



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Udvikling af emissionsreducerende kombinationsløsninger til skibe

MUDP-rapport

Marts 2018

Redaktion: Jacob Jeppesen, Ole Jakobsen
(Teknologisk institut)

Tekst: Jacob Jeppesen, Ole Jakobsen

ISBN: 978-87-93614-84-0

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Forord	4
2.	Sammenfatning og konklusion	5
2.1	Baggrund og formål	5
2.2	Projektførløb	5
2.3	Hovedkonklusioner	6
3.	Summary and Conclusion	8
3.1	Background and Purpose	8
3.2	Purpose of the project	8
3.3	Main Conclusions	9
4.	Projektindhold	11
4.1	Karakterisering af røggasemissioner fra en typisk dansk indlandsfærge	13
4.2	Udvikling af kombinationsløsningen	15
4.3	Montering af partikelfilter	16
4.4	Dokumentation af effekten af den udviklede kombinationsløsning	18
4.5	Gasemissionsmåling – Måleopstilling og metode	19
4.6	Partikelmåling - Måleopstilling og metode	19
4.7	Partikelmåling - Resultater og diskussion	20
4.8	Gasemissionsmålinger	25
4.9	Konklusion	25
4.10	Projekt erfaringer	27
4.11	Referencer	28
4.12	Links	28

2. Forord

I forbindelse med Miljøstyrelsens opslag på www.ecoinnovation.dk under temaet "Miljøeffektiv teknologi" blev der i 2009 givet tilsagn til projektet "Udvikling af partikelfiltre til skibe" med J.nr. MST-141-00146. I 2012 blev der givet tilsagn til projektet "Udvikling af emissionsreducerende kombinationsløsninger til skibe" med J.nr. MST-141-0407. Af hensyn til nye læsere, og for fuldstændighedens skyld, er denne rapport affattet som en udvidelse af rapporten omkring "Udvikling af partikelfiltre til skibe" i en let omskrevet form. Nærværende rapport fremstiller således hele projekt- og udviklingsforløbet, først omkring partikelfilter og senere omkring den såkaldte kombinationsløsning, der omfatter partikelfilter og NOx reduktion, som er udført på Ærøfærgernes skib MF Ærøskøbing.

Projektet indgår som et af initiativerne i handlingsplanen for renere skibsfart, som er udarbejdet i forbindelse med Partnerskabet for Renere Skibsfart mellem Miljøstyrelsen, Søfartsstyrelsen og Danmarks Rederiforening. Styregruppen består af deltagere fra Miljøstyrelsen, Danmarks Rederiforening, Dinex A/S, Ærøfærgerne og Teknologisk Institut.

Projektet er gennemført i samarbejde mellem Dinex A/S, Ærøfærgerne og Teknologisk Institut. Projektet blev afsluttet den 20. juli 2016, og denne rapport er den endelige projektrapport.

3. Sammenfatning og konklusion

3.1 Baggrund og formål

Det er generelt anerkendt og videnskabeligt dokumenteret, at luftbårne forbrændingspartikler er sundhedsskadelige [1] [2] [3]. Eksponering kan forårsage kredsløbssygdomme, kronisk nedsættelse af lungefunktion og øget dødelighed, og særligt er nanopartikler i fokus, da de kan trænge dybt ind i lungerne. Forskning har desuden vist, at indånding af kemiske stoffer i nanopartikelform kan være signifikant mere sundhedsskadeligt end indånding af den samme mængde større partikler.

En væsentlig del af de nanopartikler der findes i luften i kystnære områder, stammer fra kystnær skibstrafik [4] [5]. Selvom brændselsforbruget per kilogram transporteret gods overordnet set er væsentligt lavere for skibstrafik end for landtransport, kan partikelemissionen fra skibe bidrage med op til 70 % af den ultrafine partikelforurening i kystnære områder, hvilket bl.a. er blevet vist i et studie fra Santa Cruz, Spanien [4]. Mange tiltag er foretaget for at begrænse emissionerne fra landtransport hvor Euro-normer sætter grænserne, hvilket ikke i samme omfang gør sig gældende for skibstrafikken.

Til landtransport er der udviklet en række effektive filtre til fjernelse af partikler baseret på keramiske monolitter. Disse keramiske filtre, normalt enten SiC- eller Cordiorit-baserede Wall Flow-filtre, kan fjerne mere end 90 % af antallet af partikler fra køretøjers emission. Endvidere findes der effektive katalysatorer til omdannelse af NO_x fra køretøjer. På det seneste er der også blevet udviklet kombinationsfiltre, hvor coatede Wall Flow filtre med en katalytisk overflade omdanner NO_x og ammoniak til nitrogen og vand. Det var derfor oplagt at starte et udviklingsforløb hvor netop denne teknologi fra landtransport til fjernelse af partikler og NO_x blev overført til skibe.

Der er dog stor forskel på motorer og brændstof til henholdsvis skibe og køretøjer, som giver anledning til udfordringer. Der ud over skal filtrene fungere under helt andre driftsbetingelser på skibe end dem, der er til stede i køretøjer – vigtige parametre vil være tilstrækkelige røggastemperaturer til regenerering, krav og begrænsninger på røggasmodtryk, forhøjede SO₂-niveauer, pladsforhold, motortekniske parametre, vedligehold/rensning samt filtrets løbende regenerering.

3.2 Projektforløb

Hovedfokus i projektet har været rettet mod at generere ny, industrielt anvendelig viden i forhold til begrænsning af partikel- og NO_x emission fra skibe, ud fra den nyeste forskning, samt at udvikle, designe, montere og idriftsætte en fuldskala kombinationsløsning, bestående af partikelfilter og NO_x reduktionskatalysator.

Projektet har været opdelt i en række delprojekter af både parallel og seriel karakter, der alle er fokuseret på at opnå et mål, som er et effektivt og driftssikkert kombinationsfilter til skibe – men hvor også hver enkelt arbejdsopgave kan generere ny og brugbar viden for projektpartnerne.

Projektets hovedelementer:

1. Karakterisering af partikelemissionen fra en typisk dansk indlandsfærge. (Målerunde 1).
2. Udvikling af partikelfiltre.
3. Montering og afprøvning af partikelfiltre på dansk indlandsfærge i drift.
4. Dokumentation af effekten af udviklede filtre. (Målerunde 2).
5. Opgradering af partikelfiltre til at have katalytisk effekt, (kombinationsløsningen) samt installation af hjælpeudrustning som f.eks. urea indsprøjtning- og styresystem.
6. Dokumentation af effekten af det NO_x reducerende system, samt sikre og dokumentere partikelfiltrens fortsatte virkning. (Målerunde 3).

3.3 Hovedkonklusioner

Projektet har resulteret i et velfungerende system, bestående af en maritim kombinationsløsning, der i én og samme enhed reducerer partikeludledningen markant, samt målbart reducerer NO_x emissionen. F.eks. kan det nævnes, at den synlige røgdudvikling, der specielt ses ved havnemanøvrer, nu er reduceret til et minimum.

Systemet er i dette projekt opbygget med et bypass spjæld således, at udstødningsrøggasserne kan ledes uden om filterkassen. Dette er valgt af sikkerhedsmæssige årsager; for at sikre motorkraft i det tilfælde, at filterelementerne skulle tilstoppe og turboladerens modtryk derved bliver for højt. Der er indbygget sikkerhedsfunktioner i systemet imod for højt røggasmodtryk samt automatik til regulering af de motorstyrede røggasventiler.

Nogle af projektets større udfordringer har været et krav fra motorfabrikanten om lavt turboladermodtryk, dels de pladmæssige forhold om bord på testfartøjet M/F Ærøskøbing og dels at opnå tilstrækkelig temperatur til regenerering af filterelementerne.

For at imødegå kravet om lavt røggasmodtryk, blev der designet en filterkasse med plads til dobbelt så mange filterkerner, som en tilsvarende lastbilmotor ville have krævet. I skorstenscasingen blev de oprindelige installationer ændret, så filterkassen kunne monteres dér, og systemet blev udbygget med elektrisk styrede røggasspjæld, som i lighed med skibets øvrige automatik, kan betjenes fra maskinrummet. Efter første målerunde, blev det konstateret at røggastemperaturen ikke havde et tilstrækkeligt højt niveau, til at sikre regenerering af partikelfiltret. Dette blev løst ved at montere elektriske varmelegemer i filterkassen, som styres pr. automatik. Til fjernelse af aske fra filtret, blev partikelfiltret forsynet med et askeudsugningssystem. Hver aften, efter dagens sidste tur, foretager besætningen regenerering af filteret.

Til reduktion af NO_x i røggassen blev der, før tredje målerunde, installeret et urea indsprøjtningssystem i skorstensrøret, som ved hjælp af en katalytisk belægning på filtrene omdanner NO_x til nitrogen og vand. Partikelfiltret med katalytisk belægning, blev installeret i stedet for det oprindelige partikelfilter fra første projekt samtidig med at indsprøjtningssystemet blev installeret. Til kombinationsløsningen blev der også installeret styring af urea tildelingen og en urea tank under færgens vogndæk.

For at sikre de nødvendige designdata og kriterier til systemleverandøren Dinex, blev der ombord på færgen foretaget målinger af motorens emissioner inden installation af partikelfiltret. Målingerne viste et for motortypen pænt NO_x-niveau på 8,33 g/kWh, mens de øvrige emissioner også var lavere end forventet. Specielt HC og CO lå meget lavt, mens PM-emissionen var, for brændstoftypen, acceptable 0,22 g/kWh.

Efter idriftsættelse af partikelfiltret ses en markant reduktion af partikelantal (PN) på 93 %. Det var forventet med en PN-reduktion på op til 99 %. Forskellen findes med stor sandsynlighed i utætte røggasspjæld i bypass-systemet. Det forventes derfor at problemet kan løses ved justering af spjældene, alternativt ved montering af en anden og mere tæt spjældtype. Målingerne viste markante reduktioner af NO_x emissioner på mindst 40% efter idriftsættelsen af kombinationssystemet. Det viste sig dog at effektiviteten af systemet faldt drastisk i løbet af dagen, formentlig grundet tilsodning af filterets katalytiske overflade. En løsning på dette kunne være hyppigere regenerering. Dette indikerer også at NO_x-reduktionen formentlig er højere om morgenen, når filteret er helt rent.

Ud over den miljømæssige gevinst vil montering af et partikelfilter også give en reduktion af nedfald af sodpartikler, både i havneområderne og på færgens sol- og vogndæk, hvilket vil reducere behovet for rengøring af disse områder og mindske eventuel tilsmudsning af passagerer og køretøjer. Filtersystemet vil også kunne benyttes af færgeselskabet i deres markedsføring som et miljømæssigt tiltag.

I det oprindelige design, var det planen at systemet kunne placeres i maskinrummet eller i umiddelbar forbindelse dermed, hvor vægtfordelingen ville være bedre. Det viste sig dog ikke pladsmæssigt muligt. Partikelfilteret blev derfor placeret i skorstenscasingen. Udvikling og design af partikelfiltret ændrede sig generelt flere gange undervejs i projektet, dels på grund af krav fra motorfabrikanten om lavt røggasmodtryk og dels på grund af de pladsmæssige udfordringer om bord på testfartøjet. Pladsforholdene om bord på testfærgeren afviger ikke i nævneværdig grad fra andre færger.

Konstruktionen af filterkassen blev udført i almindeligt skibskonstruktionsstål og har vist sig at være en tung løsning. Det vurderes, at mindre godstykkelse og/eller andre materialetyper bør benyttes fremover for at mindske vægtbelastningen på fartøjet.

Filterkassen er udført med askeudsugningsanlæg, der opsamler asken efter regenerering, og renselemme i filterkassen, til rensning af filterkernerne. Det har dog vist sig at den elektriske regenerering alene ikke har været tilstrækkelig til at holde filterelementerne rene. Det var derfor nødvendigt at konstruere et udvendigt trykluftbaseret rensesystem til at gennemblæse filterkernerne, da den isolerede filterkasse holder så længe på varmen efter regenerering, at færgeren ikke kan nå at afkøle tilstrækkeligt til at der kan arbejdes forsvarligt med rensning af filterkernerne gennem inspektionslugerne.

Eftermontering af et partikelfilter på en færge under drift kan være omkostningstungt, hvis arbejdet skal udføres i færgens oplæggerperiode om natten, hvilket var tilfældet for M/F Ærøskøbing. Meget af det forberedende arbejde blev dog foretaget i dagstiden, men installationen af hovedkomponenterne i røggassystemet skulle foretages med færgeren i dok og med nedlukket hovedmotor.

Skibsdata:

Bruttoregister 1617 tons, Nettoregister 495 tons

Længde: 49,90 meter, bredde 13,10 meter, dybgang 3,70 meter

Kapacitet: 42 personbiler, 395 passager (vinter 250 passager)

Overfartstid: 75 minutter, max. hastighed 12 knob

Hovedmaskineri: 2 stk. MaK M20C

Værft: EOS Esbjerg – Danmark, nr. 70, 1998

IMO-nummer 9199086

Færgeren M/F Ærøskøbing er indsat i ruten Svendborg – Ærøskøbing den 1. november 1999



Figur 1: M/F Ærøskøbing med udsmykning på skroget

4. Summary and Conclusion

4.1 Background and Purpose

It is generally acknowledged and scientifically documented that airborne combustion particles are harmful to health [1] [2]. Exposure can result in circulatory diseases, chronic reduction of the lung function and increased mortality, and special attention has been directed to nanoparticles, since they are able to penetrate deeply into the lungs. Moreover, research has shown that inhalation of chemical substances in the shape of nanoparticles can be significantly more harmful to health than inhalation of the same amount of larger particles.

A considerable part of the nanoparticles that can be found in the air of coastal areas originates from near-shore shipping traffic. Even though the particle pollution per kilogram freight generally is essentially lower for shipping traffic than for overland transport, the particle emission from ships can contribute with up to 70% of the ultrafine particle pollution, which was shown in a study from Santa Cruz, Spain [4]. Many initiatives have been made to limit the emissions from land-based transportation; this does not apply for those of the shipping traffic.

For land-based transportation, a series of effective filters have been developed for removal of particles based on ceramic monoliths. These ceramic filters, normally either SiC or Cordierite-based Wall Flow filters, can remove more than 90% of the number of particles from vehicles' emission. Effective catalysts for removal of NO_x are also common. Recent development shows that Wall Flow filters can be coated with a catalytic layer, thus making it able to convert NO_x and ammonia to nitrogen and water. Therefore, it is obvious to transfer this technology to remove both particles and NO_x from ships.

However, there are some differences in the engine design and the fuels for respectively ships and road vehicles, which give rise to challenges. A particle filter for ships must be functioning under completely different conditions compared to those of vehicles – important parameters will be increased SO₂ levels, available space, engine-technical parameters, maintenance/cleaning and the filter's continuous regeneration (combustion of particles from the filters).

4.2 Purpose of the project

The focus of this project was the achievement of new industrially applicable knowledge about limitation of particle and NO_x emission from ships based on the most recent research, while designing, retrofitting and commissioning a full-scale catalytic filter solution.

The project contains a series of sub-projects of both parallel and serial character, which all are focusing on obtaining a goal, which is an effective and reliable filter solution for ships – but in which each work package provides new and usable knowledge for the project partners.

Main issues of the project:

1. Characterization of particle emission from a typical Danish ferry operating in Danish water. (First round of measurement)
2. Development of particle filters.
3. Mounting and testing of particle filters on Danish ferries in operation.
4. Documentation of the effect of the developed filters. (Second round of measurement)
5. Upgrade of particle filters with catalytic effect. Installing urea injection system.
6. Documentation of the effect of the NO_x reducing system. Ensure the continued effect of the particle filter. (Third round of measurement)

4.3 Main Conclusions

The project resulted in development of a single unit maritime filter solution, which reduces the particle emission significantly, while reducing NO_x at varying rates. The smoke visible during harbor maneuvering is now at a minimum.

The system is designed so exhaust gases can be bypassed the filter unit to ensure engine operation in case of filter clogging. The system includes safety functions to prevent an excessive exhaust gas backpressure and remote controlled exhaust valves are fitted.

Some of the challenges in the project has been the keeping a low turbocharger backpressure as required from the engine manufacturer and achievement of sufficient temperatures for regeneration of the particle filter. Onboard the test vessel M/F Ærøskøbing space is limited thus finding suitable room for the filter casing where challenging as well.

To meet the requirement of low exhaust gas backpressure, the filter housing has room for twice as many filter monoliths as would be required by a truck of similar size engine. In the ferry's funnel casing, some of the original installations were removed to make room for the filter housing. Electrically controlled exhaust valves were added to the system, which can be controlled from the engineering deck. During initiation of the system, before second measuring round, it was discovered that the exhaust gas lacked the proper level of heat to ensure a full regeneration of the filters. The issue was solved by mounting automatically controlled electrical heating elements in the filter housing and by adding an ash vacuum system. Filter regeneration is carried out by the crew, after the last trip of the day, before the engine is turned off.

Before third measuring round, to reduce NO_x, a urea injection system was installed to the exhaust pipe between the engine and the filter, which combines ammonia with NO_x to create nitrogen and water by using a catalytic coating on the filters. The first set of filter cores were replaced with catalytic coated filter cores while the injection system was installed. A control unit was installed in the engineering deck and an urea tank was installed under the vehicle deck.

To properly design a particle filter for this particular application, onboard measurements were carried out to map the particle emission composition as well as exhaust gasses. NO_x-levels were lower than expected; 8.33 g/kW, whereas the other gaseous emissions were also low. Especially HC and CO were very low, while the particle mass (PM) was 0.22 g/kWh, which is typical for the fuel type.

After commissioning the particle filter, a significant reduction of 93% of the particle number (PN) was observed. A reduction in PN up to 99% was expected but the difference is most likely due to leaky exhaust valves in the bypass system. It has not been examined whether the leak can be removed by adjusting the valves, or whether another type of valve should be installed. A significant reduction in NO_x emissions of at least 40% was measured when the system was put into operation. However the efficiency of the filter dropped significantly during the day, probably due to soot contamination of the catalyst material in the filters. This shows that the efficiency might be even higher early in the morning during the first crossing. A solution for this problem might be more frequent regeneration.

Besides the environmental advantages, mounting of a particle filter will also result in a reduction of soot particles, both in the harbor areas and on the ferry's sun- and car deck, which will reduce the needs for cleaning those areas. The filter system may also be useful to the ferry company in their marketing as an environmental initiative.

According to the original design, the particle filter should have been placed in the engine room or in immediate connection with it, where the weight distribution would have been more ideal, however after reviewing the available space for at particle filter on the test vessel, it was decided to place the particle filter in the funnel casing. In general The design of the particle filter changed during the pro-

ject, mainly due to requirements of a low exhaust gas backpressure from the engine manufacturer and due to the space challenges aboard the test vessel. The available space for fitting a filter aboard the test vessel do not differ noticeable from other vessels. The construction of the filter housing was made of marine grade construction steel, which proved to be a heavy solution. Future solutions could benefit from using different steel grades to obtain smaller wall thickness and thereby less weight.

The filter housing is fitted with an ash vacuum system, which collects the ash after regeneration. However, electrical heated regeneration combines with vacuum system alone is not sufficient to keep the filter units clean. It was necessary to construct an external cleaning system based on compressed air for blowing out the monoliths, since the insulated filter housing keeps the heat in the filters for so long after regeneration that the ferry does not have sufficient time to cool down for manual cleaning of the filters through the service hatches.

Retrofitting of a particle filter in a ferry in commission proved to be cost-intensive; since the work had to be carried out during the ferry's docking at night or the time in dry dock. Much of the preparing work was carried out in the daytime, whereas the installation of the unit in the exhaust gas system had been carried out with the main engine shut down and in dry dock. The particle filter manufacturer,

Data of the ship:

GRT 1617 tons, NT 495 tons

Length: 49.90 meter, width 13.10 meter, draught 3.70 meter

Capacity: 42 passenger cars, 395 passengers (winter 250 passengers)

Crossing time: 75 minutes, max. speed 12 knot

Main machinery: 2 x MaK M20C

Shipyard: EOS Esbjerg – Denmark, no. 70, 1998

IMO-number: 9199086

The ferry M/F Ærøskøbing were commissioned on the route Svendborg-Ærøskøbing 1st of November 1999.



Figur 2: M/F Ærøskøbing ferry with artistic decoration

MARPOL NO_x Tier: none (pre 2000 engine)

5. Projektindhold

De følgende afsnit indeholder en detaljeret beskrivelse af projekterne MST-141-00146 "Udvikling af partikelfiltre til skibe" samt MST-141-0407 "Udvikling af emissionsreducerende kombinationsløsninger til skibe"

Baggrund og formål

Det er generelt anerkendt og videnskabeligt dokumenteret, at luftbårne forbrændingspartikler er sundhedsskadelige [1] [2]. Eksponering kan forårsage kredsløbssygdomme, kronisk nedsættelse af lungefunktion og øget dødelighed, og særligt er nanopartikler i fokus, da de kan trænge dybt ind i lungerne. Forskning har vist, at indånding af kemiske stoffer i nanopartikelform kan være signifikant mere sundhedsskadeligt end indånding af den samme mængde større partikler.

En væsentlig del af de nanopartikler der findes i luften i kystnære områder, stammer fra kystnær skibstrafik [4]. Selvom brændselsforbruget per kilogram transporteret gods overordnet set er væsentligt lavere for skibstrafik end for landtransport, kan partikelemissionen fra skibe bidrage med op til 70 % af den ultrafine partikelforurening i kystnære områder, hvilket bl.a. er blevet vist i et studie fra Santa Cruz, Spanien [4]. Mange tiltag er foretaget for at begrænse emissionerne fra landtransport hvor fx Euro-normerne sætter grænser for køretøjers emissioner. For skibstrafikken reguleres svovlindholdet i brændstoffet, men ellers er der ingen generelle krav til partikeludledningen, og NO_x krav gælder kun for motorer bygget efter 2000.

Til landtransport er der udviklet en række effektive filtre til fjernelse af partikler baseret på keramiske monolitter. Disse keramiske filtre, normalt enten SiC- eller Cordiorit-baserede Wall Flow-filtre, kan fjerne mere end 90 % af antallet af partikler fra køretøjers emission. Endvidere findes der effektive katalysatorer til omdannelse af NO_x fra køretøjer. På det seneste er der også blevet udviklet kombinationsfiltre, hvor coatede Wall Flow filtre med en katalytisk overflade fjerner partikler, og samtidigt omdanner NO_x og ammoniak til nitrogen og vand. Det var derfor oplagt at starte et udviklingsforløb hvor netop denne teknologi fra landtransport til fjernelse af partikler og NO_x i én og samme enhed blev overført til skibe.

Der er dog en række forskelle på de motorer og brændstof som anvendes til henholdsvis skibe og køretøjer, og dette giver anledning til udfordringer. Emissionssystemet skal fungere under helt andre driftsbetingelser på skibe end dem, der er til stede i køretøjer. De vigtige parametre er tilstrækkelig røggastemperatur til regenerering, krav og begrænsninger på røggasmodtryk, forhøjede SO₂-niveauer på grund af svovl i brændstoffet, de trange pladsforhold samt vedligehold og rensning af filteret for aske.

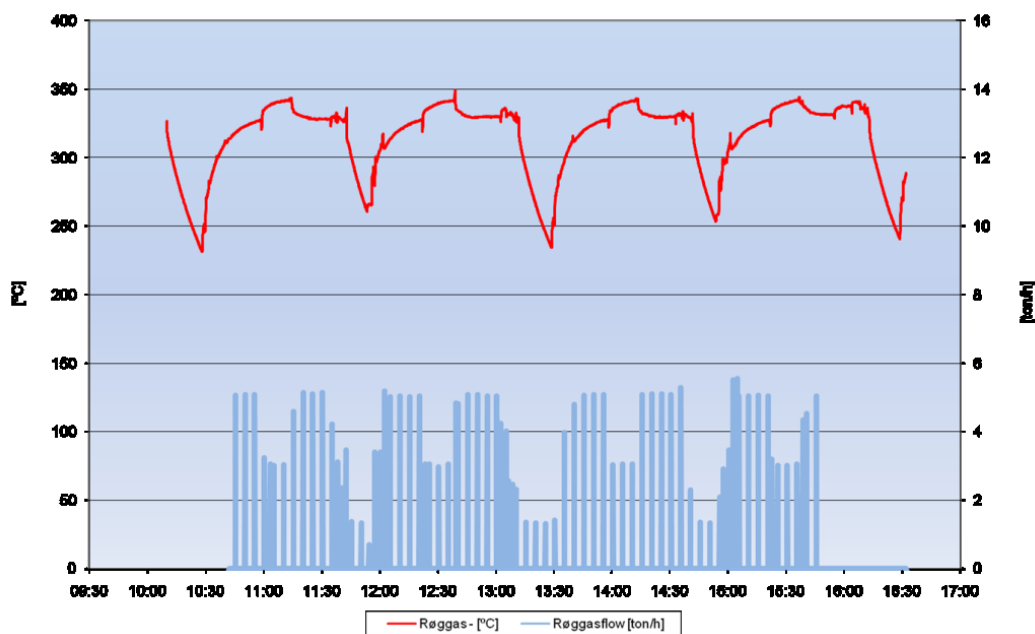
Formålet med projektet er:

- Færre partikler og mindre NO_x i luften i havneområder og kystnære bebyggelser.
- Bedre forståelse af den kemiske sammensætning af emissioner fra skibsmotorer.
- Designgrundlag og erfaringer, der muliggør udbredelse af emissionsreducerende løsninger til skibe generelt.
- Forbedret arbejdsmiljø for de ansatte på færgerne og i havneområdet.
- Forbedret miljø for passagererne.

Projektelement	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
MST-141-00146								
1 Bevilgning projekt		■						
2 Emissionsmåling 1		■						
3 Udvikling af filterløsning		■	■	■				
4 Montage og prøvesejlads		■	■	■	■			
5 Emissionsmåling 2				■	■			
6 Rapportering af første projekt				■	■			
MST-141-0407								
7 Bevilgning af projekt				■				
8 Udvikling af kombinationsløsning					■	■	■	
9 Montage og prøvesejlads					■	■	■	
10 Emissionsmåling 3							■	■
11 Rapportering af det samlede projekt								■

Figur 3: Gant skema over hovedelementerne i projekterne MST-141-00146 og MST-141-0407

Projektet er som tidligere nævnt opdelt i to delprojekter, hvor første fase omhandler udviklingen af et partikelfilter, og anden fase omhandler kombinationsløsningen med NO_x reducerende coating af filteret. For at overskueliggøre forløbet af de to projekter er den effektuerede tidsplan vist på Figur 3.



Figur 4: Færgens driftsprofil. Profilen viser blandt andet at udstødningsgassen under drift ligger mellem 250 og 350°C.

5.1 Karakterisering af røggasemissioner fra en typisk dansk indlandsfærge

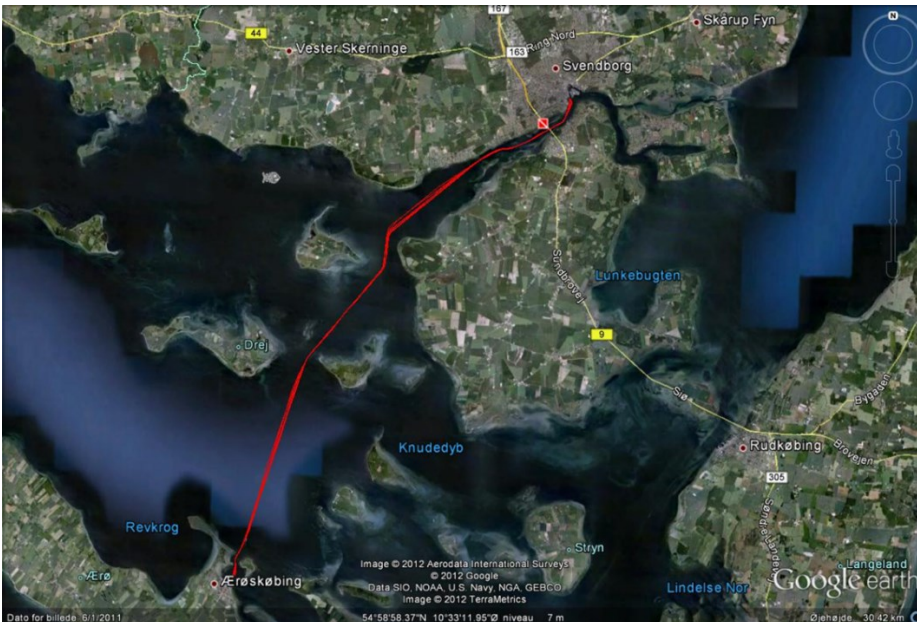
I starten af projektet blev der, af Teknologisk Institut, gennemført en målerunde for at fastlægge rå-emissionerne fra færgen. Målingerne blev udført for at sikre et tilstrækkeligt og solidt datagrundlag til

at designe et partikelfilter til den udvalgte færge, og senere opgradere til en kombinationsløsning der også reducerer NO_x. I samme periode blev der foretaget opmåling og analyse af pladsforholdene på færgen. Filterenheden er udviklet af filterproducenten Dinex A/S i tæt samarbejde med Ærøfærgernes tekniske chef.

Den valgte færge M/F Ærøskøbing er udstyret med to hovedmotorer af mærket MaK M 20 C, som er en 4-takts-dieselmotor udlagt som 6-cylindret rækkemotor, hver med en ydelse på 1020 kW. Motorerne er med konstant omdrejningstal på ca. 900 o/min. Motoren er fremstillet før 2000 og er derfor ikke underlagt MARPOL NO_x krav.

Under første målerunde blev færgens driftsforhold belyst. Driftsforholdene blev brugt til at danne grundlag for dimensionering af partikelfiltret. Røggas flowet samt røggas temperaturen er vist i Figur 4, mens færgens sejlroute er vist i Figur 5. Det ses at sejlruten er meget kystnær og nær bebyggede områder. Området er klassificeret som ECA-zone med gældende krav til svovlindhold på 1000ppm samt MARPOL Tier II NO_x for nye skibe, se Figur 6.

Som testcyklus blev der valgt 4 belastningspunkter (tomgang, 50%, 85% og 100%) som passer til den aktuelle sejlroute. De 4 punkter udgør en tilnærmet ISO 8178 Marine Type E2 test. Afvigelsen fra 75% belastningspunktet fra standarden, skyldes at en stor del af overfarten normalt foregår ved 85% belastning. Vægtningen af resultaterne er derfor foretaget med vægtfaktorer iht. Type E2 testen (15%, 15%, 50% og 20%). Den vægtede emissionsmåling viste et NO_x-niveau på 8,33 g/kWh, hvilket er udmærket for motortypen i betragtning af at den ikke er optimeret til MARPOL NO_x krav. Også de øvrige gasemissioner lå lavere end umiddelbart forventet. Specielt HC og CO lå meget lavt, mens



Figur 5: Færgens sejlroute, som foregår kystnært i ECA/Tier II-område

partikelemissionen lå på et for brændstoffypen normalt niveau med 0,22 g/kWh. Et højere svovlindhold i brændstoffet ville have resulteret i markant højere partikelmasse.

Der blev udtaget brændstof- og smørelieprøver, som blev analyseret. Hovedmotorens målte NO_x-udledning ligger under kravene for en MARPOL Tier II motor, som først gælder motorer bygget fra 2011 og frem. Tier III NO_x kravene gælder indtil videre kun i Nordamerikanske ECA-Zoner.

Parameter	Enhed	Vægtet resultat	Tier I (fra 2000)	Tier II (fra 2011)	Tier III (Nordamerika)
NO _x	g/kWh	8,33	11,59	9,25	2,32
NO ₂	g/kWh	0,99	-	-	-
HC	g/kWh	0,23	-	-	-
CO	g/kWh	0,62	-	-	-
PM	g/kWh	0,22	-	-	-
SO ₂	g/kWh	0,01	-	-	-
Spec. Br.	g/kWh	195	-	-	-

Figur 6: Vægtet resultat af emissionsmålinger fra målerunde 1 uden filter. Målingen viser at motorens NO_x udledning opfylder kravet til MARPOL Tier II. Partikelemissioner er normal.

Parameter	Driftspunkt	100,1		100,2		85,1		85,2		85,3		85,4		50,1		50,2		0,1		0,2	
NO ₂	g/s	0,30	0,28	0,23	0,25	0,23	0,23	0,13	0,11	0,01	0,01										
NO _x	g/s	2,36	2,41	1,97	1,99	2,01	2,02	1,07	1,08	0,11	0,11										
HC	g/s	0,06	0,06	0,05	0,05	0,05	0,05	0,03	0,03	0,01	0,01										
CO	g/s	0,19	0,18	0,12	0,11	0,11	0,12	0,12	0,13	0,07	0,07										
CO ₂	g/s	171	171	145	145	145	145	89	89	11	11										
PM	g/s	57	54	51	50	46	46	40	33	22	22										
SO ₂	g/s	1,4	2,1	4,5	2,4	-	-	0,3	1,3	0,3	0,3										
Røggasflow	kg/h	7463	7546	6436	6413	6475	6439	4192	4222	1350	1342										
Røggastemp.	°C	324	314	316	322	311	325	321	314	230-330	230-330										

Figur 7: Oversigt over emissionsmålinger fra målerunde 1 uden filter

5.2 Udvikling af kombinationsløsningen

Resultatet af første målerunde viste, at et filterareal svarende i størrelse til en motor på en lastbil, ikke ville have tilstrækkelig flowkapacitet til at imødekomme kravet fra motorfabrikanten om et maksimalt kontinuerligt røggasmodtryk i turboladeren på 3 kPa (peak på 5 kPa).

Udstødningstemperaturen ligger i området 250-350 °C, på grund af den lange afstand mellem motor og skorsten, hvilket ikke er tilstrækkeligt til kontinuerlig regenerering af filterkernerne. Derfor blev der valgt en løsning med aktiv, elektrisk regenerering dagligt efter endt sejlads. Regenereringen kræver ca. 150 kW, som leveres af færgens to generatoranlæg. Tidspunktet for regenerering blev henlagt til perioder, hvor hovedmotoren kører i tomgang – dette for at mindske den nødvendige effekt til varmelegemerne. Hvis regenerering skulle finde sted under drift, ville det være nødvendigt af finde yderligere elektrisk effekt til at kompensere for den knap så varme røggas. Samtidig er der på dette tidspunkt ikke behov for strøm til andre dele af færgen, så som køkkenet.

Det maksimale air flow (MAF) blev beregnet til 7505 kg/h med en forventet sodproduktion pr. dag på 3000 g, hvilket efter regenerering vil give en askeproduktion pr. dag på 280 g baseret på akseanalysen med 0,005% askeindhold (Figur 13). Størstedelen af asken kommer fra smøreoliens additiver.

Filterkernerne bliver under regenerering opvarmet til ca. 650 °C, hvorefter askesugningssystemet fjerner askeresterne. Det har dog vist sig nødvendigt at konstruere et system til at gennemblæse filterkernerne med trykluft efter regenerering, da askesugningssystemet ikke er tilstrækkeligt til at fjerne restasken. Det er vigtigt at holde filtrene rene for at undgå forhøjet røggasmodtryk, ligesom det efter udskiftning til katalytisk belagte filtre, er vigtigt at holde den katalytiske overflade ren, så den kan omdanne NO_x og ammoniak til nitrogen og vand.

Da størrelsen på filterelementerne var fastlagt, blev det mest egnede sted på færgen lokaliseret til at være bagbords skorstenscasing. En filterkasse blev designet af Dinex A/S i samarbejde med Ærøfærgen til formålet.

Efter anden målerunde blev et NO_x reducerende system installeret således, at partikelfilteret blev opgraderet til at være en kombinationsløsning. Systemet består af et doseringssystem til indsprøjtning af urea i skorstenen og nye filterelementer med en belægning af katalytisk materiale. Under vogndækket blev der installeret en ureatank samt en fødepumpe til forsyning af urea.

Urea indsprøjtningen følger en normalt anvendt strategi, hvor doseringen følger motorens brændstofforbrug. Dette foregår normalt ved, at der foretages en mapning af NO_x udviklingen som funktion af omdrejningstal og brændstofforbrug. I dette tilfælde er omdrejningstallet konstant og der er derfor kun foretaget en mapning af NO_x udviklingen som funktion af brændstofforbrug.

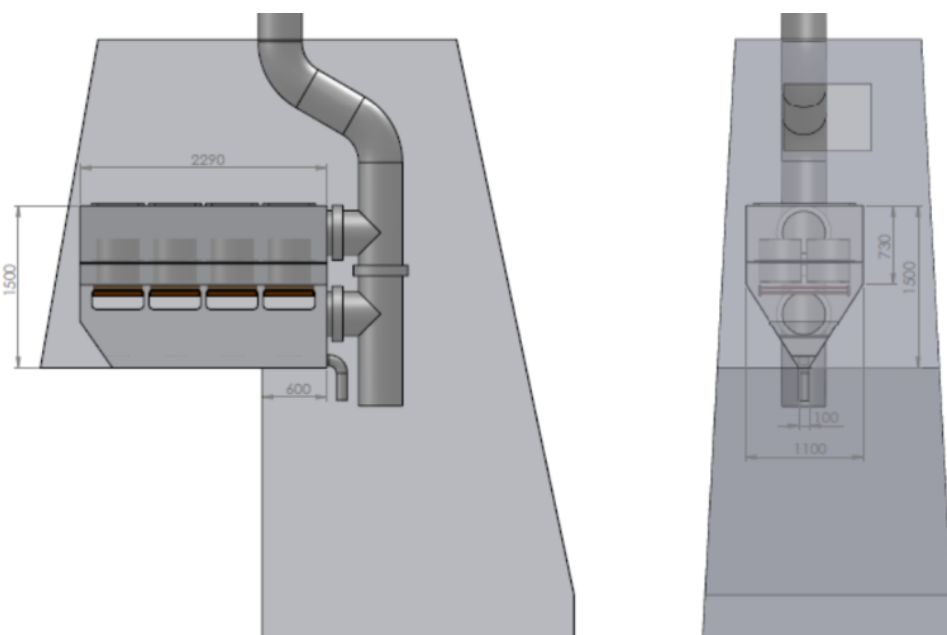
Urea indsprøjtningen foregår i skorstensrøret ca. 4m før filterkassen. Dette sikrer god opblanding med røggasserne og en fuldstændig fordampning af urea før katalysatoren.

Ved monteringen af kombinationsløsningen fandtes der ikke ammoniak sensorer på markedet, men de er under udvikling og kommer på markedet inde for en overskuelig årrække. Når de kommer, kan man vælge, at eftermontere en sensor, men det vil kræve en omprogrammering af systemet for at få systemet til at kompensere for ammoniakslip

5.3 Montering af partikelfilter

Systemet er, i dette projekt, opbygget således, at udstødningsrøggasserne kan ledes uden om filterenheden via et bypassspjæld. Dette er valgt af sikkerhedsmæssige årsager; for at sikre motorkraft i det tilfælde, at filterelementerne skulle tilstoppe og turboladerens modtryk derved bliver for højt. Der er indbygget sikkerhedsfunktioner i systemet imod for højt røggasmodtryk, samt automatik til regulering af de motorstyrede røggasspjæld.

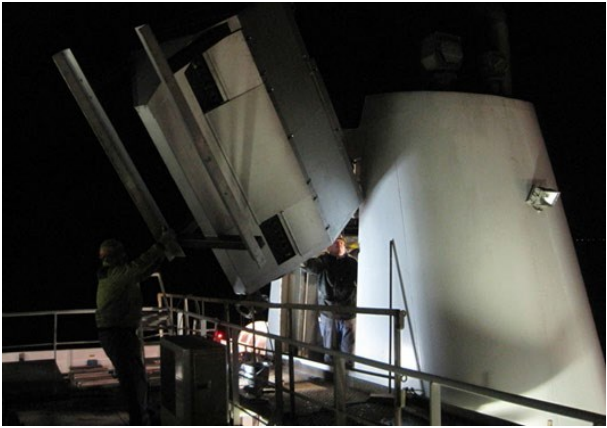
Ombygning af skorstenscasingen var nødvendig for at få plads til både filterkasse, styretavle samt røggasspjældene, og meget af arbejdet måtte udføres i færgens oplægger periode om natten for ikke at forstyrre færgens sejlplan. Filterkassen blev som vist på Figur 10, monteret gennem et skåret hul i siden af skorstenen. Hullet blev efterfølgende lukket ved svejsning.



Figur 8: Skorstenscasing og installationsoversigt. Som det ses på installationsoversigten nederst, er pladsen begrænset i skorstenscasingen.



Figur 9: Filterkassen under konstruktion.



Figur 10: Montering af filterkassen i løbet af færgens oplægger periode.

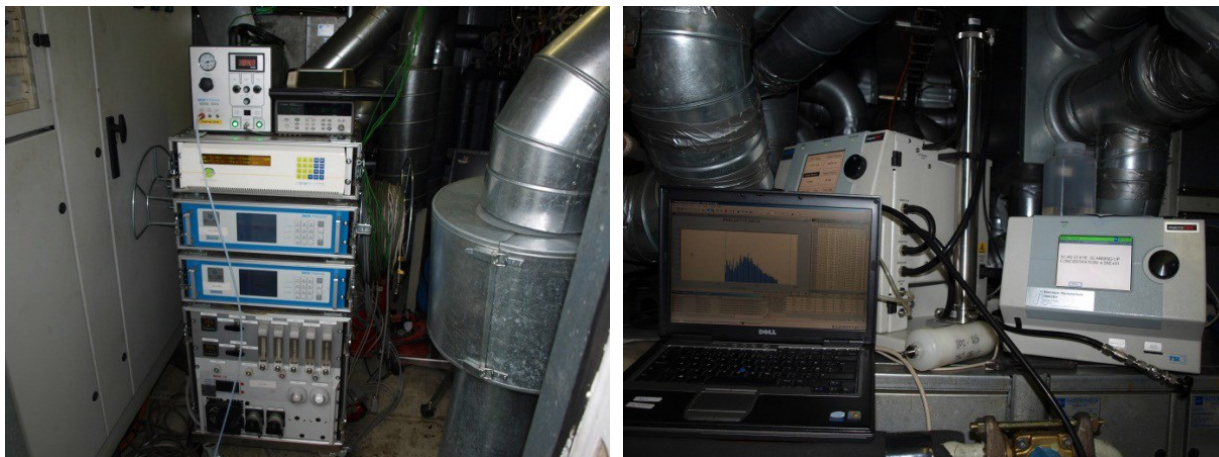


Figur 11: Automatisk røggasspjæld og tilhørende styretavle.

5.4 Dokumentation af effekten af den udviklede kombinationsløsning

Efter færdiggørelse og indkøring af partikelfilter og filterenhed, blev anden målerunde foretaget for at dokumentere effekten af det installerede partikelfilter. Målepunkterne fra første målerunde blev gentaget, og der blev foretaget målinger i bypass-mode.

Der blev som i første målerunde udtaget både brændstof- og smøreolieprøver, som blev analyseret. På Figur 13 ses en sammenligning af analysen fra anden og første målerunde.



Figur 12: Måleopstilling ombord på færgen

Svovlindholdet i brændstoffet ligger med 239 ppm langt under den maksimale grænseværdi for SE-CA-områder på 10.000 ppm (2015, maks. 1000 ppm). Der ses i smøreolien et højere vandindhold i

Brændstofprøve 22-08-2012				11-02-2010	
Parameter	Metode	Resultat	Enhed	Resultat	Enhed
Densitet	DIN EN ISO 12185	856,7	Kg/m ³	856	Kg/m ³
Askeindhold	DIN EN ISO 6245	<0,005	% (m/m)	<0,006	% (m/m)
Svovl	DIN EN ISO 20884	239	mg/kg	262	mg/kg
Vandindhold	DIN EN ISO 12937	36	mg/kg	18	mg/kg
Smøreolieprøve 22-08-2012				11-02-2010	
Densitet	DIN EN ISO 12185	898,4	Kg/m ³	891,5	Kg/m ³
Askeindhold	DIN EN ISO 6245	1,07	% (m/m)	1,05	% (m/m)
Svovl	DIN EN ISO 20884	4911	mg/kg	2193	mg/kg
Vandindhold	DIN EN ISO 12937	411	mg/kg	19	mg/kg

anden målerunde, hvilket skyldtes en tidligere defekt smøreoliekløler.

Figur 13: Brændstof- og smøreolieanalyse. Det bemærkes at vandindholdet i smøreolien er højere ved anden målerunde, hvilket skyldes en tidligere defekt smøreoliekløler

Efter udskiftning af filterkernerne med de katalytisk belagte kerner, samt installation og indkøring af urea indsprøjtningssystem, blev tredje målerunde foretaget. Dette for at dokumentere virkningen af kombinationsløsningen. Ligesom i anden målerunde, blev punkterne fra første målerunde gentaget og der blev igen foretaget målinger i bypass-mode. Grundet mistanke om utætheder ved bypassspjældene blev der også foretaget målinger direkte i filterkassen efter filtrene (herfra kaldet sekundær måleposition). I tredje målerunde blev der ikke foretaget brændstof- og smøreolieanalyse.

5.5 Gasemissionsmåling – Måleopstilling og metode

Testrøggassen blev udtaget af skorstenen gennem et opvarmet probehoved og suget gennem en opvarmet slange til Teknologisk Instituts gasanalyserack. Gasanalyseracket er beskrevet i Figur 14. Data fra gasanalyseracket blev opsamlet ved hjælp af en Agilent 34970A Datalogger og gemt i en fil med et måleinterval på et sekund.

Komponent	Fabrikat	Model	Måleområde	Målemetode	Usikkerhed
Temperatur	RS Components	Type K	0-800°C	Termoelement	±2°C
NOx	Ecophysics	CLD 822 S	0-1400 ppm	Opvarmet CLD	±5 %
CO2	Siemens	Ultramat 22P	0-20 % vol	IR	±5 %
CO2	Siemens	Ultramat 22P	0-1 % vol	IR	±5 %
CO	Siemens	Ultramat 22P	0-1000 ppm	IR	±5 % + 5 ppm
HC	SICK/Maihak	3006	0-1000 ppm	Heated FID	±5 % + 5ppm

Figur 14: Teknologisk Instituts gasanalyserack

Foruden gasanalyseracket blev røggassen i tredje målerunde analyseret ved hjælp af en Thermo Scientific Antaris IGS FTIR (Fourier Transform Infrared spectroscopy). Dette udstyr analyserer røggassen for 18 forskellige gasarter og har ligeledes et måleinterval på et sekund.

Alle målinger bliver foretaget på ppm basis og i henhold til ISO 8178.

5.6 Partikelmåling - Måleopstilling og metode

Størrelsesfordeling og antalskoncentration af partiklerne i røggassen blev målt ved hjælp af en *Scanning Mobility Particle Sizer* (SMPS), model 3080C, i kombination med en *Condensation Particle Counter* (CPC), model 3776C, begge fra TSI. SMPS'en var monteret med en *Differential Mobility Analyzer* (DMA), model 3081. Alle målinger blev udført med et sample flow på 0,3 L/min, hvilket tillod måling i størrelsesintervallet 14-673 nm med en scantid på 2,5 min.

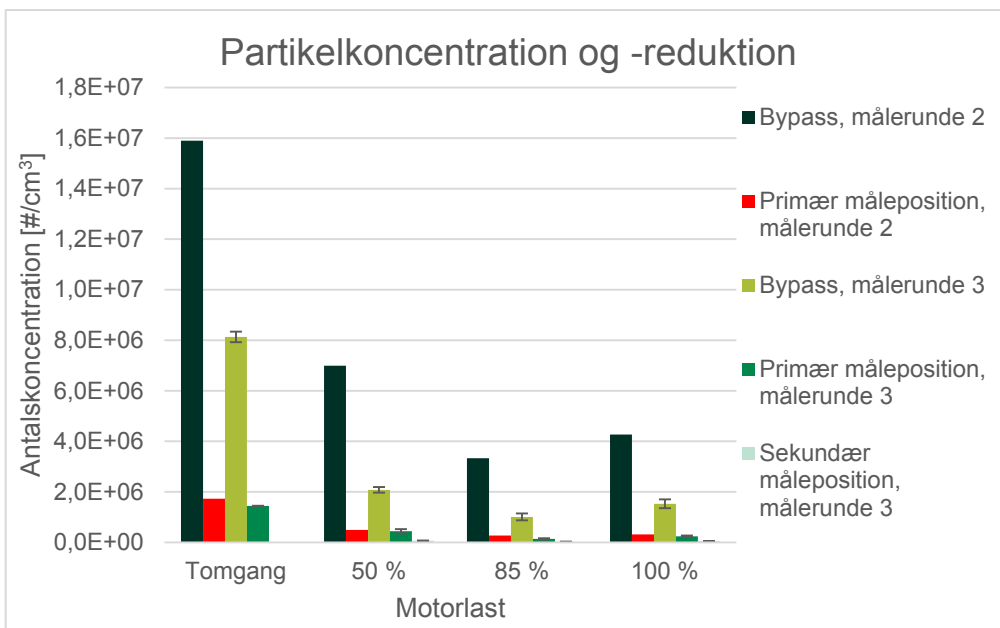
En *Rotating Disc Diluter* (fortynderudstyr), model MD19-3E fra Testo, blev brugt til at fortynde en delmængde af den rå emission fra skorstenen med cirka en faktor 15. Herefter passede den fortyndede røg en katalytisk stripper, model CS015, fra Catalytic Instruments, inden måling med SMPS. Temperaturen på den katalytiske stripper blev holdt på 350 °C for at fjerne flygtige og semi-flygtige forbindelser inden måling med SMPS, således at kun den faste partikelfraktion er tilbage (*solid particles*). Dette trin er standardprocedure i forbindelse med emissionsmålinger med henblik på at læne sig op af *Particle Measurement Program* (PMP) og derved kunne sammenligne forskellige målinger på tværs af aktører.

5.7 Partikelmåling - Resultater og diskussion

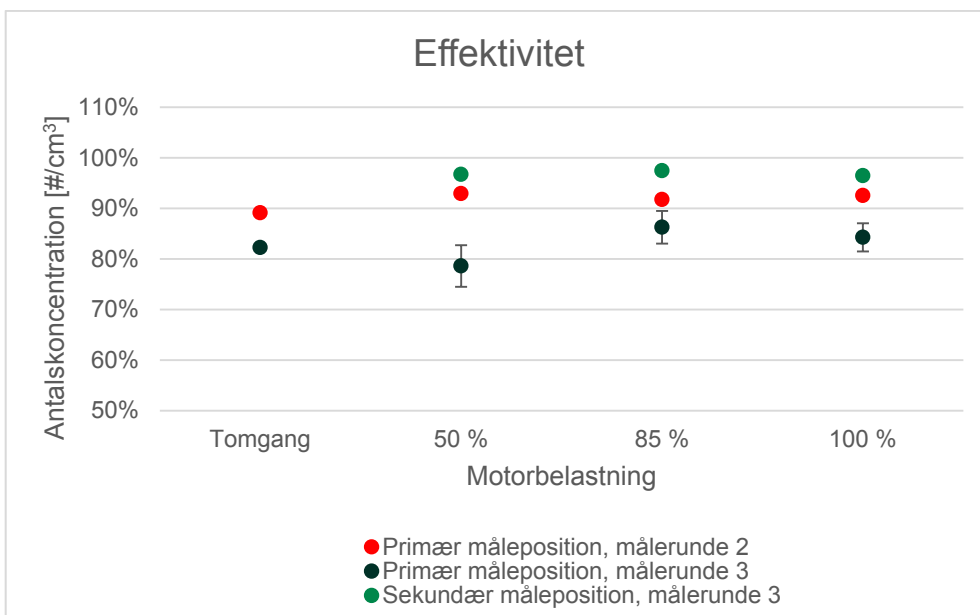
I Figur 15 er vist en oversigt over middelpartikeldiameter og –koncentration med tilhørende standardafvigelser for de forskellige motorbelastninger. Partikelreduktionen er udregnet i intervallet 14-673 nm. Tabellens resultater er endvidere visualiseret i Figur 16, Figur 17 og Figur 18.

Motorbelastning	Måleposition	Partikelstørrelse [nm]	Koncentration [antal/cm ³]	Effektivitet [%]
Tomgang	Bypass	150 ± 1	$(1,59 \pm 0,04) \times 10^7$	-
Målerunde 2	Primær	144 ± 1	$(1,73 \pm 0,06) \times 10^6$	89
Tomgang	Bypass	168 ± 3	$(8,1 \pm 0,2) \times 10^6$	-
Målerunde 3	Primær	168 ± 3	$(1,4 \pm 0,1) \times 10^6$	82 ± 0,5
50%	Bypass	96 ± 4	$(6,99 \pm 0,29) \times 10^6$	-
Målerunde 2	Primær	88 ± 4	$(4,94 \pm 0,35) \times 10^5$	93
50 %	Bypass	96 ± 2	$(2,1 \pm 0,1) \times 10^6$	-
Målerunde 3	Primær	98 ± 5	$(4,5 \pm 0,8) \times 10^5$	79 ± 4
	Sekundær	92 ± 6	$(6,8 \pm 0,2) \times 10^4$	97 ± 1
85%	Bypass	80 ± 2	$(3,33 \pm 0,05) \times 10^6$	-
Målerunde 2	Primær	80 ± 4	$(2,75 \pm 0,15) \times 10^5$	92
85 %	Bypass	88 ± 2	$(1,0 \pm 0,1) \times 10^6$	-
Målerunde 3	Primær	88 ± 3	$(1,4 \pm 0,3) \times 10^5$	86 ± 3
	Sekundær	79 ± 9	$(2,6 \pm 0,4) \times 10^4$	97 ± 1
100 %	Bypass	79 ± 1	$(4,27 \pm 0,09) \times 10^6$	-
Målerunde 2	Primær	83 ± 2	$(3,19 \pm 0,13) \times 10^5$	93
100 %	Bypass	91 ± 3	$(1,5 \pm 0,2) \times 10^6$	-
Målerunde 3	Primær	88 ± 6	$(2,4 \pm 0,3) \times 10^5$	84 ± 3
	Sekundær	78 ± 5	$(5,4 \pm 0,5) \times 10^4$	96 ± 1

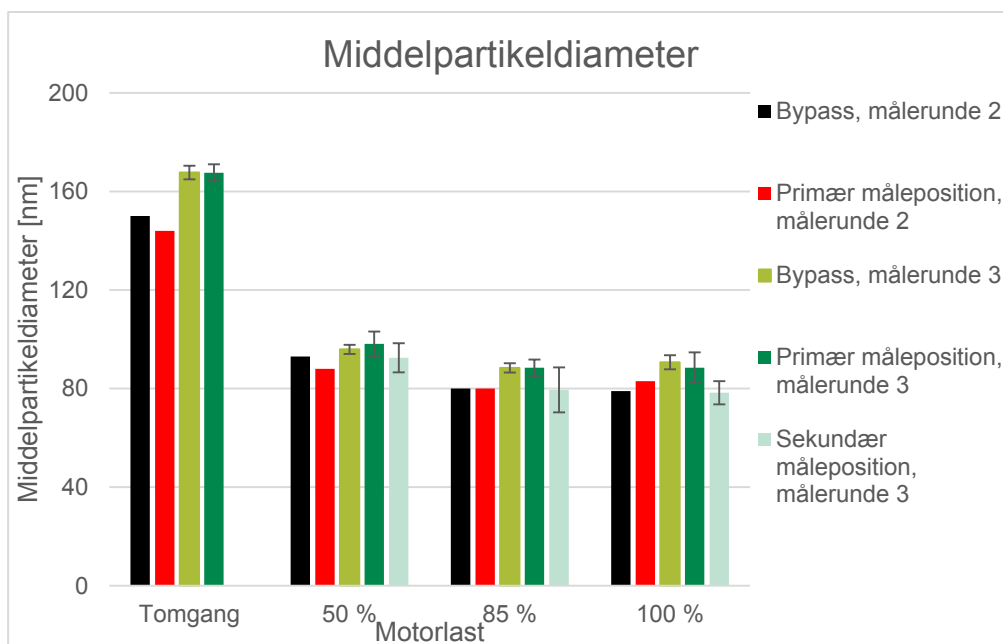
Figur 15: Oversigt over middelpartikeldiameter og partikelantalskoncentration ved forskellige motorbelastninger. Reduktionen i partikelantal er udregnet i størrelsesintervallet 14-673 nm



Figur 16. Middelpartikelantalskoncentration ved forskellige motorbelastninger og målepositioner. Usikkerheden er angivet som \pm en standardafvigelse på baggrund af de foretagne SMPS scan.



Figur 17. Filtereffektivitet i procent ved forskellige motorbelastninger i den primære og sekundære måleposition. Usikkerheden er angivet som \pm en standardafvigelse på baggrund af de foretagne SMPS scan.



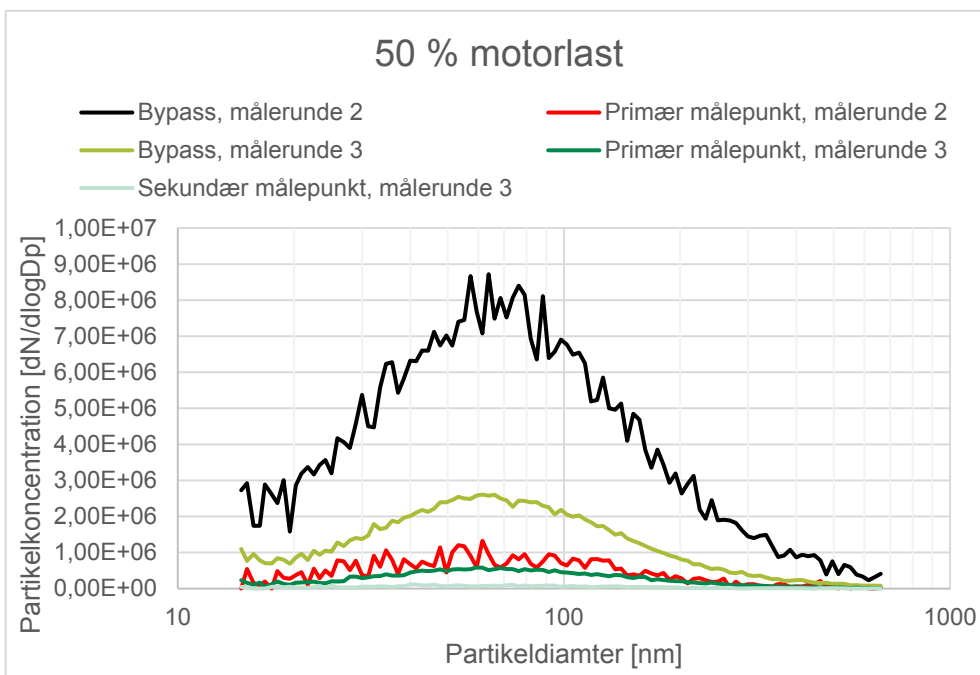
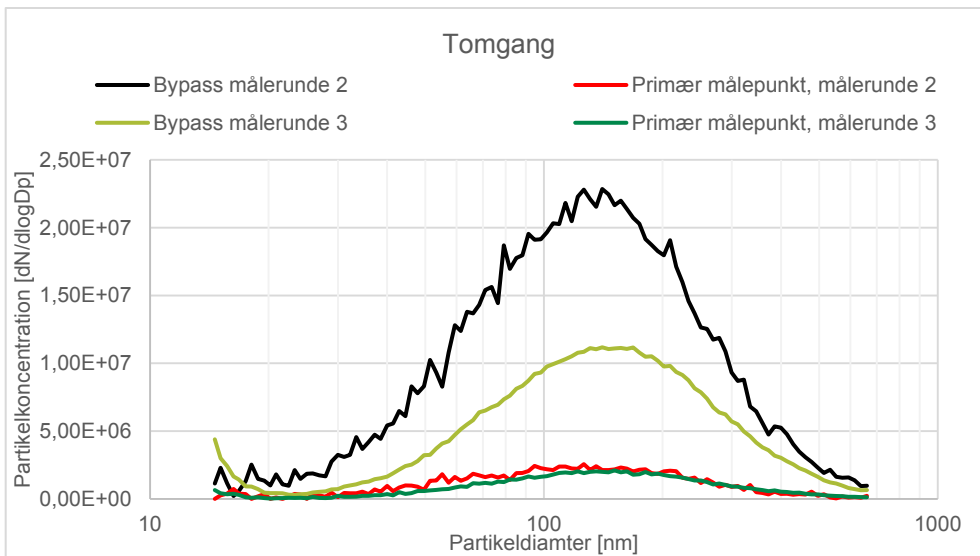
Figur 18. Middelpartikeldiameteren ved forskellige motorbelastninger og forskellige målepositioner. Usikkerheden er angivet som \pm en standardafvigelse på baggrund af de foretagne SMPS scan.

For de tre motorbelastninger, 50 %, 85 % og 100 %, blev der målt i bypass-mode og i den primære måleposition efter filteret, desuden blev der ved tredje målerunde også målt ved en sekundær måleposition direkte ved filterkassen. Ved tomgang blev der kun målt med bypass af filteret samt i den primære måleposition. I tredje målerunde blev der på baggrund af bypass-målingerne og målingerne i den primære position er beregnet en partikelantalsreduktion på 79-86 % mod en partikelantalsreduktion på 89-93% i anden målerunde. Tredje målerundes reduktion er lavere end forventet. En forklaring kunne være, at bypass-spjældet muligvis ikke lukker fuldstændig tæt og utætheden er blevet værre siden anden målerunde. Der blev derfor foretaget yderligere målinger i den sekundære måleposition. Disse viste en markant lavere partikelkoncentration og en reduktion på mellem 96-97 % for en motorbelastning på 50-100 %. Dette viser, at bypass-spjældet med stor sandsynlighed ikke er fuldstændig tæt og at en del af røggasmængden, estimeret omkring 10 %, ikke filtreres.

Middelpartikeldiameteren var stort set den samme ved bypass af filteret og ved måling i den primære måleposition, hvorimod der ses en reduktion i middelpartikeldiameteren ved måling på den sekundære måleposition. Disse forhold taler yderligere for at der er en utæthed i bypassspjældet, da det er forventeligt at filtreringen påvirker partiklernes størrelsesfordeling.

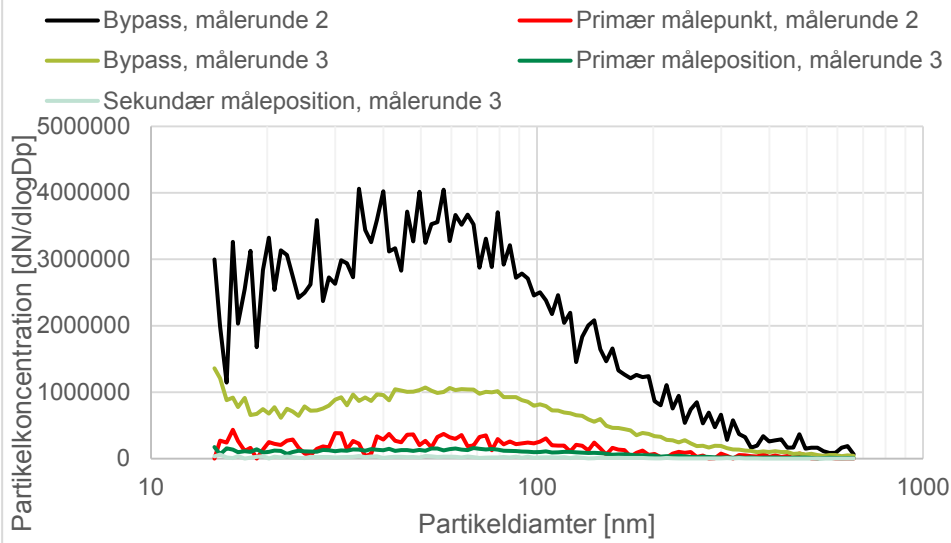
Partikelstørrelsesfordelinger for de fire motorbelastninger er vist i Figur 19 og Figur 20. Størrelsesfordelingerne er forholdsvis brede, og der ses ligeledes en reduktion af middelpartikeldiameteren i takt med at antallet af partikler reduceres i henholdsvis den primære og sekundære måleposition. Ved alle fire motorbelastninger giver SMPS-målingen samtidig anledning til observation af en partikelfraktion under ~ 20 nm. Erfaringsmæssigt er det ikke unormalt at observere sub-20 nm partikler i emissioner fra forbrændingsmotorer, og vurderingen er, at målingen er retvisende. Det kan dog ikke ud fra det foreliggende datagrundlag afvises, at der kan være tale om en måleartefakt, da der måles i yderområdet af instrumentets specifikationer.¹

¹ Måling af koncentrationen af de mindste partikler ($< ca. 20$ nm) med SMPS er behæftet med en relativ stor usikkerhed, da de anvendte korrektionsfaktorer til data pga. diffusionstab i slanger og udstyr har væsentlig større indflydelse på de mindste partikler end på de større. Samtidig kan der være tale om memory-effekter ved start af et SMPS scan. Målingen bør således gentages med fokus på det lave størrelsesområde (fx ved brug af såkaldt nano-DMA) for at få entydig vished omkring eventuel eksistens af disse sub-20 nm partikler.

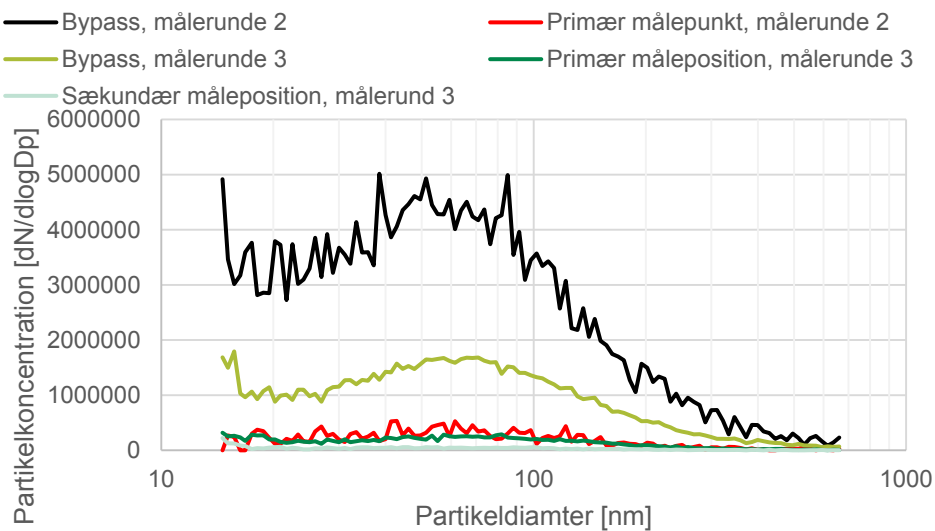


Figur 19. Partikkelstørrelsesfordeling i tomgang (øverst) og ved en motorbelastning på 50 % (nederst)

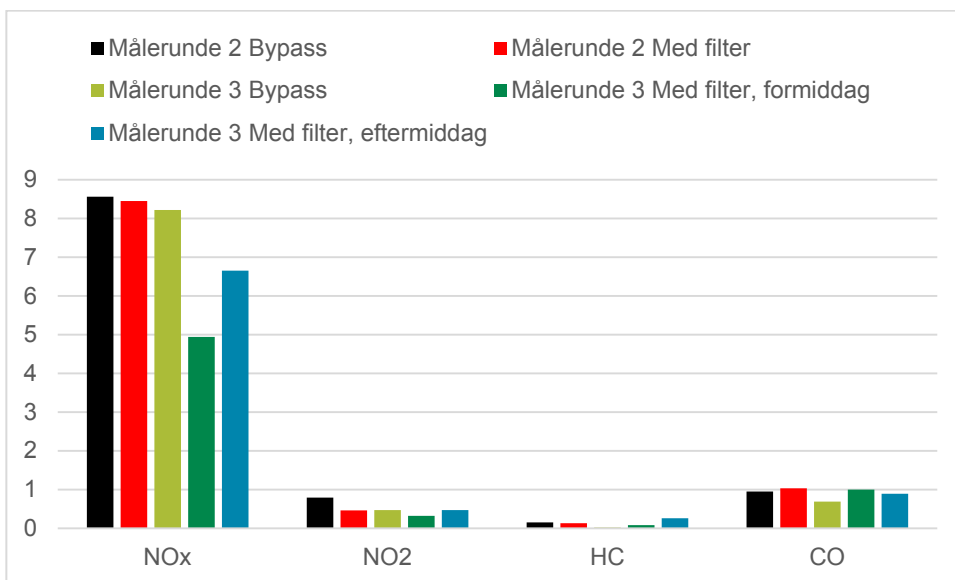
85 % motorlast



100 % motorlast



Figur 20. Partikelstørrelsesfordeling ved motorbelastning på 85 % (øverst) og 100 % (nederst).



Figur 21: Gasemissionsmålinger før/efter partikelfilter i målerunde 2 og 3

5.8 Gasemissionsmålinger

Ved anden målerunde viser målingerne stort et set uændret billede af emissionerne før og efter partikelfiltret, hvilket var i overensstemmelse med forventningerne. Se Figur 21. Til gengæld måles en klar reduktion i NO_x koncentration, ved tredje målerunde, efter installation af kombinationsløsningen. Det blev dog observeret at katalysatorens effektivitet i løbet af dagen reduceres, formegentlig grundet tilsodning af den katalytiske belægning i filteret. Dette bevirker at NO_x- samt Ammoniak koncentrationen i udstødningen stiger i løbet af dagen, se Figur 21. Denne reduktion i virkningsgrad kan formegentlig reduceres ved hyppigere regenerering.

5.9 Konklusion

Det har vist sig muligt at konstruere en maritim kombinationsløsning med katalytisk belagt partikelfilter, der i én og samme enhed effektivt reducerer partikler samt målbart reducerer NO_x emissioner, på skibe der sejler på marinediesel med et svovlindhold på op til 239ppm. Udfordringen om bord på skibe ligger i de pladsmæssige og økonomiske forhold, når en installation skal eftermonteres. I dette projekt har der desuden været flere fordyrende faktorer, fx at installationen skulle foretages i færgens oplægger perioder om natten for ikke at forstyrre den daglige drift.

Det vurderes, at en maritim kombinationsløsning kan monteres på andre skibe, men det enkelte tilfælde skal vurderes i forhold til plads, stabilitet og lasteevne. Ligeledes skal strategien for regenerering vurderes i de enkelte tilfælde, da man ikke kan være sikker på, at ethvert andet skib, har tilstrækkelig elektrisk kapacitet til regenereringen. Det vurderes på baggrund af dette, at en generel, universel anvendelig metode ikke kan fremsættes for maritime kombinationsløsninger. Det vurderes endvidere, at der er en øvre grænse på 5-10 MW effekt på størrelsen af motoren. Derover vil et filtersystem bliver for stort og for dyrt til i praksis at kunne monteres. Dog kan der være undtagelser til dette afhængigt af motorens øvrige egenskaber.

Opgradering til elektrisk styrede røggasspjæld med overvågningssystem har været en dyr løsning, men den har forbedret brugervenligheden for besætningen og dermed anlæggets effektivitet. Hvis anlægget ikke bliver startet via automatikken, kan det nemt idriftsættes manuelt. Regenereringen igangsættes efter dagens sidste tur, imens den generelle nedlukning af skibet foretages og koster derfor ikke ekstra mandstimer. Manuel rensning af restasken i filterkernerne har vist sig problematisk. På grund af for høj temperatur i filterkassen, er det ikke muligt at åbne inspektionslugerne



Figur 22: Havnemanøvre med indkoblet partikelfilter i bagbord side (t. venstre). Der ses en tydelig røgfane fra skorstenen i styrbordsside hvor der ikke er monteret kombinationsløsning.

og gennemblæse filterkernerne. Et automatisk tryklufsbaseret filterrensningssystem er derfor nødvendigt for at kunne gennemblæse filterne.

Den beregnede effektivitet for filteret er 99% partikelreduktion. I anden målerunde lå den realiserede partikelreduktion på 89-93 % for systemet mens den i tredje målerunde lå på 80-85%. Forskellen findes igen med stor sandsynlighed i utætte røggasspjæld i bypass-systemet. For at verificere dette blev der i tredje målerunde foretaget målinger direkte i filterkassen. Målingerne viste at effektiviteten af filterne alene er på 96-97%. Det er ikke blevet undersøgt, om det er muligt at justere spjældene, eller om dette kræver en anden og bedre type røggasspjæld.

Resultaterne fra tredje målerunde viste at det NO_x reducerende system i kombinationsløsningen har en virkningsgrad på mindst 40% om formiddagen, mens det i løbet af eftermiddagen falder til ca. 19%. Dette skyldes formentlig at den katalytiske overflade i partikelfiltret soder til og i løbet af dagen. Omvendt må det således antages at virkningsgraden af systemet er væsentlig højere om morgenen på skibets første tur, da filteret på dette tidspunkt er nyligt regenereret. Kombinationsløsningens virkningsgrad kunne antageligvis forbedres med hyppigere regenerering.

Sammenlignes røgfane visuelt fra færgens to skorstene ses det, når filtret er indkoblet, en tydelig forskel på de to hovedmotorers røgdudvikling. Dog skal det tilføjes, at røgdudvikling normalt kun ses under havnemanøvre.

5.10 Projekt erfaringer

Under projektets gennemførelse har der således været en del udfordringer, der skulle håndteres undervejs og der er herunder gengivet en oversigt over de problemstillinger der er behandlet.

Problemstilling	Case	Løsning
Krav fra motorleverandør om lavt røggas modtryk	Røggasmodtrykket foran turboen må ikke overstige 3 kPa kontinuerlig eller 5 kPa i spidsbelastning.	Fordobling af antallet af filterelementer for at sikre et lavt røggas modtryk under alle forhold. Montering af alarm for højt røggas modtryk.
Lav røggas temperatur	Røggas temperaturen på max. 350 °C, var ikke tilstrækkelig høj til at filterne kunne regenerere.	Der blev monteret elektriske varmelegemer der kan regenerere filterne når hovedmotoren går tomgang.
Pladsforhold	Da filterstørrelsen blev forøget kunne enheden ikke være i maskinrummet som planlagt.	Filterenheden blev flyttet op i bagbord skorstencasing. Fordyrende tiltag.
Driftsforhold	Færgen kunne ikke tages ud af drift.	Mange ombygninger skulle foretages med færgen i havn, men færgen var i almindelig drift, hvilket bevirkede at flere ombygninger blev udført om natten. Dette fordyrede projektet væsentligt.
Røggasmodtrykket steg hurtigt efter regenerering	Det var pga. høj temperatur ikke muligt at manuelt rense og askeblæse filterkernerne igennem renselømmene efter regenerering.	Der blev konstrueret et rensningssystem så sodblæsningen kunne foretages med trykluft udefra.
Betjening af anlæg	Partikelfilteret blev flyttet fra maskinrummet til skorstencasingen	Der blev monteret elektrisk styrede røggasventiler samt styretavle for nemmere betjening. Dette var en fordyrende foranstaltning, men en væsentlig opgradering af projektet.
Installationer	Høje temperaturer ved regenerering krævede specielle varrefastekabler og gennemføringer	Installationerne blev udført i henhold til gælden lovgivning for skibe.
Vægt og stabilitet	Partikelfilteret blev flyttet op i skorstencasingen. Det blev afværftet konstrueret i skibskonstruktionsstål.	Det bør fremover tilstræbes at minimere vægten af filterkassen for at reducere anlæggets totalvægt, så skibet ikke får slagside.

5.11 Referencer

- [1] J. a. Corbett, »Mortality from ship emissions: A global assessment,« Environ Sci Technol, 2007.
- [2] D. e. a. Dockery, »An association between air pollution and mortality in six U.S. cities,« N Engl J Med, 1993.
- [3] T. Ellermann, J. Brandt, O. Hertel, S. Loft, Z. J. Andersen, O. Raaschou-Nielsen, J. Bønløkke og T. Sigsgaard, »Luftforureningens indvirkning på sundheden i Danmark,« Aarhus Universitet, 2014.
- [4] Y. e. a. Gonzalez, »Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions,« Atmospheric Environment, 2011.
- [5] H. R. Olesen, M. Winther, T. Ellermann, J. Christensen og M. Plejdrup, »Ship emissions and air pollution in Denmark,« Miljøministeriet, Aarhus, 2009.

5.12 Links

Miljøstyrelsens hjemmeside om Ecoinnovation:

www.ecoinnovation.dk

Danmarks Rederiforenings hjemmeside:

www.shipowners.dk

Dinex A/S hjemmeside

<http://www.dinex.dk>

Ærøfærgens hjemmeside:

www.aeroe-ferry.dk

Teknologisk Instituts hjemmeside:

www.teknologisk.dk

Udvikling af emissionsreducerende kombinationsløsninger til skibe

Et komplet system med kombineret partikelfilter og NO_x katalysator blev udviklet og monteret på en af hovedmotorerne på færgerne M/F Ærøskøbing. Målet var at undersøge mulighederne for reduktion af partikel- og NO_x udledninger fra marinemotorer, der kører på svovlholdig marine diesel olie. (max. 0,1 % svovl)

Projektet blev gennemført med tilskud fra Miljøstyrelsen under handlingsplanen "Miljøeffektiv teknologi". Forsøget viste, at det er teknisk muligt at rense røggassen for sundhedsskadelige dieselpartikler og begrænse udledning af NO_x selv ved anvendelse af marine diesel olie.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk