



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Udvikling af partikelfiltre til skibe

Miljøprojekt nr. 1457, 2013

Titel:

Udvikling af partikelfiltre til skibe

Redaktion:

Ole Jakobsen
Jesper Norre Holm
Morten Køcks
Teknologisk Institut

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Teknologisk Institut
Ærøfærgerne

Illustration:

Teknologisk Institut

År:

2013

Kort:

Teknologisk Institut

ISBN nr.

978-87-92903-79-2

Ansvarsfraskrivelse:

Miljøstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Miljøstyrelsens undersøgelsesbevilling. 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

Forord	4
Sammenfatning og konklusion	5
Summary and Conclusion	10
1. Projektindhold	14
1.1 Karakterisering af partikelemission fra en typisk dansk indlandsfærge	14
1.2 Udvikling af partikelfiltret	16
1.3 Montering af partikelfiltret.....	17
1.4 Dokumentation af effekten af det udviklede filter.....	18
1.5 Partikelmåling: metode og resultater	19
1.6 Emissionsmålinger	24
1.7 Konklusion	24
1.8 Projekt erfaringer.....	25
1.9 Links	26
Referencer	27

Forord

I forbindelse med Miljøstyrelsens opslag på "ecoinnovation.dk" under temaet "Miljøeffektiv teknologi" blev der i 2009 givet tilsagn til projektet "Udvikling af partikelfiltre til skibe". 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 6. november 2012, og denne rapport er den endelige projektrapport.

Ole Jakobsen, Teknologisk Institut
Århus d. 6. november 2012

Sammenfatning og konklusion

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 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. Selvom partikelforureningen 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, hvilket er blevet vist i et studie fra Santa Cruz, Spanien³. Mange tiltag er foretaget for at begrænse emissionerne fra landtransport, hvilket ikke i samme omfang gør sig gældende for skibstrafikken.

Til skibe eksisterer der i dag kommercielt tilgængelige systemer til opsamling af svovlforbindelser og nitrogenoxider (NO_x), fx baseret på Selective Catalytic Reduction (SCR). Disse systemer er optimeret til fjernelse af gasemissioner men er ikke designet til at reducere partikelemissioner. Der er således behov for udvikling af filterteknologi til fjernelse af partikelemissioner, som kan kombineres med de nævnte teknologier til fjernelse af svovlforbindelser og NO_x.

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 Cordiorit-baserede Wall Flow-filtre, kan fjerne mere end 90 % af antallet af partikler fra køretøjers emission. Det er derfor oplagt at overføre denne teknologi til fjernelse af partikler fra skibe.

Der er dog nogle forskelle på motorer og brændstof til henholdsvis skibe og køretøjer, som giver anledning til udfordringer. Filtrene skal fungere under helt andre betingelser end dem, der er til stede i køretøjer – vigtige parametre vil være forhøjede SO₂-niveauer, pladsforhold, motortekniske parametre, vedligehold/rensning samt filtrets løbende regenerering (afbrænding af partikler fra filtrene).

Projektforløb

Hovedfokus i projektet har været rettet mod at generere ny, industrielt anvendelig viden i forhold til begrænsning af partikelemission fra skibe ud fra den nyeste forskning.

Projektet har været opdelt i en række delprojekter (arbejdspakker) af både parallel og seriel karakter, der alle er fokuseret på at opnå et mål, som er et effektivt og driftssikkert partikelfilter 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
2. Udvikling af partikelfiltre
3. Montering og afprøvning af partikelfiltre på danske indlandsfærger i drift
4. Dokumentation af effekten af de udviklede filtre.

Hovedkonklusioner

Projektet har resulteret i en løsning med et velfungerende maritimt partikelfilter, der reducerer partikeludledningen markant. Den synlige røgdudvikling, specielt set ved havnemanøvre, reduceres ligeledes til et minimum.

Systemet er opbygget således, at udstødningsrøggasserne kan bypasses uden om filterenheden, i dette forsøg for at sikre motordriften i det tilfælde, at filterelementerne tilstopper, og turboladerens modtryk derved bliver for højt. Der er blevet indbygget sikkerhedsfunktioner i systemet mod for højt røggasmodtryk samt automatik til regulering af de motorstyrede røggasventiler.

En af de store udfordringer der har været i projektet, har dels været et krav fra motorfabrikanten om lavt turboladermodtryk, dels de pladsmæssige forhold om bord på testfartøjet (M/F Ærøskøbing) og dels at opnå tilstrækkelig temperatur til regenerering af partikelfilterelementerne.

For at imødegå kravet om lavt røggasmodtryk blev der designet en filterkasse med plads til dobbelt så mange filterkerner som oprindeligt planlagt. I skorstencasingen blev de oprindelige installationer ændret, så filterkassen kunne være der, og systemet blev udbygget med elektrisk styrede røggasventiler for at forbedre den daglige drift for besætningen. Regenereringen blev løst ved at montere elektriske varmelegemer i filterkassen, som styres pr. automatik, og et askeudsugningssystem. Regenerering foretages af besætningen, når fartøjet ligger til kaj om aftenen efter dagens sidste tur.

Før montering af partikelfiltret blev der om bord på færgen foretaget målinger, som viste en sammensætning af partikelemissioner med et forventet relativt højt NO_x-niveau på 8,33 g/kWh, mens de øvrige emissioner lå lavere end umiddelbart forventet. Specielt HC og CO lå meget lavt, men også PM lå forholdsvist lavt med 0,22 g/kWh.

Efter idriftsættelse af partikelfiltret ses en markant reduktion af partikelmassen (PM) på 93 %. Det var forventet med en PM-reduktion på op til 99 %, og forskellen findes i utætte røggasventiler i bypass-systemet. Det er ikke undersøgt, om utætheden kan fjernes ved justering af ventilerne, eller om der skal en anden type ventil på.

Ud over den miljømæssige gevinst vil montering af et partikelfilter også give en reduktion af sodpartikler, både i havneområderne og på færgens dæk (soldæk/vogndæk), hvilket vil reducere behovet for rengøring af dette område og mindske eventuel tilsmudsning af passagerer og køretøjer. Partikelfiltret vil også kunne benyttes af færgeselskabet i deres markedsføring som et miljømæssigt tiltag.

Udviklingen og designet af partikelfiltret ændrede sig undervejs i projektet, dels på grund af krav fra motorfabrikanten om et lavt røggasmodtryk og dels på grund af de pladsmæssige udfordringer om bord på testfartøjet. Pladsforholdene om bord på testfartøjet afviger ikke i nævneværdig grad fra andre fartøjer.

Retrofitting af et partikelfilter i en færgе under drift viste sig at være omkostningstungt, da arbejdet skulle udføres i færgens oplæggerperiode om natten. Meget af det forberedende arbejde var foretaget i dagperioderne, men installationen af enheden i røggasset systemet skulle fortages med nedlukket hovedmotor. Det blev af producenten (Dinex A/S) vedtaget at opgradere det oprindeligt tænkte design med et styringssystem med elektrisk styrede røggasventiler, hvilket forbedrede anlæggets brugbarhed markant.

Filterkassen er udført med et askeudsugningsanlæg, der opsamler asken efter regenerering og renselemme i filterkassen til rensning af filterkernerne. Det har dog vist sig ikke at være

tilstrækkelig til at holde filterelementerne rene med den elektriske regenerering alene, og det er nødvendigt at benytte renselømmene og gennemblæse filterkernerne med trykluft. Det har dog efterfølgende vist sig, at det er nødvendigt at konstruere et udvendigt trykluftbaseret rensesystem til at gennemblæse filterkernerne, da den isolerede filterkasse holder på varmen længe efter regenerering, og færgen ikke har tid nok i havn, til at den kan nå at afkøle i tilstrækkelig grad, så der kan arbejdes forsvarligt med rensning af filterkernerne.

Partikelfiltret har af pladshensyn måttet placeres i skorstencasingen. Det oprindelige design var udlagt til at kunne placeres i maskinrummet eller i umiddelbar forbindelse dermed, hvor vægtfordelingen ville være bedre, men det viste sig ikke pladsmæssigt muligt. Konstruktionen af filterkassen blev udført i almindeligt skibskonstruktionsstål og har vist sig at være en tung løsning, og det vurderes, at mindre materialetykkelse og/eller andre materialetyper bør benyttes fremover for at formindske vægtbelastningen på fartøjet.

Skibsdata:

Bruttoregister 1617 tons, nettoregister 495 tons

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

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

Overfartstid: 75 minutter, maks. hastighed 12 knob

Hovedmaskineri: 2 stk. MaK M20C

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

IMO-nummer: 9199086

Færgen M/F Ærøskøbing blev indsat i ruten Svendborg – Ærøskøbing den 1. november 1999.



Figur 1: M/F Ærøskøbing efter kunstmaling

Summary and Conclusion

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, Spain³. A lot of initiatives have been made to limit the emissions from land-based transportation, which does not apply for those of the shipping traffic.

Today there exist commercially available systems for ships for accumulation of sulphur compounds and nitrogen oxides (NO_x), e.g. based on Selective Catalytic Reduction (SCR). These systems are optimized for removal of exhaust emissions but not designed to reduce particle emissions. Thus, there is a need for developing filter technologies for removal of particle emissions which can be combined with the mentioned technologies for removal of sulphur compounds and NO_x.

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 Cordiorit-based Wall Flow filters, can remove more than 90% of the number of particles from vehicles' emission. Therefore it is obvious to transfer this technology to remove the particles from ships.

However, there are some differences in the engine design and the fuels for respectively ships and vehicles which give rise for 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).

Purpose of the project

The main focus of this project has been directed to the achievement of new industrially applicable knowledge about limitation of particle emission from ships based on the most recent research.

The project has been divided into a series of sub-projects (work packages) of both parallel and serial character, which all are focusing on obtaining a goal, which is an effective and reliable particle filter 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
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.

Main Conclusions

The project has resulted in a solution with a well-functioning maritime particle filter which reduces the particle emission significantly. The visible smoke from the vessels funnel, which typically is seen while manoeuvring in the harbour, is also reduced to a minimum.

The system is constructed in such a way that the exhaust gases can be bypassed around the filter unit, in this situation to ensure the engines operation in case of filter clogging. The system has been provided with safety functions to prevent an excessive exhaust gas back-pressure and there are fitted remote controlled exhaust valves.

Some of the challenges in the project have been the requirement from the engine manufacturer of keeping a low turbocharger back-pressure, besides the space conditions aboard the test vessel (M/F Ærøskøbing) and the achievement of sufficient temperatures for regeneration of the particle filter.

To oppose the requirement of low exhaust gas back-pressure, the filter housing was designed with space for twice as many monoliths as originally planned. In the funnel casing the original installations were removed to make space for the filter housing, and the system was enlarged with electrically controlled exhaust valves to improve the daily operation of the crew. The regeneration issue was solved by mounting electric automatically controlled heating elements in the filter housing and by an ash exhaust system. Regeneration is carried out by the crew when the vessel lies in harbour in the evening after the last tour of the day.

Before mounting the particle filter, measurements were carried out aboard, showing a compound of particle emissions with an expected high NO_x-level of 8.33 g/kW, whereas the other emissions were lower than expected at first. Especially HC and CO were very low, but also the particle mass (PM) had a relatively low value of 0.22 g/kWh.

After commissioning the particle filter, a significant reduction of 93% of the particle number (N) was observed. A reduction in N was expected to make up to 99%, and the difference can be found in the leaky exhaust valves in the bypass system. It has not been subject to examination whether the leak can be removed by adjusting the valves, or whether another type of valve should be provided.

Besides the environmental advantages, mounting of a particle filter will also result in a reduction of soot particles, both in the harbour areas and on the ferry's deck (sun deck/car deck), which will reduce the needs for cleaning in those areas and decrease possible soiling of the passengers and vehicles. The particle filter may also be useful to the ferry company in their marketing as an environmental initiative.

The development and design of the particle filter changed during the project, partly due to requirements from the engine manufacturer of a low exhaust gas back-pressure and partly due to the space challenges aboard the test vessel. The space conditions aboard the test vessel do not differ noticeable from other vessels.

Retrofitting of a particle filter in a ferry during operation proved to be cost-intensive, since the work had to be done in the ferry's docking at night. Much of the preparing work was carried out in the daytime, whereas the installation of the unit in the exhaust gas system should be carried out with the main engine shut down. The particle filter manufacturer (Dinex A/S) decided to upgrade the originally planned design with a control system with electrically controlled exhaust valves, which essentially improved the system's usefulness.

The filter housing is provided with an ash exhaust system which collects the ash after regeneration and clean-out doors in the filter casing for cleaning of the monoliths. However, it has proved not to

be sufficient to keep the filter units clean just with the electrical regeneration, and it is necessary to use the clean-out doors and blow out the monoliths with compressed air. Subsequently, it was found to be necessary to construct an outer cleaning system based on compressed air for blowing out the monoliths, since the insulated filter housing keeps the heat for a long time after regeneration, and the ferry does not have enough time in the harbour to cool sufficiently, so the cleaning of the monoliths can be done safely.

Due to considerations about the space it was necessary to place the particle filter in the funnel casing. 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, but this was not possible due to the space conditions. The construction of the filter housing was made of common ship constructional steel which proved to be a heavy solution, for which reason smaller material thickness and/or other material types should be applied in the future to reduce the weight load on the vessel.

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 initiated its ferry ride Svendborg-Ærøskøbing the 1st of November 1999.



Figure 2: M/F Ærøskøbing ferry after artistic painting

1. Projektindhold

I de følgende afsnit følger en detaljeret beskrivelse af projektet.

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 desuden vist, at indånding af kemiske stoffer på nanopartikelform kan være signifikant mere sundhedsskadeligt end indånding af den samme stofmængde som større partikler.

En væsentlig del af de nanopartikler der findes i luften i kystnære områder, stammer fra kystnær skibstrafik. Selvom partikelforureningen 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, hvilket er vist i et studie fra Santa Cruz, Spanien³. Mange tiltag er foretaget for at begrænse emissionerne fra landtransport, hvilket ikke i samme omfang gør sig gældende for skibstrafikken.

Til skibe eksisterer der i dag kommercielt tilgængelige systemer til opsamling af svovlforbindelser og nitrogenoxider (NO_x), fx baseret på Selective Catalytic Reduction (SCR). Disse systemer er optimeret til fjernelse af gasemissioner men er ikke designet til at reducere partikelemissioner. Der er således behov for udvikling af filterteknologi til fjernelse af partikelemissioner, som kan kombineres med de nævnte teknologier til fjernelse af svovlforbindelser og NO_x.

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 Cordiorit-baserede Wall Flow- filtre, kan fjerne mere end 99 % af antallet af partikler fra køretøjers emission. Det er derfor oplagt at overføre denne teknologi til fjernelse af partikler fra skibe.

Der er dog nogle forskelle på motorer og brændstof til henholdsvis skibe og køretøjer, som giver anledning til udfordringer. Filtrene skal fungere under helt andre betingelser end dem, der er til stede i køretøjer – vigtige parametre vil være forhøjede SO₂- niveauer, pladsforhold, motortekniske parametre, vedligehold/rensning samt filtrets løbende regenerering (afbrænding af partikler fra filtrene).

1.1 Karakterisering af partikelemission fra en typisk dansk indlandsfærge

Der blev i starten af projektet gennemført en målerunde for at fastlægge emissionerne fra færgen og for at have tilstrækkelig data til at designe et partikelfilter til den udvalgte færge. I samme periode

¹ Dockery, D.W., et al., *An association between air pollution and mortality in six U.S. cities*. N Engl J Med, 1993. 329(24): p. 1753-9

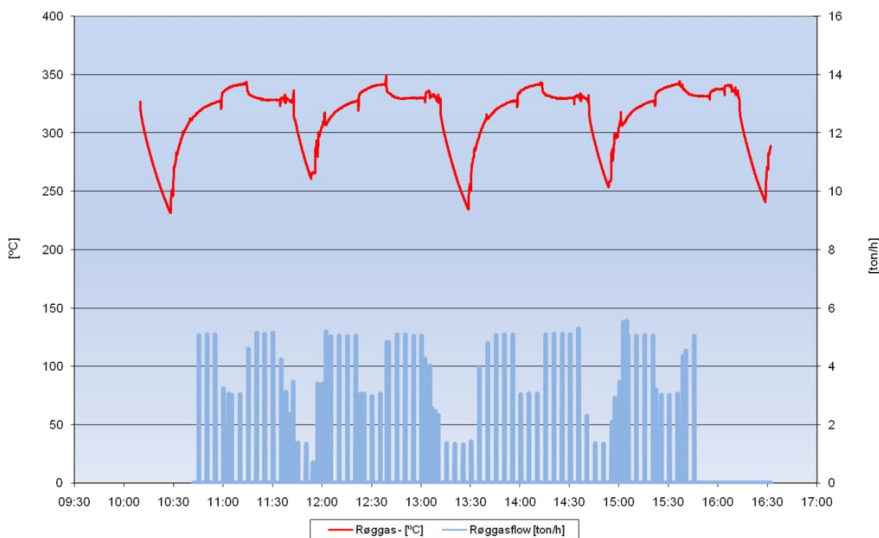
² Corbett, J.J., et al., *Mortality from ship emissions: a global assessment*. Environ Sci Technol, 2007. 41(24): p. 8512-8

³ Gonzalez, Y., et al., *Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions*. Atmospheric Environment, 2011. 45(28): p. 4907-4914.

blev der foretaget opmåling og analyse af forholdene på færgen. Filterenheden er blevet udviklet af filterproducenten Dinex A/S i tæt samarbejde med Ærøfærgernes tekniske chef.

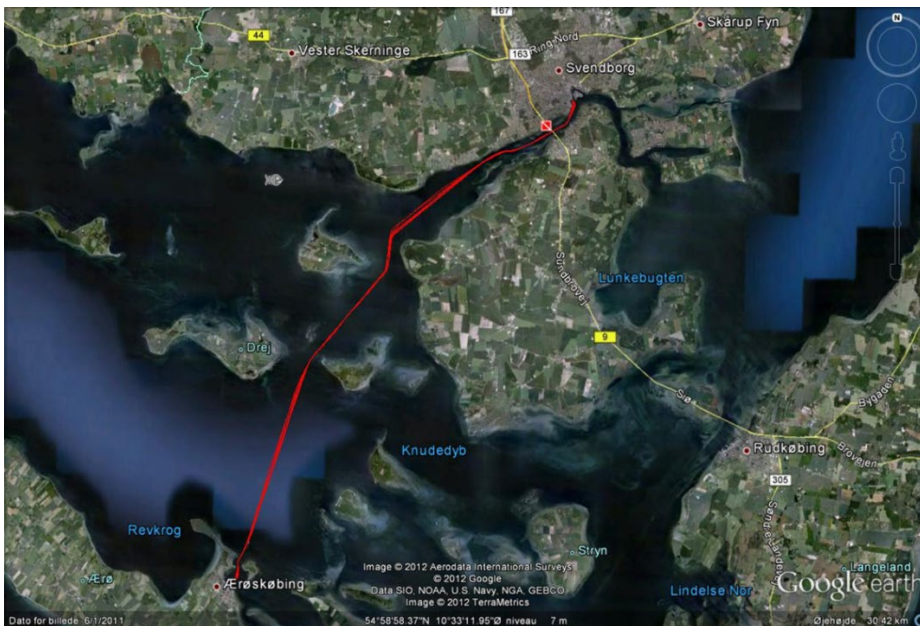
Den valgte færge M/F Ærøskøbing er udstyret med to hovedmotorer af mærket MaK M 20 C, som er en 4-takts-dieselmotor, 6-cylindret rækemotor, hver med en ydelse på 1020 kW. Motorerne er med konstant omdrejningstal på ca. 900 o/min.

For at kunne beregne partikelfiltrets dimensioner blev der gennemført en målerunde for at belyse den udvalgte færges driftsforhold. Her viste målingerne en sammensætning af partikelemissionerne med et forventet relativt højt NO_x-niveau på 8,33 g/kWh, mens de øvrige emissioner lå lavere end umiddelbart forventet. Specielt HC og CO lå meget lavt, men også PM lå forholdsvist lavt med 0,22 g/kWh. (Figur 6)



Figur 3: Færgens driftsprofil

Færgens driftsmønster i normal rutesejlads blev målt, herunder blev røggastemperatur og røggasflow kortlagt for at danne grundlag for den videre dimensionering af partikelfiltret.



Figur 4: Færgens sejlroute

Målemetode for emissionsmålinger er i henhold til ISO 8178; der blev udtaget brændstof- og smøreolieprøver, som blev analyseret. Hovedmotorens målte NOx-udledning ligger under kravene for en Tier II-motor.

Parameter	Enhed	Målt	Tier I	Tier II	Tier III
NOx	g/kWh	8,33	11,59	9,25	2,32
NO2	g/kWh	0,99	-	-	-
HC	g/kWh	0,23	-	-	-
CO	g/kWh	0,62	-	-	-
PM	g/kWh	0,22	-	-	-
SO4	g/kWh	0,01	-	-	-
Spec. Br.	g/kWh	195	-	-	-

Figur 5: Emissionsmålinger uden partikelfilter

Parameter	Driftspunkt	100,1	100,2	85,1	85,2	85,3	85,4	50,1	50,2	0,1	0,2
NO2	g/s	0,30	0,28	0,23	0,25	0,23	0,23	0,13	0,11	0,01	0,01
NOx	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
CO2	g/s	171	171	145	145	145	145	89	89	11	11
PM	mg/s	57	54	51	50	46	46	40	33	22	22
SO4	mg/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	320	321	314	230-330	230-330

Figur 6: Emissionsmålinger uden partikelfilter

1.2 Udvikling af partikelfiltret

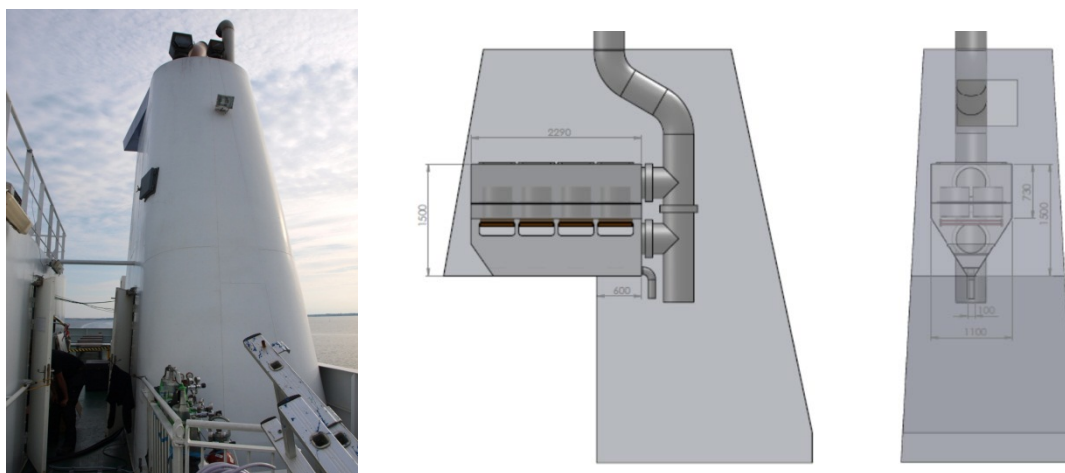
Resultatet af målerunden viste, at det oprindeligt tænkte design ikke ville være tilstrækkeligt til at imødekomme kravet fra motorfabrikanten om et maksimalt kontinuerligt røggasmodtryk i turboladeren på 3 kPa (peak på 5 kPa).

Udstødningstemperaturen ligger i området 300-350 °C, hvilket ikke er tilstrækkeligt til regenerering af filterkernerne, hvorfor der blev valgt en løsning med elektrisk regenerering efter dagens 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 effekt til at kompensere for den "kolde" røggas.

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.

Filterkernerne bliver 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 askerensningssystemet ikke er tilstrækkeligt til at fjerne restasken. Der sker derfor en hurtigere ophobning af sodpartikler i filterelementerne med efterfølgende forhøjet røggasmodtryk.

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



Figur 7: Skorstenscasing og installationsoversigt

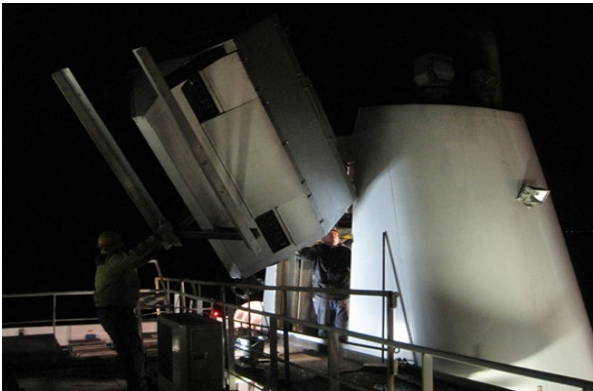
1.3 Montering af partikelfiltret

Systemet blev opbygget, således at udstødningsrøggasserne kan bypasses uden om filterenheden, i dette forsøg for at sikre motordriften i det tilfælde at filterelementerne tilstopper, og turboladerens modtryk derved bliver for højt. Der blev indbygget sikkerhedsfunktioner i systemet mod for højt røggasmodtryk og automatik til regulering af de motorstyrede røggasventiler.

Ombygning af skorstenscasingen var nødvendig for at få plads til både filterkasse, styretavle samt røggasventilerne, og meget af arbejdet måtte udføres i færgens overliggertid om natten for ikke at forstyrre færgens sejlplan.



Figur 7: Filterkassen under konstruktion



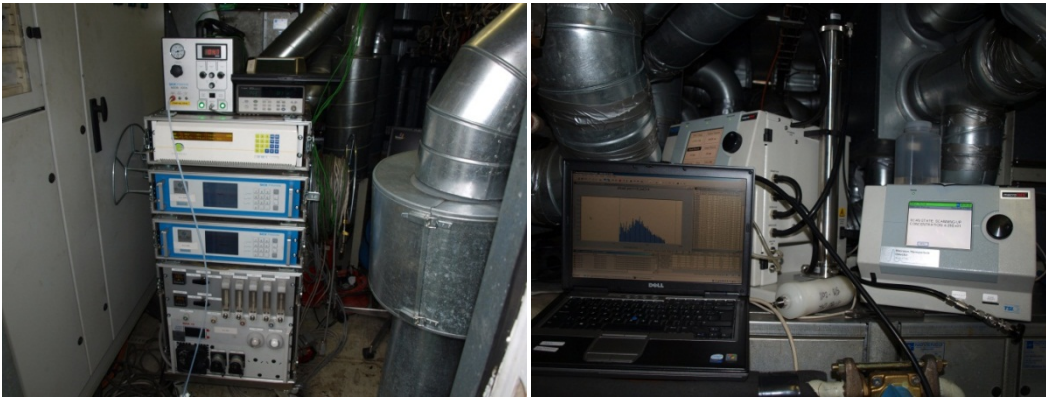
Figur 8: Montering af filterkassen



Figur 9: Automatisk røggasventil og styretavle

1.4 Dokumentation af effekten af det udviklede filter

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



Figur 10: Måleopstilling ombord på færgen

Der blev som i første målerunde udtaget både brændstof- og smørelieprøver, som blev analyseret. Her ses en sammenligning af analysen fra anden og første målerunde.

Fuelsample				11-02-2010	
Parameter	Method	Result	Unit	Result	Unit
Density (15 °C)	DIN EN ISO 12185	856,7	Kg/m ³	856	Kg/m ³
Ash content	DIN EN ISO 6245	<0,005	% (m/m)	<0,006	% (m/m)
Sulfur	DIN EN ISO 20884	239	mg/kg	262	mg/kg
Water content	DIN EN ISO 12937	36	mg/kg	18	mg/kg
Lube Oil sample				11-02-2010	
Density (15 °C)	DIN EN ISO 12185	898,4	Kg/m ³	891,5	Kg/m ³
Ash content	DIN EN ISO 6245	1,07	% (m/m)	1,05	% (m/m)
Sulfur	DIN EN ISO 20884	4911	mg/kg	2193	mg/kg
Water content	DIN EN ISO 12937	411	mg/kg	19	mg/kg

Figur 11: Brændstof- og smørelieanalyse

Svovlindholdet i brændstoffet ligger med 239 ppm langt under den maksimale grænseværdi for SECA-områder på 10.000 ppm (2015, maks. 1000 ppm). Der ses i smørelien et højere vandindhold i anden målerunde, hvilket skyldtes en tidligere defekt smøreliekøler.

1.5 Partikelmåling: metode og resultater

Antalskoncentration og størrelsesfordeling af de frigivne partikler er 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 Inc. SMPS'en var monteret med en Differential Mobility Analyzer (DMA), model 308100, også fra TSI Inc. Der blev testet ved et sample flow på 0,3 L/min.

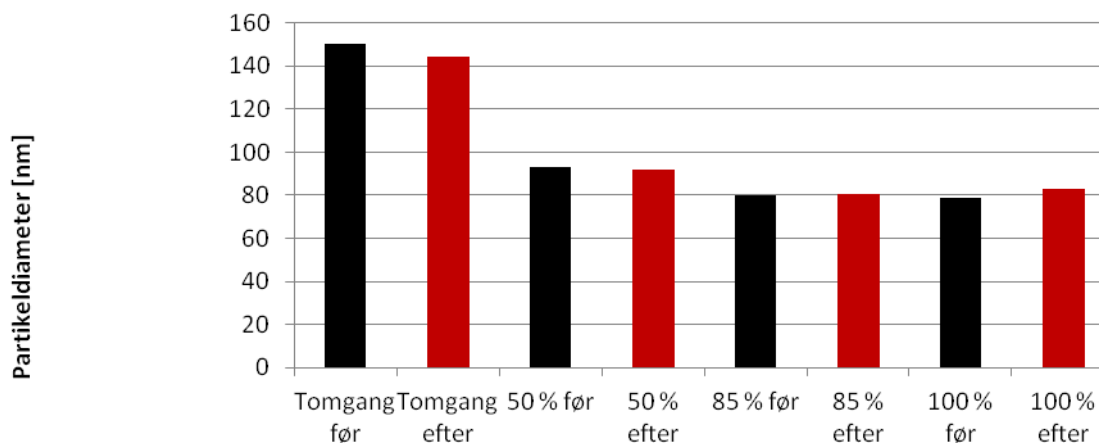
En Rotating Disc Diluter (fortynderudstyr), model MD 19-2E, fra Matter Engineering blev brugt til at fortynde partikelstrømmen til ca. faktor 15. Herefter passerede partikelstrømmen en Thermal Conditioner (ASET15-1) opvarmet til 300 °C og med ca. fire gange yderligere fortynding. Denne enhed fjerner flygtige partikler inden måling med SMPS. Alle viste data er optaget ved brug af long-DMA og ved et sample flow på 0,3 l/min., hvilket tillod sampling i størrelsesintervallet 14–673 nm. Scantiden var 2½ minut.

I tabel 1 nedenfor er angivet middelpartikelkoncentration og -diameter for de forskellige motorbelastninger under de udvalgte fokusperioder. Desuden er filtrets effektivitet udregnet over for nanopartikler i intervallet 14–673 nm. Alle data er fra 22-8 2012.

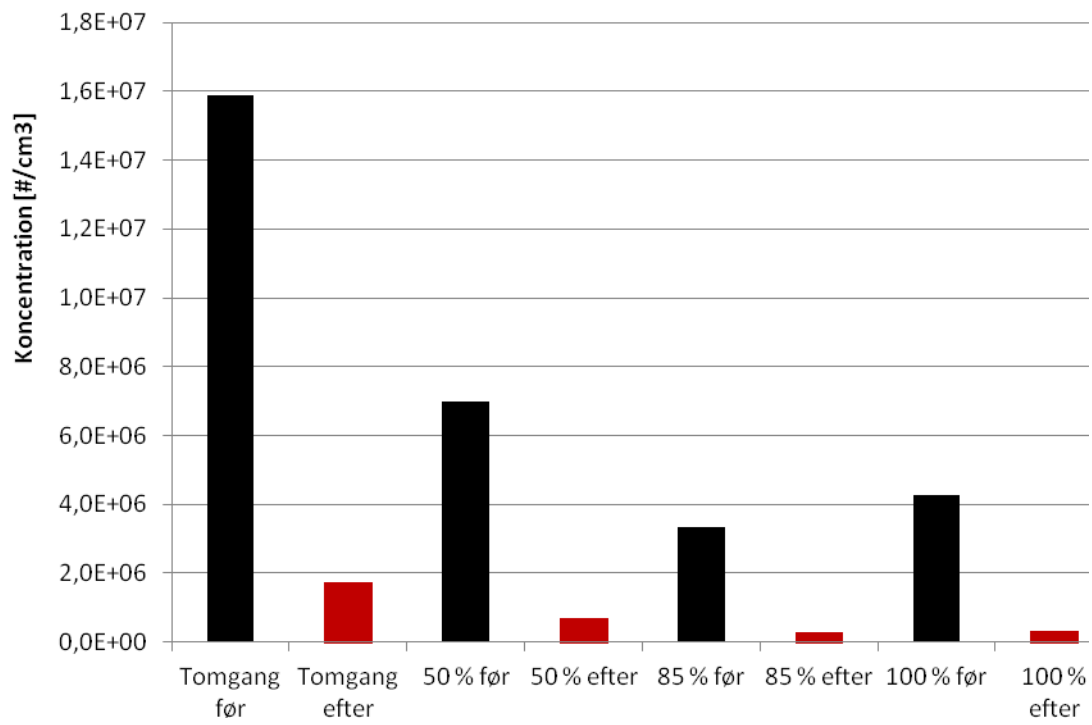
Motorlast	filter	Tidsrum	Antal spektre, midling	Partikelstørrelse [nm]	Partikelkoncentration [# /cm ³]	Effektivitet [%]
Tomgang	Før	16:01-16:11	4	150±1	1,59±0,04 x10 ⁷	
	Efter	14:34-14:44	4	144±1	1,73±0,05 x10 ⁶	89
50 %	Før	16:50-16:58	3	93±4	6,99±0,29 x10 ⁶	
	Efter	13:54-14:06	5	88±4	4,94±0,35 x10 ⁵	93
85 %	Før	16:27-16:41	6	80±2	3,33±0,05 x10 ⁶	
	Efter	14:58-15:13	6	80±4	2,75±0,15 x10 ⁵	92
100 %	Før	9:29-9:36	3	79±1	4,27±0,09 x10 ⁶	
	Efter	12:36-12:46	4	83±2	3,19±0,13 x10 ⁵	93

Figur 12: Udvalgte SMPS-spektre for før/efter filter

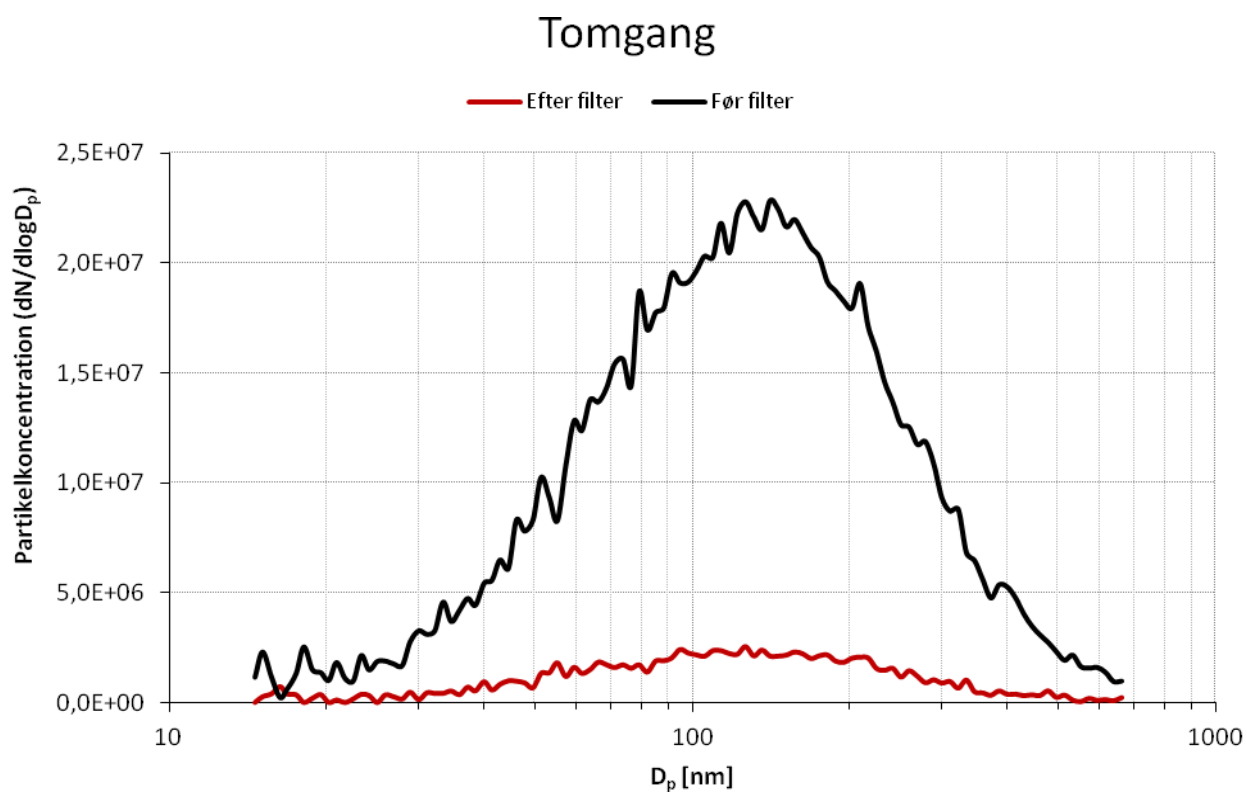
I Figur 13 er desuden angivet standardafvigelse beregnet ud fra det antal spektre, der er midlet over (3-6).



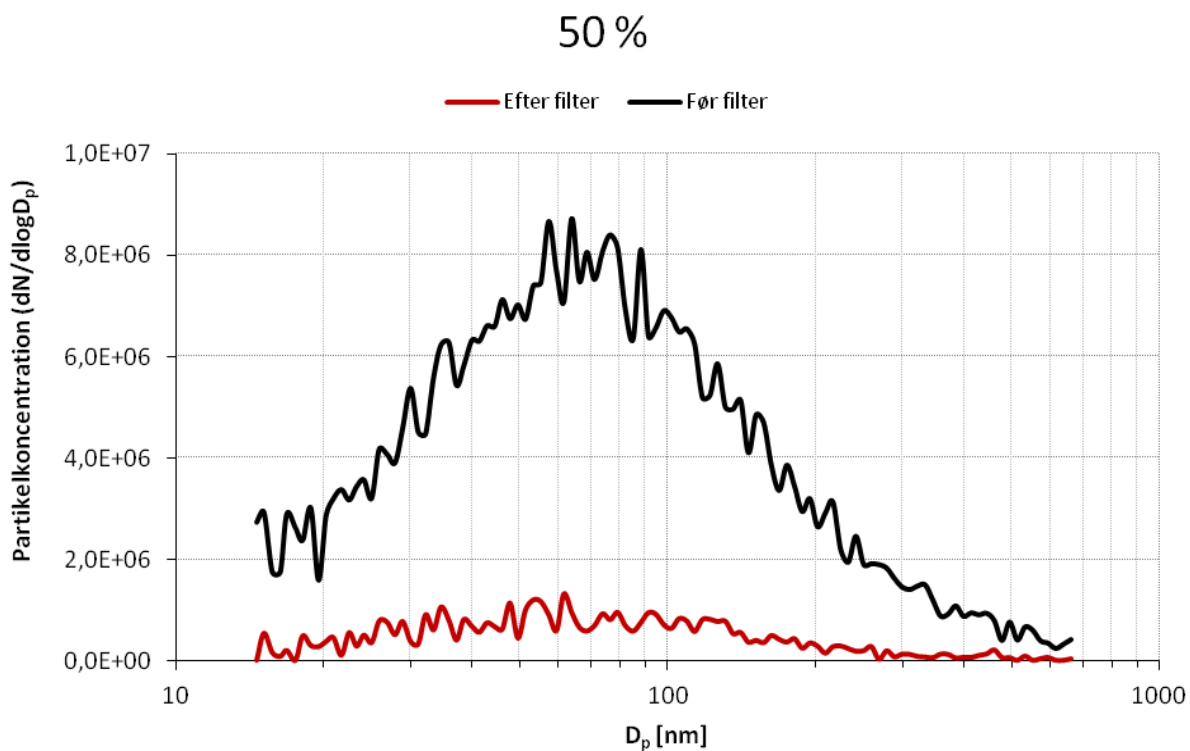
Figur 13: Partikelstørrelse i lastområderne



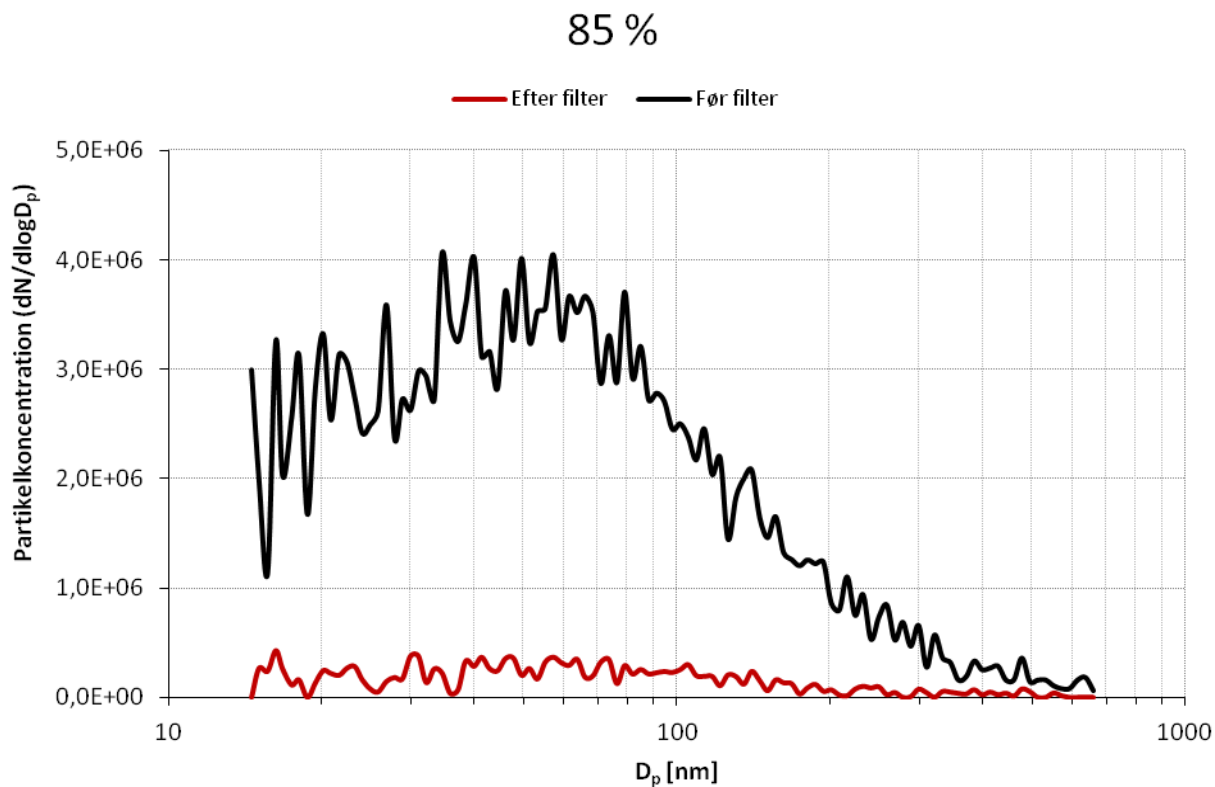
Figur 14: Partikel koncentration



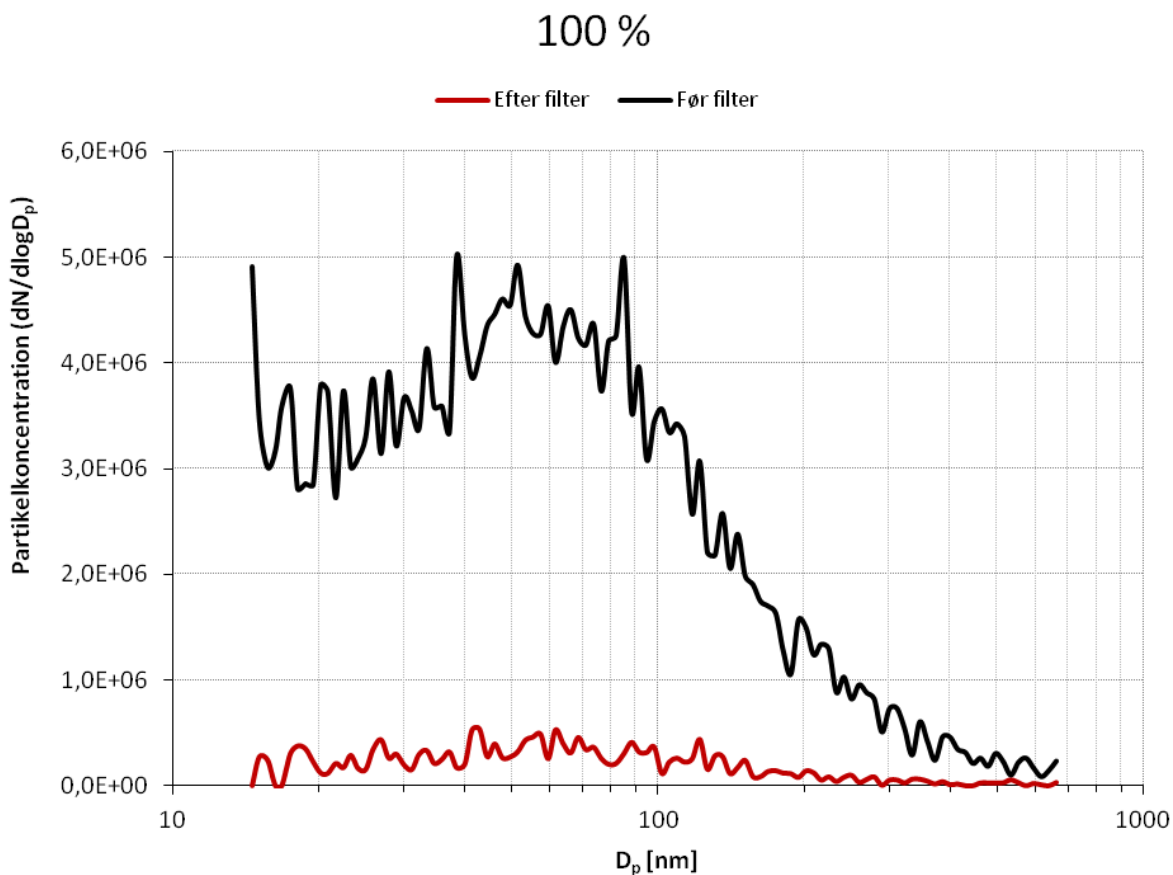
Figur 15: Partikkelkoncentration i tomgang



Figur 16: Partikkelkoncentration ved 50 % motorbelastning



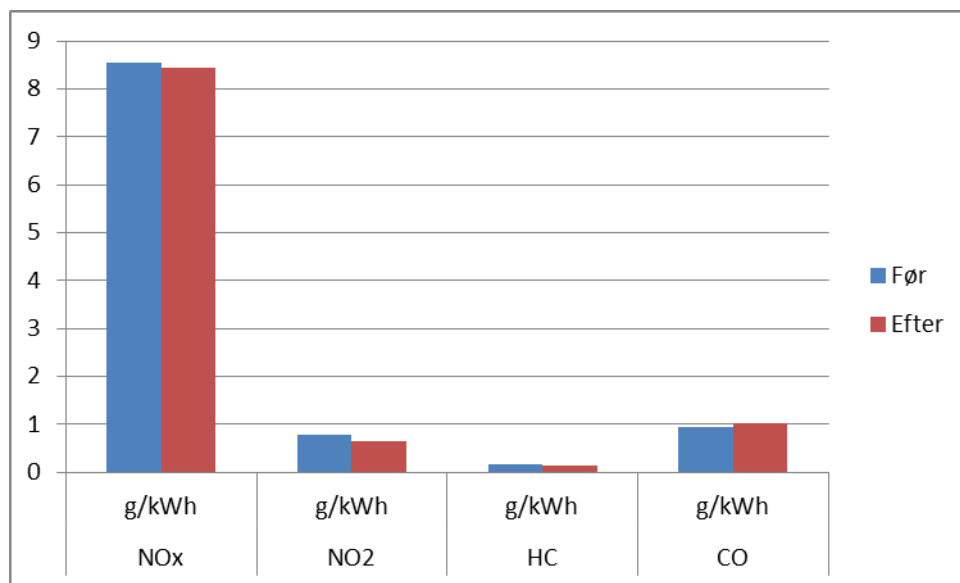
Figur 17: Partikelkoncentration ved 85 % motorbelastning



Figur 18: Partikelkoncentration ved 100 % motorbelastning

1.6 Emissionsmålinger

Målinger viser et stort set uændret billede af emissionerne før og efter partikelfiltret, hvilket var i overensstemmelse med forventningerne.



Figur 19: Emissionsmålinger før/efter partikelfiltret

1.7 Konklusion

Det har vist sig muligt at konstruere et effektivt partikelreducerende filter til brug i marinemotorer, der sejler på marine diesel olie med et svovlindhold på op til 1000 ppm (0,1 %). Udfordringen om bord på skibe ligger i de pladmæssige og økonomiske forhold, når en installation eftermonteres (retrofitting). I dette projekt har der desuden været flere fordyrende faktorer, såsom at installationen ikke måtte forstyrre den daglige drift og derfor skulle foretages i færgens overliggerperioder om natten.

Opgradering til elektrisk styrede røggasventiler med overvågningssystemer har været en dyr løsning, men den har forøget brugbarheden for besætningen og dermed anlæggets effektivitet. Hvis det ikke bliver startet via automatikken, kan den nemt idriftsættes manuelt. Regenereringen igangsættes efter dagens sidste tur, imens den generelle nedlukning af skibet foretages og koster derfor ikke ekstra mandstimer. Rensning af restasken i filterkernerne har vist sig problematisk, da det på grund af en høj temperatur i filterkassen ikke er muligt at åbne inspektionslugerne og gennemblæse filterkernerne. Et automatisk trykluftsbaseret filterrensningssystem er nødvendigt for at undgå for højt røggasmodtryk i løbet af dagen.

Den beregnede partikelreduktion var på 99 % og målt ligger den på 93 %. Forskellen rent praktisk har vist sig at ligge i nogle mindre utætheder ved nogle af bypass-ventilerne i udstødningssystemet, så systemets totale partikelreduktion forventes at kunne opnå de beregnede 99 %. Det er ikke blevet undersøgt, om det er muligt at justere ventilerne yderligere, eller om det kræver en anden type røggasventil.

På færgen ses tydelig forskel på de to hovedmotorers røgdudvikling, når filtret er indkoblet. Dog skal det tilføjes, at røgdudvikling normalt kun ses under havnemanøvre.



Figur 8: Havnemanøvre med indkoblet partikelfilter i bagbord side.

1.8 Projekt erfaringer

Et projektet som dette møder en del udfordringer der skal håndteres undervejs og der er herunder gengivet de problemstillinger der er opstået undervejs.

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 nok til at filterne kunne regenererer.	Der blev monteret elektriske varmelegemer til regenerering med hovedmotoren i tomgang.
Pladsforhold	Da filterstørrelsen blev forøget kunne enheden ikke være som planlagt i maskinrummet.	Filterenheden blev flyttet op i bagbord skorstenscasing. Fordyrende tiltag.
Driftsforhold	Færgen kunne ikke tages ud af drift.	Mange ombygninger skulle fortages med færgen 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 sodblæse filterkernerne igennem renslemmene efter regenerering.	Der blev konstrueret et rensningssystem så sodblæsningen kunne foretages med trykluft udefra.
Betjening af anlæg	Partikelfilteret blev flyttet fra maskinrummet til skorstenscasingen	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 varmfestekabler og gennemføringer	Installationerne blev udført i henhold til gælden lovgivning for skibe.
Vægt og stabilitet	Partikelfilteret blev flyttet op i skorstencasingen. Det blev af værftet konstrueret i skibskonstruktionsstål.	Det bør fremover tilstræbes at minimerer vægten af installationen. Dette for at reducerer anlæggets totale vægt, udgifter til konstruktion samt vægtbelastningen på fartøjet.

1.9 Links

Miljøstyrelsens hjemmeside om Ecoinnovation:

www.ecoinnovation.dk

Danmarks Rederiforenings hjemmeside:

www.shipowners.dk

Dinex A/S hjemmeside

<http://www.dinex.dk>

Ærofergens hjemmeside:

www.aeroe-ferry.dk

Teknologisk Instituts hjemmeside:

www.teknologisk.dk

Referencer

¹Corbett, J.J., et al., *Mortality from ship emissions: a global assessment*. Environ Sci Technol, 2007. 41 (24)

²Dockery, D.W., et al., *An association between air pollution and mortality in six U.S. cities*. N Engl J Med, 1993. 329 (24)

³Gonzalez, Y., et al., *Ultrafine particles pollution in urban coastal air due to ship emissions*. Atmospheric Environment, 2011. 45 (28)

Udvikling af partikelfilter til skibe

Et komplet partikelfilter blev udviklet og monteret på en af hovedmotorerne på færgen M/F Ærøskøbing for at undersøge reduktionsmulighederne for udledningerne af partikler 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 ved sejllads på marine diesel olie for sundhedsskadelige dieselpartikler.



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Strandgade 29
DK - 1401 København K
Tlf.: (+45) 72 54 40 00

[www. mst.dk](http://www.mst.dk)