



Miljø- og Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Overvågning og tilsyn med svovlemissioner fra skibstrafik ved hjælp af droneteknologi

Miljøprojekt nr. 1833, 2016

Titel:

Overvågning og tilsyn med svovlemissioner fra skibstrafik ved hjælp af droneteknologi

Redaktion:

Jon Knudsen, Explicit
Bettina Knudsen, Explicit

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Explicit
C9 Helicopters

Illustration:

Explicit

År:

2016

Kort:

Google Inc.

ISBN nr.

978-87-93435-37-7

Ansvarsfraskrivelse:

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
1. Konklusion og sammenfatning	5
1.1 Baggrund	5
1.2 Formål	5
1.3 Konklusion	5
2. Summary and Conclusion	8
2.1 Background	8
2.2 Purpose.....	8
2.3 Conclusion.....	8
3. Project Sense	11
3.1 Sensorer - verifikation og brugbarhed	11
3.2 Droneopsætning.....	13
3.3 Helikopteropsætning	14
3.4 Flyvning og måling.....	14
3.4.1 Drone	14
3.4.2 Helikopter.....	15
3.5 Software.....	15
3.5.1 Project Sense – Ground station software.....	16
3.5.2 Exaqt – Cloud-baseret dataopsamlingssoftware	17
4. Referencer	22
Bilag 1 Beregnede koncentrationer i centerlinjen af røgfanen fra skibe	23
Bilag 2 Sensorproducentdata	24
Bilag 3 Sensorlinearitet	25
Bilag 4 Sensorkrydsinterferens	26
Bilag 5 Sensorresponstid	27
Bilag 6 Målt- og forventet ratio	28
Bilag 7 Flyvninger	29

Forord

I forbindelse med Miljøstyrelsens ”Program for Grøn teknologi 2013”, i kategorien ”Ren luft og mindre støj – Renere skibsfart”, blev der i november 2013 givet tilsagn til projektet ”Overvågning og tilsyn med svovlemissioner fra skibstrafik ved hjælp af droneteknologi” kort kaldet ”Project Sense”.

Følgegruppen består af deltagere fra Miljøstyrelsen, Danmarks Rederiforening samt Søfartsstyrelsen. Projektet er gennemført af Explicit i samarbejde med FORCE Technology. Projektet blev afsluttet den 31. december 2014, og denne rapport er den endelige projektrapport.

Jon Knudsen, Explicit
Kgs. Lyngby, d. 31. januar 2015

1. Konklusion og sammenfatning

1.1 Baggrund

Med mere end 2.3 mio. skibe [1], der hvert år anløber europæiske havne, spiller skibstrafikken en betragtelig rolle for luftkvaliteten i de europæiske byer og i Europa generelt. Forureningen fra skibstrafikken skønnes årligt at koste Europa ca. 450 mia. kr. i helbredsrelaterede omkostninger svarende til 10 % af de samlede helbredsomkostninger som følge af luftforurening. Ca. 51.000 for tidlige dødsfald skønnes hvert år forårsaget som en direkte konsekvens af den internationale skibstrafik omkring Europa [2].

For at bekæmpe denne væsentlige forureningskilde har man i regi af EU og i IMO (den internationale søfartsorganisation under FN) vedtaget regler, som sigter mod en væsentlig reduktion i skibstrafikkens forurening med svovldioxid (SO₂) og kvælstofoxider (NO_x) frem mod 2020. Der er samtidig indført særlige kontrolområder (Sulphur Emission Control Areas) - hvorunder Nordsøen og Østersøen bl.a. hører - med skærpede krav til udledningen. Disse områder kræver f.eks., at skibene skifter bunkeroliesammensætning, når de gennemsejler et SECA-område.

Trods de skærpede miljøkrav, og de forventede positive effekter af stramningerne, er det til stadighed et problem for de nationale myndigheder at gennemføre effektiv overvågning og tilsyn med skibenes emissioner. Dette fordi ingen teknologier indtil videre har muliggjort, at man kan komme tæt nok på/ind i skibenes røgfaner til at måle udledningerne og samtidig gennemføre tilsynet inden for en effektiv økonomisk ramme. Det betyder, at man reelt ikke ved, hvad skibene sejler på, og om man har et compliance-problem eller ej.

1.2 Formål

Projektet har til formål at udvikle en teknologisk løsning, som muliggør effektiv miljøovervågning af den internationale skibstrafik ved brug af prisbillig droneteknologi, eksisterende kosteffektive sensorkomponenter og målrettet analysesoftware, der sammenholdt med skibenes AIS-data gør det muligt at opstille valid dokumentation til håndhævelse af IMO-reglerne (implementeret i EU's svovldirektiv).

Kernen i projektets tilgang er at benytte allerede eksisterende, lavpris - men dog pålidelige - elektronik- og sensorkomponenter, kombineret med simple dronemodeller, der nemt kan betjenes fra land eller følgebåde i en "ready-to-fly" løsning, der sammen med en egenudviklet softwareplatform gør det let at indsamle, analysere og præsentere emissionsresultaterne af de målte røggaskoncentrationer. Dronerne flyver autonomt via indlagte flyveruter baseret på GPS-data fra AIS-systemet samt data om vindforhold. Sensordata indsamles og afleveres i realtime via radiolink til et centralt cloud-system, hvorfra de videreanalyseres.

1.3 Konklusion

På baggrund af både laboratorietests og flyvning i skibenes røgfaner, kan det konkluderes, at de små og relativt billige sensorer fint kan løse opgaven med at skelne mellem skibe, der sejler på hhv. 0,1 %, 1 % og 3 % svovl i fuelolien. Dette er under forudsætning af, at man kan komme tæt på emissionskilden og opholde sig dér i ca. 20 sekunder, for dels at have gaskoncentrationer inden for sensorernes måleområder og dels for at kunne opnå et steady-state signal fra sensorerne som har en vis responstid.

De valgte droner og deres udstyr fungerede ligeledes efter hensigten, og det kan konkluderes, at selv dette relativt billige udstyr har en så god kvalitet, at det sagtens kan anvendes til denne type af krævende opgaver.

For bedre at kunne ramme røgfanen ved flyvning med dronerne, var det nødvendigt at bestemme vindretning og vindhastighed lokalt vha. et særligt indlagt flyvemønster, og dette blev derfor implementeret i softwaren, da vinddata fra de maritime vejrudsigter typisk var for upræcis.

Flyverutesoftwaren kan stadig forbedres for at ramme skibenes røgfaner endnu mere præcist. Softwaren vil med fordel kunne videreudvikles, så der tages højde for a) realtime-ændringer i skibenes positioner, b) ændringer i skibenes kurs og hastighed under flyvningen, c) for vindens ændring i retning og hastighed og d) justering af dronens air speed, når den optimale måleposition er nået. Ligeledes kan koncentrationsgradienterne for eksempelvis den målte CO₂ benyttes til løbende at justere den optimale højde og position i røgfanen under måling.

Man kan for eksempel forestille sig, at dronen med fordel i en videreudviklet version udstyres med en lille radar og tilhørende software, som kan 'låse' dronen på skibets position. Dronen kan også udstyres med et UV-kamera, der vha. billedanalyse-software identificerer røgfanens position. Sådan information kan potentielt også benyttes til supplerende verifikation af svovlindholdet, selvom det alene ikke kan bruges til fastsættelse af niveauet.

Den store udfordring med dronerne er dog i øjeblikket ikke af teknisk karakter, men derimod lovgivningen på området, idet dronerne i dag har et stærkt begrænset flyverum, der begrænser deres rækkevidde betragteligt. Og heri ligger den væsentligste konklusion. Før det bliver lovligt at flyve "beyond visual line of sight" (BVLOS), bliver det svært, at se dronerne som et operationelt alternativ til eks. helikoptere. Dels ligger de store sejlrender med mest trafik længere fra kysten end visual-line-of-sight (VLOS) (med undtagelse af øen Ven i Øresund) hvilket begrænser antallet af launchpunkter kraftigt. Dels kræver dronen BVLOS-operationsvidde, hvis den skal gøre sig håb om tilstrækkelig inspektionskapacitet (målt som inspicerede skibe per time) sammenlignet med andre luftbårne løsninger. Det følger omvendt af ovenstående, at hvis der kan opnås BVLOS-dispensation til inspektion af skibe, er det alene tekniske optimeringer - som alle har løsninger - som står tilbage, før dronerne kan blive et reelt og omkostningseffektivt håndhævelsesværktøj.

Testflyvninger fra hhv. Kalundborg Fjord og Ven demonstrerede tydeligt denne pointe. I Øresund er trafikdensiteten højere, ligesom der kan opnås VLOS-afstand til røgfanerne. Af dette kan det konkluderes, at både rækkevidde og trafiktæthed er vigtige ikke-tekniske parametre med afgørende betydning på inspektionskapaciteten i et driftscenarie.

Som et afledt produkt af droneprojektet er systemet også blevet udviklet og testet til benyttelse ved flyvning med helikoptere. Dette var ikke med i den oprindelige projektspecifikation; men afprøvningen af sensorudstyret på helikopterne viste så store fordele, at de bør fremhæves som en selvstændig afledt løsning.

Ved flyvning med helikopter benyttes den samme konfiguration som på dronen (dvs. identiske sensorsystemer, autopilotsystemer, software mm.) blot monteret på et bærebæslag under fronten af helikopteren. Fordelen ved denne løsning er, at systemet kan fungere fuldstændig uafhængigt af helikopterens interne system. Dermed overkommer løsningen de primære problemer, som tidligere luftbårne løsninger har haft: At de kræver særlige flytyper, mere eller mindre permanente ombygninger, lang installationstid og endnu længere certificeringstid, fordi målesystemerne er afhængige af indbygning i flyelektronikken. Disse problemer har indtil videre alle været med til at drive omkostningen ved luftbåren overvågning betragteligt i vejret og begrænse udbredelsen.

Helikopterne flyves manuelt; de kan ligge længe i røgfanen; kan flyve frit og er alene begrænset i rækkevidden af deres brændstofkapacitet; og så er der mange egnede maskiner, som kan bære udstyret, næsten hvor som helst. Helikopterne har samtidig en relativt høj inspektionskapacitet i forhold til fx fly takket være deres meget effektive flyvemønstre. De må derfor på kort sigt - indtil dronerne kan få det fornødne flyverum - regnes som en skarp konkurrent. I det efterfølgende vil begge løsninger derfor blive beskrevet.

Set i et større perspektiv beviser projektet, at der bestemt kan findes bedre, og mere kosteffektive løsninger til luftbåren svovlovervågning, end dem vi kender i dag. Ikke alene er det muligt på den korte bane at vælge en mere fleksible og skalerbar løsning til luftbåren overvågning med udgangspunkt i almindelige helikoptere; det er også muligt at substituere de dyrere flyvninger med prisbillige BVLOS-clearede droner på sigt, dér hvor trafikdensiteten er højest. Projektet har således demonstreret fordele i flere teknologier, der i samspil kan udgøre en endog meget effektiv håndhævelse af svovlreglerne til søs. Det er afsluttende værd at påpege, at løsningen med helikoptere ikke havde været mulig, hvis ikke droneteknologien havde været udviklet først.

Endelig har projektet været med til at udvikle en ensartet diagnosticerings- og rapporteringsplatform, der gør det muligt fremadrettet at samle, analysere, kvalitetssikre og publicere måledata ét sted - uanset, hvilket luftfartøj der benyttes til inspektionerne.

Parallelt med projektet er der arbejdet på patentering af teknologien og der er i januar 2015 indgivet en international patentansøgning PCT/EP2015/051584.

2. Summary and Conclusion

2.1 Background

With more than 2.3 million ships [1] each year calling at European ports, shipping has a significant impact on air quality in European cities and in Europe in general. Pollution from shipping is estimated to generate approx. DKK 450 billion in health-related costs in Europe alone, equivalent to 10 % of the total health costs from air pollution. An estimated 51,000 premature deaths are caused every year as a direct result of the international shipping around Europe [2].

To combat this major source of pollution the EU and the IMO (International Maritime Organization of the UN) have adopted rules aimed at a significant reduction in pollution from ships by 2020, in particular of the sulfur dioxide (SO₂) and nitrogen oxides (NO_x) levels. At the same time special control areas have been introduced (Sulphur Emission Control areas) - which include the North and Baltic Seas - within which stricter requirements are imposed on emissions. These restrictions require that the ships change bunker fuel composition when sailing into a SECA area.

Despite the stricter environmental requirements, and the expected positive effects of these, it remains a challenge for the national maritime authorities to carry out effective enforcement and monitoring of ship emissions. So far no technologies have made it possible to get close enough to / into the ship plumes to measure emissions while still keeping the enforcement within a reasonable economic cost. Consequently, no one at this stage knows exactly what the ships are bunkering and if there is a compliance problem or not.

2.2 Purpose

The project aims at developing a technical solution that enables efficient environmental monitoring of international shipping using affordable drone technology, existing cost-efficient sensor components and targeted analysis software, which in conjunction with AIS data from the ships makes it possible to produce valid documentation for the enforcement of IMO rules (adopted into the EU sulphur directive).

The project approach is to use existing, low-cost — but reliable — electronics and sensor components, combined with simple drone models that can be easily operated from land or from a support vessel, in a "ready-to-fly" solution with a software platform that makes it easy to collect, analyze and present emission results of the measured gas concentrations. The drones fly autonomously via predetermined flight paths based on GPS data from the AIS system and data on local wind conditions. Sensor data are collected and delivered in real time via radio link to a central cloud system, from where they are analyzed.

2.3 Conclusion

Based on both laboratory tests and flights in ship plumes, it can be concluded that the small and relatively inexpensive sensors can indeed solve the task of distinguishing between ships sailing with respectively 0.1 %, 1 % and 3 % levels of sulfur in the bunker oil. This is assuming that you can get close enough to the emission source and to stay there for about 20 seconds, partly to obtain gas concentration within the sensor's measurement ranges and partly to achieve a steady-state signal from the sensors considering their response time.

The chosen drones and their equipment performed as expected, and it can be concluded that even this relatively inexpensive equipment has a quality that can easily meet the demands of this difficult task.

In order to better determine the extent of the plume when flying the drones, it proved necessary to determine wind direction and speed locally using a special flight pattern, as wind data from the maritime weather forecasts were too inaccurate. This was consequently implemented into the software.

The flight path planning software can still be improved in order to optimize the position of the drone in the plumes. The software could be further developed to include a) real-time adjustments to changes in vessel positions, b) changes in the ships course and speed during flight, c) changes in wind direction and speed, and d) adjustment of the drone air speed when the optimal measurement position is reached. Similarly, the concentration gradients, for instance of the measured CO₂, could be used to continuously adjust the optimal altitude and position of the drone while in the plume.

For instance, one can envisage that the drone could be improved by equipping it with a small radar and associated software that can 'lock' the drone onto a ship's position. The drone can also be equipped with a UV camera in combination with image analysis software that makes it possible to identify the position and spread of the plume. Such information can potentially also be used for additional verification of the sulfur content although it cannot stand alone.

The biggest challenge currently facing the drones is however not of a technical nature, but rather legislative. With the drones only able to operate in tightly restricted air space their range is limited considerably. And herein lies the main conclusion. Before the drones are able to obtain clearance to fly "beyond visual line of sight" (BVLOS), it is very difficult to see a viable operational alternative in the drones vs. other airborne alternatives such as helicopters. Firstly, many of the main shipping routes with the most traffic lie further from the coast than visual-line-of-sight (VLOS) (except the island of Ven in the Øresund) significantly limiting the number of launch points. Secondly, the drone is dependent on BVLOS operation in order to reach sufficient inspection capacity (measured as ships inspected per hour) compared to other airborne solutions. Conversely, if BVLOS dispensations can be granted for the inspection of ships, only technical optimizations remain - all of which have solutions - before the drones can compete as a real and cost-effective enforcement tool.

Test flights from Kalundborg Fjord and Ven clearly demonstrated this point. In Øresund the ship traffic density was significantly higher, and the drones could be operated within VLOS distance to the plume. And so the range and density are both important non-technical parameters influencing the inspection capacity rate in an operational scenario.

As a derived outcome of the drone project, the system has also been adopted and tested for installation on helicopters. This was not part of the original project specification but testing of the sensors fitted on helicopters showed such promising results that they deserve to be emphasized as a derived independent solution.

The helicopter setup uses the same configuration as the drone (i.e. identical sensor systems, autopilot systems, software and more.) simply mounted on a support bracket under the front of the helicopter. The advantage of this solution is that the system can be operated completely independently of the helicopter's internal systems. The configuration thus overcomes the main problems that previous airborne solutions have had: That they require specific aircraft types, more or less permanent alterations, long installation time and even longer certification periods, because the measurement system require integration into the aircraft avionics. These problems have so far all contributed to significantly added costs of airborne surveillance and limiting their market penetration.

Although manually flown; helicopters can hover the required time in the plume, their range is only limited by fuel capacity but otherwise they have free air space, and there are many suitable machines capable of carrying the equipment almost anywhere. Helicopters also have a relatively high inspection capacity over fixed air planes thanks to their efficient flight pattern. And so in the short term — and until the drones can get the necessary air space permits — be considered as a close competitor. In the following both of these solutions are therefore described.

In a wider perspective the project demonstrates that better and more cost-effective solutions for airborne surveillance are indeed achievable. Not only is it possible in the short term to choose a more flexible and scalable solution for airborne surveillance using ordinary helicopters; it is also possible to substitute the more expensive flights with affordable BVLOS-cleared drones in the long term, in those locations where the ship traffic density is highest. The project has thus demonstrated advantages in several technologies, which in interaction can form an extremely effective tool for enforcement of sulfur regulations at sea.

Finally, the project has helped to develop a uniform diagnostics and reporting platform that integrates the collection, analysis, quality assurance and reporting of measurement data into a single system - no matter which type of aircraft is used for the inspections.

In parallel with the project, work on patenting of the technology has been ongoing and an international patent application PCT/EP2015/051584 was filed in January 2015.

3. Project Sense

3.1 Sensorer - verifikation og brugbarhed

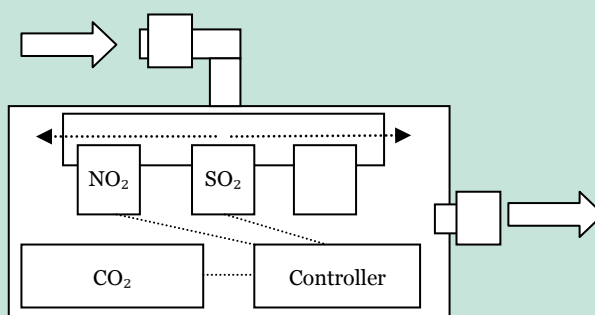
Svovlindholdet i fuelolien kan bestemmes ud fra forholdet mellem SO₂ og CO₂ i skibets røgfane ved hjælp af denne formel sammenholdt med Tabel 1:

$$r = \frac{SO_{2\text{målt}} [ppm]}{(CO_{2\text{målt}} - CO_{2\text{baggrund}})[ppm]} \cdot 10^5$$

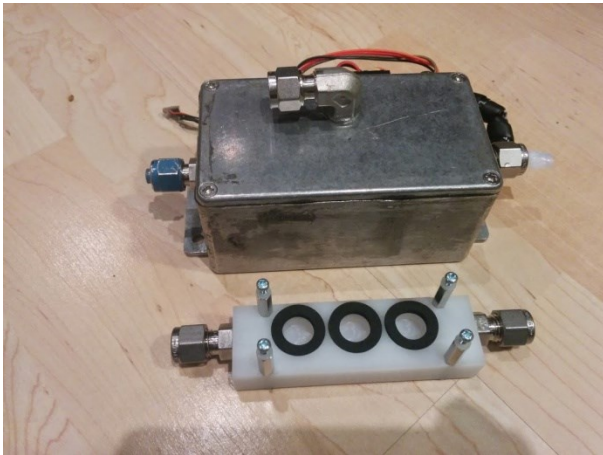
Fuel Oil Sulphur Content	Ratio Emission SO ₂ (ppm)/CO ₂ (% v/v)
4,50	195,0
3,50	151,7
1,50	65,0
1,00	43,3
0,50	21,7
0,10	4,3

TABEL 1
EMISSIONSGRÆNSER FOR SVOVLEMISSIONER DEFINERET AF IMO [3]

Projektet har til beregning af svovlindholdet benyttet en elektrokemisk sensor til måling af SO₂ (Alphasense SO₂-A4 [4]) og en infrarød sensor (NDIR) til måling af CO₂ (SenseAir CO₂ K30FR [5]). Desuden er der anvendt en elektrokemisk NO₂-sensor til kompensation for SO₂-sensorens kryds-interferens med NO₂ (Alphasense NO₂-A4 [6]). Opsætningen er illustreret i Billede 1. For at styre luftstrømmen omkring sensorerne er disse blevet samlet i en aluminiumsboks. Dette har ydermere den fordel, at boksen kan fungere som RF-casing, som fjerner radiostøj (Billede 2).



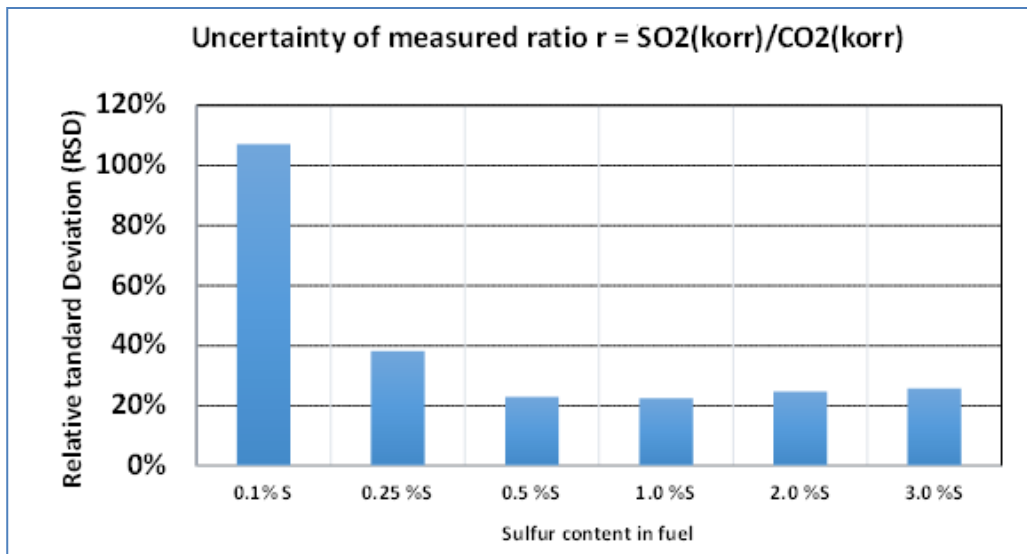
BILLEDE 1
OPBYGNING AF DETECHTOR 1XB SENSORBOKS



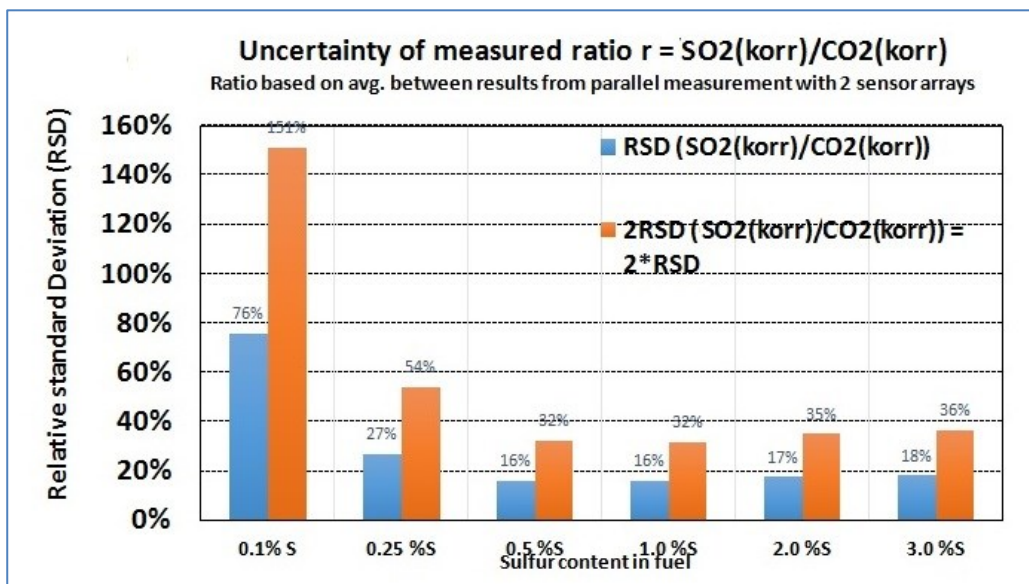
BILLEDE 2
DETECTOR 1XB SENSORBOKS TIL DRONE OG INDBYGGET TIL MONTERING PÅ HELIKOPTER

Brugbarheden af sensorerne, specielt målingerne af følsomhedsområde (Bilag 2), linearitet (Bilag 3), krydsinterferens (Bilag 4) og responstid (Bilag 5), er verificeret gennem laboratorietest. På baggrund af testene kan det konkluderes, at disse sensorer er brugbare til måling af SO₂ og CO₂ i skibenes røgfane under driftforhold, og dermed til brug for beregning af svovlindholdet i fuelolien (Bilag 1).

Det bemærkes, at opgaven med håndhævelse af svovlreglerne primært er at kunne skelne mellem skibe, der sejler på 0,1 %, 1 % og 3 % svovl i fuelolien og til dette formål, er de beskrevne sensorers usikkerhed helt acceptabel (Billede 3 og Billede 4), selv under forskellige atmosfæriske forhold (Bilag 6).



BILLEDE 3
DEN RELATIVE USIKKERHED PÅ RATIOET R VED MÅLING AF SO₂, NO₂ OG CO₂ MED DE ANVENDTE SENSORER I EN RØGFANE FRA FUEL MED ET SVOVLINDHOLD STIGENDE FRA 0,1 %S TIL 3 %S, VED BRUG AF EN ENKELT SENSORBOKS.



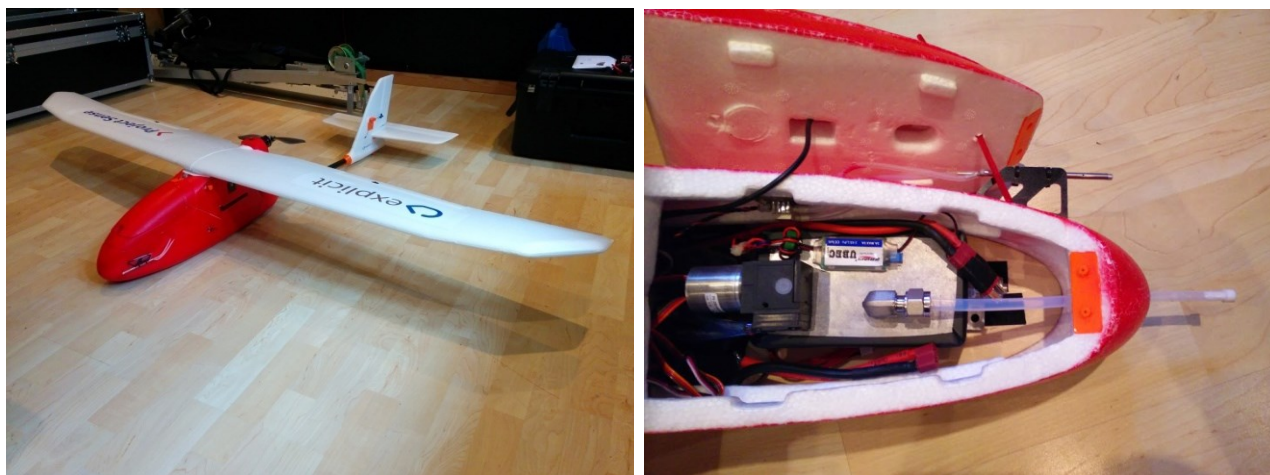
BILLEDE 4

DEN RELATIVE USIKKERHED, SAMT 95% KONFIDENSINTERVAL (TO GANGE STANDARDAFVIGELSEN), PÅ RATIOET R VED MÅLING AF SO₂, NO₂ OG CO₂ MED DE ANVENDTE SENSORER I EN RØGFANE FRA FUEL MED ET SVOVLINDHOLD STIGENDE FRA 0,1 %S TIL 3 %S, VED BRUG AF TO SENSORBOKSE I PARALLEL. USIKKERHEDEN FORVENTES YDERLIGERE NEDBRAGT VED FREMTIDIGE TEMPERATURKORREKTIONER.

3.2 Droneopsætning

Den anvendte drone er af typen 3DRobotics Aero [8]. Denne type er en Skywalker 2103 airframe bestykket med Pixhawk-autopilot, air speed-sensor, uBlox-GPS, kompas samt telemetri-system mm. Pixhawk-autopiloten er baseret på både open source hardware [9] og open source software [10], og teknologien er derfor nem at tilpasse og integrere til. Sensorboksen er placeret forrest i modellen (Billede 5), og batterierne ved tyngdepunktet under vingen.

Modellen kan med en særlig vingeprofil flyve helt ned til 8-10 m/s, hvilket betyder, at man ved flyvning i røgfanen kan placere sig i konstant afstand fra skibet og herved opnå de bedste konsistente målinger. Desuden er modellen lavet af EPO-skum og derfor et sikkerhedsmæssigt godt alternativ, som udgør en minimal risiko for tredjemand og tredjemands ejendom. Sammenholdt med en lav vægt på ca. 3 kg og en flyvetid på op til 2 timer er modellen derfor fundet ideel til opgaven.

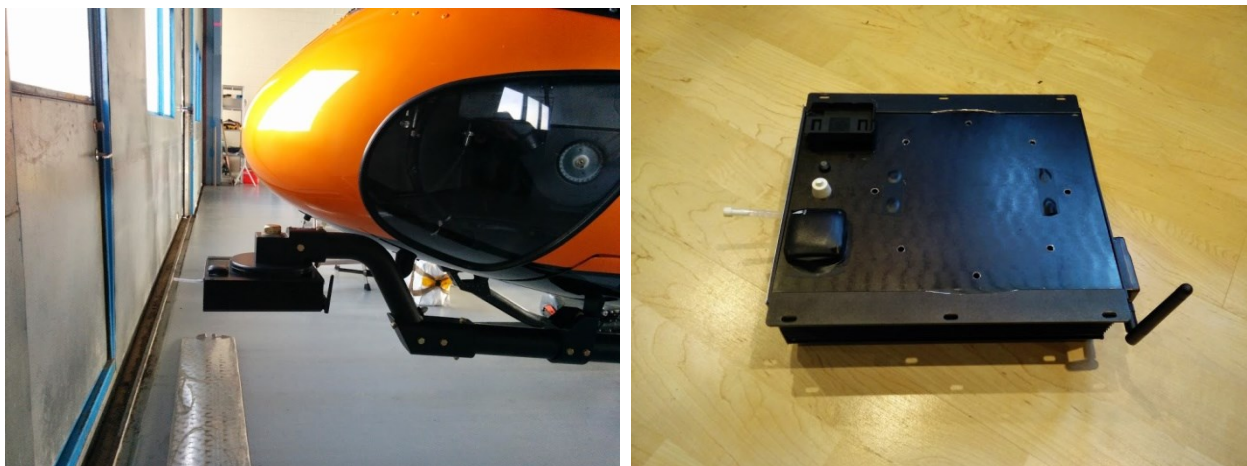


BILLEDE 5

3DROBOTICS AERO MED INDBYGGET DETEKTOR SENSORBOKS.

3.3 Helikoptersætning

Sideløbende med udviklingen af systemet til måling ved hjælp af droner er der udviklet en identisk løsning, hvor der i stedet anvendes en helikopter til at bære sensorboksen. Sensorboksen er bygget ind i en aluminiumskasse der indeholder de samme komponenter som i dronen; Pixhawk-autopilot, uBlox-GPS, kompas samt telemetrisystem mm. Sensorboksen monteres med et godkendt bæreslag på en arm forrest på helikopteren. Beslaget er beregnet til montering af eksterne videokameraer og andre instrumenter, og det kræver således ikke yderligere certificering at påmontere sensorboksen (Billede 6).



BILLEDE 6
MONTERING AF SENSORBOKS PÅ DEN ANVENDTE AIRBUS HELICOPTERS AS355NP

3.4 Flyvning og måling

3.4.1 Drone

De første testflyvninger blev foretaget over land, dels ved HCA Airport (Beldringe Odense) og dels på området ved den nedlagte Flyvestation Værløse. Disse flyvninger blev foretaget for at afprøve selve modellen, autopilotsystemet, systemet til datatransmission (telemetri) samt groundstation-softwaren til kontrol af dronen og dataopsamling.

Derudover blev der foretaget to kampagner med flyvning over vand efter skibenes røgfaner, dels i sommeren 2014 i Kalundborg fjord (Billede 27) og dels december 2014 i Øresund fra øen Ven (Billede 28).

Ved disse kampagner opsamledes AIS-data [11] fra skibene samt flyve- og sensordata fra dronen. Som AIS-modtager blev Digital Yachts uAIS receiver [12] anvendt.

Dronens flyvemønstre blev fastlagt ved brug af det egenudviklede simulationsværktøj (3.5.1), der på baggrund af skibenes position, fart og kurs, vindens hastighed og retning, samt dronens præstationer bestemmer, hvor og hvornår dronen skal flyve for at ramme skibets røgfane. Systemet indeholder også en egenudviklet procedure til bestemmelse af vindretning og -hastighed i det område, hvor operationen foretages, således at flyruten kan fastsættes uden brug af eksterne data. Metoden udnytter, at man med dronen kan måle ground speed ved flyvning af tre ben i en firkant med konstant air speed, og herfra beregne vindretning og hastighed [13] (flyvemønstret er gengivet på Billede 10).

Der blev desuden praktiseret nødprocedurer, hvor man simulerer tabt radiokontakt til dronen, og denne returnerer og cirkler over udgangspunktet ("return to launch" – RTL).

Et eksempel på flyvemønster med drone over Kalundborg fjord ud fra Røsnæs ses på Billede 30 og over Øresund ud fra Ven ses på Billede 31.

Da vi med dronen i Danmark flyver under luftfartslovens BL-9-4 [14], og i Sverige under TSFS 2009:88 [15,16], er det nødvendigt, at dronen altid er inden for synsvidde ("visual line of sight" –

VLOS). Afhængigt af sigtbarheden kan denne afstand variere fra flere kilometer ned til få hundrede meter, og dette blev efterprøvet i Kalundborg fjord, hvor en jolle med operatør ombord agerede følgefartøj og en anden operatør forblev på land. Konklusionen var, at det maksimalt er muligt at se denne drone, uden optiske hjælpemidler, på en afstand af to kilometer, når sigtbarheden er god. Dette har ved efterfølgende operationer været benyttet som den maksimale afstand mellem dronen og operatøren, selvom radiostyret har en rækkevidde på minimum 25 km.

Det er vigtigt at bemærke, at kravene til VLOS under dansk og svensk lov kraftigt begrænser antallet af mulige start- og landingssteder omkring de danske farvande, alene af den grund at afstanden fra land til sejlrønderne overstiger 2 kilometer. VLOS-kravet begrænser samtidig den trafikvolumen, som dronen realistisk kan dække indenfor et givent tidsrum. Begge disse regulative forhold er helt afgørende for rentabiliteten i droneløsningen.

3.4.2 Helikopter

Flyvningen med systemet monteret på helikopter blev udført i september 2014 over Øresund fra Roskilde Lufthavn med en to-motors Airbus Helicopters AS355NP. Som ved droneflyvningen blev sensordata, positions- og flyvedata opsamlet via telemetrisystemet, samt AIS-data fra den anvendte AIS-modtager.

På grund af downwash fra helikopterens rotor [17], sammenholdt med detektionsgrænserne på de anvendte sensorer, er det nødvendigt at flyve relativt tæt bagved de skibe, der skal undersøges, for at kunne opnå tilstrækkelige gode målinger (Billede 29). Det skal dog understreges, at flyvningerne ikke foretages ind over skibene; men i alle tilfælde i behørig sikkerhedsafstand. I tilfælde af direkte medvind måles skibene ikke, da det eller vil kræve at skibet overflyves.

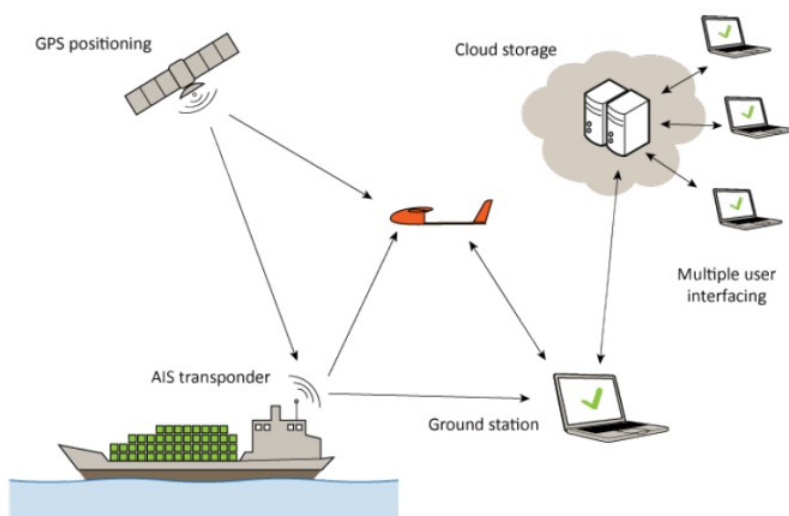
Da flyvningerne foregik i lav højde over vand, blev der desuden af sikkerhedshensyn medbragt bl.a. redningsflåde og monteret floats, der oppustes i tilfælde af eks. motorhavari. Af andre sikkerhedsforanstaltninger blev der foretaget arbejdsmiljømålinger i kabinen for at sikre at grænseværdier for SO₂ og NO₂ samt PM blev overholdt.

På en times flyvning blev samtlige transitskibe sejlene i Øresund målt.

Et eksempel på flyvemønster med helikopter i Øresund ses på Billede 30.

3.5 Software

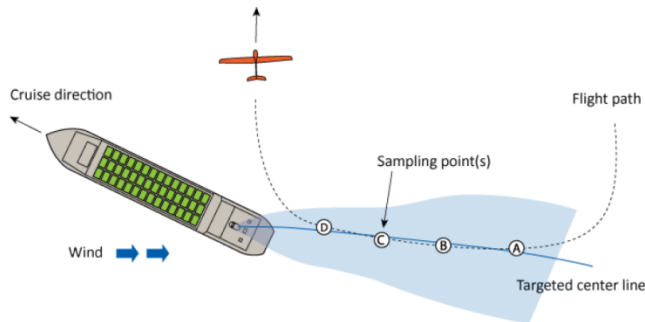
Til projektet er der blevet udviklet to software-applikationer; "Project Sense"-værktøjet til brug under inspektionen til simulering af flyveruter og lokal dataopsamling og "Exaqt"-cloudplatformen til central dataopsamling, kvalitetssikring, analyse og rapportering (Billede 7). Begge er udviklet til at køre på Microsoft Windows-plattformen.



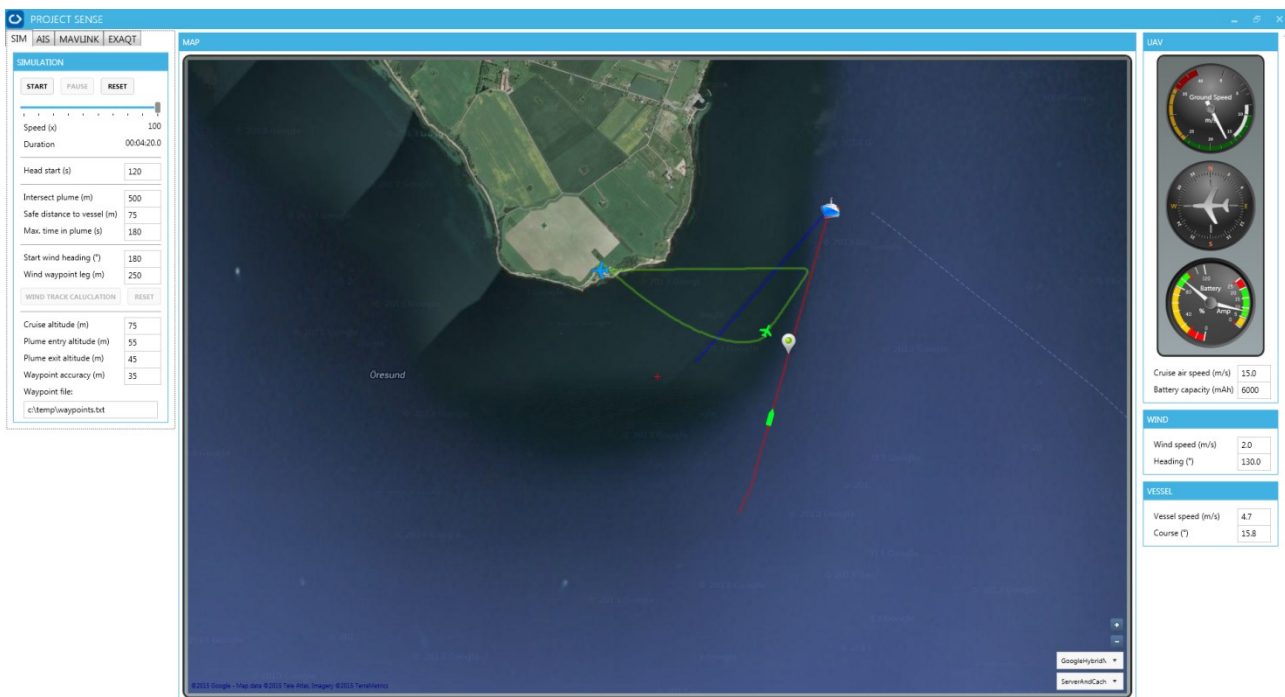
BILLEDE 7
PROJECT SENSE – GROUND STATION SOFTWARE SAMT EXAQT CLOUD PLATFORMET

3.5.1 Project Sense – Ground station software

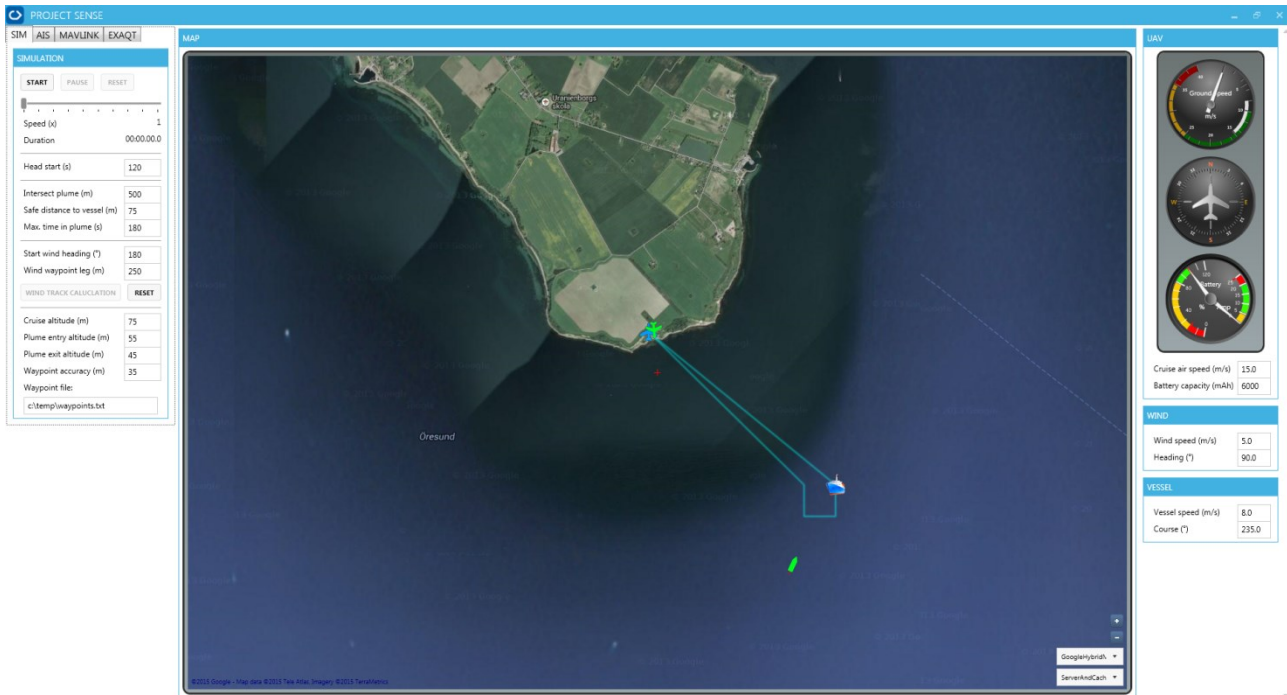
”Project Sense” ground station-softwaren benyttes af operatøren under flyvningen og indeholder a) funktionalitet til simulering af flyvningen (Billede 8 og Billede 9) ud fra lokale vindforhold (enten beregnet vha. UAV'en (Billede 10) eller onlineopslag til maritim vejrudsigt), b) røgfanens udbredelse samt c) opsamling af AIS-data fra skibstrafikken. Desuden foretages opsamling af d) Mavlink-data [18] (Billede 11) fra autopilotsystemet, som også indeholder gassensordataen. Alle data gemmes lokalt og overføres til den centrale Exaq-cloudplatform i realtid, eller når systemet bliver tilkoblet Internettet.



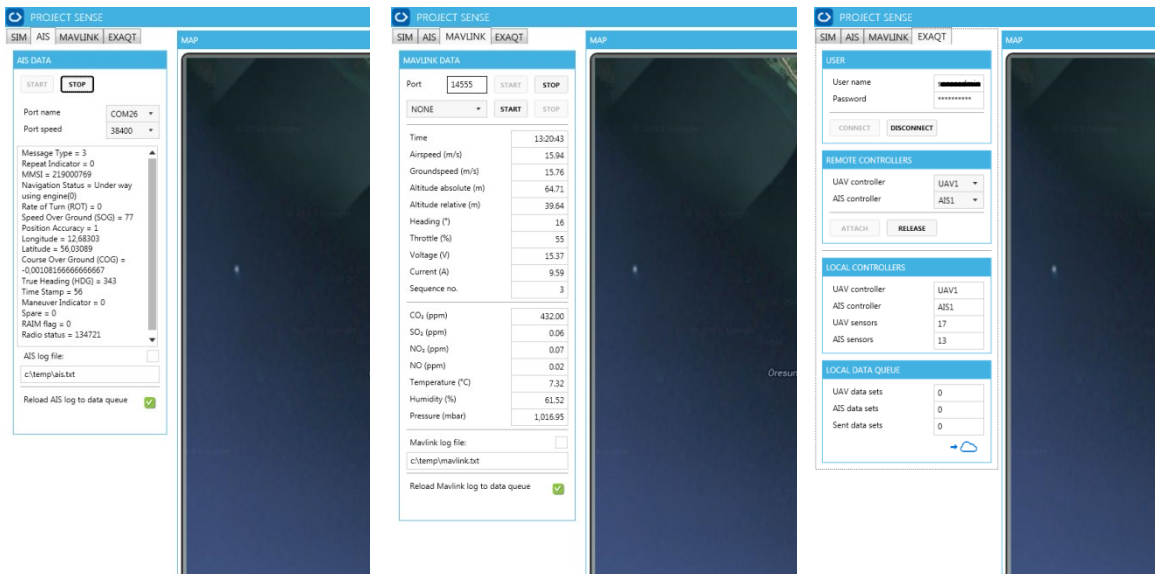
BILLEDE 8
BEREGNING AF FLYVERUTE UDFRA SKIBSDATA OG VINDFORHOLD



BILLEDE 9
SIMULERING AF FLYVERUTE



BILLEDE 10
VINDMÅLING



BILLEDE 11
DATAOPSAMLING AF AIS-DATA, DRONEDATA (MAVLINK) SAMT FORBINDELSE TIL EXAQT CLOUD PLATFORM

3.5.2 Exaqt – Cloud-baseret dataopsamlingssoftware

Til opbevaring, analyse og rapportering af data anvendes den egenudviklede cloud-platform Exaqt, der er tilpasset med moduler specifikt for Project Sense til analyse af svovlindholdet og tilknytningen til skibenes AIS-data.

Platformen er bygget på en ren service-arkitektur på Microsoft Azure cloud-platformen med Azure SQL som database-backend og WPF-frontend.

Data udvælges fra en træstruktur i kombination med et givent tidsinterval. Strukturen supporterer data fra mange samtidige enheder (droner og/eller helikoptere) og placeringer. De udvalgte data visualiseres herefter i en tabel (Billede 12) eller på en graf.

Til analyse af data benyttes eks. CO₂-grafen til manuelt at udvælge de perioder, hvor man befinder sig i røgfanen (Billede 13).

Herefter vælges "Map"-fanebladet med et kort over flyverute og skibsroute for det valgte interval og systemet udvælger automatisk det skib, som dronen eller helikopteren foretog målingerne på (defineret som det skib nærmest målepunktet) (Billede 14). Som en del af kvalitetssikringsproceduren er det muligt manuelt at udvælge et andet skib som udgangspunktet i stedet for det systemet har valgt.

Derefter vælges "Analysis"-fanebladet og systemet beregner automatisk svovlprocenten ud fra SO₂/CO₂ forholdet i røgfanen (korrigeret for NO₂) i det angivne tidsinterval. Svovlprocenten bestemmes ud fra arealet mellem de udglattede kurver og baselinjerne.

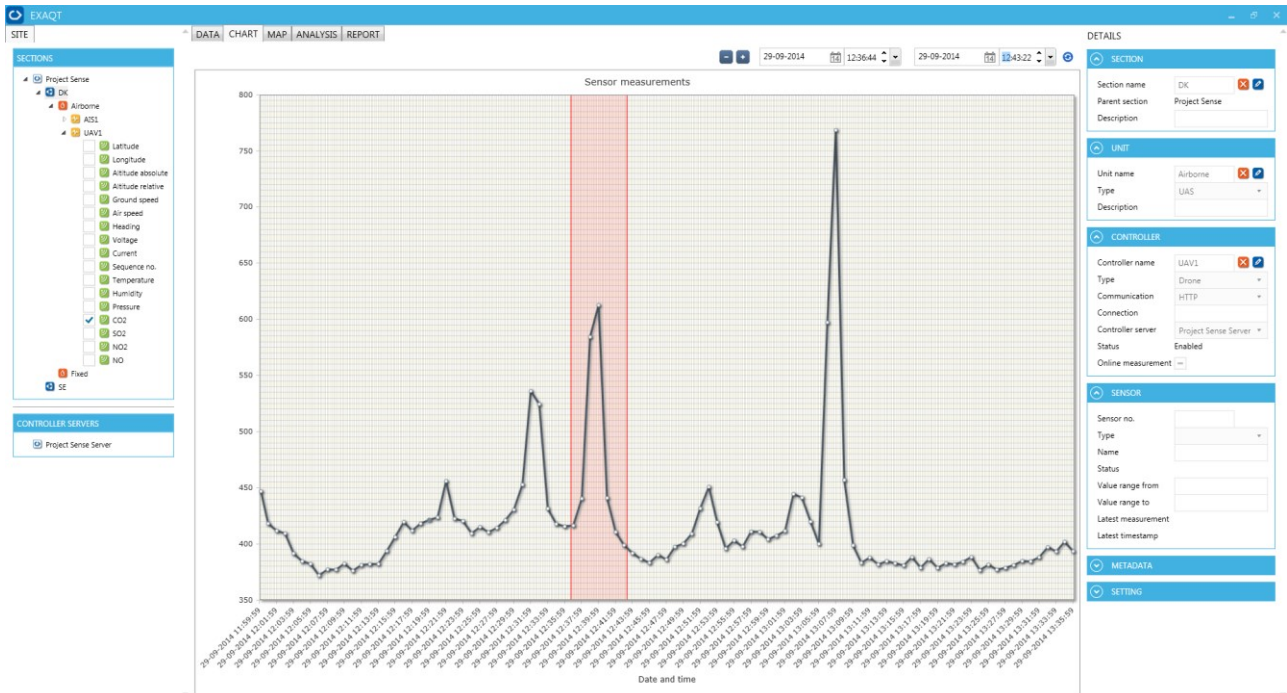
De automatisk beregnede baselinjer kan manuelt ændres som en del af kvalitetssikringsproceduren (Billede 15).

Når man har været hele processen igennem, hvor et skib er udvalgt med MMSI-kode, og der er beregnet en tilknyttet svovlprocent, er det muligt at generere en PDF-rapport over alle data tilknyttet inspektionen (Billede 16).

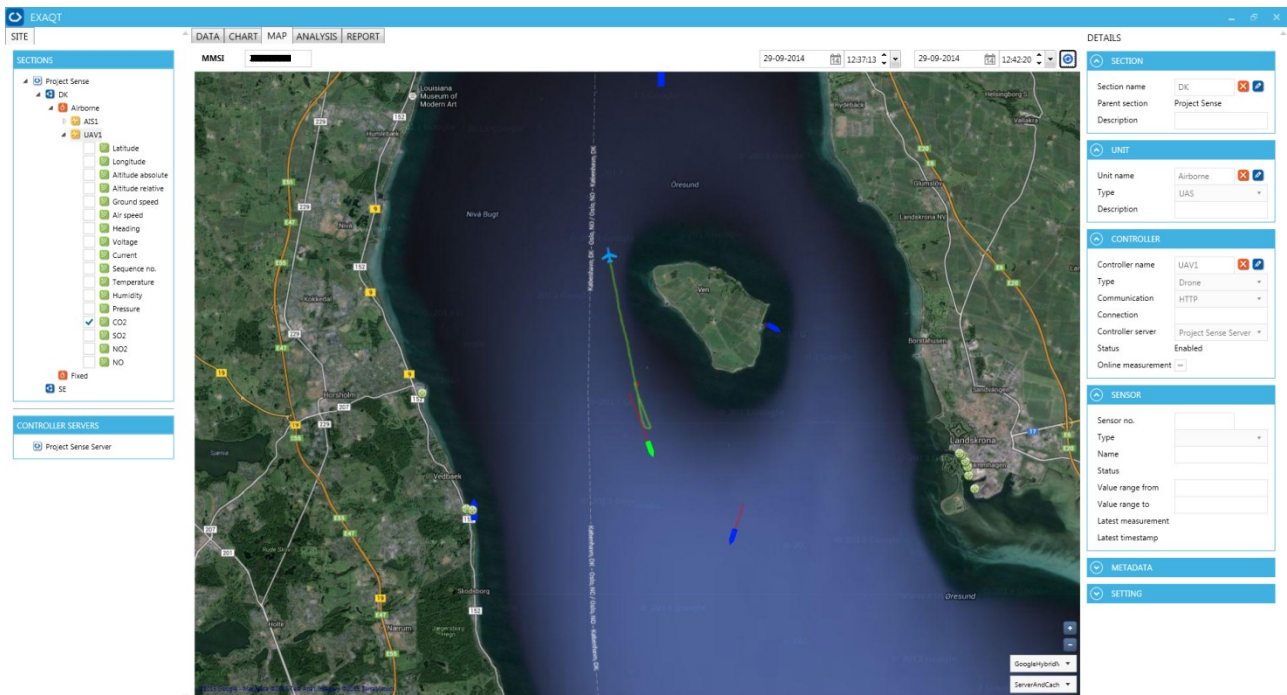
Data fra denne rapport (inkl. kvalitetsparametre) danner data- og dokumentationsgrundlag til et fremtidigt system til afrapportering til myndighederne (Billede 17).

TIMESTAMP	CO2	SO2	NO2	NO	TEMPERATURE	HUMIDITY	PRESSURE
120009 29-09-2014	446.8367	-0.2435	0.0170	0.0344	20.9768	60.2242	0.0000
120100 29-09-2014	418.1250	-0.2300	0.0111	-0.0497	21.1476	59.9901	0.0000
120201 29-09-2014	411.6383	-0.2320	0.0139	0.0186	21.2911	60.1275	0.0000
120300 29-09-2014	409.2766	-0.2357	-0.0044	-0.0337	21.3363	58.7099	0.0000
120400 29-09-2014	391.4681	-0.2285	-0.0256	0.0219	21.2742	54.4822	0.0000
120501 29-09-2014	384.4255	-0.2360	0.0082	-0.0025	21.1243	54.8822	0.0000
120600 29-09-2014	382.1875	-0.2264	-0.0145	-0.0434	20.9136	53.9928	0.0000
120700 29-09-2014	371.8542	-0.2357	0.0034	-0.0573	20.6761	54.0904	0.0000
120801 29-09-2014	377.2340	-0.2296	0.0002	-0.0074	20.4297	53.9372	0.0000
120901 29-09-2014	377.0435	-0.2454	0.0049	0.0171	20.1898	54.3336	0.0000
121000 29-09-2014	382.3830	-0.2402	0.0017	-0.0817	19.9662	54.5005	0.0000
121100 29-09-2014	376.0213	-0.2451	0.0049	-0.0308	19.7558	54.7946	0.0000
121200 29-09-2014	381.1633	-0.2538	0.0257	-0.0101	19.5515	56.7652	0.0000
121300 29-09-2014	381.9574	-0.2434	0.0200	-0.0202	19.3820	58.6815	0.0000
121401 29-09-2014	393.0638	-0.2443	0.0233	-0.0249	19.2225	59.7030	0.0000
121500 29-09-2014	393.6383	-0.2567	0.0332	-0.0188	19.1584	61.0619	0.0000
121600 29-09-2014	406.6833	-0.2532	0.0345	0.0026	19.0725	62.6553	0.0000
121701 29-09-2014	419.1111	-0.2546	0.0252	0.0069	18.9671	62.8256	0.0000
121800 29-09-2014	411.7021	-0.2511	0.0280	-0.0077	18.9120	62.7811	0.0000
121900 29-09-2014	418.0833	-0.2654	0.0368	0.0056	18.9080	62.8368	0.0000
122001 29-09-2014	421.3191	-0.2730	0.0464	0.0185	18.9754	64.3516	0.0000
122100 29-09-2014	423.5208	-0.2608	0.0529	-0.0268	18.9925	65.0429	0.0000
122200 29-09-2014	455.9167	-0.2707	0.0446	0.0892	19.0548	64.6132	0.0000
122300 29-09-2014	422.4375	-0.2554	0.0330	0.0089	19.1049	63.5977	0.0000
122400 29-09-2014	420.3750	-0.2479	0.0318	-0.0209	19.1357	64.2120	0.0000
122501 29-09-2014	409.2292	-0.2503	0.0310	-0.0045	19.1216	64.5183	0.0000
122600 29-09-2014	415.0426	-0.2531	0.0268	0.0258	19.1180	64.8836	0.0000
122700 29-09-2014	410.3878	-0.2528	0.0272	0.0119	19.0549	64.3866	0.0000
122800 29-09-2014	414.2340	-0.2488	0.0285	0.0180	19.0258	64.5389	0.0000
122900 29-09-2014	421.1042	-0.2532	0.0256	-0.0045	19.0535	64.4128	0.0000
123000 29-09-2014	430.3750	-0.2740	0.0420	0.1629	19.0937	64.1660	0.0000
123101 29-09-2014	452.7708	-0.3052	0.0701	0.4200	19.1438	64.3505	0.0000
123200 29-09-2014	536.1915	-0.3219	0.0956	0.7787	19.2059	64.5357	0.0000
123300 29-09-2014	524.3958	-0.3031	0.0759	0.5939	19.3084	64.3669	0.0000
123400 29-09-2014	431.3958	-0.2407	0.0346	0.0438	19.4128	64.7119	0.0000
123500 29-09-2014	417.6250	-0.2444	0.0304	0.0528	19.4572	64.4947	0.0000

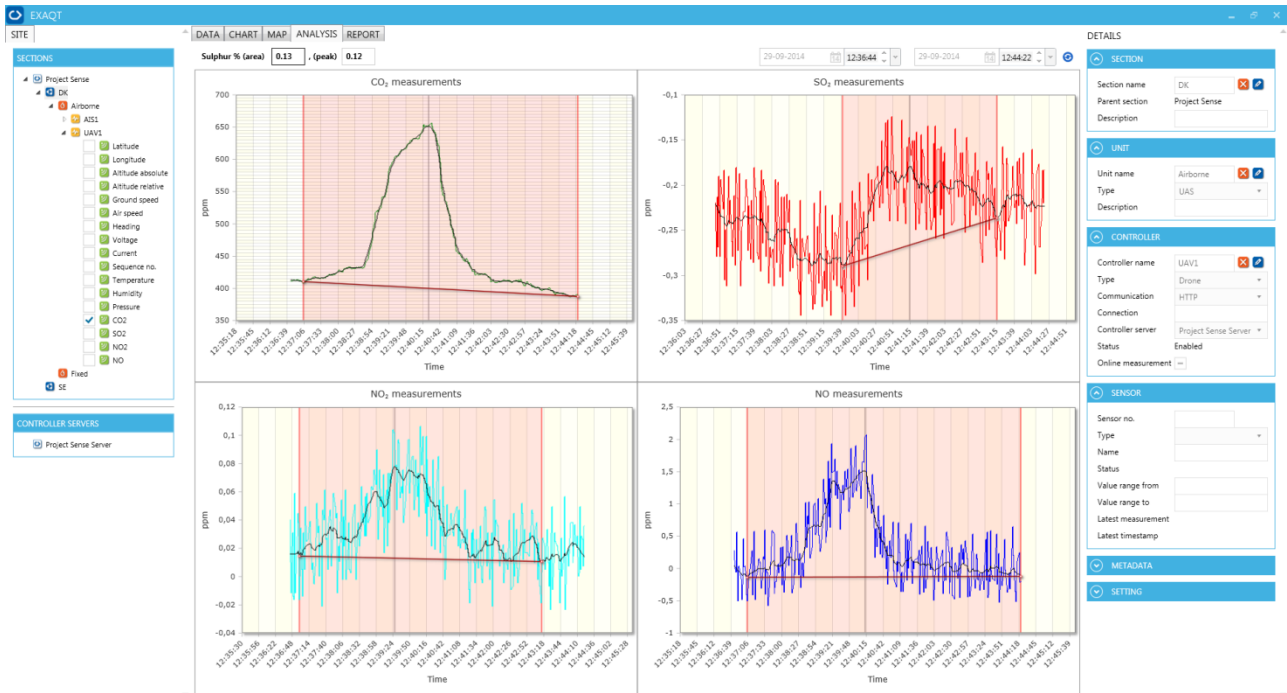
BILLEDE 12
DATAUDVÆLGELSE OG EKSPORT



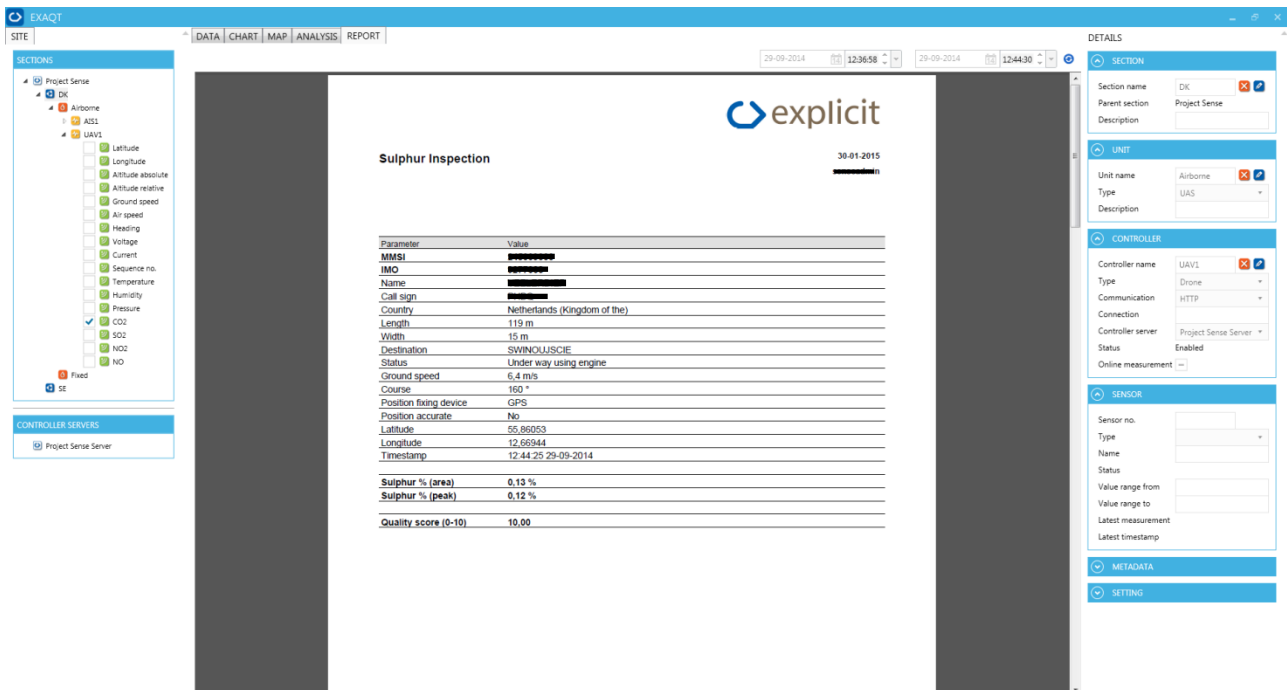
BILLEDE 13
PERIODEUDVÆLGELSE




BILLEDE 14
MAP FANEBLAD OG VALG AF SKIB



BILLEDE 15
ANALYSIS FANEBLAD, BEREGNING AF SVOVLPROCENT OG BASELINJER

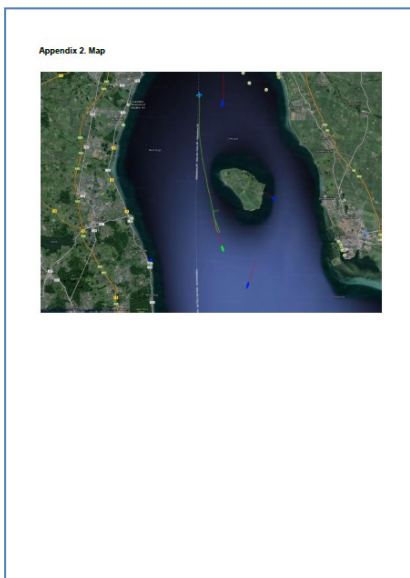
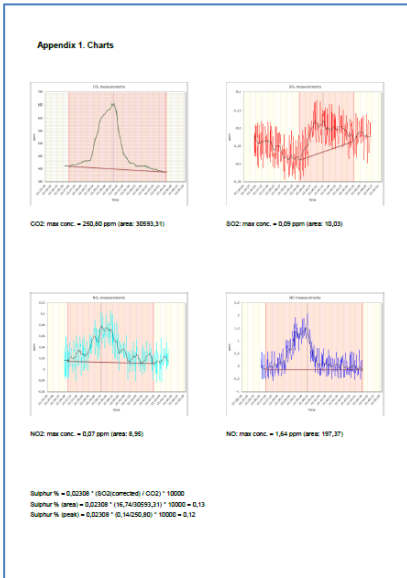


BILLEDE 16
REPORT FANEBLAD

 20-01-2015
sensauden

Sulphur Inspection

Parameter	Value
MMSI	██████████
IMO	██████████
Name	██████████
Call sign	██████████
Country	Netherlands (Kingdom of the)
Length	119.00
Width	15.00
Destination	0000000000000000
Status	Unknown area, active, active
Ground speed	0.4 m/s
Course	195.0°
Position, fix, device	2PT3
Position accuracy	5m
Latitude	55.90053
Longitude	12.89044
Timestamp	12-04-25 20:00:2014
Sulphur % (area)	0.13 %
Sulphur % (peak)	0.13 %
Quality score (0-10)	10.00



BILLEDE 17
PDF-RAPPORT, GRUNDOPLYSNINGER, ANALYSEDATA SAMT KORTMATERIALE

4. Referencer

1. Eurostat - Maritime transport - Vessel traffic – Quarterly report, 14-03-2013.
2. Centre for Energy, Environment & Health, CEEH Scientific Report 3, Assessment of Health-Cost Externalities of Air Pollution at the National Level using the EVA model, 2011, ISSN 1904-7495.
3. IMO MEPC 2009 Guidelines for Exhaust Gas Cleaning Systems.
4. <http://www.alphasense.com/index.php/products/sulfur-dioxide-air/>
5. <http://www.senseair.se/products/oem-modules/k30-fr/>
6. <http://www.alphasense.com/index.php/products/nitrogen-air/>
7. Luftforurening (1994), Red.: Fenger, J. og Tjell, J.C. Polyteknisk forlag.
8. <http://store.3drobotics.com/products/3DR-Aero>
9. <https://pixhawk.org/modules/pixhawk>
10. <https://pixhawk.ethz.ch/overview>
11. http://soefartsstyrelsen.dk/ais/Sider/AIS_forside.aspx
12. <http://www.digitalyachtamerica.com/index.php/en/products/ais-systems/ais-receivers/product/40-uais-receiver>
13. <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/airpw.html>
14. <http://www.trafikstyrelsen.dk/~media/Dokumenter/05%20Luftfart/bl/bestemmelser%20bl94.ashx>
15. TSFS 2009:88, Transportstyrelsens Föreskrifter om UAS
16. TSFF 2013:27, Föreskrifter om ändring i Föreskrifter om (UAS)
17. <http://en.wikipedia.org/wiki/Downwash>
18. <http://en.wikipedia.org/wiki/MAVLink>

Bilag 1 Beregnede koncentrationer i centerlinjen af røgfanen fra skibe

Afstand fra skorsten (z=0; vindhast = 4,5 m/s)	MGO (0,1 % S)							HFO (2,7 % S)					
	CO2 (baggrund)	SO2	CO2 (kilde)	CO2 (baggrund + kilde)	NO2	NO	Ratio (r)	SO2	CO2 (kilde)	CO2 (baggrund + kilde)	NO2	NO	Ratio (r)
	meter	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm	SO2(ppm)/CO2(vol-%)	ppm	ppm	ppm	ppm	ppm
50	400	0,57	2.677	3.077	4,8	42,9	2,1	32,76	2.809	3.209	5,04	45,37	116,6
100	400	0,14	666	1.066	1,2	10,7	2,1	8,15	699	1.099	1,25	11,29	116,6
250	400	0,02	105	505	0,2	1,7	2,1	1,28	110	510	0,20	1,78	116,6
500	400	0,01	26	426	0,0	0,4	2,1	0,31	27	427	0,05	0,43	116,6

BEREGNEDE KONCENTRATIONER AF CO₂, SO₂ OG NO₂ I RØGFANEN FOR HHV. 0,1 % SVOVL OG 2,7 % SVOVL I FUELOLIEN SOM FUNKTION AF AFSTANDEN FRA SKORSTENEN

Beregnete koncentrationer i centerlinjen af røgfanen fra skibe, der anvender hhv. lavt (MGO) og højt (HFO) svovlindhold. Motorbetingelser: High Speed Diesel. Emissionsfaktorer for 0,1 % S er beregnet ud fra emissionsfaktor for 0,5 % S under antagelse af, at emissionen reduceres direkte proportionalt med svovlindholdet. Ratioet mellem SO₂ og CO₂ er beregnet som anvist i Tabel 1, dvs. den målte CO₂ (kilde) er her omregnet fra ppm til vol-%.

Der er ved beregning af koncentrationerne anvendt en simpel Gaussisk spredningsmodel som vist i denne formel:

$$c(x,y,z) = \frac{Q}{2 \pi u \sigma_y \sigma_z} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2} e^{-\frac{1}{2} \left(\frac{z}{\sigma_z} \right)^2}$$

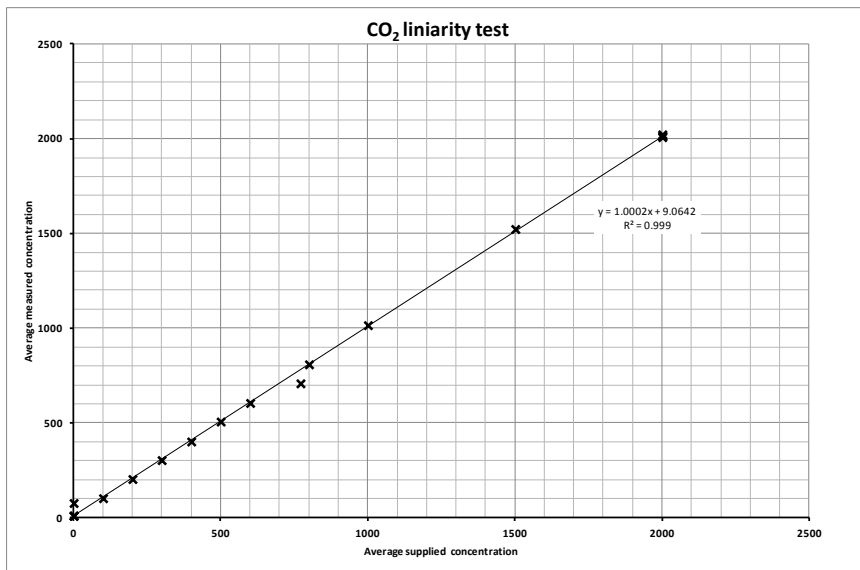
Hvor Q er kildestyrken, u er vindhastigheden, δy og δz er spredningsparametrene – standardafvigelseerne i den Gaussiske fordeling i henholdsvis den horisontale og den vertikale retning – som er funktioner af afstanden X i nedstrømsretning. Skibets skorsten er placeret i (0,0,0) i et koordinatsystem med x-aksen i vindens retning.

Bilag 2 Sensorproducentdata

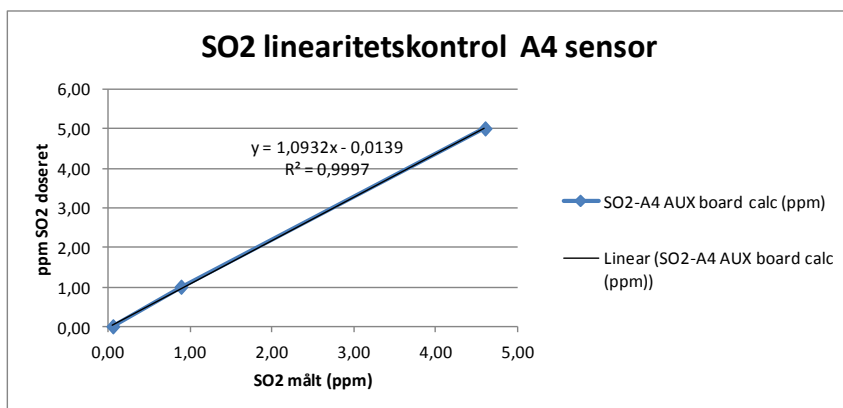
Sensortype	Produktkode	Måleområde	Responstid (t ₉₀)	Detektionsgrænse
CO ₂	K30 FR5 (SenseAir)	0-5000 ppm	< 2 s	
SO ₂	SO2-A44 (Alphasense)	0-50 ppm	(2 ppm) < 20 s	0,03 ppm
NO ₂	NO2-A46 (Alphasense)	0-20 ppm	(2 ppm) < 30 s	0,07 ppm

TABEL 2
SENSOR PRODUCENT DATA

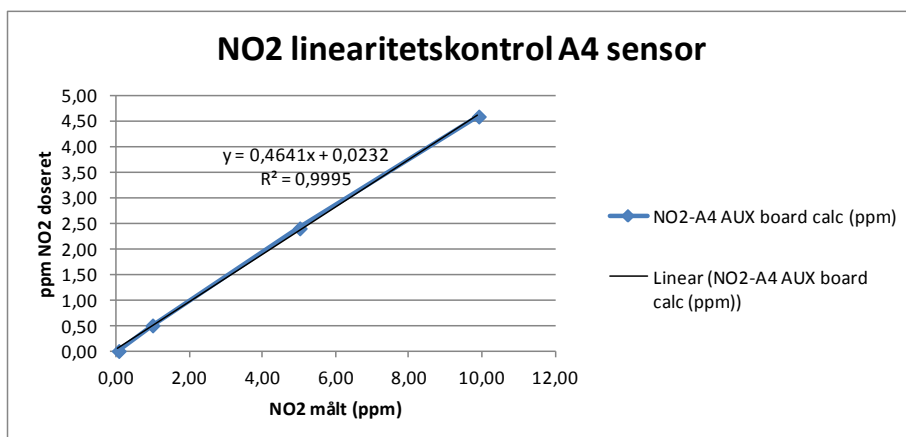
Bilag 3 Sensorlinearitet



BILLEDE 18
CO₂ LINEARITET

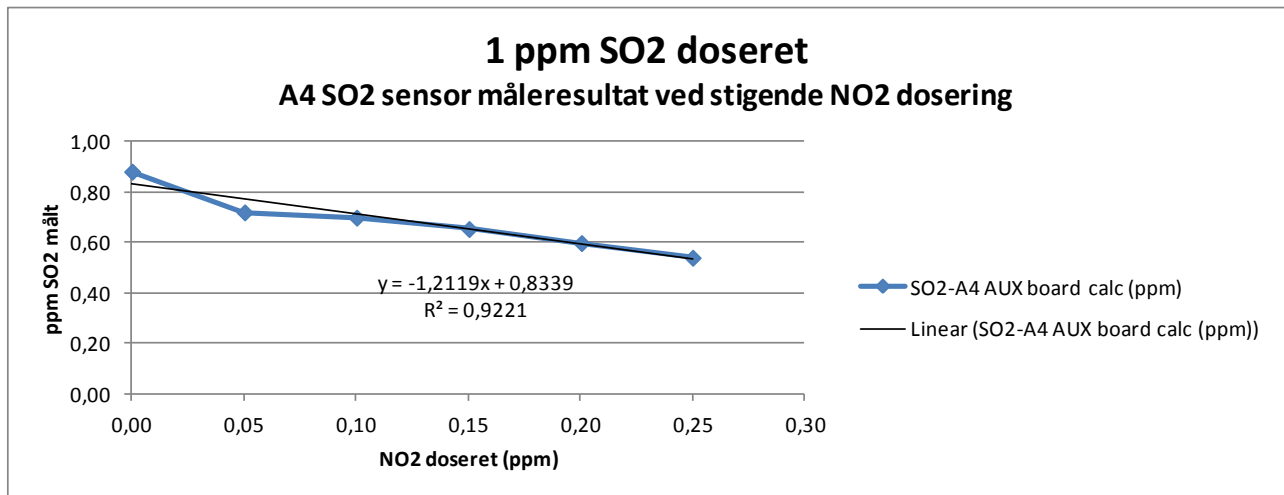


BILLEDE 19
SO₂ LINEARITET

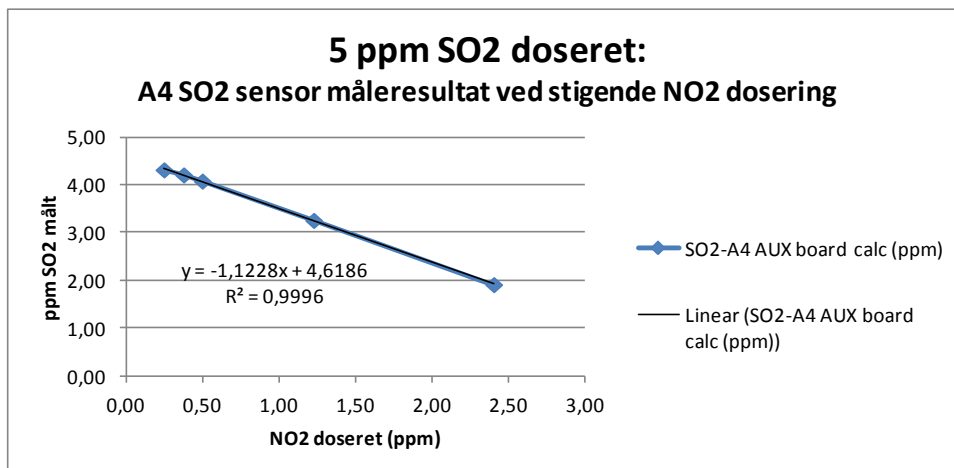


BILLEDE 20
NO₂ LINEARITET

Bilag 4 Sensorkrydsinterferens

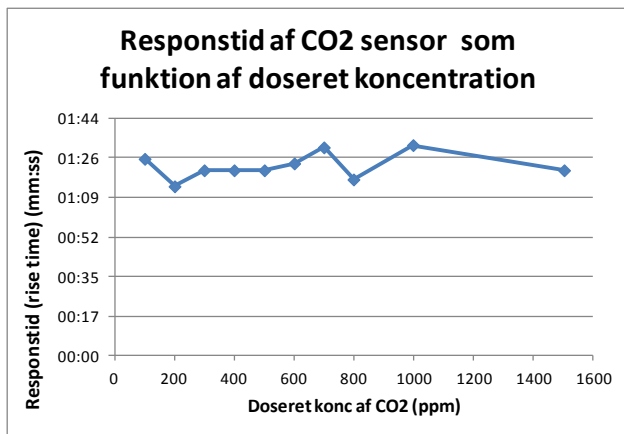


BILLEDE 21
MÅLTE RESULTATER AF SO₂ VED DOSERING AF 1 PPM SO₂ UNDER STIGENDE NO₂ KONCENTRATIONER.

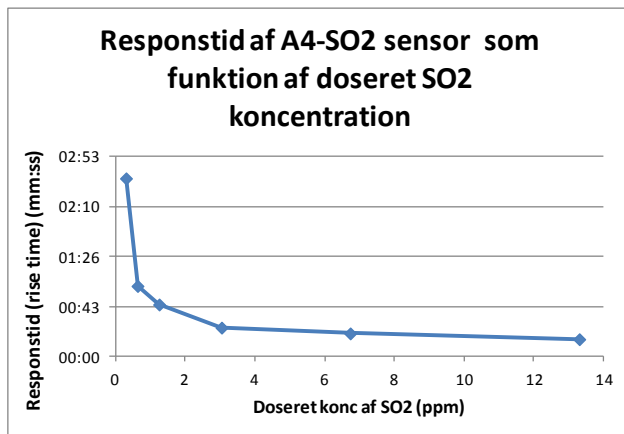


BILLEDE 22
MÅLTE RESULTATER AF SO₂ VED DOSERING AF 5 PPM SO₂ UNDER STIGENDE NO₂ KONCENTRATIONER.

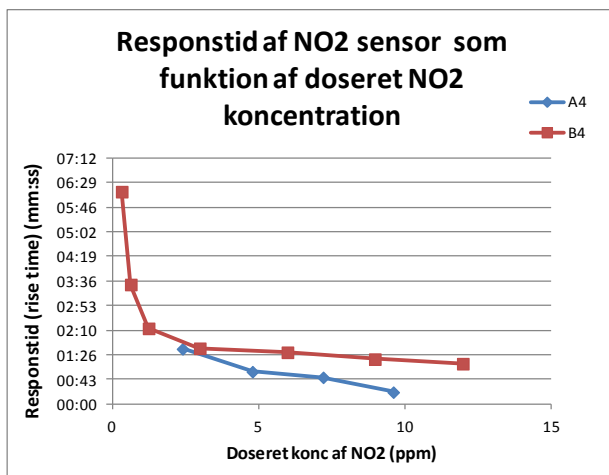
Bilag 5 Sensorresponstid



BILLEDE 23
CO2 SENSOR RESPONSTID

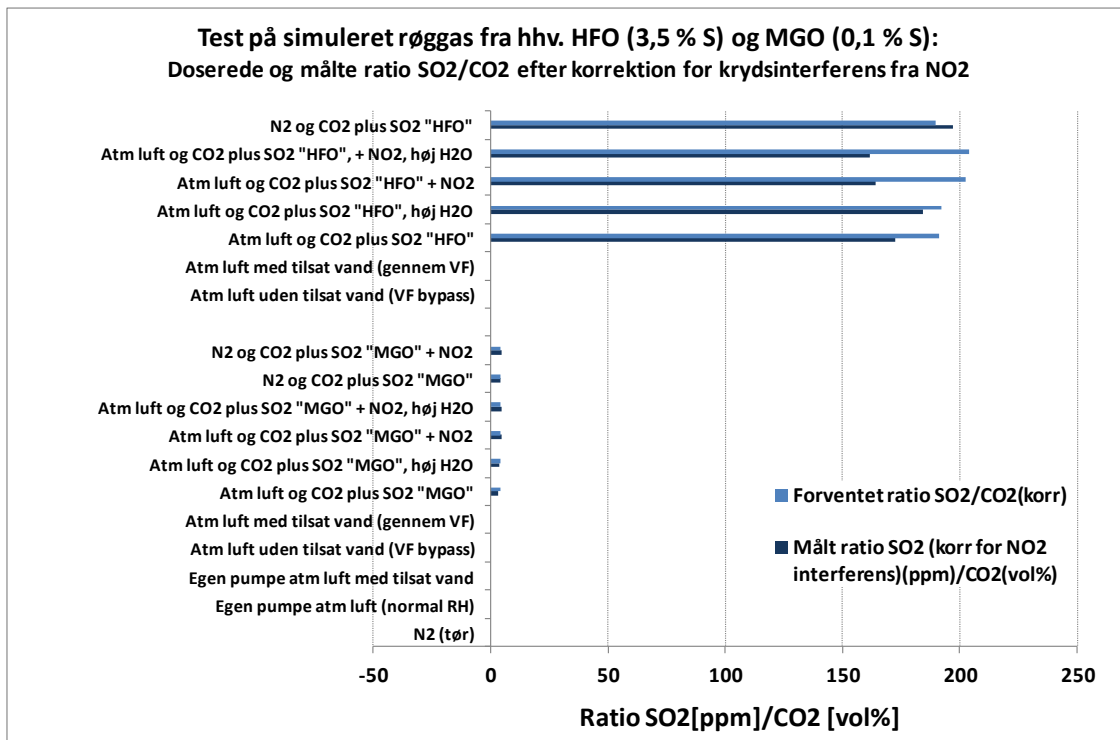


BILLEDE 24
SO2 SENSOR RESPONSTID



BILLEDE 25
NO2 SENSOR RESPONSTID

Bilag 6 Målt- og forventet ratio

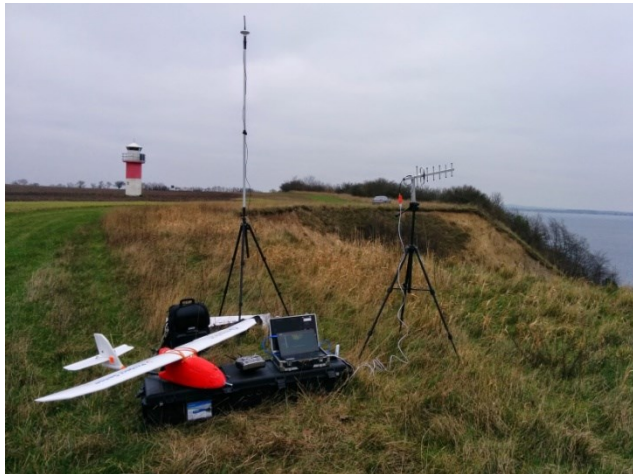


BILLEDE 26
RESULTATER AF TEST PÅ SIMULERET HFO/MGO RØGGAS: MÅLT RATIO MELLEM SO₂ OG CO₂. SO₂ ER HER KORRIGERET FOR KRYDSINTERFERENS FRA NO₂

Bilag 7 Flyvninger



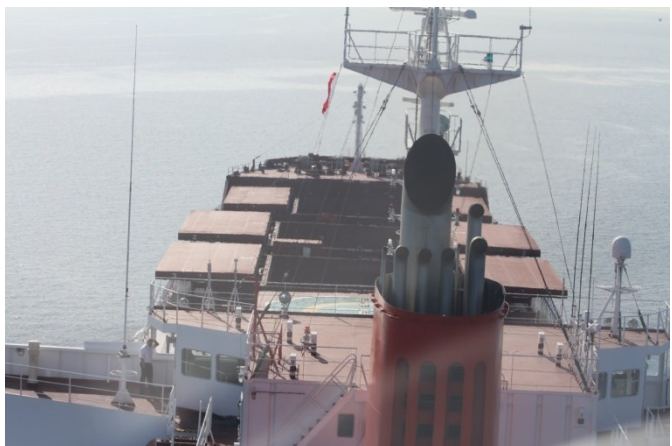
BILLEDE 27
FLYVNING I KALUNDBORG FJORD FRA RØSNÆS

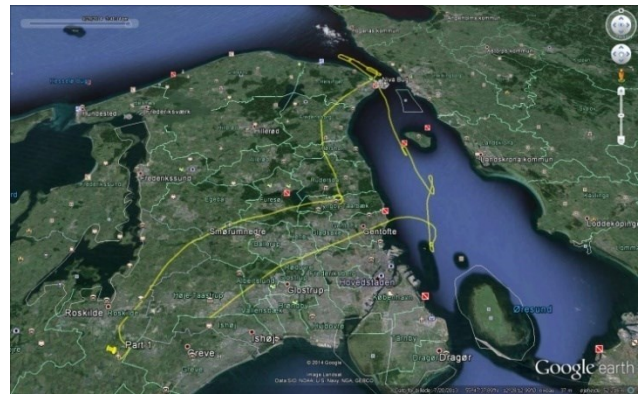
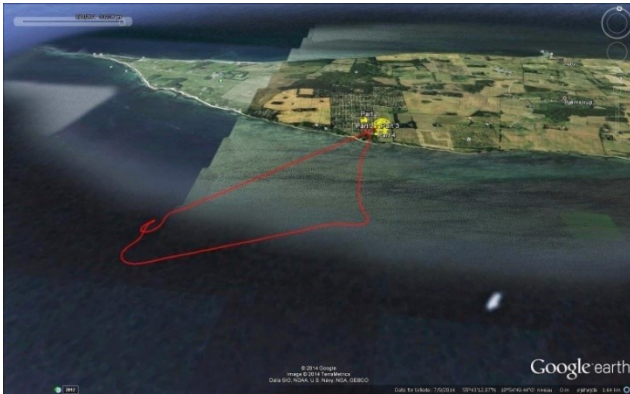


BILLEDE 28
FLYVNING I ØRESUND FRA VEN



BILLEDE 29
HELIKOPTER FLYVNING I ØRESUND FRA ROSKILDE





BILLEDE 30
GOOGLE EARTH TRACKS FRA FLYVNING MED DRONE OVER KALUNDBORG FJORD OG MED HELIKOPTER OVER ØRESUND

 The screenshot displays the EXAQT software interface. On the left, a 'SECTIONS' tree shows a hierarchy: Project Sense > DK > Airborne > A2S1 > UAV1. A list of sensor parameters is visible, including Latitude, Longitude, Altitude, Ground speed, Air speed, Heading, Voltage, Current, Sequence no., Temperature, Humidity, Pressure, CO2, SO2, NO2, and NO. The main map area shows a satellite view of the Øresund region with a green flight track and a red line. A tooltip for an MMSI (MIMO) shows the following data:

MMSI:	246000000
Country:	Cyprus (Republic of)
Status:	Under way using engine
Ground speed:	7.9 m/s
Course:	14 °
Heading:	13 °
Position accurate:	No
Latitude:	55.89902
Longitude:	12.73735
Timestamp:	13:49:30 03-12-2014

 On the right, a 'DETAILS' panel provides configuration for the 'SECTION' (DK), 'UNIT' (Airborne), 'CONTROLLER' (UAV1), and 'SENSOR' (CO2 concentration).

BILLEDE 31
FLYVNING MED DRONE OVER ØRESUND UD FRA VEN



BILLEDE 32
PROJECT SENSE

Overvågning og tilsyn med svovlemissioner fra skibstrafik ved hjælp af droneteknologi

Et system til overvågning af svovlemission fra skibe med droner og helikopter er blevet udviklet og afprøvet.

Projektet viste at det med eksisterende kosteffektive sensorer er muligt at skelne mellem skibe, der sejler på 0,1 %, 1 % og 3 % svovl i fuelolien ved flyvning og måling i skibenes røgfaner.



**Miljø- og
Fødevareministeriet**
Miljøstyrelsen

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

www.mst.dk