kapitel 3.

Det blev diskuteret, hvordan emissionsmålinger på maskinerne kunne gennemføres, mens maskinerne var i drift. Oprindeligt var det tanken, at der skulle foretages målinger, mens maskinerne blev anvendt til asfaltarbejde. NCC Roads åbnede dog op for at foretage målinger på NCC's lagerområde i Glostrup med udlægning af genbrugsasfalt, som anvendes, når maskinerne skal kontrolleres. Dette gav mulighed for at lægge asfalt ud under kontrollerede forhold og samtidig have fuld frihed i forhold til maskinerne, hvilket klart ville være at foretrække. Det blev således besluttet at foretage alle målinger i projektet under de kontrollerede forhold i Glostrup.

2.6 Udvikling af målemetode til karakterisering af emissioner

Udgangspunktet for udvikling af målemetoden har været et fokus på tidssvarende målinger, dvs. en antalsbaseret tilgang til måling af partikler og samtidig præcis måling af NO_x; med kvantificering af hhv. NO og NO₂. For både partikler og NO_x skærpes kravene løbende i disse år, jf. afsnit 2.3.

Et vigtigt element i udviklingen af målemetode har været helt lavpraktisk at dæmpe rystelser, som kan påvirke målingerne. Det har også været en målsætning at måle så simpelt som muligt, så metoden let og omkostningseffektivt vil kunne overføres til måling på andre maskiner.

2.6.1 Partikelmålinger

I forhold til partikelmålingen har udgangspunktet været at læne sig op ad det såkaldte PMP (Particle Measurement Program), som definerer den målemetode, der benyttes til at måle partikelemission, jf. Euro VI (vejpgående trafik). Jævnfør PMP måles udelukkende den faste partikelfraktion med henblik på at kunne reproducere målinger og samtidig kun partikler større end 23 nm (d₅₀).¹⁴ Dette gøres ved at benytte et opvarmet fortyndingstrin (150 grader celsius) samt efterfølgende passage af en fordamper (*evaporator*), hvor flygtige organiske forbindelser forbrændes ved 300 grader celsius. Dette er umiddelbart efterfulgt af endnu et fortyndingstrin ved rumtemperatur, hvor partikelstrømmen køles ved fortynding for samtidig at forebygge dannelse af sekundære partikler (rekondensering), som kan udgøre en væsentlig del af den samlede partikelfraktion. Endelig tælles partiklerne i en CPC (Condensation Particle Counter).

For at være repræsentativ ift. PMP, men samtidig mobil og nytænkende, blev det besluttet at udføre partikelmålingen efter metoden skitseret i Figur 3. Ved at benytte et instrument af typen NanoScan SMPS opnås, udover at tælle partiklerne som i PMP, samtidig information om partiklernes størrelsesfordeling samt antallet af partikler helt ned til 10 nm i størrelse. Dette kan være vigtig viden ift. at vurdere, hvorvidt PMP-størrelsesgrænsen ved 23 nm er tidssvarende eller mere historisk betonet i udviklingen af målemetoder og -instrumenter. Det vil samtidig give brugbar viden om partiklernes størrelse fra denne type motorer.

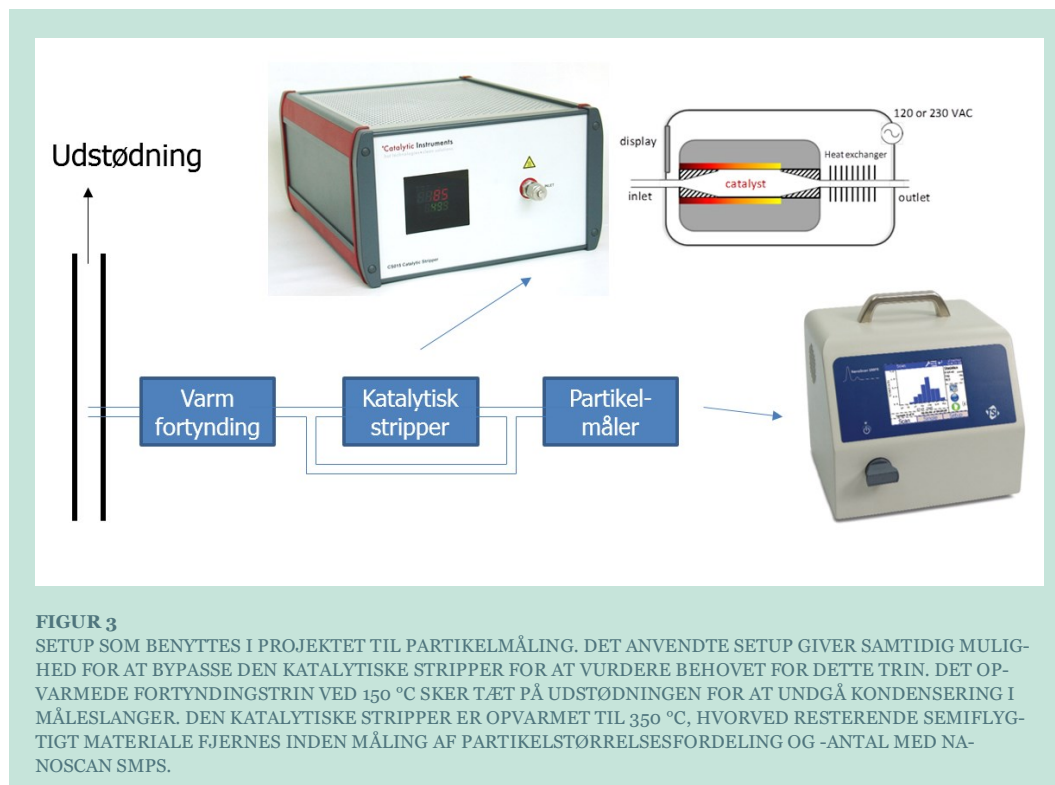
Inkludering af de mindre partikler i projektets målemetode har samtidig givet anledning til nogle overvejelser omkring den mest optimale måde at fjerne den semiflygtige del af partiklerne (ikke-faste partikler). Typisk består denne del af partiklerne af organisk materiale, men kan også indeholde svovlforbindelser, hvis der er højt svovlindhold i brændstoffet (fx skibsmotorer).

I litteraturen diskuteres fordele/ulemper mellem to forskellige teknologier; den traditionelle thermodenuder (fordamper) og katalytisk stripper-teknologi, hvor man ud over opvarmning har en katalytisk belægning, som oxiderer de semiflygtige forbindelser. I det lave måleområde under PMP cut (<23 nm) viser studier, at thermodenuderen (TD) kan give anledning til artefakter;¹⁵ primært

¹⁴ <http://www.unece.org/fileadmin/DAM/trans/doc/2007/wp29grpe/PMP-2007-18-02e.pdf>

¹⁵ J. Swanson *et al.*, Evaluation of thermal denuder and catalytic stripper methods for solid particle measurements, *Journal of Aerosol Science* 41 (2010) 1113–1122

derfor blev det besluttet at benytte en katalytisk stripper i dette projekt. Artefakter ved TD-metoden kan omfatte 1) dannelse af semiflygtige partikler på grund af ufuldstændig fjernelse af fordampede kemiske forbindelser samt 2) faste partikler, der dannes under behandling af aerosolen med TD. Samme studie viser dog også, at artefakterne ikke lader til at have nogen væsentlig betydning for traditionelle målinger i PMP regi >23 nm.



2.6.2 Gasmålinger

De regulerede gasser i forhold til Stage III A/B og Stage IV er CO, HC og NO_x, hvor sidstnævnte er summen af NO og NO₂. Disse gasser kan måles med traditionelt måleudstyr, som består af NDIR (non-dispersive infrared) til CO og CO₂, CLD (chemi-luminescence detection) til NO og NO₂ samt FID (flame ionization detection) til HC.

Herudover er der defineret en grænseværdi på 25 ppm for den gennemsnitlige koncentration af ammoniak i udstødningen. Denne grænse er indført for at sikre mod høje ammoniakslip fra SCR-katalysatorer. Ammoniak kan imidlertid ikke måles med det traditionelle udstyr. Derfor anvendes i dette projekt en nyere type instrument, som i daglig tale kaldes FTIR – forkortelsen for Fourier Transform Infrared spectroscopy. Med FTIR måles absorptionen af lys i et bredt infrarødt spektrum i en celle, som udstødningsgassen passerer igennem. På baggrund af kendskab til de enkelte gassers unikke absorptionsspektre kan det målte spektrum kvantificeres, således at sammensætningen af gassen kan bestemmes med forholdsvis høj nøjagtighed. I Bilag 1 findes en oversigt over det anvendte instruments kalibrering, som viser, hvilke gasser der måles.

En anden fordel ved FTIR-målingen i forhold til SCR-katalysatorer er, at instrumentet også måler lattergas (N₂O). Denne gas er en indikator for ammoniakslip, idet en del af ammoniakken oxideres til lattergas i ammoniakslip-katalysatorer. Derved kan det bestemmes, om SCR-katalysatoren tilføres for meget ammoniak under drift, selvom der er installeret en ammoniakslip-katalysator. Dette er brugbart i udvikling og diagnosticering af SCR-systemer.

2.7 Konklusion

I arbejdsplanen 1 blev det teoretiske grundlag for projektet lagt, og der blev udvalgt 4 maskiner, der opfylder de grundlæggende kriterier (passende alder, motorstørrelse, plads til retrofit og fleksibilitet ift. øvrig drift). Dette udvalg af maskiner skal der arbejdes videre med i projektet, og det skal yderligere indsnævres. Maskinerne skal have installeret temperaturloggere, hvorefter emissionerne skal karakteriseres, før designet af kombinationsløsningen med DPF og SCR fastlægges.

Ligeledes blev der gjort grundige overvejelser omkring, hvilken målemetode der skulle benyttes i projektet. På partikeldelen blev udviklet en metode, som er målrettet PMP, men som samtidig er af en mere fleksibel natur, herunder opnåelse af størrelsesinformation og antal af partikler helt ned til 10 nm. Til gasmålinger skal anvendes en FTIR, som udover at måle de regulerede gasser, også kan måle koncentrationen af ammoniak (NH_3) og lattergas (N_2O), hvilket især er relevant ved optimering af urea-doseringen til den NO_x -reducerende SCR-katalysator.

3. Arbejdspakke 2: Udvikling af kombinationsløsning

3.1 Formål

Formålet med AP 2 har været at udvikle selve kombinationsløsningen til udvalgte maskiner. Udgangspunktet har været det i AP 1 indsnævrede felt af maskiner og med kombinationsløsningen målrettet NO_x- og partikelreduktion. Parallelt hermed foretages indledende emissionsmåling på forskellige maskiner til brug for fremadrettet reference i projektet. Oprindeligt var dette punkt en del af arbejdspakke 1, men det gav mening inden da at foretage en yderligere indsnævring af maskinerne, med kortlægning af driftsmønster mv.

Til transport på landjorden er der udviklet en række effektive filtre til fjernelse af partikler baseret på keramiske monolitter. Disse keramiske filtre, normalt enten SiC- eller Cordierite-baserede Wall Flow-filtre, kan fjerne mere end 99 % af antallet af partikler fra køretøjers emission, afhængigt af partikelmassen i filteret. Samtidig findes kommercielt tilgængelige systemer til fjernelse af NO_x, fx baseret på urea-SCR. Overførsel af disse teknologier til ikke-vejgående maskiner stiller dog nogle særlige krav til fx regenerering (forbrænding af opsamlet sod), idet driftsprofilen typisk er noget mere varierende end for vejgående maskiner. Særligt kan motortemperaturen være noget lavere end på fx lastbiler, hvilket i værste tilfælde kan lede til motorhavari som funktion af for stort tryktab over filteret.

Pladsforhold på maskinerne spiller også en vigtig rolle, idet maskinerne oftest er meget kompakt konstrueret.

3.2 Kortlægning af maskinernes driftsmønster og pladsforhold

Der blev jf. afsnit 2.5 monteret temperaturloggere (T-loggere) på 4 maskiner, alle udlæggere. Temperaturen i udstødningen (herefter T-profil) er den vigtigste parameter i forhold til regenerering af partikelfilteret og reduktion af NO_x.

For de fire maskiner ser T-profilerne ret identiske, stabile og fornuftige ud på alle maskiner, hvilket er bedre end forventet. Ca.-temp. er 300-350 °C, når motoren er varmet op, hvilket er en god temperatur for retrofit, da det er muligt at opnå kontinuert afbrænding af den opsamlede sod – også kaldet kontinuert regenerering. Purefi vurderede ud fra T-profilerne, at det kan lade sig gøre med retrofit. På SCR-delen vil der dog være en risiko med urea-dosering, som kan have problemer med udkrystallisering ved høje temperaturer, hvilket kan blokere udstødningen. Dette bør dog ikke være noget problem, når der sættes et DPF af SiC ind foran, hvilket forventes at sænke temperaturen inden SCR.

Det blev besluttet at se nærmere på en bestemt udlægger (UM 269) med henblik på retrofit i projektet. Motoren i denne udlægger er en firecylindret turbodiesel på 45 kW Stage IIIA fra 2012, som ikke har DPF. På denne maskine afprøves to forskellige kombinationsløsninger for at have et direkte sammenligningsgrundlag for de forskellige teknologier.

Det blev af NCC foreslået, at der også måles emission fra en nyere maskine (Stage IV / Stage IIIB) og bruge disse målinger som sammenligningsgrundlag med ældre maskiner. Der er mulighed for at måle på asfaltfræsere. Alle parter var interesserede i at få belyst, hvordan de reelle udledninger er fra maskiner.

3.3 Indledende karakterisering af emission fra udvalgte maskiner under drift

Udstyret, som anvendtes til de indledende emissionsmålinger er beskrevet i afsnit 2.6. I det følgende opsummeres kort opbygningen af udstyr til partikelmåling og gasmåling. Partikelmålingen består af et indledende, opvarmet fortyndingstrin helt tæt på udstødningen, hvorefter partiklerne ledes gennem en katalytisk stripper, som fjerner alt semiflygtigt materiale, således at kun den faste partikelfraktion er tilbage. Endelig måles antal og størrelse af de faste partikler i størrelsesintervallet 10-350 nm (med mobil NanoScan SMPS). Gasemissionerne blev indledningsvist målt med mere traditionelt gasmåleudstyr, stadig on-site og parallelt med partikelmålingerne. FTIR blev benyttet ved de efterfølgende målekampanjer, men var desværre ikke en mulighed ved denne indledende karakterisering. Her var det dog heller ikke vigtigt at måle ammoniak eller lattergas, da SCR ikke var installeret på dette tidspunkt.

Alt måleudstyr blev placeret i en varevogn, som kørte parallelt med maskinerne på testfacilitet ved NCC Roads A/S i Ejby gennemført ultimo 2014, se Figur 4 og Figur 5. På den første måledag blev målt på fræser med DPF og dag 2 blev målt på udlægger uden DPF (den maskine, der er udvalgt til retrofit) samt en fræser uden DPF med henblik på sammenligning. Partikelfilter på fræseren med DPF er fra en ukendt leverandør (ikke et LiqTech-filter)



FIGUR 4
BILLEDER FRA EMISSIONSMÅLING PÅ ASFALTFRÆSERE PÅ TESTSTRÆKNING VED NCC ROADS A/S.



FIGUR 5
BILLEDER FRA EMISSIONSMÅLING PÅ ASFALTUDLÆGGER PÅ TESTSTRÆKNING VED NCC ROADS A/S – SAMME MASKINE (ASFALTUDLÆGGER), SOM SKAL RETROFITTES I PROJEKTET.

Gennemsnitlige emissionsdata fra de tre entreprenørmaskiner er vist i Tabel 3 og uddybet efterfølgende. Hvert tal er et gennemsnit på 2-3 målecykluser, hver med en varighed på ca. 15 minutter, repræsentative for normal anvendelse og typiske motorbelastning for de tre maskiner. Forud for målingerne var maskinerne blevet varmet op, hvilket normalt vil ske i forhøjet tomgang for de fleste maskiner før de bliver belastet. Målingerne er derfor repræsentative for normal anvendelse, men der vil naturligvis være højere emissioner under selve opvarmning af maskinerne.

TABEL 3
PARTIKEL OG GASEMISSIONER PÅ TRE FORSKELLIGE MASKINER HENHOLDSVIS MED OG UDEN PARTIKELFILTER (DPF) UNDER REALISTISKE DRIFTSBETINGELSER. PARTIKELKONCENTRATION (PNC) ER MÅLT I STØRRELSSESINTERVALLET 10-420 NM MED NANOSCAN SMPS, JF. AFSNIT 2.6.

Emissionsmåling	Fræser med DPF	Udlægger uden DPF	Fræser uden DPF
PNC, normal belastning [# /cm ³]	2,9 · 10 ⁶	9,9 · 10 ⁷	2,2 · 10 ⁸
PNC, tomgang [# /cm ³]	3,0 · 10 ⁵	9,1 · 10 ⁷	8,1 · 10 ⁵
Middeldiameter, normal belastning [nm]	61	73	90
Middeldiameter, tomgang [nm]	86	68	77
NO [ppm]	200-250	300-400	700
NO ₂ [ppm]	40-50	20-30	10-20
NO _x [ppm]	250-300	300-450	700
CO [ppm]	5-10	100	1.000-10.000
CO ₂ [%]	8-9	8	8-11

3.3.1 Partikelmålinger

Der blev målt relativt høje partikelkoncentrationer på alle 3 maskiner, inkl. maskinen med DPF (ikke et LiqTech-filter). Desuden bemærkes, at den målte partikelkoncentration for fræseren med DPF er omkring en faktor 10 over den referenceværdi, der bliver foreslået af det schweiziske FOEN (2,5x10⁵ partikler/cm³), hvilket kraftigt indikerer et skadet DPF. Dette på trods af at den målte koncentration er omkring en faktor 100 under den målte for fræseren uden DPF. Selvom DPF sandsynligvis er skadet, er der altså stadig en kraftig effekt af filteret.

De målte nanopartikler har en gennemsnitsdiameter på omkring 60-90 nm med relativt få faste partikler nær og under PMP cut (23 nm) for de pågældende målinger.

Den målte partikelkoncentration for udlæggeren uden DPF benyttes som reference fremadrettet i projektet med henblik på sammenligning med samme maskine med DPF+SCR monteret.

3.3.2 Gasmålinger

Formålet med gasmålingerne var at bestemme niveauerne af de regulerede emissioner, dvs. NO_x, CO og THC. CO₂ blev målt som indikator på lasten. De målte middelværdier fremgår af Tabel 3.

Fræser med partikelfilter

Maskinen med partikelfilter havde forholdsvis lave værdier af NO og NO₂ og meget lave værdier af CO og THC. Niveaue af CO₂ på 6-8 % indikerede, at motoren kørte med et normalt luftoverskud.

Temperaturen i udstødningen var på omkring 350 grader, hvilket altså er efter partikelfilteret og dermed indikere at filterets temperatur er tilstrækkelig til kontinuert regenerering.

Fræser uden partikelfilter

Fræseren uden partikelfilter havde markant højere værdier af NO og NO₂ end fræseren med partikelfilter. Niveauer af CO på op mod 1 % og CO₂ over 10 % indikerede, at motoren kørte med et unormalt lavt luftoverskud. Dette kan skyldes en defekt turbolader eller en dårligt indstillet diesel-pumpe, som giver for høj brændstofmængde under last. Temperaturen i udstødningen kom op på omkring 500 grader, hvilket er fuldt tilstrækkeligt til regenerering af et partikelfilter. Der blev ikke målt THC i denne kørsel.

Udlægger uden partikelfilter

På udlæggeren, som senere skulle udstyres med DPF og SCR, blev der målt forventelige koncentrationer af NO/NO₂, CO og CO₂. Målingerne indikerer, at motoren arbejder med normal forbrænding og et korrekt luftoverskud. Den målte temperatur i udstødningen ligger mellem 400 og 500 °C, hvilket er tilstrækkeligt til regenerering af et partikelfilter.

3.3.3 Erfaringer fra første målekampagne

En af erfaringerne fra første målekampagne var, at udstyret til måling af NO_x er følsomt over for kulde. Derfor fungerede NO_x måleren først efter nogen tids opvarmning. Partikelmålingen forløb efter planen. En anden erfaring var at den anvendte generator ikke leverede strøm nok til hele opstillingen, hvilket betød, at der måtte slukkes for måling af THC for at undgå, at generatorens sikring slog fra. Disse problemer medførte at der blev medbragt en batteridrevet strømforsyning (UPS) ved de næste målinger, som sørgede for at udjævne effektforbruget på generatoren og sikrede instrumenterne mod strømafbrydelse.

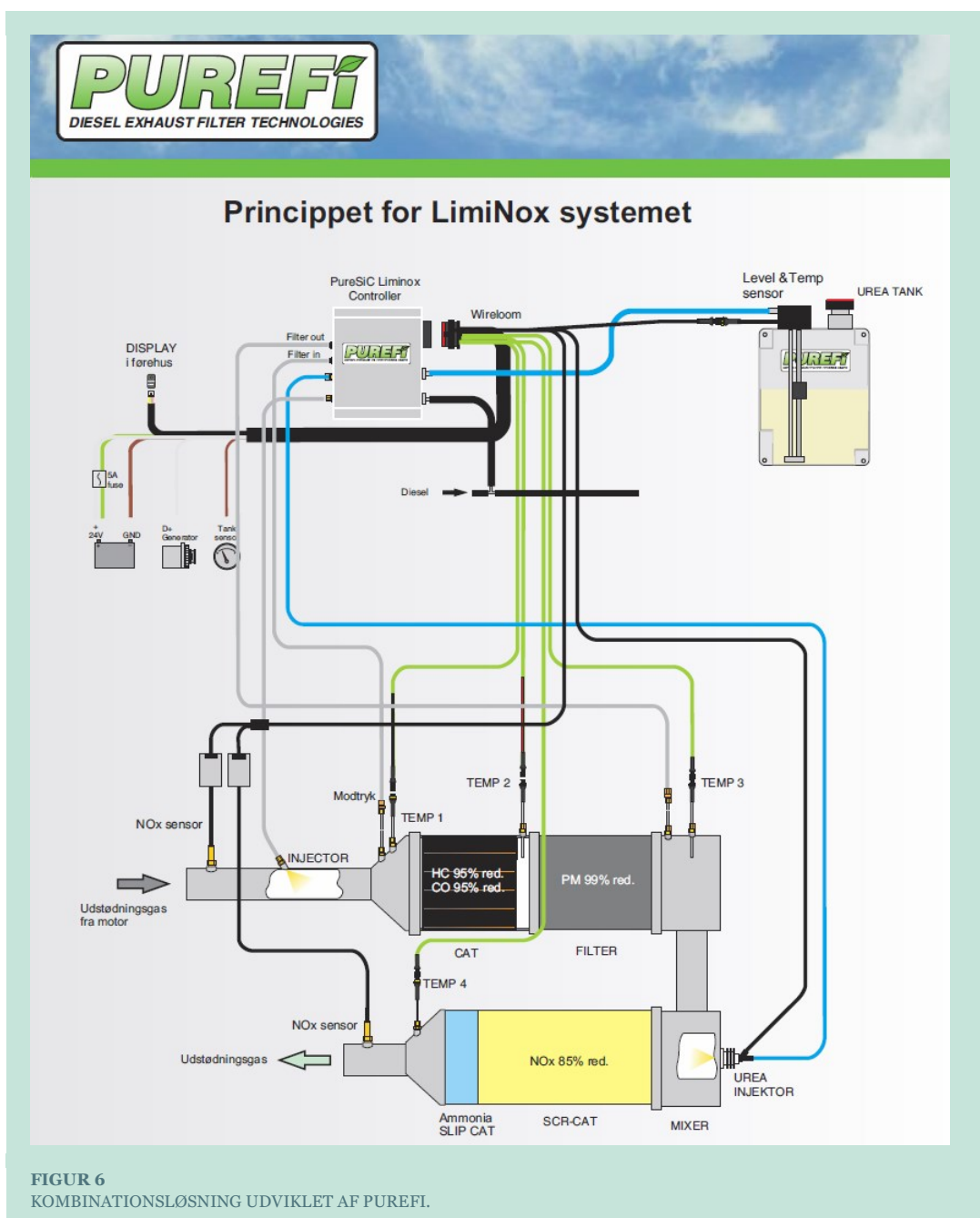
Efter disse indledende emissionsmålinger blev der arbejdet videre med udvikling af kombinationsløsningen målrettet asfaltudlæggeren, og emissionsmålingerne benyttes som reference for det fremtidige arbejde.

3.4 Detaljeret beskrivelse af kombinationsløsningen

I Figur 6 vises en principskitse af den kombinationsløsning, som Purefi har udviklet, inklusive sensorer, styringselektronik og doseringsudstyr. Systemet består af følgende komponenter:

- Sensorer til tryk, temperatur og NOx
- Dyser til dosering af urea og diesel
- Tank til urea med niveausensor
- Ledningsnet og display til indikation af systemets tilstand
- Styring og overvågning af alle systemets funktioner, inkl. pumper til urea og diesel

Katalysatorer og filtre udvælges af Purefi til den konkrete opgave.



FIGUR 6
KOMBINATIONSLØSNING UDVIKLET AF PUREFI.

3.5 Optimering af egenskaber, dimensionering og fremstilling af kombinationsløsning nr. 1

Systemet blev fra starten designet ud fra et princip om robusthed, da det skulle monteres relativt udsat på en arbejdsmaskine. Opbygningen blev derfor en løsning med de mest robuste materialer på markedet og består af følgende:

- En indpakning i rustfrit stål.
- En DOC, som er en metalkatalysator, der er specielt designet til ekstremt høje temperaturer også under regenerering.
- En filterkerne i DPF af det meget robuste materiale SiC fra LiqTech, som også er optimeret i porøsitet for optimal sodfiltrering. Filtrene har en væsentlig højere durabilitet end de fleste andre på markedet, og især i forhold til Cordierite filtre.
- En SCR-katalysator, som har en metallisk kerne med en kemisk sammensætning, der er designet til stabilitet ved meget høje temperaturer. En særligt vigtig parameter er, at SCR-katalysatoren skal kunne modstå en evt. krystallisering af urea samt efterfølgende afbrænding af krystallerne uden sammensmeltning af kernen.
- En styring, der er programmeret til jævnligt at sørge for afbrænding/rensning af SCR-katalysatoren for evt. krystaller og dermed til enhver tid sikre frit flow samt størst mulig kontaktflade med udstødningsgassen og dermed højest mulig NO_x-reduktion.
- En ASC, som også er udført af en metallisk kerne for maksimal levetid.

Det blev fra starten valgt, at kombinationsløsningen skulle være et aktivt system, hvilket betyder, at systemet selv kan tilføre varme og derved regulere temperaturen. Således er det samlede system også effektivt ved lave temperaturer, hvor standardsystemer normalt ikke fungerer. Er udstødningsgassen for kold, dvs. under 240 °C, sørger systemet for at dosere en lille mængde diesel, som forbrændes i oxidationskatalysatoren. Herved hæves temperaturen over 240 °C, hvor NO_x-reduktionen er effektiv, samtidig med at der ikke sker udkrystallisering af den doserede urea i udstødningen. Krystallisering vil med tiden tilstoppe SCR-katalysatoren og til sidst i værste fald helt blokere for flowet gennem SCR-katalysatoren. Systemet kan dog rense sig selv ved at hæve temperaturen over ca. 350 °C i kortere perioder, hvilket oxiderer (afbrænder) krystalliseret urea.

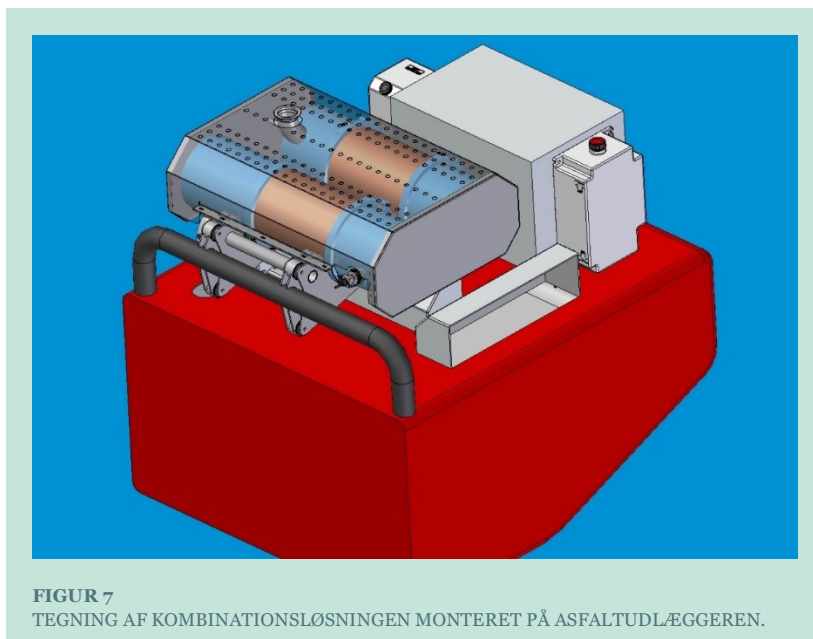
Første kombinationsløsning blev designet med henblik på at sikre et lavt modtryk under drift, så der ikke opstod motorstop på grund af filteret. Derfor blev der anvendt komponenter med et volumen, der var ca. dobbelt så stort som normalt. Der blev endvidere valgt et katalytisk belagt filter for at optimere regenereringen af filteret. Komponenternes specifikationer i første kombinationsløsning fremgår af tabel 4.

TABEL 4
SPECIFIKATION AF KOMPONENTER I FØRSTE KOMBINATIONSLØSNING.

Component	Material and coating	Dimensions	Volume	Note
DOC	High Platinum coating	Ø 191 x 120 mm	3.5 L	
DPF	SiC with Platinum coating	Ø228 x 305 mm	12.0 L	
SCR	400 cpsi	2x Ø224 x 150 mm	12.0 L	High Temperature Stability
ASC	No ASC			

I designfasen af kombinationsproduktet blev der lagt vægt på, at eftermontering af systemet ikke måtte skabe gener eller påvirke sikkerheden for brugerne af maskinen. Særligt måtte udsynet til siderne ikke blokeres. Purefi valgte derfor at placere systemet over motoren, som vist på Figur 7. NCC ønskede også, at motoren kunne tilgås ovenfra, dvs. ved åbning af den øverste

motorafskærmning. Dette blev løst ved at montere systemet på et hængsel, således at hele systemet kan vippe op i lodret stilling og give fri adgang til motoren fra den øverste motorafskærmning.



På Figur 7 ses det også, at systemet er placeret mellem indsugningstragterne til motorens kølesystem. Tragterne er eftermonterede stålprofiler, som beskytter indsugningen til kølesystemet mod asfalt. Ved at placere systemet hævet over disse sikres det, at varmen fra emissionssystemet ikke forringer motorens køling. På figuren ses også beholderne til urea og FBC (fuel borne catalyst) på siden af den metalkasse, som indeholder NCC's udstyr.

Systemet bliver under drift opvarmet til over 300 °C. Der blev derfor også designet et varmeskjold til systemet, dels for at sikre brugerne mod forbrænding ved berøring, dels for at beskytte systemet mod skader, som særligt kunne tænkes at opstå under påfyldning af asfalt. Varmeskjoldet, som er skitseret gennemsligt på Figur 7, blev dog aldrig monteret, da det viste sig, at der ikke er nogen fare for berøring, og fordi det blev vurderet, at emissionssystemet ikke var specielt udsat.

3.5.1 Afsluttende bemærkninger fra Purefi

Purefis system udmærker sig ved, at det også kan fungere ved lavere driftstemperatur, end standarden er i dag. Dette medfører en forbedret effektivitet og bedre regenerering af partikelfilteret allerede ved udstødningstemperaturer omkring 200 °C. Reduktionen af NO_x er derfor ligeledes forbedret, da doseringen af urea kan starte ved en lavere udstødningstemperatur. En sikker regenerering af partikelfilteret har meget høj værdi for driften af maskinen, da driftstop som følge af eksempelvis et tilstoppet partikelfilter dermed undgås/minimeres.

3.6 Konklusion

Den første kombinationsløsning blev designet med henblik på robusthed og driftssikkerhed. Særligt blev der designet efter, at der ikke måtte opstå for højt modtryk i filteret. Den udviklede kombinationsløsning opfyldte ligeledes kravet fra NCC om, at det ikke måtte optage for meget plads eller tage udsyn, samt at der skulle være adgang til motoren fra siderne og fra toppen.

Den udviklede målemetode blev anvendt ved de indledende emissionsmålinger. Selve opsætningen med en varevogn kørende ved siden af entreprenørmaskinerne var vellykket, og sideløbende med udviklingen af DPF + SCR-løsningen blev emissionsdata i realtid opnået under virkelige driftsforhold. De målte emissioner viste, at der er stor forskel på maskinernes emissioner, som kan tilbage-

føres dels til maskinernes alder, og dels deres respektive Stagecertificering. En enkelt maskine udviste dog også tegn på motorfejl, idet især partikel- og CO-emissionerne var ekstreme.

4. Arbejdspakke 3: Montering og overvågning på udvalgte maskiner

4.1 Formål

Formålet med AP 3 har været montering af DPF/SCR-løsningen på udvalgte maskiner samt overvågning af systemet ved normal drift. Herunder også optimering af egenskaber under realtidsmålinger på systemet under realistiske driftsforhold.

4.2 Montering af kombinationsløsning på udvalgt maskine

På baggrund af aktiviteter i AP2, beskrevet i forrige kapitel, blev systemet monteret på udlæggeren. Den udviklede kombinationsløsning blev monteret og testet på maskinen under drift for at få en realistisk afprøvning af den udviklede teknologi.

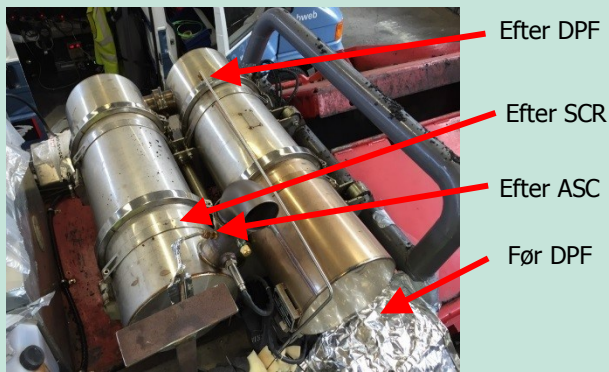
4.2.1 Installation af det færdige system

På Figur 8 ses systemet fra siden, mens det er ved at blive monteret. Det ses, at der også er fri adgang til motoren fra siden af maskinen. Det bemærkes også, at systemet ikke tager ret meget af udsynet fremad, da det ikke er højere end NCC's fastmonterede værktøjskasse.



FIGUR 8
MASKINEN MED KOMBINATIONSLØSNING MONTERET (VENSTRE) OG KOMBINATIONSLØSNIGNEN SET FRA SIDEN (HØJRE).

På Figur 9 ses systemet ovenfra, mens det er ved at blive klargjort til emissionsmåling. På figuren er de forskellige udtag af udstødningssgas markeret. Udtagene blev ført ned i en firevejs ventil, således at der hurtigt kunne skiftes mellem de fire udtag under måling.



FIGUR 9
KOMBINATIONSLØSNING FORBEREDT TIL EMISSIONSMÅLING.

4.3 Overvågning af kombinationsløsning ved normal drift og test af robusthed

Purefi DPF-SCR system er en *stand-alone* enhed, som arbejder med sine egne sensorer. Begge systemer er overvåget via modtrykssensorer, som sikrer, at systemet ikke pludselig stopper, således at udstødningsgassen ikke længere kan passere gennem filter og SCR-katalysator. Såfremt modtrykket alligevel overstiger det maksimalt tilladte niveau, vil der komme en alarm, og fejl skal rettes, før driften kan fortsætte.

De operatører, der har deres daglige gang ved maskinerne, har meldt tilbage, at der ingen problemer har været med systemet, og at den daglige drift har været uforstyrret. Systemet har samtidig ikke været forsøgt stjålet, hvilket der har været lidt nervøsitet omkring, da systemet sidder relativt let tilgængeligt uden på maskinen.

4.4 Optimering af egenskaber under normale driftsforhold

Den udviklede målemetode (beskrevet i afsnit 2.6) blev benyttet til at gennemføre projektets anden målekampagne, denne gang med fokus udelukkende på asfaltudlæggeren. Emissionsmålingerne blev gennemført medio 2015 på testfacilitet ved NCC Roads A/S i Ejby (se Figur 10). Til denne målekampagne blev gasmålingerne udført med en mobil FTIR-plattform, hvilket gav mulighed for at fokusere på ammoniak og lattergas, som begge dannes i efterbehandlingssystemet. Urea-doseringen blev optimeret on-site, og partikelfiltre med og uden platin blev afprøvet. Der blev også eksperimenteret med aktiv regenerering ved tilsætning af diesel til DOC-katalysatoren for at bestemme indflydelsen på SCR-delen.



FIGUR 10
BILLEDER FRA EMISSIONSMÅLING PÅ ASFALTUDLÆGGER MED PÅMONTERET KOMBINATIONSLØSNING VED NCC ROADS I EJBY.

Den første måledag blev der målt på et DPF/SCR-system, hvor partikelfilteret var belagt med platin. Der blev foretaget partikelmålinger før DPF og efter SCR samt gasmålinger i begge disse positioner og i position efter DPF, jf. Figur 9.

4.4.1 Partikelmålinger

Partikelmålingerne før partikelfilteret var sammenlignelige med målingerne på samme maskine uden partikelfilter (målekampagne oktober 2014, beskrevet i afsnit 3.3). Dette viser, at motoren formodes at arbejde på samme måde uafhængigt af det monterede filter, hvilket er forventeligt, da der ikke er observeret noget signifikant modtryk.

På målekampagnens anden dag, blev der om formiddagen målt og optimeret på systemet med platinbelægning. Over middag blev partikelfilteret udskiftet med en model uden platinbelægning, og der blev efterfølgende målt partikler efter SCR, samt gassens sammensætning efter DPF og efter SCR. Målte partikelkoncentrationer var meget sammenlignelige for partikelfiltrene med og uden platin. Dette er interessant, da det er særdeles bekosteligt at belægge et partikelfilter med platin.

Den gennemsnitlige partikelkoncentration over seks udlægninger med forskellige SCR-parametre er vist i Tabel 5. Denne sammenlignes med maskinens gennemsnitlige partikelemission uden DPF (se Tabel 3). Den beregnede middelkoncentration (antal / kWh) er foretaget via formel og antagelser beskrevet i Bilag 2. Det ses, at reduktionen af antal partikler (større end 23 nm) var højere end 99,9 %.

TABEL 5
MIDDELPARTIKELKONCENTRATIONER MÅLT FØR DPF OG EFTER SCR. REDUKTIONEN ER UDREGNET PÅ BAGGRUND AF MIDDELKONCENTRATIONERNE MÅLT OVER FORSKELLIGE UDLÆGNINGER. USIKKERHED ANGIVER ± EN STANDARDAFVIGELSE, UDREGNET PÅ BAGGRUND AF DE FORETAGNE MÅLINGER.

	Middelkoncentration PN [# / cm ³]	Beregnet middel- koncentration PN [# / kWh]	Reduktionsgrad [%]
Før DPF	$(1,7 \pm 0,8) \cdot 10^8$	$(8,9 \pm 4,2) \cdot 10^{14}$	
Efter SCR – kombinationsløs- ning 1	$(6,9 \pm 3,8) \cdot 10^4$	$(3,6 \pm 2,0) \cdot 10^{11}$	99,96 ± 0,03

4.4.2 Gasmålinger

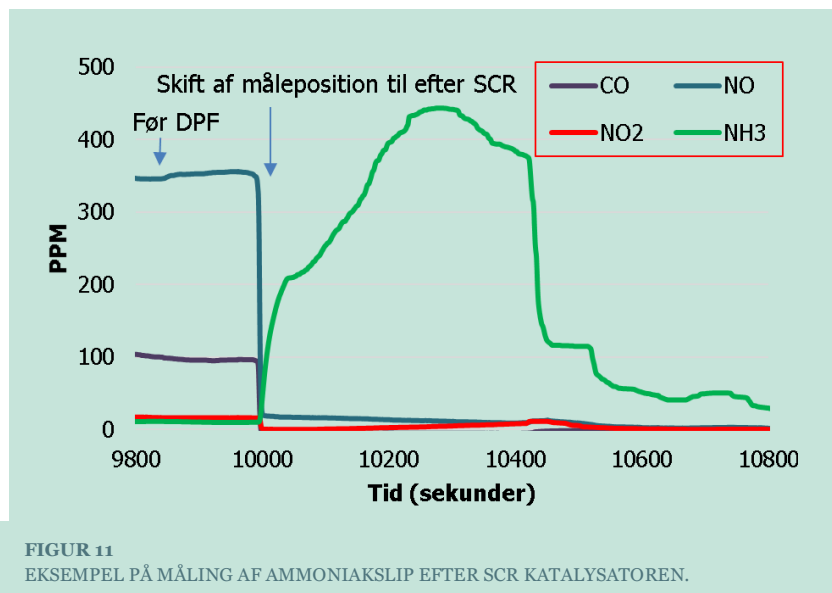
Ved måling under reelle driftsbetingelser opnåede system 1 at reducere NOx-udledningen med ca. 75 %. Maskinens udledning uden efterbehandling blev målt til ca. 3,1 g/kWh, mens system 1 reducerede dette til ca. 0,75 g/kWh. Første system var dermed ikke tilstrækkeligt til at opnå tilnærmede Stage IV-krav, da grænsen for NOx her er på 0,4 g/kWh.

Systemet var til gengæld effektivt til at reducere udledningen af kulbrinter og CO. Kulbrinter blev reduceret fra 1,36 til 0,15 g/kWh, hvor grænseværdien for Stage IV er 0,19 g/kWh. CO blev reduceret så effektivt, at det faldt under FTIR-instrumentets usikkerhed og er dermed langt under grænseværdien på 5 g/kWh.

Urea-doseringen var før målekampagnen sat op til automatisk regulering af urea. Doseringen styres af en algoritme på basis af den NOx-koncentration, som måles med NOx-sensorerne før og efter systemet. Under målekampagnen afprøvedes andre doseringsstrategier med henblik på at se sammenhængen mellem urea-dosering og NOx-reduktion.

Under arbejdet med optimering af doseringen var der i flere perioder problemer med overdosering af urea, hvilket gav høje koncentrationer af ammoniak i udstødningen. Problemet skyldtes, at den NO_x-sensor, som sidder i udgangen af systemet, er følsom over for både NO og ammoniak. Ved utilsigtet overdosering over længere tid blev SCR-katalysatoren mættet og begyndte at frigøre ammoniak. Dette blev fejlagtigt målt af NO_x-sensoren som NO_x, hvilket førte til kraftigere overdosering.

Ud over denne fejl var der også mistanke om, at NO_x-sensoren blev degraderet af ammoniakken, idet flere NO_x-senser var blevet defekte efter at have været anvendt efter SCR-katalysatoren.



FIGUR 11
EKSEMPEL PÅ MÅLING AF AMMONIAKSLIP EFTER SCR KATALYSATOREN.

Figur 11 viser, at koncentrationen af ammoniak er kraftigt stigende, hvilket betyder, at katalysatoren har et overskud af ammoniak, som frigives. Samtidig er koncentrationen af NO_x meget lav. Men idet NO_x-sensoren efter SCR-katalysatoren fejlagtigt måler den frigivne ammoniak som NO_x, forværres problemet yderligere, når styresystemet øger tilsætningen af urea for at kompensere.

Problemet skyldes primært, at der kræves meget høje NO_x-reduktioner på 80-90% under alle driftsforhold. Derfor er det nødvendigt, at der altid er tilstrækkelig ammoniak til rådighed i SCR-katalysatoren. Der vil derfor ske en overdosering i nogle situationer, hvilket giver ammoniakslip, når katalysatoren bliver overmættet. Det er netop en af årsagerne til, at der i dag altid anvendes en ASC (Ammonia Slip Catalyst). Dermed er der en større frihedsgrad til regulering af urea-doseringen, da overdosering ikke giver ammoniakslip.

Erfaringerne med de negative virkninger af ammoniakslippet medførte, at systemet efterfølgende blev opgraderet med en slipkatalysator, som omdanner ammoniak til nitrogen. Effekten af denne blev dog først dokumenteret ved måling i sidste målekampagne på begge kombinationsløsninger.

4.5 Dimensionering og fremstilling af kombinationsløsning nr. 2

Den nye kombinationsløsning blev designet på baggrund af erfaringerne med den første løsning. Det nye system blev nedskaleret til ca. 1/2 volumen af det første system, og fik dermed en størrelse som matcher motorstørrelsen efter de normale retningslinjer for design af disse løsninger. Specifikationer for komponenterne i det nye system findes i Tabel 6.

Det blev erfaret, at DOC-katalysatoren i det første system var mere effektiv end nødvendigt, idet den omdannede en uforholdsmæssig stor del af NO til NO₂. Der blev derfor valgt en DOC med lavere koncentration af platin, som gav et mere normalt forhold mellem NO og NO₂.

Partikelfilteret havde i første system et volumen, der var ca. dobbelt så stort som nødvendigt. Det blev nedskaleret til en størrelse, som er normal for motorstørrelsen. Partikelfilteret i første system var også belagt med en katalytisk belægning, som sænker den temperatur, som kræves for at afbrænde sodpartiklerne, således at dette sker allerede fra ca. 330° C. I anden målekampagne blev der som nævnt tidligere testet et andet filter, uden katalytisk belægning. Denne test viste, at det var muligt at regenerere filteret udelukkende med anvendelse af brændstofadditivet Satacene, som tilsættes brændstoffet løbende. Derfor blev der også i 2. kombinationsløsning anvendt filter uden katalytisk belægning.

SCR-katalysatoren var ligeledes overdimensioneret i det første system, hvilket også betød, at den reagerede lidt for langsomt på ændringer i den tilførte urea. Dette er især et problem ved transiente forhold, hvor det tager længere tid at opnå ligevægt i systemet. I det nye system blev der derfor anvendt en mindre katalysator, som udover at være billigere også gerne skulle give en bedre respons på reguleringen.

Endelig blev der også i det nye system tilføjet en ammoniakslip-katalysator, da det var konstateret, at denne ikke kunne undværes.

TABEL 6
SPECIFIKATION AF KOMPONENTER I ANDEN KOMBINATIONSLØSNING.

Part	Material/coating	Dimensions	Volume	Note
DOC	High Platinum coating	Ø 137 x 74,5 mm	1.1 L	
DPF	SiC (no coating)	Ø190 x 305 mm	7.2 L	
SCR	400 cpsi	4x Ø186 x 90 mm	9.7 L	High Temperature Stability
ASC		Ø 186 x 50 mm	1.4 L	High Temperature Stability

4.6 Konklusion

Effektiviteten af den udviklede, første kombinationsløsning og potentiale blev demonstreret under projektets anden målekampagne, som blev succesfuldt gennemført medio 2015. Målinger herfra blev samtidig benyttet i en iterativ proces til optimering, særligt af SCR-delen, og også med henblik på en nedskaleret udgave af det samlede system. Det blev motiveret, at der var mulighed for at optimere løsningen – bl.a. i forbindelse med optimal urea-dosering, hvilket der blev arbejdet på ved udvikling af den nedskalerede DPF/SCR-løsning (system 2).

Der blev målt på en kombinationsløsning med DPF både med og uden platinbelægning, og partikelkoncentrationerne var meget sammenlignelige for de to filtertyper. Det viste sig, at filteret uden platinbelægning også kunne regenerere kontinuert under drift, kun med tilsætning af fuel borne catalyst. Det blev derfor besluttet ikke at benytte filtre belagt med platin til den anden kombinationsløsning. Partikelkoncentrationer før partikelfilteret var sammenlignelige med målingerne på samme maskine uden partikelfilter (målekampagne oktober 2014), og generelt blev partikelemissionen fra maskinen observeret til at være meget stabil og stort set uafhængig af de respektive SCR-indstillinger under optimeringsfasen. Systemet har en partikelreduktion på over 99,9 %, beregnet på baggrund af seks asfaltudlægninger med forskellige SCR-parametre og for faste partikler >23 nm.

Kombinationsløsning 1 har fungeret pålideligt og har ikke fejlet under drift. Der manglede dog fra start en slip-katalysator til oxidation af overskydende ammoniak, hvilket har medført, at systemet kunne komme til at overdosere urea på basis af en for høj NOx-måling efter SCR-katalysatoren. Efterfølgende målekampagne var her med til at belyse problemet, hvilket førte til, at der blev tilføjet en slip-katalysator.

Erfaringer fra det første system blev brugt i designet og dimensioneringen af det nye system. Samlet set blev system 2 væsentlig billigere i fremstilling, hovedsageligt fordi der kunne undværes katalytisk belægning på partikelfilteret, men også fordi komponenterne kunne nedskaleres. Kombinationsløsning 2 nåede ikke at få så mange driftstimer i projektet som system 1, grundet den senere montering, men har ligeledes fungeret upåklageligt og med meget positive tilbagemeldinger fra medarbejdere ved NCC Roads.

5. Arbejdspakke 4: Dokumentation af effekt af den udviklede kombinationsløsning

5.1 Formål

Formålet med AP 4 har været at gennemføre onlinekarakterisering af emission ved typisk driftsmønster samt efterfølgende, afsluttende dokumentation af effekt over for begge de udviklede kombinationsløsninger. Desuden undersøges, hvorvidt teknologien kan overføres til andre maskiner. Endelig formidles projektets resultater.

5.2 Onlinekarakterisering af emission ved typisk driftsmønster

Den udviklede mobile måleopstilling (jf. afsnit 2.6) blev ligeledes benyttet i projektets tredje målekampagne til at dokumentere effekten af de to udviklede kombinationsløsninger i forhold til begrænsning af partikel- og røggasemissionerne. Målekampagnen blev gennemført i november 2015 på testfaciliteten ved NCC Roads i Ejby (Se Figur 12). Kombinationsløsning nr. 1 havde på dette tidspunkt været monteret på maskinen i cirka fem måneder, og der var i denne periode ikke konstateret problemer med maskinen.



FIGUR 12
BILLEDER FRA EMISSIONSMÅLINGER Gennemført ved NCC Roads i Ejby ultimo 2015, hvor effekten af to versioner af kombinationsløsningen blev dokumenteret.

5.3 Måling på kombinationsløsning 1

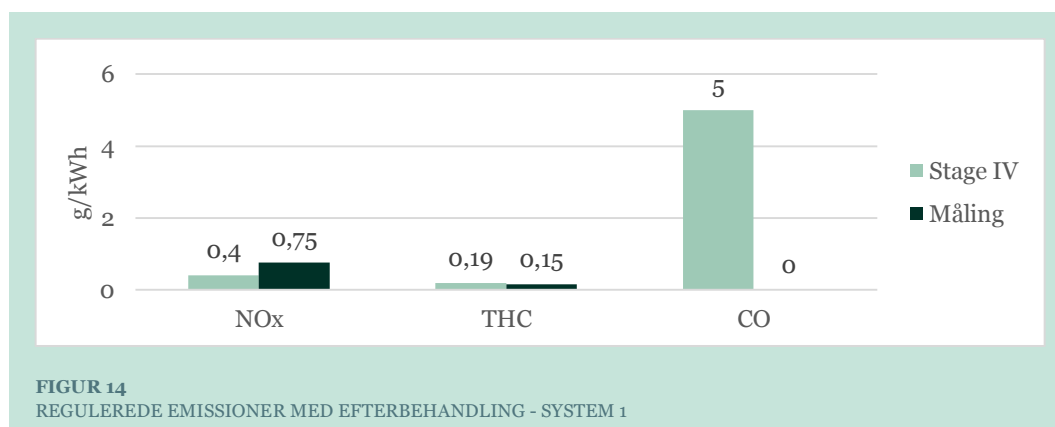
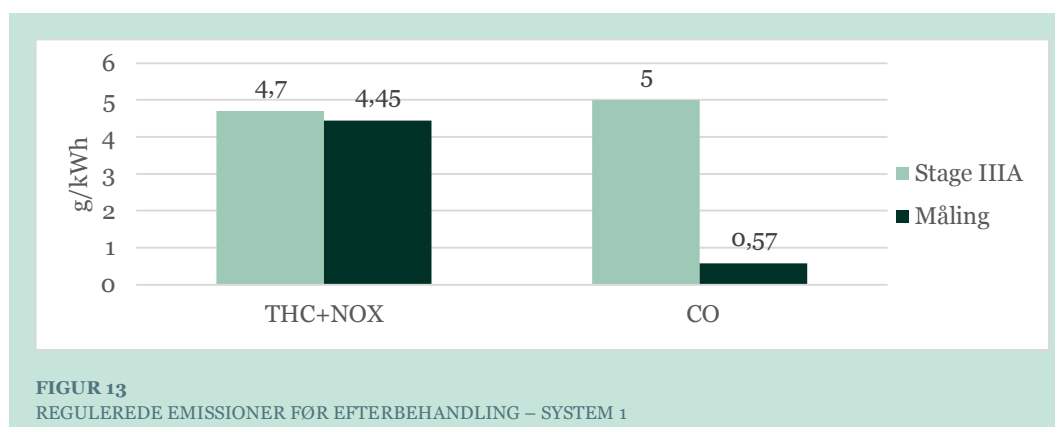
På den første måledag blev der udelukkende udført gasmålinger på system 1, da det primært var systemets SCR-parametre, der var blevet justeret siden målekampagnen fem måneder tidligere. Partikelemissionen formodes således at være sammenlignelig, da de mange forskellige SCR-parametre afprøvet på den tidligere målekampagne ikke havde nogen nævneværdig indflydelse på partikelkoncentrationen.

På kombinationsløsning 1 blev reduktionen i NO_x, CO og THC målt under udlægning. Tabel 7 viser de opnåede resultater. Det ses, at der opnås en meget fornuftig reduktion i NO_x på ca. 79 %. Kulbrinterne bliver reduceret med omkring 89 %, og CO bliver fjernet helt. I Bilag 2 er vist, hvordan der omregnes fra ppm til g/kWh.

TABEL 7
RESULTATER FRA EMISSIONSÅLING PÅ FØRSTE KOMBINATIONSLØSNING

System 1	Før systemet		Efter systemet		Reduktion	
	Enhed	ppm	g/kWh	ppm		g/kWh
NO _x		444	3,09	95	0,75	79
CO		89	0,57	0	0	100
THC		134	1,36	15	0,15	89

I Figur 13 og Figur 14 er de målte emissioner opstillet i forhold til Stage IIIA og IV. Emissionerne før systemet skal gerne opfylde kravene i Stage IIIA, som gælder for maskinen. I stage IIIA skal THC og NO_x tilsammen ligge under 4,7 g/kWh, hvilket ser ud til at være overholdt. Også CO ligger langt under grænsen.



For emissionerne efter systemet var målsætningen for projektet, at de skulle være tæt på Stage IV-kravene, som dog formelt set ikke er gældende for motorer under 56 kW. Her er reduktionen i NO_x ikke helt høj nok, mens det ser bedre ud for THC, der ligger lidt under. CO blev reduceret til under måleusikkerheden.

Ammoniak blev målt til ca. 3 ppm med ASC monteret. Grænsen i Stage III/IV er 25 ppm.

5.3.1 Bemærkninger til sammenligning med Stagekravene

Det skal understreges, at målingerne kun er udført ved høj, normal last for maskinen, mens certificering under Stagekravene forudsætter en udførlig måling på motoren i hele belastningsområdet under kontrollerede forhold efter ISO 8178-standarden. Derfor kan målingerne reelt ikke sige noget om, hvorvidt motorens emissioner med efterbehandling faktisk lever op til Stage IV-kravet.

Der er flere omstændigheder, som yderligere gør det svært at sammenligne målingerne direkte med Stagekravene. Blandt andet er der målt på motoren ved høj belastning, hvor det typisk er sværere at opnå en høj NO_x-reduktion. Dette skyldes, at SCR-katalysatoren bliver mindre effektiv ved de højeste temperaturer, samt at dannelsen af NO_x er højest, når motoren er højest belastet. Den høje belastning og temperatur er dog en fordel ved omdannelse af CO og THC i DOC-katalysatoren, som bliver mere effektiv. Ligeledes er den høje temperatur fordelagtig ved forbrændingen af partikler. Motoren vil samtidig oftest arbejde ved denne belastning, hvorfor det også giver mest mening at vurdere emissionerne her.

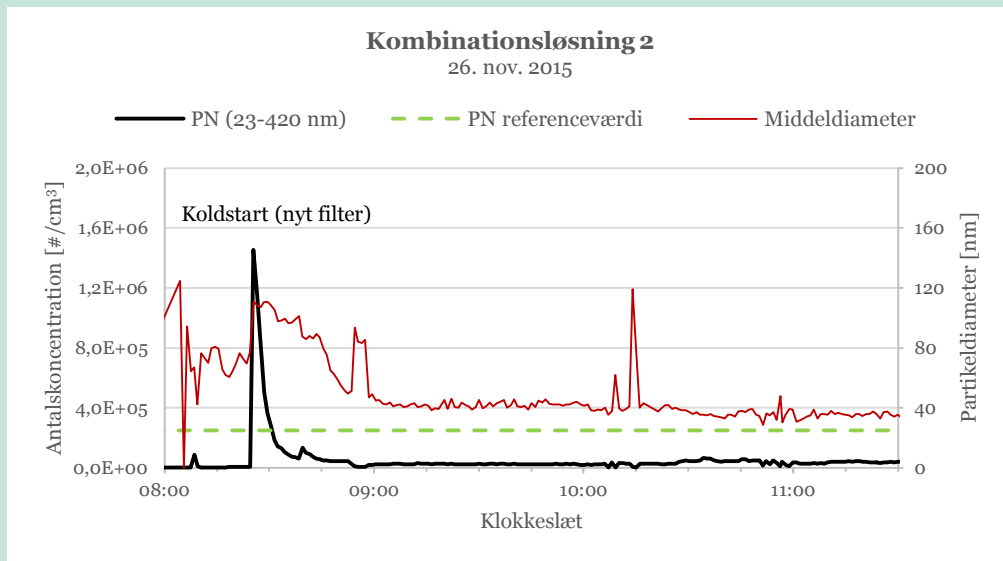
5.4 Måling på kombinationsløsning 2

På målekampagnens anden dag, blev kombinationsløsningen udskiftet med den nedskalerede model, beskrevet i afsnit 0. Den nedskalerede model indeholdt desuden en slip-katalysator installeret efter SCR-katalysatoren for at reducere udslippet af ammoniak. Der blev etableret en ny måleposition mellem SCR og slip-katalysatoren for at kunne dokumentere effekten af denne. Desuden blev måleinstrumenter til partikelmålingerne monteret på anden måledag, hvorefter der blev gennemført en koldstart samt en test af både den nye kombinationsløsning og måleinstrumenterne.

På tredjedagen blev der gennemført gasmålinger i alle fire positioner, mens der udelukkende blev målt partikler efter SCR, jf. Figur 9, da partikelkoncentration før DPF tidligere var dokumenteret. Der blev indledningsvist gennemført to udlægninger, hvor SCR-parametrene blev optimeret. Herefter blev der gennemført to udlægninger, hvor SCR-parametrene var sat til "AUTO", hvilket svarer til maskinens reelle driftsindstillinger.

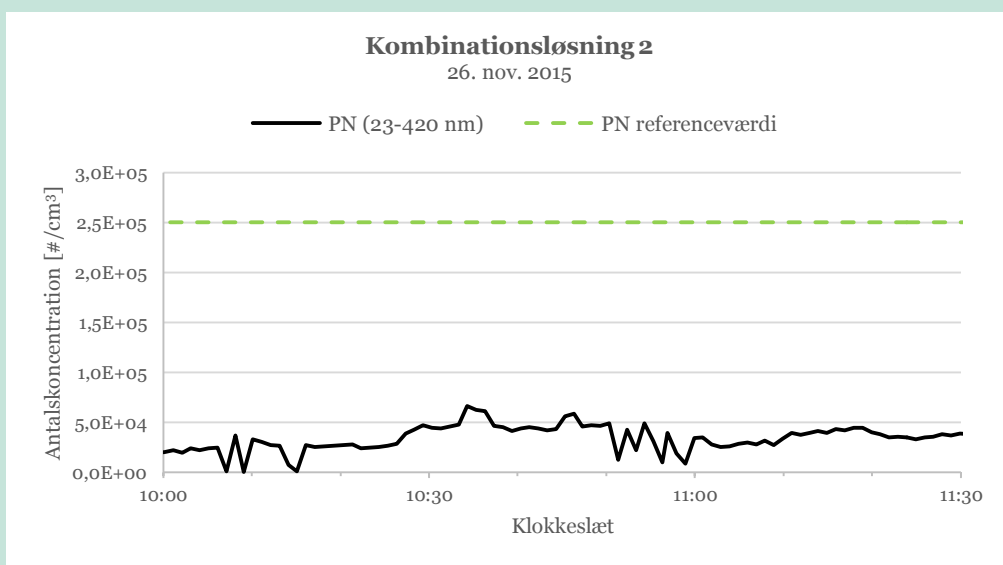
5.4.1 Partikelmåling

Partikelkoncentrationen i røggassen var højst i forbindelse med koldstart af maskinen (se Figur 15), som dog samtidig var på et helt nyt filter, hvorfor den høje koncentration er forventelig. Koncentrationen aftog hurtigt i forbindelse med opvarmning af systemet. Efter 20-30 minutter var koncentrationen stabiliseret omkring ca. 25.000 partikler/cm³, hvilket blot er en tiendedel af den foreslåede referenceværdi fra Schweiz (250.000 partikler/cm³). Dette er tydeligere illustreret i Figur 16, hvor partikeludledningen vises i perioden fra 10:00 til 11:30, hvor de fire udlægninger fandt sted.



FIGUR 15

GRAF OVER PARTIKELUDLEDNINGEN (SORT) SAMT PARTIKLERNES MIDDELDIAMETER (RØD) FRA ASFALTUDLÆGGER MED PÅMONTERET KOMBINATIONSLØSNING NR. 2. DEN FORESLÅEDE REFERENCEVÆRDI FRA SCHWEIZ PÅ $2,5 \cdot 10^5$ PARTIKLER/CM³ ER VIST MED EN GRØN LINJE. MASKINEN BLEV KOLDSTARTET KL. 8:25. I PERIODEN FRA 10:22 TIL 11:27 BLEV DER FORETAGET FIRE UDLÆGNINGER, HVER MED EN VARIGHED PÅ CIRKA 10 MIN.



FIGUR 16

ZOOM PÅ FIGUR 15. PARTIKELUDLEDNINGEN OVER TID (SORT PROFIL) OG REFERENCEVÆRDIEN FRA SCHWEIZ (GRØN STIPELET LINJE). I PERIODEN FRA 10:22 TIL 11:27 BLEV DER FORETAGET FIRE UDLÆGNINGER, HVER MED EN VARIGHED PÅ CIRKA 10 MIN.

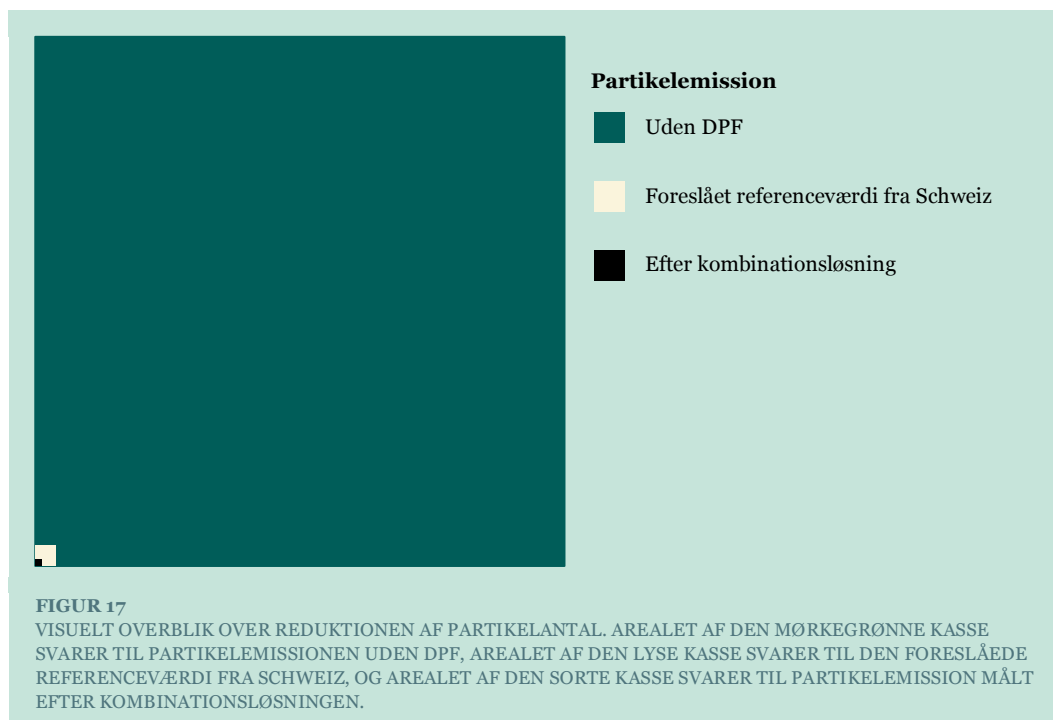
På baggrund af partikelemissionen er kombinationsløsningens effektivitet over for reduktionen af antal partikler bestemt. Resultaterne er vist i Tabel 8, der viser, at kombinationsløsning 2 har en meget sammenlignelig effektivitet sammenlignet med den første kombinationsløsning. Den beregnede middelkoncentration (antal / kWh) er foretaget via formel og antagelser beskrevet i Bilag 2.

TABEL 8

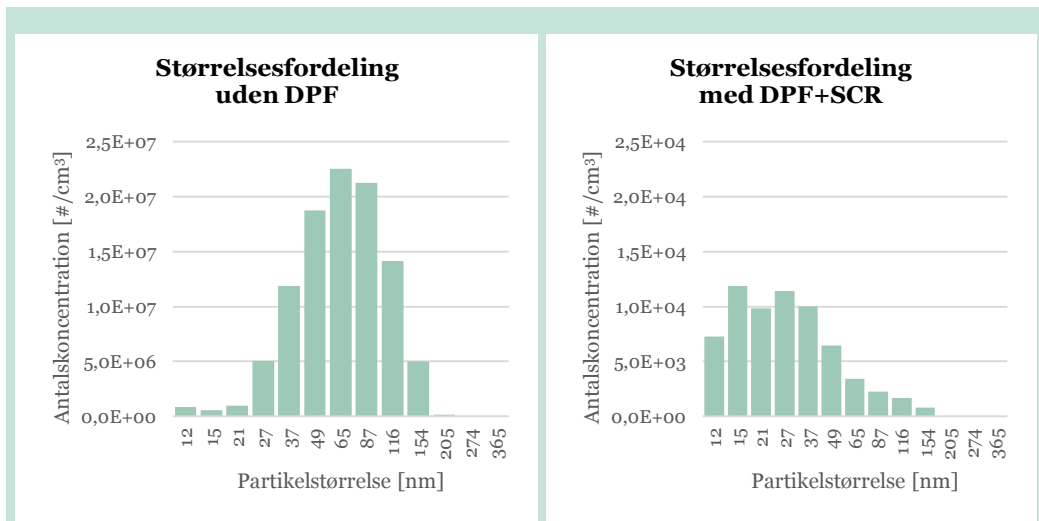
MIDDELPARTIKELKONCENTRATIONER MÅLT FØR DPF OG EFTER SCR SAMT EFFEKTIVITET. USIKKERHED ANGIVER ± EN STANDARDAFVIGELSE, UDREGNET PÅ BAGGRUND AF DE FORETAGNE MÅLINGER.

	Middelkoncentration PN [#/cm ³]	Beregnet middelkoncentration PN [#/kWh]	Reduktionsgrad [%]
Før DPF	$(1,7 \pm 0,8) \cdot 10^8$	$(8,9 \pm 4,2) \cdot 10^{14}$	
Efter SCR – kombinationsløsning 1	$(6,9 \pm 3,8) \cdot 10^4$	$(3,6 \pm 2,0) \cdot 10^{11}$	99,96 ± 0,03
Efter SCR – kombinationsløsning 2	$(3,6 \pm 0,4) \cdot 10^4$	$(1,9 \pm 0,2) \cdot 10^{11}$	99,98 ± 0,01

Det kan være svært at forholde sig til en reduktionsgrad på 99,98 %. Hvis partikelemissionen uden DPF svarer til et rumfang på 1.000 liter (1 m³), svarer partikelemissionen efter kombinationsløsningen cirka til rumfanget af en appelsin. Alternativt kan reduktionsgraden illustreres ved at omregne emissionerne til arealer, som det er gjort i Figur 17.



Som forventet reducerer kombinationsløsningen mest effektivt de store partikler. Dette illustreres i Figur 18, der viser, at middelpartikelstørrelsen uden DPF er omkring 65 nm og væsentligt lavere efter kombinationsløsningen. Bemærk, at der er en faktor 1.000 i forskel på de to y-akser. Det er interessant, at en signifikant andel af partiklerne, målt efter SCR, også er mindre i størrelse end den nedre grænse for størrelse på 23 nm, som er defineret i PMP.



FIGUR 18
PARTIKELSTØRRELSFORDELING MÅLT PÅ MASKINEN UDEN DPF (VENSTRE) OG MED DEN UDVIKLEDE KOMBINATIONSLØSNING NR 2 MED DPF+SCR (HØJRE). BEMÆRK, AT VÆRDIERNE PÅ Y-AKSEN TIL VENSTRE ER 1.000 GANGE STØRRE END VÆRDIERNE PÅ Y-AKSEN TIL HØJRE. PARTIKLERNE, DER PASSERER FILTRET, ER FORTRINSVIS UNDER CA. 50 NM.

5.4.2 Gasmåling

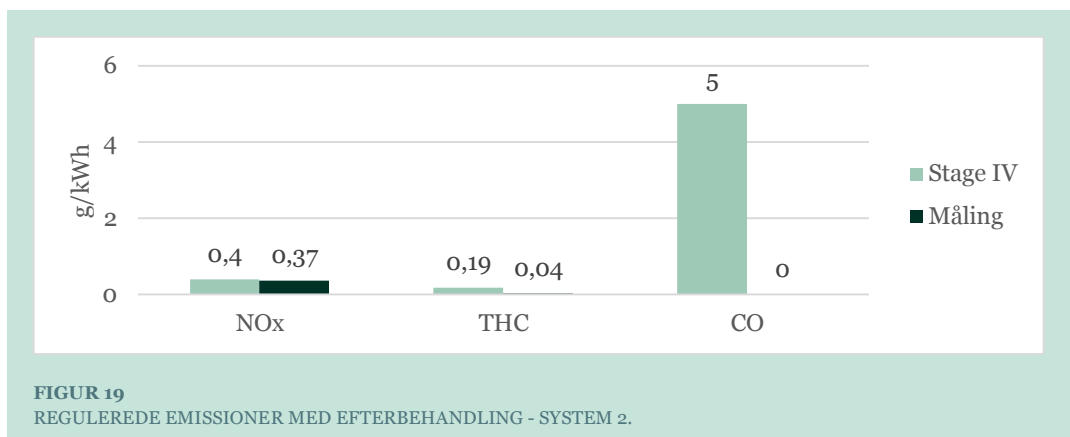
På kombinationsløsning 2 blev reduktionen i NO_x, CO og THC ligeledes målt under udlægning. Tabel 9 viser de opnåede resultater. I Bilag 2 er vist, hvordan der omregnes fra ppm til g/kWh.

TABEL 9
DE MÅLTE GASEMISSIONER FØR OG EFTER SYSTEM 2.

System 2	Før systemet		Efter systemet		Reduktion	
	Enhed	ppm	g/kWh	ppm		g/kWh
NO _x		444	3,09	50	0,37	88
CO		89	0,57	0	0	100
THC		134	1,36	4	0,04	97

System 2 opnåede en meget fornuftig reduktion af NO_x på 88 %. Samtidig formåede systemet at reducere kulbrinter og fjerne CO helt. I tabellen er emissionerne før systemet de samme reference-data, som blev anvendt i første måling.

I Figur 19 er de målte emissioner opstillet i forhold til Euronormens Stage IV-krav. Der gælder i øvrigt samme forbehold ved sammenligning med Stagekravene, som bemærket under resultaterne af de første målinger.



Med det optimerede system er alle emissionerne under Stage IV-kravene, inklusive NO_x, som ikke blev reduceret optimalt i første system. Emissionsmålingerne viste en fin balance mellem NO/NO₂, som er den vigtigste faktor for sikker drift af partikelfilteret. Der blev også målt væsentlig lavere THC end ved første system, mens måleværdien for CO fortsat lå under usikkerheden.

Målingen af ammoniak lå tæt på 0 ppm, hvilket betyder, at slip-katalysatoren fungerede helt efter hensigten.

5.5 Teknologioverførsel og mulig udbredelse

Projektet har vist, at det er teknisk muligt at anvende kombinationsløsningen på en asfaltudlægger, og at der kan opnås gode resultater, uden at det i øvrigt har negativ indflydelse på hverken maskinen eller driftssikkerheden. Det er således relevant at overveje mulighederne for at anvende teknologien på andre maskiner i samme kategori.

Der var overvejelser om at prøve løsningen på andre maskiner, herunder tromler og fræsere som også kunne være relevante, idet de også anvendes til arbejde i bl.a. parkeringskældre. Der indgik dog flere overvejelser omkring udsyn og plads på maskinen, som diskvalificerede de øvrige maskiner, der blev inspiceret. Især pladsen omkring motoren er et problem, som også har været en udfordring for fabrikanterne, der i mange tilfælde har været nødt til at bygge nye chassis til maskinerne for at finde plads til partikelfiltrene i Stage IV-maskiner.

Et andet teknisk kriterie er maskinens udstødningstemperatur, som skal være tilstrækkeligt høj til at sikre afbrænding af sodpartiklerne. Dette betyder, at maskiner, som ofte står i tomgang eller arbejder med lav belastning, vil være mere krævende at udstyre med efterbehandlingsudstyr, idet der skal tages hensyn til sodbelastningen af filteret og foretages hyppige aktive sodafrændinger. Her blev asfaltudlæggere og fræsere fundet egnede til eftermontering af partikelfiltre, idet de kører med konstant høj belastning. Andre maskiner, som fx traktorer, kan være mindre egnede, idet deres belastningsmønstre gør, at de sjældent kører med høj last i lang tid ad gangen.

Maskinernes alder er også en vigtig faktor, eftersom en investering i eftermonteret udstyr skal afskrives over maskinens resterende levetid. I nærværende projekt blev der udvalgt en forholdsvis ny maskine med Stage IIIA-certificering, som NCC forventer at anvende i højst ti år, før maskinen evt. skal videresælges. Maskiner, som sælges i dag, har imidlertid Stage IV-certificering og er udstyret med partikelfiltre. Derfor vil det fremover kun give mening at udstyre maskiner med Stage III A/B-certificering, hvis deres forventede restlevetid kan retfærdiggøre investeringen.

Endelig er der det økonomiske aspekt. Purefi A/S har estimeret, at en maskine med tilsvarende motorstørrelse, som udlæggeren undersøgt i nærværende projekt, vil kunne udstyres med et partikelfilter for omkring 30.000 kr., mens en komplet kombinationsløsning vil koste omkring 60.000 kr. såfremt der kan opnås aftale om et større antal maskiner. En eventuel investering i efterbehand-

lingsudstyr vil i første omgang skulle vejes mod de forventede positive effekter, herunder medarbejdernes sundhed, tilfredshed og lavere sygefravær. Dertil kommer positiv omtale af virksomhedens tiltag for et sundere nærmiljø. Det er således op til selskaberne at vurdere, hvorvidt investeringen er rentabel ud fra disse effekter, idet der ikke er nogen direkte målbare gevinster.

Den vigtigste faktor for udbredelse af eftermonterede løsninger er dog efter alt at dømme på et politisk og lovgivningsmæssigt niveau. Såfremt eftermontering af partikelfiltre og SCR-katalysatorer skal blive udbredt, må det nødvendigvis stilles som krav i fx udliciteringsopgaver, at maskinerne skal opfylde Stage IV, enten fra fabrikken eller tilnærmet gennem eftermontering af partikelfiltre og evt. SCR. Således kan de, som byder på kontrakten, selv vurdere, om de vil investere i nye maskiner eller opgradere deres maskiner til Stage IV. Det kan også være et generelt krav til arbejdsmiljøet, at maskinerne skal opfylde Stage IV, såfremt de anvendes i lukkede rum, i tæt befolkede byområder eller inden for de allerede etablerede miljøzoner. Det skal her understreges, at en eventuel regulering vil have større effekt, jo hurtigere den bliver effektueret, idet de ældre maskiner langsomt bliver udfaset og erstattet af Stage IV-maskiner.

5.6 Konklusion

Målsætningen for det eftermonterede system var at nedbringe motorens emissioner til et niveau svarende til Stage IV-kravet for motorer i non-road maskiner. Sammenligningen må dog kun betragtes som vejledende for systemets effektivitet, idet Stage IV-certificering kræver måling i hele motorens lastområde efter Iso 8178-standarden. Sammenligningen er her kun gældende for det målte lastpunkt, som vurderes at være tæt ved fuld nominal belastning af motoren. Motoren vil dog oftest arbejde ved denne belastning, hvorfor det også giver mest mening at vurdere emissionerne her.

Kombinationsløsning 1 leverede en effektiv reduktion i emissionerne. THC blev reduceret med omkring 90 %, mens CO blev fjernet helt. NO_x blev reduceret med ca. 78 %. Systemets NO_x-reduktion levede dog ikke helt op til Euro Stage IV-kravet i det målte lastpunkt. Partikelreduktion var på >99,9 % og levede fint op til foreslået grænseværdi i Stage V og foreslået referenceværdi fra Schweiz.

Kombinationsløsning 2 leverede ligeledes en meget effektiv reduktion i emissionerne af CO og THC, og reduktionen af NO_x blev yderligere forbedret til ca. 89 %. Dermed opfyldte systemets emissioner Stage IV kravet i det målte lastpunkt. Partikelreduktion var igen på >99,9 % og levede fint op til foreslået grænseværdi i Stage V og foreslået referenceværdi fra Schweiz.

En mindre gennemsnitlig partikeldiameter blev observeret ved måling efter DPF+SCR end ved måling før DPF. Det er interessant, at en signifikant andel af partiklerne, målt efter SCR, også er mindre i størrelse end den nedre grænse for størrelse på 23 nm, som er defineret i PMP.

Begge systemer havde desuden som følge af den installerede NH₃-slip-katalysator meget lave emissionsniveauer af ammoniak (NH₃) og havde ingen problemer med at overholde grænseværdien på 25 ppm.

Endelig konkluderes det, baseret på kommentarer og erfaringer fra de i projektet involverede parter, at en bred udbredelse af kombinationsløsninger til entreprenørmaskiner i Danmark forudsætter, at der bliver indført lovkrav herom.

Bilag 1: FTIR-kalibrering

Group	Component	Name	Range	
Carbon oxides	Carbon dioxide	CO ₂	0.1 – 20 %	
	Carbon monoxide	CO	1 - 10,000 ppm	
Nitrogen oxides	Nitric oxide	NO	1 - 10,000 ppm	
	Nitrogen dioxide	NO ₂	1 - 100 ppm	
	Nitrous oxide	N ₂ O	1 - 100 ppm	
	Total NO _x	NO _x	a)	
Hydrocarbons	Methane	CH ₄	1 - 10,000 ppm	
	Acetylene	C ₂ H ₂	1 - 100 ppm	
	Ethene	C ₂ H ₄	1 - 100 ppm	
	Ethane	C ₂ H ₆	1 - 100 ppm	
	Propene	C ₃ H ₆	1 - 100 ppm	
	Propane	C ₃ H ₈	1 - 100 ppm	
	1,3 butadiene	C ₄ H ₆	1 - 100 ppm	
	Iso-butylene	C ₄ H ₈	1 - 100 ppm	
	N-Pentane	C ₅ H ₁₂	1 - 100 ppm	
	Benzene	C ₆ H ₆	1 - 100 ppm	
	Iso-octane	C ₈ H ₁₈	1 - 100 ppm	
	Total hydrocarbons	THC	b)	
	Non-methane hydrocarbons	NMHC	c)	
Aldehydes	Formaldehyde	CH ₂ O	1 - 100 ppm	
	Acetaldehyde	CH ₃ CHO	1 - 100 ppm	
Other	Water	H ₂ O	0.5 – 25 %	
	Ammonia	NH ₃	1 - 1000 ppm	
	Sulfur dioxide	SO ₂	1 - 100 ppm	

Notes:

a) NO_x is calculated as the sum of NO and NO₂

b) THC is calculated as an FID response equivalent, based on known FID response factors for each hydrocarbon.

c) The non-methane HC is calculated as in note b, except that methane is not included.

Bilag 2: Omregning fra målte til ydelsesspecifikke koncentrationer

Gasser

Koncentrationen i ppm (X_i) er omregnet til masse specifik emission (MSE) med enheden g/kWh, ud fra sammenhængen:

$$MSE_i \left[\frac{g}{kWh} \right] = X_i \text{ [ppm]} \times \frac{M_i \left[\frac{g}{mol} \right]}{M_{exh} \left[\frac{g}{mol} \right]} \times \frac{\text{massestrøm af luft [g/h]}}{\text{effekt [kW]}}$$

M_i er molarmassen af den relevante komponent og M_{exh} er molarmassen af udstødningen (29 g/mol). Brøken korrigerer således for de forskellige komponenters molarmasser i forhold til udstødningens. Massestrømmen af udstødning er beregnet til ca. 300 kg/h og effekten er sat til 45 kW.

Partikler

Antallet af partikler per m³ (PN) kan omregnes til antal partikler per kWh (PN_{bs}) ved hjælp af nedestående formel:¹⁶

$$PN \left[\frac{\text{antal}}{m^3} \right] = PN_{bs} \left[\frac{\text{antal}}{kWh} \right] \times \frac{\rho_{exh} \left[\frac{kg}{m^3} \right]}{bsfc \left[\frac{kg}{kWh} \right] \times (\lambda \times AF_s + 1)}$$

Der anvendes her en række antagelser for dieselmotoren, som generelt set ikke varierer meget for motorer i de størrelser, som anvendes i entreprenørmaskiner. Densiteten (ρ_{exh}) af udstødningen er opgivet til 1,2934 kg/m³, ved standard tryk og temperatur. Det specifikke brændstofforbrug (*brake specific fuel consumption*, $bsfc$) måles i g/kWh. Denne er beregnet til ca. 234 g/kWh for udlæggeren, mens standarden angiver en middelværdi på 215 g/kWh. Luftoverskudstallet (λ) er i standarden opgivet til 1,8, mens det for udlæggeren er beregnet til 1,92. Det støkiometriske luft-brændstof forhold (AF_s) er opgivet til 14,5 hvilket er en standardværdi.

Ud fra ovenstående formel er i øvrigt fastlagt den i rapporten omtalte schweiziske referenceværdi (*comparison value*) på $2,5 \times 10^5$ partikler / cm³, svarende til 1×10^{12} partikler/kWh, indregnet en mindre usikkerhedsmargin.

¹⁶ *Luftreinhaltung auf Baustellen*, Bundesamt für Umwelt (BAFU), side 22 (2016).
<http://www.bafu.admin.ch/publikationen/publikation/01014/index.html?lang=de>

Røgrensning til entreprenørmaskiner

Projektet med den officielle titel "Emissionsbegrænsende teknologi til ikke-vejpgående maskiner" løb fra 2014-2016 og er gennemført i et samarbejde mellem NCC Roads A/S, Purefi A/S, LiqTech International A/S og Teknologisk Institut.

Projektets overordnede formål har været at videreudvikle og implementere løsninger til reduktion af luftforurening fra entreprenørmaskiner. Herunder også udvikling af en mobil måleplatform til brug ved on-site målinger, så det sikres, at de målte emissioner reflekterer realistiske driftsforhold.

Projektet har vist, at det er teknisk muligt at anvende en kombinationsløsning af partikelfilter og NO_x-reducerende SCR-katalysator på en asfaltudlægger, og at der kan opnås en effektiv emissionsreduktion, målt on-site under realistiske driftsbetingelser, uden at det i øvrigt har negativ indflydelse på hverken maskinen eller driftssikkerheden



Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K

www.mst.dk