



Miljø- og Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Måling af NO_x- udledninger fra skibstrafikken ved hjælp af droneteknologi

Miljøprojekt nr. 1834, 2016

Titel:

Måling af NO_x-udledninger fra skibstrafikken ved hjælp af droneteknologi

Redaktion:

Jon Knudsen, Explicit

Udgiver:

Miljøstyrelsen
Strandgade 29
1401 København K
www.mst.dk

Foto:

Explicit

Illustration:

Explicit

År:

2016

ISBN nr.

978-87-93435-39-1

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	6
2. Summary and Conclusion	7
2.1 Background	7
2.2 Purpose.....	7
2.3 Conclusion.....	8
3. Projekt	9
3.1 Sensorer - verifikation og brugbarhed	9
3.1.1 Vurdering af målesikkerhed	11
3.2 Drone.....	13
3.3 Helikopter	14
3.4 Udviklet software	14
3.5 Målinger	16
4. Referencer	17
Bilag 1 Beregnede koncentrationer i centerlinjen af røgfanen fra skibe	18
Bilag 2 Sensorproducentdata	19
Bilag 3 Sensorlinearitet	20
Bilag 4 Sensorresponstid	22
Bilag 5 Krydsinterferens	23
Bilag 6 Sensortemperaturafhængighed	24

Forord

I forbindelse med Miljøstyrelsens "MUDP 2014" program, i kategorien "Renere luft", blev der i september 2014 givet tilsagn til projektet "Måling af NO_x-udledninger fra skibstrafikken ved hjælp af droneteknologi".

Følgegruppen består af deltagere fra Miljøstyrelsen, Danmarks Rederiforening, Søfartsstyrelsen, Trafikstyrelsen samt UAS Danmark. Projektet er gennemført af Explicit i samarbejde med FORCE Technology.

Jon Knudsen, Explicit
Kgs. Lyngby

1. Konklusion og sammenfatning

1.1 Baggrund

I april 2014 vedtog FN's internationale søfartsorganisation, IMO, at stramme reglerne for NO_x-udledningen fra skibe. Fra og med den 1. januar 2016 skal skibe, som er bygget på/efter denne dato, og som sejler inden for de allerede udlagte NO_x Emission Control Areas (NECAs) eller fremtidige NECA-områder, reducerer deres udledning af kvælstofoxider (NO_x) i overensstemmelse med Tier III-udledningsgrænserne fastsat af IMO [1]. De nye grænser svarer til cirka en 75 % reduktion i kvælstofudledningen sammenlignet med non-NECA sejlads.

I øjeblikket eksisterer der kun et enkelt NECA-område ud for det nordamerikanske kontinent (inkl. Karibien), men det forventes, at reglerne inden for overskuelig fremtid også vil komme til at gælde det nordeuropæiske SECA-område.

Udledningen af kvælstofoxider (NO_x) er en væsentlig forureningskilde fra den internationale skibsfart. Sammen med svovldioxid (SO₂) skønnes disse forureningskilder fra skibstrafikken årligt at koste Europa ca. 450 mio. kr. i helbredsrelaterede omkostninger svarende til 10 % af de samlede helbredsomkostninger som følger af luftforurening [2]. Dertil kommer den belastning, som opstår som følge af eutrofiering ved deponering af kvælstof. Indførelsen af de skærpede miljøkrav har imidlertid også skabt et betydeligt økonomisk incitament for non-compliance, da brændstofomkostningerne for skibene ved at overholde de nye regler er væsentligt højere end før de nye grænser. Det gælder både for svovl og kvælstof. Hermed bliver den største enkeltstående trussel mod effekten af de nye miljøregler gennemførelsen af et effektivt tilsyn med skibenes emissioner. Uden et effektivt tilsyn kan skibe, som ikke overholder bestemmelserne, ikke identificeres og eventuelt sanktioneres.

Det er imidlertid en udfordring for de nationale myndigheder at gennemføre effektiv overvågning og tilsyn med skibenes emissioner, da ingen teknologier indtil videre har muliggjort prøvetagning i skala inden for en overskuelig økonomisk ramme. Det betyder, at man reelt kun i meget begrænset omfang ved, om de enkelte skibe overholder udledningsreglerne for kvælstofoxider.

1.2 Formål

Projektet har til formål at udvikle en teknologisk løsning, som muliggør effektiv overvågning af NO_x-udledningen fra 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 på NO_x-området.

Fastsættelsen af, hvorvidt skibene overholder Tier III-standarderne, vil tage udgangspunkt i bestemmelse af forholdet mellem NO_x (NO+NO₂) og CO₂ i røgfanen.

Kernen i projektets tilgang er at benytte allerede eksisterende, prisbillige - 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 software-plattform 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 datalager, hvorfra de videreanalyseres.

Projektets fokus er at udvikle dels hardware (drone og sensorsystem), beregningsmodel og softwareplatform til prototypestadiet, hvor systemet er modent til brugertest i skala og videre kommercialisering.

Projektet vil muliggøre et effektivt tilsyn med NO_x-udledningen og dermed tilbyde et attraktivt alternativ til håndhævelsen af de nye IMO-regler på området.

1.3 Konklusion

Det kan konkluderes, at det ved hjælp af små og relativt billige sensorer, kan fastsættes hvorvidt skibene overholder Tier III-standarderne, ved at tage udgangspunkt i bestemmelse af forholdet mellem NO_x (NO+NO₂) og CO₂ i røgfanen.

Den valgte drone og dens udstyr fungerede ligeledes efter hensigten, og det kan konkluderes, at selv dette relative billige udstyr har en så god kvalitet, at det sagtens kan anvendes til denne type opgaver.

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 indsnævre 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 andre luftbårne overvågningsløsninger - f.eks. helikoptere.

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

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 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 flyvemønster. De må derfor på kort sigt - indtil dronerne kan få det fornødne flyverum - anses som en attraktiv luftbåren platform. I det efterfølgende vil begge løsninger derfor blive beskrevet.

2. Summary and Conclusion

2.1 Background

In April 2014, the UN International Maritime Organization (IMO) decided to tighten the rules for NO_x emissions from ships. From 1 January 2016 ships that are built on/after this date, and are operating within the already designated NO_x Emission Control Areas (NECAs), or future NECAs, must reduce their emissions of nitrogen oxides (NO_x) to comply with Tier III emission limits set by the IMO [1]. The new limits correspond to about 75% reduction in nitrogen discharge compared to non-NECA sailing.

Currently there exists only a single NECA-area off the North American continent (incl. The Caribbean), but it is expected that the rules in the foreseeable future will also become applicable to the Northern European SECA area.

Emissions of nitrogen oxides (NO_x) are a major source of pollution from international shipping. Together with sulfur dioxide (SO₂), this air pollution from shipping is estimated to cost Europe about 450 million. kr. p.a. in health-related costs, amounting to 10% of total health costs related to air pollution [2]. In addition, there is also the load caused by eutrophication by deposition of nitrogen. The introduction of stricter environmental requirements have also created a significant financial incentive for non-compliance within the shipping industry as cost of compliant operation is considerably higher than non-compliant behavior. This applies to both sulfur and nitrogen. The single biggest threat to the impact of the new environmental rules thus becomes the lack of efficient monitoring of ships' emissions. Without efficient monitoring vessels that do not comply cannot be appropriately identified and possibly penalized.

However, the efficient monitoring of ship emissions represents a considerable challenge for the national enforcement authorities, as no technologies so far have allowed sampling of these in scale within a reasonable budget. Consequently, there is currently very limited knowledge on whether ships comply with the emissions regulations for nitrogen oxides.

2.2 Purpose

The project aims to develop a solution that enables efficient monitoring of NO_x emissions from international shipping using affordable drone technology, existing cost-efficient sensor components and analysis software, that in conjunction with the ships' AIS data make it possible to generate valid documentation for the use of enforcement of the IMO regulations on NO_x.

The determination of whether the ships comply with the Tier III standards will be based on a calculation of the ratio between NO_x (NO + NO₂) and CO₂ in the plume.

The core of the project approach is to use existing, inexpensive - but reliable - electronics and sensor components, combined with simple drone airframes that can be easily operated from land or marine vessels in a "ready-to-fly" solution, that together with a proprietary software platform makes it easy to collect, analyze and present emission results of measured gas concentrations. The drones fly autonomously via calculated flight routes based on GPS data from AIS and data on wind conditions. Sensor data are collected and delivered in real time via radio link to a central data warehouse from where they are analyzed.

The project's focus is to develop hardware (drone and sensor system), analysis and software platform to a prototype stage, from which the system is ready for user testing in scale and further commercialization.

The project will allow efficient monitoring of NO_x emissions and thus offer an attractive alternative to the enforcement of the new IMO-regulations.

2.3 Conclusion

It can be concluded, that even using small and relatively inexpensive sensors it is possible to determine whether the vessels conform to the Tier III standards by calculating the ratio of NO_x (NO + NO₂) and CO₂ in the exhaust plume.

The selected drone and electronics also worked flawlessly, and it can be concluded that even this relatively inexpensive equipment has sufficient quality that it can easily be used for this kind of task.

The big challenge with the drones is currently not technical in nature but regulatory, since the drones currently have extremely limited airspace restricting their range considerably. And herein lies the main conclusion. Before it becomes legal to fly "beyond visual line of sight" (BVLOS), it is difficult to use the drones as an operational alternative to other airborne technologies, e.g. helicopters.

As a derived result of the drone project, the system has therefore also been developed for testing on helicopters. This was not included in the original project specification but testing of the sensors fitted on helicopters showed such great advantages, that it should be highlighted as an independent derived solution.

The helicopters are flown manually; they can stay a long time in each plume; they can fly freely and are only limited in the scope of their fuel capacity; further there are several suitable machines that can carry the equipment almost anywhere. The helicopters also have a relatively high inspection capacity in relation to e.g. planes thanks to their very efficient flight pattern. They are therefore in the short term - until the drones can get the necessary airspace - to be considered a strong alternative. Consequently, in the following both solutions will be described.

3. Projekt

3.1 Sensorer - verifikation og brugbarhed

For at bestemme, om skibene overholder Tier-III standarderne, bestemmes NO_x-emissionsfaktoren ud fra forholdet mellem NO_x (NO+NO₂) og CO₂ i skibets røgfane ved hjælp af denne formel (hvor 'e' er skibsmotorens brændstoffeffektivitet i g/kWh) [3]:

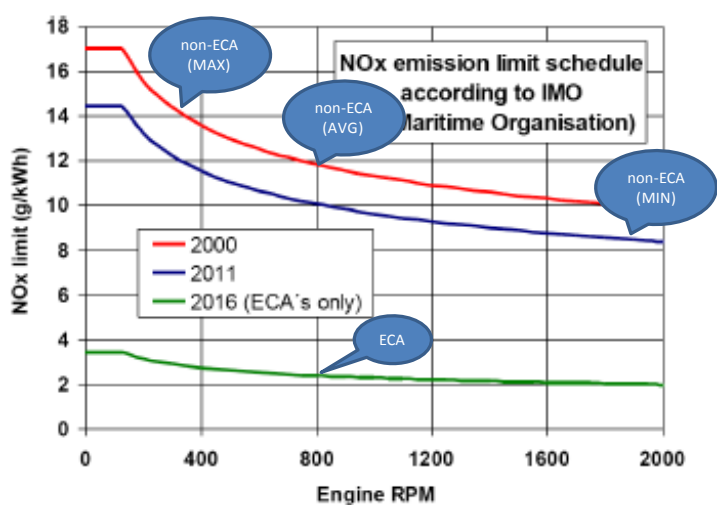
$$NOx \text{ emissionsfaktor } (g \frac{NOx}{kWh}) = \frac{NOx_{m\ddot{a}lt} [ppm]}{(CO2_{m\ddot{a}lt} - CO2_{baggrund})[ppm]} \cdot 3,33 * e$$

FIGUR 1. FORMEL TIL BESTEMMELSE AF NO_x-EMISSIONSFAKTOR [3]

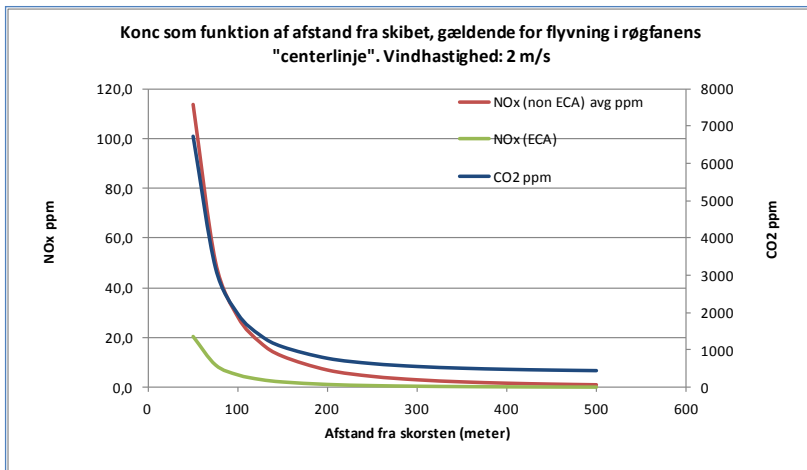
Udover brændstoffeffektiviteten skal der også tages højde for motoromdrejningerne ved bestemmelse af overholdelse af Tier standarderne, se Tabel 1 og Billede 2.

Tier	Skibs-konstruktion	n < 130	n = 720	n > 2000
	dato	g/kWh	g/kWh	g/kWh
I	1. januar 2000	17,0	12,1	9,8
II	1. januar 2011	14,4	9,7	7,7
III (ECA)	1. januar 2016	3,4	2,4	2,0

TABEL 1
NO_x EMISSIONSGRÆNSEVÆRDI SOM FUNKTION AF TIER OG MOTOROMDREJNINGER (N) [10].

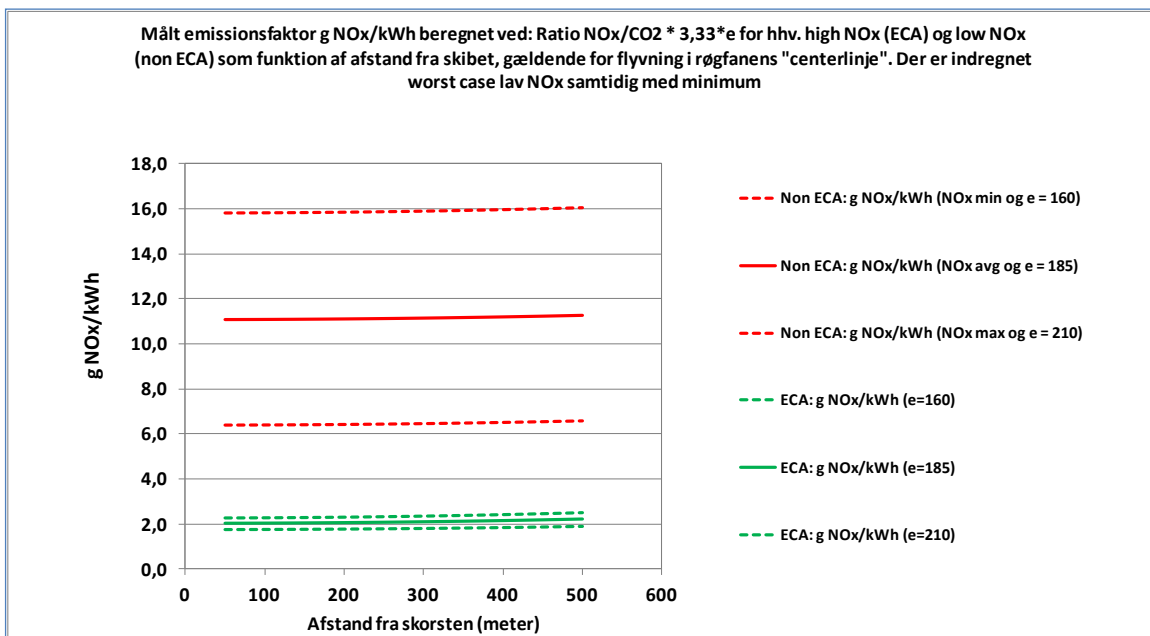


BILLEDE 2
GRAF OVER NO_x EMISSIONSGRÆNSEVÆRDI, SOM I TABEL 1 SOM FUNKTION AF TIER OG MOTOROMDREJNINGER (N) [10].



BILLEDE 3

NO_x KONCENTRATION SOM FUNKTION AF AFSTAND FRA SKORSTENEN VED FLYVNING I RØGFANENS CENTERLINJE VED 2M/S VINDHASTIGHED, VIST UD FRA DATA I TABEL 4.



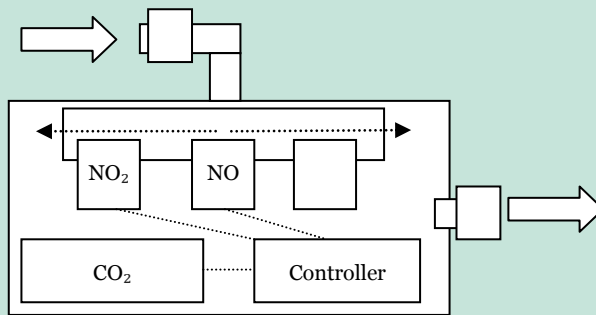
BILLEDE 4

BEREGNET EMISSIONSFATOR G NO_x/KWH FOR HENHOLDSVIS NON-ECA OMRÅDE OG ECA OMRÅDE. RATIO FOR NON ECA OG ECA ER BEREGNET PÅ BASIS AF DATA I TABEL 4.

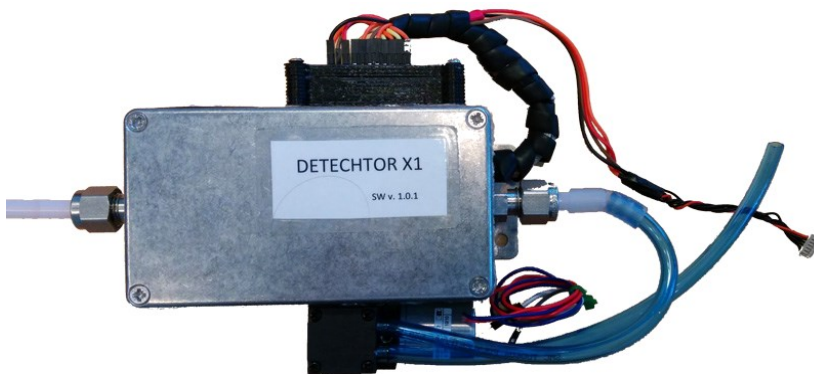
Som det ses på Billede 3 og Billede 4 er der rigelig stor forskel på emissionsfaktoren i hhv. non-ECA og ECA-områder til at bestemme om standarderne er overholdt eller ej, selv i rimelig afstand fra skorstenen og selvom man tager højde for motoromdrejninger og variationen i brændstoffeffektiviteten (e), som typisk ligger mellem 160 g/kWh og 210 g/kWh [3].

Projektet har til beregning af NO_x -indholdet valgt elektrokemiske sensorer til måling af NO₂ (Alphasense NO₂-A4 [13]) og NO (Alphasense NO-A4 [14]) og en infrarød sensor (NDIR) til måling af CO₂ (SenseAir CO₂ K30FR [12]). Opsætningen er illustreret i Billede 5.

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 6).



BILLEDE 5
OPBYGNING AF NO_x SENSORBOKS



BILLEDE 6
DETECHTOR NO_x SENSORBOKS

Brugbarheden af sensorerne, specielt målingerne af følsomhedsområde (Bilag 2), linearitet (Bilag 3), responstid (Bilag 4), krydsinterferens (Bilag 5) samt temperaturafhængighed (Bilag 6), er verificeret gennem laborietest. På baggrund af testene kan det konkluderes, at disse sensorer er brugbare til måling af NO_x og CO₂ i skibenes røgfaner under driftforhold.

3.1.1 Vurdering af måleusikkerhed

Usikkerhedsbudgettet opstilles i henhold til den samlede beregningsformel for ratiomålingen af NO_x-emissionsfaktoren.

Der er i forbindelse med laborietesten ikke fundet interferens fra SO₂ på hverken NO eller NO₂-sensorerne, og Figur 1 indeholder derfor ingen korrektioner af målesignalerne fra disse sensorer.

Usikkerheden på ratioen er her vurderet ved opstilling af et usikkerhedsbudget [4] fra Figur 1. Den tilfældige fejl er i forbindelse med gentagne laborietests på identiske gassammensætninger (test af repetérbarhed) typisk fundet at være $\leq 10\%$ RSD. Usikkerheden er i det nedenstående usikkerhedsbudget konservativt sat noget højere for at inkludere evt. uforudsete påvirkninger under feltmåling (bl.a. tryk og temperatursvingninger).

Tabel 2 viser en oversigt over vurderede måleusikkerheder på de enkelte sensorer, udtrykt ved den relative standardafvigelse (RSD). Der er her regnet med, at koncentrationerne af såvel NO, NO₂ som CO₂ i store træk er uafhængige af svovlindholdet i fuelolien. De i Tabel 2 viste koncentrationer er de forventede, målte koncentrationer i røgfanen i en afstand fra skorstenen på ca. 100 meter.

Måle-parameter	Vurderet måle-usikkerhed RSD (%), 66% konfidens- interval	Målt koncentration	s (absolut) 66% konfidens- interval	2s (absolut) 95% konfidens- interval
NO	15%	25 ppm	± 3,75 ppm	± 7,5 ppm
NO ₂	25%	2,8	± 0,70 ppm	± 1,40 ppm
CO ₂ (målt)	10%	0,200 vol-%	± 0,020 vol-%	± 0,040 vol-%
CO ₂ (baggr.)	10%	0,040 vol-%	0,004 vol-%	0,008 vol-%

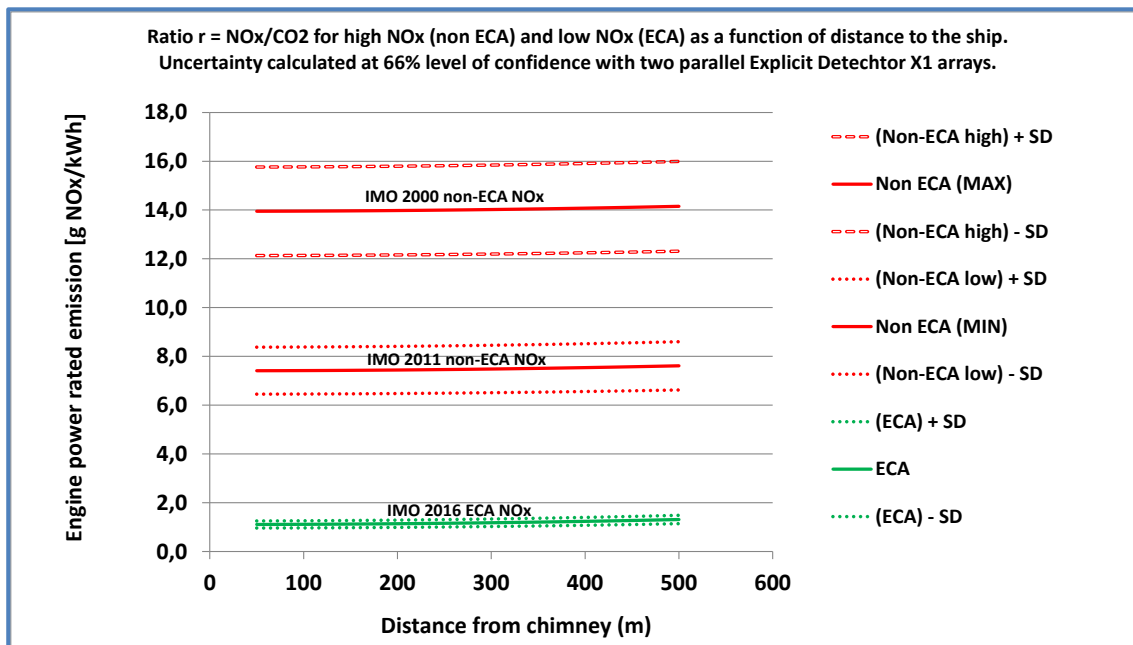
TABEL 2
MÅLEUSIKKERHEDER PÅ DE ENKELTE SENSORER VED HENHOLDSVIS 66% OG 95% KONFIDENSINTERVAL

Tabel 3 viser den relative usikkerhed på ratioet ved måling af NO_x og CO₂ med de anvendte sensorer og i de koncentrationsniveauer, der er vist i Tabel 2. Ved anvendelse af to parallelle sensor arrays, hvor resultatet beregnes som middelværdien af måleresultaterne fra de to sensor arrays, vil usikkerheden reduceres med $\sqrt{2}$, som vist i tabellens nederste række.

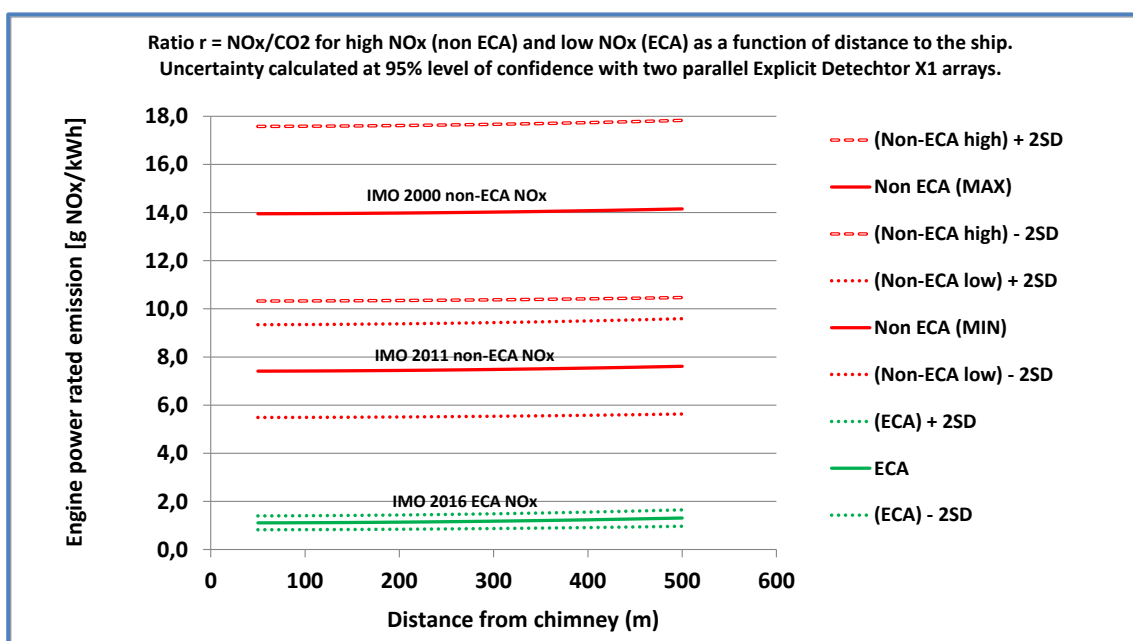
Beregnet parameter	Absolut usikkerhed	RSD (%), 66% konfidensinterval	2RSD (%), 95% konfidensinterval
$U(\text{NO}_x) = \sqrt{s_{\text{NO}}^2 + s_{\text{NO}_2}^2}$	$\sqrt{3,75^2 + 0,70^2} =$ 3,81 ppm	$\frac{3,8}{(25+2,8)} \cdot 100 = 13,7\%$	27,4%
$U(\text{CO}_2(\text{korr.})) =$ $\sqrt{s_{\text{CO}_2(\text{tot})}^2 + s_{\text{CO}_2(\text{baggrund})}^2}$	$\sqrt{0,02^2 + 0,004^2} =$ 0,02 vol-%	$\frac{0,02}{(0,2-0,04)} \cdot 100\% = 12,7\%$	25,4%
U(NO _x /CO ₂ (korr.)) – et sensor array	-	$\sqrt{13,7^2 + 12,8^2} = 18,7\%$	37,4%
U(NO _x /CO ₂ (korr.)) – to parallelle sensor arrays	-	13,2%	26,4%

TABEL 3
BEREGNING AF DEN RELATIVE USIKKERHED PÅ RATIOEN VED MÅLING AF NO, NO₂ OG CO₂.

Den beregnede usikkerhed vil i praksis have en effekt på målingen som vist i Billede 7 og Billede 8. Her er forventede, målte ratioer for hhv. de højeste og laveste NO_x-emissioner i non-ECA områder beregnet jf. IMO's krav til NO_x-reduktioner jf. Tier I-II (røde kurver). Desuden er forventede, målte ratioer for NO_x emissioner i ECA-områder beregnet jf. IMO's krav til NO_x-reduktioner jf. Tier III (grøn kurver). De stiplede linjer viser den potentielle variation i måleresultatet for de givne Tier I-III emissioner jf. de beregnede usikkerheder for målingen.



BILLEDE 7
 BEREGNEDE NO_x EMISSIONER I G/KWH OG TILHØRENDE MÅLEUSIKKERHEDER, USIKKERHED MED 66% KONFIDENSINTERVAL

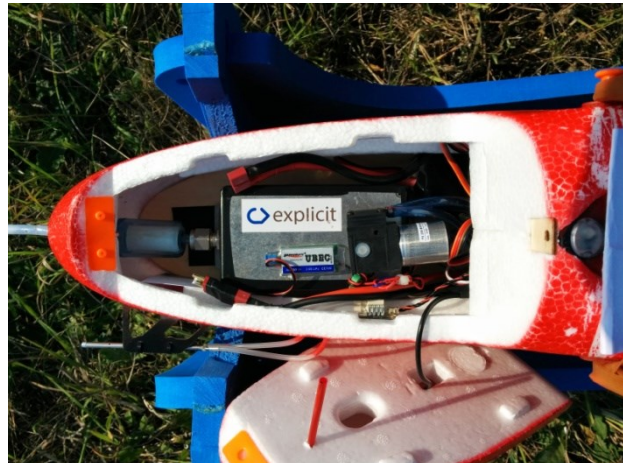


BILLEDE 8
 BEREGNEDE NO_x EMISSIONER I G/KWH OG TILHØRENDE MÅLEUSIKKERHEDER, USIKKERHED MED 95% KONFIDENSINTERVAL

Det konkluderes hermed, at måleusikkerheden for måling af ratio NO_x/CO_2 i røgfaner fra skibe er god nok til, at Tier III-skibe kan udpeges ved måling med det benyttede sensor array.

3.2 Drone

Til flyvningerne anvendtes en 3DRobotics Aero [5]. Denne model benytter open source-hardwaren Pixhawk og den tilhørende PX4 open source software [6]. Denne model har desuden den fordel, at den kan flyve relativt langsomt, helt ned til 8-10 m/s, og kan derfor ved optimale forhold opholde sig i røgfanen længe i samme afstand til skorstenen.

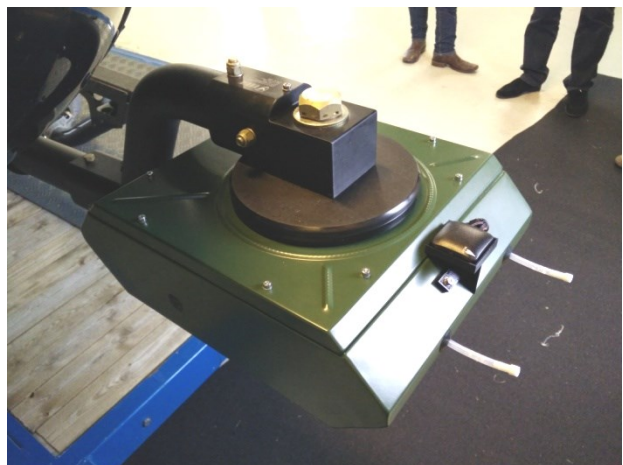


BILLEDE 9
DRONE MODEL 3DROBOTICS AERO, MONTERET MED NOX-SENSORBOKS.

Flyvninger blev foretaget fra den svenske ø Ven i Øresund i sommeren 2015, hvor det er muligt at nå skibstrafikken inden for visual-line-of-sight (VLOS), som er kravet ved droneoperationer.

3.3 Helikopter

Ved flyvning med helikopter blev det parallelle målesystem monteret i en snifferboks på en bærearmlast på en AS350 helikopter [7]. Fordelen ved den anvendte helikopter er, at den, udover bærearmlasten og snifferboksens placering, har en størrelse, hvor det er muligt at måle i røgfanen uden, at fanen bliver "ødelagt" af for meget downwash [8] fra rotoren.

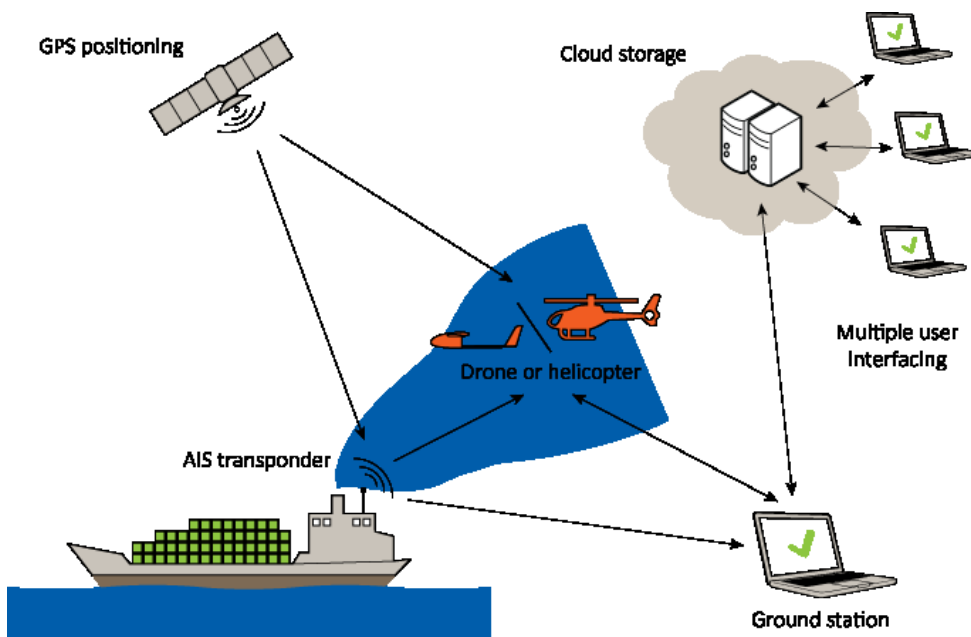


BILLEDE 10
MONTERING AF SNIFFERBOKS PÅ DEN ANVENDTE AS350 HELIKOPTER. DET REDUNDANTE PARALLELSYSTEM ER VIST HER.

Flyvninger blev foretaget ud fra Roskilde Lufthavn og målingerne blev foretaget i røgfaner fra skibe i Øresund.

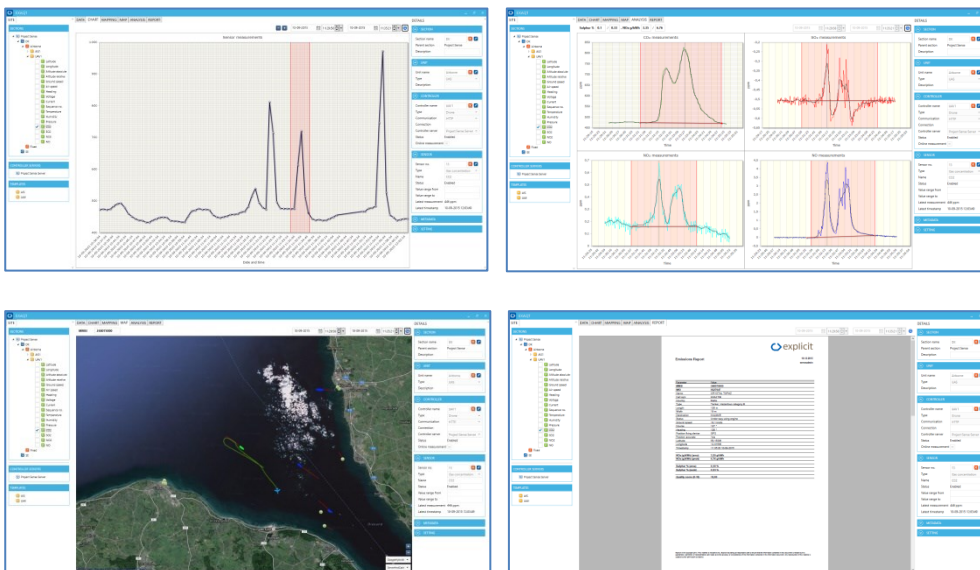
3.4 Udviklet software

Til at gemme, analysere og rapportere data er der udviklet to applikationer; en ground station applikation til lokal dataopsamling på jorden eller i helikopterkabinen, samt en central cloudbaseret analyse- og afrapporteringsapplikation.



BILLEDE 11
PROJECT SENSE – LOKAL SOFTWARE TIL AT OPSAMLE DATA (OG GUIDE DRONEN) OG VIDERESENDE TIL CLOUD PLATFORMEN

Analysesoftware (Exaqt) indeholder en simpel struktur, hvori man kan udvælge datasæt fra en ønsket tidsperiode, analysere gaskoncentrationerne for NO_x og CO₂ og generere rapporter for skibenes udledninger.



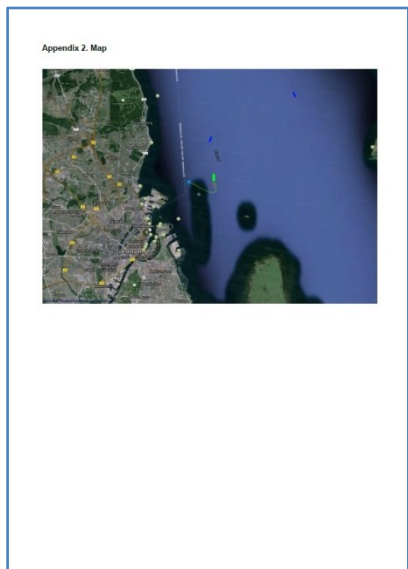
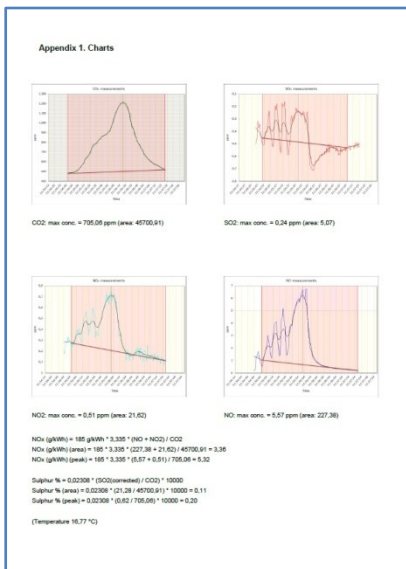
BILLEDE 12
EXAQT PLATFORMEN TIL OPBEVARING AF DATA, ANALYSE AF MÅLINGERNE OG PDF-AFRAPPORTERING

Explicit

Emissions Report 10-09-2015
sensadbin

Parameter	Value
IMR#	XXXXXXXXXX
IMO	XXXXXXXXXX
Name	XXXXXXXXXX
Call sign	XXXXXX
Country	Malaga, Subregion
Type	Cargo, all types of this type
Length	95 m
Width	14 m
Destination	ROTTERDAM
Stowage	Under deck, 600kg empty
Ground speed	15.7 knots
Course	285 °
Heading	1 °
Position, latitude	59° 22' 38"
Position, longitude	12° 08' 53"
Latitude	59.377222
Longitude	12.148056
Timestamp	11:57:27 10-09-2015
NOx (g/kWh) (prev)	3.50 g/kWh
NOx (g/kWh) (peak)	3.20 g/kWh
Sulphur % (prev)	0.11 %
Sulphur % (peak)	0.20 %
Quality score (0-100)	10.00

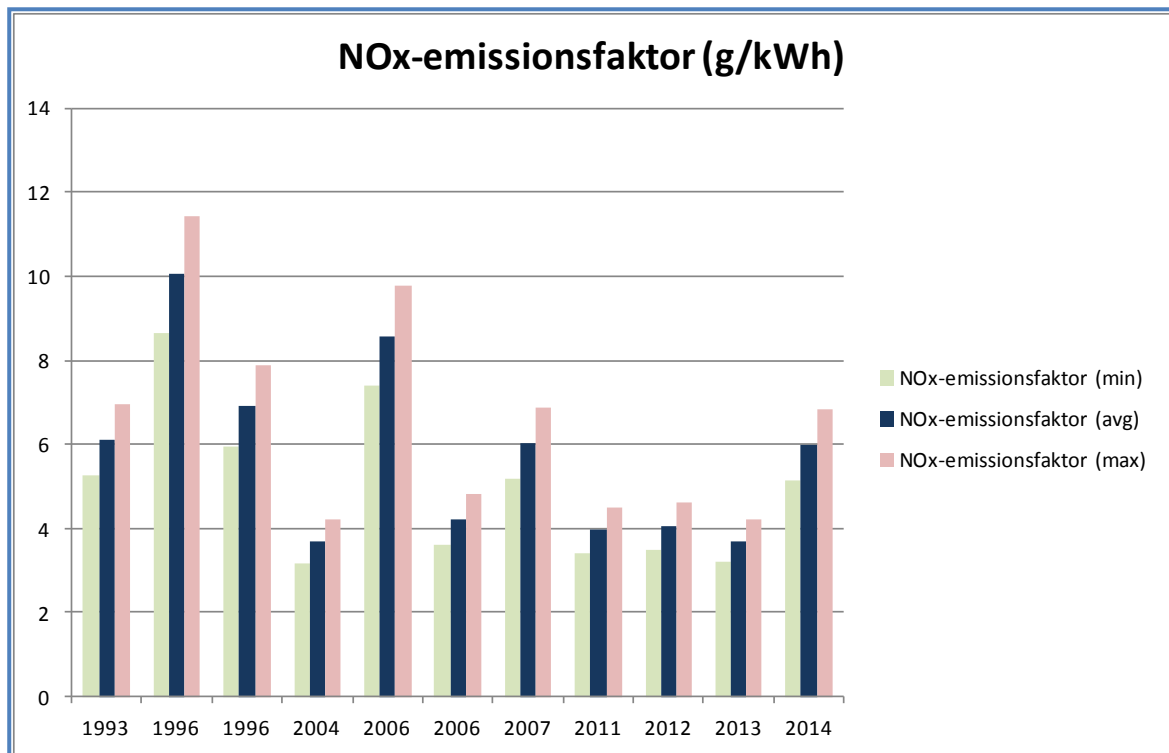
Report ID: 00000000. This report is intended for internal use. For more information or to request that the information contained in this document is made public, please contact the responsible person. The information is provided on an "as is" basis. The user of this information is responsible for its use.



BILLEDE 13
PDF-RAPPORT, SKIBS- OG MÅLEDATA, BAGGRUNDSANALYSE OG KORTMATERIALE

3.5 Målinger

Beregninger fra de første testflyvninger viser, at alle målte skibe som forventet har en NO_x emissionsfaktor over ECA-niveauet. Desuden findes en lille tendens til, at nyere skibe (<= 15 år), med enkelte undtagelser, har en lavere NO_x-udledning end de ældre skibe (>= 15 år). [Billede 14].



BILLEDE 14
BEREGNING AF NO_x-EMISSIONSFAKTOR SOM FUNKTION AF SKIBENES KONSTRUKTIONÅR.

4. Referencer

1. http://www.imo.org/MediaCentre/PressBriefings/Pages/10-MEPC-66-ends.aspx#.U4CnI_1_sfE
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. <http://www.atmos-meas-tech.net/7/2597/2014/amt-7-2597-2014.pdf>
4. Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement (1993), International Organization for Standardization, ISBN 92-67-10188-9
5. <http://store.3drobotics.com/products/3DR-Aero>
6. <https://pixhawk.ethz.ch/overview>
7. <http://airbushelicoptersinc.com/products/AS350-product.asp>
8. <http://en.wikipedia.org/wiki/Downwash>
9. Luftforurening (1994), Red.: Fenger, J. og Tjell, J.C. Polyteknisk forlag.
10. <http://www.imo.org/OurWork/Environment/PollutionPrevention/AirPollution/Pages/Nitrogen-oxides-%28NOx%29-%E2%80%93-Regulation-13.aspx>
11. <http://www.alphasense.com/index.php/products/sulfur-dioxide-air/>
12. <http://www.senseair.se/products/oem-modules/k30-fr/>
13. <http://www.alphasense.com/index.php/products/nitrogen-air/>
14. <http://www.alphasense.com/index.php/products/nitric-oxide-air/>

Bilag 1 Beregnede koncentrationer i centerlinjen af røgfanen fra skibe

Afstand fra skortsen (z=0; vindhast=2 m/s)	CO ₂ (kilde)	NO ₂ NON ECA	NO NON ECA	Ratio (r) NO ₂ /CO ₂ NON ECA	NO ₂ ECA	NO ECA	Ratio (r) NO ₂ /CO ₂ ECA
meter	ppm	ppm	ppm	(ppm/ppm) * 1.000	ppm	ppm	(ppm/ppm) * 1.000
50	6.321	11,4	102,1	17,95	2,1	18,5	3,25
100	1.572	2,8	25,4	17,96	0,5	4,6	3,36
250	248	0,5	4,0	18,02	0,1	0,7	3,36
500	61	0,1	1,0	18,27	0,0	0,2	3,58

TABEL 4
BEREGNEDE KONCENTRATIONER AF NO₂, NO OG CO₂ I RØGFANEN, SOM FUNKTION AF AFSTANDEN FRA SKORSTENEN (HFO 2,7% S I NON ECA OG ECA)

Der er ved beregning af koncentrationerne anvendt en simpel Gaussisk spredningsmodel som vist i denne formel [9]:

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

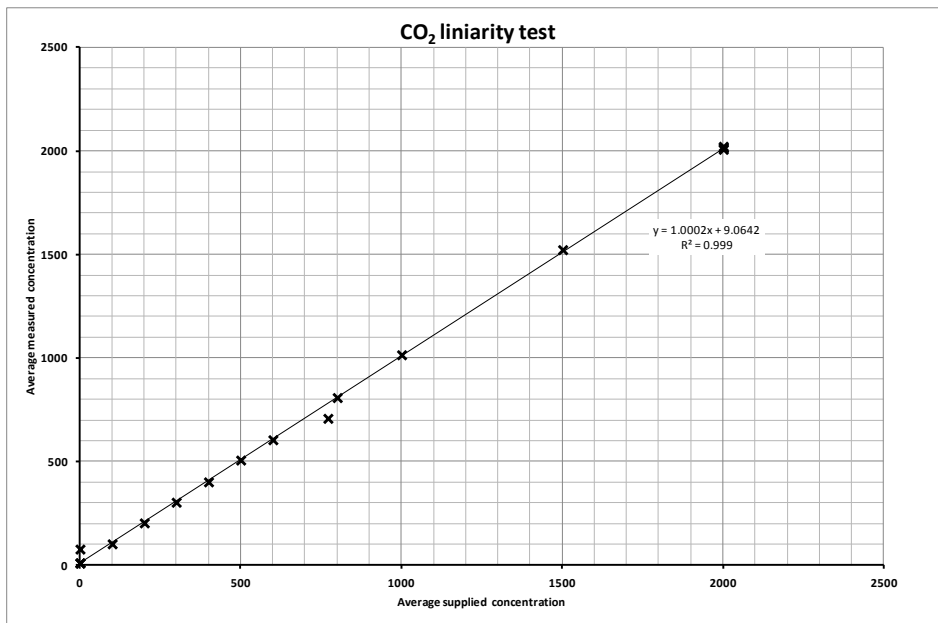
Hvor Q er kildestyrken, u er vindhastigheden, δy og δz er spredningsparametrene – standardafvigelserne i den Gaussiske fordeling i henholdsvis den horisontale og den vertikale retning – som er funktioner af afstanden X i nedstrømsretning. Skibets skorsten er placeret i (0,0,0) i et koordinatsystem med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

Bilag 2 Sensorproducentdata

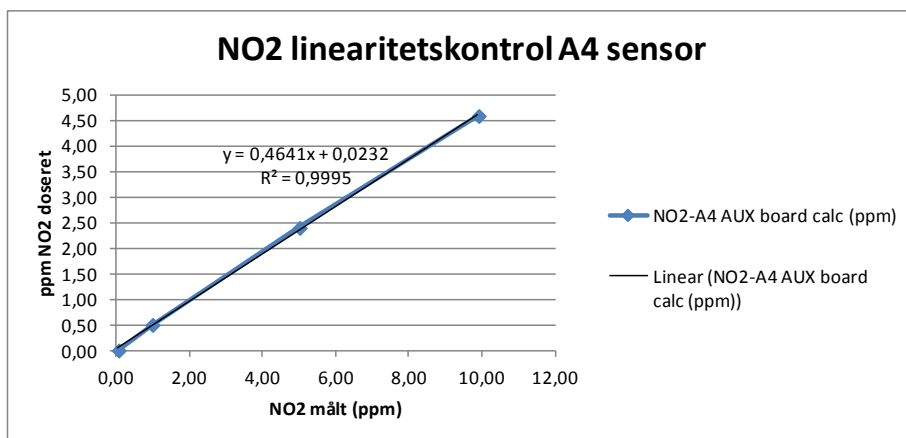
Sensortype	Produktkode	Måleområde	Responstid (t_{90})	Detektionsgrænse
CO ₂	K30 FR [12] (SenseAir)	0-5000 ppm	< 2 s	
NO ₂	NO2-A4 [13] (Alphasense)	0-20 ppm	(2 ppm) < 30 s	0,03 ppm
NO	NO-A4 [14] (Alphasense)	0-20 ppm	(2 ppm) < 25 s	0,05 ppm

TABEL 5
SENSORPRODUCENTDATA

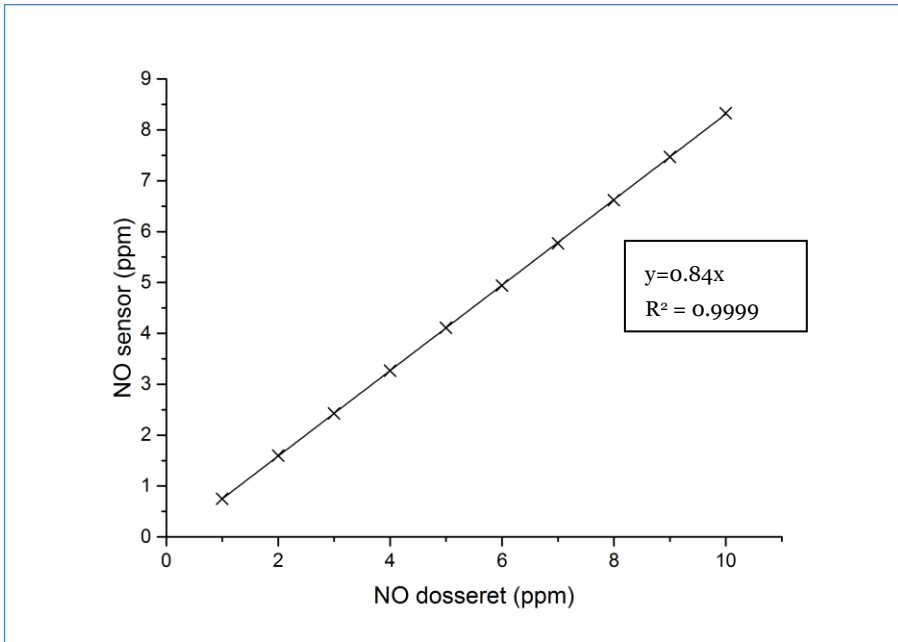
Bilag 3 Sensorlinearitet



BILLEDE 15
CO₂ LINEARITET

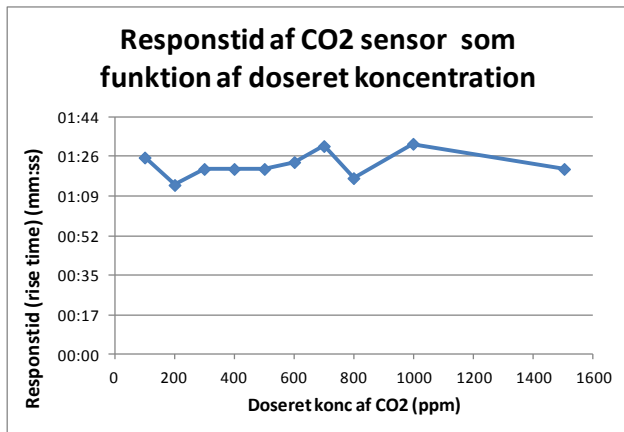


BILLEDE 16
NO₂ LINEARITET

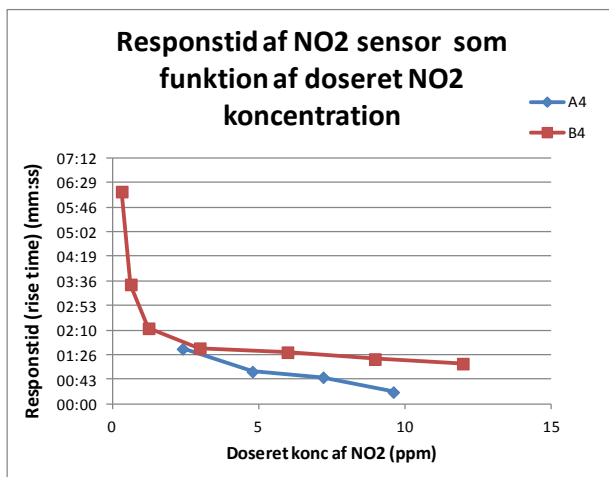


BILLEDE 17
NO LINEARITIT

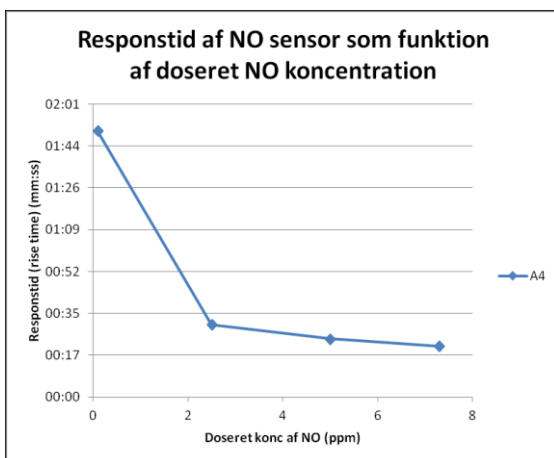
Bilag 4 Sensorresponstid



BILLEDE 18
CO₂ SENSOR RESPONSTID

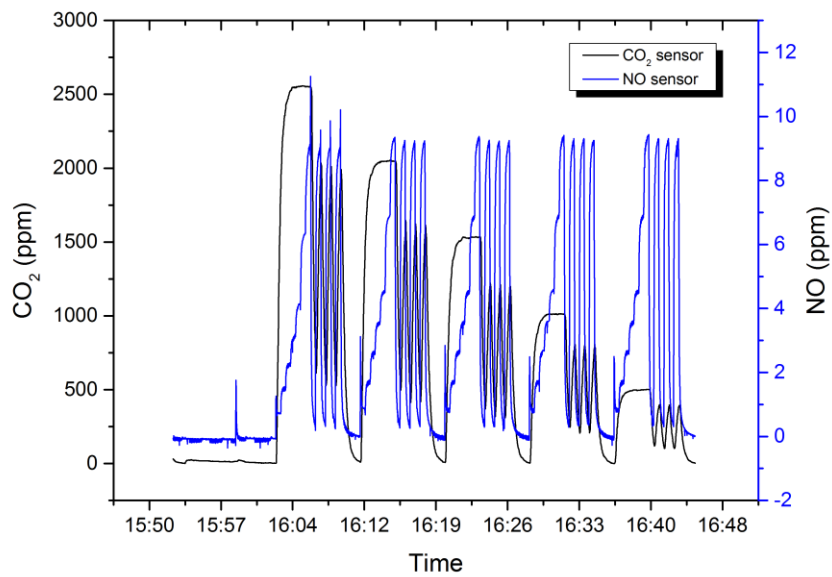


BILLEDE 19
NO₂ SENSOR RESPONSTID

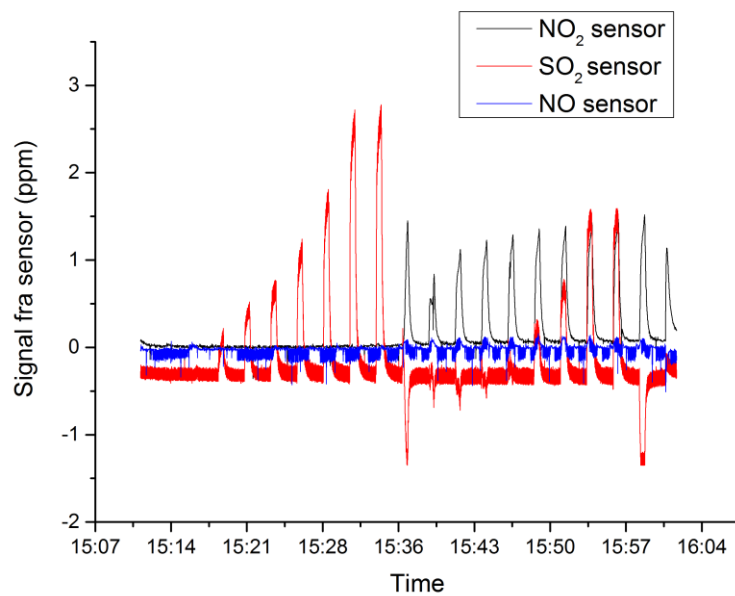


BILLEDE 20
NO₂ SENSOR RESPONSTID

Bilag 5 Krydsinterferens

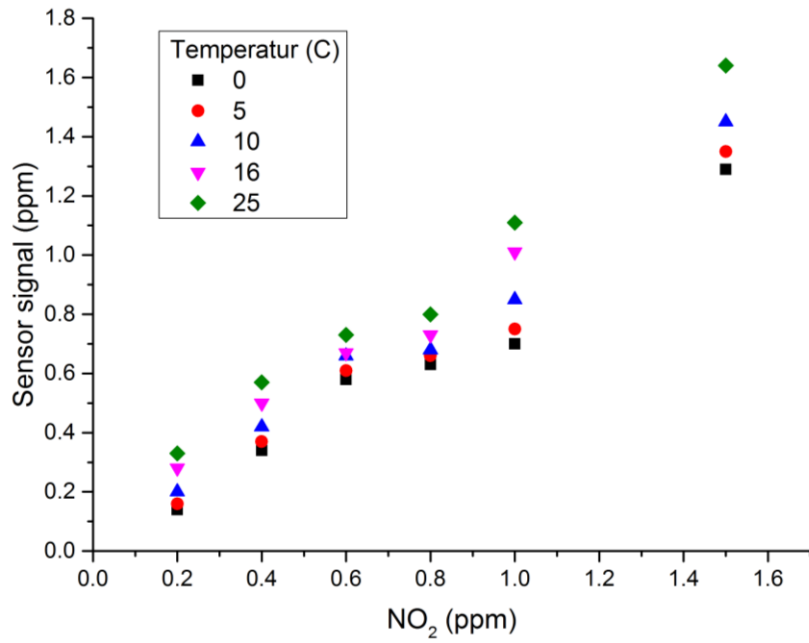


BILLEDE 21
FEM MÅLESERIER HVOR NO ER DOSERET STIGENDE I 30 SEC INTERVALLER, OG I FORSKELLIGE CO₂ KONCENTRATIONER.

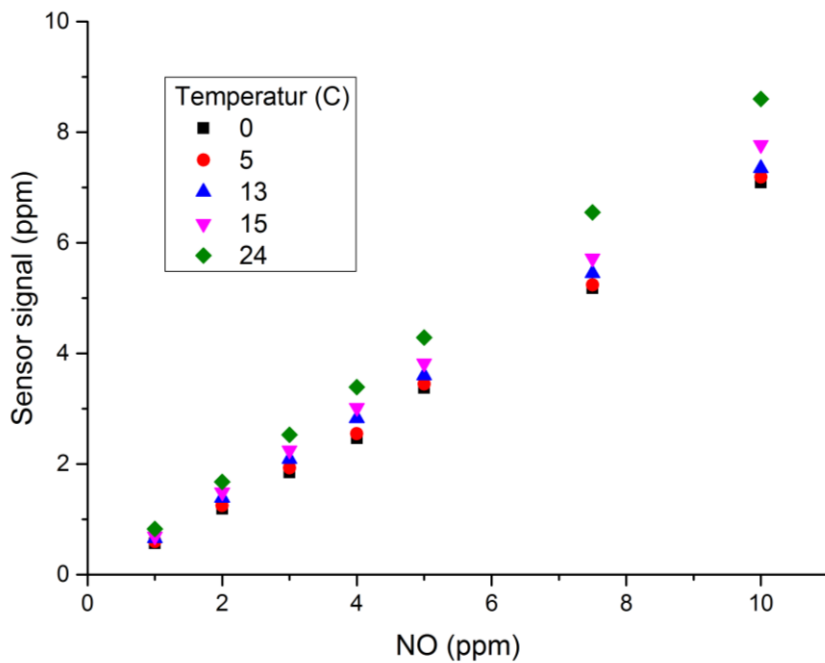


BILLEDE 22
MÅLESERIE MED STIGENDE KONCENTRATIONER AF SO₂ (I 30 S PULSER MED 120 S IMELLEM), OG DEREFTER ER DER DOSSET 1,5 PPM NO₂ (I 30 S PULSER MED 120 S IMELLEM) – FØRST UDEN SO₂ OG DER EFTER MED SAMME STIGENDE SO₂ SOM I STARTEN AF MÅLESERIEN.

Bilag 6 Sensortemperaturafhængighed



BILLEDE 23
NO₂ SENSOR TEMPERATURAFHÆNGIGHED



BILLEDE 24
NO SENSOR TEMPERATURAFHÆNGIGHED

Måling af NO_x-udledninger fra skibstrafikken ved hjælp af droneteknologi

Et system til overvågning af NO_x-emissioner fra skibe med droner og helikoptere er blevet udviklet og afprøvet i projektet.

Projektet viste at det ved brug af eksisterende, kosteffektive sensorer er muligt at bestemme om skibe overholder Tier III-kravene ved flyvning og måling i skibenes røgfaner.

Projektet blev gennemført med tilskud fra Miljøstyrelsen under ”MUDP 2014”.



**Miljø- og
Fødevareministeriet**
Miljøstyrelsen

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

www.mst.dk