



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande MUDP-projekt

MUDP rapport

August 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Troels Dyhr Pedersen

Thomas Nørregaard Jensen

Fotos:

Hans Søndergaard

ISBN: 978-87-7038-637-1

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

Må citeres med kildeangivelse.

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, der støtter udvikling, test og demonstration af miljøteknologi.

MUDP investerer i udvikling af fremtidens miljøteknologi til gavn for klima og miljø i Danmark og globalt, samtidig med at dansk vækst og beskæftigelse styrkes. Programmet understøtter dels den bredere miljødagsorden, herunder rent vand, ren luft og sikker kemi, men understøtter også regeringens målsætninger inden for klima, biodiversitet og cirkulær økonomi.

Det er MUDP's bestyrelse, som beslutter, hvilke projekter der skal modtage tilskud. Bestyrelsen betjenes af MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen.

MUDP-sekretariatet i Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5, 5000 Odense | Tlf. +45 72 54 40 00

Mail: ecoinnovation@mst.dk
[MUDP's hjemmeside](#)

Denne slutrapport er godkendt af MUDP, men det er alene rapportens forfatter/projektlederen, som er ansvarlige for indholdet. Rapporten må citeres med kildeangivelse.

Indhold

1.	Baggrund	6
2.	English Summary	8
3.	Dansk resume	11
4.	Kortlægning	13
4.1	Opsøgning og organisering af projektdeltagere	13
4.2	Indledende emissionsmålinger på skibene	13
4.3	Forventninger til emissionssystemerne	13
4.4	Afklaring af arbejdsbetingelser og krav til installationerne	14
4.5	Sammenligning af måleprincipper til partikelmåling	15
4.6	Opsummering af bidrag til IEA AMF Task 60	15
5.	Metoder og instrumenter anvendt til bestemmelse af emissioner	18
5.1	Metoder og instrumenter anvendt til måling efter ISO 8178	18
5.2	Øvrige instrumenter anvendt til måling af gasemissioner	18
5.3	Øvrige instrumenter anvendt til måling af partikelemissioner	19
6.	Purefi & World Marine Offshore	21
6.1	Beskrivelse af World Marine Offshore	21
6.2	Beskrivelse af Purefi A/S	21
6.3	Referencemålinger på World Mistral	22
6.4	Specifikation af emissionssystemet	23
6.5	Brændstofkvalitet og svovlindhold	24
6.6	Opbygning af emissionssystem	25
6.7	Ændring i valg af skib	27
6.8	Idriftsættelse på World Calima	27
6.9	Bestemmelse af opnået støjreduktion	29
6.10	Driftserfaring	31
7.	Exilator og Hundested-Rørvig Færgesfart	32
7.1	Beskrivelse af Hundested-Rørvig Færgesfart	32
7.2	Beskrivelse af Exilator ApS	33
7.3	Referencemålinger på M/F Isefjord	33
7.4	Specifikation af partikelfiltrene	34
7.5	Installation	34
7.6	Bestemmelse af partikelreduktion	35
7.7	Driftserfaring	37
7.8	Service	38
7.9	Opfølgende måling af partikelreduktion og katalytisk effektivitet	38
7.10	Bestemmelse af opnået støjreduktion	41
7.11	Kortvarig måling af partikelfiltrenes effekt på nærmiljøet i 2018	42
7.12	Længerevarende partikelmålinger i nærmiljøet i 2020	44
7.13	Oplevelsen af M/F Isefjord efter montering af partikelfiltre	45

8.	Amminex og Partrederiet Sundbusserne	48
8.1	Beskrivelse af Partrederiet Sundbusserne	48
8.2	Beskrivelse af Amminex Emission Solutions A/S	48
8.3	Referencemålinger på M/S Pernille	49
8.4	Specifikation af emissionssystemet	50
8.5	Afprøvning af SCR-løsning	50
8.6	Designovervejelser for partikelfiltre	51
8.7	Afslutning af demonstrationsforløbet	53
9.	Konsekvens og potentiale	54
9.1	Introduktion	54
9.2	Datagrundlag	55
9.3	Potentiale for udbredelse	55
9.4	Metode	55
9.5	Spredningsmodeller	56
9.6	Hovedkonklusioner	57
9.7	Diskussion og perspektivering af rapportens konklusioner	59
9.8	Regneeksempel på helbredsomkostninger	59
9.9	Regionale kontra lokale effekter	60

1. Baggrund

Reguleringen af skibstrafikkens emissioner af SO_x, NO_x og sodpartikler har overordnet set været langt mindre restriktiv end reguleringen af emissioner fra landbaserede kilder, særligt set i forhold til udviklingen i regulering af emissioner fra motorer der anvendes til gods og persontransport på land.

I erkendelse af at skibenes emissioner bidrager til negative effekter på landmiljøer og menneskers sundhed, blev der i starten af det nye årtusinde vedtaget specifikke zoner kaldet Emission Control Areas (ECA) indenfor hvilke der skulle gælde lavere grænseværdier for udledning af SO_x og senere også NO_x. Grænseværdier for udledningen af SO_x i de øvrige globale farvande er ligeledes løbende blevet sænket.

Teknologierne til begrænsning af NO_x og SO_x er nu overordnet set kommet på plads og har vist sig effektive, idet der bl.a. er konstateret en markant reduktion af både SO_x og NO_x i luften, særligt i ECA-zonerne. Der er dog fortsat potentiale for yderligere reduktion af særligt NO_x, hvor den nuværende grænseværdi for NO_x kun er gældende for nye skibe (fra 2021) som sejler i ECA zonerne.

Det har imidlertid ikke til dato været muligt at indføre en grænseværdi for udledning af sodpartikler, hvilket overvejende skyldes, at det er svært at begrænse på motorer der anvender brændstof med højt svovlindhold. Problematikken er særligt udtalt for store to-takts motorer, hvor det rent teknisk for nuværende ikke er muligt at anvende effektive partikelfiltre, dels fordi de ikke kan arbejde med det tryktab som partikelfiltre giver, dels fordi de ikke har tilstrækkeligt høj temperatur til at sikre afbrænding af partiklerne.

I nærskibstrafikken er skibene imidlertid i stort omfang bygget med mindre 4-takts motorer, der som udgangspunkt kan udstyres med partikelfiltre som er baseret på samme teknologi som anvendes til motorer i køretøjer. Partikelfiltre er blevet demonstreret ved eftermontering på flere skibe i både danske og udenlandske farvande de sidste 15 år, og der eksisterer i dag flere virksomheder som specialiserer sig i installation af partikelfiltre til skibe.

Teknologisk Institut har tidligere deltaget i projekter målrettet afprøvning af partikelfiltre og NO_x reduktion på skibe, både gennem deltagelse i udvikling og demonstrationsprojekter, men også de seneste år i stigende omfang som kommerciel partner til måling og dokumentation af installationernes virkningsgrad ift. reduktion af partikler og NO_x.

Grundtanken bag projektet "Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande", som denne rapport omhandler, var at engagere teknologileverandører, rederier, interesseorganisationer og viden-institutioner i et projekt med fokus på udvikling og demonstration af specifikke emissionsløsninger til specifikke skibe, med særligt fokus på reduktion af partikler og NO_x.

Emissionsteknologierne ville tage afsæt i fungerende teknologi udviklet til tunge køretøjer, som skulle videreudvikles med fokus på de specifikke udfordringer som forventeligt ville opstå ved skift til større motorer og under mere krævende driftsbetingelser.

Projektets mål har fra start været at opnå specifikke reduktioner, som er defineret i de enkelte demonstrationer. Forventningerne har været at partikelemission reduceres med mere end 98 %, mens NO_x sænkes med omkring 80 %, svarende til den gennemsnitlige virkningsgrad af en SCR-katalysator.

Udover NO_x og partikler har der også været fokus på reduktion af støj fra udstødningen, som kan være ganske markant fra skibe. Med stigende beboelse langs havnearealer er der også kommet fokus på støjen fra bl.a. færger, ligesom passagerer i stigende omfang forventer at lugt og støjgener minimeres på passagerfærgers udendørs arealer. Emissionssystemer med partikelfiltre leverer en dæmpning af lydniveauet som ligger på niveau med eller over selv meget effektive lyddæmpere, og vil ofte kunne erstatte disse.

2. English Summary

This report describes the activities in the project “Maritime Emission Solutions for Ships in Coastal Waters”, which was funded by the Danish Environmental Agency program for development and demonstration projects (MUDP). The project was a so-called “lighthouse project”, in which the ambition is to demonstrate environmental technology that exceeds current legislation and regulation.

The project was applied for and accepted by MUDP in 2016, and work began in February 2017. The project was originally scheduled for a duration of 3 years, but several major delays were encountered in the demonstration planned in collaboration between World Marine Offshore and Purefi A/S, which necessitated a total of 3 years of project extensions, to ensure the demonstration of the developed systems.

The purpose of the project was to gather relevant stakeholders in the Danish maritime sector, in a collaboration on development and demonstration of emission aftertreatment solutions for reduction of NO_x and particulate matter, on three ships in Danish, coastal waters.

The project partners were:

- The maritime organizations Danish Shipping, Danish Maritime and Færgesekretariatet, which is a common secretariat for eighteen municipal shipping companies which have responsibility for island ferry operations.
- Danish Center for Environment and Energy (DCE) at Aarhus University
- Technology suppliers Purefi A/S, Exilator ApS og Amminex Emission Solutions A/S
- The ferry companies Hundested-Rørvig Færgefart A/S and Sundbusserne, and the offshore service company World Marine Offshore

The project aimed at performing three parallel emission aftertreatment system demonstrations on three ships. The companies Purefi A/S, Exilator ApS, and Amminex Emission Technologies A/S developed and implemented the technology for the systems. The emission after-treatment systems were demonstrated on ships belonging to the shipping companies World Marine Offshore, Hundested Rørvig Færgefart and Sundbusserne A/S.

In January 2018, Exilator ApS installed particulate filters on the main and auxiliary engines on the ship M/F Isefjord, while the ship was in dock for scheduled maintenance and service. The particulate filters have been in continuous operation on the ferry since 2018, providing approximately 5 years of nearly uninterrupted particulate reduction in this project, with maintenance limited to yearly ash removal. The operating experience has shown that the load profile of the main propulsion engines provides a sufficient temperature level for continuous burning of the accumulated soot particles. The catalytic activity and particle retention efficiency of the particle filters were checked by onboard measurements in September 2021, at which point the filters were found to be in good condition. The particulate filter installations will remain in operation on M/F Isefjord after project closure.

M/F Isefjord connects the towns Rørvig and Hundested in the northern part of Zealand and provides a short cut between the ferries to Aarhus and Helsingborg. The harbor areas in Rørvig and Hundested are, like other harbors in small cities, being increasingly populated with residential buildings and restaurants near the ferry piers. The particulate filter installation on M/F Isefjord has been an important and timely improvement that improves the air quality in these areas, which is of high value to the residents and guests in the harbor. The particulate filter installations have also provided a very significant noise reduction, meaning that most

people will not experience any sound from the ferry engines. Passengers and permanent residents in the harbor region have clearly noted the absence of noise from the ferry arriving and departing, after installation of the particulate filters.

Purefi developed a fuel sulfur tolerant emission aftertreatment system for demonstration on a vessel owned by World Marine Offshore, which operates with fuel containing up to 1000 ppm sulfur. The demonstration was planned initially for the vessel World Mistral, but as the ship was later contracted for work in Taiwan, the demonstration was moved to the vessel World Calima. The Purefi aftertreatment system was commissioned and tested in November 2022, at which time the NO_x reduction efficiency measured was 90-95 %, and particulate reduction efficiency was more than 99,9 %. Exhaust noise reduction was also measured, with an average 20-22 dB noise attenuation by the emission aftertreatment system. The ship was not in service at the time due to the winter season, and measurements were made in the harbor. Due to financial challenges, World Marine Offshore filed for bankruptcy in January 2023, at which time the system was dismantled from the ship.

Amminex Emission Technologies A/S entered the project with a solid background in development and retrofitting of SCR systems utilizing their patented solution (ASDS™) for non-pressurized storage of ammonia, as reducing agent in the NO_x conversion. These systems were originally developed for heavy duty vehicles and have been mounted on 300 buses which operate in the central and rural Copenhagen area. The ambition with the demonstration of Amminex technology was to achieve a high NO_x conversion with an ammonia-based reduction, combined with particulate reduction using diesel particulate filters. The aftertreatment solutions were designed and the SCR systems were demonstrated onboard the ship M/S Pernille, but due to company priorities Amminex chose to exit the project before completing the demonstration. There were considerations regarding continuation of the project with assistance from the other partners, but it was not possible to find a satisfactory solution, and the demonstration was terminated in 2019, with the SCR catalysts remaining on the ship.

Danish Center for Environment and Energy, part of Aarhus University, has participated in the project. The aim of their participation was to account for human health effects and the related potential socio-economic benefits resulting from retrofitting of particulate filters and SCR catalysts on ships in Danish territorial waters, to the extent deemed technically possible. The reduction scenario has been evaluated using models for atmospheric distribution and transformation of emission species in the atmosphere, health effects from exposure, and pricing of human health effects and premature deaths. The reduction scenario and reduction potentials have been calculated with models including Europe and for Denmark only. The differences between the reference scenario (current emission level) and the reduction scenario provides estimates of potential external cost savings related to the potential reductions of NO_x and primary particulate matter (PPM_{2.5}). These estimates are used to calculate unit costs in DKK/kg for NO_x and PPM_{2.5}. These unit cost estimates can be used in socioeconomic evaluation of retrofitting emission aftertreatment systems on ships in coastal waters.

Danish Technological Institute has performed a detailed review on the development and technology spread of aftertreatment technologies for ships. The review is a contribution to a report under preparation by a workgroup under The International Energy Agency (IEA) named Advanced Motor Fuels (AMF). The background for the Danish contribution is the recent tightening of NO_x and SO_x emission in both global waters and ECA zones, which has forced the maritime sector into complex choices between aftertreatment solutions and cleaner fuels, that satisfy these requirements. The investigation has focused on the extent of scrubber retrofitting for SO_x removal, engine technology and aftertreatment systems for NO_x removal under IMO Tier III rules, and the increasing use of LNG as engine fuel for ships. The report contribution also focuses on emerging alternative propulsion technologies, such as battery

electric and fuel cell powered propulsion, which are now being used for passenger ships on short routes. These new propulsion technologies are becoming serious alternatives to conventional diesel propulsion for short distance shipping and will become important measures in reducing pollution in coastal waters.

3. Dansk resume

Denne rapport omhandler aktiviteterne i projektet "Maritime emissionsløsninger til skibe i kystnære farvande", som blev ansøgt og bevilliget under Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet, med status som Fyrtårnsprojekt. I et Fyrtårnsprojekt er ambitionen at demonstrere miljøforbedrende teknologi der rækker ud over rammerne for gældende lovgivning og regulering.

Projektets formål var at samle relevante aktører i den maritime branche, i en samlet indsats med det formål at udvikle og demonstrere emissionsløsninger til reduktion af NO_x og partikelforurening, på tre skibe i danske, kystnære farvande. Projektet blev ansøgt med følgende partnere:

- Brancheorganisationerne Danske Rederier og Danske Maritime samt Færgesekretariatet, som er et fælles sekretariat for 18 kommunale rederier med ansvar for drift af ø-færger
- Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) ved Aarhus Universitet
- Teknologileverandørerne Purefi A/S, Exilator ApS og Amminex Emission Solutions A/S
- Rederierne World Marine Offshore, Hundested-Rørvig Færgefart A/S og Partrederiet Sundbusserne

Projektet blev ansøgt og bevilliget i 2016, med opstart 1. februar 2017. Oprindeligt var projektet tilrettelagt med en tidsramme på 3 år, men flere større forsinkelser, særligt relateret til demonstrationsforløbet på først fartøjet World Mistral og senere fartøjet World Calima, medførte et behov for flere forlængelser, for at sikre gennemførelsen. MF Isefjord færgen, som sejler på ruten Hundested-Rørvig, og ejes af Hundested-Rørvig Færgefart, fik primo 2018 monteret partikelfiltre på alle fire motorer og har demonstreret emissionsteknologien fra Exilator lige siden. Projektet kom endeligt i mål i januar 2023, efter en vellykket demonstration af et svovltolerant emissionssystem til partikel- og NO_x reduktion på fartøjet World Calima ejet af World Marine Offshore.

Fra projektets start har målet været at gennemføre tre parallelle demonstrationer af emissionsreducerede systemer, monteret på tre skibe. Teknologierne til disse skibe skulle udvikles af Purefi A/S, Exilator ApS og Amminex Emission Technologies A/S. Rederierne Hundested Rørvig Færgefart og Partrederiet Sundbusserne, var med fra projektets start, mens World Marine Offshore blev inddraget kort tid efter projektopstart.

Purefi og virksomheden World Marine Offshore har været gennem et langstrakt og kompliceret forløb før det endelig lykkedes at få monteret et system med partikelfiltre og SCR-katalysator på World Calima i efteråret 2022. Forsinkelserne har betydet at der kun blev opnået begrænset driftserfaring på denne installation efter idriftsættelse og indledende emissionsmåling. Systemet blev efter indkøring målt til at have en meget effektiv NO_x reduktion på 91-94 %, samt en virkningsgrad i reduktion af partikler på over 99,9 %. Der blev også målt en meget fin støjreduktion på omkring 20-22 dB(A), hvilket sænker støjniveauet markant både omkring udstødningerne såvel som inde i skibet.

Exilator fik tidligt i projektet en mulighed for at installere partikelfiltre på M/F Isefjord i løbet, hvilket blev udført under skibets planlagte dokning i januar 2018. Der blev installeret partikelfiltre på alle motorer, dvs. to hovedmotorer og to hjælpemotorer. Partikelfiltrene har været i kontinuert drift i 5 år ved projektafslutning, og vedligehold har primært været begrænset til årlig rensning af partikelfiltrene for aske. Driftserfaringen har vist at skibets driftsprofil er velegnet til at sikre løbende afbrænding af akkumuleret sod, og der er ikke fundet indikationer på degradering af partikelfiltrene ift. filtreringsevne og katalytisk aktivitet i

kontrolmålinger udført i september 2021. Partikelfiltrene yder fortsat omkring 97 % reduktion af partikler, hvilket er meget tæt på at opfylde målsætningen i projektet, som var på 98 %. Partikelfiltrene har i øvrigt elimineret de problemer som skibet tidligere havde med nedfald af sodpartikler på dækket, som udover hyppig rengøring til tider udløste klager fra passagerer.

Havnearealerne i bl.a. Rørvig og Hundested bliver ligesom andre mindre havne i stigende grad taget i anvendelse til beboelse og rekreative formål, ligesom der etableres restauranter på havnefronten. Partikelfiltrene på M/F Isefjord har været et vigtigt bidrag til et renere nærmiljø, som særligt kommer havnens øvrige brugere til gode. Partikelfiltrene har desuden medført en støjreduktion af udstødningen fra motorerne på omkring 22 dB(A), hvilket i praksis har medført at færgerne i praksis nu opleves som nærmest lydløse. Flere af færgerne brugere og særligt faste beboere nær havnen har i tiden efter idriftsættelsen bemærket at færgerne ikke længere kan høres ved ankomst og afgang.

Amminex Emission Technologies A/S havde ved projektets start en solid baggrund indenfor SCR-systemer til NO_x reduktion, med ammoniak dosering fra deres patenterede system til trykløs og sikker lagring af ammoniak i beholdere med strontium klorid. Systemerne er oprindeligt udviklet til tunge køretøjer, og er bl.a. blevet monteret på omkring 300 busser i København og omegn. Ambitionen med denne demonstration var at opnå en høj NO_x reduktion med ammoniak som reduktionsmiddel, i kombination med et partikelfilter. Løsningen blev projekteret og nåede at blive afprøvet på skibet, før Amminex valgte at udtræde af projektet som følge af en intern vurdering og prioritering af ressourcer i virksomheden. Der var overvejelser om at fortsætte arbejdet med at få en løsning på skibet, men dette måtte opgives af flere årsager, og denne demonstration måtte derfor stoppes i 2019.

Dansk Center for Miljøvidenskab (DCE) under Aarhus Universitet har deltaget i projektet, med fokus på at beregne de sundhedsmæssige og samfundsøkonomiske gevinster ved at reducere emissioner fra skibe i dansk farvand. Der er arbejdet med et scenarium hvor alle skibe der sejler i dansk farvand udstyres med SCR og partikelfiltre i det omfang som er skønnet muligt. Ved hjælp af spredningsmodeller, modeller for atmosfærekemi, dosis-responsfunktioner og værdisætning af sundhedseffekter og omkostninger ved tabte leveår, har DCE beregnet samfundsøkonomiske besparelser ved reduktion af hhv. NO_x og partikelforurening, både på nationalt og europæisk niveau. Med udgangspunkt i de udledte mængder og de afledte effekter ved udledning af NO_x og partikler har det været muligt at estimere såkaldte enhedsomkostninger, der direkte udtrykker omkostningen per udledt mængdeenhed af NO_x og partikler. For Danmark er enhedsomkostningen for NO_x beregnet til 26 kr./kg, og for PPM_{2.5} er enhedsomkostningen 81 kr./kg. Disse estimater vil kunne indgå i fremtidige samfundsøkonomiske analyser for tiltag mod partikler og NO_x fra skibe, idet der nu er konkrete skøn for de gevinster som vil kunne opnås for en given investering i partikelfiltre eller SCR-katalysatorer.

Som en del af projektet har Teknologisk Institut udført en grundig undersøgelse af udviklingen og udbredelsen af emissionsteknologier til skibe, der indgår som et bidrag til en større redegørelse under det Internationale Energiagenturs arbejdsgruppe for alternative motorbrændstoffer (IEA-AMF). Den Internationale Maritime Organisation (IMO) har med de seneste stramninger i grænseværdier for udledning af NO_x og SO_x tvunget den maritime sektor til at foretage nogle grundlæggende valg omkring brændstoftyper og efterbehandlingssystemer til røggas. Undersøgelsen har kigget på udviklingen indenfor eftermontering af scrubbere til SO_x fjernelse, motorteknologier og efterbehandlingssystemer til IMO NO_x Tier III, samt udviklingen i antallet af skibe der anvender LNG som brændstof. Alternative fremdriftsmidler, herunder elektrisk fremdrift understøttet af batterier eller brændselsceller, er også ved at finde udbredelse til passagerskibe på korte overfarter, hvilket på kort sigt vil få indflydelse på de valg som træffes ved projektering af nye skibe til korte overfarter.

4. Kortlægning

4.1 Opsøgning og organisering af projektdeltagere

Før projektet blev ansøgt havde Teknologisk Institut igangsat en proces med at identificere potentielle projektdeltagere, med særligt fokus på rederier med færgeoverfarter, samt dialog med virksomheder som kunne levere emissionsreducerende teknologi.

Der var flere vigtige kriterier til skibene, herunder motorenes størrelser og driftsprofil, som skulle kunne sikres tilstrækkelig høj udstødningstemperatur til afbrænding af soden i filtrene. Dette ville være nemmest at opfylde med faste driftsintervaller og overfarter af mindst 15-20 minutters varighed, så filtrene kunne opnå tilstrækkelig høj temperatur til afbrænding af sod. I denne proces blev der forud for ansøgningen indgået aftale med partrederiet Sundbusserne og Hundested-Rørvig Færgefart, som opfyldte de ønskede kriterier.

Virksomheden Exilator ApS fik til opgave at konstruere partikelfiltre til det kun ca. 5 år gamle skib M/F Isefjord. Skibet er udstyret med motorer fra 2012 godkendt under IMO Tier II, og har derfor en relativt lav NO_x udledning. Det gav derfor mening at fokusere på partikelemissionen alene på dette skib.

Virksomheden Amminex Emission Solutions fik til opgave at arbejde med en NO_x reducerende løsning på skibet M/S Pernille, et skib bygget omkring 1981, med forholdsvis høje niveauer af NO_x i udstødningen. Eftersom Amminex SCR-teknologi anvendte dosering af ammoniak fremfor urea, var forventningen at der kunne opnås effektiv reduktion af NO_x under alle driftsforhold på skibet. Dertil skulle der også installeres partikelfiltre, produceret af en ekstern leverandør til Amminex.

Virksomheden Purefi A/S blev kontaktet sent i forløbet under klargøring af ansøgningen, da en anden virksomhed sprang fra, og gik med i ansøgningen i forventningen om at der i starten af projektet ville blive fundet et rederi som kunne understøtte demonstration af Purefis emissionsteknologi. World Marine Offshore blev kontaktet medio 2017 og formelt inddraget i projektet i august 2017, hvorefter Purefi og World Marine Offshore kunne begynde arbejdet med at planlægge en emissionsløsning til et af selskabets skibe.

4.2 Indledende emissionsmålinger på skibene

Skibenes emissioner blev målt før montering af emissionssystemerne, med henblik på dels at opnå erfaring med emissionsmålinger på skibene, dels for senere at have data til at vurdere de opnåede reduktioner i NO_x og udledte partikler.

Emissionsmålingerne blev udført med udstyr til måling af gasemissioner (CO₂, CO, NO, NO₂, O₂ og HC) og flere typer af udstyr til partikelmålinger, hvor partiklerne blev målt både på massebasis, antalsbaseret og med bestemmelse af størrelsesfordeling.

4.3 Forventninger til emissionssystemerne

Forventningen til emissionssystemernes reduktioner blev fastlagt i forbindelse med projektan søgningen, hvor succeskriterierne for systemerne var en reduktion af NO_x på 80 % og en reduktion af partikler på mindst 98 %, målt på antalskoncentration. Herudover skulle Exilator's emissionssystemer medføre en støj dæmpning af udstødningen på 30-35 dB på bilfærgeren Isefjord.

4.4 Afklaring af arbejdsbetingelser og krav til installationerne

Der var fra starten af projektet lagt op til at installationerne blev udført som et samarbejde mellem rederierne og teknologileverandørerne, så begge parter bidrog med deres specifikke viden i implementeringen og dermed havde et fælles ansvar for at systemerne ville komme til at fungere efter hensigten. Det skulle bl.a. sikres at installationen kunne gennemføres og godkendes efter gældende sikkerhedsregler, idet classeselskabet skulle godkende installationerne før ibrugtagning, men også at driftsbetingelserne var acceptable for emissionssystemerne, såvel som for motorerne, i forhold til at sikre at systemerne blev dimensioneret store nok, så det øgede modtryk ikke oversteg motorproducentens specifikation.

Forventningen var således at projektdeltagerne på de respektive demonstrationer på forhånd skulle afklare de krav som ville være gældende for installationerne, skibets sikkerhed og de betingelser som skulle sikre emissionssystemernes funktionalitet. Der fandtes ikke på forhånd en fast defineret tilgang til dette arbejde, så det var i høj grad op til partnerne at afklare rammerne for samarbejdet og i fællesskab identificere potentielle udfordringer forud for installationen af systemerne.

På bilfærgen M/F Isefjord stod Exilator for at montere partikelfiltrene på alle skibets motorer. Her blev det ved indledende målinger afklaret at udstødningstemperaturen under overfart var tilstrækkelig til at sikre at partikelfiltrene kunne afbrænde soden. Det blev dog konstateret at generatormotorerne arbejdede med meget lav belastning, som betød at udstødningstemperaturen her ikke ville være tilstrækkelig til at opnå kontinuert afbrænding af sod, hvilket ledte til at der blev designet en løsning der kunne hæve belastningen på generatorerne. Det var aftalt at skibet fremover skulle fortsætte med at sejle med MGO med max 50 ppm svovl, idet højere svovlindhold ville hæmme filtrenes evne til at afbrænde sod. Herudover var der flere tekniske krav til godkendelse af installationerne, herunder at skibets faste ballast skulle tilpasses, hvorefter der skulle gennemføres test af krængningsstabiliteten før skibet kunne sættes i drift på overfarten. Endelig blev der designet løsninger til bypass af partikelfiltrene, så skibets fremdrift og sikkerhed kunne sikres hvis der skulle opstå problemer med tilstopning af filtrene.

På skibet M/S Pernille havde Amminex til opgave at implementere deres ASDS™ systemer til NO_x reduktion såvel som partikelfiltre på hoved og hjælpemotorerne. I denne forbindelse var det særligt overvejelser af sikkerheden omkring systemerne til ammoniakdosering, som gav anledning til forskellige overvejelser omkring placering af systemerne, så passagerer eller besætning ikke risikerede at blive generet af ammoniaklugt i tilfælde af lækage. Derudover blev det tidligt klart at der kunne være udfordringer med olieforbruget på den ene af skibets hovedmotorer, som var en del højere end normalt. Smøreolie indeholder store mængder aske, som på kort tid kan reducere det effektive volumen i et lukket partikelfilter, så et højt olieforbrug er problematisk. Det blev vurderet at en løsning kunne være at bruge et såkaldt partielt partikelfilter, som er et åbent filter der ifølge producenten kan give 40-60 % reduktion af partiklerne, dog uden garanti selv for dette. Amminex valgte at udtræde af projektsamarbejdet i 2019, men fik inden da beskrevet et detaljeret overblik over de tekniske overvejelser og betragtninger de havde gjort sig i planlægningen af installationerne.

Skibet World Mistral var udvalgt blandt flere egnede skibe i World Marines flåde, til demonstration af store emissionssystemer med partikelfiltre og urea-baseret SCR. Her var særligt pladsforholdene under dæk en udfordring, da der ikke kunne findes plads til montering af partikelfiltrene. Løsningen blev at der blev designet en løsning til montering på dækket, hvor det i øvrigt ville være langt nemmere at afmontere partikelfiltre og katalysatorer for inspektion og service-ring, herunder tømning for aske. I forhold til Mistrals brændstof var der fra start en opfattelse af at der skulle bruges MGO med 50 ppm svovl, men senere i projektet blev det klart at skibet tankede brændstof med varierende svovlindhold, op til 1000 ppm. Dette var en stor udfordring, som krævede ændringer i designet af systemet med nye svovltolerante komponenter.

4.5 Sammenligning af måleprincipper til partikelmåling

Tidligt i projektet var der overvejelser omkring afprøvning af måleprincipper til måling af partikler i røggassen, idet standardmetoden (beskrevet i standarden ISO 8178) til måling af partikelmasse ikke ville være anvendelig for udstødningsgas der var effektivt rensset for partikler i et partikelfilter, hvor mere end 99,9 % af partikelmassen forventes tilbageholdt og afbrændt.

Standarden for måling af partikelmasse på ubehandlet udstødningsgas er at måle partikelmassen gravimetrisk, hvilket indebærer at der ekstraheres et gasvolumen, som fortyndes og filtreres gennem et planfilter. Dette filter vejes før og efter med en præcisionsvægt, og den øgede vægt (typisk mellem 0,2 og 2 milligram) anvendes til beregning af partikelmassen per volumenenhed i røggassen. Typisk udføres målingen over 10-15 minutter, hvor motorens belastning i udgangspunktet skal være så stabil som muligt.

Udfordringen ved at bruge den gravimetriske metode til partikelmåling efter et partikelfilter er at eftersom partikelfiltret forventeligt tilbageholder over 99,9 % af partikelmassen, vil det kræve et meget større volumen af gas gennem planfiltrene (mellem 100 og 1000 gange større, afhængigt af valgt fortynding) for at opsamle en partikelmængde, som kan vejes med acceptabel nøjagtighed. I praksis er dette ikke muligt at opnå, selv hvis målingen udføres over flere overfarer.

For at kunne vurdere alternativer til den gravimetriske metode blev der foretaget afprøvning og sammenligning med andre instrumenter parallelt med den standardiserede måling, med det formål at sammenligne metoderne og instrumenterne direkte. Hvis resultaterne fra de forskellige instrumenter var sammenlignelige, ville der være alternativer som kunne foretage målinger både før og efter partikelfiltre. Dette ville give de nødvendige redskaber til at bestemme både filtreringseffektivitet og specifikke emissioner af partikler for skibene.

4.6 Opsummering af bidrag til IEA AMF Task 60

Teknologisk Institut har leveret bidrag til en rapport, som er udarbejdet af deltagere i IEA-AMF. AMF er forkortelsen for **A**dvanced **M**otor **F**uels, som er betegnelsen for en international arbejdsgruppe (Technology Collaboration) under IEA, International **E**nergy **A**gency. Arbejdsgruppen undersøger og redegør løbende for udvikling og potentialer i nye brændstoffer i såkaldte Tasks med veldefinerede temaer.

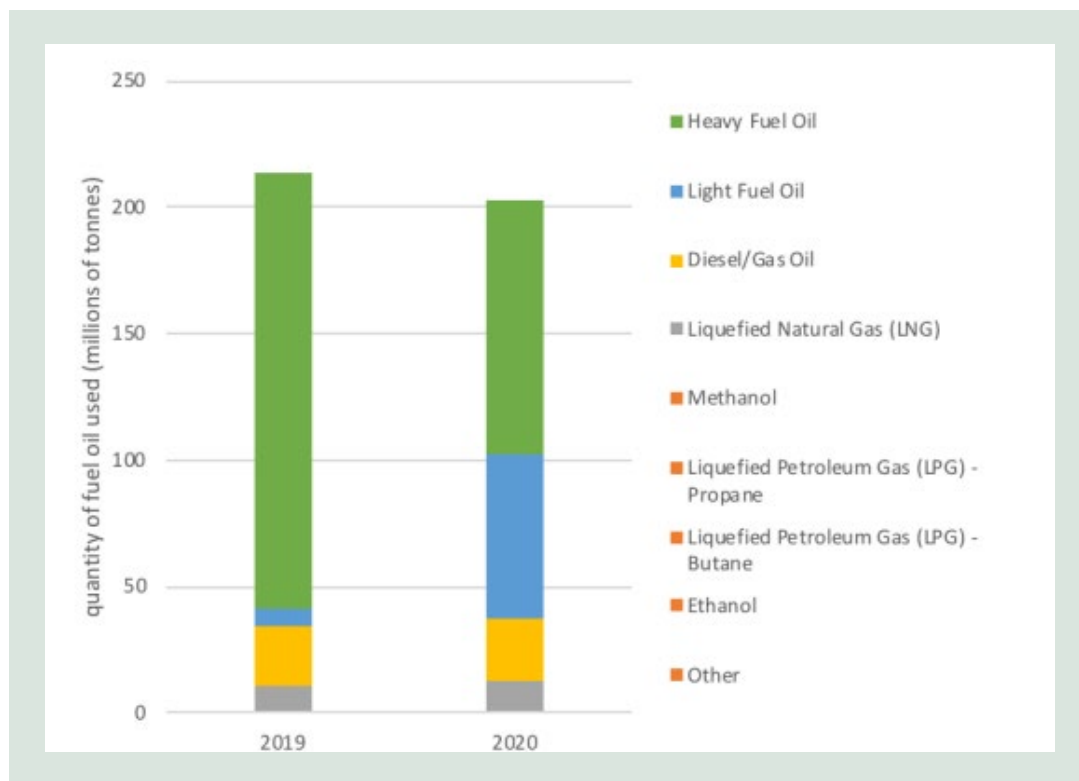
Den aktuelle rapport er udarbejdet under AMF Task 60 - The Progress of Advanced Marine Fuels, hvor fokus er på udvikling og udbredelse af alternative maritime brændstoffer. De øvrige deltagende lande i rapporten er Sverige, Finland, Østrig, Schweiz, USA, Canada, Kina og Sydkorea.

Teknologisk Institut har bidraget til den fælles rapport med en redegørelse for udviklingen og udbredelsen af teknologier og alternative tilgange til reduktion af NO_x, SO_x og partikler, som i store træk er en følge af de tiltag som IMO har iværksat for at reducere særligt SO_x og NO_x fra skibe, både globalt og i de såkaldte ECA-zoner, som er udpegede regioner hvor der stilles skærpede krav til skibes emissioner af SO_x og NO_x.

SO_x - hovedkonklusioner

I rapportbidraget redegøres bl.a. for udviklingen og udbredelsen af scrubber systemer på større skibe siden de første systemer blev installeret omkring år 2015. Scrubbere kan anvendes som alternativ til anvendelse af brændstof med lavt svovlindhold, og reducere udledningen af SO₂ til samme niveau som hvis der var anvendt brændstof med det tilladte indhold af svovl. Hovedkonklusionen på denne del af undersøgelsen er at ca. 6% af verdens bestand af skibe over 5000 bruttoton (GT) frem til og med 2022 er blevet udstyret med scrubbere. Det er primært på de større skibe hvor det giver mening at eftermontere scrubbere,

mens det på mindre skibe bedre kan betale sig at anvende brændstof med lavt svovlindhold. Scrubberne er installeret som forberedelse til særligt den nye grænse for svovludledning fra skibe globalt, som trådte i kraft i 2020. Her blev det tilladte svovlindhold sænket fra 3,5 % til 0,5 % i farvande uden for ECA-zonerne. Skibe uden scrubber skulle fra 2020 skifte fra brændstof med op til 3,5 % svovl til brændstof med 0,5 % svovl i internationalt farvand. Dette skifte kan aflæses direkte i den statistik som IMO opgør årligt over forbruget af brændstof for skibe over 5000 GT. I statistikken ses et markant skifte fra 2019 til 2020 i forholdet mellem Heavy Fuel Oil (med svovlindhold op til 3,5 %) til Light Fuel Oil (med svovlindhold op til 0,5 %).



FIGUR 1. Opgjort brændstofforbrug for skibe over 5000 GT, for 2019 og 2020. Kilde: IMO MEPC 77/6/1, Report of fuel oil consumption data submitted to the IMO Ship Fuel Oil Consumption.

NO_x - hovedkonklusioner

IMO har også indført regulering af tilladte emissioner af NO_x fra skibe. Reguleringen trådte i kraft i år 2000 med Tier I gældende primært for nye skibe bygget efter denne dato. Tier II trådte i kraft for nybyggede skibe i år 2011 med en ca. 20 % lavere grænseværdi. Tier III trådte i kraft i 2016 i den nordamerikanske ECA og i 2021 i den europæiske ECA, for nybyggede skibe der sejler i eller gennem zonerne.

Den tilladte emissionsgrænse for NO_x er afhængigt af motorens størrelse (bestemt ved nominal motorhastighed), og grænseværdien er højere for to-takts motorer. Dette har betydet at store to-takts motorer kan overholde grænseværdien i Tier III med enten EGR (Exhaust Gas Recirculation) eller SCR (Selective Catalytic Reduction). Begge løsninger anvendes til nye Tier III motorer, og de to teknologier er omtrent ligeligt fordelt antalsmæssigt. Tier III motorer udgør ca. 60 % af det samlede salg af nye to-takts motorer i 2022.

På 4-takts motorer er mulighederne for at overholde IMO Tier III indtil videre begrænset til enten at bruge SCR, eller vælge Dual Fuel motorer der anvender LNG som primært brændstof. EGR alene kan ikke sænke NO_x tilstrækkeligt fra 4-takts motorer, da Tier III ligger omkring 80 % under Tier II, som i forvejen var en ambitiøs, men opnåelig grænseværdi for 4-taktsmotorer uden efterbehandling.

Alternative brændstoffer - hovedkonklusioner

Der er også sket en markant vækst i anvendelsen af alternative brændstoffer, som i nogle 2-taktsmotor designs gør det muligt at overholde grænseværdien for NO_x under Tier III. Der ses en meget markant udvikling i ordretilgangen på 2-taktssiden for motorer der kan anvende alternative brændstoffer, idet omkring 36 % af nye 2-taktsmotorer bestilt til levering i 2023 er designet til at overholde Tier III med et alternativt brændstof, primært LNG, men også LEG, LPG og metanol, hvor metanol er et alternativ der kun har været på markedet som motorbrændstof til skibe i få år.

Væksten i alternative brændstoffer – særligt LNG, men senest også metanol – er primært en konsekvens af den regulering som er indført for NO_x og SO_x, idet de alternative brændstoffer gør det muligt at overholde begge emissionsgrænser, i mange tilfælde uden efterbehandling af motorernes udstødning. I de tilfælde hvor det stadig er nødvendigt at sænke NO_x med SCR, betyder de rene alternative brændstoffer at der ikke opstår komplikationer i systemerne som følge af reaktioner mellem fx svovlforbindelser og urea eller ammoniak. Det giver generelt en betydeligt længere levetid på katalysatorerne når der ikke er svovl i udstødningen, ligesom de meget lavere niveauer af sodpartikler forlænger intervallerne for vedligehold af udstødningsvejene, herunder turboladere, EGR-systemer og røggaskedler. Endelig er der ikke behov for scrubber, hvilket i sig selv er en meget stor investering og løbende udgift på store skibe.

Mens udviklingen i alternative brændstoffer til 2-takts motorer i dag har medført at der findes designs til mange forskellige brændstoffer, er udvalget af 4-taktsmotorer endnu begrænset til motorer der kan køre på enten diesel eller LNG som primært brændstof. Adskillige motorproducenter arbejder dog pt. med at udvikle nye 4-takts motorer der kan køre på metanol, så nye skibe med 2-taktsmotorer designet til metanol kan blive udstyret med disse 4-taktsmotorer.

I horisonten for nye brændstoffer til forbrændingsmotorer ligger ammoniak som et lovende, men også meget udfordrende alternativ. Motivationen for at anvende ammoniak er at der ikke indgår kulstof, hverken i produktionen eller emissionerne. Dette er dels en fordel rent produktionsmæssigt idet der ikke skal findes (udvindes eller genvindes) kulstof til produktionen, men derudover betyder det at skibe principielt kan sejle med nuludledning af kulstof, dvs. ingen udledning af CO₂ og Black Carbon, som er sodpartikler, der overvejende består af kulstof. På sigt vil det givetvis være nødvendigt at have en andel af nye skibe der anvender ammoniak som brændstof, hvis det skal lykkes at opfylde de ambitiøse målsætninger om reduktion af CO₂ og øvrige emissioner fra skibe. Der er dog adskillige udfordringer alene på skibene, herunder håndtering af ammoniak som er en giftig gasart, og dertil tekniske udfordringer i at opnå en effektiv forbrænding og reducere de miljøskadelige emissioner af NO_x og potentielt også lattergas, som er en gasart med et meget højt drivhuspotentiale.

For mindre skibe ses en markant udvikling i anvendelse af alternative fremdriftsmidler, herunder brint til brændselsceller, og anvendelse af batterier i hybrid og fuldt elektriske fremdriftsløsninger. Disse løsninger er særligt egnede til små skibe, såsom ruteferger med korte overfarter, sightseeing/havnerundfarter og andre skibe med lave motoreffekter.

Der er dog også opmærksomhed på alternative brændstoffer til mindre 4-takts forbrændingsmotorer, såsom metanol, der på kort sigt nemt kan implementeres i nye skibe og udgøre et miljøvenligt alternativ til dieselbrændstof. Anlæg til storskala produktion af grøn metanol er pt. ved at blive opbygget, hvilket primært er drevet af Mærskes grønne ambitioner, og forventningen er at grøn metanol i nær fremtid vil være kommercielt tilgængelig.

5. Metoder og instrumenter anvendt til bestemmelse af emissioner

5.1 Metoder og instrumenter anvendt til måling efter ISO 8178

Måling af gasemissioner er bl.a. blevet udført med en samling af instrumenter som opfylder kravene til standarden ISO 8178 ift. gasmåling, herunder de specifikke måleprincipper som bruges til bestemmelse af de respektive regulerede gasemissioner, såvel som metoden til bestemmelse af partikelmasse. I standarden stilles der krav til måling af CO₂, CO, NO/NO₂, O₂ og kulbrinter (THC).

TABEL 1. Instrumenter der indgår i ISO 8178 måling af gasser og PM emission.

Gas komponent	Måleprincip	Instrument	Måle område
CO ₂	Non-dispersive Infra-Red (NDIR)	ABB EL3020	0-20 % vol. CO ₂ 0-2 % vol. CO ₂
CO	Non-dispersive Infra-Red (NDIR)	Sick Maihak SIDOR	0-1 % vol. CO
NO og NO ₂	Chemiluminescence Detection (CLD)	Ecophysics 822S	0-5000 ppm NO 0-5000 ppm NO _x
O ₂	Paramagnetic	Sick Maihak OXOR P	0-25 % vol. O ₂
THC	Flame Ionization Detector (FID)	Sick Maihak THC 3006	0-100.000 ppm C3 (propan-ækvivalent)

Måleprincippet for gravimetrisk måling af sodpartikler efter ISO 8178 består i at lede en lille delstrøm af røggassen gennem en fortyndingstunnel, hvor røggassen fortyndes ca. 10 gange med opvarmet og filtreret luft. Fortyndingsforholdet bestemmes ved måling af CO₂ koncentration før og efter fortynding. En delstrøm af den fortyndede gas ledes gennem to parallelle planfiltre, hvor soden afsættes. Planfiltrene vejes før og efter målingen, hvorved den opsamlede partikelmasse kan bestemmes. Med måling af det volumen som har passeret planfiltrene, kan partikelkoncentrationen i røggassen bestemmes. Hvis motorydelsen også er kendt, kan den specifikke udledning i g/kWh beregnes.

5.2 Øvrige instrumenter anvendt til måling af gasemissioner

Der er anvendt andre instrument-typer til gasmåling alt efter behovet i den konkrete opgave, hvor der ikke har været behov eller mulighed for måling efter ISO 8178.

AVL M.O.V.E. Portable Emissions Measurement System (PEMS) er en kompakt og transportabel instrumentpakke udviklet til måling af gas og partikelemmissioner fra biler, i det særlige *Real Driving Emissions* måleprogram, som er udviklet til Euro 6 køretøjer. Udstyret måler CO₂, CO, NO, NO₂, O₂ og partikel koncentration (PN) i realtid. Udstyret har været anvendt til referencemålinger på M/F Pernille og verificerende målinger på M/S Isefjord.

TABEL 2. AVL M.O.V.E Portable Emissions Measurement System.

Gas komponent	Måleprincip	Måle område
CO og CO ₂	Non-dispersive Infra-Red (NDIR)	0-20 % vol. CO ₂ 0-5 % vol. CO
NO og NO ₂	Non-dispersive Ultra-Violet (NDUV)	0-5000 ppm NO 0-2500 ppm NO ₂
O ₂	Electro-chemical cell (EC)	0-21 % vol. O ₂

Testo 350 Maritime er et bærbart instrument udviklet til røggasmåling på marine dieselmotorer. Den maritime version er godkendt af DNV GL til måling efter MARPOL Annex VI og NO_x Technical Code 2008, kap. 6.3 (*Simplified measurement method*) og kap. 6.4 (*Direct measurement and monitoring method*). Instrumentet har været anvendt til måling på World Calima i forbindelse med måling af virkningsgraden på den eftermonterede SCR.

TABEL 3. Testo 350 Maritime.

Gas komponent	Måleprincip	Måle område
CO ₂	Non-dispersive Infra-Red (NDIR)	0-40 % vol.
CO	Electro-chemical cell (EC)	0-3000 ppm
NO og NO ₂	Electro-chemical cell (EC)	0-3000 ppm NO 0-500 ppm NO ₂
SO ₂	Electro-chemical cell (EC)	0-3000 ppm
O ₂	Electro-chemical cell (EC)	0-25 % vol.

Gasmet CX 4000 er en FT-IR analysator der udover de regulerede gasser (CO, CO₂, NO_x, også måler ammoniak (NH₃) og lattergas (N₂O). FT-IR måleprincippet er baseret på analyse af røggassens absorption i det infrarøde spektrum. De forskellige molekyler, som ønskes målt, har unikke absorptionsmønstre, hvilket gør det muligt at bestemme koncentrationerne af de forskellige gasarter samtidigt med stor nøjagtighed. FT-IR instrumentet er anvendt ved måling på World Calima ved bestemmelse af virkningsgraden af den eftermonterede SCR.

5.3 Øvrige instrumenter anvendt til måling af partikelemissioner

Måling af partikelemissioner blev udført med et udvalg af instrumenter, såvel som gravimetrisk med fortyndingstunnel. Til partikelmåling er instrumenterne i TABEL 4 anvendt.

Instrumenterne anvender forskellige måleprincipper. **CPC** er forkortelsen for **Condensation Particle Counter**, hvor partiklerne passerer gennem en atmosfære af butanol, som lægger sig på partiklerne og gør det muligt at detektere dem med en fotodetektor. **Charge diffusion** er et måleprincip baseret på at partiklerne opsamler en elektrisk ladning, hvor mængden af opsamlede elektroner er proportional med koncentrationen af partikler. I **light scattering** princippet måles lys der afbøjes og reflekteres af partiklerne. Endelig anvendes en **scanning mobility particle sizer (SMPS)** som ved variation af elektrisk spænding kan måle størrelsesfordeling af partikler der passerer gennem instrumentet.

Instrumenterne DustTrak, P-Trak, CPC 3007, DiSCmini, og NanoScan er udviklet til måling af partikler i fri luft. Røggassen er derfor fortyndet før måling med roterende diskfortynder af mærket Testo, Model MD19-3.

Der er ved måling med alle instrumenter undtagen Pegasor Mi3 anvendt en katalytisk ovn af mærket Catalytic Stripper, Model CS015, der fjerner flygtige forbindelser fra røggassen, som

kan kondensere og danne partikler. Denne proces sikrer at der kun måles partikler med fast kerne af kulstof.

Instrumentet Pegasor Mi3 måler røggassen varmt og har indbygget variabel fortynding med trykluft og kan måle partikelkoncentration i røggassen både før og efter partikelfiltre.

TABEL 4. Måleinstrumenter til partikelmåling.

Parameter	Instrument	Måleprincip	Størrelsesområde	Koncentrationsområde
PM/PN	Pegasor Mi3	Charge Diffusion	15-1000 nm	0-250 mg/m ³
PM	DustTrak	Light scattering	0,1-15 µm	0,001–150 mg/m ³
PN	P-Trak	CPC	20-1000 nm	0-500.000 #/cm ³
PN	CPC 3007	CPC	10-1000 nm	0-100.000 #/cm ³
PN	DiSCmini	Charge Diffusion	10-700 nm	2000-500.000 #/cm ³
PN/PSD	NanoScan	SMPS	10-420 nm	100 – 1.000.000 #/cm ³

6. Purefi & World Marine Offshore



World Calima

6.1 Beskrivelse af World Marine Offshore

Virksomheden World Marine Offshore blev oprettet i 2012, med det primære formål at udleje serviceskibe med besætning til de virksomheder som driver og servicerer offshore vindmølleparker. Serviceskibene kan transportere hold med serviceteknikere ud til de faste beboelsesplatforme eller direkte til vindmøllerne, hvor de bliver overført til vindmøllens skibet ligger an mod møllens fundament.

De fleste skibe i selskabet er designet af World Marine Offshore. De er overvejende bygget som katamaraner eller trimaraner, hvor motorene er placeret under vandlinjen og driver propeller eller jets. Skibene er bygget til at transportere passagerer ud til havvindmøllerne og beboelsesplatformene, hvor skrogkonstruktionen bidrager til at øge skibets stabilitet og mindske generne ved høj søgang generelt.

World Marine Offshore har opereret i en branche præget af intens konkurrence, hvor det bl.a. kan nævnes at der i Esbjerg alene er 6-7 direkte konkurrenter med lignende skibe. Virksomheden er dog lykkedes med at indgå kontrakter i andre lande, herunder USA og Taiwan, hvor skibene også har arbejdet på offshore vindmølleparker under opbygning.

World Marine Offshore indgav konkursbegæring 10. januar 2023, efter at der flere år i træk havde været underskud på driften af selskabet, samtidigt med at der var anlagt sag med et stort krav mod selskabet af en udenlandsk partner.

6.2 Beskrivelse af Purefi A/S

Purefi A/S har næsten 20 års erfaring i design, konstruktion og montering af partikelfiltre og SCR-katalysatorer i en forretning der har udviklet sig fra personbiler og tunge køretøjer videre til non-road maskiner og skinnekørende materiel. De fleste løsninger bliver designet og konstrueret af virksomheden selv, inklusive styringselektronik til urea dosering og dosering af

diesel i systemer med aktiv regenerering. Der anvendes keramiske filtre fra bl.a. Haldor Topsøe og danske LiqTech i produktionen af partikelfiltrene. Løsningerne monteres i stort omfang bl.a. på ældre tunge køretøjer der skal kunne køre i miljøzoner.

Med det maritime projekt har Purefi taget et stort skridt ind på markedet for maritime emissionsløsninger. Undervejs i projektet er Purefi blevet leverandør af færdige løsninger til flodpramme i Holland, hvor reduktion af CO₂ og NO_x emissioner skal kunne dokumenteres i byggeprocesser, med det formål at sænke emissionerne fra byggeprocesser i både forsyningskæden og selve byggeprocessen. Med partikelfiltre og NO_x katalysatorer monteret på de skibe der sejler inde i landet sænkes emissioner af NO_x og partikler til niveauer svarende til moderne lastbiler, og dertil en sænkning af støjen fra skibene.

6.3 Referencemålinger på World Mistral

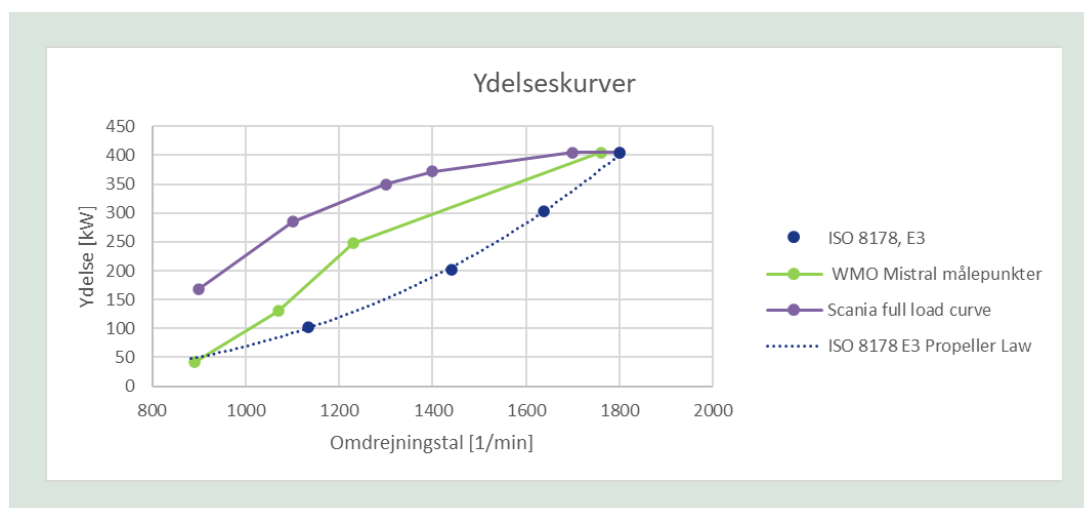
Der blev udført referencemålinger af gas og partikelemissioner på skibet World Mistral i oktober 2017. Målingerne blev udført i Esbjerg havn, hvor World Marine Offshore har deres kontor og hovedparten af deres skibe liggende.

World Mistral, IMO 9681302, er bygget i 2013. Det er udstyret med fire Scania DI13 motorer på hver 405 kW @ 1800 RPM, som parvis driver to stilbare propeller. Skibet har to Perkins hjælpemotorer på 29 kW.

Målingen blev udført med variabel belastning på motorerne. I det sejlads med skibet generelt medfører flere unødvendige udfordringer, blev det aftalt at udføre målingerne ved at skibets motorer blev belastet mens skibet lå stille. Dette blev udført ved at lade skibets forende trykke mod kajkanten, hvilket skibene er indrettet specifikt til når de anløber havvindmøller.

Målingen blev udført med udstyr til gasmåling og partikelmasse måling med det gravimetrisk princip med fortyndingstunnel, udført i overensstemmelse med ISO 8178 jf. beskrivelserne i kapitel 5. Måling af partikelemissioner blev også udført med TSI NanoScan til bestemmelse af partikelantal og størrelsesfordeling, samt med en DustTrak DT1, til optisk bestemmelse af partikelmasse.

Det var oprindeligt tanken at der skulle udføres målinger i fire belastninger, fastlagt af testcyklussen E3 i standarden ISO 8178. Dette forudsatte dog at stigningen på propellerne kunne stilles manuelt, hvilket ikke på daværende tidspunkt var muligt. Stigningen styres automatisk gennem en forprogrammeret kurve, som udnytter motorens kræfter mere effektivt i hele omdrejningstallet, hvilket giver skibet en bedre brændstoføkonomi. Målingerne kom således til at ligge på denne kurve, som er markeret med grønt på FIGUR 2.



FIGUR 2. Grafen viser motorens effektkurve (øverst), målepunkter (midterst) og målepunkter på en idealiseret propeller-kurve jf. ISO 8178, E3 (nederst).

De målte og beregnede værdier er anført i TABEL 5.

TABEL 5. Beregnede emissioner for World Mistral.

ISO 8178 E3	Enhed	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4
Load (setpoint)	%	100	75	50	25
Omdrejningstal	RPM	1760	1230	1070	890
Motoreffekt	kW	405	248	134	41
NO _x	g/kWh	10,4	8,8	11,6	19,2
PM	g/kWh	0,14	0,08	0,17	0,34
PN	#/kWh	3,3x10 ¹³	1,6x10 ¹³	3,4x10 ¹³	1,4x10 ¹³

De målte koncentrationer af NO_x var høje selv ved lave omdrejningstal og moderat belastning, men til gengæld var partikelemissionen tilsvarende lidt lavere end forventet. Som følge af at målingen ikke kunne gennemføres efter standarden var det dog ikke muligt at beregne en vægtet værdi for NO_x, som kunne sammenlignes med emissionsgrænsen i IMO Tier II og motorens EIAPP-certifikat.

De høje NO_x emissioner betyder at SCR-katalysator vil have en stor effekt, og de lave PM koncentrationer betyder at partikelfiltrene kan dimensioneres noget mindre og stadig have tilstrækkelig kapacitet til at opsamle sod i længere perioder hvor der ikke er temperatur til at opnå løbende afbrænding.

6.4 Specifikation af emissionssystemet

Planen var at eftermontere emissionssystemer med partikelfiltre og SCR på de fire hovedmotorer, i en samlet løsning som skulle monteres på toppen af World Mistral, eller det identiske skib World Scirocco. Denne tilgang blev valgt efter at det var blevet vurderet at der ikke var tilstrækkelig plads i skibets motorrum. Selvom det normalt er mest optimalt at have systemerne tæt på motorerne for at få den højeste mulige temperatur ind i systemet, blev det vurderet at udstødningsrørene var tilstrækkeligt isoleret til at holde temperaturen i udstødningen høj nok til at sikre afbrænding af sod i partikelfiltrene, selvom disse blev placeret udenfor på skibet.

Forud for dimensionering af emissionssystemet til World Mistral udførte Purefi målinger af skibets driftsprofil. Der blev installeret sensorer til måling af NO_x og udstødningstemperatur på to motorer, så driftsforholdene kunne monitoreres under normal drift.

Skibene driftes under meget varierende forhold, hvor skibet ofte kan ligge i venteposition på havet i lang tid, i nogle tilfælde over natten, med lav belastning på motorerne. Som hovedregel foregår transit med høj belastning af motorerne, hvilket sikrer at der her er tilstrækkelig temperatur i udstødningen til at afbrænde de opsamlede partikler.

Purefi valgte at designe systemet som en løsning med passiv regenerering, dvs. uden brug af dieselindsprøjtning som hæver temperaturen i partikelfilteret. Denne løsning blev valgt, da det på baggrund af de indledende målinger blev vurderet at temperaturen ville være tilstrækkelig til at sikre kontinuert afbrænding af sod under normal drift.

6.5 Brændstofkvalitet og svovlindhold

Emissionssystemer udviklet til køretøjer i landtransport sektoren kan som hovedregel ikke fungere med brændstof der indeholder svovl, da disse emissionssystemers katalytiske belægninger er udviklet og tilpasset brændstof med meget lavt svovlindhold. Svovlindholdet for brændstoffer til køretøjer er i EU i flere omgange blevet reguleret, fra et tilladt niveau på 2000 ppm i 1994, til 10 ppm gældende fra 2009, hvor partikelfiltre blev et de facto krav for at overholde Euro 5 i lette køretøjer.

Den lave grænseværdi skyldes i første omgang fokus på at forbrænding af svovl danner SO₂, som er både sundhedsskadeligt og miljøskadeligt, idet det danner svovlsyre i atmosfæren som bliver til såkaldt syrerregn, der forsuret jord, søer mm. på land. Reguleringen af partikelforurening medførte at der fra omkring 2005 begyndte at blive monteret partikelfiltre på dieselmotorer, hvilket samtidig stillede krav til at der kunne tankes brændstof med meget lavt svovlindhold, for at undgå at de katalytiske belægninger i systemerne blev deaktiveret af svovl.

Der har imidlertid ikke været samtidig opmærksomhed på regulering af svovludledninger fra skibe, hvor det i dag fortsat er tilladt at anvende brændstof med langt højere svovlindhold. De danske farvande ligger indenfor det europæiske ECA-område, hvor skibe lovligt kan bruge brændstof med op til 1000 ppm (0,1 %) S. Udenfor ECA-området kan skibe lovligt anvende brændstof med op til 5000 ppm (0,5 %) S.

Det blev tidligt i projektet klarlagt at World Marine Offshore benytter diesel med et langt højere svovlindhold end marine diesel eller transportdiesel med op til 50 ppm S, som er den brændstofkvalitet der ellers ofte bruges på skibe med små motorer. Dette skyldes at der er en ganske markant besparelse i at tanke brændstoffer af lavere kvalitet, som også har et højere svovlindhold. World Marine tanker brændstof med varierende svovlindhold alt afhængig af hvor de arbejder. Ifølge WMO være op imod 500.000 DKK i ekstra omkostning om året, hvis de i stedet valgte at bruge brændstof med kun 50 ppm svovl.

Purefi havde fra projektets start ikke erfaring med svovltolerante løsninger, og var derfor ikke i stand til at levere et system der var tolerant overfor høje svovlkoncentrationer. Indledningsvis forsøgte World Marine Offshore at finde kunder som var villige til at indgå kontrakter, hvor kunderne bandt sig til at bruge brændstof med lavt svovlindhold. Dette var dog ikke muligt, og det blev derfor nødvendigt at gøre emissionssystemet svovltolerant.

Purefi tog derfor kontakt til Umicore, som bl.a. arbejder med katalysatorer til skibe, hvor svovltolerance er påkrævet. Umicore indgik aftale med Purefi om at levere den nødvendige svovltolerante coating til oxidationskatalysatorer og partikelfiltre, som er udviklet netop til skibe.

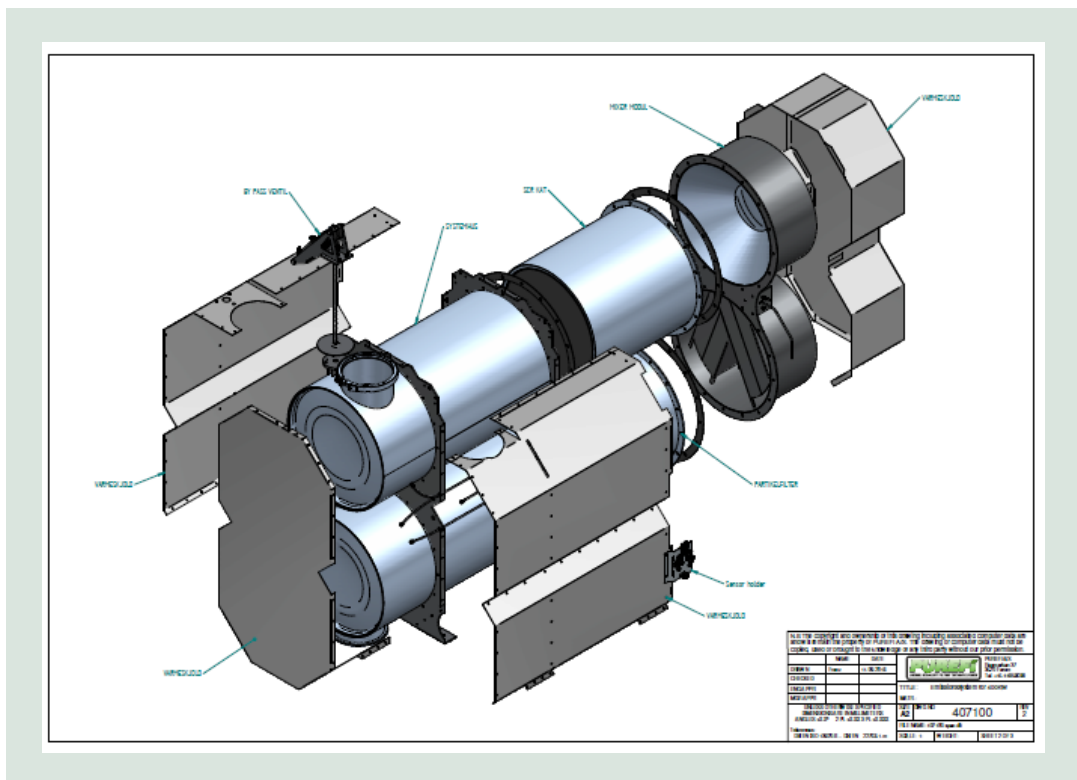
6.6 Opbygning af emissionssystem

Emissionssystemet er opbygget med fire hovedkomponenter: Diesel oxidations katalysator (DOC), partikelfilter (DPF), NO_x katalysator (SCR) og ammoniak-slip katalysator (ASC). På FIGUR 3 ses to cylindere, hvor DOC og DPF er monteret i den nederste, mens SCR og ASC er monteret i den øverste. På figuren ses også den udvendige aktivering af bypass ventilen, som åbner for bypass mellem de to enheder internt, så røggassen kan passere udenom systemet.

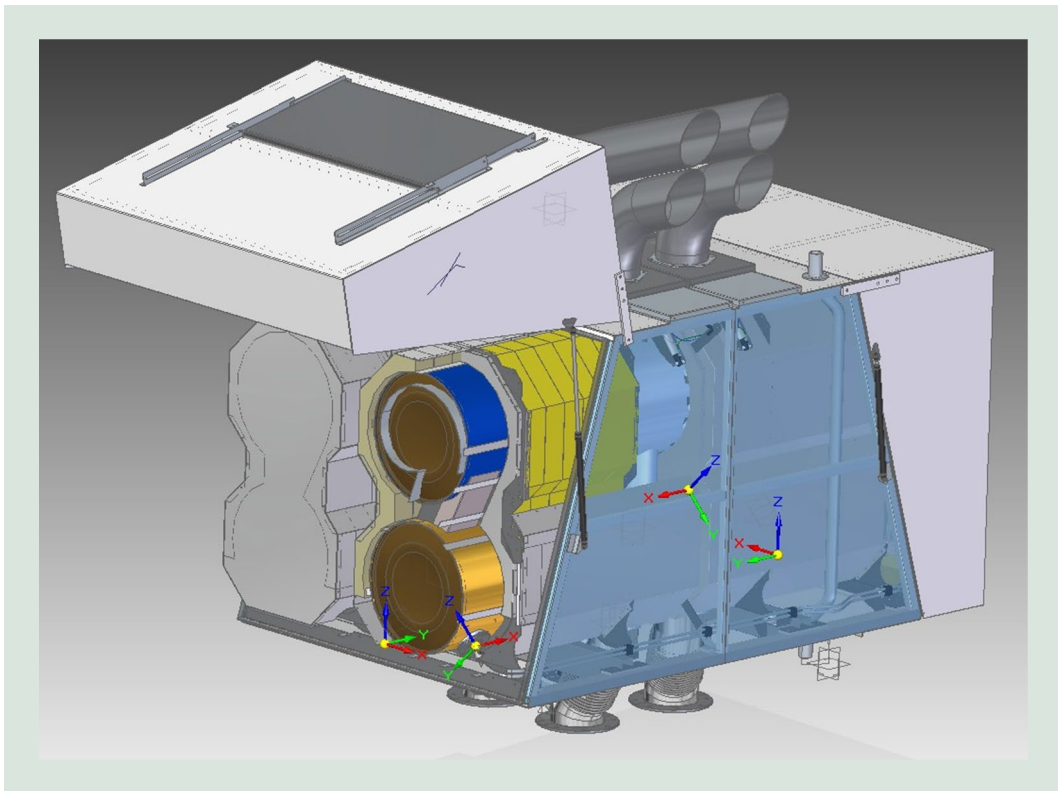
De fire systemer blev monteret samlet i en kasse, som kunne monteres direkte på skibet. På FIGUR 4 ses den samlede konstruktion. Emissionssystemet blev designet til World Mistral eller Scirocco, som har fire 13 liters Scania hovedmotorer med omkring 400 kW motoreffekt hver. Der blev produceret fire systemer, så hver motor havde et system. Nederst på konstruktionen ses de fire flangesamlinger at montere direkte på skibets afgangsrør.

I designet af systemerne er adgangen til at servicere systemet indtænkt. Bundpladen på de to systemer kan afmonteres uden at afmontere systemerne, hvilket giver adgang til både SCR og DPF, som kan trækkes ud af systemet. Dette er særligt relevant idet de mange årlige driftstimer og høje brændstofforbrug vil medføre at filtrene skal renses for aske periodisk. Intervallet er ikke fastlagt, og vil være meget afhængigt af bl.a. brændstofkvalitet, smørelieferbrug mm.

Det samlede emissionssystem med alle fire enheder stod klar i starten af 2020, men partikelfiltre og oxidationskatalysatorerne havde længere leveringstid da de skulle til Canada for at blive belagt med svovltolerant coating. Filtre og katalysatorer blev bestilt i starten af 2020, men blev først leveret i januar 2021, bl.a. som følge af længere fragttider i det første år med COVID-19.



FIGUR 3. Enkelt emissionssystem med udvendig isolerende beklædning.



FIGUR 4. 3D skitse af emissionssystemet designet til World Mistral.



Det samlede emissionssystem til World Mistral

Billedet er taget ved Purefi i Farum i februar 2020.

Den samlede vægt af konstruktionen og tank til 1000 liter urea blev beregnet til omkring 2,3 ton, hvilket med afmontering af de oprindelige lyddæmpere burde kunne holde vægtændringen indenfor rammerne af tilladelige 2% af skibets vægt på ca. 90 ton. Urea-

tanken skulle have været placeret længere nede i skibet hvor vægtforøgelsen ikke ville påvirke skibets tyngdepunkt og stabilitet.

6.7 Ændring i valg af skib

Skibene Scirocco og Mistral, som var de to skibe i klassen Windcarrier 25 som emissionssystemet var designet til, blev i marts 2021 sendt til Taiwan til et offshore vindmølleprojekt før systemerne kunne blive installeret på et af dem. Der var enighed om at afstanden gav for store udfordringer til at det gav mening at fortsætte med installation og idriftsættelse samt monitorering af systemerne. Det blev derfor besluttet at udføre demonstrationen på et af de skibe, som stadig var i Danmark.

Idet motorerne på disse skibe er større og kraftigere, blev det besluttet at udføre demonstrationen på kun en motor. Den væsentligste bekymring her var at modtrykket i systemerne ville blive for højt og på sigt medføre risiko for skade på turboladere, og i så fald ville skaden være begrænset til én motor, hvilket sikkerhedsmæssigt ville være forsvarligt. Det ville også være muligt at udføre installationen uden at det medførte behov for godkendelser fra klaseselskabet.

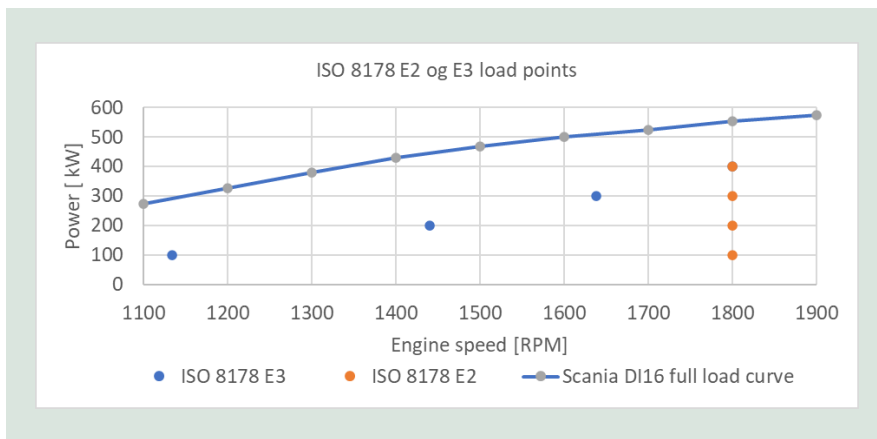
6.8 Idriftsættelse på World Calima

Et af de fire producerede emissionssystemer blev monteret på World Calima i oktober 2022, mens skibet var i dok i Hvide Sande. SCR-systemet blev efterfølgende idriftsat 22. november 2022, hvor Purefi foretog indkøring af urea-doseringen mens skibet lå i Esbjerg havn, mens Teknologisk Institut stod for bestemmelse af emissionssystemets effektivitet.

Idriftsættelse og indkøring af SCR blev foretaget parallelt med bestemmelse af NO_x-reduktionen og effektiviteten af partikelfilteret. Målsætningen var at optimere NO_x-reduktionen så emissionerne kunne overholde IMO Tier III. Målsætningen for partikelfilteret var at overholde grænseværdien for partikler i EU Stage V.

Der var planlagt et testforløb, hvor motoren skulle belastes efter testcyklusserne E2 og E3, under ISO 8178. Motorerne på World Calima er dog på ca. 600 kW og dermed ca. 50 % kraftigere end World Mistrals motorer på ca. 400 kW. Det blev derfor besluttet at indrette testforløbet efter de oprindelige motorers specifikation på 400 kW, så røggasmængden og koncentrationer ville svare nogenlunde til de motorer som systemet var tiltænkt.

Cyklussen E2 udføres ved motorens nominelle omdrejningstal (1800 RPM) mens E3 udføres i fire belastningspunkter ved forskellige omdrejningstal langs en ideel propellerkurve, som ville være den belastningskurve motoren ville følge hvis den var koblet med en fastbladet propel. Skibets motorer er oprindeligt certificeret efter både E2 og E3.



FIGUR 5. Belastningspunkter anvendt i afprøvningen.

Emissioner på gasfase blev målt med Testo 350 før emissionssystemet og med en Gasmeter CX 4000 FTIR efter systemet, som også målte NH₃ slip.

Partikelemissionerne blev primært målt før emissionssystemet, for at få et indblik i hvor meget sod motoren sender ind i partikelfilteret, med henblik på at estimere hvor lang tid skibet vil kunne ligge med lav last på motorerne, før der er behov for at regenerere filtrene. Der blev dog også udført måling efter partikelfilteret ved høj last, for at bestemme filtreringseffektiviteten.

De målte værdier er ud fra den målte effekt og beregnet volumenstrøm af udstødning omregnet til specifikke emissioner, som regnes i g/kWh for NO_x og PM, mens partikelkoncentration (PN) regnes i antal partikler per kWh. Målet for projektet var mindst 80 % reduktion af NO_x og mindst 98 % reduktion af partiklerne, hvilket systemet har opfyldt.

Der er beregnet en reduktion af NO_x på 91 % i E2 og 94% i E3, hvilket er over målsætningen på 80 %. Det er meget høje reduktioner, som tilmed er realiseret med meget lave udslip af NH₃. Purefi har efterfølgende vurderet at SCR-katalysatoren har været overdimensioneret, idet der fra start var usikkerhed omkring hvor effektiv katalysatoren ville være.

TABEL 6. Målte og beregnede værdier i ISO 8178 E2.

ISO 8178 E2	Enhed	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Vægtet
Omdrejningstal	RPM	1800	1800	1800	1800	
Load (setpoint)	%	98	72	54	36	
Motoreffekt	kW	541	400	300	200	
NO _x , ind	g/kWh	7,9	7,3	8,9	10,7	9,1
NO _x , ud	g/kWh	0,38	0,39	0,81	1,00	0,78
Reduktion	%	95	95	91	91	91
PM, ind	g/kWh		0,20	0,19	0,046	0,15
PM, ud	g/kWh		0,000016			
Reduktion	%		>99,9			
PN, ind	#/kWh		1,1x10 ¹⁵	8,9x10 ¹⁴	2,2x10 ¹⁴	7,4x10 ¹⁴
PN, ud	#/kWh		7,5x10 ¹⁰			
Reduktion	%		>99,9			

Reduktionen i PM og PN er målt til omkring 99,99 %, hvilket ligeledes er over projektets målsætning på 98 %. Dette viser at både partikelfilteret og systemets bypass ventil er helt tætte, hvilket erfaringsmæssigt kan være årsagen til lavere reduktioner end forventet. Reduktionen er på niveau med eller over hvad der er målt i andre sammenhænge, herunder personbiler og tunge køretøjer.

TABEL 7. Målte og beregnede værdier i ISO 8178 E3.

ISO 8178 E3	Enhed	Mode 1	Mode 2	Mode 3	Mode 4	Vægtet
Omdrejningstal	RPM	1800	1640	1440	1130	
Load (setpoint)	%	72	58	46	32	
Motoreffekt	kW	400	300	200	100	
NO _x , ind	g/kWh	7,3	11,5	14,0	22,6	12,7
NO _x , ud	g/kWh	0,39	0,68	0,78	1,59	0,77
Reduktion	%	95	94	94	93	94
PM, ind	g/kWh	0,20	0,28	0,11	0,01	0,21
PM, ud	g/kWh	0,000016				
Reduktion	%	99,99				
PN, ind	#/kWh	1,1x10 ¹⁵	1,4x10 ¹⁵	5,4x10 ¹⁴	2,7x10 ¹³	9,9x10 ¹⁴
PN, ud	#/kWh	7,5x10 ¹⁰				
Reduktion	%	99,99				

Purefi havde ud over projektets mål en forventning til at systemet kunne overholde grænseværdierne i IMO Tier III og EU Stage V Inland Waterways (kategori IWP/IWA), gældende for nye skibe der sejler på floder og søer i EU-medlemslande. Emissionssystemet overholder også disse grænseværdier.

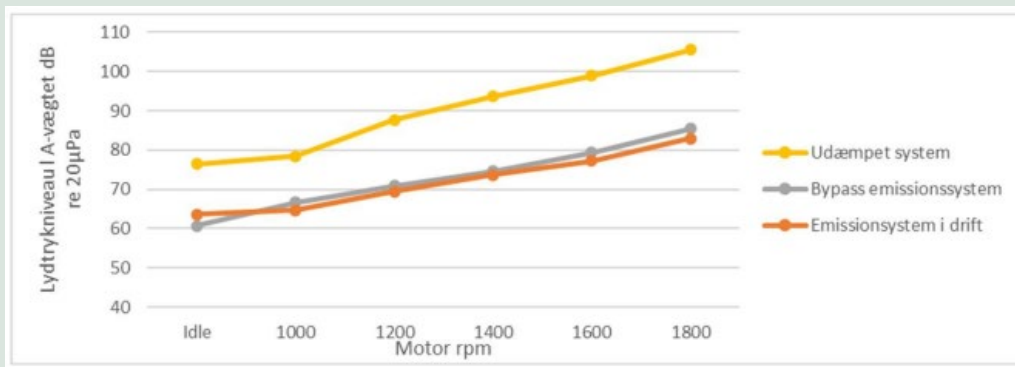
TABEL 8. Sammenligning af grænseværdier under IMO Tier III og EU Stage V, med de beregnede specifikke emissioner.

	NO _x [g/kWh]	PM [g/kWh]	PN [g/kWh]
IMO Tier III	2,0	-	-
EU Stage V, P >300 kW	1,8	0,015	1x10 ¹²
World Calima med Purefi System	0,78	0,000016	7,5x10 ¹⁰

6.9 Bestemmelse af opnået støjreduktion

Der blev udført måling af støjniveau på World Calima den 18. januar 2023. Målingerne blev udført direkte ved udstødningerne af en støjmålingseksperter fra Teknologisk Institut. Målingerne er detaljeret beskrevet i en særskilt rapport,

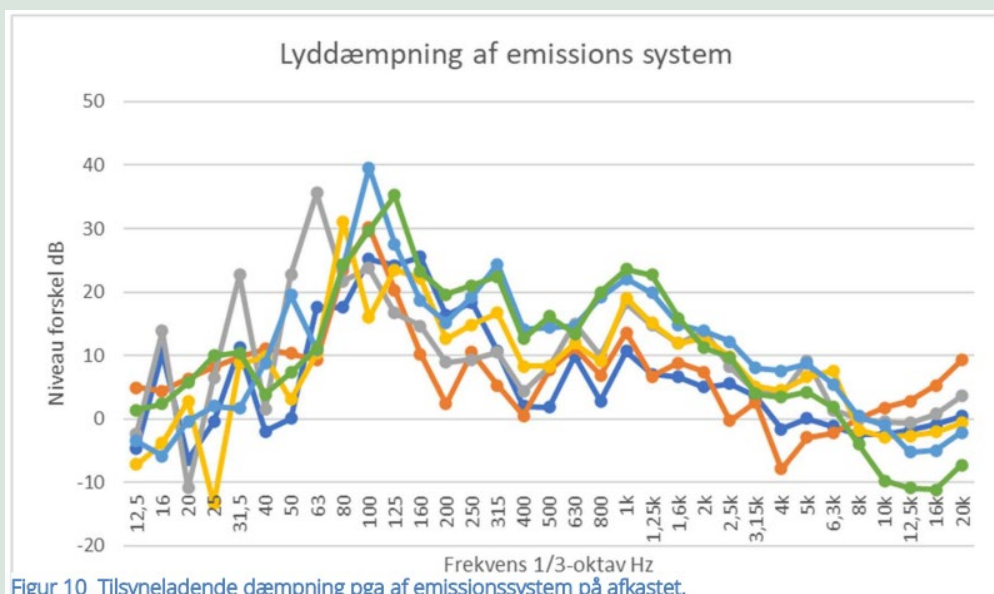
Målingerne blev udført indledningsvis på motoren med emissionssystem, derefter på samme motor med bypass og endeligt på en anden motor, som kun var udstyret med oprindelig lyddæmper. Det skal her bemærkes at lyddæmperen ikke var afmonteret på det rør som emissionssystemet var monteret på, så den opnåede støjreduktion er udover det som dæmperen leverer. På FIGUR 6 ses de tre målinger, som er udført ved omdrejningstal fra tomgang op til 1800 RPM. Motoren arbejdede med en belastning på 30-50 %, idet propellen var indkoblet i neutral stilling.



FIGUR 6. Lydtrykkniveauer målt hhv. med og uden emissionssystem, samt med bypass åbent på emissionssystem.

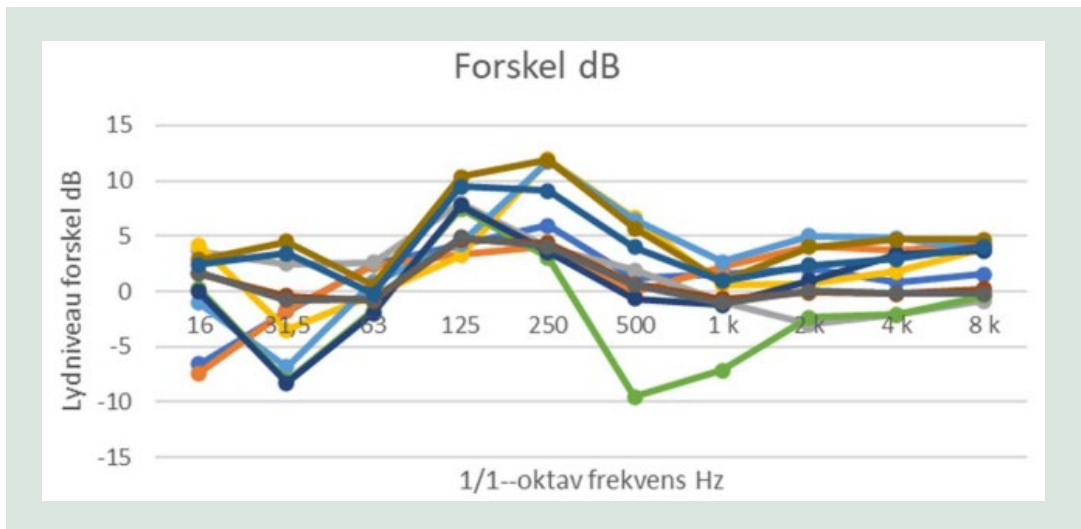
Emissionssystemet med partikelfilter og SCR fungerer som en effektiv lydæmper, som følge af lydabsorption i det porøse partikelfilter og passagen gennem emissionssystemet, hvor røggassen passerer gennem flere kamre mellem komponenterne. Af FIGUR 6 ses det, at selv når der åbnes for det integrerede bypass, vil systemet stadig levere en så stor dæmpning at der sandsynligvis ikke vil være behov for yderligere dæmpning for at overholde gældende krav til lydniveau fra udstødningen. På FIGUR 7 er dæmpningen vist opdelt på frekvenser, baseret på de målte forskelle med og uden emissionssystemet. Den noget ujævne dæmpningskarakteristik kan forklares ved det komplekse lydbillede, som opstår ved resonanser i de lange rør.

Der blev også gennemført måling inde i skibet. Idet der generelt er et meget lavt støjniveau på skibets beboelsesdæk, var de målte og oplevede forskelle ikke særligt markante sammenlignet med ophold nær skibets udstødning. I FIGUR 8 ses det at den største dæmpning lå ved 125-250 Hz, hvor emissionssystemet sænkede lydtrykkniveauet med op til 12 dB.



Figur 10 Tilsyneladende dæmpning pga af emissionssystem på afkastet.

FIGUR 7. Dæmpning gennem frekvensområdet, opdelt i 1/3 oktav bånd.



FIGUR 8. Målt lyddæmpning inde i skibet.

6.10 Driftserfaring

Erfaringen med systemet begrænser sig til de få ture, som skibet nåede at få med systemet inden WMO indgav konkursbegæring. Systemet blev monteret på Hvide Sande skibsværft i oktober 2022, hvorefter skibet har sejlet til Esbjerg, videre til Eemshaven i Holland og retur til Esbjerg. Samlet rejsetid Holland t/r er ca. 30 timer, med et forbrug på ca. 2,5 m³ brændstof på den motor hvor systemet har været monteret. Herefter har skibet ligget i Esbjerg havn og afventet charter.

Målingerne i november og januar blev udført efter den begrænsede driftsperiode, men påviste både en NO_x reduktion over 90 % og over 99,9 % reduktion i partikelantal. Dette peger på at både NO_x reduktion og partikelfilter er tolerante overfor brændstoffets svovlindhold og leverer de forventede reduktioner. Som følge af den korte driftsperiode er det dog ikke muligt at vurdere om der på længere sigt vil være en degradering af systemets effektivitet, ligesom der ikke blev opnået erfaring med regenerering af partikelfilteret under drift.

Emissionssystemet blev afmonteret efter de sidste målinger i midten af januar 2023, idet der var stor usikkerhed om selskabets og dermed skibenes fremtid, hvorfor det ikke gav mening at lade systemet blive på skibet.

7. Exilator og Hundested-Rørvig Færgesfart



Færgen M/F Isefjord

7.1 Beskrivelse af Hundested-Rørvig Færgesfart

Hundested-Rørvig Færgesfart er et privatejet rederi, som står for færgesfart mellem Hundested og Rørvig. Rederiet ejer to færges, M/F Nakkehage og M/F Isefjord, som har fået eftermonteret partikelfiltre.

Rederiets primære og nyeste færges M/F Isefjord, IMO 9615781, er bygget i 2013. Hovedmotorerne er to Cummins QSK19-M hver med en MCR-rating på 373 kW @ 1800 RPM. De er placeret i hver ende af skibet, hvor de er koblet med fast aksel til et propeldrev af azimuth typen. Skibet har derudover to Cummins generatormotorer af typen 6CT8.3-D(M) på hver 122 kW. Motorerne er certificeret under IMO Tier II. Dette betyder at skibets emissioner af NO_x generelt er lavere end for skibe med ældre motorer, men der er ikke installeret systemer til efterbehandling af udstødningen.

Skibet er bygget som en såkaldt dobbelt-ender, hvor biler og tunge køretøjer kan køre på fra den ene ende og ud gennem den anden ende. Færges er symmetrisk bygget og kan derfor sejle i begge retninger. Begge hovedmotorer er i drift under overfart, idet den forreste motor løber med i lav last og primært bruges til at styre retningen, mens bagerste motor står for fremdrift. Dette betyder at motorerne skiftes til at have høj last og dermed høj udstødningstemperatur, hvilket er med til at sikre, at filtrene kan afbrænde partikler under hver anden overfart.

Skibets generatormotorer er skiftevis i drift ca. en uge ad gangen. Motorerne kører generelt med meget lav last, hvilket betyder at udstødningstemperaturen er lav. Dette udgør en særlig udfordring i forhold til drift med partikelfiltre, idet sodpartiklerne ikke vil kunne afbrændes løbende i normal drift med passive partikelfiltre.

7.2 Beskrivelse af Exilator ApS

Exilator ApS er en virksomhed som er oprettet med det primære formål at levere partikelfiltre til skibe. Virksomheden fokuserer på mindre skibe med motorer op til 1 MW, og orienterer sig mod særligt mindre skibe som lystbåde, passagerskibe og lignende.

Et særligt forretningssegment for Exilator er luksusyachter, som er udbredte i den sydlige del af Europa, særligt i havnene i Middelhavet. Her er filternes funktion bl.a. at sikre at udstødning fra hovedmotorer og generatorerne ikke giver synlig forurening på dækket eller oliefilm i vandoverfladen, som kan være til gene for skibets passagerer.

Partikelfiltrene er udstyret med katalytisk coating, som sikrer kontinuert passiv afbrænding af partikler ved udstødningstemperatur fra omkring 300 °C. Exilator designer og opbygger deres partikelfiltre med fokus på at opnå en høj lyd-dæmpning, så skibene som udgangspunkt kan undvære deres oprindelige lyd-dæmper. Dette har særlig stor betydning når der er begrænset plads til eftermontering.

7.3 Referencemålinger på M/F Isefjord

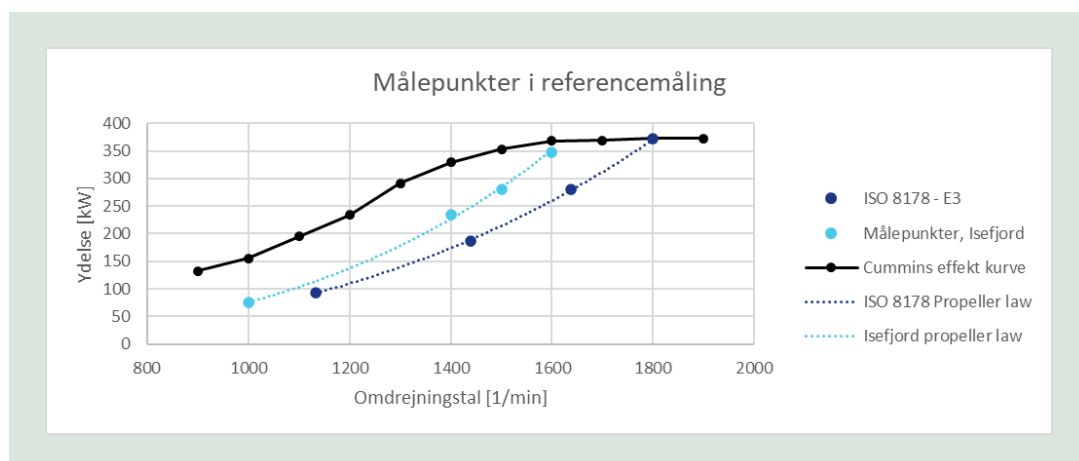
Der blev udført referencemålinger af gas- og partikelemissioner på M/F Isefjord i september 2017. Måling af emissioner blev udført med emissionsudstyret beskrevet i kapitel 5.

Målingerne blev udført under overfart på Rørvig-endens hovedmotor. Der blev målt ved flere omdrejningstal, men det var ikke muligt at styre belastningen på motoren direkte. Motorens belastning i % kunne dog udlæses fra et display ved motoren og blev brugt til at vurdere motorens ydelse ved de givne omdrejningstal. Brændstofforbruget blev ligeledes aflæst fra display.

Målingen blev udført med skibet i normal drift, men det blev aftalt med skibets kaptajn at der kunne varieres på hovedmotorens omdrejningstal, når den blev brugt til fremdrift.

Fremdriftsmotoren arbejder oftest omkring ca. 1500 RPM, så der blev udført måling ved 1400, 1500 og 1600 RPM. Der blev også målt ved 1000 RPM, som motoren kører ved når skibet sejler den anden vej og propellen primært bruges til styring.

Motorens belastning blev aflæst og omregnet til ydelse i kW. På FIGUR 9 ses det at de målte punkter faktisk ligger på en propellerkurve, som dog ligger lidt højere end den kurve som udgøres af punkterne i en test, hvor punkterne er fastlagt efter ISO 8178 E3.



FIGUR 9. Hovedmotorens ydelseskurve (øverst), lastpunkter i måling (midterst) og ideel propellerkurve over de fire punkter i ISO 8178 E3 måling.

Ud fra de målte og aflæste værdier blev de specifikke emissioner af NO_x og partikelmasse beregnet og angivet i TABEL 9. Når skibet lå i havn var bagerste motor indkoblet i tomgang med propellen for at holde skibet mod lejet, mens forreste motor var udkoblet, men stadig i tomgang. Det gav anledning til to forskellige målinger på samme motor ved 650 RPM, måling (a) med indkoblet propel og måling (b) med propel udkoblet.

TABEL 9. Beregnede emissioner for M/F Isefjord ved referencemåling.

	Enhed						
Omdrejningstal	RPM	1600	1500	1400	1000	650 (a)	650 (b)
Load (aflæst)	%	93	75	63	20	9	2
Motoreffekt	kW	347	280	235	75	34	7,5
NO _x	g/kWh	5,5	5,9	7,4	8,7	8,5	10,2
PM, ISO8178	g/kWh	0,11	0,13	0,15	0,048	-	-
PM, DustTrak	g/kWh	-	0,12	-	0,037	0,11	0,13
PN	#/kWh	-	2,1x10 ¹⁴	-	1,2x10 ¹⁴	2,2x10 ¹⁴	1,3x10 ¹⁴

Det bemærkes umiddelbart at motorens emissioner af NO_x ser ud til at ligge pænt under grænseværdien i IMO Tier II, hvor disse motorer må udlede op til ca. 7,8 g/kWh.

PM emissionerne ligger på det forventede niveau, hvilket svarer til et niveau mellem EU Non-road Stage IIIB og Stage IV.

Målt på antal vil partikelfiltre skulle fjerne ca. 99,5 % af partiklerne for at komme ned på grænseværdien på 1x10¹²/kWh for EU Stage V, svarende til en faktor 200. Succeskriteriet for projektet er dog kun en virkningsgrad på 98 %.

7.4 Specifikation af partikelfiltrene

I udvælgelsen af skibet var der fra start fokus på særligt udstødningstemperaturen. For at sikre en hurtig afbrænding af den opsamlede partikelmasse er det nødvendigt at partikelfiltret bliver opvarmet til mindst 300 °C, og udstødningstemperaturen skal gerne væsentligt højere op når motoren er under belastning. Dette var sikret på forhånd, ved at overvåge temperaturen under sejlads.

Skibets hovedmotorer er specificeret til et modtryk på højst 10 kPa. Exilator dimensionerede partikelfiltrene efter at overholde dette krav under alle forhold, hvilket medførte at filtrene blev væsentligt større end hvis de var dimensioneret til f.eks. et tungt køretøj med samme motoreffekt.

Partikelfiltrene på Isefjord er sammensat af ni kvadratiske moduler, som er monteret gennem siden i en isoleret metalkasse. Det modulbaserede system letter det årlige vedligehold, idet modulerne kan tages ud når de skal tømmes for aske, hvilket udføres en gang årligt.

7.5 Installation

I forbindelse med installation af partikelfiltrene blev der indgået aftaler mellem Exilator og Hundested Rørvig Færgeservice om tidsplan og ansvarsfordelingen i forhold til installationsarbejde og nødvendige godkendelser.

Installationsarbejdet på hovedmotorerne indebar, at de eksisterende lyddæmpere blev afmonteret og flyttet længere væk fra motorerne. Partikelfiltrene blev monteret på lyddæmpernes oprindelige plads, som var tæt på motorerne.

På generatormotorerne var udfordringen at de generelt kører med meget lav belastning, da de er dimensioneret til en højere last end de normalt bruges til. Problematikken blev løst ved at montere en kraftig elektrisk vandvarmer, som ved indkobling øger belastningen af generatormotorerne i en kort periode, så partikelfiltrene kunne blive varme og afbrænde partikler. Vandvarmeren leverer varmt vand til akkumulatortanke der forsyner skibets centralvarmeanlæg, og reducerer derved forbruget på skibets oliefyrede kedel. Systemet blev designet med automatisk styring af denne belastning så afbrændingen sker efter behov, og kan desuden startes manuelt.

7.6 Bestemmelse af partikelreduktion

Der blev udført målinger af gas- og partikelemissioner i september 2018 med henblik på at dokumentere effektiviteten af udført DPF-installation på hoved- og hjælpemotor.

Samlet har målingerne i flere omgange påvist at partikelfiltrene isoleret set har den ønskede effektivitet i forhold til opsamling og afbrænding af partiklerne, hvor afbrænding sker under høj belastning. Målingerne har dog også påvist at der har været en utæthed gennem det målte systems bypass ventil, som i hvert fald under målingerne har sænket virkningsgraden, idet en mindre del af røggassen har passeret udenom partikelfilteret. Dette kan enten skyldes at ventilen ikke har været lukket ordentligt, eventuelt som følge af en blokeret mekanisme, eller at ventilen ikke er optimal til anvendelsen og aldrig vil blive helt tæt. Udfordringen med utætte ventiler er også set i et tidligere projekt med Ærøfærgeren.

Målingerne blev udført under overfart på Rørvig-endens hovedmotor, og der blev målt ved flere omdrejningstal. Målingerne blev udført med emissionsudstyret beskrevet i kapitel 5. Motorens belastning i % blev aflæst fra et display ved motoren og blev brugt til at vurdere motorens ydelse ved de givne omdrejningstal. Brændstofforbruget blev ligeledes aflæst fra display. Ud fra de målte og aflæste værdier blev de specifikke emissioner af NO_x og partikelmasse beregnet.

Partikelantalskoncentration og vejledende partikelmassekonzentrationer ses i TABEL 10 for hovedmotor samt reduktionsgrader i TABEL 11. For PN-målingerne er reduktionsgraden for partikelfilteret beregnet for målepunktet i selve filterkassen (se FIGUR 10). Der ses >99% reduktion i partikelantal. Udover antalskoncentration giver målingen også detaljeret information om partikelstørrelse og for alle målinger ses gennemsnitlige partikelstørrelser i området 80-100 nm med meget sammenlignelige resultater hhv. før og efter DPF. Supplerende PM-målinger blev foretaget i både filterkassen og længere fra DPF på hovedmotor, nær bypass ventilen. De vejledende målinger i filterkasse lige efter DPF viser over 99% reduktion af PM. Måling i udstødning længere fra DPF viser ca. 90 % reduktion af PM (med Pegasor).

TABEL 10. Partikelantalskoncentration og -masse målt før og efter DPF (i filterkassen) som gennemsnit over flere overfarter.

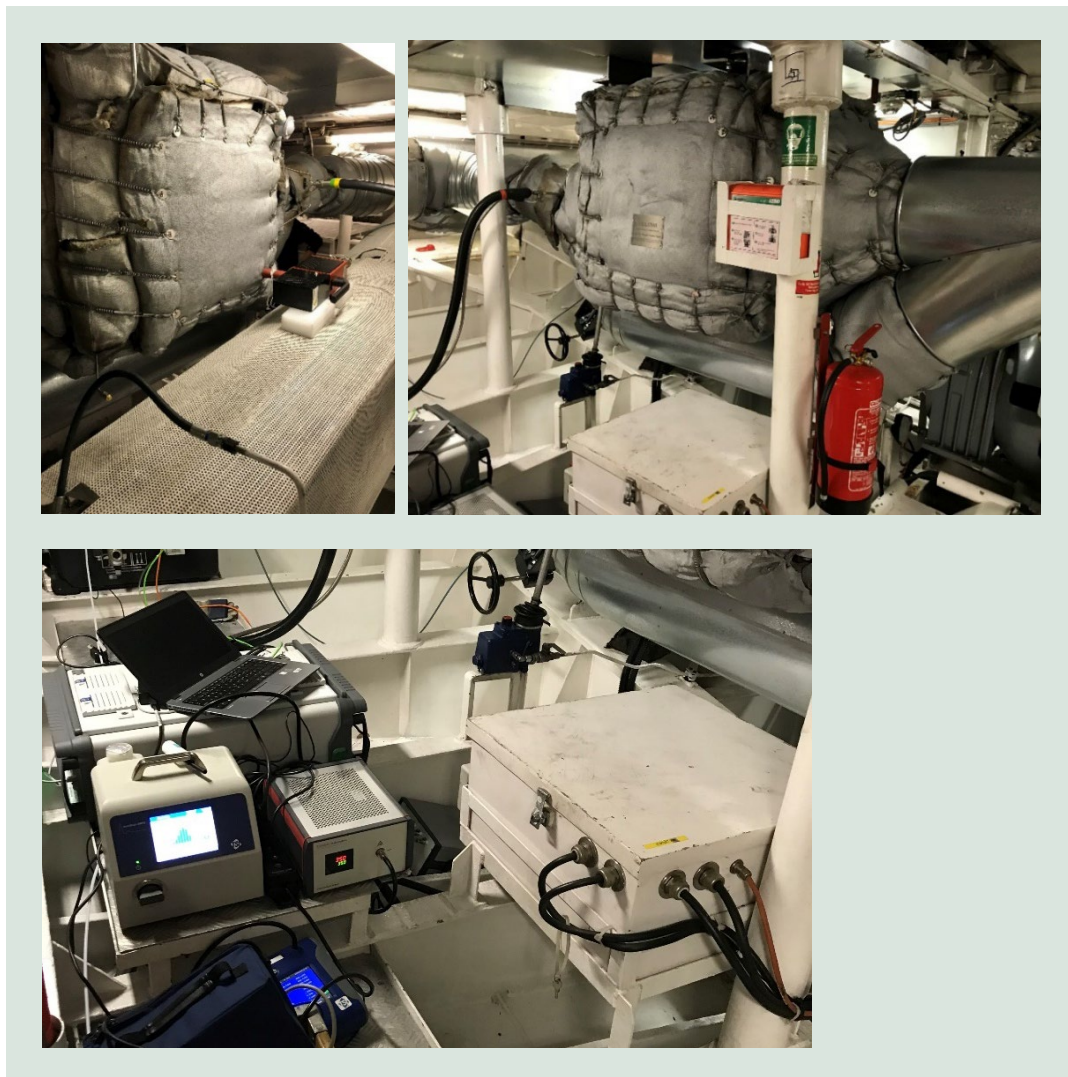
Hovedmotor	Retning	PN (mio. #/cm ³)	PM1 (DustTrak)	PM _{2.5} (Pegasor)
Før DPF	Rørvig-Hundested	44 ± 7	38*	
	Hundested-Rørvig	18 ± 8	6 ± 1	
	Hundested Havn	18 ± 1	23 ± 1	
Efter DPF	Rørvig-Hundested	0,18 ± 0,01	0,14 ± 0,01	
	Hundested-Rørvig	0,06 ± 0,01	< 0,01*	
	Hundested Havn	0,08 ± 0,01		

*Baseret på én overfart.

TABEL 11. Partikelreduktion målt på både hoved- og hjælpemotor (generator).

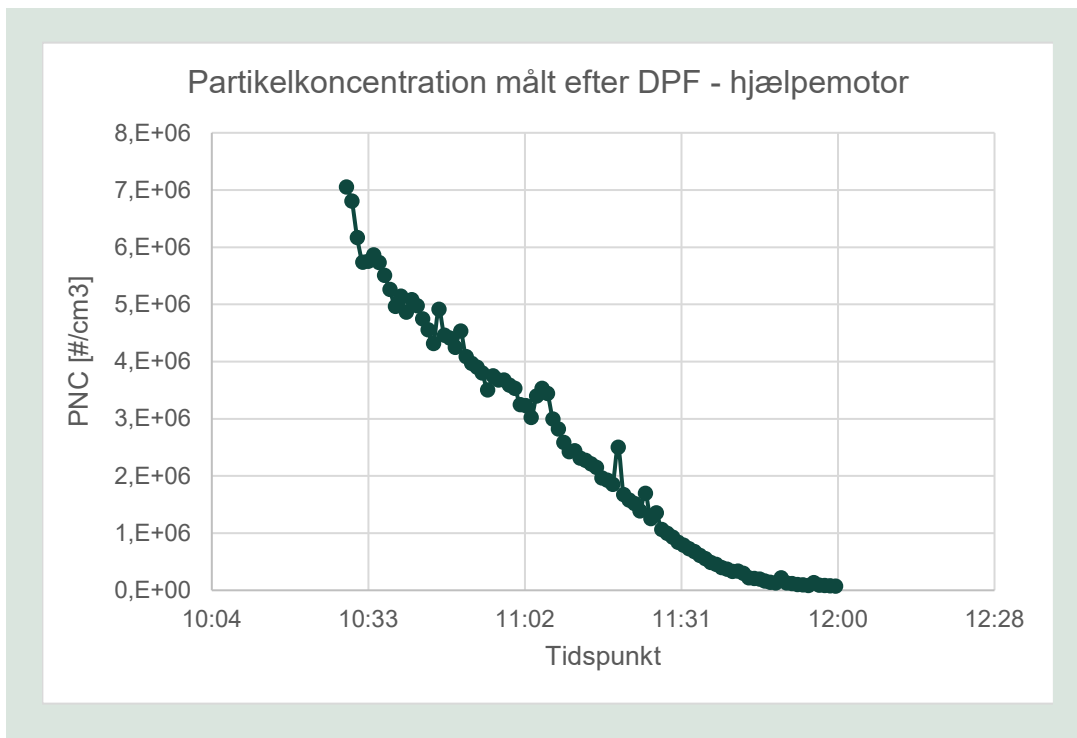
Motor	Retning	Partikelreduktion (PN)
Hovedmotor	Rørvig-Hundested	99,6 %
	Hundested-Rørvig	99,7 %
	Hundested havn	99,6 %
Generator	-	99,8 %*

*Reduktion lavere ved opstart.

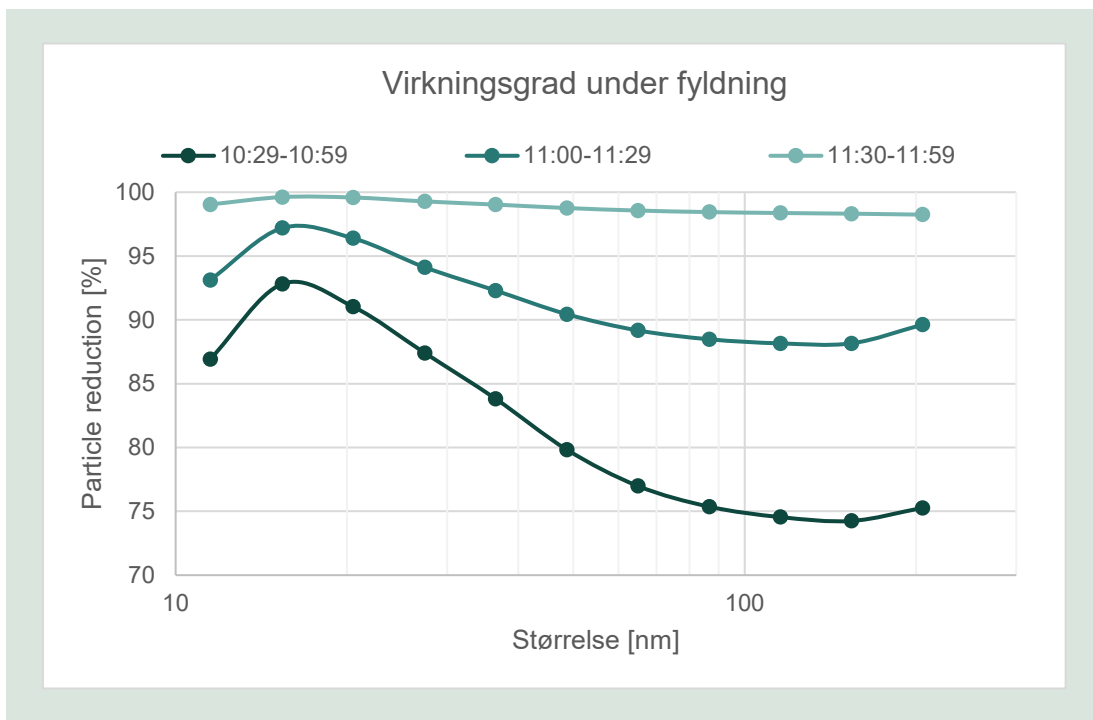


FIGUR 10. Måleposition i filterkasse (t.v.) og længere fra filteret (t.h.) og partikelmåleudstyr (nederst).

Målinger på hjælpemotor viste tilsvarende reduktioner, dog med en noget lavere effektivitet end angivet i TABEL 11 ved opstart. Den målte koncentration kan her observeres over tid på FIGUR 11 samt virkningsgraden som funktion af partikelstørrelse under fyldning af filteret på FIGUR 12. Det ses desuden her at filteret er mest effektivt for de mindste partikler.



FIGUR 11. Udvikling i målt partikelkoncentration efter DPF på hjælpemotor.



FIGUR 12. Visualisering af virkningsgrad som funktion af partikelstørrelse.

7.7 Driftserfaring

Partikelfiltrene har været i drift fra januar 2018 til projektets afslutning i januar 2023, dvs. 5 år. I denne periode har partikelfiltrene været i drift omkring 12 timer hver dag, alle ugens dage, hvilket til dato er omkring 22.000 timer. I denne periode har der kun været få tekniske fejl, primært på sensorer, men ingen fejl på selve partikelfiltrene.

7.8 Service

Filtermodulerne er blevet afmonteret og rensat for aske en gang om året, hvilket de fleste gange er udført med mobilt udstyr på havnen. Asken sidder løst i filteret og kan let blæses ud, blot filteret har været fuldt regenereret ved høj temperatur, inden motoren er stoppet.

7.9 Opfølgende måling af partikelreduktion og katalytisk effektivitet

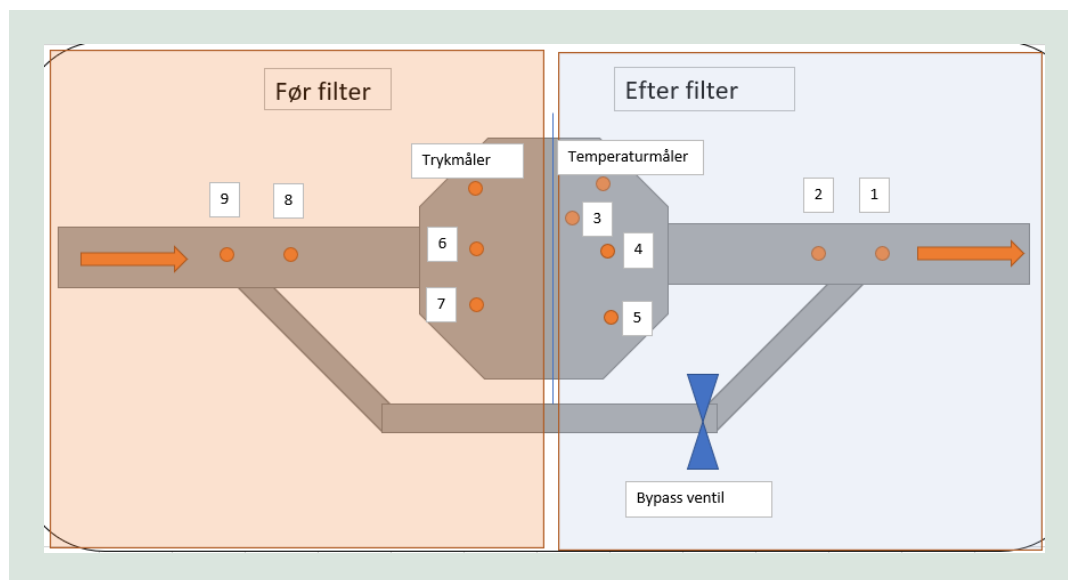
For at validere effekten af de implementerede røgrensningsløsninger på Hundested-Rørvig-færgen, blev der gennemført en målekampagne efter filterne havde været i drift i godt 2 år. Målingerne blev udført i november 2020, og der blev gennemført måling med fokus på udledningen af partikler og NO/NO₂.

Partikelmålingerne viser, at filtereffektiviteten er væsentlig lavere målt en meter efter filterkassen sammenlignet med målingen i selve filterkassen. Dette indikerer, at partikelfilterets bypass-ventil ikke er tilstrækkeligt tæt.

Partikelreduktionen målt i filterkassen lige efter selve partikelfilteret er ca. 97 %, hvilket er lidt lavere end forventet, da partikelfiltre oftest reducerer partikelantal med over 99 %.

Formålet med at måle NO/NO₂ var at vurdere effektiviteten af den katalytiske belægning, som sikrer afbrændingen af sod gennem omdannelse af NO til NO₂, der kan oxidere sod ved normale driftstemperatur. Målingerne indikerede at partikelfiltrene efter ca. 5 års drift fortsat har en effektiv katalytisk belægning, der danner rigeligt NO₂ til at sikre sodafbrændingen.

Emissionsmålingerne blev udført ved en motorbelastning på henholdsvis 1100 RPM og 1500 RPM. De anvendte målepunkter er vist i FIGUR 13. Der blev udført måling før filteret (målepunkt 8 og 9) og efter filteret (målepunkt 1 og 2) for at vurdere filterets effektivitet. Derudover blev der foretaget efter-målinger i selve filterkasser (målepunkter 3, 4 og 5) for at vurdere tætheden af bypassventilen. Målingerne blev udført med emissionsudstyret beskrevet i Kapitel 5.



FIGUR 13. Skitse over filteret på Hundested-Rørvig-færgen med markering af målepunkter.

Den målte partikelantalskoncentration og vejledende partikelmassekoncentration fremgår af TABEL 12 og beregnede reduktionsgrader er vist i TABEL 13. Før og efter filteret blev der

foretaget måling på fire overfarer, to ved 1100 RPM og to ved 1500 RPM. I filterkassen blev der målt i to overfarer (en ved 1100 RPM og en ved 1500 RPM).

Filterets reduktionsgrad er desuden vist grafisk i FIGUR 14. Se desuden øvrige billeder fra målekampagnen i FIGUR 15 og FIGUR 16.

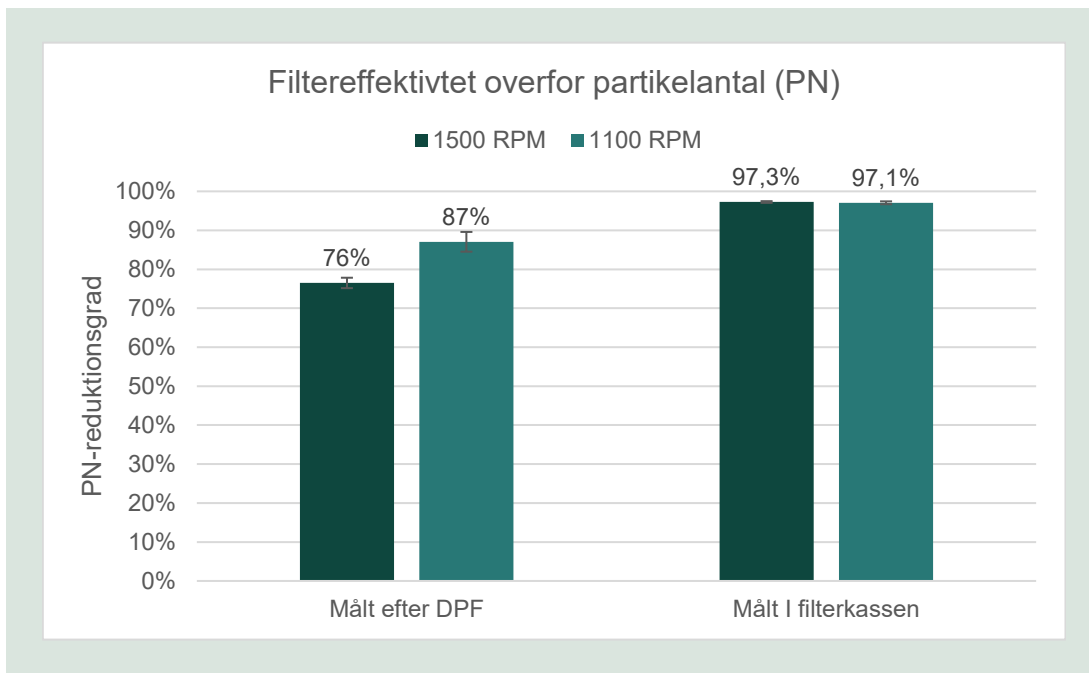
Supplerende PM-målinger blev foretaget i samme tre målepunkter som beskrevet ovenfor. Både målingen en meter efter filterkassen og målingen i filterkassen viser ca. 90 % reduktion af PM.

TABEL 12. Partikelantalskoncentration og -masse målt før DPF, efter DPF samt i selve filterkassen ved henholdsvis 1100 RPM og 1500 RPM. PN-målingerne er baseret på flere overfarer, mens PM-målingerne er baseret på én overfarer.

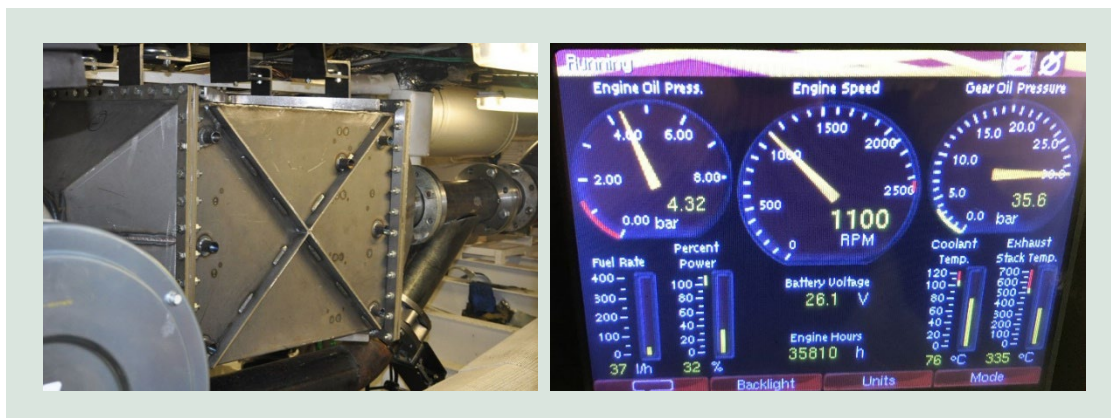
Målepunkt	RPM	PN [Mio. #/cm ³]	PM (DustTrak) [mg/m ³]	PM _{2.5} (Pegasor)
Før DPF	1500	37,6 ± 0,2	31	
	1100	10 ± 1	3,8	
Efter DPF (1 meter efter filterkassen)	1500	8,8 ± 0,5	3,0	
	1100	1,3 ± 0,2	0,4	
Efter DPF (i filterkassen)	1500	1,0 ± 0,1	0,5	
	1100	0,29 ± 0,01	-	

TABEL 13. Partikelreduktion i PN på hovedmotor målt ved 1100 RPM og 1500 RPM.

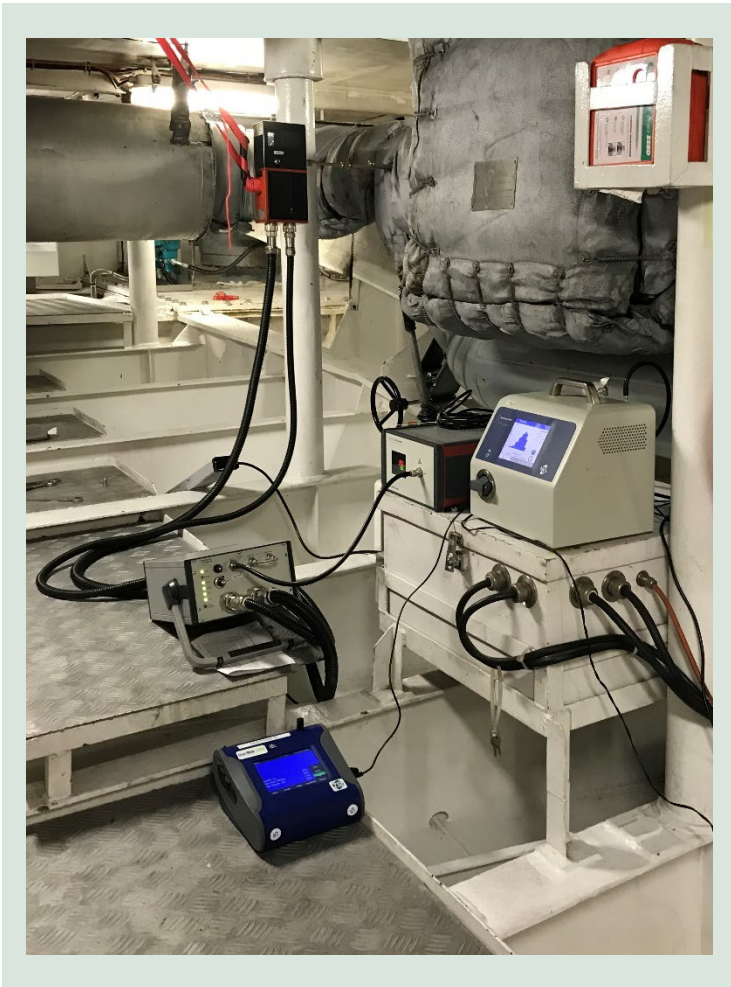
Målepunkt	RPM	Partikelreduktion (PN) i %
Efter DPF (1 meter efter filterkassen)	1500	76 ± 1 %
	1100	87 ± 3 %
I filterkassen (efter DPF)	1500	97,3 ± 0,2 %
	1100	97,1 ± 0,4 %



FIGUR 14. PN-reduktionsgrad i to forskellige målepunkter målt ved henholdsvis 1100 RPM og 1500 RPM.



FIGUR 15. Billede af filterkassen på Hundested-Rørvig-færgen med udtag til de forskellige måleudtag (t.v.) og billede af display hvor motorens omdrejningstal løbende blev aflæst og noteret fra motorens informationsskærm (t.h.).



FIGUR 16. Billede af det anvendte fortyndings- og partikelmåleudstyr.

7.10 Bestemmelse af opnået støjreduktion

Idet virksomheden Exilator er grundlagt af fagfolk med ekspertise indenfor støjdæmpning, har det været naturligt at indarbejde støjdæmpning i designet af partikelfiltrene, med særlig fokus på lavfrekvente resonanser. Støjdæmpning er også et vigtigt salgsargument for Exilator, som har deres fokus på montering på bl.a. yachter, hvor fokus fra købers side ofte vil være på de fordele som passagerne oplever rent komfortmæssigt, herunder minimering af støj fra bl.a. generatorer.

Exilator satte fra projektets start et mål om 30-35 dB støjdæmpning, som var teoretisk beregnet for partikelfilterets design. I praksis viste det sig at være udfordrende rent måleteknisk at udføre målinger af støjdæmpningen, idet partikelfiltrene blev monteret mellem motoren og de eksisterende lyddæmpere. Den samlede dæmpning af støjen i udstødningen er således opnået i kombination med de eksisterende lyddæmpere, hvilket betød at dæmpningen i partikelfilteret ikke kunne måles direkte ved afgangsrøret. Til bestemmelse af partikelfilterets dæmpning blev lydtrykket derfor målt direkte i udstødningsrøret, på hver side af partikelfilteret. Målingen blev udført af en ekstern virksomhed, og målingerne er dokumenteret i en særskilt rapport herfra. Resultatet af målingerne direkte over filtret var dæmpninger mellem 26 og 33 dB(A) målt ved omdrejningstal fra 700 til 1100 RPM, hvilket lå tæt på forventningerne.

Teknologisk Institut udførte parallelt hermed målinger ved afgangsrørene udenfor med håndholdt udstyr, hvor der blev målt lydtryk og lavet optagelser, der senere blev analyseret for

at bestemme dæmpningen i hele frekvensområdet. Der blev udført referencemålinger før partikelfiltrene blev installeret, og målingerne blev gentaget efter partikelfiltrene var installeret.

Målingerne påviste en reduktion på ca. 22 dB(A), ved måling ca. 1,5 meter fra afgangsrøret. Før montering af partikelfiltrene var støjniveauet på denne afstand målt til ca. 94 dB(A), hvilket svarer til lydniveauet fra andre store motorers udstødning, fx en ældre traktor. Ifølge arbejdstilsynet svarer eksponering for 94 dB(A) i en time til den maksimale støjbelastning som en ansat må udsættes for på en 8 timers arbejdsdag¹.

Efter monteringen af partikelfilteret blev lydtrykket målt til ca. 72 dB(A). Dette giver en dæmpning på ca. 22 dB(A) målt ved afgangsrøret. 72 dB(A) svarer ca. til lydniveauet ved en normal samtale. Støjen blev oplevet som primært lavfrekvent og der kunne føres en normal samtale umiddelbart ved siden af udstødningen.

Endelig blev der målt med åben bypass ventil. Selv med bypass åbent, sker der en stor absorption af lydenergi i partikelfiltrets åbne struktur. Med bypass åbent blev lydtrykket målt til ca. 76 dB(A), hvilket svarer til at partikelfiltret dæmper lyden ca. 16 dB(A) selv når gassen primært passerer forbi filteret. Det skal dog bemærkes at den oprindelige lyddæmper var blevet flyttet til en position efter partikelfilteret, så de 76 dB(A) er altså opnået i kombination med passage gennem lyddæmperen. Men som nævnt var lydniveauet med denne dæmper, før partikelfilteret blev monteret, på ca. 94 dB(A). En meget stor del af støjreduktionen må derfor kunne tilskrives partikelfilteret.

De målte værdier af lydtryk i dB er lettest at forstå for fagfolk med tilstrækkelig erfaring indenfor lydmåling, som kan vurdere niveauerne og de opnåede reduktioner. For de fleste mennesker er det den subjektive oplevelse af støjen der afgør om og hvor meget støjen generer personen i en given situation. Flertallet af passagerne vil nok affinde sig med støj fra motorer når de er ombord på en færge, og vil om ikke andet finde en placering hvor de ikke bliver generet. Nogle mennesker er imidlertid støjsensitive, og vil ganske sikkert opleve det som en meget stor forbedring i komforten ombord, særligt over dæk. Overordnet set vil det give en mere rolig oplevelse for alle der opholder sig på det udendørs dæk, hvor lydniveauet fra udstødningsrørene er kommet på niveau med baggrundstøjen fra havet og vinden.

For enkelte beboere nær havnen har den lavfrekvente støj fra udstødningen ved færgens ankomst og afgang være et irritationsmoment, som har givet anledning til uformelle klager til rederiet. Efter monteringen af partikelfiltrene er det i praksis ikke muligt at høre motorerne på mere end 10-20 meters afstand når færgen går i havn. For disse støjsensitive beboere har støjreduktionen ganske sikkert været bemærket og værdsat. Ses også afsnit 7.13 med beretninger fra rederiet.

7.11 Kortvarig måling af partikelfiltrenes effekt på nærmiljøet i 2018

Med henblik på at dokumentere den reelle eksponering af passagerer, besætning og nærmiljø blev der i september 2018 foretaget vejledende målinger i omgivelserne i to dage.

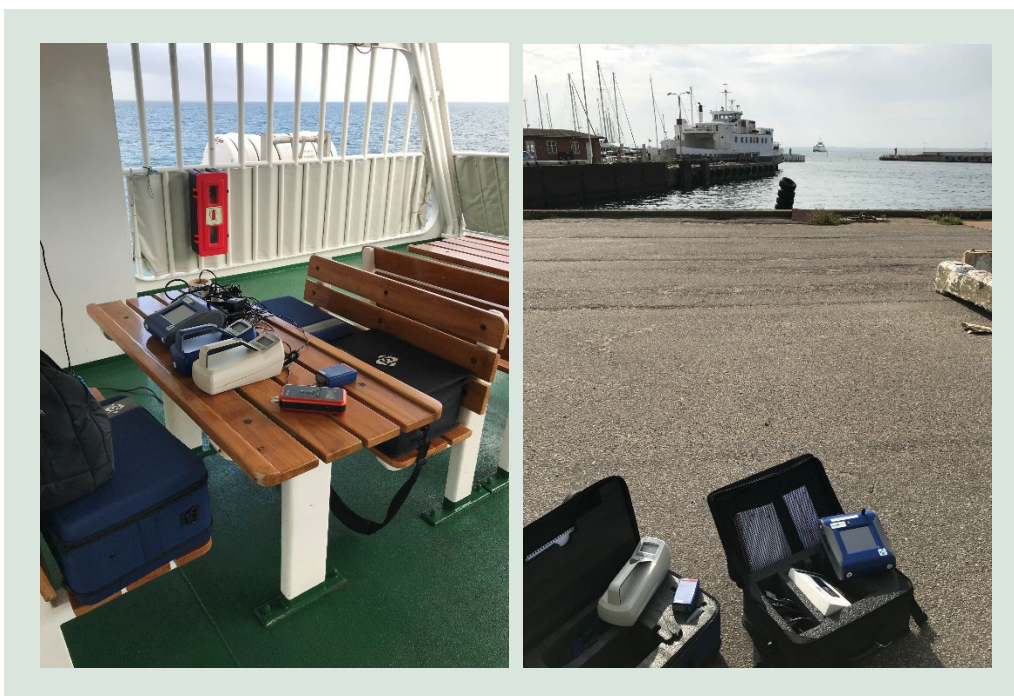
Målinger af luftkvalitet er meget vejfrafhængige, og særligt vindretningen har betydning for om røgfanen fra motorernes afgangsrør blæser væk fra skibet eller henover dækket. Den dominerende vind under målingerne var fra sydvest, og røgfanen under overfart blev således ført ind over dækket. Ligeledes blæste røgfanen ind over Hundested havn under anløb og afgang (se FIGUR 17).

¹ <https://at.dk/arbejds miljoeproblemer/straaling-stoej-vibrationer/stoej/forebyg-hoej-stoej/meget-kraftig-stoej-stoejgraenser-og-beregning-af-stoej/>



FIGUR 17. Kort over færrens rute mellem Rørvig og Hundested samt vindforhold under partikelmålingerne i september 2018.

Målingerne blev foretaget ombord på skibet og nær færrens anløb i Hundested (se FIGUR 18). På udvalgte overfarter blev partikelfiltrene deaktiverede med henblik på at kunne vurdere deres effektivitet på nærmiljøet.



FIGUR 18. Målinger på passagerdækket (t.v.) og i Hundested havn (t.h.).

Der blev målt sammenlignelige partikelniveauer på dækket med filteret aktiveret og deaktiveret. Under overfarten måles i gennemsnit ca. 5.000 partikler/cm³ med P-Trak for den pågældende måling, som vurderes at være meget tæt på baggrundsniveau.

Kontinuerlige målinger ved kaptajnen i tidsrummet fra kl. 10 til kl. 18 den 19/9-2018 viste ligeledes en partikkelkoncentration lig den som måles i omgivelserne (ca. 2.000 partikler/cm³ målt med DiSCmini).

De relativt kortvarige målinger i omgivelserne tydeliggjorde behovet for et større datagrundlag for at kunne konkludere på målinger i omgivelserne. Længerevarende kontinuert partikelmåling beskrives nærmere i næste afsnit.

7.12 Længerevarende partikelmålinger i nærmiljøet i 2020

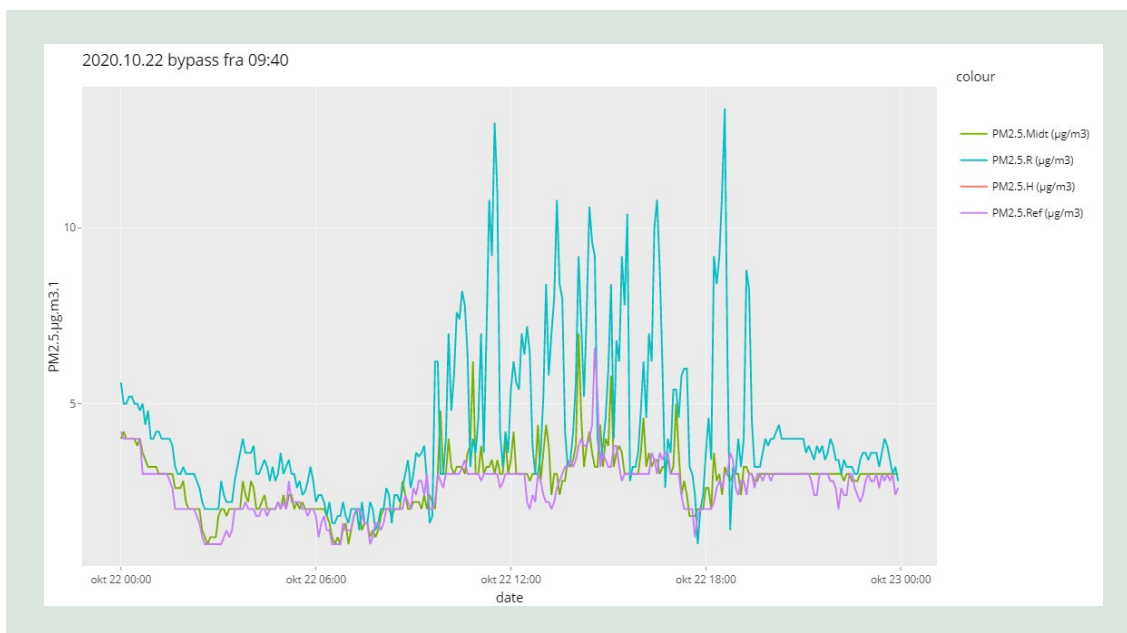
De vejledende partikelmålinger i nærmiljøet viste, at der er behov for et væsentligt større datagrundlag, for at kunne kvantificere en forbedring i luftkvaliteten for passagerer, besætning og nærmiljø. For at vurdere effekten af partikelfiltrene på luftkvaliteten i omgivelserne på færgen er der således gennemført en længerevarende målekampagne med kontinuert måling af partikkelkoncentrationen i fire målepunkter ombord på færgen samt på Rørvig havn nær færgelanløbet. De fire målepunkter på færgen fremgår af FIGUR 19.



FIGUR 19. Billede af Hundested-Rørvig-færgen med angivelse af de fire målepunkter for kontinuert måling af partikkelkoncentration.

Der observeres forholdsvis store variationer fra dag til dag, og det er derfor ikke muligt ud fra de daglige middelværdier at vurdere effekten af partikelfiltrene på partikeleksponeringen i luften i nærmiljøet. Den relative luftfugtighed samt vindretning og vindstyrke udgør en væsentlig udfordring i denne sammenhæng, og data indikerer, at den målte partikkelkoncentration korrelerer med den relative luftfugtighed.

For at vurdere effekten i nærmiljøet fokuseres der, på grund af de store daglige variationer i partikkelkoncentrationen, således på data fra den 22. oktober 2020, hvor partikelfiltrenes bypass var åbent fra kl. 9:40 og resten af dagen. Den målte partikkelkoncentration for dagen er vist i FIGUR 20. Vejret var tørt med temperaturer på 14-15 °C og en luftfugtighed på 78-92 %. Vindstyrken var 7-12 m/s og retninger var primært fra vest- og sydvest. Vejret var forholdsvis stabilt i færgens sejltid fra kl. 6:15 til kl. 19:20, hvorfor målingerne fra før kl. 9:40 med rimelighed kan sammenlignes med målingerne efter kl. 9:40, hvor filtrenes bypass var åbent.



FIGUR 20. Data fra den 22. oktober 2020, hvor færgeren startede med at sejle kl. 6:15. Partikelfiltrenes bypass blev åbnet kl. 9:40 og først aktiveret igen efter færgerens sidste sejltur var gennemført kl. 19:40.

Umiddelbart efter bypass af partikelfiltrene (kl. 9:40), blev der målt relativt høje partikelkoncentrationer med et fast interval på ca. en time. Dette indikerer, at partikeleksponeringen på passagerdækket med meget høj sandsynlighed skyldes partikeludledning fra færgeren. Den mest tydelige effekt måles af partikelsensoren placeret i skibets Rørvig-ende, hvor $PM_{2.5}$ -middelværdien i perioden med aktive filtre blev målt til $2,1 \mu\text{g}/\text{m}^3$, mens den i perioden med bypass åbent var $4,0 \mu\text{g}/\text{m}^3$ (efter korrektion for baggrundsmåling ved Rørvig havn). Dermed var den målte partikeleksponering i skibets Rørvig-ende ca. 50 % lavere i perioden med aktive filtre sammenlignet med perioden med bypass åbent.

Konklusion

De målte koncentrationstoppe med et interval på ca. en time, svarer til intervallet i færgerens fartplan, og indikerer dermed, at de målte partikelkoncentrationer på færgeren, med meget høj sandsynlighed skyldes partikelemission fra færgeren. Specifikt for den 22. oktober 2020 blev der målt $PM_{2.5}$ -middelværdier i perioden med aktive filtre som var 50 % lavere sammenlignet med perioderne med by passede filtre. Herudover har målingerne bekræftet den tidligere delkonklusion at partikeleksponeringen uden aktive filtre primært er domineret af kortvarige eksponeringer nær og omkring havneanløb.

Fordelen ved at foretage målinger med low-cost-sensorer er, at der for et relativt beskedent budget kan foretages måling over længere tid og ikke mindst på flere forskellige lokationer end hvad der ellers ville være muligt. Ulempen er dog, at der er en større måleusikkerhed tilknyttet de målte koncentrationer og at især luftfugtigheden har indflydelse på målingerne. I fremtidige målekampagner af denne type vil det være yderst relevant at have en udendørs referencemåling på færgeren, som ikke påvirkes af færgerens partikeludledning.

7.13 Oplevelsen af M/F Isefjord efter montering af partikelfiltre

Udover den målbare reduktion af M/F Isefjords partikelemissioner, den målbare støjrreduktion og effekten på nærmiljøet som er opnået med partikelfiltrene, har også færgerens brugere og beboere i havnene givet positive beretninger. Det er blevet bemærket, at færgeren er blevet renere og mere støjsvag efter monteringen af partikelfiltre.

Den nuværende direktør for Hundested-Rørvig Færgeservice, Lars Wolfgang, er blevet adspurgt om de oplevelser, som faste brugere, lokale beboere og turister har bemærket efter færgen efter montering af partikelfiltre. Vi gengiver disse oplevelser herunder, med tak til Lars Wolfgang for hans bidrag.

Refleksioner fra personer i havneområde?

Der er i hvert fald 2 gode historier. M/F Isefjord har jo Cummins-motorer, i modsætning til lignende færger, som har "lastbilmotorer" som Volvo eller Scania. Så der er en anden slags motorlyd end på lignende færger. Selvom jeg kun har været i jobbet knap ½ år, så har jeg sejlet med på Isefjord, inden partikelfiltrene fra Exilator blev installeret. Jeg husker det, som om den larmede mere end gennemsnittet. Og med tydelig sort røg op af skorsten, når motorene tog omdrejninger. Jeg kan sammenligne med min tidligere færge (M/F Orø), hvor vi gik fra traditionel diesel til GTL (gas-to-liquid). Samme motorbrummen, men aldrig sort røg op af skorstenen og ingen lugt af dieselmøg. GTL-brændstof medførte, at passagerne ikke fik sod og partikler på hverken bil eller tøj.

Også i Hundested blev det bemærket. Havnen i Hundested, hvor vores færger anløber, er fiskerihavnen. Men der bliver færre fiskeskibe og flere lystbåde, hvor folk sidder udenfor på båden og nyder livet om sommeren. Den tidligere fiskeriauktionshal er blevet lavet om til mondæn restaurant med udendørs servering om sommeren. Det ligger 150 meter fra fæргеlejet. Der er også kommet et bryghus, tøjbutikker, isboder, cafeer osv. Så fiskerihavnen er delvist transformeret til en fritidshavn med mange turister og børnefamilier, især om sommeren. Man kan antage, at Exilator har modvirket klager over støj og røg.

Refleksioner fra medarbejdere?

Medarbejderne er glade for det lavere støjniveau, samt at der ikke skal spules dæk så ofte for at få sodpartikler væk fra vogndæk, soldæk og bænke.

Hvad har I hørt fra passagerer?

Vi kan i sommersæsonen måle direkte, hvor vi har både M/F Isefjord og den noget ældre M/F Nakkehage i drift. Nakkehage er bygget i 1955 og står stort set i oprindelig version, altså uden partikelfiltre og andre moderne tiltag. På Nakkehage får besætning og rederi klager over sod på bilerne på vogndækket. Vi har haft kunder, som føler sig berettiget til en bilvask på rederiets regning, hvilket vi må afslå. Sod på det hvide sommertøj. Nogle (romantikere) synes så, at det er "autentisk" med sort røg op af skorsten, men jeg antager, at de er en uddøende race.

Vi har faktisk sommergæster, som foretrækker den gamle færge, fordi den er "fra en svunden tid". De fleste, især pendlere, foretrækker dog Isefjord med de bedre forhold, komfort og mere plads på vogndækket.

Gode historier?

Og så til de gode historier. Den første fra en beboer i Rørvig, som brugte Isefjord som vækkeur kl. 06.50, hvilket er ankomst Rørvig. Første dag, hvor færgen var i drift med partikelfiltre, sov han over. Han kontaktede rederiet og fortalte historien – og var i øvrigt glad for det lavere støjniveau.

Den næste var en beboer fra Rørvig, som kort før installationen klagede over den støjende færge. Min forgænger sagde til ham, at han ville gøre noget ved det inden for nogle uger.

Færgen røg på værft og fik monteret partikelfiltrene fra Exilator. Og klageren kom efterfølgende og takkede over, at vi havde taget hans klage alvorligt – og gjort noget ved det. Klageren behøvede jo ikke at få at vide, at installationen var planlagt måneder forinden. Hvis man kan gøre folk tilfredse, så gør det jo ikke noget.

I øvrigt tror jeg støj i havne og maritime bymiljøer bliver en stor udfordring i fremtiden. Jeg oplevede det i mindre målestok som havnemester i Holbæk, hvor man ombyggede trafikhavnen og opførte lejligheder i højhuse med altaner. Det højeste er 17 etager. Her fik jeg tit klager over måger(!?), skibe med tøffende motorer, lastbiler/varebiler med gods til skibene. Man ønskede det maritime miljø, i en art Disneyficering, uden forståelse for havnens brugere og skibene. Det har jeg også hørt/læst fra andre havne. Senest ifm. udbygningen af Århus Havn, men også andre østjyske havne.

Turisters tilbagemeldinger?

Som under passagerer. Vi kan ikke skelne turister fra øvrige passagerer.

Afslutningsvis tilføjer Lars Wolfgang:

Ingen roser uden torne. Én dag om året skal Exilator renses/serviceres. Det tager det meste af en dag. Det er beskidt arbejde, som kræver dragt og andet udstyr. Det betyder, at færgen er ude af drift. Arbejdet skal udføres af en fagmand eller uddannet medarbejder.

Men det skal ikke overskygge vores tilfredshed med Exilator-løsningen.

8. Amminex og Partrederiet Sundbusserne



Sundbuss Pernille

8.1 Beskrivelse af Partrederiet Sundbusserne

Partrederiet Sundbusserne er et mindre rederi, som hovedsageligt sejler på ruten mellem Helsingør og Helsingborg med passagerfærger, parallelt med de større bilfærger ejet af selskabet ForSeas, på samme rute. I dag betjenes overfarten med skibet M/S Pernille, med afgang hver time og en overfartstid på ca. 20 minutter. På weekendaftener afholdes ofte festlige arrangementer på skibet, som også kan chartres til udflugter på Øresund. Skibet kan medbringe omkring 200 passagerer.

8.2 Beskrivelse af Amminex Emission Solutions A/S

Amminex Emission Solutions A/S blev dannet som en spin-off virksomhed fra DTU i 2005, af fem forskere som havde samarbejdet om udvikling af lagringsteknologi til ammoniak. Teknologien blev indledningsvis kendt under navnet "brintpillen", selvom det var ammoniak der blev lagret. Grunden til dette var at det oprindeligt var tanken at ammoniakken skulle reformeres til brint over en simpel katalysator, så brinten efterfølgende kunne anvendes i brændselsceller.

Det viste sig imidlertid at der var gode forretningsmuligheder i at anvende lagringsteknologien sammen med SCR-katalysatorer til dieselmotorer, idet ammoniak har flere fordele som reduktionsmiddel end urea. Ammoniak kan ikke udkrystallisere, og det er derfor muligt at dosere ammoniak til katalysatoren ved lavere driftstemperatur end med urea, og derved samlet set opnå en mere effektiv reduktion af NO_x. Amminex kerneteknologi bestod i systemer til sikker lagring og kontrolleret frigivelse af ammoniak, i en samlet pakke kaldet **Ammonia Storage and Delivery System, ASDS™**.

I 2015 vandt virksomheden et offentligt udbud hvor opgaven var at opgradere ca. 300 københavnske bybusser med nye SCR-katalysatorer og partikelfiltre, hvor målsætningen var at busserne skulle overholde grænseværdierne for Euro VI. Busserne skulle generelt have

eftermonteret partikelfiltre og opgraderet eksisterende SCR-katalysatorer. Opgaven gav Amminex yderligere erfaring i at arbejde med komplette emissionssystemer.

I december 2016 blev franske Faurecia hovedaktionær med 91 % af aktierne i virksomheden, som på daværende tidspunkt stadig var en forretning under udvikling og kørte med store underskud.

I april 2019 valgte Faurecia at lukke udviklingsafdelingen i Søborg, mens forretningen med påfyldning af ammoniak på systemerne fortsatte på virksomhedens produktionsanlæg i Nyborg. Udviklingen af Amminex ASDS™ teknologi er fortsat under Faurecia, men med fokus på first-fit, dvs. fabriksmonterede (OEM) løsninger til køretøjer.

8.3 Referencemålinger på M/S Pernille

M/S Pernille, IMO 8010532, er bygget i 1981. Det er udstyret med to Volvo Penta hovedmotorer på hver 240 kW @ 1800 RPM, som driver to stilbare propeller. Skibet har to hjælpemotorer ligeledes fra Volvo Penta, med hver 80 kW @ 1500 kW.

Der blev udført referencemålinger på M/S Pernille 22. maj 2018. Målingerne blev udført mens skibet var i normal drift på overfarten. Der blev udført målinger på begge hovedmotorer.

Skibets driftsmønster er periodisk med afgang hver halve time fra hhv. Helsingør og Helsingborg, hvor selve overfarten varer omkring 18 min, det meste af tiden med motorerne i konstant høj belastning. Skibet tilbringer herefter ca. 10 min med motorerne i tomgang i havn, mens passagerer stiger af og på. Der er målt både under overfart og når skibet ligger i havn med motorerne i tomgang.

Gasmålingerne blev udført med AVL M.O.V.E PEMS, som på det tidspunkt var det eneste udstyr der var mobilt nok til at blive båret ned i maskinrummet på skibet. Partikelmålingerne blev udført med DustTrak DT (PM) og TSI NanoScan (PN og PSD).

Idet skibets motorer ikke har moderne elektronisk styring og overvågning, var det ikke muligt at foretage udlæsning af brændstofforbrug eller motorbelastning undervejs. De målte koncentrationer af NO_x og PM er omregnet ud fra vurderinger af motorens ydelse og forventet brændstofforbrug.

TABEL 14. Målte og beregnede emissioner ved referencemåling af hovedmotorerne på M/S Pernille.

	Enhed	Motor 1	Motor 2	Motor 1	Motor 2
Omdrejningstal	RPM	1700	1700	750	750
Motorydelse (estimeret)	kW	200	200	0	0
NO _x , koncentration	ppm	2100	1850	400	340
NO _x emission	g/kWh	18,6	19,4	-	-
PM, koncentration	mg/m ³	16	27	N/A	N/A
PM emission	g/kWh	0,08	0,14	-	-
PN, concentration	#/cm ³	1,9x10 ⁷	2,2x10 ⁷	1,7x10 ⁷	2,2x10 ⁷
PN emission	#/kWh	9,5x10 ¹³	11x10 ¹³	-	-

Det bemærkes at NO_x koncentrationerne er høje når motorerne er under belastning. Motorerne er fra 1981 og bygget længe før der kom fokus på udledning af NO_x. De specifikke emissioner ligger omkring 19 g/kWh, hvor grænsen for udledning fra 2011 ville være på omkring 7,8 g/ kWh for en motor med samme specifikation. Det giver derfor rigtig god mening at reducere NO_x med SCR på dette skib, som fragter passagerer mellem to store havnebyer.

Partikelemissionerne er forholdsvis lave (kun målt under overfart), motorernes alder taget i betragtning. Men idet skibet anvendes som passagerfærge med udendørs opholdsdæk, og ligger meget af tiden i Helsingør og Helsingborg med motorerne i tomgang, giver det også mening at reducere partikeludledningen, da det vil øge komforten for passager og forbedre nærmiljøet på havnearealerne hvor skibet lægger til.

8.4 Specifikation af emissionssystemet

Udgangspunktet for demonstration på Pernille var at alle skibets motorer, dvs. begge hovedmotorer og begge generatorer, skulle udstyres med SCR og partikelfilter. Projektets succeskriterier for installationerne var en NO_x reduktion på mindst 80 % og en partikelreduktion på mindst 98 %.

I forbindelse med planlægningen af installationerne blev der udført et omfattende stykke arbejde, hvor tekniske og sikkerhedsmæssige aspekter blev afdækket. I forhold til normale SCR-installationer med urea skulle der også tages hensyn til risiko for utilsigtet udledning af ammoniak, hvorfor denne installation skulle udføres så eventuel udledning blev ventileret væk fra passagerens opholdsområder.

Ved hjælp af de indledende referencemålinger blev behovet for ammoniak til SCR-systemerne fastslået til ca. 225 mg/s per hovedmotor ved fuld last, hvor der blev målt 1400-1600 ppm NO_x i udstødningen. Dette betød at der skulle bruges to ASDSTM systemer per motor for at sikre en NO_x reduktion på mindst 80 %, da et system kun kan levere 100-150 mg/s.

Der blev indhentet en tidsbegrænset godkendelse fra Søfartsstyrelsen til at gennemføre 18 måneders afprøvning af systemerne på skibet. Idet skibets motorer er fra 1981 og dermed ikke omfattet af NO_x regulering i IMO, er der som udgangspunkt ingen dokumentationskrav ved eftermontering af emissionsreducerende foranstaltninger.

Der blev også arbejdet på at få en internationalt anerkendt typegodkendelse af systemet, så fremtidige godkendelser ikke skulle bero på individuelle vurderinger ved hver installation. Da Amminex trak sig fra projektet i 2018 blev denne del ikke gennemført.

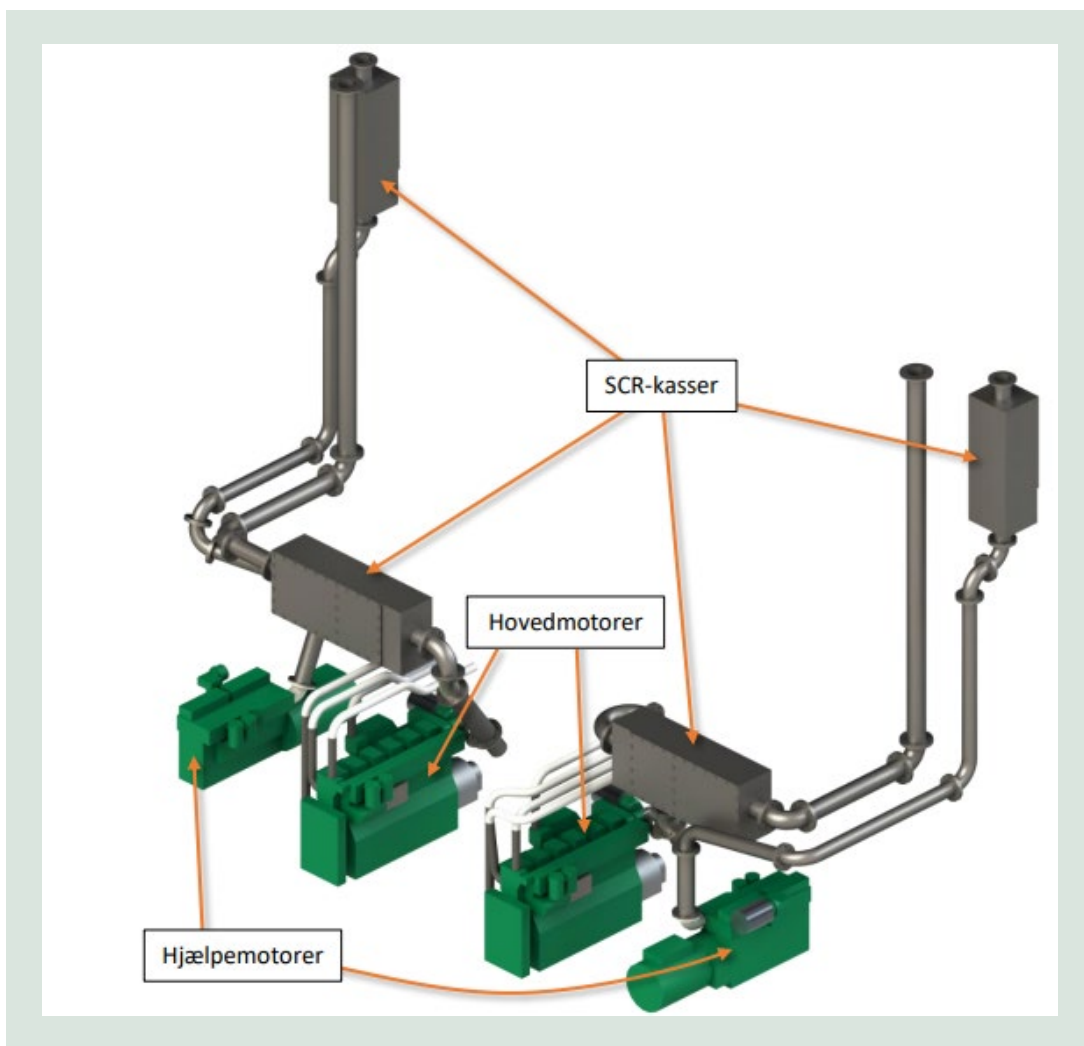
FIGUR 21 skitserer den planlagte installation af SCR-enheder. Der blev arbejdet videre med at få plads til de påtænkte partikelfiltre, men der blev ikke udarbejdet en færdig skitse for placeringen af disse.

8.5 Afprøvning af SCR-løsning

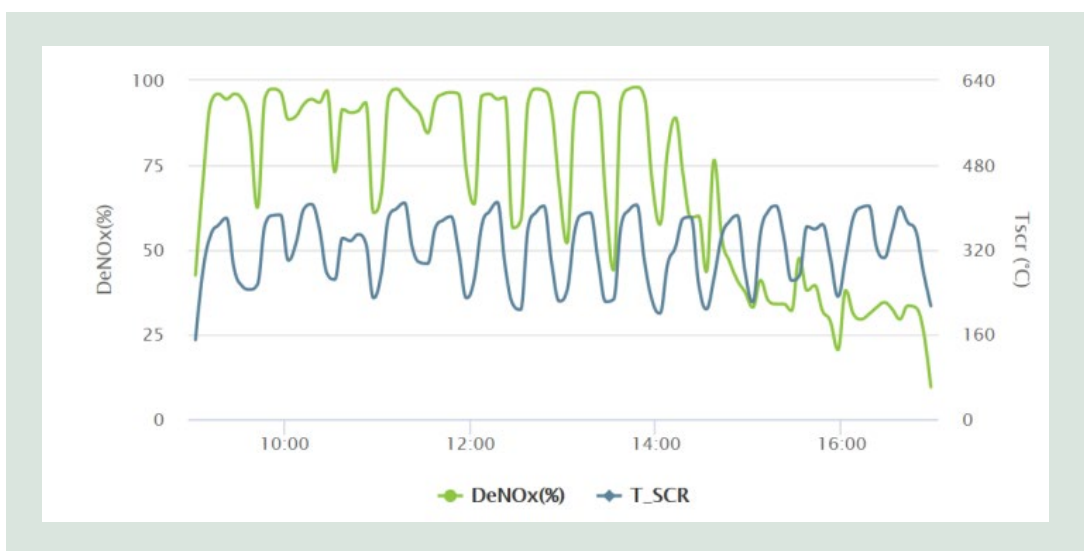
Amminex udførte selv montering af SCR-katalysatorer fra Haldor Topsøe og de tilhørende ASDSTM systemer på skibets hovedmotorer og udførte efterfølgende målinger af NO_x reduktion på disse. Afprøvningen og målingerne er udført med skibet i normal rutefart, da det gav bedst mening i forhold til skibets driftsmønster.

På FIGUR 22 ses i et udvalgt testforløb sammenhængen mellem udstødningstemperatur og opnået NO_x reduktion på den ene hovedmotor. Udsvingene i temperatur skyldes at skibet ligger med lav last på motorerne mellem overfarterne og ved passage ind og ud af havnene. Der opnås en NO_x reduktion på over 95 % når udstødningstemperaturen er over ca. 350 °C. Årsagen til at effektiviteten falder fra kl. 14, er at det ene af de to ASDSTM systemer løber tør for ammoniak omkring dette tidspunkt, og det andet system har ikke tilstrækkelig kapacitet til at følge med doseringsbehovet.

Afprøvningen bekræftede at det var nødvendigt med to systemer per hovedmotor, og at det var muligt at opnå meget høje NO_x reduktioner, også i gennemsnit.



FIGUR 21. Installation af SCR på M/S Pernilles motorer.



FIGUR 22. NO_x reduktion med Amminex ASDS™ system.

8.6 Designovervejelser for partikelfiltre

Skibets originale hovedmotorer var i 2016 blevet hovedrenoveret. Efterfølgende blev der målt et meget højt smørelieferbrug, ca. 80 g/h, på bagbords hovedmotor, mens styrbords

hovedmotor havde et mere normalt forbrug på ca. 6 g/h. Hjælpe motorene havde et normalt olieforbrug omkring 14 g/h.

Der blev valgt et aktivt system fra Purefi med lukkede filtre til hjælpe motorene. Sodafbrænding sker i dette filter aktivt ved dieselindsprøjtning foran filteret, som hæver temperaturen hvilket accelererer sodafbrændingen.

Olieforbruget på bagbords hovedmotor ville være problematisk i forhold til de påtænkte keramiske wall-flow partikelfiltre, hvor oliens askeindhold meget hurtigt vil stoppe filtret til. For at undgå dette blev der overvejet at bruge såkaldt åbne partikelfiltre fra Agriemach, som er en mindre effektiv men også mere olietolerant løsning. Producentens beskrivelse og skitse af opbygningen kan ses i FIGUR 23.

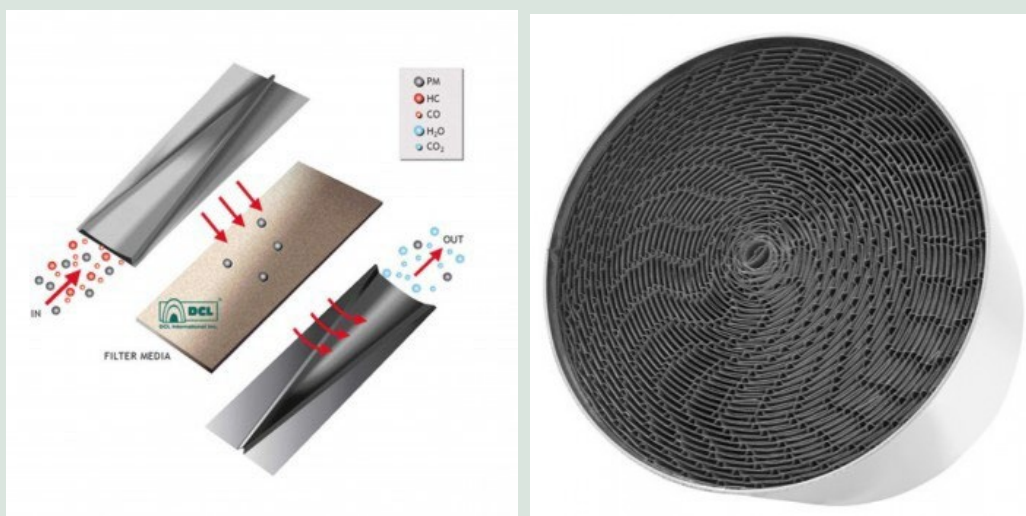
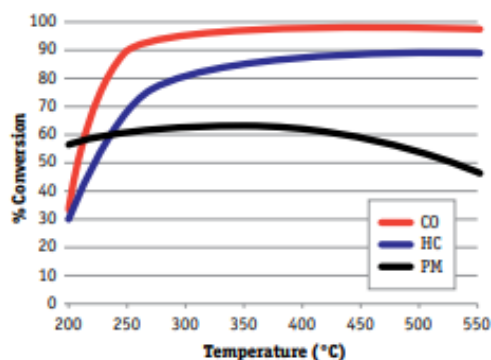
Filteret fra Agriemach ligger under kategorien "partielle" eller "åbne" partikelfiltre, som findes i mange forskellige udførelser, bl.a. som finmaskede metalfiltre. I partielle partikelfiltre opnås filtreringseffektiviteten primært ved at en del af partiklerne, samt CO og kulbrinter, bliver oxideret katalytisk ved kontakt med filteret, når temperaturen er høj nok. I princippet fungerer det åbne partikelfilter som en oxidationskatalysator med et stort overfladeareal. En stor andel af partiklerne passerer dog igennem uden at blive oxideret. Det er ikke beskrevet hvorvidt filteret kan renses for aske, men det er anført at det ikke skal vedligeholdes.

Åbne filtre kan komme i betragtning på især ældre skibe med gamle og slidte motorer, hvor det er udelukket at bruge et keramisk wall-flow filter. Det kan være en økonomisk løsning der kan give mening at afprøve med lav risiko i forhold til at der potentielt kan opnås omkring 50 % reduktion i de udledte partikler, samt reduktion i CO og kulbrinter.

THE BENEFITS

- > Reduces between 60-70% of Diesel Particulates (PM)
- > Looks, installs and operates like a Catalytic Converter
- > Non Blocking – Requires no Maintenance
- > Low Back Pressure
- > High Conversion Efficiency
- > Concentrates on Nano-Particulates (Highest Human Health Risk)
- > Improves Sound Attenuation

MINE-X® FLOW-THROUGH FILTER CONVERSION EFFICIENCY



FIGUR 23. Beskrivelse af åbne partikelfiltre fra Agriemach.

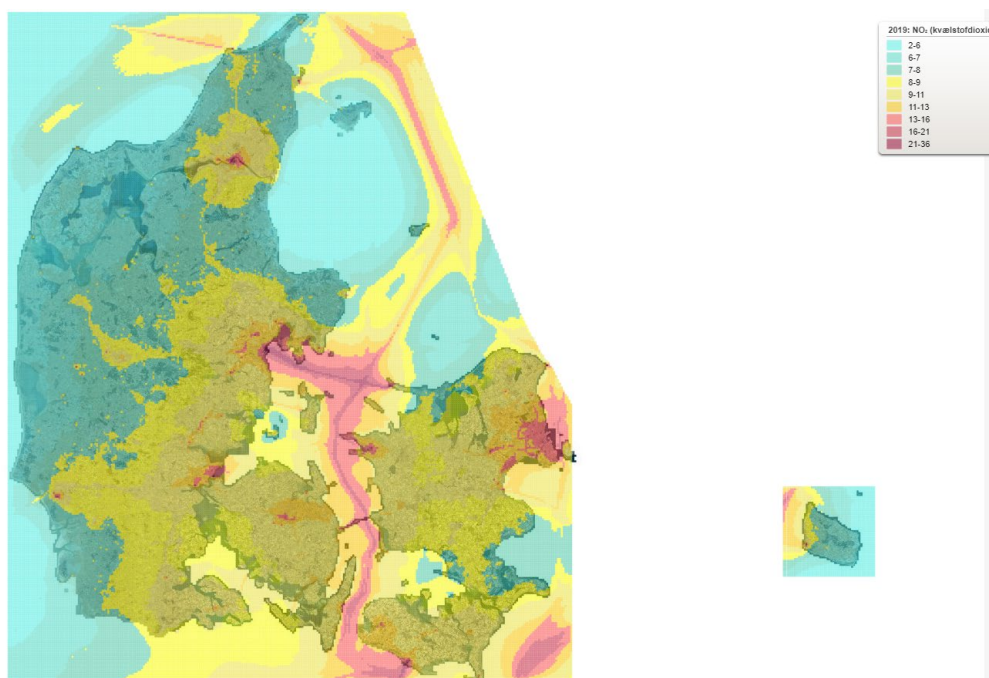
8.7 Afslutning af demonstrationsforløbet

Amminex valgte at træde ud af projektet i oktober 2018, efter at have vurderet at der ikke var et tilstrækkeligt markedspotentiale for eftermontering af teknologien på skibe.

På daværende tidspunkt havde Amminex udført testforløb med SCR-katalysatorer og deres ADDS™ anlæg, som beskrevet i forrige afsnit, men var ikke nået til at installere partikelfiltrene. Der var indkøbt partikelfiltre til både hoved og hjælpemotorer, men monteringen ville kræve en ombygning af udstødningssystemerne, som var planlagt til marts 2019, hvor skibet skulle i dok. Amminex og Partrederiet Sundbusserne aftalte i forbindelse med Amminex udtræden af projektet, at de installerede SCR katalysatorer på hovedmotorerne skulle forblive monteret og eventuelt køre videre med urea-dosering, som katalysatorerne også kan fungere med.

Amminex har beskrevet hele projektføreløbet i en særskilt rapport med titlen "Afsluttende teknisk rapport – M/S Pernille", som er indsendt til Miljøstyrelsen.

9. Konsekvens og potentiale



Luftforurening med NO₂ i Danmark, inklusive bidrag fra skibstrafik. 2019

Kilde: DCE²

9.1 Introduktion

Nationalt Center for Miljø og Energi (DCE) er et center under Aarhus Universitet, der bl.a. arbejder med emner relateret til luftforurening og konsekvenser heraf. DCE blev inviteret til at deltage i projektet, med sigte på at få belyst konsekvenserne ved udbredelse af emissionsteknologierne på skibe i danske farvande for luftforureningens helbredseffekter og tilhørende samfundsmæssige omkostninger.

DCE har bidraget til projektet med en konsekvensanalyse for helbredseffekter og samfundsmæssige omkostninger for et scenarie, hvor alle skibe indregnet under national søfart får eftermonteret partikelfiltre og NO_x-katalysatorer, i det omfang det er teknisk muligt. Konsekvensanalysen er udgivet som rapport i 2021³. Dette kapitel indeholder en kort opsummering af analysen og resultaterne. Samtlige figurer i kapitlet er kopieret fra samme rapport.

² Jensen, S.S., Ketzler, M., Khan, J., Valencia, V.H., Brandt, J., Christensen, J.H., Frohn, L.M., Nielsen, O.-K. Plejdrup, M.S., Ellermann, T. (2021): Luften på din vej 2.0. DCE-Nationalt Center for Miljø og Energi, 62 s. - Videnskabelig rapport fra DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi nr. 445, <http://dce2.au.dk/pub/SR445.pdf>

³ Jensen, S.S., Winther, M., Brandt, J., Frohn, L.M., 2021. Reduktionspotentialer for luftforurening fra national søfart i Danmark ved retrofit af SCR og partikelfiltre - Betydning for helbredseffekter og tilhørende eksterne omkostninger. Aarhus Universitet, DCE – Nationalt Center for Miljø og Energi, 43 s. - Videnskabelig rapport nr. 464. <http://dce2.au.dk/pub/SR464.pdf>

9.2 Datagrundlag

Udgangspunktet for at kunne vurdere potentialet for reduktion af luftforurening fra skibe i kystnære farvande ved emissionsbegrænsende løsninger er den nationale emissionsopgørelse for national søfart. Emissionen er beregnet ud fra aktivitetsdata, emissionsfaktorer og beregningsmetoder, og emissionerne er geografisk fordelt på danske farvande med den såkaldte SPREAD-model.

Den nationale opgørelse indeholder nationale indenrigs færgeruter, inklusive færgeruter til Færøerne og Grønland. Færgeruterne til vores nabolande og gennemgående trafik mellem disse lande i dansk farvand er ikke inkluderet.

9.3 Potentiale for udbredelse

I emissionsreduktionsberegningerne er det antaget, at NO_x-emissionerne reduceres med 80% for skibe som bruger MDO, MGO og HFO i national søfart.

For partikelemissioner er det antaget, at det er muligt at reducere med 99% med partikelfilteret eftermonteret set i forhold til emissionerne fra motoren uden partikelfilter, ved anvendelse af MDO/MGO-diesel med et svovlindhold på 50 ppm.

For skibe der anvender HFO som brændstof antages det at det ikke er muligt at anvende partikelfiltre, da teknologien pt. ikke er i stand til at håndtere de store mængder aske og sod, som forbrændingen af HFO danner.

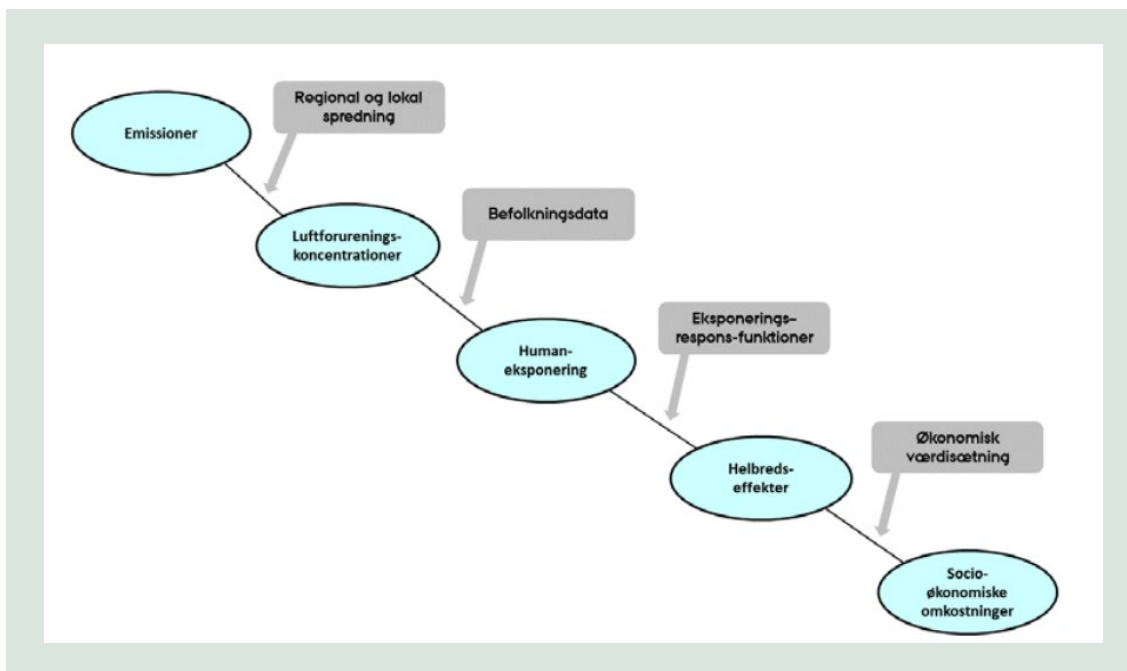
HFO udgør kun ca. 18 % af den totale anvendte brændstoffmængde i national søfart, men grundet brændstoffets høje indhold af svovl står forbrænding af HFO i skibe for næsten halvdelen af den totale årlige udledte partikelmasse fra skibene.

9.4 Metode

DCE har udført konsekvensanalysen med følgende metode:

1. Analysen tager udgangspunkt i den nationale opgørelse af emissioner fra søfarten, som er kortlagt af DCE. Dette er referencen for beregningen af potentialet for reduktioner af emissioner fra skibene i nationalt farvand.
2. Reduktionspotentialet antages at være 80 % for NO_x uanset anvendt brændstoffkvalitet og er beregnet til at være 52 % for partikelmassen, når emissioner fra skibe der sejler på HFO ikke kan anvende partikelfiltre.
3. For reduktionssceneriet er forskelle i koncentrationerne af sundhedsskadelige emissioner beregnet med en høj geografisk opløsning på 1 km x 1 km.
4. Konsekvenserne af de beregnede koncentrationsforskelle beregnes med EVA-systemet (Economic Valuation of Air Pollution).

EVA-systemet er en metodisk tilgang til en objektiv vurdering af sundhedsmæssige konsekvenser ved eksponering af mennesker for sundhedsskadelig forurening. I FIGUR 24 er vist hvordan systemet anvendes til økonomisk værdisætning af de konsekvenser, som følger af eksponeringen.



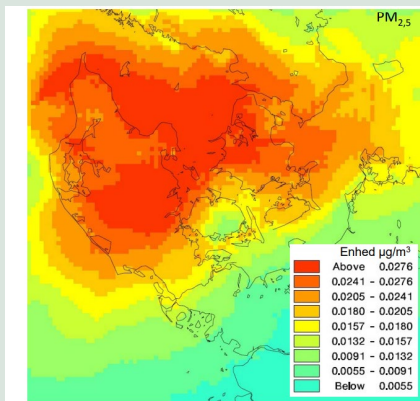
FIGUR 24. Skitsering af EVA-systemets trin.

Diagrammet viser trinene i EVA-systemet. Der tages udgangspunkt i de specifikke lokale emissioner, som indsættes i en spredningsmodel, der både modellerer atmosfærisk spredning, atmosfærekemi og afsætning. Modellen resulterer i et detaljeret billede af luftkoncentrationer af forurenende komponenter, som sammen med data for befolkningstæthed giver et samlet billede af befolkningseksponeringen. Herefter anvendes eksponeringsresponsfunktioner til at beregne helbredseffekterne på befolkningen. Endelig værdisættes disse helbredseffekter (sundhedseffekter, sygefravær, hospitalsophold, tabte leveår mm.) efter gældende normer for værdiansættelser, hvilket resulterer i et samlet resultat for sundhedsmæssige omkostninger, fordelt på arten af forurening (primære og sekundære partikler, ozon, SO₂ og NO₂.)

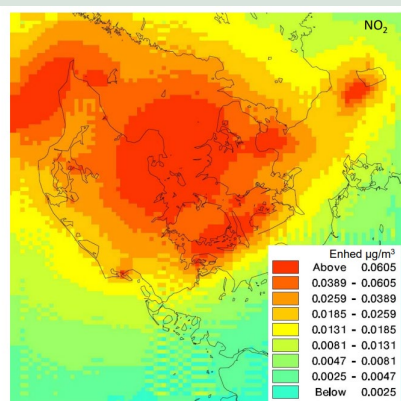
9.5 Spredningsmodeller

DCE har bl.a. anvendt modellen Danish Eulerian Hemispheric Model (DEHM) til at beregne den geografiske spredning af skibenes emissioner over Danmark og Europa. I denne model er der først kørt en beregning med basissceneriet baseret på emissionsopgørelsen for 2018, derefter en beregning baseret på tallene i reduktionssceneriet. Forskellen på de to emissionsscenerier giver koncentrationsforskelle i PM_{2,5} og NO₂, som er gengivet i FIGUR 25.

I beregningen af de lokale koncentrationer indgår modellering af atmosfærekemi, som omsætter en del af de primære emissioner til andre former for luftforurening, herunder dannelse af sekundære partikler. I denne sammenhæng skelnes der altså mellem udledte primære partikler (PPM_{2,5}) og partikler generelt (PM_{2,5}), som udgøres af både de primære og sekundært dannede. DEHM-modellen foretager beregningerne af de atmosfærekemiske processer som sker under transporten af forureningen, såvel som deposition ved regn og afsætning på vegetation.



Figur 5.1. Koncentrationsforskel beregnet med DEHM for PM_{2,5} som følge af scenariet for emissionsreduktion i national søfart i 2018.



Figur 5.2. Koncentrationsforskel beregnet med DEHM for NO₂ som følge af scenariet for emissionsreduktion i national søfart i 2018.

FIGUR 25. Forskelle i koncentrationer af PM_{2,5} og NO₂ i reduktionsscenarioet. Beregnet med DEHM-modellen.

9.6 Hovedkonklusioner

Dette afsnit indeholder ordrette gengivelser af rapportens hovedkonklusioner, som er oplyst først i rapporten, suppleret med tabeller fra de relevante afsnit i rapporten.

Emissioner fra national søtransport

De samlede NO_x- og PM_{2,5}-emissioner fra national søfart i 2018 er hhv. 11.939 tons og 277 tons. PM_{2,5} er partikler under 2,5 mikrometer i diameter.

De samlede NO_x- og PM_{2,5}-emissioner fra national søfart udgør hhv. 10% og 1,6% af de totale NO_x og PM_{2,5} emissioner for alle emissionskilder i den nationale emissionsopgørelse for 2018.

Tablet 3.3. De samlede energiforbrug og NO_x- og PM_{2,5}-emissioner for national søfart i 2018 opdelt pr. brændstoftype for større færger, mindre færger, øvrig national søfart og godstransport til Grønland/Færøerne.

	Brændstoftype	Energiforbrug		NO _x Tons	PM _{2,5} Tons	NO _x % af samlet	PM _{2,5}
		PJ	Tons				
Større færgeruter	MDO/MGO	2,15	50388	2045	41,1		
	HFO	0,75	18400	1151	61,0		
	LNG	0,08	1723	13	0,7		
	I alt	2,99	70511	3210	102,8	26,9	37,1
Mindre færgeruter	MDO/MGO	0,32	7535	373	6,5	3,1	2,3
	HFO	0,00	0	0	0,0		
	I alt	3,83	89708	6078	87,9	50,9	31,7
Øvrig national søfart	MDO/MGO	3,83	89708	6078	87,9		
	HFO	0,00	0	0	0,0		
	I alt	3,83	89708	6078	87,9	50,9	31,7
Grønland/Færøerne	MDO/MGO	0,43	10090	684	9,9		
	HFO	0,76	18597	1595	69,9		
	I alt	1,19	28687	2278	79,8	19,1	28,8
Samlet		8,33	196441	11939	277	100,0	100,0

FIGUR 26. Emissionsopgørelse for national søfart i 2018.

Potentiale i reduktionsscenarioet

De forudsatte procentvise emissionsreduktioner svarer til samlede emissionsbesparelser på 9.541 tons NO_x og 144 tons PM_{2,5} i 2018.

Reduktion i helbredseffekter

De sparede helbredseffekter i form af dødelighed og sygelighed ved reduktionsscenarioet for national søtransport er underopdelt i "Hele Europa" (inkl. Danmark) og "Kun Danmark".

I Danmark vil reduktionsscenarioet potentielt kunne spare 17 for tidlige dødsfald om året, mens det samlede antal i hele Europa inkl. Danmark er 98 for tidlige dødsfald i 2018. De 17 for tidlige dødsfald i Danmark, som kan spares i reduktionsscenarioet, udgør omkring 1,4% af antallet af for tidlige dødsfald pga. emissioner fra alle danske kilder. De 98 for tidlige dødsfald i Europa inkl. Danmark udgør tilsvarende omkring 3,2% af Danmarks bidrag til Danmark og udland. Herudover vil der være en reduktion i sygelighed.

Tabel 6.1. Reduktion af helbredseffekter som følge af reduktionsscenarioet for national søtransport i 2018.

Helbredseffekter	Hele Europa	Kun Danmark
Dødelighed		
For tidlige dødsfald fra korttidseksponering (PM _{2,5} , SO ₂ , NO ₂ , O ₃)	22	6
For tidlige dødsfald fra langtidseksponering (PM _{2,5} , NO ₂)	76	11
Dødsfald blandt spædbørn (PM _{2,5})	0	0
Totalt antal for tidlige dødsfald (PM_{2,5}, NO₂, O₃, SO₂)	98	17
Sygelighed		
Hospitalsindlæggelser for åndedrætsbesvær (PM _{2,5} , NO ₂ , O ₃)	74	25
Hospitalsindlæggelser for hjertekarsygdomme (PM _{2,5} , O ₃)	13	-1
Astmasymptomer børn (PM _{2,5})	8	1
Bronkitis voksne (PM _{2,5})	72	11
Bronkitis børn (PM _{2,5})	238	37
Dage med tabt arbejde (PM _{2,5})	7037	1000
Dage med nedsat aktivitet (sygedage) (PM _{2,5})	88800	13100
Dage med delvist nedsat aktivitet (sygedage) (O ₃)	13	-6
Lungekræft (PM _{2,5})	1	0

FIGUR 27. Oversigt over potentialet for reduktion i helbredseffekter i scenariet. Der er beregnet helbredseffekter både for Danmark og Europa, som er omfattet af modellen.

Reduktion i eksterne omkostninger af helbredseffekter

De samlede sparede eksterne omkostninger af helbredseffekter fra luftforurening er 332 mio. kr. om året i reduktionsscenarioet for national søtransport, mens det er 1,7 mia. kr. om året i hele Europa inkl. Danmark. 19% af gevinsten er i Danmark, mens 81% af gevinsten er i det øvrige Europa. Langt den største del skyldes reduktion i partikler. Bemærk dog at PPM_{2,5} udgøres af primære (direkte udledte) sodpartikler, mens øvrige PM udgøres af sekundære partikler, herunder partikler dannet ved reaktion med sulfat, ammonium og nitrat.

Tabel 6.2. Reduktion af eksterne omkostninger ved sparede helbredseffekter som følge af reduktionsscenarioet for national søtransport i 2018.

Mio. DKK	Total	SO ₂	O ₃	NO ₂	PPM _{2,5}	Øvrige PM	Total PM _{2,5}
Hele Europa inkl. Danmark	1747	0,30	37	203	33	1474	1507
Kun Danmark	332	0,01	-17	133	12	205	217
Procent i Danmark	19%	5%	-47%	65%	35%	14%	14%

FIGUR 28. Oversigt over potentialet for reduktion af årlige eksterne omkostninger for hhv. Danmark og Europa. Omkostningerne er opgjort i mio. DKK med udgangspunkt i 2018.

Table 6.3. Enhedspriser for NO_x og PPM_{2,5} for national søfart.

Enhedspriser	Europa inkl. Danmark	Danmark
Lufforurening	Kr./kg	Kr./kg
NO _x (NO ₂ -enheder)	122	26
PPM _{2,5} (primære partikler)	230	81

FIGUR 29. Opgørelse af enhedspriser for NO_x og PPM_{2,5}. Enhedsprisen udtrykker den helbredsoms-kostning som en udledning af et kilo af stoffet giver anledning til.

9.7 Diskussion og perspektivering af rapportens konklusioner

Analysen fra DCE bidrager med et overblik over den nationale skibsfarts emissioner, og de helbreds-mæssige effekter som disse har i Danmark og Europa. Det er bemærkelsesværdigt at en meget stor del af den potentielle reduktion i emissioner også vil komme vores europæiske naboer til gode. Der kan derfor argumenteres for at det vil være meningsfyldt at investeringer i emissionsudstyr til skibe bør støttes gennem nordiske eller fælleseuropæiske initiativer, fremfor at udgifterne bliver finansieret nationalt.

Den norske NO_x-fund er et eksempel på hvordan afgifter på NO_x tilbageføres til projekter der giver direkte reduktion af udledt NO_x, hvilket i høj grad er udnyttet til både ombygning og nybygning af skibe med lave NO_x emissioner. I Norge er det dog overvejende LNG-motorer der er anvendt som alternativ til normale marine dieselmotorer, som er blevet støttet.

9.8 Regneeksempel på helbredsoms-kostninger

De beregnede enhedspriser kan bruges til at estimere den samfundsmæssige gevinst ved at montere partikelfiltre og/eller SCR-katalysatorer på specifikke skibe, hvor emissionerne ofte kan estimeres eller bestemmes direkte ved måling som beskrevet i denne rapport.

Der tages udgangspunkt i et skib, hvor motorene har en gennemsnitlig NO_x udledning på 10 g/kWh og en partikeludledning på 0,2 g/kWh, hvilket er normale værdier for mindre 4-taktsmotorer. NO_x-udledningen svarer nogenlunde til grænseværdien under IMO Tier I, som var emissionsstandard for skibe bygget mellem år 2000 og 2011, mens skibe bygget mellem 2011 og 2021 vil have Tier II godkendte motorer med en tilladt NO_x emission på 8-9 g/kWh. Fra 2021 vil nye skibe med dieselmotorer som udgangspunkt være udstyret med SCR, hvis de skal sejle i danske farvande, som ligger i ECA området.

Skibet antages at have et gennemsnitligt effektbehov på 500 kW til fremdrifts- og hjælpemotorer, med drift 2000 timer om året. Dette bliver til 1 mio. kWh på et år, hvilket med ovenstående antagelser medfører en udledning på 10 ton NO_x og 200 kg primære partikler (PPM_{2,5}). I TABEL 15 er reduktionen af de årlige eksterne sundhedsoms-kostninger ved hhv. reduktion af NO_x med SCR og PPM_{2,5} med partikelfiltre beregnet.

TABEL 15. Beregningseksempel på reduktionspotentialet og de mulige reduktioner i årlige eksterne sundhedsoms-kostninger for et mindre skib.

	Enheder	NO _x	PPM _{2,5}
Skibets specifikke emissioner	g/kWh	10	0,2
Skibets årlige emissioner	kg/år	10000	200
Reduktionspotentiale	kg/år	8000	200
Enhedspris, Danmark	Kr./kg	26	81
Årlig reduktion af eksterne omkostninger, Danmark	Kr./år	208000	16200
Enhedspris, Europa, inkl. Danmark	Kr./kg	122	230

	Enheder	NO _x	PPM _{2,5}
Skibets specifikke emissioner	g/kWh	10	0,2
Skibets årlige emissioner	kg/år	10000	200
Reduktionspotentiale	kg/år	8000	200
Årlig reduktion af eksterne omkostninger, Europa inkl. Danmark	Kr./år	976000	46000

Hvis en installation med SCR-katalysatorer antages at have en levetid på 10 år og en virkningsgrad på 80 %, vil NO_x reduktionen i denne periode kunne spare det danske samfund for helbredsomkostninger på omkring 2 mio. DKK og for Europa inkl. Danmark er besparelsen tæt på 10 mio. DKK.

En installation med partikelfiltre, som også antages at have en levetid på 10 år med 100 % reduktion af primære partikler, vil partikelreduktionen i denne periode kunne spare det danske samfund for helbredsomkostninger på 160.000 DKK og for Europa inkl. Danmark er besparelsen 460.000 DKK.

Ud fra en samfundsøkonomisk betragtning giver det således god mening at overveje eftermontering af SCR på ældre skibes motorer, idet de sparede eksterne omkostninger med NO_x reduktion, ifølge eksemplet, er estimeret til at være langt højere end den gevinst som reduktion af primære partikler (PPM_{2,5}) ved eftermontering af partikelfiltre er estimeret til.

9.9 Regionale kontra lokale effekter

Det er vigtigt at bemærke at der er forskel på de lokale og regionale effekter af forureningen med NO_x og primære partikler. Studiet af effekterne ser på reduktionspotentialet og de mulige sparede sundhedsomkostninger for Danmark og Europa som helhed, hvor atmosfæriske processer har en stor betydning bl.a. for dannelse af sekundære partikler, som bidrager forholdsvis meget til de samlede eksterne omkostninger. Men i nærmiljøet, dvs. på skibe og i havneområder, er det sandsynligt at emissioner af primære partikler har større betydning for sundhedseffekterne end NO_x, ligesom reduktion af partikler med partikelfiltre ofte giver en synlig effekt. Lugtgener reduceres også i højere grad med partikelfiltre end SCR-katalysatorer, idet partikelfiltrene som udgangspunkt fjerner både partikler og de kulbrinter som kan lugtes i udstødningen, samt CO. Endelig kan partikelfiltre give markant bedre lyd-dæmpning end SCR-katalysatorer.

Set i lyset heraf kan det derfor give mening for de enkelte rederier at fokusere på at fjerne partikler, lugtgener og opnå støjreduktioner, med fokus på den oplevede merværdi særligt i forhold til øget komfort for passagerne. Dette betinger dog også at rederiet kan anvende brændstof i høj kvalitet, med lavt svovlindhold.

I andre sammenhænge vil der ikke være behov for hensyntagen til besætning, passagerer og nærmiljø. Her vil en indsats med SCR-katalysatorer kunne give større værdi i et samfundsøkonomisk perspektiv, som vist i regneeksemplet i afsnit 9.8.

Maritime Emissionsløsninger i Kystnære Farvande

Skibe med dieselmotorer udleder store mængder af sodpartikler og NO_x. Der er derfor et stort potentiale for at reducere luftforureningen fra skibe, ved at udnytte partikelfiltre og NO_x-katalysatorer, som er udviklet og udbredt til dieseldrevne motorer i køretøjer.

Projektet har haft til formål at udvikle, demonstrere og produktmodne efterbehandlingssystemer til skibe i kystnære farvande, med fokus på NO_x og sodpartikler. Projektets partnere har udviklet og afprøvet disse løsninger på tre mindre skibe.

Exilator ApS har udviklet og installeret partikelfiltre på bilfærgen M/F Isefjord. Fire partikelfiltre har været i drift på skibets hovedmotorer og generatorsæt siden 2018. Partikelfiltrene fjerner sodpartikler effektivt og dæmper støjen fra udstødningen til et meget lavt niveau. Eftermonteringen øger komforten for besætningen og passagererne, og der har samlet set været stor tilfredshed med processen og resultatet.

Purefi A/S har udviklet og produceret svovltolerante emissionssystemer med partikelfiltre og NO_x-katalysatorer til motorer, som anvender brændstof med op til 0,1 % svovlindhold. Systemerne blev udviklet til et servicefartøj, som transporterer serviceteknikere ud til vindmølleparke. Demonstrationen viste, at systemerne opfyldte målsætningen ift. NO_x- og partikelreduktion.

Amminex Emission Solutions A/S har arbejdet med eftermontering af NO_x-katalysatorer til passagerfærgen M/S Pernille. Det blev demonstreret, at katalysatorerne med dosering af ren ammoniak kunne opnå en høj NO_x-reduktion under færgens overfart.

DCE - Nationalt Center for Miljø og Energi har udarbejdet en detaljeret redegørelse for helbredseffekter og sundhedskostninger som følge af luftforurening med NO_x og partikler fra skibe i national søfart, samt de forventede samfundsøkonomiske gevinster ved at reducere disse emissioner med efterbehandlingssystemer.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk