



Kosteffektiv overvågning af svovlemissioner fra skibe på åbent hav - Et MUDP projekt



MUDP Rapport

Oktober 2022

Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram

Projektet, som er beskrevet i denne rapport, er støttet af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram, MUDP, som er et program 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

Web: www.ecoinnovation.dk

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

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion: Teknologisk Institut

Fotos:

Teknologisk Institut C.I.-Aqua

ISBN: 978-87-7038-449-0

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

Må citeres med kildeangivelse

Indhold

1.	Sammenfatning og konklusion	5
1.1	Sammenfatning og konklusion	5
1.2	Summary and conclusion	8
2.	Introduktion	11
2.1	Baggrund	11
2.2	Svovlkravene	12
2.3	Formål med projektet	12
2.4	Information om projektet	13
3.	Sensorvalg og prøveudtagning	14
3.1	Overordnede krav til sensorløsningen	14
3.2	Maritim svovlmåling og MEPC 68	14
3.3	Sensortyper og -valg	15
3.4	Prøveudtagning (sampling)	16
3.5	Valgt systemopbygning	17
4.	Målekampanjer og resultater	20
4.1	Stationær motortest	20
4.2	DFDS Crown Scubber 1, 2019	21
4.3	DFDS Crown Seaways Scubber 2, 2020	23
4.4	Hundested-Rørvig	25
4.5	DFDS ARK Futura	26
5.	Diskussion og perspektiver	30

1. Sammenfatning og konklusion

1.1 Sammenfatning og konklusion

For at mindske luftforureningen indførte International Maritime Organization (IMO) i 2020 på globalt plan nye, skrappe krav omkring udledning af svovl: Enten skal der benyttes brændstof med lavt svovlindhold (0,5 %), alternativt brændstof eller scrubbertechnologi til rensning af røggassen. Et vigtigt element for at kunne dokumentere compliance er, sammen med bunker-delivery notes og brændstofprøver, direkte måling af røggassen, hvilket bl.a. kan bruges til i realtid at bestemme brændstoffets svovlindhold.

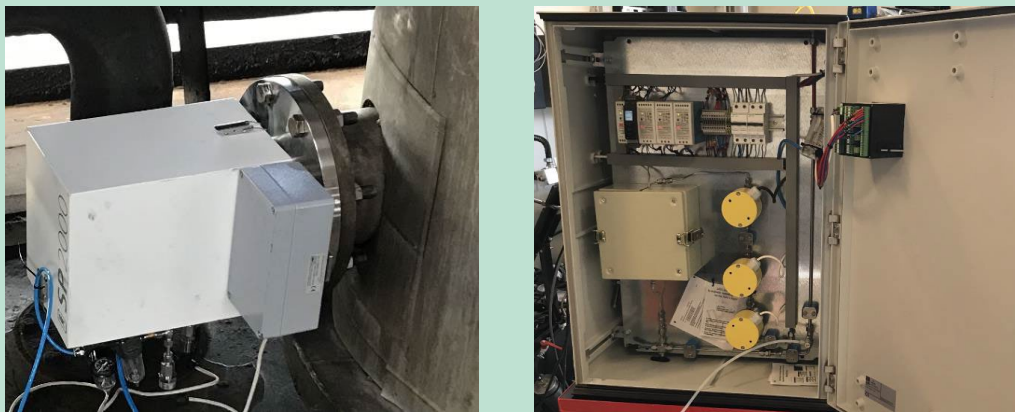
Projektets mål har således været at udvikle og demonstrere en kosteffektiv røggassensor, der kan placeres på det enkelte skib, og som kan måle svovlemissionerne. Rederier og myndigheder vil således kunne få et omkostningseffektivt værktøj til dokumentation af skærpede, globale krav til især skibes svovludledning. De tilgængelige målesystemer til SO₂/CO₂ vurderes at ligge i prislejet 150.000-500.000 DKK pr. målepunkt, og ambitionen i dette projekt har været at ligge et godt stykke under dette beløb med samtidig fastholdelse af en tilfredsstillende ydeevne og robusthed.

Projektet er gennemført i perioden januar 2019 til og med december 2021, og i projektet har C.I.-Aqua, DFDS, MOL Chemical Tankers, ME Production, Danske Rederier, Danske Maritime samt Teknologisk Institut deltaget. C.I.-Aqua har i samarbejde med Teknologisk Institut, udviklet, integreret og testet sensorenhederne over flere feltmålinger, bl.a. på flere DFDS skibe.

Projektet har været delt op i fire primære aktiviteter:

- Vidensindsamling og krav til sensorløsningen
- Validering af sensorer i laboratoriet og gennem kortere feltmålinger
- Optimering af sensorløsningen med fokus på integration og robusthed
- Længerevarende test og demonstration på skibe.

Den udviklede, integrerede sensorløsning består grundlæggende af enkeltdele baseret på velkendt teknologi, mens kombinationen er unik og ikke tidligere anvendt til kontinuerlig røggasmonitorering. Måleprincippet baserer sig på måling af forholdet mellem SO₂ og CO₂ og med brug af fortynding via et ekstraktivt system (se billeder nedenfor).



FIGUR 1. Fortyndingsprobe (t.v.), her monteret på DFDS-skibet Crown Seaways samt udviklet sensor-kasse (t.h.). Resultater logges internt i dataloggeren, som også har display.

Proof of concept blev opnået tidligt i projektet – dels i laboratorieskala, dels på motorteststand på Teknologisk Institut. Der blev overordnet set opnået en meget tilfredsstillende ydeevne af systemet, herunder i forhold til respons og linearitet, og det blev derfor besluttet, at test på skib igangsættes.

Ved den første felttest af komplet system på DFDS Crown Seaways blev systemet installeret i skorstenen og succesfuldt afprøvet over længere tid (uger). Datalogning, kommunikation samt IR-CO₂-sensor fungerede efter hensigten, men med et par lavpraktiske udfordringer omkring fortyndingsproben og interaktion med havvand, som heldigvis tidligt i forløbet blev adresseret. Samtidig var NO_x-koncentrationerne relativt høje, og kompenseringsmetoderne skulle optimeres yderligere forud for de følgende kampagner.

Efter laboratorieoptimering blev anden felttest af komplet system ligeledes foretaget på Crown Seaways, nu med nye scrubber installeret af ME Production. Systemet blev igen installeret i skorstenen og afprøvet over længere tid (uger). Fortyndingsprobe, datalogning, kommunikation samt IR-CO₂-sensor fungerede nu efter hensigten, men NO_x konverterens levetid kan være en begrænsning ved de høje NO_x-koncentrationer, og det blev konkluderet, at yderligere optimering af denne er påkrævet. Fortyndingsproben fungerede upåklageligt i testperioden med minimal vedligeholdelse, men udfordringerne med SO₂-sensorens påvirkning af NO₂ udestår stadig.

Under Coronanedlukningen var det en stor udfordring at komme ombord på skibe, men der opstod en mulighed for at gennemføre test af systemet på færgeren Hundested-Rørvig ved brug af brændstof med meget lavt svovlindhold og med lavere NO_x-niveauer. Det blev konkluderet, at NO_x-converteren er tilstrækkelig ved lav motorbelastning, mens NO_x-niveauerne ved højere motorbelastning stadig er problematisk for SO₂-sensoren. Det blev således besluttet, at den elektrokemiske sensor i den afsluttende kampagne vil blive suppleret med en UV-SO₂-sensor, som ikke er NO₂-krydsfølsom. Det er altså desværre ikke lykkedes at dimensionere NO_x-converteren til de høje NO₂-koncentrationer, så den elektrokemiske sensor kan måle de relativt lave SO₂-koncentrationer.

Til den afsluttende målekampagne blev målesystemet således opgraderet med en ny UV-SO₂-sensor, som fungerer markant anderledes end de elektrokemiske celler. Det er derfor muligt at omgå problemerne med høje NO₂-koncentrationer. Udstyret blev installeret på ARK Futura, der sejler på 0,03 %S MGO, og som ikke er udstyret med scrubber. Der blev desværre igen set tilstopning af fortyndingsproben, som betød løbende, faldende målt CO₂. Der ses både

partikulære og olielignende belægninger. Det formodes, at olielignende belægninger har påvirket UV-SO₂-sensoren, da signalet stiger over tid med motoren i drift. Efter en periode med ren luft genfindes det oprindelige nulniveau dog. Det optimale ville være at kunne udregne SO₂/CO₂-forholdet i røggassen, men grundet tilstopningen har det ikke været muligt at kompensere dette og opnå tilfredsstillende resultater.

Det vurderes samlet set, at de ovennævnte forskellige målekampagner har været realistiske for de maritime betingelser (herunder NO_x "Tier 0" og motorer >25 år). Generelt har systemet været robust, men det bemærkes, at der har været situationer, hvor udstyret har været nede pga. tilstopninger af forskellige slags. Der er arbejdet med en kosteffektiv tilgang, som har vist sig udfordrende pga. interfererende gasser (NO_x) på de elektrokemiske SO₂-senser. Adskillige måleprincipper inden for den kosteffektive ramme er afprøvet under driftsbetingelser - med varierende succes. De forskellige tekniske måleprincipper og elementers egnethed i forhold til den pågældende motortype er forsøgt opsummeret i tabellen nedenfor.

Baseret på resultaterne fra målekampagnerne har det været muligt at vurdere egnetheden af de enkelte komponenter under en bred vifte af betingelser. Dette er vist i tabellen, hvor ✓ betyder, at det fungerer godt; () betyder, at det formodes at fungere godt; og "-" betyder, at det ikke fungerer tilfredsstillende.

	Med scrubber	Uden scrubber	NO _x Tier 0	NO _x Tier 2
Fortyndingsprobe	✓	✓	✓	✓
IR-CO ₂ -sensor	✓	✓	✓	✓
UV-SO ₂ -sensor	✓	(✓ OBS Filter)	(✓)	✓
EC-SO ₂ -sensor NO ₂ -kompensering	Afhænger af NO _x		-	(✓)
EC-SO ₂ -sensor Mo-converter	Afhænger af NO _x		-	(✓)

Interessen fra de deltagende rederier for mere robuste og kosteffektive sensorer er, som ved projektstart, stor, da der ved målesystemer installeret i dag er en begrænset levetid. Der vil ved udskiftning blive skelet til driftsøkonomien ved erstatningsmålesystemer, og herunder er service og vedligeholdelse et vigtigt element. Frivillig monitoring er samtidig stadig relevant, men kræver kosteffektive systemer uden særlig driftsvedligeholdelse. Det vurderes, at certificering vil være nødvendig ved salg.

Der vurderes ikke umiddelbart at være lovgivning på vej indenfor SO₂-monitoring (udover for scrubberinstallationer).

I forhold til det udviklede system i projektet forventes en kostpris på 80.000-100.000 DKK, og det vil med flere end tre målepunkter på skibet være fordelagtigt at bruge en multiplekser. Der er endvidere potentiale for yderligere omkostningsreduktion igennem nedskalering af fortyndingsenheden, da i kravene til målingerne alene omfatter SO₂/CO₂-forholdet, hvorved den faktiske fortyndingsfaktor og stabiliteten af denne er mindre vigtig.

Vedligeholdelse af systemet (efter eliminering af 'børnesygdomme') forventes at være meget lave. Et proof-of-principle på et NO_x Tier 2 skib er samtidig i spil mellem flere af projektpartnerne i forlængelse af nærværende MUDP-projekt.

Endelig skal det bemærkes, at det udviklede system i projektet med succes har været brugt i forbindelse med bl.a. SO₂-, NO₂- og N₂O-monitorering i varierende og udfordrende målepunkter hos en større industrivirksomhed i Danmark. Der er således, udover de maritime perspektiver, også en række andre potentielle markeder, som opsøges af bl.a. C.I.-Aqua, herunder kraftværker.

1.2 Summary and conclusion

In 2020, the International Maritime Organization (IMO) globally introduced new, strict requirements to the sulphur emission: fuel with a low sulphur content (0.5 %), alternative fuel, or scrubber technology to clean the exhaust gas must be used. In addition to bunker-delivery notes and fuel samples, the direct measurement of exhaust gas (which i.a. could be used to determine the sulphur content of the fuel in real-time) is important in order to document compliance.

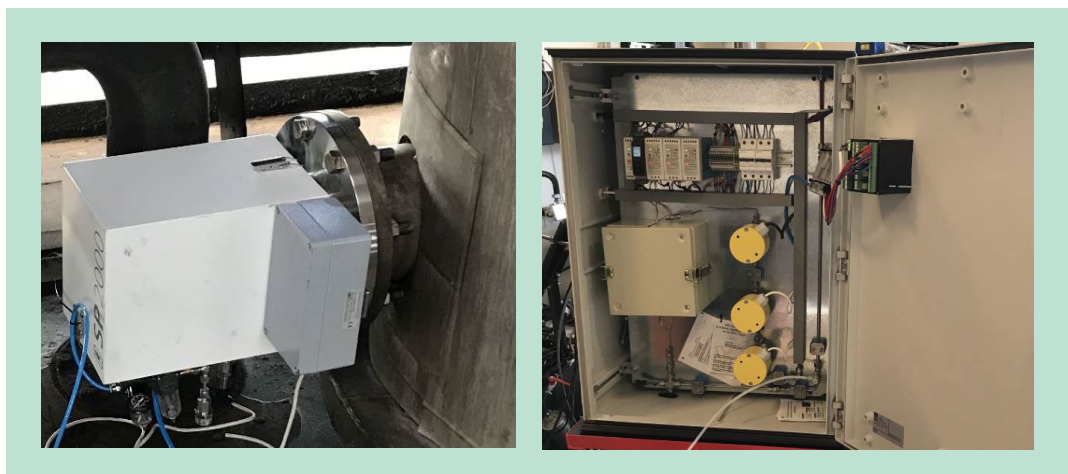
Therefore, the objective of this project was to develop and demonstrate a cost-efficient exhaust gas sensor that could be located on the ship and measure sulphur emissions. That would give shipping companies and authorities a cost-effective tool to document intensified, global requirements to the sulphur emissions from ships. The systems available for measuring SO₂/CO₂ cost from 150.000 to 500.000 DKK per measuring point, and the ambition of this project was to be well below that amount and to demonstrate satisfactory performance and robustness.

The project was carried out from January 2019 to December 2021, and the project participants were C.I-Aqua, DFDS, MOL Chemical Tankers, ME Production, Danish Shipping, Danish Maritime and Danish Technological Institute. In co-operation with Danish Technological Institute, C.I-Aqua has developed, integrated, and tested the sensor units in several field measurements i.a. onboard DFDS ships.

The project was divided into four main activities:

- Requirements to sensor solution
- Sensor validation in a laboratory and through short-term field measurements
- Optimisation of sensor solution with focus on integration and robustness
- Long-term tests and demonstration on ships

Basically, the developed, integrated sensor solution consists of individual parts based on well-known technology, whereas the combination is unique and not previously used for continuous exhaust gas monitoring of maritime emissions. The measuring principle is based on the measurement of the relation between SO₂ and CO₂ and on dilution via an extractive system (see photos below).



FIGUR 2. Dilution probe (to the left), installed on the DFDS ship Crown Seaways and a sensor box was developed (to the right). The results are logged internally in the datalogger that also has a display.

Proof of concept was obtained early in the project – partly in a laboratory and partly on an engine test rig at Danish Technological Institute. In general, the system performed satisfactorily, also in relation to response and linearity, and therefore it was decided to initiate tests on ships.

During the first field test of the complete system on DFDS Crown Seaways, the system was installed in the smokestack, and it was tested successfully for a longer period (weeks). Datalogging, communication, and CO₂ IR sensor functioned as intended, but there were a couple of challenges regarding the dilution probe and interaction with sea water. Luckily, the problems were dealt with at an early stage of the project. At the same time, the NO_x concentrations were rather high, and the compensation methods had to be optimised further before the next campaigns.

After laboratory optimisation, the second field test of the entire system was also carried out on Crown Seaways, and new scrubbers were installed by ME Production. Once again, the system was installed in the smokestack and tested for a longer period (weeks). The dilution probe, datalogging, communication, and CO₂ IR sensor functioned as intended, but the life of the NO_x converter can be a limitation at high NO_x concentrations. Therefore, it was concluded that additional optimisation of the converter was needed. The dilution probe functioned satisfactorily during the test period and required minimum maintenance, but the influence of the SO₂ sensors on NO₂ still posed a challenge.

During the Corona lockdown, boarding ships presented a challenge, but it became possible to carry out tests of the system on the Hundested-Rørvig ferry by using fuel with a very low sulphur content and with lower NO_x levels. It was concluded that the NO_x converter sufficed at low engine load, whereas the NO_x levels remained problematic for the SO₂ sensor at high engine load. Therefore, it was decided to supplement the electrochemical sensor with a SO₂ UV sensor in the final campaign as it does not display cross interference to NO₂. That means that it was not possible to design the NO_x converter for the high NO₂ concentrations so that the electrochemical sensor could measure the rather low SO₂ concentrations.

In the final measuring campaign, the measuring system was upgraded with a new UV SO₂ sensor that functions different from the electrochemical cells. Therefore, it was possible to avoid the problems with high NO₂ concentrations. The equipment was installed on ARK Futura that runs on 0.03%S MGO and is without a scrubber. Unfortunately, the dilution probe clogged once again which resulted in ongoing declining CO₂. Coatings of particulate matter as well as oil were observed. It is assumed that the oil-like coatings have influenced the SO₂ UV sensor, as the signal increases over time when the engine is in operation, but after some time with clean air the original zero level is recovered. The optimum situation would be to calculate the SO₂/CO₂ relation in the exhaust gas. However, due to clogging it was impossible to compensate for that and achieve satisfactory results.

All in all, it is assessed that the different measuring campaigns – mentioned above – have been realistic for the maritime conditions (including NO_x "Tier 0" and >25 year old engines). In general, the system has been robust, but situations with equipment down-time due to various types of clogging have been noted. A cost-efficient approach has been applied which turned out to be challenging due to interfering gas (NO₂) on the electrochemical SO₂ sensors. Several measuring principles within a cost-efficient framework were tested during operating conditions – with varying success. In the table below, the suitability of the different technical measuring principles and elements in relation to the engine type in question are summarised.

Based on the results of the measuring campaigns it was possible to assess the suitability of the individual components according to a wide range of conditions. That is shown in the table where ✓ means that it functions well, (✓) that it is assumed to function well, and "-" that it is not satisfactory.

	With scrubber	Without scrubber	NOx Tier 0	NOx Tier 2
Fortyndingsprobe	✓	✓	✓	✓
CO2 IR sensor	✓	✓	✓	✓
SO2 UV sensor	✓	(✓ OBS Filter)	(✓)	✓
SO2 EC-sensor NO ₂ compensation	Depends on NOx		-	(✓)
SO2 EC-sensor Mo converter	Depends on NOx		-	(✓)

The participating shipping companies are still very interested in more robust and cost-efficient sensors as the currently installed measuring systems have a limited life. In case of replacement, the total cost of ownership will be considered for replacement of measuring systems, and service and maintenance are also important elements. At the same time, voluntary monitoring is still relevant but requires cost-efficient systems without considerable operation maintenance. It is assessed that certification will be necessary to enable sale.

Regarding legislation it is not immediately assessed that legislation is under way within SO₂ monitoring (in addition to scrubber installations).

In relation to the system developed in the project, a cost price of 80.000-100.000 DKK is expected, and with more than three measuring points on the ship it will be an advantage to use a multiplexer. There is also potential for a further cost reduction by downscaling the dilution probe, as the measurement requirements only place demands on the SO₂/CO₂ relationship, and therefore the actual dilution factor and its stability are less important.

Maintenance of the system (after elimination of teething-problems) is expected to be minor. At the same time, a proof-of-principle on a NOx Tier 2 ship is in play between several of the project partners in continuation of this MUDP project.

Finally, it should be noted that the system developed in the project has with success been used to measure SO₂, NO₂, and N₂O at a large Danish industrial company in varying and challenging measuring points. Therefore, there are several other potential markets besides the maritime perspectives that are investigated i.a. by C.I.-Aqua, including power plants.

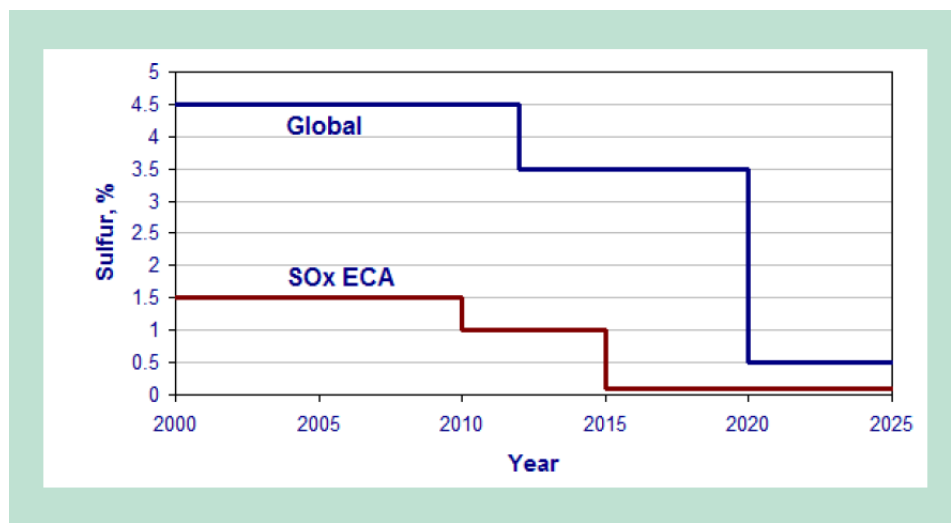
2. Introduktion

2.1 Baggrund

Skibstrafikken tegner sig for en væsentlig andel af den samlede luftforurening. På europæisk plan udgjorde skibstrafikkens udledning af svovloxider (SO_x) og partikler (PM_{2.5}) ca. 10 % af den samlede luftforurening i 2019¹ med dertilhørende samfundsøkonomiske omkostninger på flere hundrede milliarder DKK. Luftforurening vurderes samlet set at tegne sig for knap ½ mio. for tidlige dødsfald i EU (2019),² herunder 4.600 for tidlige dødsfald i Danmark.³ Svovl i brændstof er en væsentlig faktor, idet afbrænding af svovl fører til emission af helbredsskadelig SO₂ og partikler.

For at mindske luftforureningen er der således fra 2020 på globalt plan indført nye, skrappe krav omkring udledning af svovlholdige forbindelser: Enten skal der benyttes brændstof med lavt svovlindhold (0,5 %), alternativt brændstof eller scrubbertechnologi til rensning af røggassen. På internationalt niveau lægger myndigheder og den maritime branche op til, at alle teknologiske muligheder kommer i spil.

Med IMO's vedtagelse af de nye 2020-svovlkrav (se FIGUR 3) på åbent hav er der opstået et behov for at kunne kontrollere og dokumentere compliance. Et vigtigt element er, sammen med bunker-delivery notes og brændstofprøver, direkte måling af røggassen, hvilket bl.a. kan bruges til i realtid at bestemme brændstoffets svovlindhold. Rederiernes tilbagemelding er, at der er behov for langt mere kosteffektive og robuste løsninger end nuværende state-of-the-art for at sikre bred implementering på skibe.



FIGUR 3. IMO-krav over tid til svovlindhold af brændstof på globalt niveau samt SO_x ECA (Emission Control Areas).

¹ [Emissions of air pollutants from transport — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.euro.who.org/en/health-topics/air-pollution/news-and-events/news/2019/05/emissions-of-air-pollutants-from-transport)

² [Health impacts of air pollution in Europe, 2021 — European Environment Agency \(europa.eu\)](https://www.euro.who.org/en/health-topics/air-pollution/news-and-events/news/2021/04/health-impacts-of-air-pollution-in-europe-2021)

³ [SR410.pdf \(au.dk\)](#)

2.2 Svovlkravene

IMO-kravene stilles til svovlindholdet i brændstoffet, men ifølge MEPC 68 (68/21/Add.1) er det dokumenteret, at alt kulstof samt svovl ved (næsten) fuldstændig forbrænding omdannes til CO₂ og SO₂. Der er derved en lineær sammenhæng mellem svovlindholdet i brændstoffet og SO₂/CO₂ (ppm/%) -forholdet i røggassen – se FIGUR 4. Det åbner op for muligheden for at monitere røggassen i stedet for brændstoffet, og muliggør, at der kan anvendes høj-svovls brændstof i sammenhæng med røgrensning (scrubbere). Jf. dokumentationen så gælder det, at:

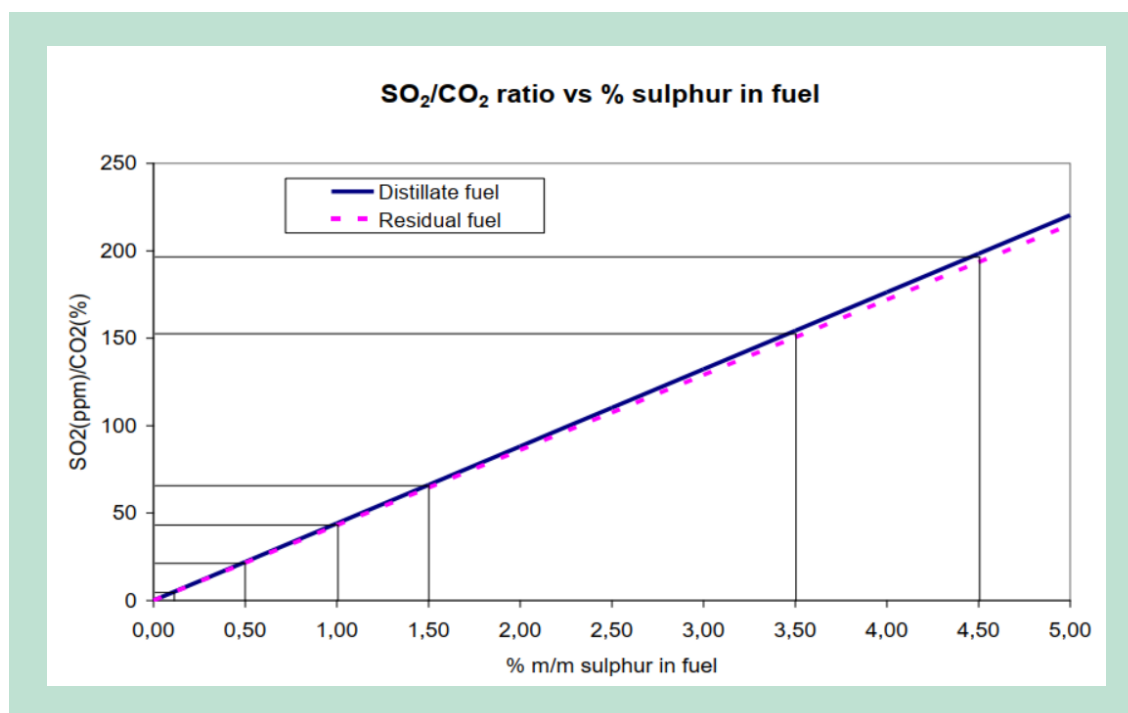
$$0,1 \%S \text{ m/m} = 4,3 \text{ ppm/\%}$$

og

$$0,5 \%S \text{ m/m} = 21,7 \text{ ppm/\%}$$

Det betyder, at der ved en typisk CO₂-koncentration på 5 % må udledes op til 21,5 ppm SO₂ for at overholde 0,1 %S-kravet.

Der vil derfor i projektet blive arbejdet med måling direkte i røggassen af CO₂ (%-området) og SO₂ (<100 ppm).



FIGUR 4. Sammenhæng mellem svovlindhold i brændstoffet og SO₂/CO₂-forholdet i røggassen. Kilde: MEPC 68/21/Add.1.

2.3 Formål med projektet

Projektets mål er at udvikle en kosteffektiv røggassensor, der kan placeres på det enkelte skib, og som kan måle svovlemissionerne. Rederier og myndigheder vil således få et omkostningseffektivt værktøj til dokumentation af skærpede, globale krav til især skibes svovludledning. I første omgang vil installationen være på frivillig basis med mulighed for indberetning af data til myndighederne, men sensoren vil på sigt også kunne blive et myndighedsværktøj. Dette vil være et væsentligt skridt på vejen for sikker nedbringelse af emissioner fra skibe.

De tilgængelige målesystemer til SO₂/CO₂ vurderes at ligge i prislejet 150.000-500.000 DKK pr. målepunkt, og tilgangen i dette projekt er at ligge et godt stykke under dette beløb med samtidig tilfredsstillende ydeevne og robusthed.

2.4 Information om projektet

Projektet er gennemført i perioden januar 2019 til og med december 2021. I projektet har C.I.-Aqua, DFDS, MOL Chemical Tankers, ME Production, DanskeRederier, Danske Maritime samt Teknologisk Institut deltaget.

Projektet blev forlænget med et år i forhold til den oprindelige tidsplan, som skyldes store udfordringer med at komme ombord på skibe grundet Coronapandemien.

C.I.-Aqua og Teknologisk Institut har i samarbejde udviklet, integreret og testet sensorenhederne over flere feltmålinger, bl.a. på DFDS-skibe.

Projektet har været delt op i fire primære aktiviteter:

- Vidensindsamling og krav til sensorløsningen
- Validering af sensorer i laboratoriet og gennem kortere feltmålinger
- Optimering af sensorløsningen med fokus på integration og robusthed
- Længerevarende demonstration på skibe.

I denne rapport er krav til sensorløsningen samt beskrivelse af løsningen behandlet i kapitel 3. De udførte målekampanjer og resultaterne deraf er beskrevet i kapitel 4. Der afsluttes med en evaluering og perspektivering af projektresultaterne i kapitel 5.

3. Sensorvalg og prøveudtagning

3.1 Overordnede krav til sensorløsningen

Det er projektets ambition at benytte kosteffektive sensorer til udvikling af en integreret røggassensor, der kan placeres på det enkelte skib. Målet er at kunne levere målinger af en kvalitet, der kan bruges til monitorering af svovlemissionen og dermed give målinger til dokumentation af SO₂-compliance – for skibe både med og uden scrubbere.

Udgangspunktet er at benytte simple, kosteffektive, men velafprøvede sensorer fra tilsvarende miljøer og i den udstrækning, det er nødvendigt, at fortynde og konditionere en delmængde af røggassen før måling.

Denne tilgang forventes at være billigere end etablerede måleteknologier, samtidig med at der måles kontinuerligt på røggassen. Følgende krav forventes stillet til den udviklede røggassensor:

- Kosteffektiv (estimeret 50.000 DKK ved masseproduktion)
- Robust, kompakt og med minimal vedligeholdelse
- Umulig at snyde, når installeret (tamperproof)
- Data kan sendes til "skyen" med mulighed for frivillig indberetning af data til myndigheder.

De største teknologiske udfordringer er at kunne opnå god stabilitet, lav vedligeholdelse og robusthed og samtidig sikre en kosteffektiv løsning. Disse udfordringer imødekommes via en række tiltag:

- Stabilitet er sikret ved at reducere belastningen af sensoren vha. lavt flow
- Anvende fortynding for at undgå kondensdannelse
- Vedligeholdelsen er reduceret ved at optimere designet, så korrosion og tilstopning undgås, og ved at designe sensorpakken inkl. filtre, så den kan ombyttes af det tekniske personale uden forhåndskendskab til målesystemet
- Høj robusthed er opnået ved så vidt muligt at undgå mekaniske elementer (pumper, ventiler, regulatorer).

3.2 Maritim svovlmåling og MEPC 68

I MEPC 259 (68) fra 2015 beskrives muligheden for at benytte 2 tilgange til at dokumentere compliance: Scheme A og Scheme B. Forskellen mellem disse er hovedsageligt hyppigheden af SO₂/CO₂-målingen, hvor Scheme A beskriver daglig monitorering og Scheme B kontinuert. Der er ingen tvivl om, at kontinuert sensorudstyr belastes væsentligt mere end udstyr, der benyttes i kortere perioder. Det blev dog vurderet, at Scheme A ikke er gangbar i realiteten og Scheme B derfor er benyttet af de rederier og producenter af scrubbere, som projektgruppen har kendskab til.

Ved scrubberinstallationer er der i dag krav om at benytte en sensor for at dokumentere compliance. Der eksisterer således i dag en håndfuld producenter, der leverer måleudstyr til kontinuerlig røggasmåling på skibe. Fælles for de udbudte typer af måleudstyr er, at de bygger på relativt komplekse målesystemer og ofte er kombineret med konditionering af røggassen. Det bevirker, at udstyret er vedligeholdelseskærvende og følsomt, hvorfor de eksisterende løsninger er omkostningstunge. De typiske installationsomkostninger per skorsten ligger således på 150.000 DKK og opfejer.

Måling direkte i skorstenen er udfordrende, da røggassen er varm (op mod 450 °C), beskidt (partikler, SO₂ m.v.) og våd (særligt i forbindelse med scrubberinstallationer). Disse forhold stiller store krav til måleudstyret og til vedligeholdelse for at kunne opnå stabile og troværdige målinger.

3.3 Sensortyper og -valg

Den integrerede sensorløsning består grundlæggende af enkeltdele baseret på velkendt teknologi, mens kombinationen er unik og ikke tidligere anvendt til kontinuerlig røggasmonitorering. Måleprincippet baserer sig, som beskrevet i indledningen, på måling af forholdet mellem SO₂ og CO₂. De to gasser måles med forskellige teknologier, og de behandles derfor separat i det følgende.

De øvrige bestanddele af røggassen er som vist i TABEL 1.

TABEL 1. Indholdet i (våd) røggas.

Kilder: Bl.a. IVL 2018 No. B 2318, "Scrubbers closing the loop, activity 3, air emission measurements".

Bestanddel	Størrelse	Enhed
N ₂	Ca. 76	%
O ₂	Ca. 13	%
CO ₂	4-8	%
H ₂ O	Ca. 5	%
NO	500-1200	ppm
NO ₂	50-120	ppm
SO ₂	22-120	ppm
Black carbon	1-100	mg/m ³
Askerester	1-100	mg/m ³

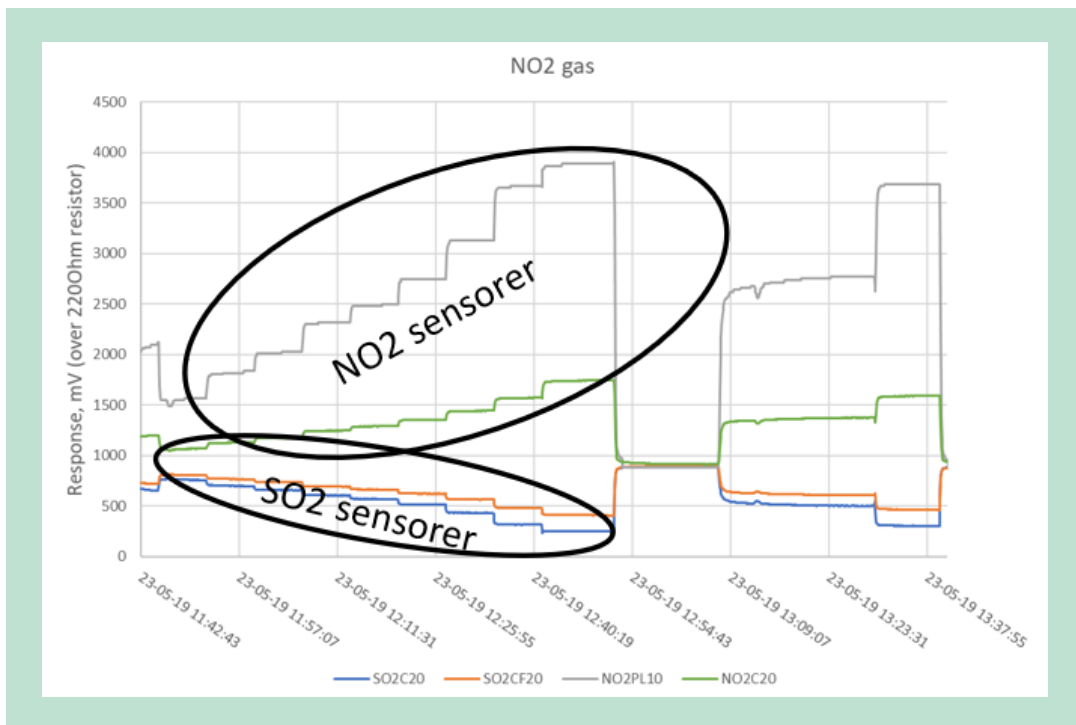
Til måling af CO₂ anvendes en NDIR-sensor (Non-Dispersive InfraRed). Dette er en tilgængelig sensorteknologi, som benyttes i mange sammenhænge, bl.a. i ventilationsanlæg og til processtyring og indeklimamåling. Den fungerer ved at sende IR-syn igennem luftprøven og måle på mængden af absorberet lys. Teknologien fungerer udmærket, da CO₂-koncentrationen er relativt høj, ligesom der er meget få krydsinterferenser i IR-båndet, som sensoren måler.

Til måling af SO₂ kan der anvendes elektrokemiske sensorer, NDIR-, NDUV, eller pulsfluorescence. Her er der tale om meget forskellige optiske teknikker, som benytter IR- og UV-absorption/emission samt elektrokemiske celler.

Prismæssigt er de elektrokemiske celler at foretrække, da de er langt billigere end de øvrige teknikker (2.500 DKK vs. 25.000-75.000 DKK). Ulempen ved de elektrokemiske celler er dog en mere begrænset levetid (der er fysisk kontakt med gassen) samt krydsinterferens med NO₂.

I FIGUR 5 kan effekten af krydsinterferensen ses ved en måling af en elektrokemisk SO₂-sensor, som udsættes for NO₂-gas. Det ses, at SO₂-signalet ændres med øgning af NO₂-koncentrationen – dvs. der er krydsinterferens. Dette skal håndteres ved brugen af elektrokemiske celler, hvilket kan ske på to måder: ved fjernelse af NO₂-gassen eller ved måling af NO₂-koncentrationen og trække denne fra.

Det endelige valg af sensorteknologier og måleområder bestemmes på baggrund af en helhedsbetragtning af det samlede system inkl. prøveopsamlingen (sampling).



FIGUR 5. Figuren viser resultaterne fra en intern kalibrering af elektrokemiske sensorer (både SO₂- og NO₂-sensorer) under belastning af NO₂. Det ses, at NO₂-sensorene reagerer tilfredsstillende på øget NO₂-tilsætning, og ved fjernelse af gassen går de hurtigt til nulpunktet. SO₂-sensorene reagerer også på NO₂-gassen ved at give et negativt signal ift. nulpunktet. Dette skyldes, at NO₂-gassen kemisk reduceres i SO₂-sensoren.

3.4 Prøveudtagning (sampling)

En meget vigtig del af hele målesystemet er punktet, hvor gassen måles. Målingen sker enten direkte i skorstenen (in-situ) eller ved at suge gassen ud (ekstraktivt). Omkostningerne ved at udvikle et in-situ system er betydeligt større end, hvad projektet kan bære, og der findes vel-fungerende, omend dyre in-situ systemer i dag.

Det er der derfor valgt at benytte et ekstraktivt system. Udfordringerne ved denne tilgang er bl.a.:

- Fugten (bl.a.) i røggassen kondenserer, når temperaturen sænkes, hvilket betyder, at:
 - Fugten skal fjernes, eller temperaturen skal opretholdes ved brug af opvarmede slanger
 - Alternativt skal gassen fortyndes med tør luft og dermed sænke dugpunktet
- Sod og andre partikler stopper systemet til
- Selve system skal være robust for at kunne holde til de høje temperaturer og vibrationer i skorstenens omgivelser.

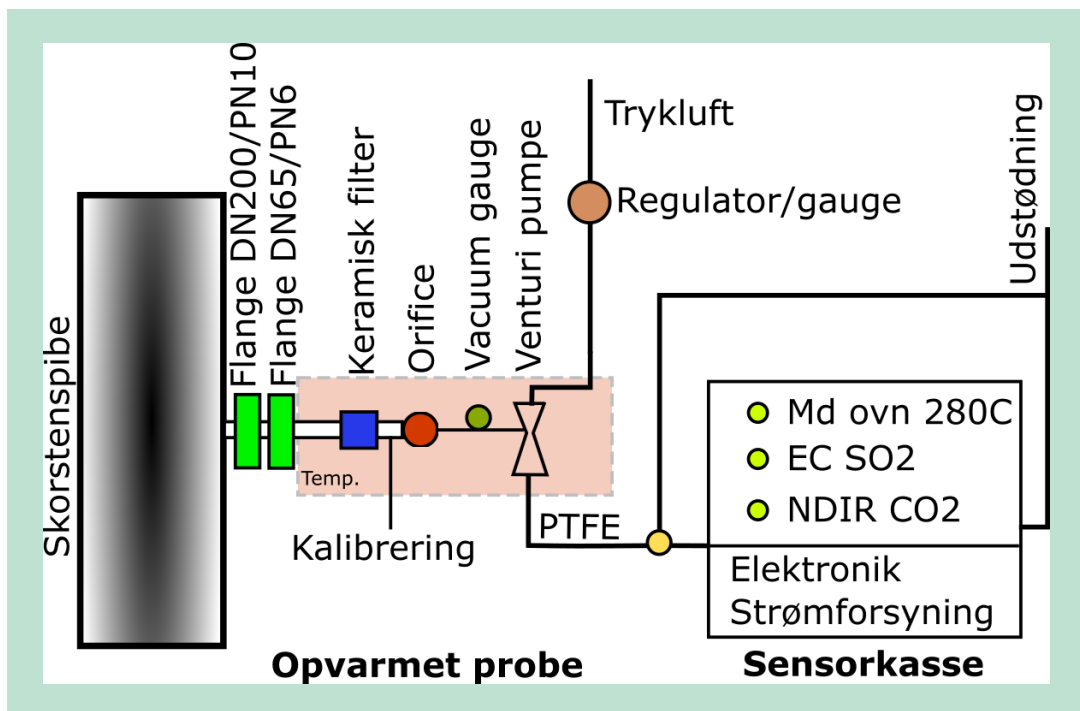
Det blev valgt at gå videre med brugen af fortyndingsprincippet, da det har yderligere fordele:

- lavere koncentration af gas betyder ofte mindre slid
- det køler gassen før målingen
- der kommer mindre beskidt gas og partikler igennem systemet.

Desuden stiller måleprincippet ikke krav til måling af den faktiske koncentration af SO₂ og CO₂, men alene til forholdet imellem dem, hvorfor fortyndingsfaktoren og stabiliteten af denne ikke er specielt vigtig.

3.5 Valgt systemopbygning

I det følgende beskrives det valgte sensorsystem. I FIGUR 6 ses den skematiske opbygning. Den opvarmede ekstraktive probe monteres direkte på skorstenen, og en slange transporterer gassen videre til sensorerne.



FIGUR 6. Skitse over sensorsystemet. Den opvarmede ekstraktive probe monteres direkte på skorstenen, og en slange leder gassen videre til sensorerne.

En fortynding på 1:10 anvendes ved brug af en opvarmet fortyndingsprobe. Der anvendes et fortyndingsprincip, som kun anvender trykluft, og der indgår ikke mekaniske pumper, som skal serviceres. Fortyndingsproben fungerer vha. en trykluftdrevet venturipumpe, som skaber et vakuum, som suger røggassen igennem et fint, opvarmet keramisk filter. Fortyndingen kontrolleres vha. en orifice (lille hul), som præcist begrænser mængden af røggas, som suges ind i probeen.

CO₂-sensorerne forventes efter fortyndingen at måle koncentrationer mellem 0,54 %-0,84 % eller 5.400 til 8.400 ppm. Der anvendes derfor en ADOS 10.000 ppm sensor med en nøjagtighed på +/- 3 %. Ved beregning af CO₂-koncentrationen før fortyndingen skal der tages højde for fortyndingsluftens CO₂-koncentration på ca. 400 ppm.

Svovlkoncentrationen reduceres efter fortyndingen til ca. 2-10 ppm (0,1 %S-0,5 %S). Der anvendes ADOS SO₂-sensorer med range på 20 ppm og præcision på bedre end +/- 0,1 ppm. Med udgangspunkt i de oplyste usikkerheder efter fortynding er den samlede usikkerhed (2*RSD svarende til 95 % konfidensinterval) beregnet til:

- 0,1 %S +/- 0,01 %S
- 0,5 %S +/- 0,03 %S

Da der anvendes elektrokemiske SO₂-celler, skal krydsinterferensen håndteres med NO₂. Det er valgt både at indbygge kompensering (ved måling af NO₂) og at fjerne NO₂ i systemet, så den bedste teknik kan evalueres. Til fjernelse af NO₂ benyttes en opvarmet molybdænkatalysator – også kaldet en Mo-converter.

I sidste demonstrationskampagne blev der også installeret en UV SO₂-sensor i sensorkassen, da der generelt er målt høje NO₂-koncentrationer, som gør det svært at kompensere de elektrokemiske sensorer. Den installerede UV SO₂-sensor er kombineret med en IR CO₂-sensor fra firmaet Wi-Tec.

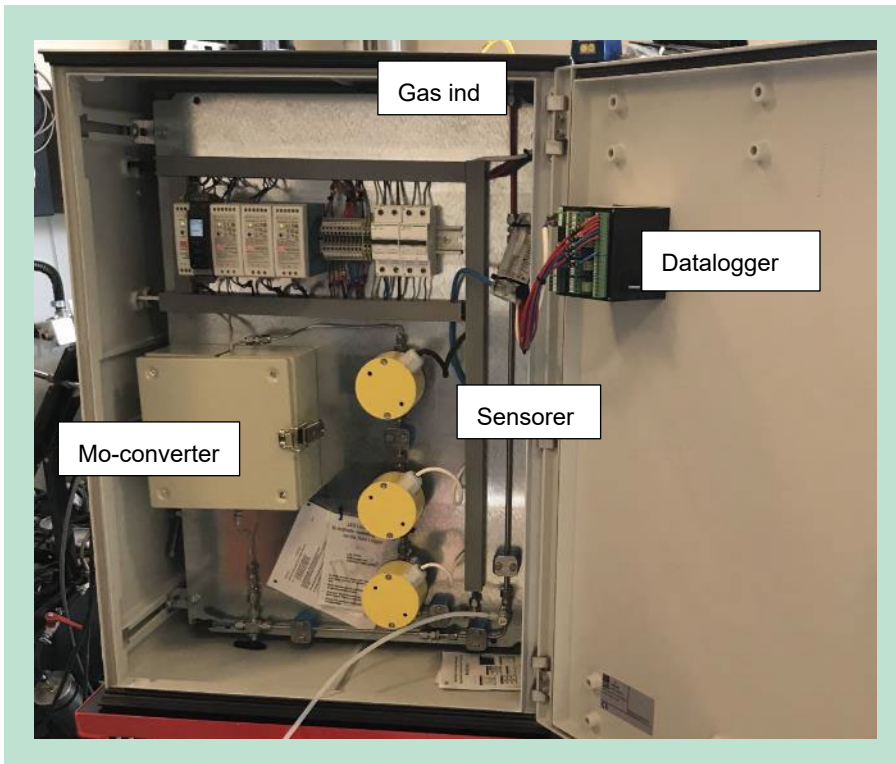
Der er inkluderet en elektrokemisk NO-sensor i testskabet for at kunne følge ydeevnen af Mo-converteren. Dette er tænkt som en option i et endeligt system.

Fortyndingsproben er vist i FIGUR 7.

Sensorskabet er vist i FIGUR 8.



FIGUR 7. Fortyndingsprobe installeret på DFDS Crown Seaways.



FIGUR 8. Sensorer og Mo-converter installeret i sensorskabet. Resultater logges internt i data-loggeren, som også har display.

4. Målekampagner og resultater

I dette kapitel beskrives de udførte målekampagner, resultaterne, udfordringerne og forbedringsmuligheder til efterfølgende kampagner.

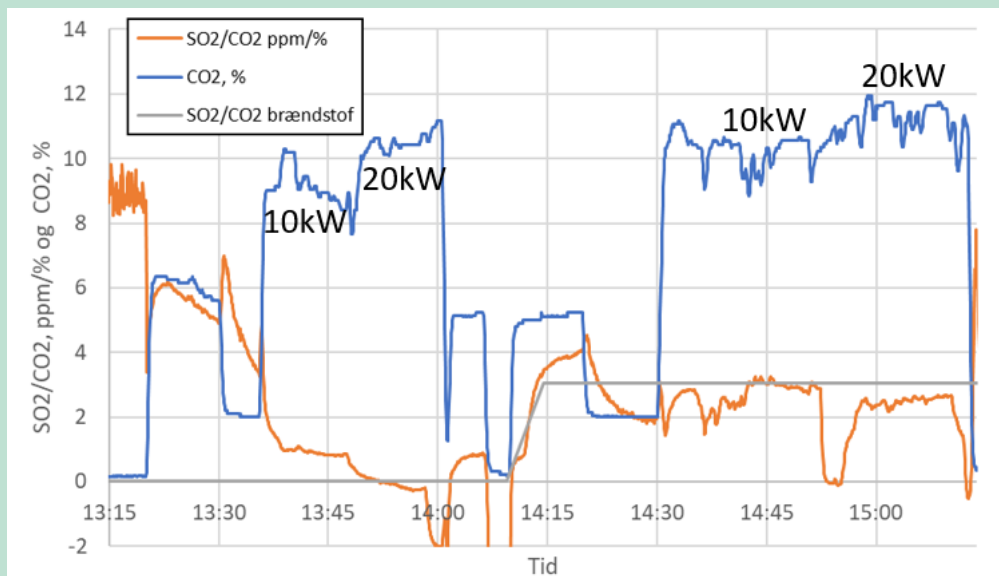
4.1 Stationær motortest

En indledende test på en stationær motor blev udført. Målingerne er summeret i TABEL 2, og resultaterne er vist i FIGUR 9.

Der er kørt med to typer brændstof med hhv. 5 ppmS og 0,07 %S samt ved to effektniveauer (10 og 20 kW). Der er efter indsvingningsforløbene god overensstemmelse mellem SO₂/CO₂ i brændstoffet (grå kurve) og det målte forhold (orange kurve). Det målte SO₂/CO₂-forhold under testen er meget tæt på de forventede 3 ppm/% for 0,07 %S brændstoffet.

TABEL 2. Målekampagne på laboratoriemotor.

Målekampagne	Laboratoriemotor
Formål	Validering og test af komplet system Der testes med 0,07 %S og ca. 0 % svovlbrændstof på testmotor
Lokation	Teknologisk Institut Aarhus, Peugeotdieselmotor
Tidsperiode	30/9 2019
Konfiguration	IR-CO ₂ , EC-SO ₂ , Mo-converter
Resultater	Variierende svovlindhold bestemt korrekt i røggassen
Udfordringer	Kort tidsperiode og lidt ustabil motorstyring
Forbedringsmuligheder	Temperaturen af Mo-converteren skal optimeres
Delkonklusion	Der er indledningsvist opnået en meget tilfredsstillende ydeevne af systemet, herunder respons og linearitet. Alt fungerer efter hensigten og test på skib kan igangsættes



FIGUR 9. Motortest af sensorsystemet. Der er kørt med to effektiveauer (10 og 20 kW) og to typer brændstof med hhv. 5 ppmS og 0,07 %S. Der er efter indsvingningsforløbene god overensstemmelse mellem SO₂/CO₂-forholdet i brændstoffet (grå kurve) og det målte forhold (orange kurve).

4.2 DFDS Crown Scubber 1, 2019

Efter indledende test på den stationære motor blev systemet installeret ombord på DFDS Crown Seaways, som sejler mellem København og Oslo, for at opnå vigtige, indledende erfaringer forholdsvis tidligt i projektet.

Målekampagnen er opsummeret i TABEL 3.

Et eksempel på målingerne er vist i FIGUR 10. Billeder af installationen er vist i FIGUR 11.

Crown repræsenterer, fra et målesystemmæssigt synspunkt, et worst case scenarium, hvor der skiftes både mellem brændstoftyper og operation med/uden scrubber, hvorfor denne test-case vurderes som værende meget interessant i projektet. Desuden har Crown en såkaldt "NO_x Tier O"-rating, dvs. at der ingen krav er til NO_x-niveauet.

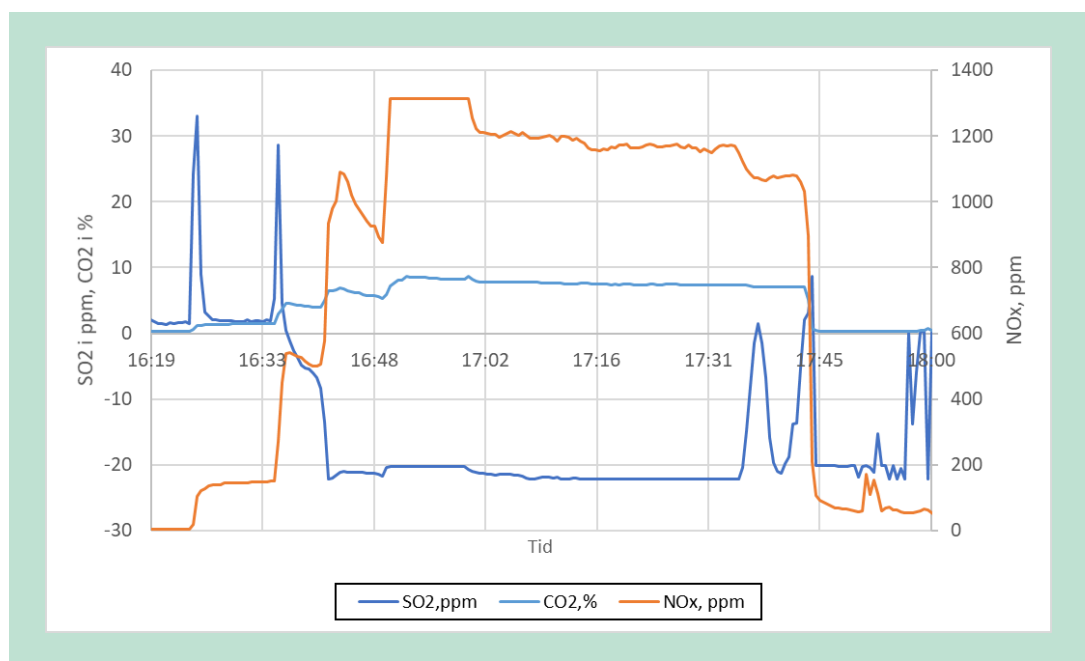
Der var efter de første 24 timers drift tegn på tilstopning af fortyndingssystemet. Efter få ugers test blev systemet planmæssigt afmonteret. Indstiksrør og filteret blev undersøgt, og det viste sig, at saltaflagringer fra scrubbevandet lagde sig i det keramiske filter og fortyndingssystemet. Billeder af indstiksrør og det keramiske filter efter afmontering er vist i FIGUR 12.

Proben viste sig uheldigvis at være installeret med hældning af proberøret, så scrubbevand løb ned i proben og forårsagede tilstopning med salt.

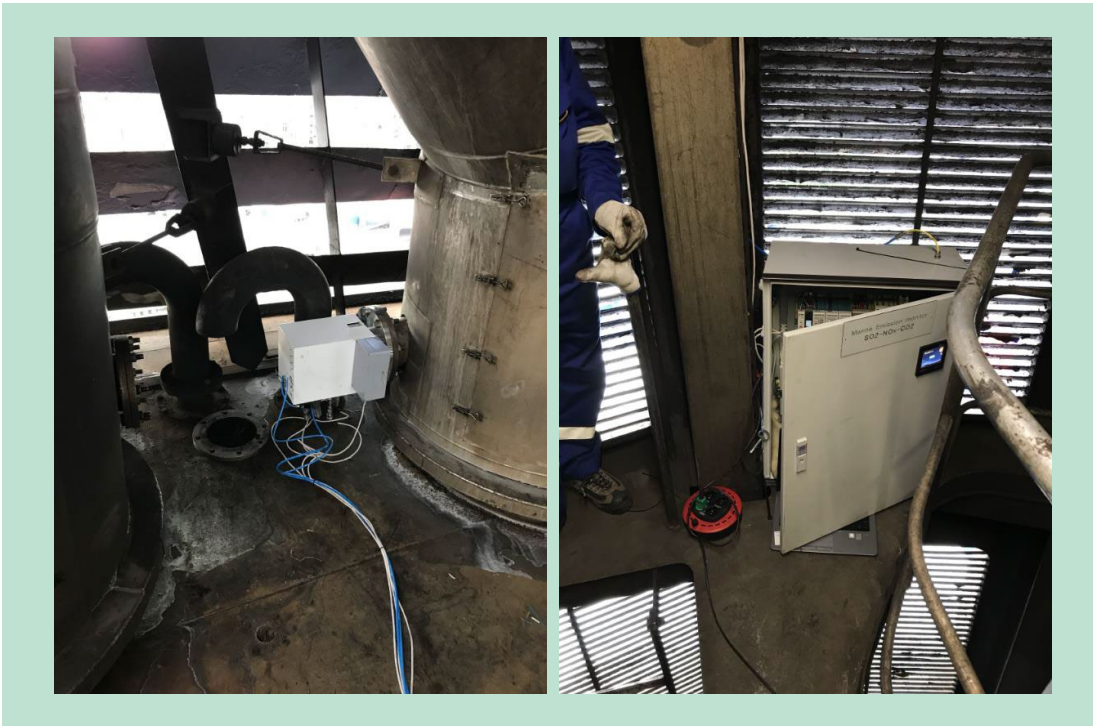
Samtidig blev der observeret højere NO_x-værdier end forventet, hvilket gør NO₂-kompenseringen af SO₂-sensoren udfordrende. Der er potentiale for forbedring af Mo-converterens driftstemperatur.

TABEL 3. Målekampagne på DFDS Crown Seaways – Scrubber 1.

Målekampagne	DFDS Crown Seaways – Scrubber 1
Formål	Felttest af komplet system
Skib og rute	DFDS Crown Seaways – København – Oslo
Tidsperiode	31/10 2019 – 16/12 2019
Konfiguration	CO ₂ IR, SO ₂ EC, Mo-converter
Resultater	Systemet installeret i skorsten og afprøvet succesfuldt i længere tid. Datalogning, kommunikation samt IRCO ₂ -sensor ok.
Udfordringer	Tilstopning af fortyndingsprobe efter kortere tid. NOx er høj, så EC-SO ₂ -sensoren går i negativ mætning.
Forbedringsmuligheder	Proben blev uheldigvis installeret med hældning af proberøret, så scrubbevand løb ned i proben og forårsagede tilstopning af salt. NOx-konverterens effektivitet skal efterprøves. 4G-forbindelsen kan hænge ved skift af landegrænser; der indføres periodisk genstart af 4G-routeren.
Delkonklusion	Fortyndingsproben kan ikke tåle havvand og skal derfor installeres, så vandet løber ned ad indstiksrøret. NOx-koncentrationerne var relativt høje, og kompenseringsmetoderne skal optimeres yderligere i næste kampagner.



FIGUR 10. Eksempel på måledata fra DFDS Crown Seaways Scrubber 1. CO₂- og NO_x-koncentrationerne stiger ved motorstart, og SO₂ falder til negativ mætning pga. en rest af NO₂ efter Mo-converteren.



FIGUR 11. Fortyndingsproben og sensorskabet installeret på DFDS Crown Seaways, 2019.



FIGUR 12. Indstiksør og keramisk filter efter få ugers test på DFDS Crown Seaways.

4.3 DFDS Crown Seaways Scubber 2, 2020

DFDS Crown Seaways var på værft i januar 2020, hvor eksisterende scrubberes erstattes af ME Production-scrubber. Efter reoveringen af scrubberne på værft blev sensorsystemet installeret igen. Denne gang med det formål at kunne sammenligne direkte med performance af fx Norsk Analyse-udstyr, der allerede var installeret på Crown Seaways.

En ny indstiksprobe er optimeret i december, ligesom NO₂-converteren er optimeret og gennemtestet i laboratorium.

Den optimerede røggassensor blev således installeret på DFDS Crown Seaways ultimo juni 2020 efter en længere forsinkelse pga. Coronasituationen. DFDS Crown Seaways har været i

drift siden den 25/6 2020. Ruten blev midlertidigt ændret til København-Frederikshavn-Oslo og retur Oslo-Frederikshavn-København.

Indledningsvist kan det på baggrund af de nye målinger konkluderes, at fortyndingsenheden og selve gassensorerne har fungeret i hele perioden (4 måneder), hvilket er meget positivt på baggrund af de udfordringer, der var i 2019 med tilstopning af salte, hvilket nu er håndteret tilfredsstillende.

NO₂-koncentrationen ligger dog for højt til, at Mo-converteren fjerner den høje NO₂-koncentration (som er væsentligt højere end i laboratoriemotoren) tilstrækkeligt, ligesom kompensering af tilstedeværende NO₂ vha. en NO₂-sensor har vist sig at være mere kompliceret end først antaget. I FIGUR 14 ses, at der efter ca. 7 dage sker en stigning i NO₂-koncentrationen efter Mo-converteren, hvilket tyder på, at levetiden af Mo-convertermaterialet er begrænset. Der er mulighed for yderligere optimering i forhold til materialesammensætning, driftstemperatur og luftflow.

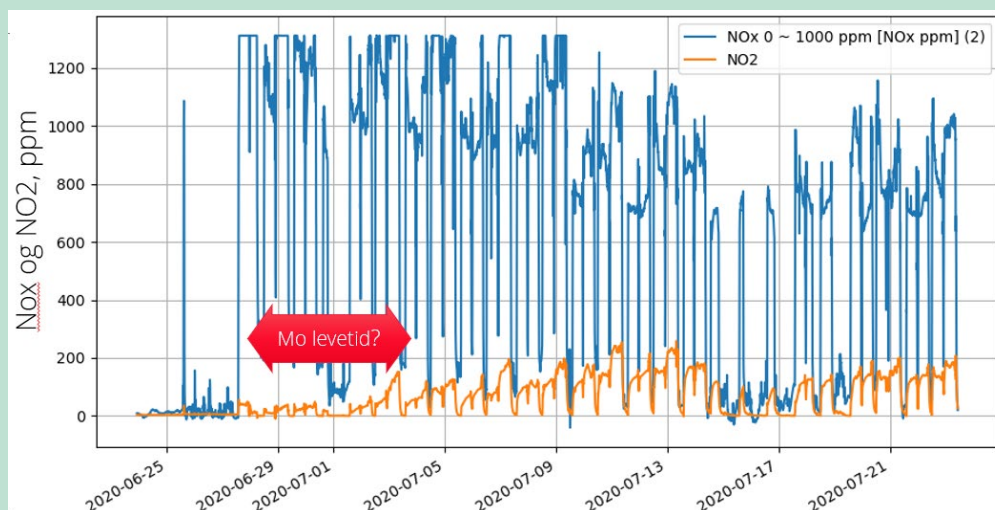
Der ses meget fine og stabile CO₂-koncentrationer og indikation af, hvornår motoren er i drift hhv. i havn.

TABEL 4. Målekampagne på DFDS Crown Seaways – Scrubber 2.

Målekampagne	DFDS Crown – Scrubber 2
Formål	Felttest af komplet system
Skib og rute	DFDS Crown Seaways – København – Oslo – Frederikshavn
Tidsperiode	17/6 2020 – 7/10 2020
Konfiguration	CO ₂ IR, SO ₂ EC, Mo-converter 2
Resultater	Systemet installeret i skorsten og afprøvet i længere tid. Fortyndingsprobe, datalogning, kommunikation samt IR-CO ₂ -sensor ok.
Udfordringer	NOx efter konverteren er høj, hvorved SO ₂ -sensoren går i negativ mætning.
Forbedringsmuligheder	NOx-konverterens levetid kan være en begrænsning ved de høje NOx-koncentrationer. Yderligere optimering af denne er påkrævet.
Delkonklusion	Fortyndingsproben fungerede upåklagelig i testperioden med minimal vedligeholdelse. Stadig udfordringer med SO ₂ -sensorens påvirkning af NO ₂



FIGUR 13. Fortyndingsproben er installeret på en ca. 45 graders rørbøjning, så det ikke risikeres at indstiksrøret leder scrubbevand ind i filtret.



FIGUR 14. NOx og NO₂ efter Mo-converteren. Der ses efter ca. 7 dage en markant stigning i NO₂-toppene, hvilket kan tyde på, at Mo-converteren har begrænset levetid.

4.4 Hundested-Rørvig

Grundet de store samfundsmæssige udfordringer pga. Coronapandemien - nationalt som internationalt - viste det sig yderst svært at teste målesystemet på de større skibe.

En plan B blev derfor at teste det optimerede målesystem på M/F Isefjord (Hundested-Rørvig-færgen). Dette skib anvender brændstof med meget lavt svovlindhold, og testen vil derfor

kunne vise, om NO₂-interferensen på SO₂-sensoren er forbedret med de fortløbende optimeringer af Mo-converteren.

Systemet blev installeret på én af fire motorer før et partikelfilter. Der er derfor tale om så rå og varm røggas som muligt. Forventningen er stadig, at målesystemet skal kunne installeres på skibe uden scrubbere, hvilket testes i denne kampagne.

Motoren kører skiftevist lav og høj belastning (øst/vest). Ved den lave belastning når SO₂-sensoren kun svagt i negativ, men ved højbelastning (CO₂ >0,5 % efter fortynding) når den i mætning. Derfor viste testkampagnen desværre, at det ikke har været muligt at optimere Mo-converteren til at kunne reducere NO₂-koncentrationen tilstrækkeligt - selv ved lavere koncentrationer.

TABEL 5. Målekampagne på Isefjord.

Målekampagne	Hundested-Rørvig
Formål	Test af systemet uden svovl samt lavere NOx
Skib og rute	M/F Isefjord (uden scrubber og uden svovl), før partikelfilter, NOx Tier II Hundested-Rørvig
Tidsperiode	29/6 2021 – 10/8 2021
Konfiguration	CO2 IR, SO2 EC, Mo-converter 2
Resultater	Ved lav last er Mo-converteren tilstrækkelig, men ved højere last er NOx-koncentrationen problematisk for SO ₂ -sensoren.
Udfordringer	Den midlertidige installation af problem stoppede til pga. sod-afsætning inden proben. Den elektrokemiske SO ₂ -sensor er også udfordret ved lavere NOx-koncentrationer end forventet.
Forbedringsmuligheder	I næste kampagne vil den elektrokemiske sensor blive suppleret med en UV-SO ₂ -sensor, som ikke er NO ₂ -krydsfølsom.
Delkonklusion	Det er ikke lykkedes at dimensionere Mo-converteren til de høje NO ₂ -koncentrationer, så den elektrokemiske sensor kan måle de relativt lave SO ₂ -koncentrationer.

4.5 DFDS ARK Futura

I denne afsluttende målekampagne blev målesystemet opgraderet med en ny UV-SO₂-sensor, som fungerer meget anderledes end de elektrokemiske celler, og det er derfor muligt at undgå problemerne med høje NO₂-koncentrationer.

Udstyret blev installeret på ARK Futura, der sejler på 0,03 %S MGO og ikke er udstyret med scrubber. Svovlindholdet er så lavt, at målekampagnen udfordrer nul-stabiliteten af UV-sensoren, som er vigtig for bestemmelse af SO₂-koncentrationen.

Målekampagnen er opsummeret i TABEL 6.

Resultaterne er vist i FIGUR 15 og FIGUR 16.

Der blev desværre igen set tilstopning af fortyndingsproben i den belastende røggas. Tilstopning af proben betød løbende, faldende målt CO₂.

Der er både partikulære og olielignende belægninger. Der blev observeret relativt kraftig sodbelægning på røgkanalen, som muligvis skyldes ufuldstændig forbrænding.

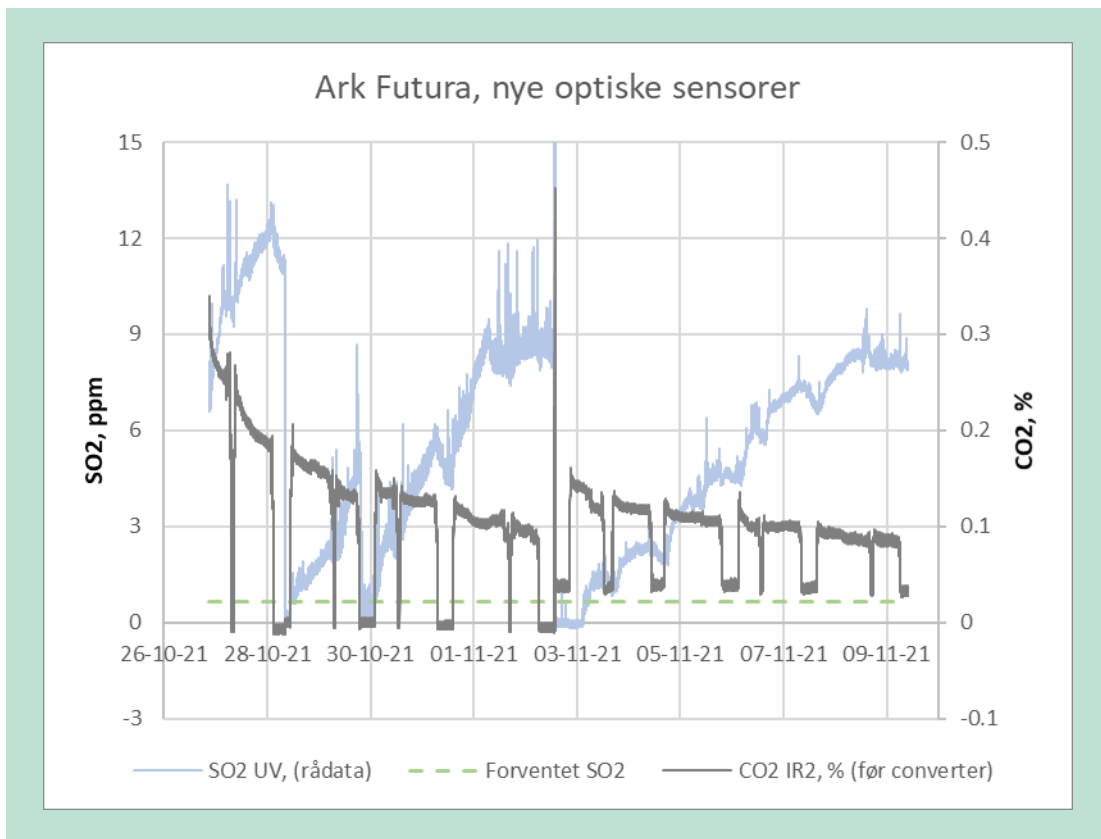
Det formodes, at olielignende belægninger har påvirket UV-SO₂-sensoren, da signalet stiger over tid med motoren i drift. Efter en periode med ren luft genfindes det oprindelige nulniveau.

Desuden sås høje temperaturudsving i maskinrummet, som også kan have en indflydelse på stabiliteten af UV-sensoren.

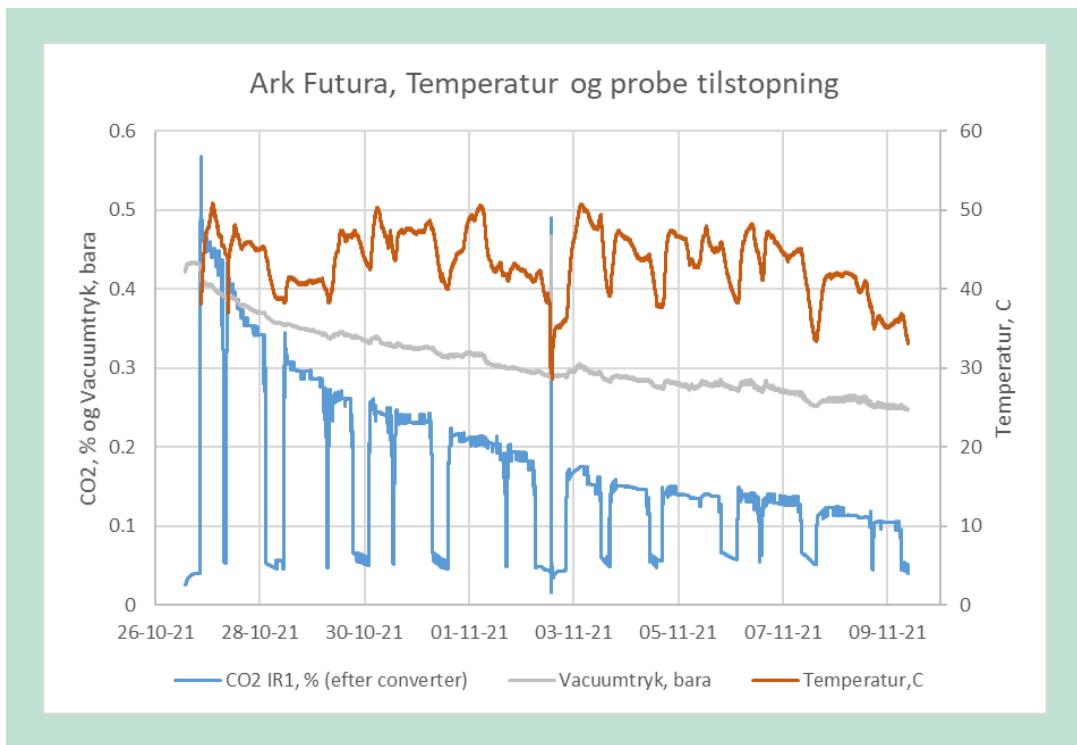
Det ikke været muligt at udregne SO₂/CO₂-forholdet i røggassen ved at kompensere for driften af UV-SO₂-sensoren samt tilstopningen. Den systematiske fejl og støjen er for dominerende til at kunne give troværdige resultater.

TABEL 6. Målekampagne på DFDS ARK Futura.

Målekampagne	DFDS ARK Futura
Formål	Test af nye IR-CO ₂ - og UV-SO ₂ -sensorer
Skib og rute	DFDS ARK FUTURA (ingen scrubber, 0,03 %S MGO) Fredericia – Litauen
Tidsperiode	26/10 2021 – 17/11 2021
Konfiguration	IR-CO ₂ -2, UV-SO ₂ , IR-CO ₂ (ADOS), EC-SO ₂ , Mo-converter 2
Resultater	Der er målt CO ₂ og SO ₂ med de nye sensorer (IR-CO ₂ -2 og UV-SO ₂). CO ₂ -koncentrationen før Mo-converteren er målt lavere end efter.
Udfordringer	Der er igen set tilstopning af fortyndingsproben i den belastende røggas. Der er både partikulære og olielignende belægninger. Tilstopning af proben betød løbende, faldende målt CO ₂ . Det formodes, at olielignende belægninger påvirker UV-SO ₂ -sensoren, da signalet stiger over tid med motoren i drift. Efter en periode med ren luft genfindes det oprindelige nulniveau. Der var høje temperaturudsving i maskinrummet.
Forbedringsmuligheder	Filtrering af den varme og støvholdige røggas skal optimeres. SO ₂ -sensoren kan med fordel temperaturstabiliseres. Der skal stilles krav til renheden af trykluft.
Delkonklusion	Det har været nødvendigt at kompensere for nulpunktsforskydningen af SO ₂ sensoren, hvilket betyder, at usikkerheden på SO ₂ /CO ₂ -forholdet er høj. Det er et dilemma med en kosteffektiv tilgang samtidig med meget krævende forhold i røggassen. De 0,1 %S eller mindre er væsentligt sværere at kvantificere end 0,5 %S udenfor SECA.



FIGUR 15. UV-SO₂-sensoren sammen med CO₂ er vist. Den forventede SO₂-koncentration på 0,66 ppm er vist med stiplede linje. Der er ikke taget højde for fortyndingen i denne figur, så koncentrationerne skal ganges med ca. 10 for at få røggassens koncentration.



FIGUR 16. Måling af temperatur i kabinettet. Faldende vakuumtryk i proben indikere tilstopning af proben, og det ses som konsekvens heraf, at CO₂-koncentrationen falder løbende. Der er ikke taget højde for fortyndingen af CO₂'en i denne figur.

5. Diskussion og perspektiver

Fokus i sidste del af projektet har været at efterprøve det udviklede system under de meget krævende maritime betingelser og over længere perioder.

Det vurderes samlet set, at de forskellige målekampanjer, opsummeret i forrige afsnit, har været realistiske for de maritime betingelser (herunder NOx Tier 0 og motorer >25 år).

Generelt har systemet været robust, men det bemærkes, at der har været situationer, hvor udstyret har været nede pga. tilstopninger af forskellige slags. Der er arbejdet med en kosteffektiv tilgang, som har vist sig udfordrende pga. interfererende gasser (NOx) på EC SO₂-sensorene. Adskillige måleprincipper inden for den kosteffektive ramme er afprøvet under driftsbetingelser - med varierende succes. De forskellige tekniske måleprincippers og elementers egnethed i forhold til den pågældende motortype er forsøgt opsummeret i tabellen nedenfor.

TABEL 7. Baseret på resultaterne fra målekampanjerne har det været muligt at vurdere egnetheden af de enkelte komponenter under en bred vifte af betingelser. Dette er vist i tabellen, hvor ✓ betyder, at det fungerer godt; (✓) betyder, at det formodes at fungere godt; og "–" betyder, at det ikke fungerer tilfredsstillende.

	Med scrubber	Uden scrubber	NOx Tier 0	NOx Tier 2
Fortyndingsprobe	✓	✓	✓	✓
IR-CO ₂ -sensor	✓	✓	✓	✓
UV-SO ₂ -sensor	✓	(✓) OBS Filter)	(✓)	✓
EC-SO ₂ -sensor NO ₂ kompensering	Afhænger af NOx		-	(✓)
EC-SO ₂ -sensor Mo-converter	Afhænger af NOx		-	(✓)

Interessen fra de deltagende rederier for mere robuste og kosteffektive sensorer er, som ved projektstart, stor, da der ved målesystemer installeret i dag er en begrænset levetid. Der vil ved udskiftning blive skelet til driftsøkonomien ved erstatningsmålesystemer, og herunder er service og vedligeholdelse et vigtigt element. Frivillig monitoring er samtidig stadig relevant, men kræver kosteffektive systemer uden særlig driftsvedligeholdelse. Det vurderes, at certificering vil være nødvendig ved salg.

Der vurderes ikke umiddelbart at være lovgivning på vej indenfor SO₂-monitoring (udover for scrubberinstallationer).

I forhold til det i projektet udviklede system forventes en kostpris på 80.000-100.000 DKK, og det vil med flere end tre målepunkter på skibet være fordelagtigt at bruge en multiplexer. Der er desuden potentiale for yderligere omkostningsreduktion ved nedskalering af fortyndingsenheden, da der i kravene til målingerne alene stilles krav til SO₂/CO₂-forholdet, hvorved den faktiske fortyndingsfaktor og stabiliteten af denne er mindre vigtig.

Vedligeholdelse af systemet (efter eliminering af 'børnesygdomme') forventes at være meget lave. Et proof-of-principle på et NOx Tier 2 skib er samtidig i spil mellem flere af projektpartnerne i forlængelse af nærværende MUDP-projekt.

Endelig skal det bemærkes, at det udviklede system med succes har været brugt i forbindelse med bl.a. SO₂-, NO₂- og N₂O-måling i varierende og udfordrende målepunkter hos en større industrivirksomhed i Danmark. Der er således, udover de maritime perspektiver, også en række andre potentielle markeder, som opsøges af bl.a. C.I.-Aqua, herunder kraftværker.

Kosteffektiv overvågning af svovlemissioner fra skibe på åbent hav

For at mindske luftforureningen indførte International Maritime Organization (IMO) i 2020 på globalt plan nye, skrappe krav omkring udledning af svovl: Enten skal der benyttes brændstof med lavt svovlindhold (0,5 %), alternativt brændstof eller scrubberteknologi til rensning af røggassen. Et vigtigt element for at kunne dokumentere compliance er, sammen med bunker-delivery notes og brændstofprøver, direkte måling af røggassen, hvilket bl.a. kan bruges til i realtid at bestemme brændstoffets svovlindhold.

Projektets mål har således været at udvikle og demonstrere en kosteffektiv røggas-sensor, der kan placeres på det enkelte skib, og som kan måle svovlemissionerne. Rederier og myndigheder vil således kunne få et omkostningseffektivt værktøj til dokumentation af skærpede, globale krav til især skibes svovludledning. De tilgængelige målesystemer til SO₂/CO₂ vurderes at ligge i prislejet 150.000-500.000 DKK pr. målepunkt, og ambitionen i dette projekt har været at ligge et godt stykke under dette beløb med samtidig fastholdelse af en tilfredsstillende ydeevne og robusthed.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk