



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Robust maritim sensor til kontinuerlig måling af partikeludledning MUDP-projekt

MUDP

September 2026

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Naja Villadsen, Casper Laur Byg, Julie Tølbøl Rasmussen, Teknologisk Institut
Steffen Møller, Jakob Brøns, Daniel Dith, Sonny Bækdahl Trudslev, Green Instruments A/S

ISBN: 978-87-7564-151-2

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
Lerchesgade 35, 5000 Odense J 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.	Sammenfatning	5
1.1	Resume af projektet	5
1.2	Hovedkonklusion(er)	5
1.3	Afledte effekter	5
1.4	Perspektivering	6
2.	Afreportering på aktiviteter	7
2.1	Arbejdspakke 1: Dybdegående teknologianalyse og udformning af kravspecifikation	7
2.2	Arbejdspakke 2: Udvikling af laboratorieopstilling, validering og kalibreringskoncept	7
2.2.1	Bordopstilling	8
2.2.2	Tøndemodell	10
2.2.2.1	Referencemålinger til kalibrering i varm røggas	11
2.3	Arbejdspakke 3: Hardwareudvikling, maritim test og produktmodning	12
2.4	Arbejdspakke 4: Demonstration og feltkampagne	13
2.4.1	Referencetest på tønde	13
2.4.2	Installation på skib	17

1. Sammenfatning

Formålet med projektet har været at udvikle og afprøve en innovativ, robust og kosteffektiv sensor til kontinuerlig måling af partikeludledning (PM) i røggas fra skibe. Løsningen skal gøre det muligt at dokumentere de faktiske maritime partikelemissioner i realtid og styrke både miljøindsats og teknologisk innovation i den maritime sektor.

1.1 Resume af projektet

Projektet har været struktureret i fire arbejdsplaner, fra teknologianalyse og kravspecifikation til udvikling, test og demonstration af sensoren. Arbejdet blev gennemført i et tæt samarbejde mellem partnere fra både industrien og vidensinstitutioner, herunder Green Instruments, Teknologisk Institut, Danske Maritime og MOL Chemical Tankers.

Projektet forløb generelt planmæssigt, omend der undervejs opstod tekniske udfordringer relateret til måleteknologi, laboratorieopsætning og kalibrering i varme røggasser. Disse udfordringer blev løst gennem tilpasning af testsetups, justering af detektorkonfiguration og løbende sparring mellem projektpartnere. En væsentlig erkendelse var, at enkeltpartikelmåling ikke var realistisk i praksis, og projektet fokuserede derfor på et volumenbaseret måleprincip.

Undervejs blev projektet formidlet via flere kanaler til relevante aktører, herunder branchefolk, industri og myndigheder. Teknologineutralitet på måleprincipper blev fremhævet og indarbejdet i internationale IMO-guidelines, hvilket giver mulighed for PM-regulering fremover.

1.2 Hovedkonklusion(er)

Projektet har leveret følgende hovedresultater:

- Udvikling og validering af en robust, modulopbygget PM-sensor baseret på eksisterende black carbon-moduler, med dokumenteret stabil drift både i laboratorie- og feltforsøg under maritime forhold.
- Dokumenteret proof-of-concept for laboratorie- og feltmålinger på forskellige partikelstørrelser og -typer (PM_{2.5} og BC), hvor dataopsamling muliggjorde udviklingen af en kalibreret algoritme til pålidelig bestemmelse af partikelmassekonzentration. Målin-gerne viste en høj korrelation ($r^2=0,92$) mellem sensorsystem og referenceudstyr i et måleområde mellem nogle få ng/m³ og op til 50 mg/m³.
- Demonstration af sensorens funktion i laboratorieopstilling, en simuleret skorsten (tønde model) samt forsøg på skibe, herunder afprøvning af stabilitet og kommunikation under maritime forhold.
- Udarbejdelse af et kalibreringskoncept og en ny model for massekoncentrationsbestemmelse, der kan anvendes til maritim realtidsmonitorering.

1.3 Afledte effekter

Deltagelsen i projektet har betydet:

- Styrket samarbejde i hele værdikæden fra udvikling over test til brug, med øget viden om partikelmåling under realistiske maritime betingelser.
- Markant løft i vidensniveau hos partnerne ift. PM-måleteknik, optik, elektronik, databehandling og maritim systemintegration.

- Udvikling af en produktplatform, hvor PM- og BC-måling kan kombineres, og der er skabt grundlag for kommercialisering af verdens første in-situ realtidsmålede PM/BC-sensor til skibsfart.
- Udvidet netværk til både nationale og internationale aktører, herunder centrale indspil til kommende IMO-reguleringer.
- Vidensgrundlag og tilpasset laboratorieudstyr åbner for nye projekter inden for PM-måling, både maritimt og potentielt landbaseret.

1.4 Perspektivering

Projektets resultater har stor betydning for den grønne omstilling i skibsfarten, idet robust og valideret måleteknologi er en forudsætning for troværdig dokumentation af udledninger. Hvis sensorløsningen markedsføres bredt, kan det få væsentlig indflydelse på:

- Skærpet regulering og håndhævelse af maritime partikeludledninger samt indsats mod luftforurening og klimabelastning.
- Sikker dokumentation af miljøeffekter fra brændstofovergang (fossil til alternativt brændstof) og implementering af emissionsreduktionsteknologier (fx scrubbere og filtre) samt årlige klimaregnskaber for rederier.
- Mulighed for at sætte nye standarder for monitorering, der kan danne grundlag for såvel international regulering som frivillige miljøinitiativer i rederibranchen.
- Teknologien har potentiale for udbredelse til landbaseret procesindustri, hvor der er tilsvarende behov for robust, kontinuerlig partikelmåling.

2. Afrapportering på aktiviteter

2.1 Arbejdspakke 1: Dybdegående teknologianalyse og udformning af kravspecifikation

Arbejdspakke 1 havde til formål at kortlægge og analysere eksisterende måleprincipper og udstyr til partikelmåling (PM) med henblik på anvendelse i maritime miljøer. Der blev udført et review af nationale og internationale referencemetoder samt relevante erfaringer fra beslægtede brancher, fx industri og transport (IMO, EU, mv.). Dette dannede grundlag for fastsættelse af centrale funktionskrav til sensoren samt en indkredsning af regulatoriske krav og udviklingsmuligheder.

AP1 skabte det metodiske og tekniske fundament for det efterfølgende udviklingsarbejder. Bland andet gennem kravspecifikationer som løbende blev konkretiseret i dialog med industrien, ud fra tekniske afgrænsninger. Herunder valg af tør gas og dermed fravalg at skibe med scrubber som primære scenarie. Desuden blev viden og erfaringer fra tidligere black carbon-projekter aktivt integreret i processen.

Flere tekniske løsningsmodeller blev analyseret gennem litteraturstudier, beregninger og optiske simuleringer (herunder Mie-spredning). Analysen viste tidligt, at enkeltpartikelmåling ikke var praktisk anvendelig ved de koncentrationer, der forekommer i maritime emissioner. Derfor blev fokus rettet mod en volumenbaseret metode, hvor der analyseres på et samlet signal fra et afgrænset volumen. Den volumenbaserede metode muliggør samtidig integration med Green Instruments' (GI) eksisterende platform for black carbon-monitorering. Det nye sensor-system blev derved designet med mulighed for samtidig måling af PM- og BC-koncentrationer i ét modulært setup.

I analysearbejdet blev det vurderet, om sensoren primært skulle måle PN (partikelantalskoncentration) eller PM (partikelmassekoncentration). Valget faldt på partikelmassekoncentration som hovedparameter, da dette vurderes mest relevant for dokumentation og regulering. Det blev også besluttet at undersøge potentialet for partikelstørrelsesfordeling.

Kravspecifikationerne og den gennemførte tekniske analyse dannede grundlag for udvælgelsen af relevante måleprincipper, som blev testet og videreudviklet i de følgende arbejdsopgaver – først i fleksibel laboratorieopstilling, derefter i skorstenssimulering (tøndemodell) og endelig ved installation på skib.

2.2 Arbejdspakke 2: Udvikling af laboratorieopstilling, validering og kalibreringskoncept

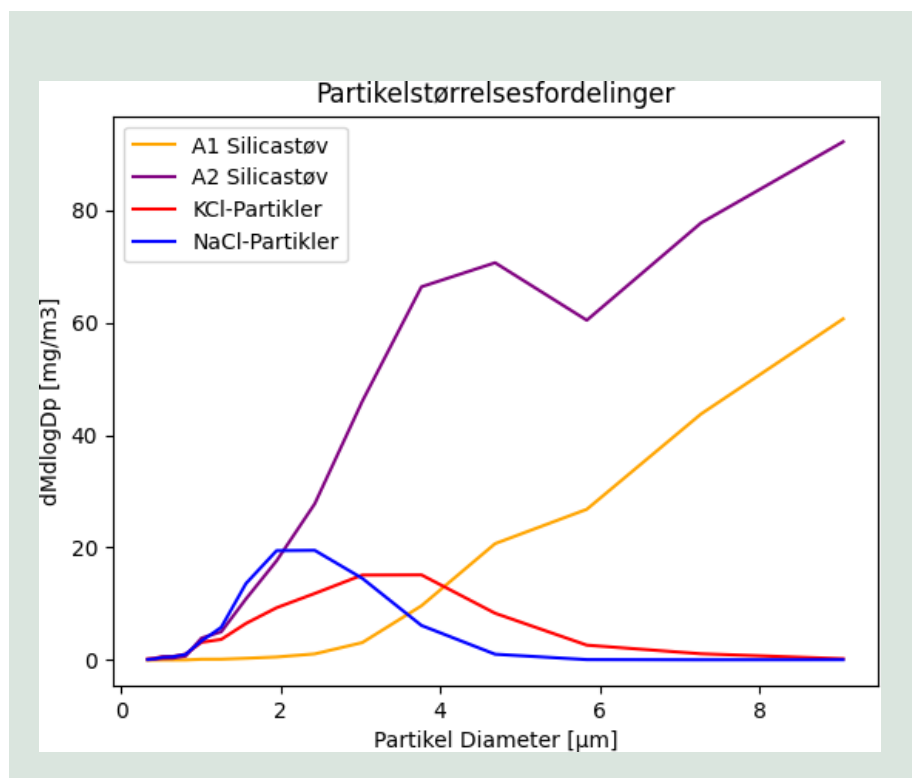
AP2 fokuserede på at teste de udvalgte måleprincipper fra AP1. Til det formål blev der opbygget to typer testopstillinger:

- En fleksibel bordopstilling, der gjorde det muligt hurtigt at ændre målekonfigurationer (fx detektorplacering, vinkler, bølglængder)
- En tøndemodell, som i højere grad simulerer en skibsskorsten, men med mindre fleksibilitet

Disse opstillinger dannede grundlag for optimering af måleparametre samt udvælgelse og test af de mest relevante parametre for en optimal bestemmelse PM i skibsrøg. Det var samtidig en forberedelse til senere validering.

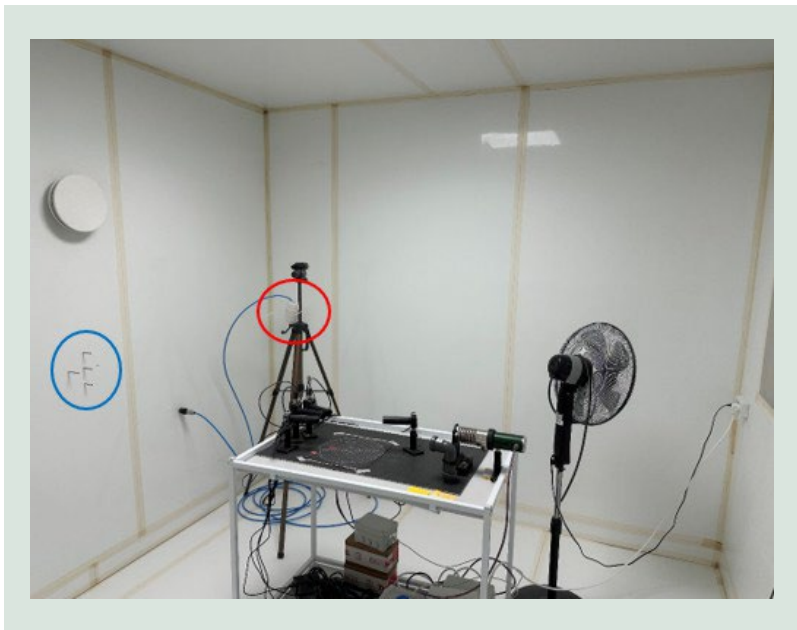
2.2.1 Bordopstilling

Den fleksible bordopstilling blev konstrueret af standard optiske laboratoriemoduler. Her kunne centrale parametre som polarisering, bølgelængde og detektorplacering justeres, hvilket muliggjorde systematisk afprøvning og optimering for forskellige PM-typer. Formålet med opstillingen var at kunne udvælge de mest relevante parametre til videre test. Der blev udført målinger på forskellige partikeltyper og -størrelser i form af salt- og sandpartikler i forskellig størrelse: SiO₂-partikler i form af DMT Test Dust A2 og A1, samt KCl- og NaCl-partikler fra en vandig opløsning med en volumenprocent på 20% for henholdsvis KCl og NaCl. Målte partikelstørrelsesfordeling kan ses i FIGUR 1.



FIGUR 1. Partikelstørrelsesfordelinger for A1 og A2 silica samt KCl- og NaCl-saltpartikler.

Bordopstillingen blev placeret i et 20 m³ teflonbelagt kammer hvor udluftning og partikeltilførsel kunne kontrolleres. Den fulde forsøgsopstilling for forsøg med silicapartikler kan ses på FIGUR 4.



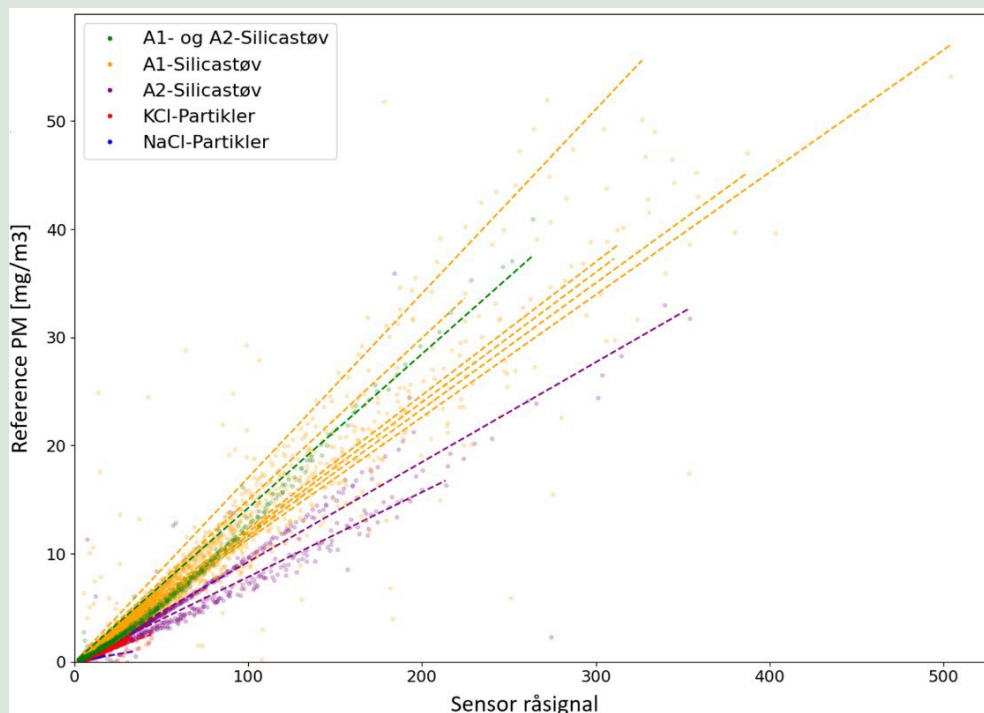
FIGUR 2. Kammer med den fulde forsøgsopstilling for forsøg med Silicapartikler. Den røde cirkel viser støvbeholderen til partikelsprednings og den blå cirkel viser måleporene til referenceudstyret.

Referenceudstyret som sensormodulerne blev sammenlignet med var en Optical Particle Sizer (OPS Model 3330 fra TSI) som var forbundet til kammeret gennem rørene markeret i blå på FIGUR 2. OPS'en har den fordel som referenceudstyr at den måler partikelstørrelsesfordeling, partikelmassekoncentration og partikelantalskoncentration samtidig. Udfordringen er en lav øvre detektionsgrænse på 3000 partikler pr cm^3 .

Partiklerne blev spredt ved hjælp af henholdsvis en hjemmebygget støvspreder til Silica og en Palas AGK2000 til KCl- og NaCl-partikler. Til at undersøge forskellige størrelser blev det udnyttet at større partikler hurtigere falder til jorden end mindre partikler.

Testene med bordmodellen identificerede en række relevante måleparametre, som blev udvalgt til videre undersøgelse. Samtidig blev der opnået væsentlige erfaringer med kalibrering og analyse af sensordata.

FIGUR 3 illustrerer korrelationen mellem én udvalgt måleparameter og reference-PM-målinger og bekræfter, at metoden har potentiale for videreudvikling. Testene understregede dog også behovet for yderligere afprøvning på reelle udstødningspartikler, da bordmodellen ikke reflekterer partikelsammensætningen fra en forbrændingsmotor.

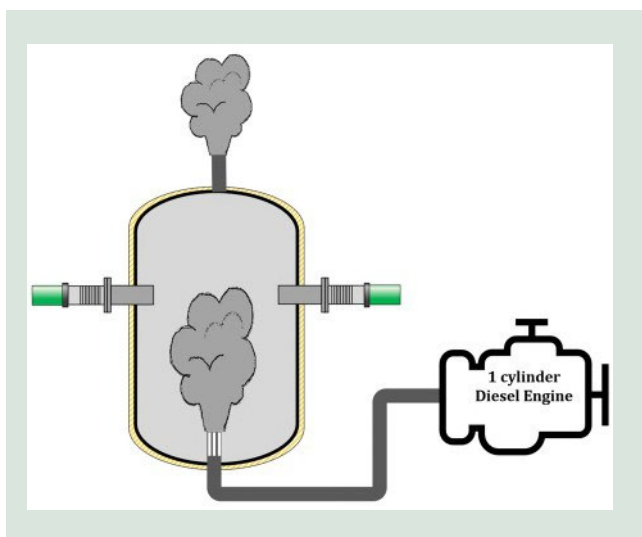


FIGUR 3. Eksempel på sammenhæng mellem referencemålinger af PM koncentrationer og rådata fra en udvalgt måleparameter.

En betydelig udfordring var at det på bordmodellen ikke var muligt at teste på partikler direkte fra en forbrændingsmotor og at det var svært at kontrollere partikelstørrelsesfordelingen. Desuden viste det sig at der var behov for fortynding på grund af OPS'ens lave øvre detektionsgrænse. Fortynding af partikel er mere kompliceret end fortynding af mange gasser da partikler let sætter sig i lange og bukkede slanger. Så valget faldt på en dedikeret OPS-fortynder på trods af at motorrøgen er varmere en specificeret på fortynderen.

2.2.2 Tøndemodell

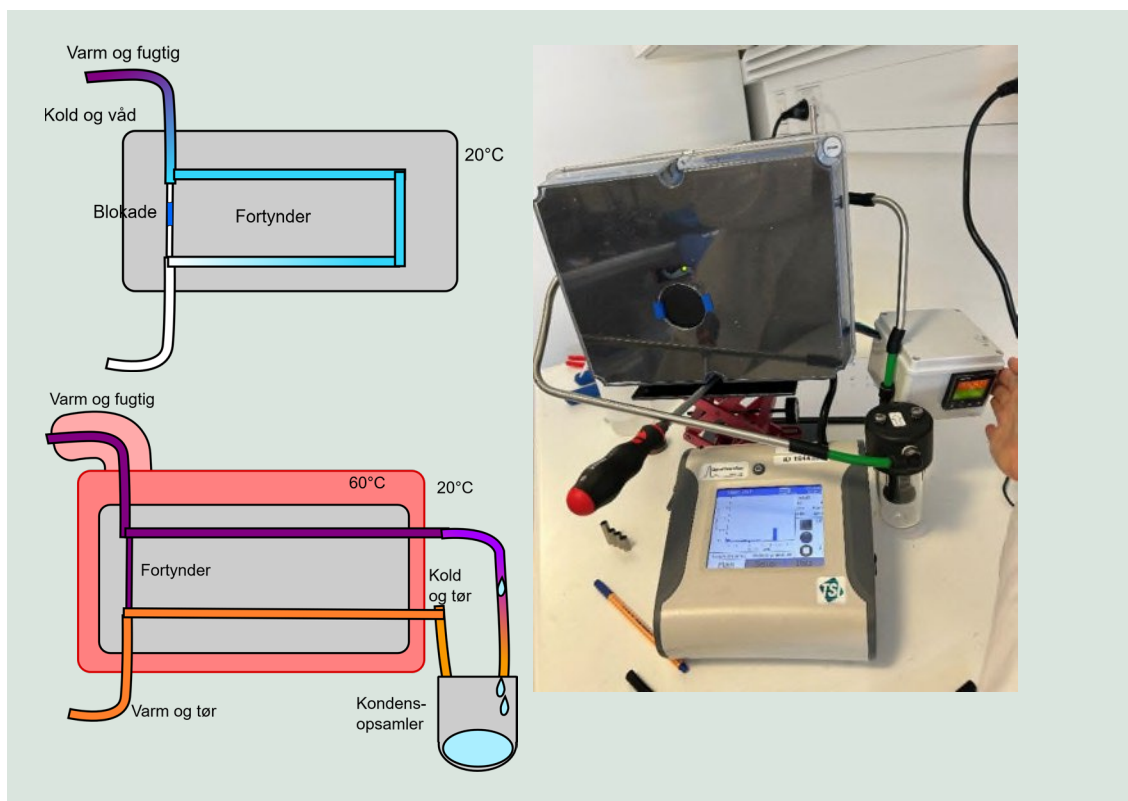
Parallelt med bordmodellen blev der udviklet en tøndemodell som i størrelse, materialer og partikelkilde har til formål at simulere forholdene på og i en skibsskorsten. En skitse af tøndemodellen kan ses i FIGUR 4. Tøndemodellen gav mulighed for at teste sensorerne under mere realistiske forhold og teste relevante driftsparametre som for eksempel temperatur og stabilitet. Samtidig med at den er let tilgængelig og ikke begrænset af sejlplanen for et skib i drift. Til at generere partikler/røg blev der brugt en 1-cylindret dieselgenerator. Generatoren gjorde det muligt at belaste motoren i flere forskellige belastningsområder, hvilket påvirkede mængden og typen af partikler der blev udledt.



FIGUR 4. Tøndemodell til test af sensormoduler på udstødnings-emissioner.

2.2.2.1 Referencemålinger til kalibrering i varm røggas

De første forsøg på referencemålinger af PM i varme røggas viste sig at være en udfordring på grund af kondensation. Kondens gav to hovedudfordringer. For det første kan referenceudstyret (OPS og DustTrak), som er baseret på lysspredning og ikke skelne mellem forskellige typer af PM. Det vil sige at det ikke kan skelne relevante partikler fra små vanddråber, som skabes når den varme røg køles ned. For det andet viste det sig at fortynderudstyret til PM-referenceudstyret blev blokeret af kondens så der ikke kunne komme luft igennem. Det var derfor nødvendigt at bygge det nye fortynderudstyr om, så den varme, våde partikelstrøm blev tørret inden den nåede referenceudstyret.



FIGUR 5. Skitse af fortynder med blokade på grund af kondens og med ombygning til varm røggas. Billede af den ombyggede fortynder der er klar til at kunne måle på varm røg.

Fortynderen blev testet på varm vandmættet luft. Før ombygningen satte der sig kondens i fortynderen i løbet af få minutter. Efter opvarmning af boksen og udkondensering af fortynderluften kunne fortynderen køre stabilt flere timer uden der var tegn på blokade af fortynderen.

Den udviklede skorstenssimulering i form af en tøndemodell gjorde det muligt af lave langtids-test af stabilitet og temperaturudsving på sensormodulerne. Tøndemodellen muliggjorde desuden udviklingen af en brugbar referencemetode for PM-målinger i varm røggas hvilket var essentielt for den videre udvikling af hardwaren og udvikling af en sensorkalibreringsalgoritme.

2.3 Arbejdspakke 3: Hardwareudvikling, maritim test og produktmodning

AP3 omfattede produktmodning af sensormodulerne og test i både simuleret skorsten (tønde model) og på skib. Fokus har især været på integration, robusthed og fejlsikring af systemet – fx optimeret optik, forbedret elektronik, forbedre lasersikkerhed og sikret kommunikation til moduler installeret på skib. En relevant konfiguration med GI's BC-moduler og eventuelle ekstra måleparametre blev udviklet til test på tønde og skib.

Tøndemodellen har været afgørende for at afprøve sensorernes robusthed før feltinstallation. Sensoren er blevet testet i skibsinstallation, hvor hardware- og softwareproblemer er blevet løst. Parallelt arbejdes der videre med at udvikle algoritmer for omregning af rå-signal til koncentrationer.

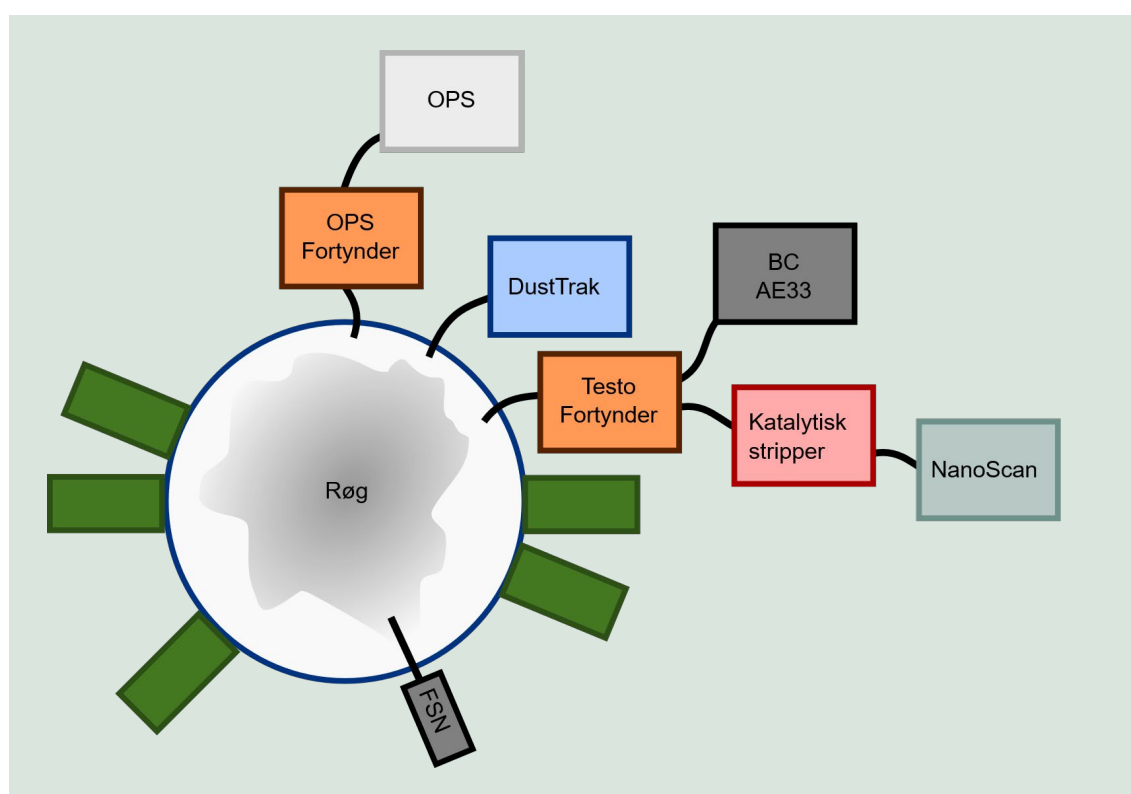
Resultatet af AP3 var en funktionel og robust sensorløsning som blev installeret på skib, samt dataopsamling til algoritmeudvikling og videre produktmodning til det udsatte miljø på et skib i drift.

2.4 Arbejdspakke 4: Demonstration og feltkampagne

AP4 har fokuseret på at demonstrere sensoren i fuldskala, herunder installation og test på skib samt validering op mod referenceudstyr. Arbejdspakken har også indeholdt evaluering af installationen, brugervenlighed og den praktiske kalibrering under operation.

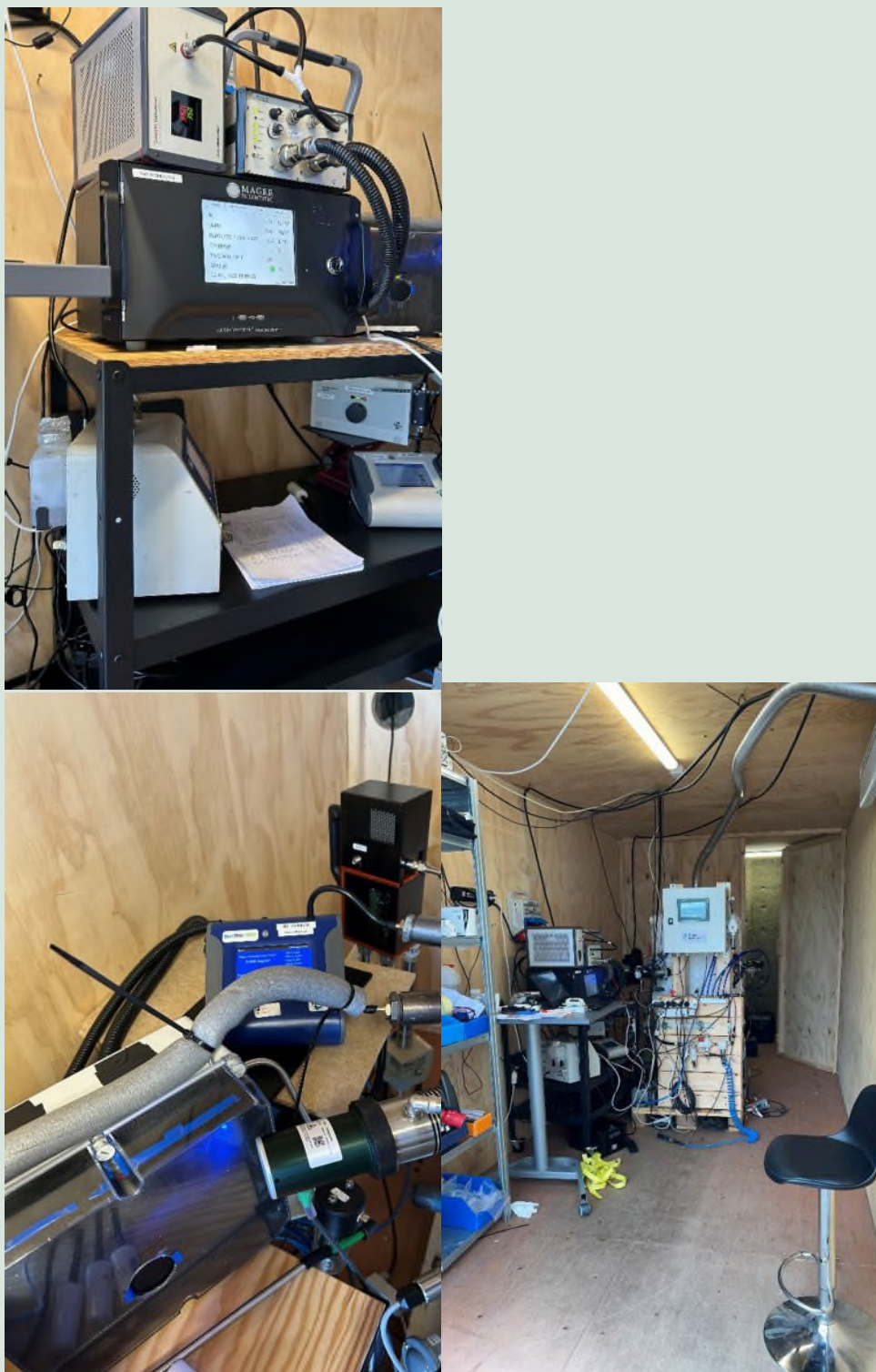
2.4.1 Referencetest på tønde

Som afsluttende test blev der gennemført en validering op mod reference-udstyr på tøndemodell med nyeste iteration af sensor modulene. Der blev anvendt en række forskelligt reference-udstyr, FIGUR 6 og FIGUR 7, herunder OPS (TSI, 3330) med den ombyggede fortynder til PM-reference (TSI 3332), DustTrak (TSI, 8533) til direkte måling på røg uden kondens kompensati-on, Black Carbon referenceudstyr i form af FSN-måler (testo 338 – Smoke tester) og AE33 (Magee Scientific - Aethalometer AE33), samt NanoScan (TSI NanoScan SMPS, 3910) til må-ling af ultrafine partikler. Til fortynding af BC og ultrafine partikler og til katalytisk stripping blev der anvendt hhv. Testo MD19-3E og Catalytic Instruments Model CS015.



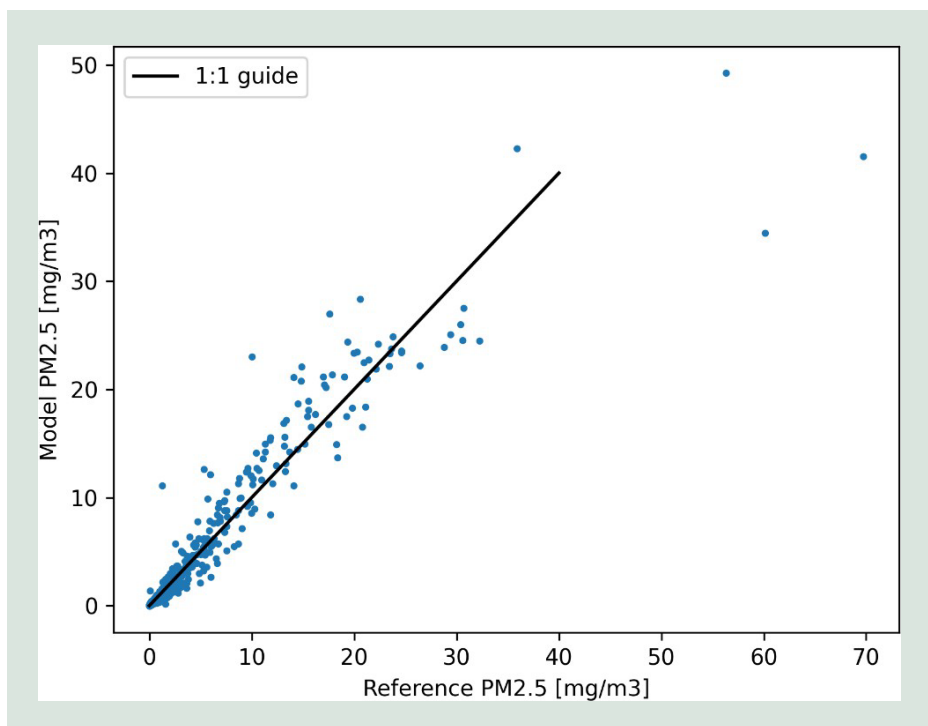
FIGUR 6. Skitse af opstilling til referencemålinger på tønde. De grønne bokse indikerer sensormodulerne der er under udvikling i projektet. De andre moduler er forskellige former for referenceudstyr og udstyr til at understøtte referenceudstyret.

Referencemålingerne gav en bred indsigt i partikelsammensætningen under forsøgene. Målekampagnen bestod både af en række forsøg med ren PM i form af saltpartikler og blandet PM og BC i form af udstødning fra en dieselmotor. Kampagnen muliggjorde en endelig algoritme til kalibrering af sensormodulerne og beregning af PM_{2.5}.



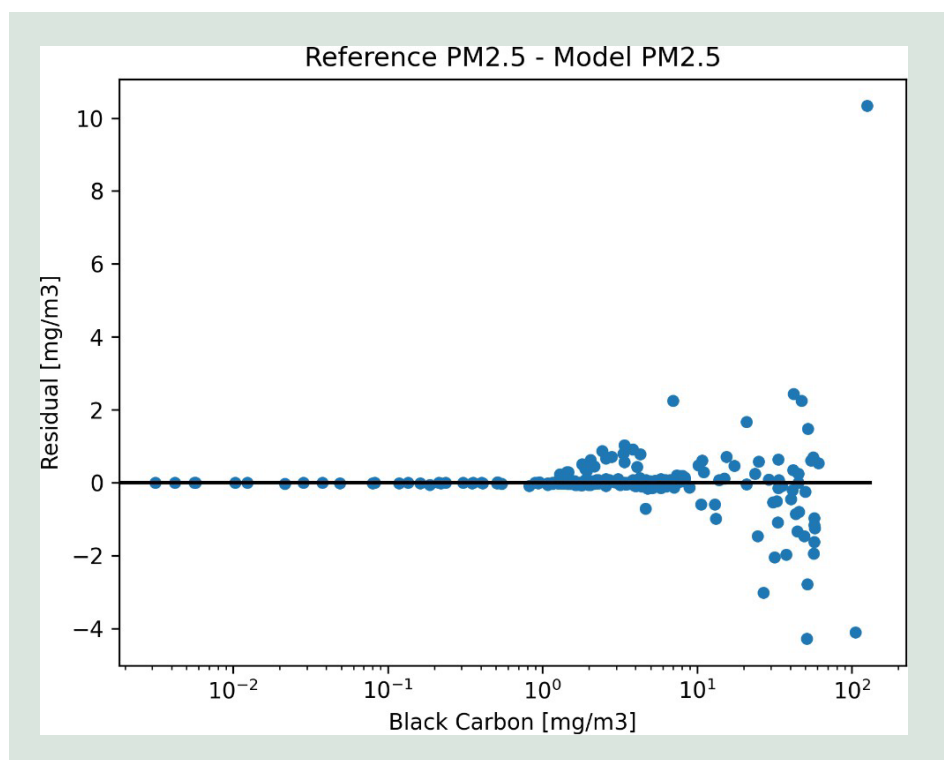
FIGUR 7. Billeder af målekampagne på tøndemodellen med referenceudstyr.

På baggrund af målekampagnen og teoretiske udledninger blev der udviklet og testet en matematisk model til at omsætte rådata fra sensorsystemet til partikelmassekoncentrationer. Resultaterne fra forsøgene viser en korrelation på 0,92 mellem beregnet PM_{2.5} og referencemålingerne, se FIGUR 8. De samme beregninger viser en nedre detektionsgrænse på omkring 0,1 mg/m³. Der er ikke observeret et øvre loft for detektionsgrænsen.

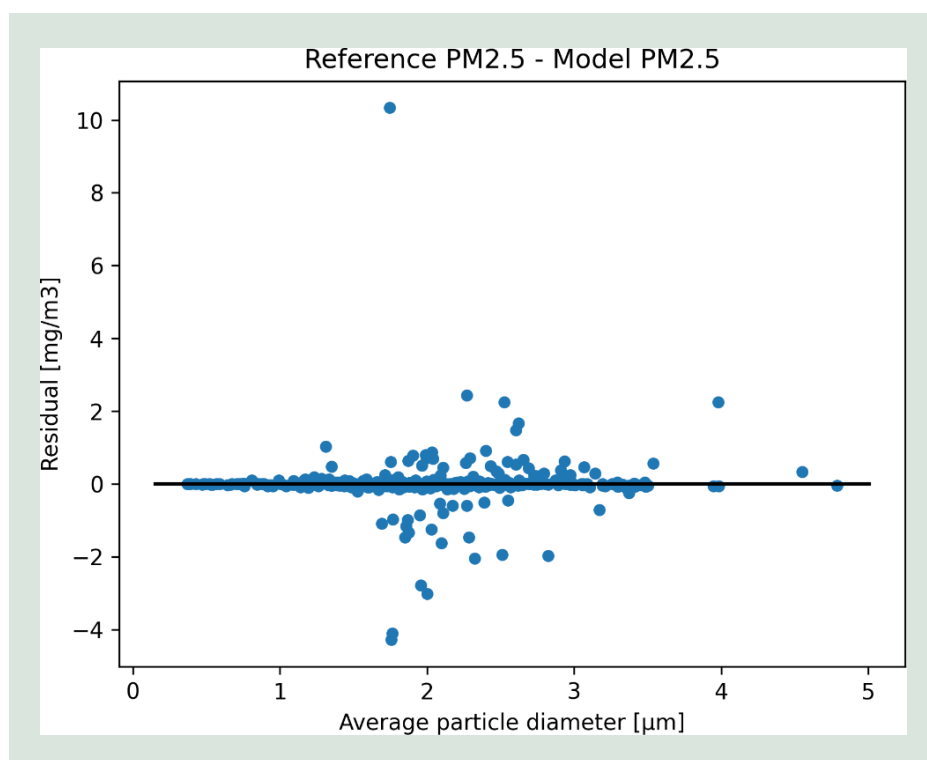


FIGUR 8. Målte koncentrationer af PM2.5 på de kalibrerede sensorer versus reference-data.

Den udviklede model viser sig desuden at have meget lille eller ingen krydsinterferens fra black carbon, FIGUR 9. Det vil sige der kan beregnes en PM2.5 masse som er uafhængig af koncentrationen af absorberende black carbon partikler og uafhængigt af størrelsessammensætning af typiske PM-partikler i størrelsesområdet fra 0,3 μm til 10 μm , se FIGUR 9 og FIGUR 10. Dette stemmer overens med at selvom PM2.5 i teorien dækker over alle partikler mindre end 2,5 μm i diameter, så giver spredningsbaseret udstyr i realiteten PM2.5 for ca. 0,3 μm -2,5 μm .



FIGUR 9. Afvigelse mellem referencemålinger og PM2.5 beregnet ud fra den udviklede model på rådata fra sensorsystemet op imod målet koncentrationer af BC.

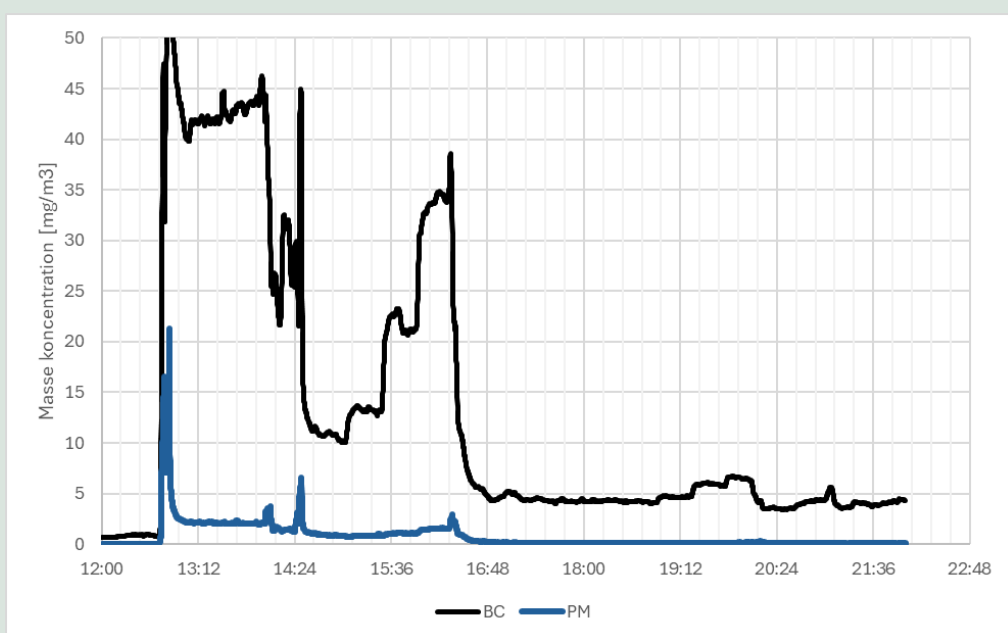


FIGUR 10. Afvigelse mellem referencemålinger og PM2.5 beregnet ud fra den udviklede model på rådata fra sensorsystemet op imod denne gennemsnitlige partikelstørrelse målt med OPS.

2.4.2 Installation på skib

Sideløbende med udvikling af kalibrering på tønden har et sæt sensormoduler været installeret på et skib i foreløbigt 6 måneder. Den mekaniske installation af sensormodulerne samt controlleren forløb uden nævneværdige udfordringer. Dog var det i ca. en uge efter installationen ikke muligt at oprette remote forbindelse med systemet, på grund af en fejkoblet internetforbindelse. Da forbindelsen til sidst blev etableret, kunne det konstateres at systemet kørte fejlfrit. På nuværende tidspunkt er der logget data i ca. 6 måneder.

Et udsnit af data under forsøg med to forskellige brændstoffer kan ses i FIGUR 11. Figuren viser målte BC-koncentrationer sammen med beregnede PM_{2.5}-koncentrationer baseret på kalibre-ringen fra tøndeforsøgene. Det anbefales fremadrettet at udføre en kalibrering på skib for at dokumentere validiteten af beregningerne.



FIGUR 11. Eksempel på måledata fra skibsinstallationen. Den sorte linje er målte black carbon koncentrationer og den blå linje er beregnede PM_{2.5} koncentrationer ud fra kalibreringsfaktorer fundet på tøndeopstillingen.

De mange måneder med stabile målinger på skibsinstallationen bekræfter sensorens egnethed til maritimt brug, og giver input til de sidste justeringer før kommerialisering.

Resumé

Udledning af partikler fra skibsfart udgør en væsentlig kilde til luftforurening og klimabelastning, men der eksisterer begrænset viden om de faktiske udslip under reelle driftsforhold. Projektet "Robust maritim sensor til kontinuerlig måling af partikeludledning" har udviklet og afprøvet en innovativ sensorløsning, som gør det muligt løbende at måle partikeludledning (PM og black carbon) direkte i skibets røggas.

Projektet blev gennemført i et samarbejde mellem industripartnere og vidensinstitutioner og omfattede både laboratorieforsøg, skorstenssimulering og installation på skib. De centrale tekniske udfordringer – især relateret til måleteknik, kalibrering i varm røggas og integration under maritime forhold – blev løst gennem systematisk test, ombygning af referenceudstyr og tæt dialog mellem parterne.

Resultaterne viser, at sensorplatformen kan måle pålideligt under maritime forhold med høj korrelation til eksisterende referenceudstyr. Sensoren giver mulighed for at dokumentere både partikelmasse (PM_{2.5}) og black carbon i realtid – uafhængigt af partikeltype og størrelsessammensætning. Kvalificeret datagrundlag fra den nye sensortechnologi vil understøtte både regulering, dokumentation og indførelse af emissionsreducerende tiltag i den maritime sektor.

Projektet har skabt grundlag for kommercialisering af en in-situ maritimsensor til kontinuerlig PM/BC-måling, styrket kompetencer og netværk på tværs af værdikæden og bidrager til at forberede branchen på kommende miljøreguleringer fra IMO og EU. Teknologien har desuden potentiale for overførsel til andre brancher med tilsvarende målebehov.



Miljøstyrelsen
Lerchesgade 35
5000 Odense C

www.mst.dk