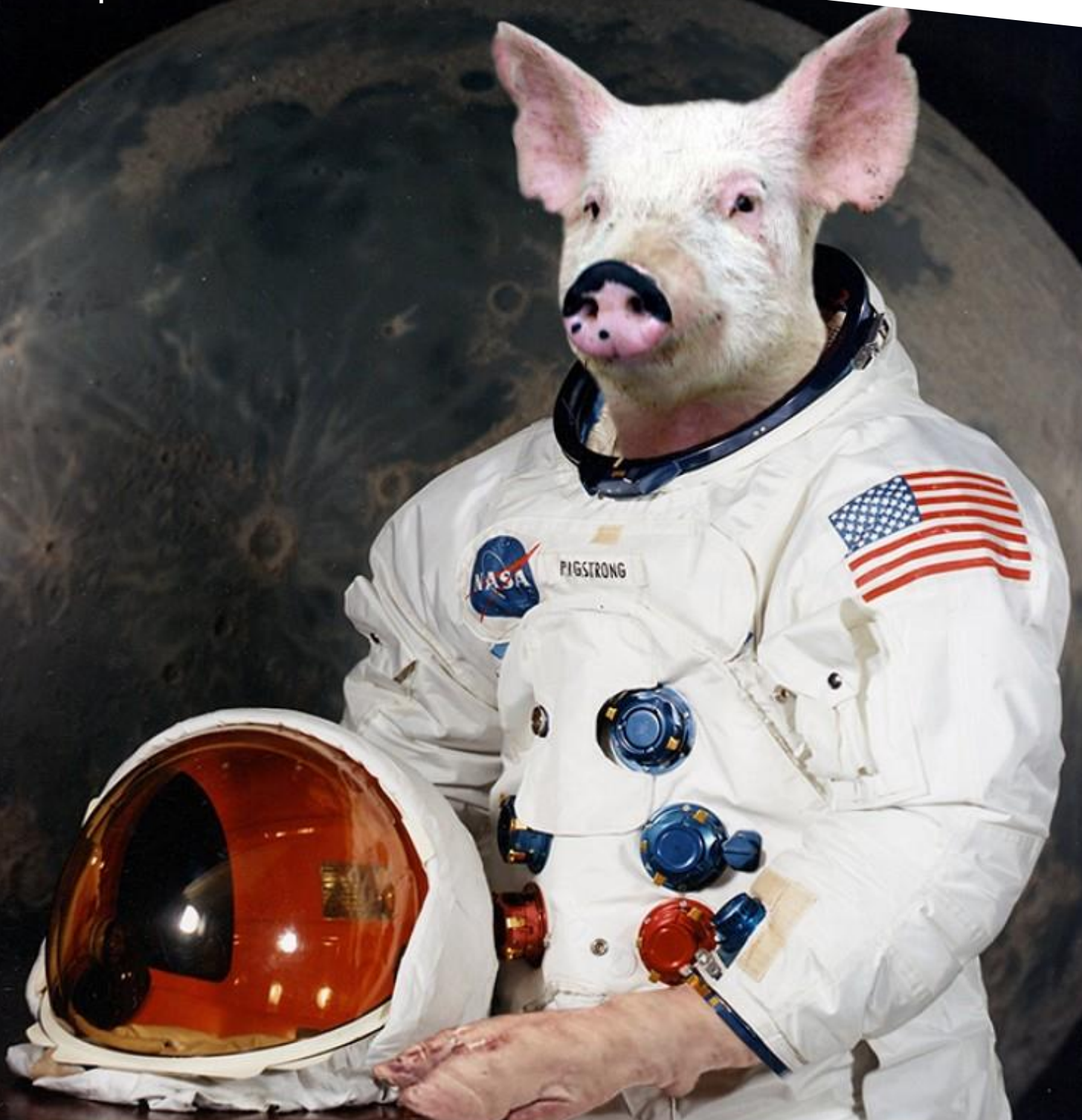




TEKNOLOGISK  
INSTITUT

# PROJEKT MÅNEGRISEN

April 2016



## **Udvikling og test af prototype målesetup til dokumentation af emission fra slagtesvinestalde.**

**Udarbejdet af:**  
Teknologisk Institut  
AgroTech, Skejby

Mathias Andersen  
Arne Grønkjær Hansen  
Philipp Trené

Projektet er støttet af Forsknings- og Innovationsstyrelsen og ud over AgroTech deltager Teknologisk Institut, Tåstrup, Force Technology, DELTA og DHI.

Læs mere om Månegris projekter på <http://naturerhverv.dk/tvaergaaende/maanegrise/>

## Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning .....	3
2	Dataintegration og modellering .....	7
	Dataintegration og modellering .....	7
	Afgrensning efter simulering .....	9
	Resultater for simulering .....	11
	Diskussion af simulering .....	16
2.1	Sensorer til måling af ammoniak .....	16
2.2	Sensorer til måling af ammoniak .....	16
2.3	Integration af data .....	18
2.4	Resultater fra fuldskala test .....	22
	Forsøgssetup .....	22
	Emissionsberegninger .....	24
4.1	Sammenligning mellem ammoniaksensorer .....	28
4.2	Sammenligning mellem ammoniaksensorer .....	28
4.3	Usikkerhed med måling i x antal sektioner .....	34
4.4	Diskussion .....	39
	Konklusion .....	45

## 1 Sammenfatning

En af visionerne i månegrisprojektet var at opbygge et målesetup, der kan anvendes til online måling af emissioner og danne grundlag for emissionsbaseret regulering af en slagtesvinestald. I projektet har deltagere fra 5 GTS-institutter undersøgt muligheden for at indføre direkte målinger vha. omkostningseffektive målesetups på en svineproduktion. Projektet er gennemført med støtte fra Rådet for Teknologi og Innovation.

Der blev indledningsvist gennemført en screening af egnede sensorer på markedet til måling af ammoniak og kuldioxid samt måling af ventilationsflow. De bedste kandidater blev udvalgt til videre test i laboratorium og i praksis. Endvidere blev der gennemført flere simuleringer for at finde de mest omkostningseffektive målesetups.

De udvalgte sensorer til ammoniakmåling var elektrokemisk sensor fra Dräger i hhv. decentralt og centralt setup, Tunable Diode Laser, TDLAS fra firmaet Axetris samt et setup med proportional sampling af ammoniak i vaskeflasker, som Force Technology anvender som referencemetode. Der blev endvidere udvalgt CO<sub>2</sub>-sensorer af mærket E+E sensor og CO<sub>2</sub>Meter. Disse sensorer blev medtaget som mulig kontrol af flow ud fra CO<sub>2</sub>-balanceberegninger. Til flowbestemmelse udvalgte Teknologisk Institut to måleprincipper, nemlig ultralydsflowmåling og klapsensorer som mulige kandidater ud fra en afvejning mellem økonomi og målesikkerhed. Endvidere indgik trykdifferencemåling fra SKOV A/S som en kandidat.

Indledende simuleringer med udgangspunkt i teknologiproducenternes beskrevne usikkerheder viste, at det var teoretisk muligt at estimere den samlede emission fra en slagtesvinestald med 13 sektioner ved udelukkende at måle online på 4-5 sektioner over et år, og derigennem bestemme den samlede ammoniakemission inden for +/- 10 % fra den sande værdi. Systemet til måling af ammoniakemission vha. et centralt vaskeflaskesystem viste sig at have en større usikkerhed end onlinemåleprincipperne grundet langt lavere målefrequens. Systemet var dog det billigste at etablere, og metoden har større sikkerhed på de enkelte koncentrationsmålinger. Ulempen ved vaskeflaskerne er, at det ikke giver mulighed for løbende optimering i produktionen, grundet at data først kan opgøres efter ca. en måned.

Simulering af alle måleprincipper tog udgangspunkt i sensor- og systemusikkerheder, som blev oplyst af producenten, og senere verificeret og testet i laboratorie-setups samt faglige konservative vurderinger af systemet under praktiske forhold.

Simuleringerne er løbende blevet opdateret med aktuelle priser og værdier for usikkerheder, detektionsgrænser mv. Ved genberegning med disse oplysninger viste simuleringerne, at det var muligt at estimere den samlede emission fra en slagtesvinestald ud fra måling i 4 sektioner ud af 13, med en samlet usikkerhed og bias for hele målesystemet ned til 5,5 %. Desuden viste beregningerne, at omkostningerne for dette lå omkring 6 kr. pr. stiplads ved brug af elektrokemisk sensor i kombination med trykdifferencemåling. Det maksimale antal sektioner er typisk 13 for slagtesvinestalde med ugentlig indsættelse og alt ind/alt ud på sektionniveau, hvorfor dette scenarie var vigtigt at inddrage i beregningerne.

De udvalgte sensorer til det endelige setup blev installeret ved en eksisterende slagtesvinestald på 4 ud af 8 sektioner. Som kontrol/verifikation af det samlede system målte Agro-Tech i samtlige 8 sektioner vha. et centralt placeret udstyr med fotoakustiske sensorer af typen INNOVA samt trykdifference målinger i alle afkast fra SKOV A/S til måling af flow. Der blev foretaget kontrolmålinger af flow vha. målevinger.

Måling af næringsstoffer i gylle fra besætningen blev udført af DHI. Målinger er tænkt som kontrol af emissionsmålinger på luft og sekundært som beslutningsstøtte til planteproduktion og biogasanlæg. DHI udvalgte et setup bestående af en prøveudtager og en homogenisator samt en spectrofotokemisk robotanalysator fra Hach Lange. Systemet blev programmeret til automatisk at udtage repræsentative prøver fra fortanken. Flowet af gylle måles med en niveausensor i fortanken. Der blev ud over total N og P også målt pH og konduktivitet som sekundære parametre. DHIs måle-setup er tænkt som en mobil prøvestation, der kan flyttes rundt mellem flere bedrifter. Analyserobot og automatisk prøvetager koster ca. 1 mio. kr. i investering. Hertil kommer omkostning til kalibrering, service og vedligehold samt forbrugsstoffer. Det må derfor vurderes, at det ikke er realistisk at anvende dette setup til gyllemålinger i reguleringsøjemed.

Måleperioden vedr. gasemission strakte sig fra den 1. september 2015 til den 15. december 2015. Målingerne af gylle blev foretaget i januar 2016 som følge af indkøringsproblemer med systemet.

### Målinger ved stald

Verifikationen af testsetup for gasformige emissioner bekræftede, at det er muligt at bestemme den samlede ammoniakemission fra en slagtesvinebesætning ud fra måling på 4 sektioner ud af 8 sektioner med en usikkerhed under 10 %. Anvendelse af elektrokemiske sensorer fra Dräger både i et centralt og et decentralt setup viste en bias på under +/-5 %. Der var generelt en god overensstemmelse mellem koncentrationsbestemmelse for de forskellige sensorer ved koncentrationer over 2 ppm. For decentralt placeret Dräger sensorer var usikkerheden på den samlede emissionsbestemmelse på niveau med den centralt placerede sensor. Til gengæld forventes prisen for et decentralt setup at komme under de 6 kr. per stiplads, da leverandøren planlægger at lancere en ny billigere udgave, men med samme præcision. Usikkerhed ved bestemmelse med TDLAS er i samme niveau som den elektrokemiske bestemmelse. Til gengæld er omkostningerne til denne lidt over 7 kr. per stiplads som følge af en større investering i primært sensordelen og indbygning af denne. Simuleringer viser, at bestemmelse af emissionen med decentralt setup er en smule mere usikkert, hvilket kan skyldes lidt længere responstid på den enkelte måling, da luften til sensoren udskiftes ved diffusion og ikke pumpes forbi sensoren, som ved den centrale løsning. Omvendt er der større risiko for utætheder og tilstopning i et centralt system. Der er således også større risiko for en uopdaget fejlmåling ved det centrale målesystem. Centralt målesetup stiller samtidigt krav til periodevis overvågning og servicering af slanger og filtre af erfarent personale.

Bestemmelsen af baggrundskoncentrationen vha. vaskeflasker viste, at koncentrationen lå på 0,05 ppm, hvilket betyder, at man i de fleste tilfælde vil kunne vælge et setup uden onlinemåling af baggrundskoncentration. Dette er en stor fordel, da de fleste sensorer ikke måler præcist i området 0-2 ppm. For koncentrationer < 2 ppm vurderes måleusikkerheden at være > 50 % for NH<sub>3</sub> måling med både TDLAS sensoren og de elektrokemiske sensorer. Dette kan være en udfordring ved måling efter en luftrensning, hvor det ikke er unormalt at koncentrationen er under 2 ppm, og hvor luftfugtigheden er nær 100%.

Der er umiddelbart størst perspektiv i en decentral løsning, fordi der her er lavere udgifter til drift og vedligehold grundet fravær af slangesystemer og filtre med temperaturstyring samt måleskab og multiplexersystem mv., hvilket giver øgede udgifter til drift, service og stiller større krav til mandskab.

Forsøg med forskellige sensorer til bestemmelse af flow viste, at ultralydsmålinger var det mest drifts stabile setup. Klapsensorer støvede til i løbet af en uge og kunne derefter ikke

måle præcist. Trykdifferencesensor placeret i skorstensafkast og havde god overensstemmelse med referencemåling med målevinge.

Flowbestemmelse med ultralydsmåling kan bestemmes med en usikkerhed under 5 % ved en luftmængde mellem 730 til 14.000 m<sup>3</sup>/h og 3,5 % mellem 1.700 til 14.000 m<sup>3</sup>/h.

Målevinger kan ved flow under 1.500 m<sup>3</sup>/h bestemme flowet med en usikkerhed på 7 %.

Afvigelsen mellem målingerne ved luftmængder over 1.500 m<sup>3</sup>/h er under 2 %. Trykdifferencemåling med Dynamic Air fra SKOV A/S kan bestemme luftflowet med en usikkerhed på 5 % ved luftmængder mellem 2.600 m<sup>3</sup>/h og 17.000 m<sup>3</sup>/h.

Sensorprisen for de forskellige måleprincipper ligger mellem 800-1500 per sensor. Hertil kommer omkostninger til installation og datalogning. Målevinger og trykdifference målere er kommercielt tilgængelige teknologier, hvor driftsstabiliteten er velafprøvet. Ultralydssensorer er endnu ikke kommercielt tilgængelige til staldapplikationer, og der mangler endnu et udviklingsstrin, før teknologien er robust nok til det aggressive staldmiljø. Der er dog gode perspektiver for teknologien, som er relativ billig og non-invasiv.

Afprøvning af automatisk prøvetager og robotanalysator til måling af næringsstofindhold udført af DHI viste, at det var muligt at bestemme total N og P koncentrationen i gylle med samme nøjagtighed som akkrediterede analysefirmaer (1-2 % usikkerhed). Måling af gyllemængde blev udført vha. niveaumåler med en usikkerhed på mellem 0,6 % - 2 %. Den største usikkerhed ligger på i selve prøveudtagning og homogenisering, her ligger usikkerheden på 10-15 %. Den samlede systemusikkerhed er beregnet til 11-18 % ved homogen prøvetagning. Det var ikke muligt at køre anlægget automatisk i en længere periode uden opsyn, hvorfor manuel styring af prøveudtager og robotanalysator i forsøgsperioden var nødvendig. I den periode, hvor automatisk kørsel blev forsøgt, fremkom der urealistisk lave værdier, som kan skyldes fejl ved fortynding.

Undersøgelsen giver ikke yderligere information om teknologiens modenhed med hensyn til implementering til emissionsbaseret regulering. Dette skyldes først og fremmest, at det ikke med det valgte setup var muligt at måle næringsstoffer på sektionsniveau og desuden blev der ikke udarbejdet massebalancer på in- og output til stald, dvs. foder og dyr. Data fra afprøvning af analyserobot kan således heller ikke bruges til kontrol eller reference for målingerne af gasformige emissioner. Prisen på anlægget vurderes ligeledes at være alt for høj set i forhold til gevinsten.

AgroTech har i projektet udviklet en analyseplatform til opsamling og præsentation af data fra projektet. TI, FORCE og AgroTech uploadede i løbet af forsøgsperioden værdier for gas-koncentrationer og flow målt med forskelligt udstyr i stalden. Disse data kan dels præsenteres for forskellige perioder på sektionsniveau og for besætningen samlet. Desuden kan platformen integrere flow og koncentrationsdata til beregning af samlet emission for besætningen ved kombination af forskelligt udstyr. Dette giver mulighed for en direkte sammenligning af emissioner fra forskellige sektioner og udstyr i forskelligt setup.

Forsøgsstald havde centralt udsug og delrensning vha. biologisk luftrensning, hvilket muliggjorde løbende kontrol af luftrensnings effektivitet. Desuden var det muligt at bestemme, hvor meget ammoniak der blev reduceret i luftrensning fra hver enkelt sektion og samlet for stalden.

Projektet har yderligere bidraget med viden omkring variation i emission på sektionsniveau under praktiske forhold, og resultaterne viser, at der er op til 40 % forskel i emission mellem helt ens sektioner. Dette viser, at der er stort potentiale for optimering af daglig management og klimastyring, der kan føre til reduktion af emissionen og forbedring af staldklimaet. Derfor er der gode perspektiver for at udvikle systemer, som kan give landmanden

alarmer direkte i ventilationsstyring, eller som integreret del af et managementsystem. Endvidere er der perspektiver for at forbedre optimal delvis luftrensning gennem styring af luftfordeling fra sektion til luftrensere. Dette vil kunne sikre, at den mest forurenede luft altid prioriteres til luftrensere og ikke blot en fast minimumsventilation fra de enkelte sektioner. Det vil betyde, at en større del af staldens samlede emission vil kunne behandles af luftrensere, og derved enten reducere omkostninger til rensning eller reducere den samlede emission.

Perspektivet for online målinger af ammoniakemission fra en svinestald er i første omgang, at den samlede emission fra stalden kan bestemmes via målinger frem for beregnes på baggrund af input. Dette kan give landmanden nogle friheder i form af muligheden for at udvide produktionen inden for samme udledningsloft, og frihed i forhold til at vælge managementstrategi og miljøteknologi, der ikke nødvendigvis er verificeret. For det andet kan onlinemåling af ammoniakemission evt. afsløre svine i stier og dårligt staldmiljø med reduceret trivsel til følge. Et overblik over ammoniakemissionen fra forskellige staldsektioner giver landmanden et nyt overvågningsværktøj til at opdage og reagere på begyndende negative tendenser. Et godt staldmiljø er nøglen til forbedret dyrevelfærd og sundhed samt øge potentielt øget produktion.

### **Anbefalinger**

Analyseplatformen bør videreudvikles, således at de målte emissioner har en feedbackmekanisme, der kan medvirke til reduktion af emissioner. Systemet skal i første omgang kunne give en alarm, hvis emissionen er over en forud defineret grænse. I fase 2 skal data fra analyseplatformen bruges direkte i forbindelse med styring af produktionen. Man kan f.eks. forestille sig at CO<sub>2</sub>- og ammoniakkoncentrationen kunne blive styrende for minimumsventilationen, eller at forhøjet ammoniakemission i perioder automatisk vil kunne udløse yderligere køling af stalden, evt. via højtryksskøling.

Alle produktionsdata burde samles op i en fælles database, herunder emissionsdata, klimadata fra ventilationssystemet, foderdata fra fodercomputer, slagteridata, veterinære data samt produktivitetstal. Ud fra alle disse data, hvoraf de fleste allerede i dag bliver logget på forskellige platforme, vil det være muligt at finde sammenhænge mellem produktionsforhold og produktivitet, hvilket åbner et potentiale for optimeringer. Man kunne f.eks. forestille sig, at det ville blive tydeliggjort præcis, hvor stor betydning 5 graders overtemperatur under 14 dage sommerforhold vil have på produktiviteten og ammoniakemissionen.

Systemet bør designes med åbne interfaces og med muligheder for at læse og skrive data til databasen via simple web api's. Dette betyder, at eksisterende systemer kan kommunikere med analyseplatformen. Herved kan data fra andre systemer sendes til databasen og andre systemer kan efterfølgende udregne ønskede specifikke nøgletal til svineproducenten. Der skal indarbejdes en høj sikkerhed, hvis systemet åbnes for disse funktioner.

## 2 Dataintegration og modellering

Formålet med målinger kombineret med simuleringer er at generere et beslutningsgrundlag til udvælgelse af økonomisk realistiske og tilstrækkeligt nøjagtige målesetups, i forhold til at bestemme den årlige ammoniakemission på besætningsniveau.

### Dataintegration og modellering

Modellen er baseret på empiriske måledata dels fra Grønhøj forsøgsstation (SEGES) samt fra to lavemissionsstalde, hvoraf den ene er fra tidligere forskningscenter Bygholm, og det andet stammer fra måling ved en større svineproduktion i forbindelse med en DanETV verifikation af en luftrenser. Med lavemissionsstalde menes stalde, hvor der udledes under 0,24 kg NH<sub>3</sub>-N pr. slagtesvin pr. år svarende til 0,96 kg NH<sub>3</sub>-N/år.

Data fra Grønhøj er et dataset, som dækker 12 sektioner over knapt 1 år. Disse data er transformeret til lavemissionsniveau på baggrund af niveau og variationer, der blev fundet i de anvendte lavemissionsstalde under hensynstagen til årstidsvariation. Herved er der dannet et nyt dataset. Simuleringerne er foretaget vha. Stokastisk MonteCarlo simulering af målescenarier på baggrund af eksisterende NH<sub>3</sub>-emissions data ([NH<sub>3</sub>], ventilationsydelse, temperatur m.m.), brugerspecificerede målescenarier (antal daglige målinger, antal måle-sektioner m.m.) og input af sensorspecifikke data (usikkerhed, kvantificeringsgrænse) samt økonomiske begrænsninger (pris, vedligeholdelseskostning, levetid m.m.).

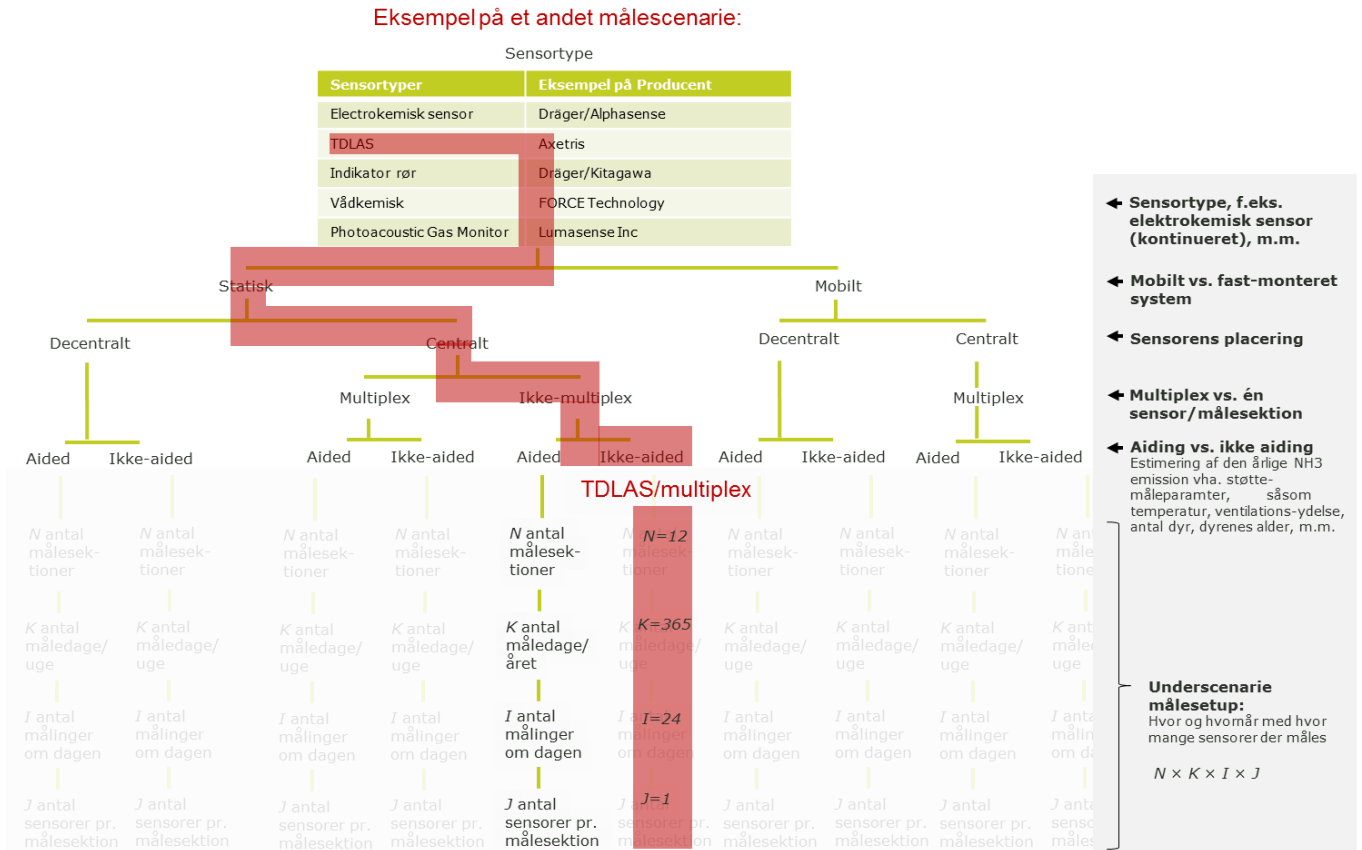
Data vedr. sensorer er fremkommet ved indsamling af informationer fra øvrige institutter. Sensortyper til ammoniak målinger er udvalgt ud fra beskrivelserne i AP2.1 (delrapport fra Force Technology).

Simuleringen baserer sig på Bootstrap sampling af sektioner for at øge generaliserbarheden fra datagrundlaget. Dette sikrer, at data kan simulere et stort antal sektioner/hold/stalde. Hver af de i alt N=80 bootstrap-samplede stalde af en brugerspecificeret størrelse (f.eks. 10 sektioner) er en virtuel stald, hvorfra der plukkes gentagne gange (n=10) data til en række målescenarie-simuleringer (Monte Carlo simulering) under inkludering af sensorens og målesystemets måleusikkerheder. Simulering blev kørt i programmet R.





måledage om ugen, samlinger pr. dag, antal sensorer pr. målesektion. Der fremkommer således en matrix med mange scenarier, hvor usikkerhed, bias og omkostning kan beregnes.



Figur 2 Eksempel på valg af scenarie til simulering. N, K I og J angiver antallet af muligheder i det enkelte niveau.

## 2.2

### Afgrænsning efter simulering

Ud fra alle de mulige scenarier er der i første omgang foretaget en afgrænsning og fravalgt scenarier på baggrund af bias og pris. Scenarier med en bias over +/- 0,05 kg NH<sub>3</sub>-N/stiplads er ikke medtaget i videre udvælgelse. Dette svarer til ca. +/- 5 % af den samlede emission. Desuden har vi afgrænset prisniveau til max 8 kr. pr. produceret svin. Dette tal har tidligere været anvendt som retningsgivende ved BAT, og vi antager, at omkostningen til måleudstyr ikke i praksis må overstige omkostningen til miljøteknologi. Dette er en foreløbig frasortering af dyreste scenarier.

Derudfra har vi fra de resterende scenarier udvalgt de 500 scenarier med de laveste usikkerheder. Herudfra er scenarier sorteret efter måleomkostninger, og inden for hver sensortype er udvalgt det billigste scenarie ved måling i minimum 5 sektioner. De 5 sektioner blev udvalgt på baggrund af de valgmuligheder, der var i den kørte simulering mellem 1, 5 og 10 sektioner.

Måling i én sektion blev fravalgt pga. væsentlig højere usikkerhed på den samlede emission samt stor risiko ved sensorudfald. I figur 6 ses, at usikkerheden falder med en faktor 3 ved at øge antal målesektioner fra 1 til 5. Hvis en sensor "falder ud", kommer der slet ingen data i perioden. Har man flere sektioner, er der altid en "backup". I praksis vil der altid være forskel på sektioner alene pga. den fysiske placering af stalden, som betyder, at en enkelt sektion kan være mere udsat for kulde og træk som følge af større vindpåvirkning o.lign. Dette skal man naturligvis tage højde for ved udvælgelse af repræsentative sektioner. Mulighed for manipulation med måledata begrænses desuden ved anvendelse af måling i flere sektioner, da det vil være let for landmanden at køre speciel behandling i få ud af 13 sektioner og derved opnå et resultat, der viser lav emission.

Målinger i min. 4 sektioner giver bedre mulighed for at benchmarke sektioner og holde resultat op mod hinanden og reagere hurtigt på uregelmæssigheder.

Prisforskel fra at gå fra 1 til minimum 4 sektioner (ud af 13 sektioner) med placering af disse sensorer decentralt er ca. 2 kr. pr. stiplads ved anvendelse af central elektrokemisk sensorer, se figur 6. Forskellen vil være i samme størrelsesorden ved mere avancerede målemetoder, f.eks. TDLAS. Dette skyldes, at der kræves ekstra slangeføring og kanaler på en multiplexer, og prisen for en ekstra sektion svarer nogenlunde til prisen på en ekstra sensor ved en decentral løsning.

## Resultater for simulering

Tabel 2 Resultater/beregninger af, bias, usikkerhed, omkostning, antal målesektioner, antal målinger, kvantifikationsgrænse og systemusikkerhed for 7 scenarier i stald med hhv. 13 og 8 sektioner, hvor der måles på 4 af disse. Dec: decentral. Cent: Central. E-kem: Elektrokemisk sensor. V.kem: Vådkemisk analyse (vaskeflaske) tryk:trykdiference til flowbestemmelse. TDLAS: Tunable Diode Laser Sensor. Fotoakustisk-cent-tryk: Photoacoustic Gas Monitor (Innova 1314) - central/multiplex.

\*Ved vådkemiske analyse udtages der ikke 24 prøver per sektion om dagen, men ammoniakken opsamles ved isokinetisk flow, og der kan derved integreres over 24 timer.

### 13 sektioner

Sensor ID	Bias kg NH <sub>3</sub> - N/år/stipl.	Usikkerhed kg NH <sub>3</sub> - N/år/stipl.	Omkostning DKK/Stipl./år	Målesektioner Antal	Målinger Antal sekt./dag	Kvantifik.gr. [NH <sub>3</sub> ] ppm
Indikatorrør-dec-tryk	0,0162	0,0291	3,68	4	24	2
E.kem-cent-tryk	0,0156	0,0288	6,43	4	24	2
E.kem-dec-tryk	0,0157	0,0292	6,62	4	24	2
TDLAS-cent-tryk	0,0164	0,0298	7,33	4	24	1
V.kem-dec-tryk	0,0164	0,1060	7,80	4	24*	0,01
Fotoakustisk-cent-tryk	0,0149	0,0290	11,88	4	24	0,5

### 8 sektioner

Sensor ID	Bias kg NH <sub>3</sub> - N/år/stipl.	Usikkerhed kg NH <sub>3</sub> - N/år/stipl.	Omkostning DKK/Stipl./år	Målesektioner Antal	Målinger Antal/ sekt. /dag	Kvantifik.gr. [NH <sub>3</sub> ] ppm
Indikatorrør-dec-tryk	0,0052	0,0169	9,85	4	24	2
E.kem-cent-tryk	0,0057	0,0169	17,23	4	24	2
E.kem-dec-tryk	0,0056	0,0174	17,73	4	24	2
TDLAS-cent-tryk	0,0233	0,0159	19,63	4	24	1
V.kem-dec-tryk	0,0194	0,0597	20,90	4	24*	0,01
Fotoakustisk-cent-tryk	0,0199	0,0161	31,83	4	24	0,5

Der er udvalgt 6 scenarier, som inkluderer følgende kombinationer af ammoniak/sensortyper/måleprincipper og luftflowbestemmelse (se tabel 2). Bias, eller nøjagtighed, er et mål for, hvor tæt man ligger på "den sande værdi", mens usikkerhed er et udtryk for den tilfældige variation omkring middelværdien.

Tabel 3 Resultater/beregninger af bias, usikkerhed i procent af target emissionen i kg. N per stiplads per år for de 6 scenarier i stald med hhv. 13 og 8 sektioner, hvor der måles på 4 af disse.

Dec: decentral. Cent: Central. E-kem: Elektrokemisk sensor. V.kem: vådkemisk analyse (vaskeflasker). Tryk: trykdifference til flowbestemmelse. TDLAS: Tunable Diode Laser Sensor. Fotoakustisk-cent-tryk: Photoacoustic Gas Monitor (Innova 1314) - central/multiplex

13 sektioner

Sensor ID	Target kg N.yr.pp	Usikkerhed % af target	Bias % af target	Usikkerhed + bias % af target
Indikatorrør-dec-tryk	0,810	3,595	2,004	5,60
E.kem-cent-tryk	0,810	3,561	1,926	5,49
E.kem-dec-tryk	0,810	3,606	1,941	5,55
TDLAS-cent-tryk	0,810	3,678	2,028	5,71
V.kem-dec-tryk	0,810	13,086	2,023	15,11
Fotoakustisk-cent-tryk	0,810	3,586	1,836	5,42

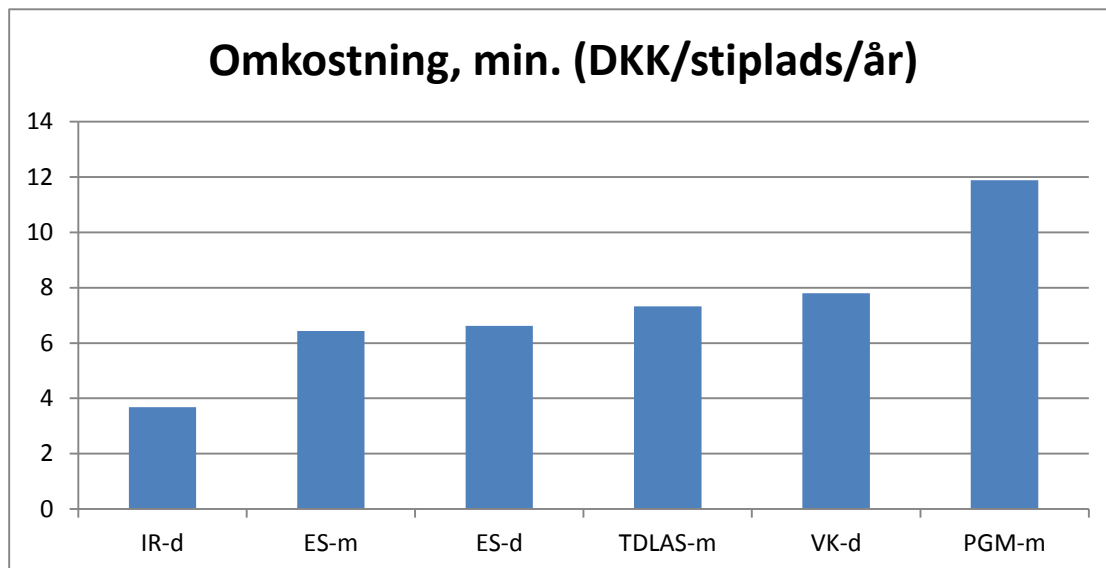
8 sektioner

Sensor ID	Target kg N.yr.pp	Usikkerhed % af target	Bias % af target	Usikkerhed + bias % af target
Indikatorrør-dec-tryk	0,890	1,905	0,0058	1,91
E.kem-cent-tryk	0,890	1,898	0,0064	1,90
E.kem-dec-tryk	0,890	1,954	0,0063	1,96
TDLAS-cent-tryk	0,890	1,792	0,0262	1,82
V.kem-dec-tryk	0,890	6,714	0,0218	6,74
Fotoakustisk-cent-tryk	0,890	1,806	0,0224	1,83

Bias er den fejl, som målesystemet systematisk generer, det vil sige, at emissionen enten overestimeres eller underestimeres. Usikkerhed eller præcision er derimod et mål for, hvor ens resultatet af gentagne målinger er. Usikkerhed er en tilfældig fejl omkring den beregnede emission. Det er således muligt at have en metode, der er meget nøjagtig, uden at være specielt præcis, I det tilfælde er man bare nødt til at tage gennemsnittet af en masse målinger, for at være sikker på, at man ikke rammer ved siden af ved et tilfælde. Har man derimod en målemetode med høj bias, hjælper det ikke med mange gentagelser, da man vil ramme ved siden af hver gang. Til gengæld kan der korrigeres for bias, når man kender størrelsen af denne systematiske afvigelse.

Alle scenarier, der er listet i tabel 2, bygger på målinger i 4 sektioner ud af 8-13. I alle scenarier, på nær det scenarie hvor der benyttes detektionsrør, måles der 24 gange om dagen per sektion. For de vådkemiske analyser er der dog tale om en integreret måling over 24 timer. For online måleudstyr giver det ikke mening at begrænse frekvensen yderligere, da ekstra målingen i princippet er gratis. Elektrokemiske sensorer vil dog have en holdbarhed,

der er begrænset af ammoniakgennemstrømningen, hvilket skyldes, at sensoren bliver opbrugt med tiden. Den testede elektrokemiske sensor, der benyttes i forsøget, er dog udviklet til løbende regenerer, hvorfor den skulle kunne holde til flere års kontinuerligt brug.



Figur 3 Omkostninger pr. stiplads/år (DKK) for forskellige sensorkombinationer ved måling i 4 ud af 13 sektioner. I alt 7500 stipladser.

IR: Indikatorrør til manuel sampling f.eks. med Kitagawa-rør)

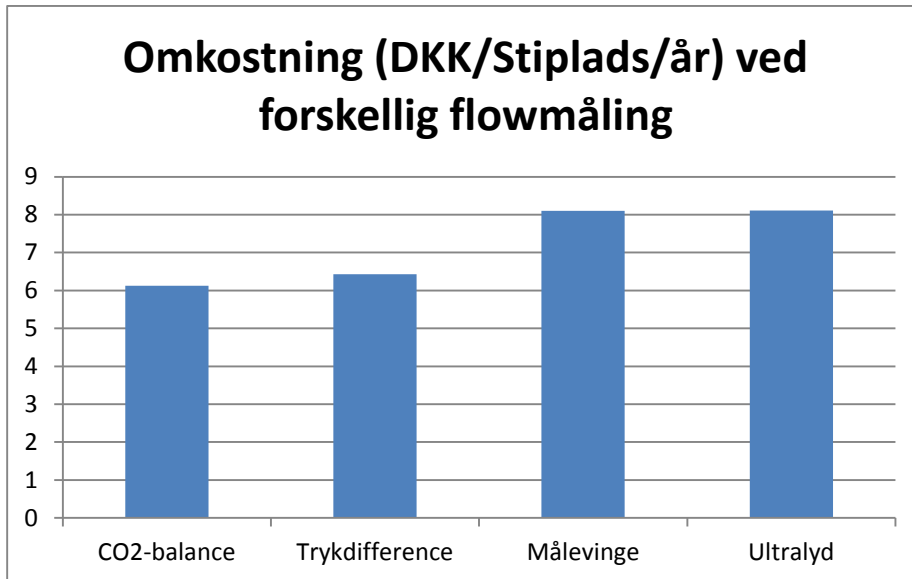
d: decentral. m: central/multiplex. ES: Elektrokemisk sensor. VK: vådkemisk analyse (vaskeflaske).

TDLAS: Tunable Diode Laser Sensor. PGM: Photoacoustic Gas Monitor (Innova 1314) - central/multiplex. Alle målinger af flow er i denne simulering udført med trykdifferencemålere.

Indikatorrør er den billigste løsning med en pris omkring 4 kr. per stiplads. De elektrokemiske målmetoder ligger både for den centrale og decentrale løsning på lige over 6 kr. per stiplads. TDLAS metoden er lidt dyrere omkring 7 kr. per stiplads, hvilket fortrinsvis skyldes en dyrere sensor og avanceret temperaturstyring. Vådkemiskanalyse vha. vaskeflasker ligger på en pris på knap 8 kr. per stiplads, hvilket skyldes de forholdsvis dyre laboratorieanalyser af væsken. Dyrest er den fotoakustiskmålemetode, der koster næsten 12 kr. per stiplads. Prisen er et resultat at en høj investeringspris på udstyret samt høje omkostninger til vedligeholdelse. På figur 3 ses spredning i omkostninger ved de valgte scenarier. Til alle emissionsmålinger er der anvendt tryk-differensmålere til at bestemme luftflow, da denne løsning viste sig at være billigst, og usikkerhederne ligger i samme niveau (5-7 % i normalt flow området) for alle metoder af flowbestemmelse.

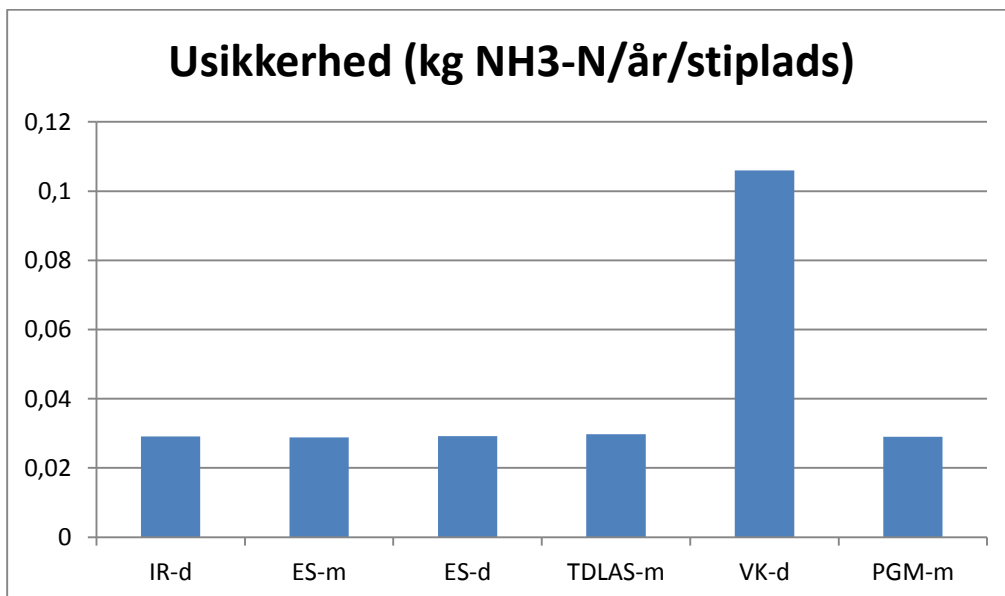
CO<sub>2</sub>-balance måleprincippet forudsætter manuelle indtastninger til beregning af flow baseret på produktionsdata (antal, størrelse mv.), og derved er der risiko for fejl. Prisen er ikke væsentligt mindre, og derfor har vi i første omgang valgt at udelukke denne metode. Princippet kan dog blive interessant i staldsystemer, hvor der automatisk logges antal og vægt og evt. fodertildeling. CO<sub>2</sub>-koncentrationen kan desuden bruges til at styre minimumsventilationen i stalden.

Figur 4 viser omkostningerne til måling af flow med 4 forskellige principper, forudsat at der måles ammoniakkoncentration med et elektrokemisk centralt system.

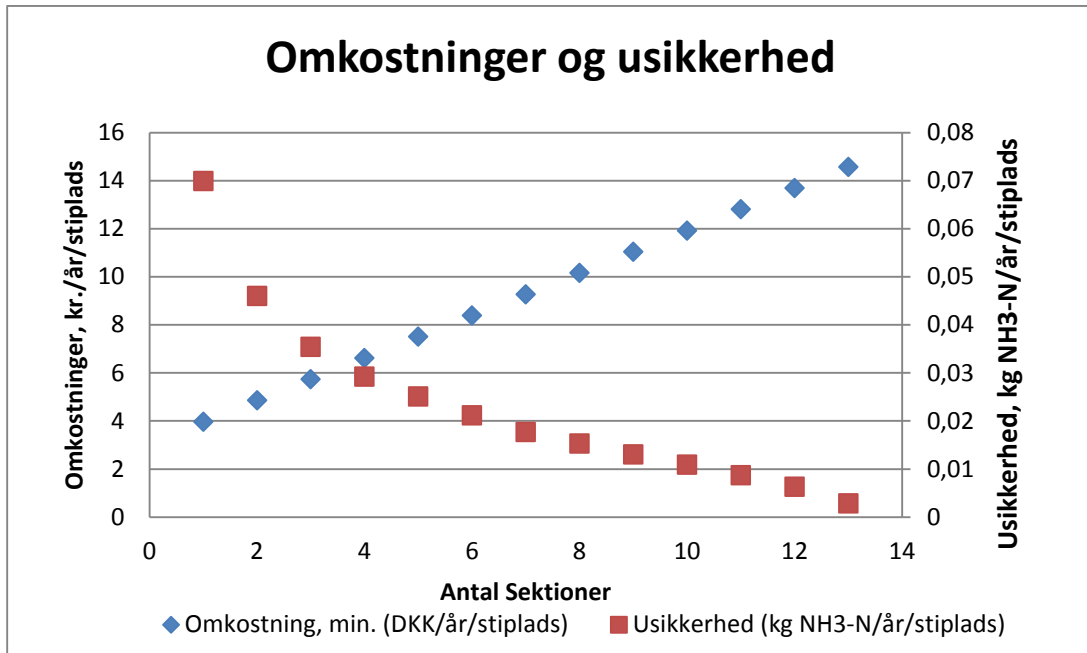


Figur 4 Samlet omkostning for emissionsmåling ved forskellige flow målemetoder i kombination med elektrokemisk central sensor. Co2: bestemmelse af flow ud fra CO2-balance. Tryk: Flowbestemmelse ud fra trykdifference måling. Ultra: Flowbestemmelse vha. ultralydssensor. MV: Flowbestemmelse vha. målevinge. Måling i 4 ud af 13 sektioner. I alt 7500 stipladser.

I figur 5 er usikkerheden ved de valgte scenarier vist. Når emissionen bestemmes på årsbasis ved måling i 4 ud af i alt 8 sektioner og 24 målinger pr. dag, er der ikke nogen nævneværdig forskel på metode – alle på nær vådkemiske målinger, som skiller sig ud med en usikkerhed på over 4 %. De øvrige ligger således alle lige under 4 % i usikkerhed. Den lave usikkerhed på emissionsbestemmelsen på besætningsniveau fremkommer på trods af, at systemusikkerheden og detektionsgrænserne er forholdsvis store. Dette skyldes et meget stort antal målinger set over et helt år.



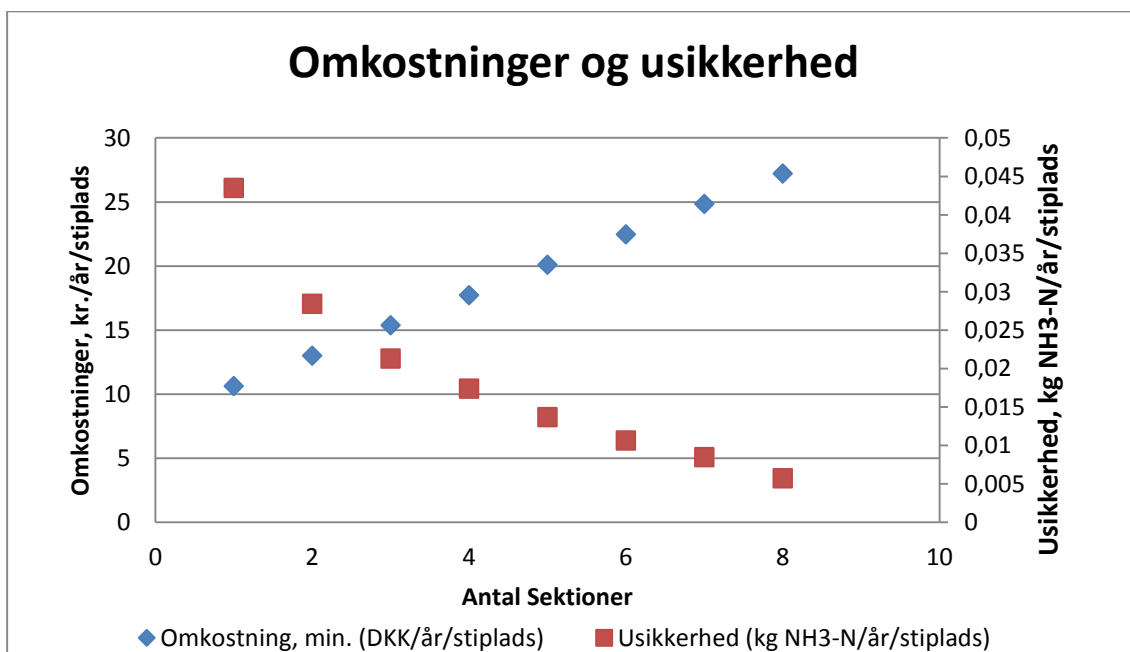
Figur 5 Usikkerhed for de forskellige målescenarier. Måling i 4 ud af 13 sektioner.



Figur 6 Omkostninger og usikkerheder for elektrokemiske målinger ved 1-13 sektioner ud af i alt 13 sektioner med en besætningsstørrelse på 7500 stipladser.

Af figur 6 fremgår det, at der som forventet er en lineær sammenhæng mellem omkostninger og antal målesektioner ved scenarie, hvor der benyttes decentral måling med elektrokemiske sensorer (i 1-13 sektioner ud af i alt 13 sektioner).

Usikkerheden falder eksponentielt ved et øget antal målesektioner. Fra måling i 4 sektioner og op bliver lineær, samtidig med usikkerhed falder til under 3 %. Ved måling i 4 målesektioner er prisen ca. 6 kr./stiplads eller ca. 1,5 kr. pr. produceret gris.



Figur 7 Her ses der som forventet en lineær sammenhæng mellem omkostninger og antallet af målesektioner. I dette scenarie benyttes der decentral måling med elektrokemiske sensorer i 1-8 sektioner ud af i alt 8 sektioner. Besætningsstørrelse: 2800 stipladser.



På figur 8 falder usikkerheden igen eksponentielt ved måling i de 1-3 målesektioner ud af 8. Allerede ved måling i 3 sektioner ud af i alt 8, kommer usikkerheden ned under 25 g NH<sub>3</sub>-N/stiplads, hvilket ca. svarer til 2,5 % i en moderne stald. Ved måling i 3 sektioner er omkostningerne ca. 15 kr. pr. stiplads svarende til ca. 4 kr. pr. produceret gris.

## Diskussion af simulering

Output fra simuleringen er en meget stor matrix med over 2000 kombinationer af målesetups. Vi har valgt at sortere output efter bias og pris i første omgang for at sortere helt urealistiske scenarier fra. Når dette er gjort kommer de meget simple målemetoder som indikatorrør eller kemiske sensor eller vaskeflasker placeret i én enkelt sektion ud som de billigste alternativer. Det er naturligvis ikke overraskende. Vi har herefter set på, hvor meget dyrere næste trin er, hvis man ønsker at begrænse måleusikkerheden.

Avanceret måleudstyr, som er udviklet til forsknings- eller verifikationsformål, er fravalgt pga. meget høj pris, som gør det urealistisk at anvende til emissionsbaseret regulering. Dette udstyr indgår derfor kun som kontrolmåling/reference i forbindelse med test i praksis. Hvis vi ser på usikkerheden ved at gå fra én sektion til flere på baggrund af simulering baseret på første input fra FORCE vedr. detektionsgrænser, kvantificering og målesystemnøjagtigheder, ser det ikke ud til at, man kan dømme de allerbilligste alternativer med måling af en enkelt sektion helt ude. Men der er imidlertid en række faktorer, der gør det uhenigtsmæssigt at fastholde disse alternativer, herunder mulighed for udfald af sensor, højere usikkerhed samt mulighed for manipulering.

Under de økonomiske forudsætninger og med anvendelse af statistisk simulering af en række scenarier, ser det ud til at samtlige 8 udvalgte scenarier er brugbare i et fremtidigt emissionsbaseret reguleringssystem, idet ammoniakemissionen kan bestemmes inden for +/- 8 % af den sande værdi ved de valgte ammoniak- og flowmålemetoder. Der kunne således udvælges flere brugbare scenarier, men ud af de over 2000 scenarier er det de 8 bedste inden for hver ammoniak emissionsbestemmelsesmetode, som er valgt.

Dette er under forudsætning af, at bias er kendt for det valgte setup, da det så er muligt at kompensere for denne. Med undtagelse af vådkemiske målemetoder kan ammoniakemissionen bestemmes med en sikkerhed på +/-5 % (usikkerhed + bias) ved måling i 4 ud af 13 sektioner.

De 8 forskellige scenarier er sammensat af 4 forskellige ammoniak målemetoder herunder detektorrør, elektrokemiske sensorer, vådkemisk analyse (vaskeflaske) samt TDLAS. Hver målesensor kan enten sidde i et decentralt eller centralt målesetup. Ved centralt målesetup kræves der en multiplexer, som skiftevis henter luft fra forudbestemte sektioner. Ved decentralt måling skal der sidde sensorer i alle målesektioner. Fordelen ved det sidste er, at man undgår lange slanger, som er nødvendige ved det centrale måleudstyr. Derved undgås de fejlkilder og usikkerheder, som kan opstå pga. af utætheder og risiko for kondens og/eller vedhæftning til slangerne. Dette er årsagen til, at måleusikkerheden vurderes til at være højere for scenarier med centrale sensorer, hvilket også fremgår af figur 5.

### Sensorer til måling af ammoniak

*Indikatorrør eller detektorrør* har den fordel, at det samlet er det billigste alternativ af de 8 udvalgte scenarier, hvilket skyldes, at rør og pumpe er relativt billig i anskaffelse og kan anvendes af en utrænnet person. Ulemperne er, at der er stor risiko for menneskelige fejl forbundet med aflæsning og notering af data. I simuleringen kommer detektorrør ud med

usikkerhed der er sammenlignelig med online metoder, hvilket kan tilskrives, at der kun udtages 24 måling pr. dag. Det vurderes dog at dette høje antal samlinger dagligt ville være urealistisk grundet stort behov for manuel arbejdskraft, men metoden kan sandsynligvis automatiseres delvist. Mere udvikling på dette område er nødvendigt.

*Elektrokemiske sensorer* har den fordel, at de er relativt billige i anskaffelse og drift og har et lineært output i måleområdet. Ulempen er, at de har en høj detektionsgrænse (måler ikke præcist i området 0-2 ppm). Desuden kan der være problemer med at sensorsignaler "drifter", hvilket betyder, at der skal foretages hyppige 0-punktskalibreringer. Sensorerne "opbruges" med tiden som følge af, at målemetoden er baseret på en kemisk reaktion. Problemet kan løses ved at periodisk måling på ude-luft og registrering som forskel mellem ude- og inde koncentration. Der bør indgå periodisk service (flere gange årligt) eller evt. udskiftning med bestemt interval. Nyeste sensorer fra Dräger er udviklet til, at regenererer automatisk, hvorfor signalet kan holdes stabilt gennem mange måneders og sandsynligvis års kontinuerlig drift.

Elektrokemiske sensorer i et centralt setup viste sig i simuleringen at være det næst billigste alternativ. En decentral løsning er dog kun 20 øre dyrere pr. stiplads pr. år. Samtidig er usikkerhed for begge alternativer med elektrokemiske sensorer på niveau med øvrige målesetup.

*Vådkemisk måling* er en nøjagtig metode, som også anvendes til forskningsformål. Der er lille risiko for interferens. Metoden består i at boble staldluften gennem en syreholdig flaske, hvorved ammoniak tilbageholdes. Efterfølgende kan væsken analyseres i et laboratorium. Ulempen ved metoden er, at det ikke er muligt at få online information om emissionen. Det er ikke realistisk at indsende vaskeflasker til laboratorium mere end én gang om måneden. Der kan ske menneskelige fejl under transport og analyse, f.eks. lækage, tab af flasker mv. samt fejl i elektronik på laboratorium. Hvis sådanne fejl opstår, tabes data for hele samplingsperioden. Fejl kan minimeres ved faste rutiner, service og protokoller. Simuleringen viste, at den vådkemisk metode er lidt dyrere end elektrokemisk målemetode og usikkerhed på den samlede emissionsbestemmelse er kun minimalt dårligere. Usikkerheden kan begrænses yderligere ved en mere præcis temperaturstyring.

*TDLAS* (Tunable Diode Laser Sensor) er et forholdsvis nyt måleprincip, der udnytter absorption af gasser i et meget smalt bølgespektrum. Dette betyder, at risiko for interferens er meget lille. Måleusikkerheden er forholdsvis lille og detektionsgrænsen lav. Responstiden er lav, og der er høj linearitet. Det er en forholdsvis kompakt sensor, der kan anvendes centralt eller decentralt. Sensoren er dog følsom over for støv og svingende temperatur, hvilket betyder, at den skal placeres i et tæt skab med temperaturstyring, da nøjagtigheden er afhængig af meget stabil temperatur. Der er ikke ret stort behov for kalibrering (måske 1 gang årligt som antaget i simuleringen). Ulempen ved metoden er den relativt høje indkøbspris.

Samlet må det konkluderes, at der ikke er væsentlig forskel på usikkerheden ved de udvalgte metoder til bestemmelse af emission, når der måles 24 målinger pr. dag over et helt år i 4 ud af 13 sektioner. Det skyldes, at den variation, der er resultat af målesystemusikkerheden, bliver minimeret ved det store antal målinger, der logges over et helt år. I denne situation er den usikkerhed, som skyldes målesystemet langt lavere end usikkerhed, der er forbundet med døgnvariationer, sektionvariationer og årstidsvariationer, og derfor får sensorvalg mindre betydning. I tilfælde af færre målepunkter over et år vil systemusikkerheden have større betydning.

Usikkerheder og omkostninger er vurderet på baggrund af laboratorie test, hvor ikke alle interfererende gasser og influerende parametre er medtaget. Priserne er baseret på enkelt styk indkøb på det givende tidspunkt og forbundet med væsentlig usikkerhed.

Pilotforsøget med de ovenfor beskrevne teknologier har bekræftet, at sensorerne kan performe inden for de forventede usikkerheder.

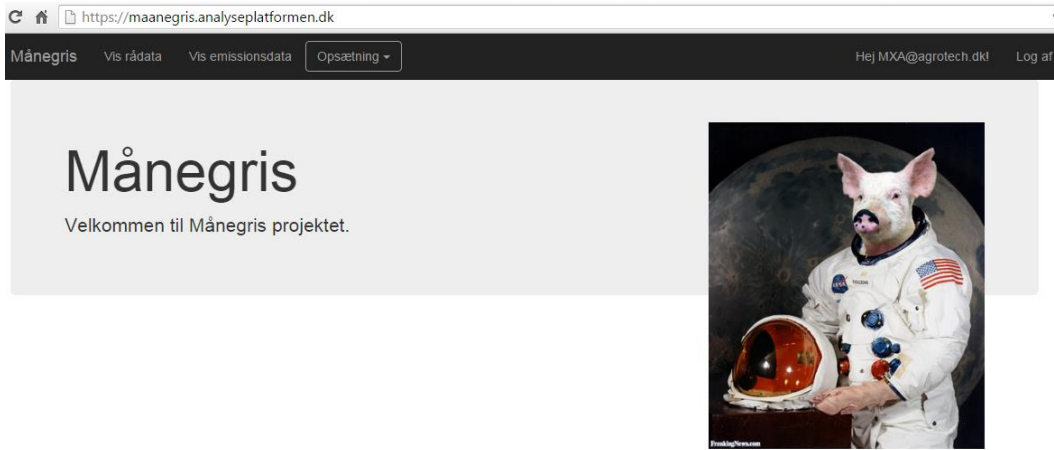
Vi forventer at kunne forbedre emissionsbestemmelsen yderligere ved at inkludere modellering, der tager højde for forklarende parametre som f.eks. målinger af N og pH i gylle samt temperatur. Vi forventer således at kunne forbedre flere af de udvalgte setups gennem modellering ud fra sekundære parametre.

### 3 Integration af data

Integration af data fra de forskellige sensorer er foretaget af AgroTech. Ud fra information om flow og ammoniakkoncentration kan emissionen beregnes, dels på sektionniveau og dels for hele besætningen. Til opsamling af data på fælles database, integration og præsentation af data har AgroTech udviklet en webbaseret analyseplatform. Denne platform gør det muligt at opsamle data fra en hvilken som helst sensor og præsentere dem samlet. Dette er dels gjort ved at aftale fælles standarder for datastruktur og dataoverførsel samt ved at oversætte data til fælles sprog og strukturer for disse i på en fælles database. Fra analyseplatformen kan man oprette nye kanaler og lokationer, hvorefter dataoverførslen og behandlingen forgår automatisk. Fra analyseplatformen kan man sammenligne forskellige sensorer med hinanden, eller man kan benchmarke sektioner mod hinanden eller beregne den samlede emission fra besætningen for forskellige perioder. Værktøjet kan skræddersyes til landmanden, således at han hurtig kan få et overblik over hans produktion og de informationer, der er vigtige for ham. I en fremtidig videreudvikling af systemet kunne man forestille sig, at systemet ville give en alarm, hvis en sektion eller besætningen samlet viser en tendens til at komme over det emissionsloft, der måtte være sat for besætningen. På den måde har landmanden mulighed for at optimere staldklimaet i tide. Landmanden vil også kunne give sine rådgivere eller teknologileverandører adgang til systemet, således at de kan hjælpe med at optimere produktionen. Derudover vil systemet også kunne melde emissionsdata ind til en kontrolinstans til brug for emissionsbaseret regulering.

Der kan logges på analyseplatformen via dette link: <https://maanegriskontrolplatformen.dk>

Der kræves dog bruger ID og kode for kunne bruge systemet. Det er p.t. kun projektpartnere, der har adgang til data. Adgangen kan tildeles med forskellige rettigheder.



Figur 8 Eksempel fra startside af analyseplatformen.

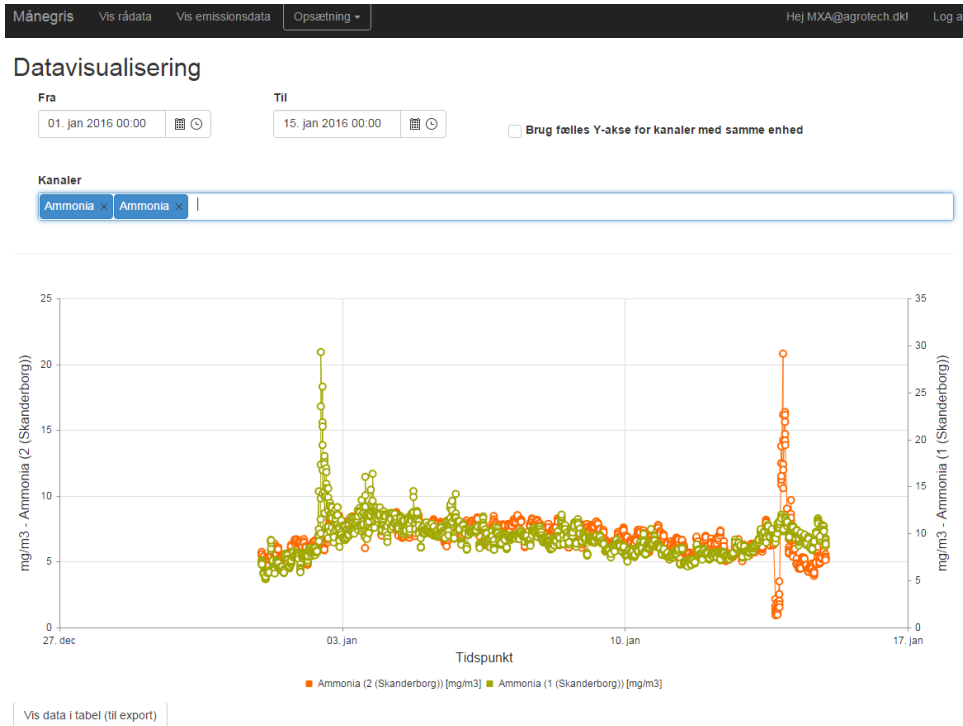
Analyseplatformen er opbygget på den måde, at alle sensorer melder deres data ind til en fælles database via et "Application Programming Interface" (API). Alle typer sensorer kan i princippet bruges så længe, data via en datalogger eller lokal server bliver leveret i JSON eller CSV format (kræver en parser) til databasen. Filen skal for hver sensor indeholde en unik kanal ID, der oprettes via analyseplatformen samt tidstempler i UTC og måleværdi. Inde fra Analyseplatformen skal man så tildele hver kanal ID en specifik lokation. En lokation beskriver fx en udluftningskanal i en given sektion og dennes fysiske karakteristika. Der oprettes en kanal pr. sensor, som skal installeres. Denne kanal beskriver: sensortype, måleenhed, et sigende navn (fx "MUX ID 6 CO2-B") mv. samt en association til en lokation, hvor sensoren sidder placeret, se figur 5.

ID	Navn	Beskrivelse	Type	Enhed	Lokation	Oprettet	Sidst opdateret	Note	Rådata	Kopier	Edit	Slet
8	Ude	udekanal, baggrundsluft		ppm	Skanderborg-Ude	30-04-2015 15:59:09	04-12-2015 14:22:09		Ja			
9	Prototype Datalogger	Flow hastighed		m/s	Ti-Lab	28-07-2015 08:19:36	28-07-2015 08:21:19	Bruges til test af upload-data	Ja			
10	Ultralyd sektion 3 decentral syd	MG datalogger 3		m/s	Skanderborg-3	29-07-2015 08:39:42	23-12-2015 14:35:08		Ja			
11	Ultralyd sektion 6 decentral syd	MG datalogger 4		m/s	Skanderborg-6	29-07-2015 08:39:49	23-12-2015 14:35:34		Ja			
12	ultralyd sektion 5 decentral syd	MG datalogger 5		m/s	Skanderborg-5	29-07-2015 08:39:53	23-12-2015 14:35:53		Ja			
13	Ultralyd sektion 6 deentral nord	MG datalogger 6		m/s	Skanderborg-6	29-07-2015 08:39:55	23-12-2015 14:40:12		Ja			
14	Ultralyd sektion 4 decentral nord	MG datalogger 7		m/s	Skanderborg-4	29-07-2015 08:39:58	23-12-2015 14:36:45		Ja			
15	Ultralyd sektion 5 decentral nord	MG datalogger 8		m/s	Skanderborg-5	29-07-2015 08:40:01	23-12-2015 14:37:17		Ja			

Figur 9 Eksempel på hvordan en kanal oprettes i analyseplatformen.

Det er desuden vigtigt at markere, om data er rådata eller behandlede data. Flere sensorer har en indsvingningstid, som er den tid, det tager at opnå 90 % af fuldt udslag. Med andre ord kan data ikke bruges, før målingen har stabiliseret sig omkring den sande værdi. Det

man typisk gør er at fjerne de første målepunkter i en ny dataserie, indtil signalet er stabilt. Der starter en ny datarække, hver gang multiplexeren skifter kanal. Rådata kan behandles enten centralt i databasen eller lokalt, før data bliver sendt til databasen. Når en kanal er oprettet, og data logges, vil man online kunne følge måledata fra den specifikke sensor via analyseplatformen.



Figur 10 Eksempel på visning af rådata via analyseplatformen.

Efter alle kanaler er oprettet, kan man oprette emissionskanaler, der beskriver hvilke kombinationer mellem gassensorer og flowmålere, der ønskes vist i grafik.

Månegrís Vis rådata Vis emissionsdata Opsætning - Hej MXA@agrotech.dk Log af

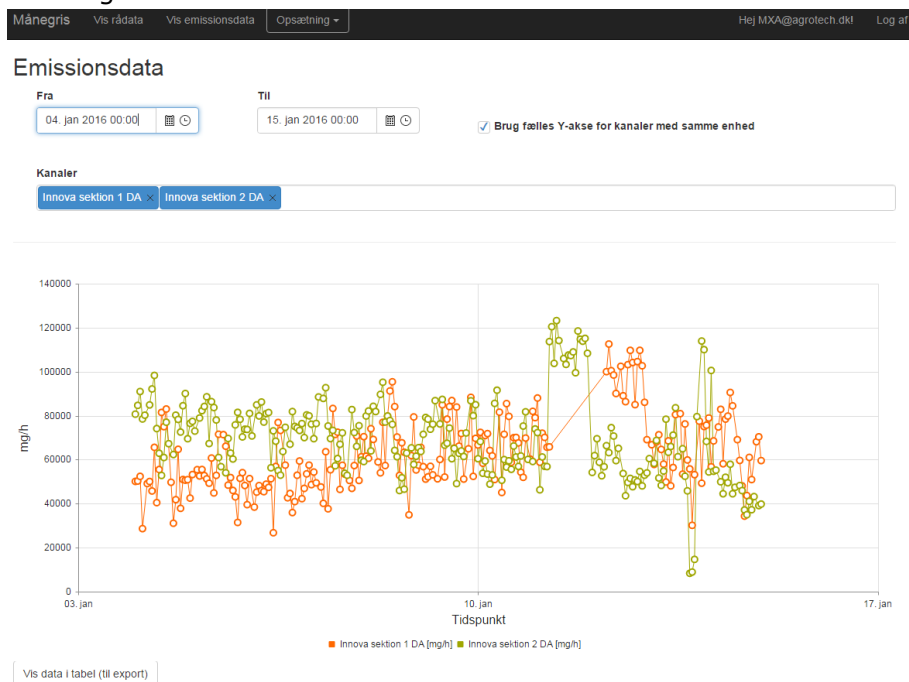
### Emissionskanaler

Opret ny emissionskanal

Navn	Flowkanal	Koncentrationskanal	
Innova sektion 1 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 2 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 3 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 4 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 5 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 6 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 8 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova sektion 7 DA	DynamicAirTotalAirFlow	Ammonia	Slet
Innova før renser DA	DynamicAirCETotalAirFlow	Ammoniak efter renser	Slet
Innova efter renser DA	DynamicAirCETotalAirFlow	Ammoniak før renser	Slet
Drager sektion 3 DA	DynamicAirTotalAirFlow	NH3 (Dräger P8000 EC) Sektion 3	Slet
Drager sektion 4 DA	DynamicAirTotalAirFlow	NH3 (Dräger P8000 EC) sektion 4	Slet

Figur 11 Eksempel på hvordan man opretter en emissionskanal

I ovenstående figur kan man f.eks. se de oprettede emissionskanaler. Kanal: "Innova sektion 1 DA" er f.eks. emissionen fra sektion 1 beregnet ud fra Innova ammoniaksensor og DynamicAir flowsensor. Det er også muligt at pulje flere sektioner og se emissionen fra alle sektioner sammenlignet med nogle få. På denne måde kan analyseplatformen både bruges til at sammenligne sensor-performance, emission mellem sammenlignelige sektioner eller hold og til at bestemme den ugentlige, månedlige og årlige emission på sektions- eller besætnings niveau.



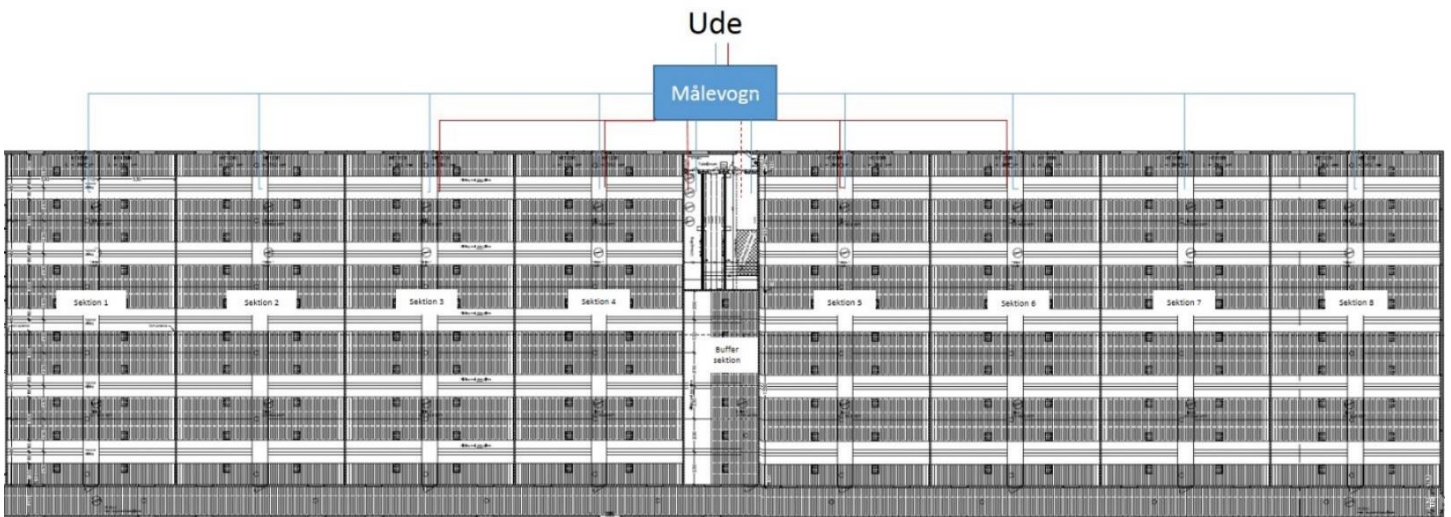
Figur 12 Eksempel på visning af emission i mg NH<sub>3</sub> per time for sektion 1 og 2.

## 4 Resultater fra fuldskala test

I dette afsnit er vist eksempler på beregnede emission ved kombination af forskellige sensorer. Grundet de mange kombinationsmuligheder har vi udvalgt nogle eksempler.

### Forsøgssetup

Fuldskala afprøvning af de udvalgte sensorer og integrationen af data fra disse blev foretaget på en eksisterende slagtesvineproduktion fra 2012 bestående af 8 sektioner, med ca. 350 stipladser i hver sektion. Stalden er traditionelt indrettet med 2/3 spaltegulv og undertryksventilation med combi diffust luftindtag. Det faste gulv er placeret i længderetningen under fodertruet. Stalden er forsynet med delvis luftrensning, hvor ca. 20 % af den samlede luftkapacitet via en central luftkanal på loftet bliver trukket ud til en biologisk luftreenser fra SKOV A/S.



Figur 13 Forsøgsstalden og målevogn. De blå linier indikerer, hvilke målepunkter der benyttes til referencemåling med Innova, og de røde linier indikerer, hvilke målepunkter der benyttes til måling med udvalgte gassensorer ved FORCE og udvalgte flowsensorer ved Teknologisk Institut.

Den samlede emission fra stalden blev målt af AgroTech via fotoakustisk måleudstyr fra Innova til måling af ammoniakkoncentration i samtlige sektioner, før og efter luftreenser samt udekonzentrationen (baggrunden), som måles ved indsugning på loftet af stalden. Udstyret er centralt placeret i opvarmet målevogn, og luften suges fra de enkelte målepunkter til målevognen vha. 8 mm teflonslanger, der er opvarmet og isoleret. For at undgå tilstopning af slangerne, er der placeret et 40  $\mu$  partikelfilter for enden af hvert sugepunkt. Luftflowet fra alle afkast måles med trykdifferens målere fra Skov af mærket Dynamic Air.

Udvalgte sensorer til måling af gaskonzentration og flow er afprøvet i sektion 3,4,5,6, før eller efter luftreenser, og for gassensorenes vedkommende måles baggrunden. Ved centralt målesetup benyttes samme slangesystem som til referencemålingen, hvorfor der derved måles på præcis samme luft.



Figur 14 AgroTechs målevogn placeret midt på forsøgsstalden. Målevognen indeholder måleudstyr til centrale analyser samt lognings- og kommunikationsudstyr.

De udvalgte sensorer til måling af ammoniak omfatter elektrokemisk sensor fra Dräger af typen polytron 8000 i en central og decentral placeret udgave. Den decentrale udgave blev placeret i sektion 3-6. De kræver ingen pumpe, da luften diffunderer passivt ind forbi sensoren. Desuden afprøves en TDLAS (Tuneable Diode Laser Sensor) fra firmaet Axetris.

Sensorer til måling af CO<sub>2</sub> koncentration omfatter infrarøde sensorer fra firmaerne CO2Meter og E+E.

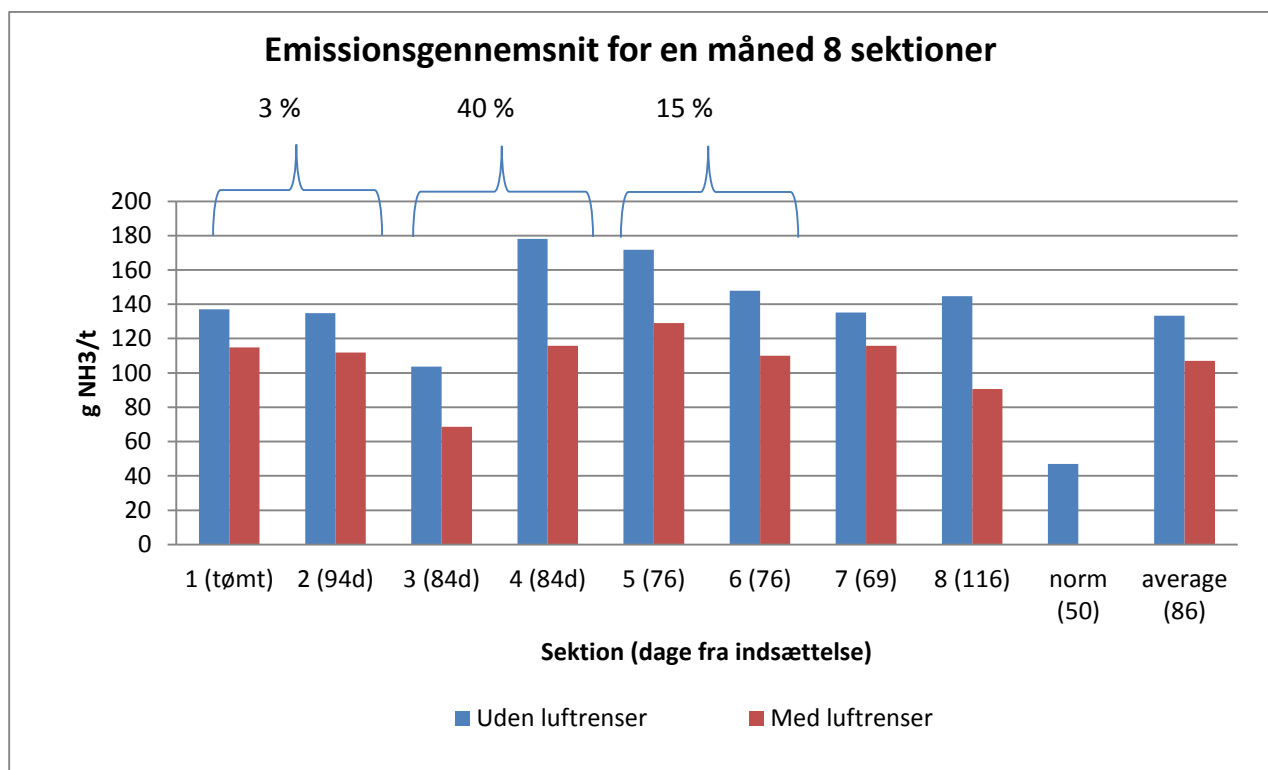
Udvalgte sensorer til måling af luftflow på forsøgsstalden omfatter en ultralydsmål og en klapsensor, begge håndbygget af Teknologisk institut. Desuden testet en målevinge i en kortere periode.



Figur 15 Billeder af de forskellige sensorer, der blev brugt under fuldskala afprøvningen på forsøgsstalden.



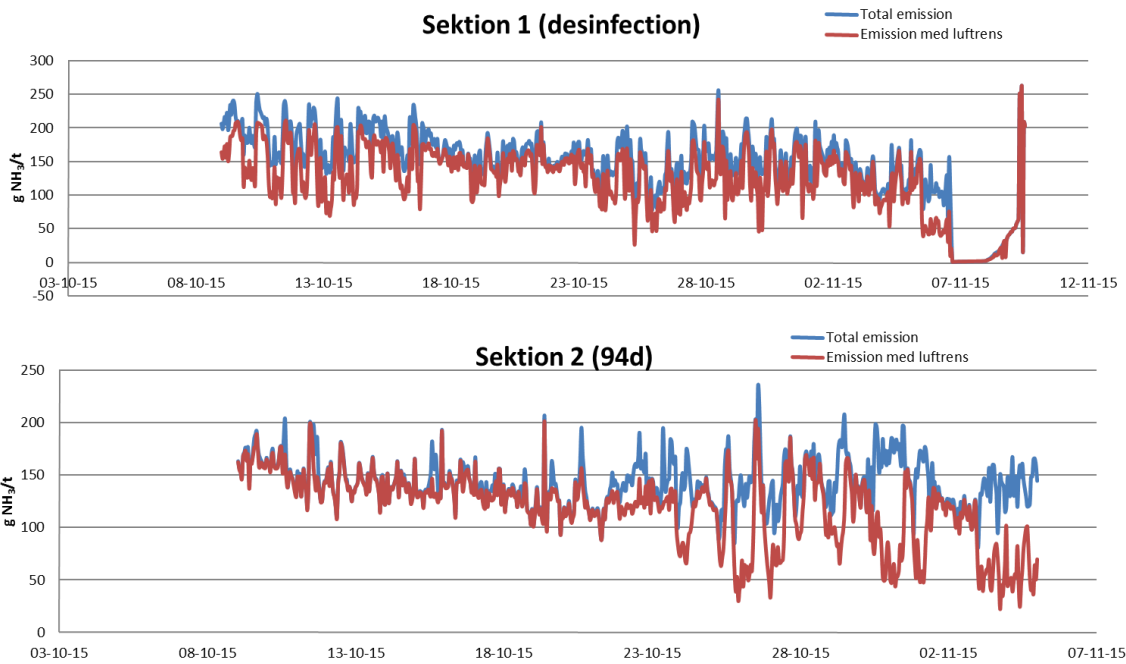
## Emissionsberegninger



Figur 16 Ammoniakemissionen fra de 8 sektioner i forsøgsstalden med og uden luftrensere. Emissionen er angivet i gram ammoniak pr. time pr. sektion. Der er ca. 350 dyr i hver sektion. Nummeret i parentes angiver antallet af dage dyrene har været i stalden

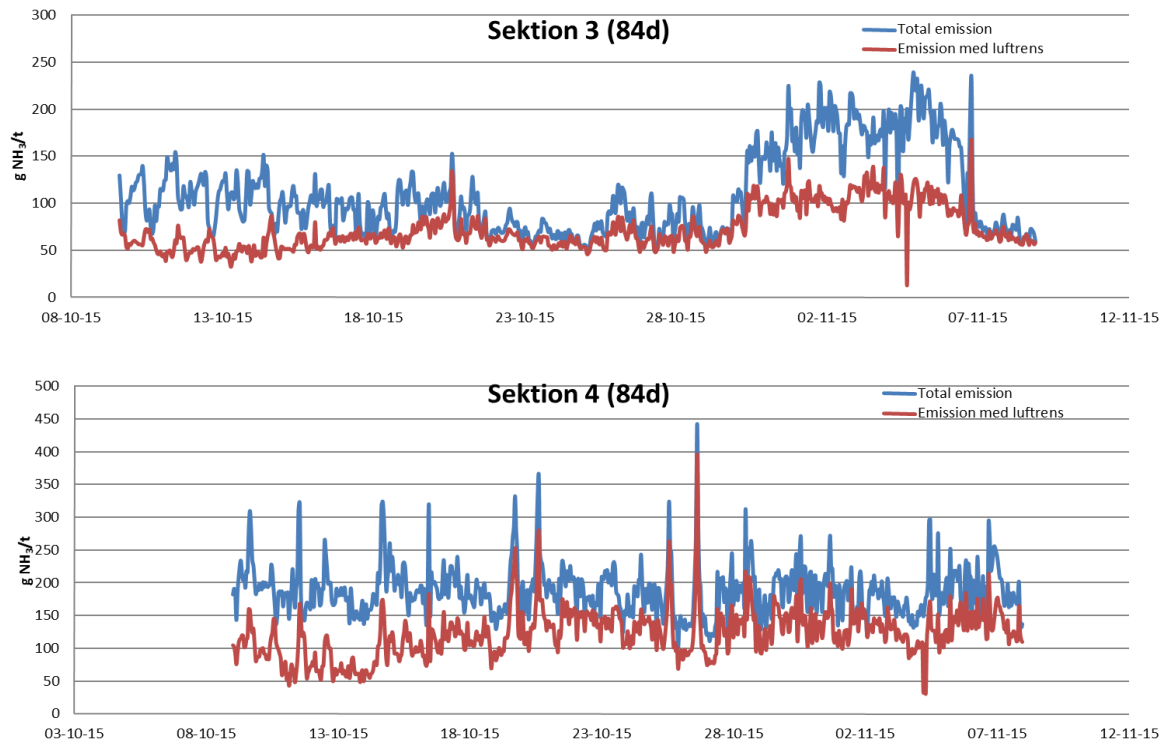
I figur 16 vises resultater beregnet på baggrund af ammoniakkoncentration målt med Innova og flowmåling målt med trykdifferensmåler fra SKOV.

Det bemærkes, at der er stor forskel på emissionen fra forskellige sektioner med sammenlignelig dyrealder og belægning, se f.eks. sektion 3 og 4, hvor forskellen er 40 %. Denne forskel skal ses i sammenhæng med, at der er målt kontinuerligt over en helt måned, og at indsættelsesdatoen og derved dyrenes alder er ens. De 6 første sektioner, hvor emissionen er afbilledet har to og to samme indsættelsesdato. I de tre sidste søjler mod højre kan man se den gennemsnitlige emission fra alle sektioner sammenlignet med norm emissionsfaktoren udregnet for en lignende sektion. Det ses, at emissionen over en måned er mere end dobbelt så høj, som den beregningsmæssigt skulle have været, hvis der var målt et gennemsnit over et år. Forventeligt skulle emissionen være lavere om vinteren, hvor staldtemperaturen er lavere og luftskiftet mindre. Det skal bemærkes, at den gennemsnitlige vægt på dyrene under forsøget var højere end middelalderen (norm=50 kg.). Luftrenseren fjerner gennemsnitlig i perioden ca. 20 % af kvælstoffet. Der ses ikke nogen klar sammenhæng mellem dyrealder og emission.



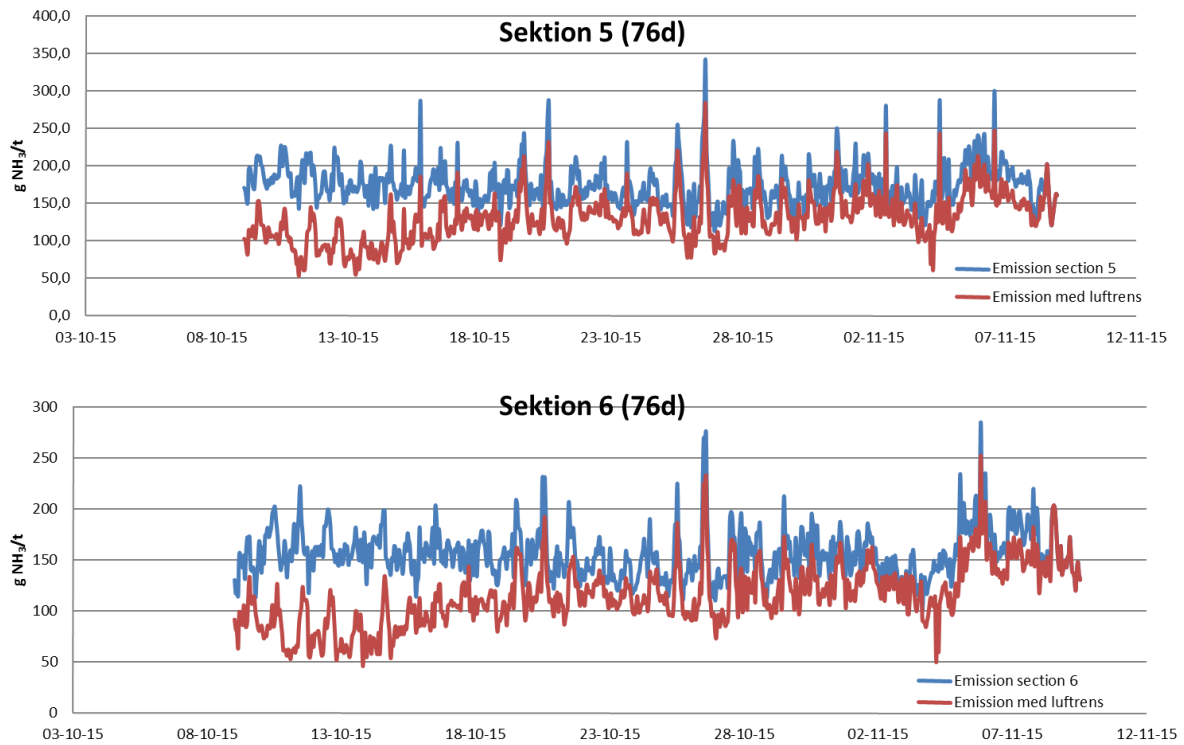
Figur 17 Figuren viser emissionsdata fra den sidste måned før slagting

Emissionen fra sektion 1 og 2 ligger på samme niveau, hvilket er forventeligt, da der ikke er forskel på størrelse eller belægning i de to stalde. I slutningen af perioden for sektion 1 ses at emissionen falder til 0, hvor dyrene tages ud og ventilationen stoppes.



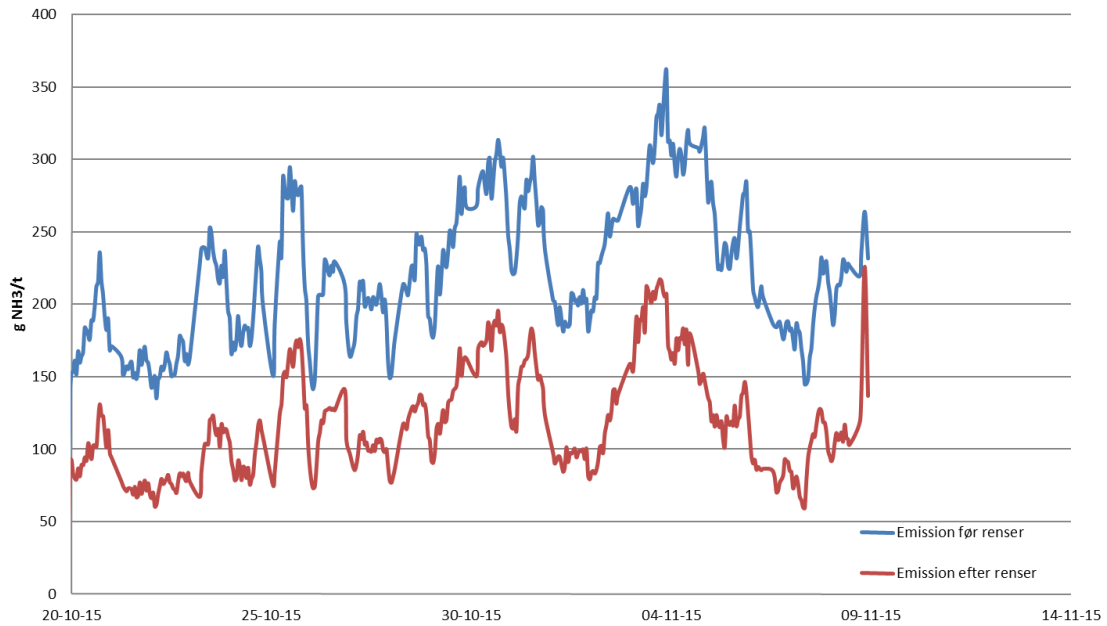
Figur 18. Figuren viser emissionsdata for sektion 3 og 4.

Sektion 4 ligger i gennemsnit 40 % over sektion 3. Det ses, at emissionen fra sektion 4 det meste af perioden ligger godt over 100 g NH<sub>3</sub>/time, mens den for sektion 3 i størstedelen af perioden ligger et godt stykke under 100 g NH<sub>3</sub>/time. I slutningen af perioden tager emissionen et stort hop op i sektion 3. I sektion 5 og 6 minder emissionsudviklingen utroligt meget om hinanden, skønt der i gennemsnit er 15 % forskel. Det kan bemærkes, at stort set alle toppe og dyk er korrelerede mellem de to sektioner.



Figur 19 Emissionsdata for sektion 5 og 6.

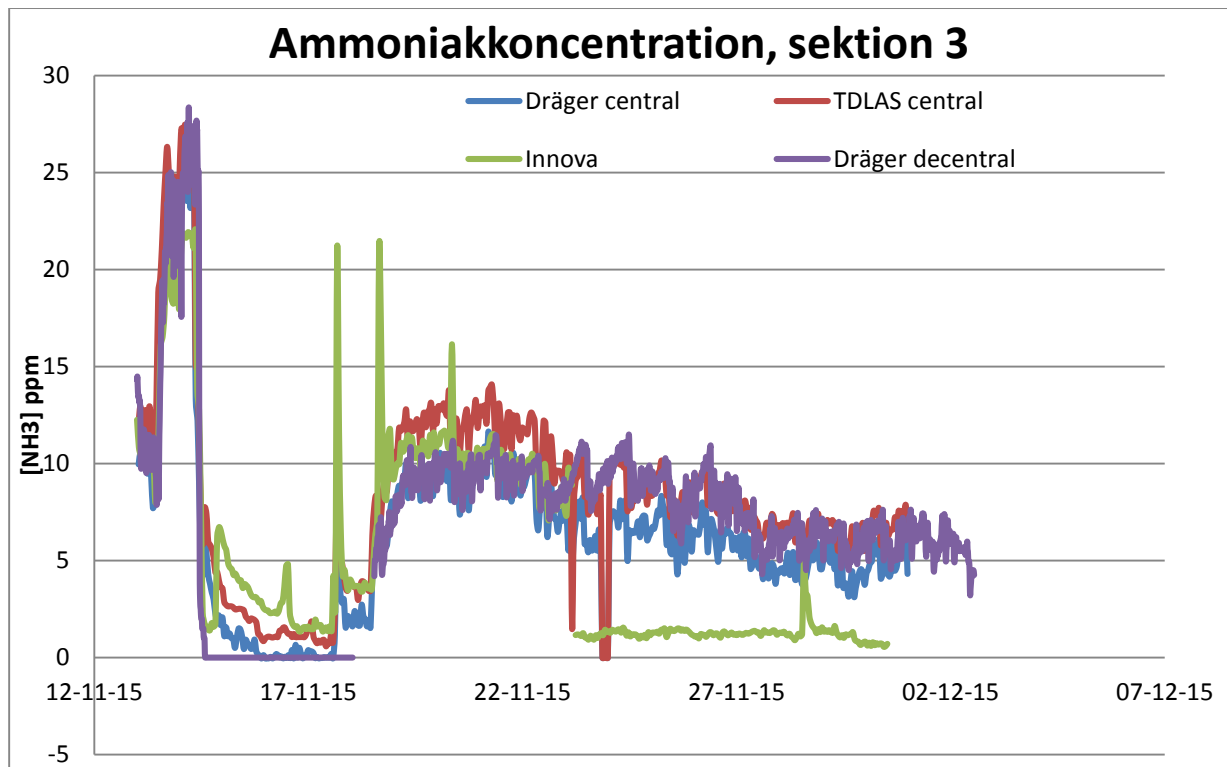
Effekt af luftrensere



Figur 20 Emissionen af ammoniak før og efter den biologiske luftrensning, der renses en del af luftmængde gennem et centralt afkast.

Effekten på luftrenseren ligger i perioden på gennemsnitlig ca. 50 %. Det ses, at den mængde kvælstof, der fjernes i luftrenseren, er temmelig konstant og uafhængig af belastningen. Den største procentvise reduktion ses således ved de lave belastninger.

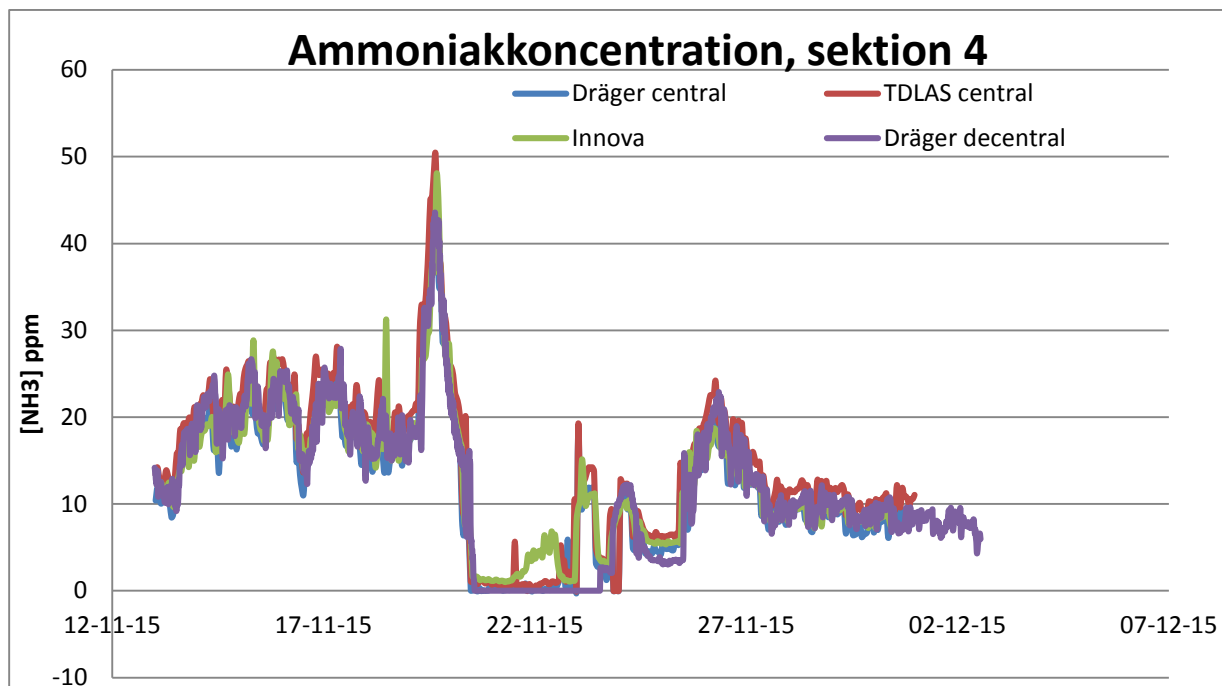
## Sammenligning mellem ammoniaksensorer



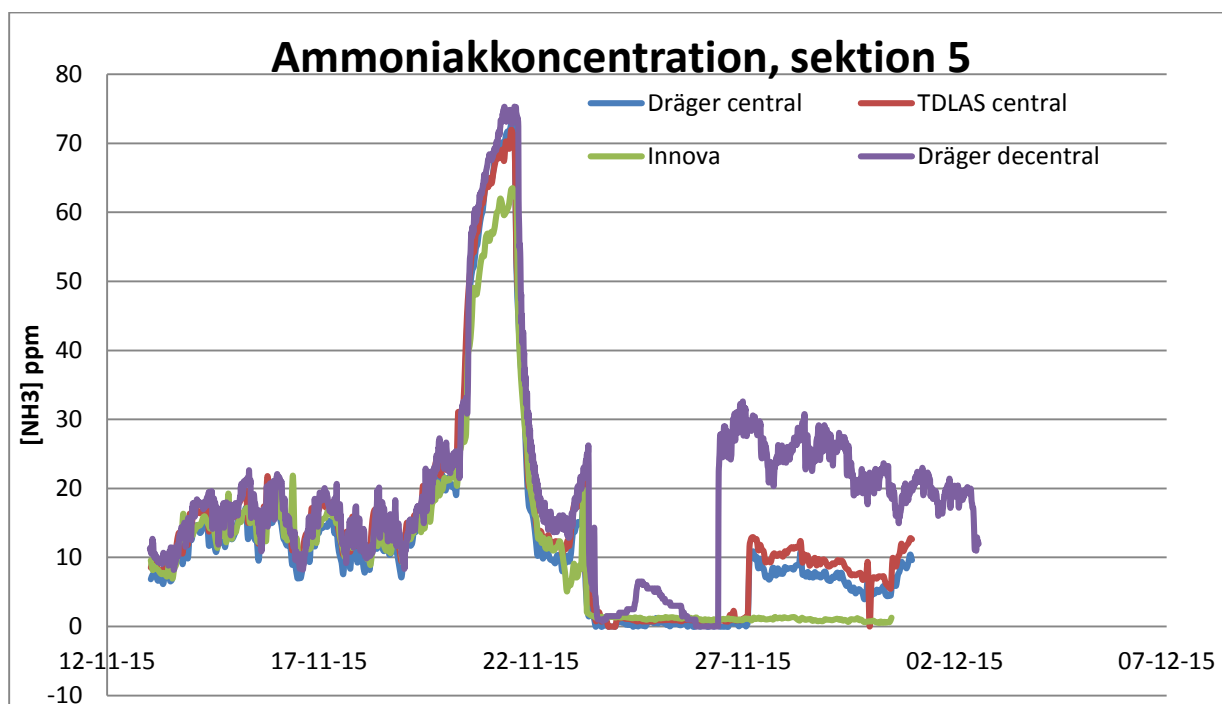
Figur 21 Ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer i sektion 3.

I det følgende afsnit ses en sammenligning mellem sensorerne: Dräger central, Dräger decentral, TDLAS central og Innova central.

Efter den 24-11-15 ses et udfald for Innova signalet sandsynligvis pga. tilstopning af filter, der resulterer i for lavt flow i måleslanger.

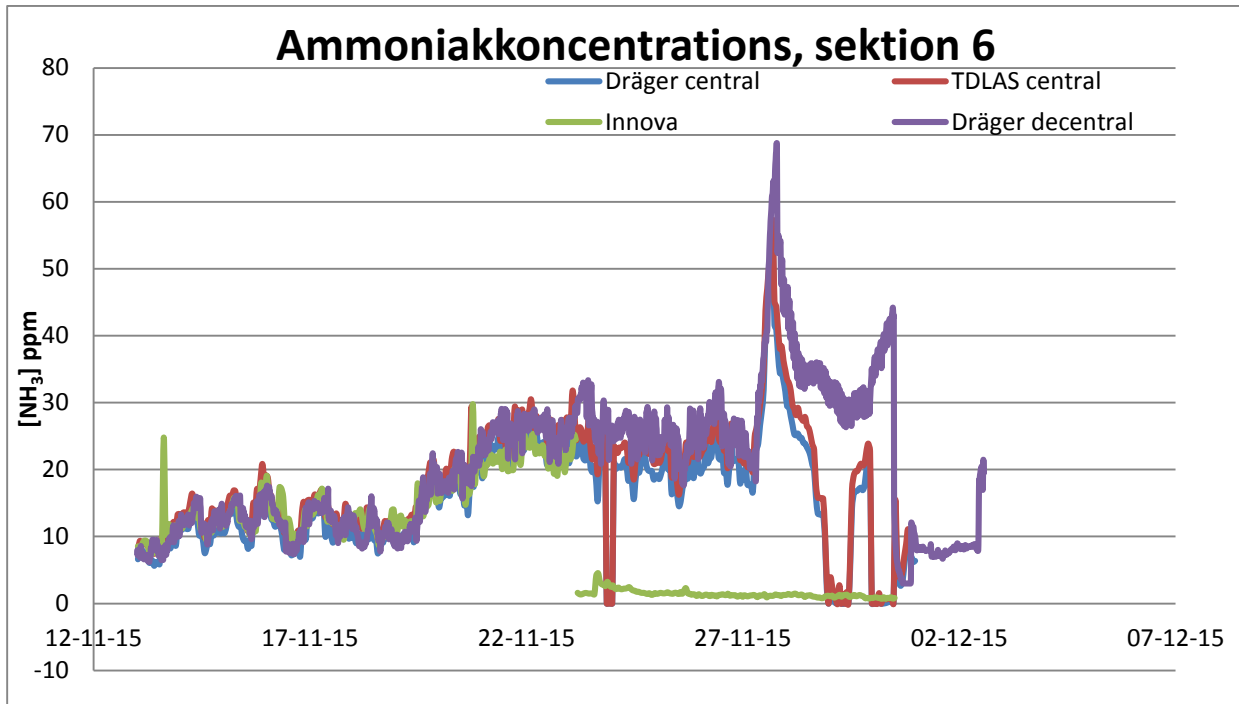


Figur 22 Ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer i sektion 4



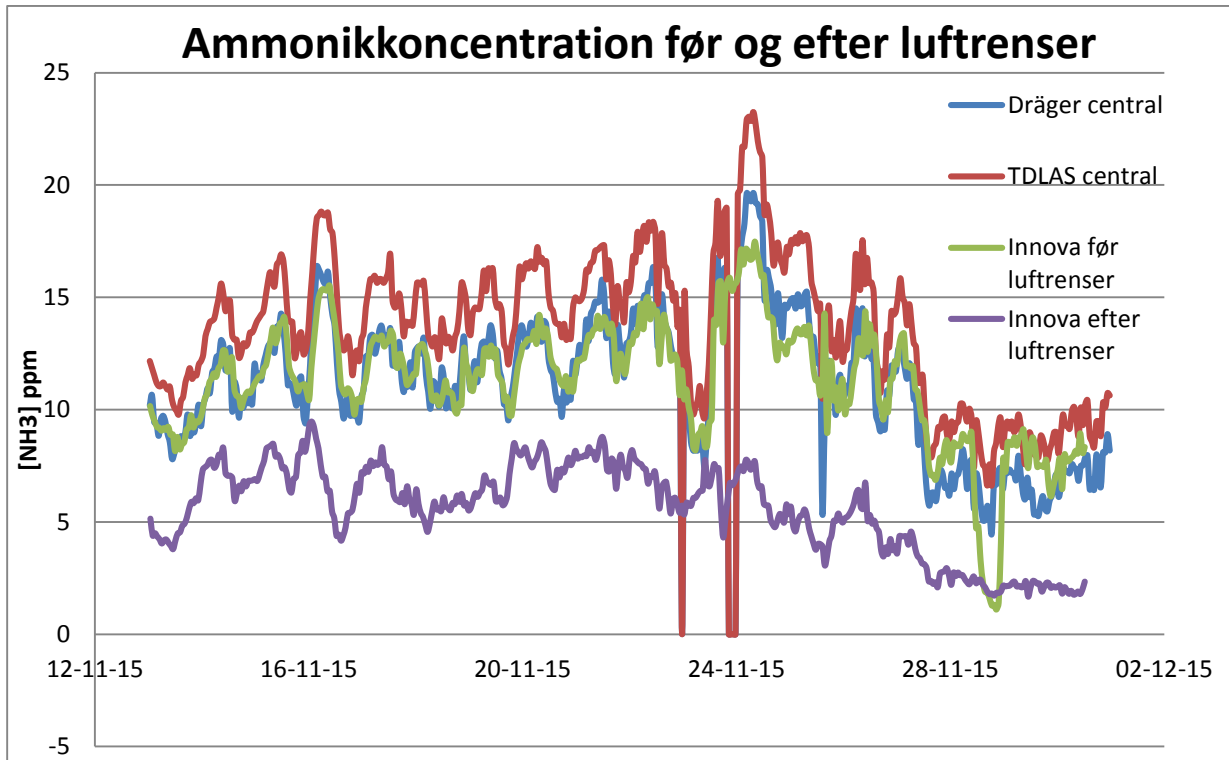
Figur 23 Ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer i sektion 5.

Der er god overensstemmelse med koncentrationen målt med alle 4 sensorer. Fra omkring den 26. november 2015 startes et nyt hold i sektion 4. Den høje top i fig 23 skyldes udslusning af gylle.



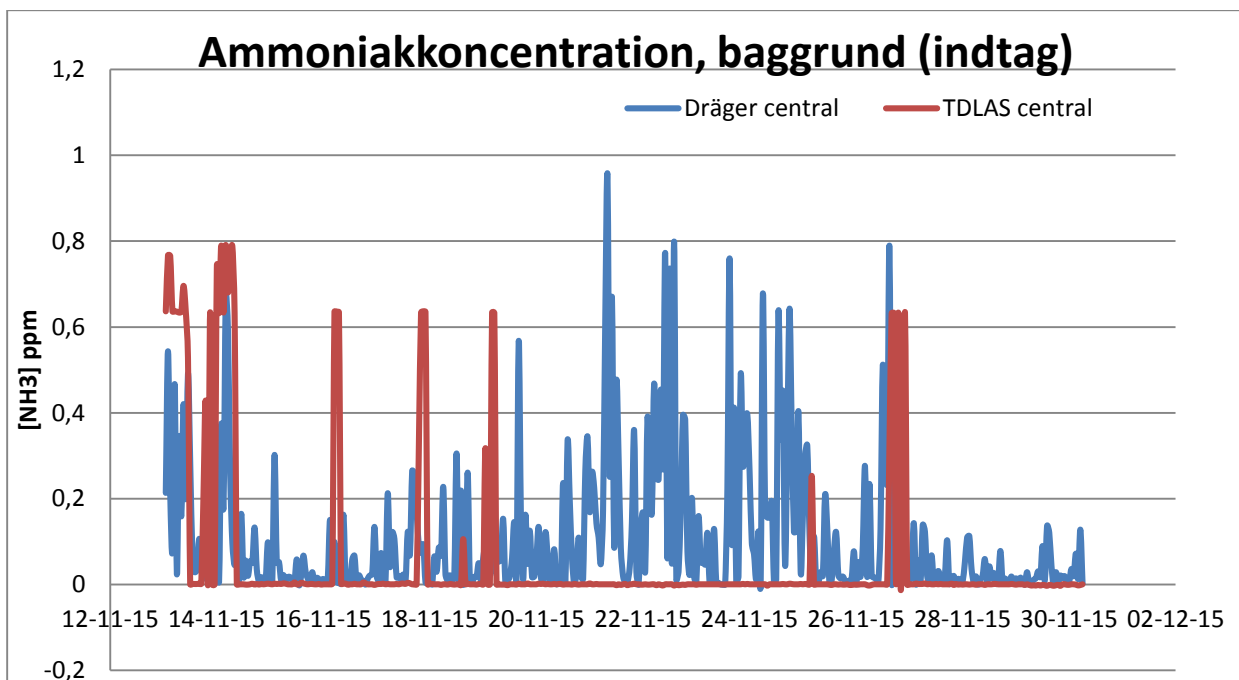
Figur 24 Ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer i sektion 6.

Der ses igen et udfald for Innova målingen i sidste del af perioden. Disse perioder med udfald indgår ikke statistisk i sammenligningen.



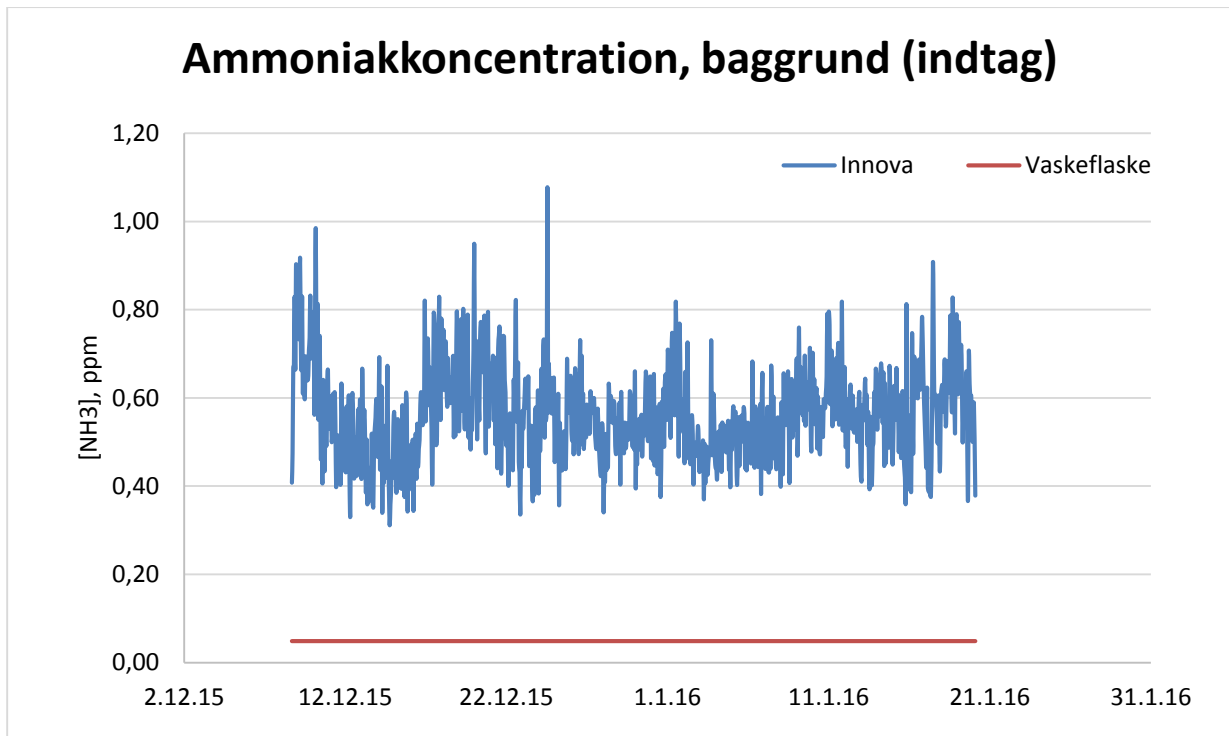
Figur 25 Ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer i centralkanal før luftrensere samt målt med Innova efter rensere (lilla).

Af figur 25 fremgår det, at alle sensorer har samme udsving, men der er en væsentlig parallelforskydning for TDLAS, som måler lidt højere koncentration. Rensningseffekten er i perioden omkring 50 %.



Figur 26 Baggrundskoncentrationen ved luftindtaget til stalden målt med Dräger og TDLAS





Figur 27 Baggrundskoncentrationen ved luftindtaget til stalden målt med Innova og vaskeflaske

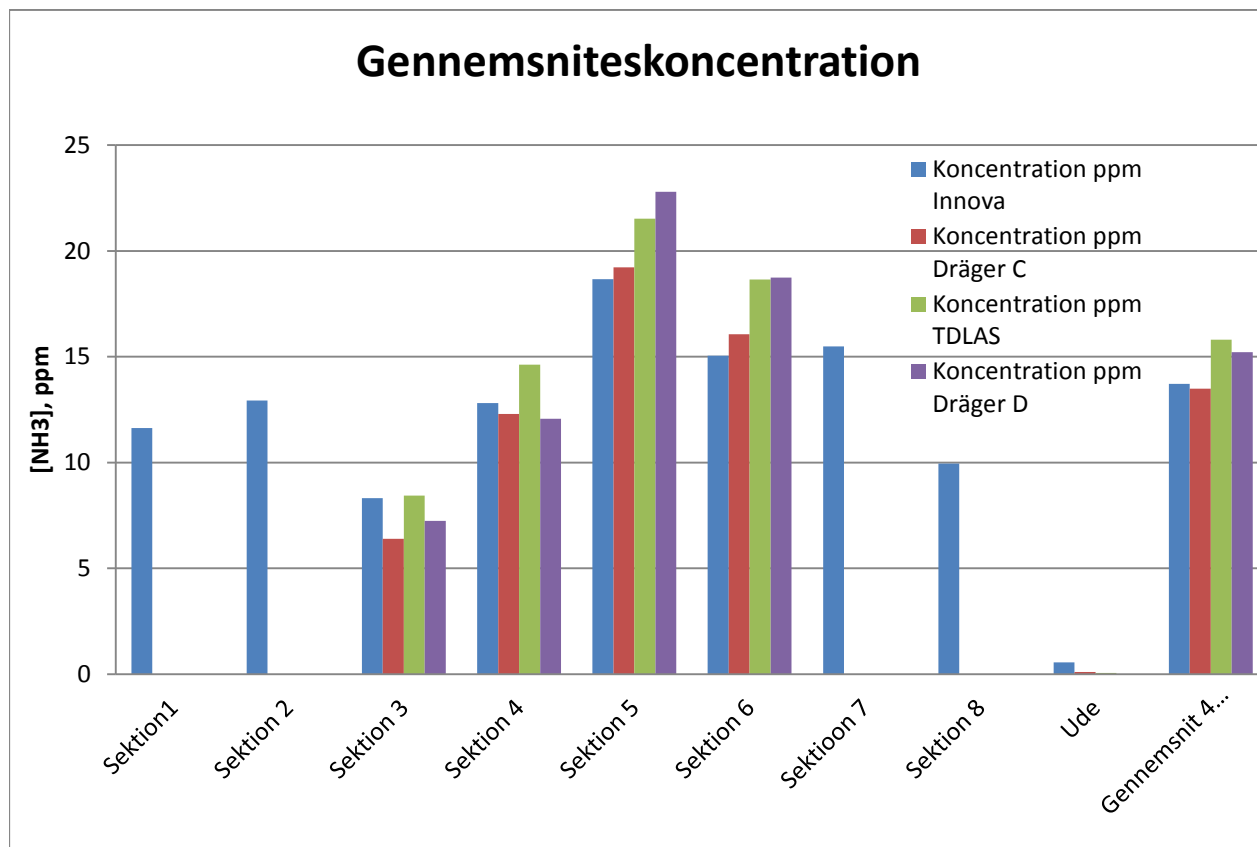
Målingerne for baggrund er udtaget på loftet over svinestalden, hvor luften gennem diffust luftindtag suges ned i staldsektionerne. Det ses at TDLAS'en "cut off" værdi ligger omkring 0,7 ppm.

Af fig. 27 fremgår det at koncentrationen i luftindtaget, målt med Innova, er ca. 0,5 ppm højere end referencemetoden målt med vaskeflasker.

Tabel 4 Middel baggrundskoncentration og standardafvigelse målt med 4 forskellige sensorer.

Måleperiode		Innova	Vaskeflaske	Dräger central	TDLAS central
13.11.2015-30.11.2015 & 08.12.2015-20.01.2016	Middel	0,56	0,049	0,11	0,057
	Std.afv.	0,11	0,0049	0,16	0,18

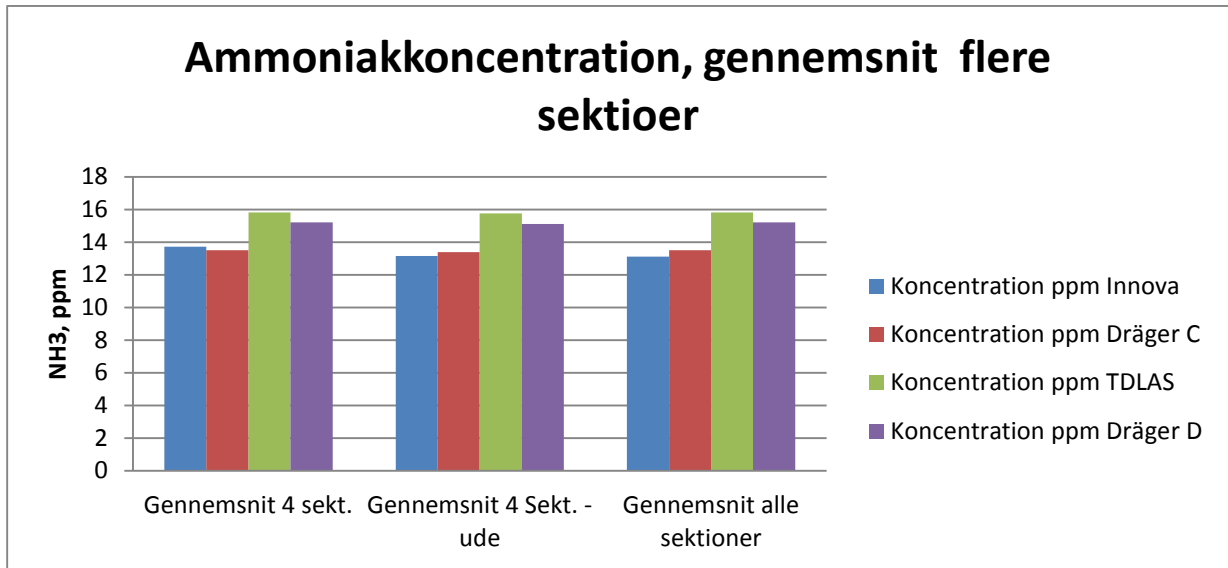
Den gennemsnitlige ammoniakkoncentration målt med Dräger og TDLAS ligger tæt på referencemålingen målt med vaskeflaske. Innovamålingen ligger ca. 0,5 ppm for højt. Dette er ikke nødvendigvis et problem, da der kan korrigeres for denne forskydning ved beregningen af emissionen.



Figur 28 Gennemsnit af ammoniakkoncentrationen målt med 4 forskellige sensorer og i forskellige sektioner.

Der ses en fin overensstemmelse mellem de gennemsnitlige koncentrationer målt i hver sektion.

Den centralt placerede Dräger-sensor performer bedst. Den ligger bedre end den decentralt placerede Dräger-sensor og TDLAS sensor, når der sammenlignes med referenceinstrumentet fra Innova. Målinger i alle 8 sektioner frem for 4 giver kun minimal forskel i praktiske målinger over en måned.



Figur 29 Gennemsnitskoncentration for alle 4 stalde med og uden fratrækning af baggrund (udeluft). Sidste 4 søjler sammenligner gennemsnittet målt med innova i 8 sektioner med de resterende sensorer målt i 4 sektioner.

## Usikkerhed med måling i x antal sektioner

### 4.4

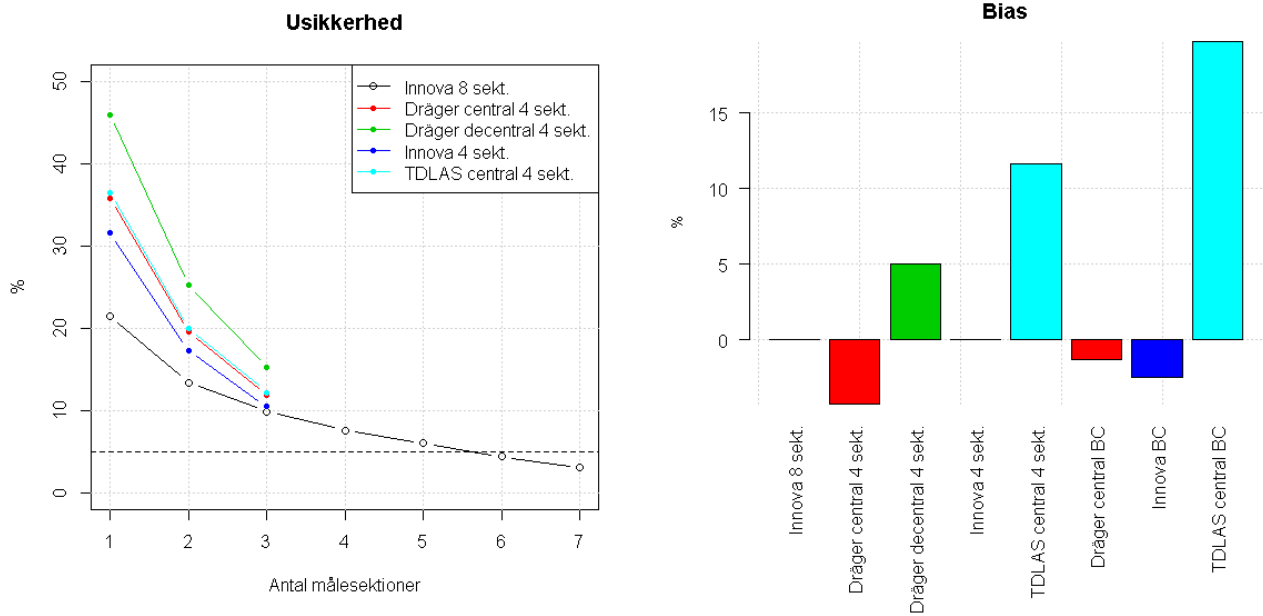
Til at starte med har vi beregnet den samlede systemusikkerhed ud fra producenternes oplyste værdier. Disse usikkerheder er senere blevet efterprøvet i laboratorietest ved FORCE TECHNOLOGY, og beregninger af systemusikkerheden på årsbasis er blevet opdateret. I denne tredje fase har vi brugt data fra en fuldskala test til at beregne systemusikkerheden ved at holde de forskellige sensors performance op mod en reference. Det er således også muligt at bestemme de antal sektioner, der skal til for at holde usikkerheden under f.eks. 5 %. Dette er dog under forudsætning af, at der kun måles i en kortere periode på 10 dage. Målinger over et år vil øge sikkerheden.

Der blev udvalgt data i perioden 12. – 22. november 2015, da denne periode var uden synlige mangelfulde data, data udfald m.m., se figur 30 nedenfor.

Der blev for alle sensorer og sektionskombinationer beregnet den procentvise afvigelse fra target-emissionen over den valgte periode mellem den 12. – 22. november 2015. Targetemissionen er emissionen målt med Innova med relevant antal sektioner (4 eller 8).

Ud fra de procentvise afvigelser for alle mulige kombinationer med et givet antal målesektioner (dog max 2000 kombinationer tilfældigt trukket fra alle mulige kombinationer) blev der beregnet bias som den gennemsnitlige afvigelse og usikkerheden som standardafvigelsen af den procentvise afvigelse.

Resultatet falder ud som forventet, se nedenfor. For at opnå en emissionsbestemmelse med under 5 % sikkerhed skal der her i praksis bruges 6 målesektioner, formentligt grundet den relative store dag-til-dag og sektion-til-sektion variation, se modellen i figur 30.

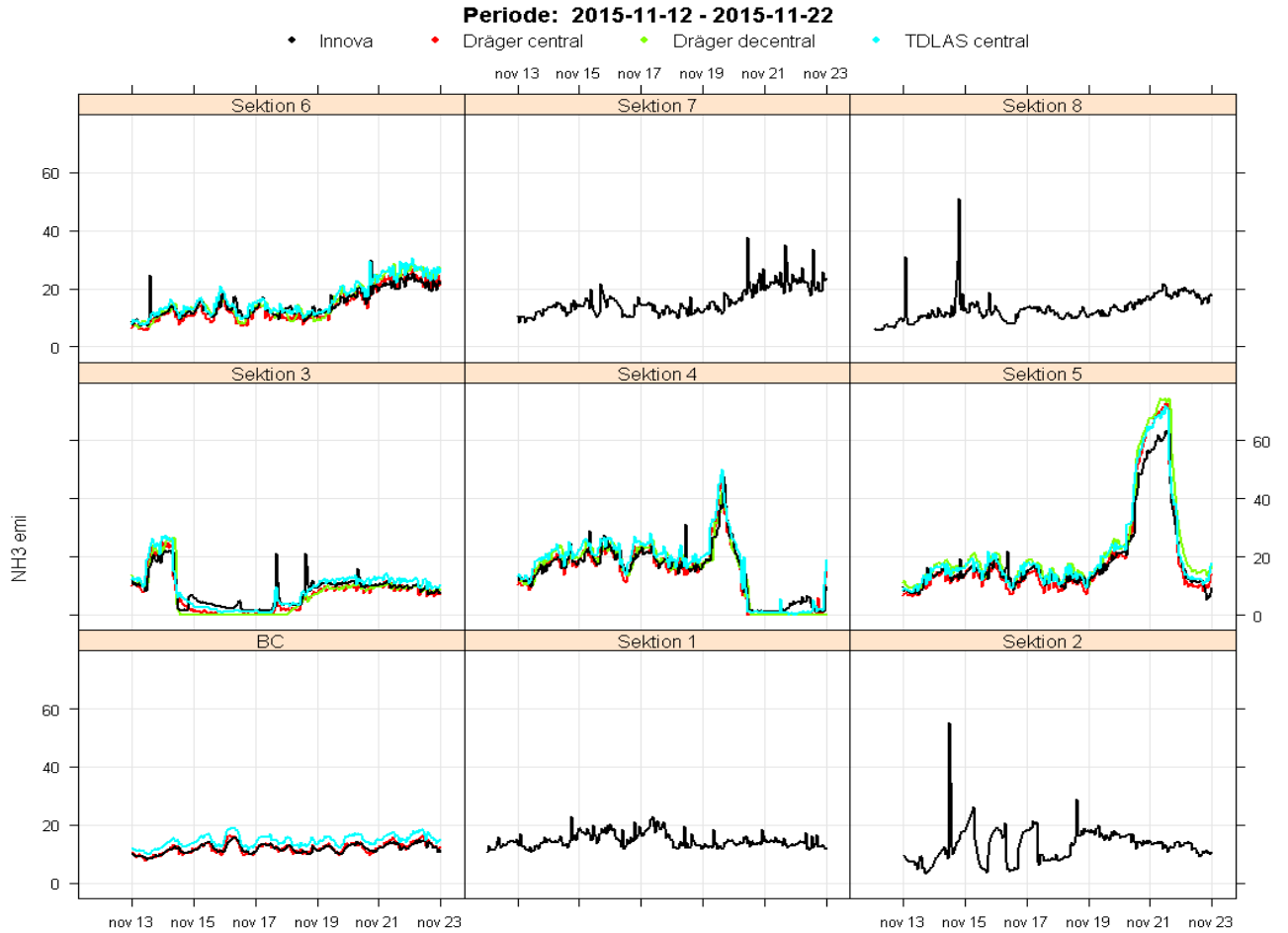


Figur 30 Venstre panel: NH<sub>3</sub>-emissionsbestemmelsesusikkerheder som funktion af stigende antal målesektioner og forskellige sensorer. Højre panel: Den estimerede bias (systematisk afvigelse) for de forskellige sensorer.

Det ses på figur 30, at usikkerheden falder eksponentielt som funktion af måling i flere sektioner. Måling i 8 sektioner med Innova er defineret som "den sande værdi" altså referencen. Ved måling i 4 sektioner ud af 8 bliver usikkerheden ca. 7,5 %. Dette skyldes variation mellem sektioner, hvilket skyldes forskellige tidspunkter for indsættelse af grise. Set over et år vil forskellen med indsættelsesdato udjævne sig. Af tabel 5 fremgår det, at den centrale Dräger-sensor, for måling i 3 sektioner, har en lidt højere usikkerhed end den centrale, hvilket ikke er hvad vi forventede ud fra simuleringerne. En forklaring kan være, at den centrale Dräger-sensor analyserede på præcis den samme luft som referencemålingen med Innova. I forhold til bias kan vi se, at Dräger-sensoren har den mindste fejl, mindre end +/- 5 %. Det kunne tyde på, at der sker et tab af ammoniak gennem filter, slange, multiplexer og pumpe, da Dräger sensorerne til central og decentral installation basalt set er ens. Alligevel måler den decentrale sensor systematisk ca. 10 % højere end den centrale og 5 % højere end Innova sensoren.

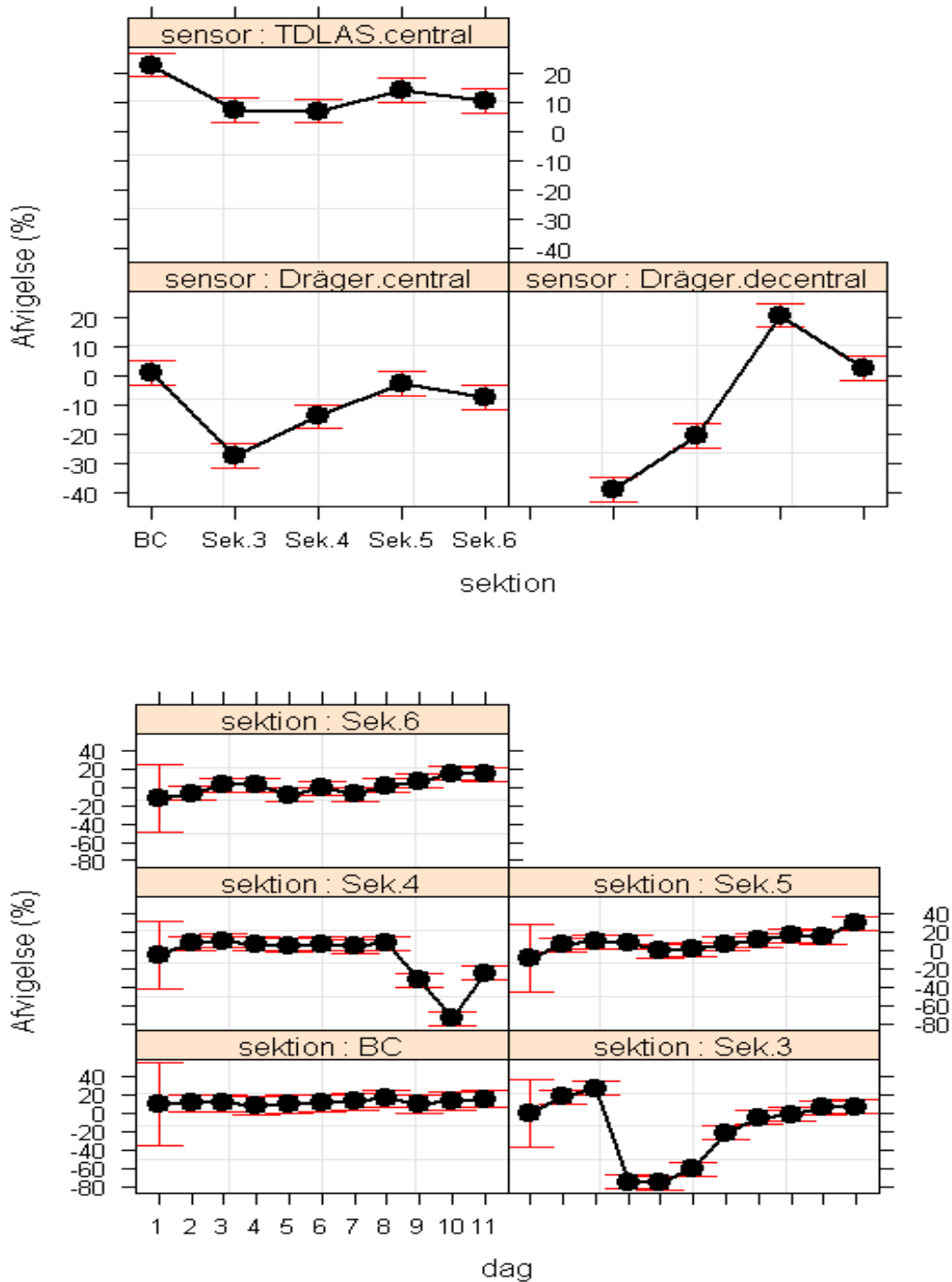
Tabel 5 Estimerede bias (systematisk afvigelse) og emissionsbestemmelsesusikkerheder som funktion af stigende antal målesektioner og forskellige sensorer.

\$`Innova 8 sekt.`				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	1	Innova	0	21.5
2	2	Innova	0	13.4
3	3	Innova	0	9.9
4	4	Innova	0	7.6
5	5	Innova	0	6
6	6	Innova	0.3	4.4
7	7	Innova	0	3.1
\$`4 sekt.`				
\$`4 sekt.`\$`Antal målesektioner: 1`				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	1	Dräger central	-4.3	35.8
2	1	Dräger decentral	5.0	46.0
3	1	Innova	0.0	31.6
4	1	TDLAS central	11.6	36.5
\$`4 sekt.`\$`Antal målesektioner: 2`				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	2	Dräger central	-4.3	19.6
2	2	Dräger decentral	5.0	25.2
3	2	Innova	0.0	17.3
4	2	TDLAS central	11.6	20.0
\$`4 sekt.`\$`Antal målesektioner: 3`				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	3	Dräger central	-4.3	11.9
2	3	Dräger decentral	5.0	15.3
3	3	Innova	0.0	10.5
4	3	TDLAS central	11.6	12.2
\$`4 sekt.`\$`Antal målesektioner: 4`				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	4	Dräger central	-4.3	NA
2	4	Dräger decentral	5.0	NA
3	4	Innova	0.0	NA
4	4	TDLAS central	11.6	NA
\$BC				
	Antal målesektioner	Sensor	Bias (%)	usikkerhed (%)
1	1	Dräger central	-1.3	NA
2	1	Innova	-2.5	NA
3	1	TDLAS central	19.7	NA



Figur 31 NH<sub>3</sub>-koncentration målt i sektionerne 1 til 8 og før luftrenser mellem den 12. - 22. november 2015.

På figur 21 ses samtidige målinger af ammoniak med 4 forskellige sensorer i 4 sektioner samt før luftrenser (BC). Det kan bemærkes, at der generelt er god overensstemmelse mellem kurveforløbene. Målinger med TDLAS ser generelt ud til at være højere end de øvrige målinger.



Figur 32 Modelestimerede procentvise afvigelser til Innova (4 sektioner). Afvigelsen blev modelleret i en lineær model med sensor, sektion og måledag som forklarende variabler. Vekselvirkningerne mellem sektion og dag og mellem sensor og sektion var signifikante. Dvs. den relative performance i forhold til Innova ændrede sig (for alle sensorer) igennem testperioden (dag) men denne ændring var forskellig for de forskellige sektioner (sektion: dag vekselvirkning,  $p < 0.05$ ). De forskellige sensorer performede signifikant forskellige i de forskellige sektioner (sensor: sektion vekselvirkning,  $p < 0.05$ ).

Særligt sektion 3 og 4 udviste større afvigelser på nogle måle dage mellem sensorerne, hvilket kan skyldes, at TDLAS og Dräger ikke har samme responstid som Innova, se f.eks. figur 19, hvor Innovaen har nogle peaks, der ikke bliver detekteret af de øvrige sensorer. Sektion BC (before cleaner) ligger mest stabilt, hvilket er forventeligt, da luften er en sammenblanding af 8 sektioner, og udsving i koncentration er derfor mere moderate. Det samme faktum kan forklare, at bestemmelse af den samlede emission fra stalden kan bestemmes meget præcist med udelukkende måling med f.eks. Dräger sensoren i det centrale afkast. Dette vil dog kun være tilfældet i en vintersituation, hvor al luften bliver ført gennem centralkanalene.

## 5 Diskussion

I projekt månegrisen har GTS-institutterne FORCE, DHI, DELTA, Teknologisk Institut og AgroTech i 2014-15 samarbejdet om udvikling af omkostningseffektive målemetoder til at bestemme ammoniakemission fra en slagtesvineproduktion. Formålet har ligeledes været at undersøge mulighederne for, at målinger kan danne grundlag for fremtidig miljøregulering baseret på output frem for input. Resultaterne viser, at det er muligt at bestemme ammoniakemissionen fra en svinestald med 13 sektioner ved udelukkende at måle i 4 sektioner. Simuleringer af sensorperformance for et år har vist, at det kan lade sig gøre at bestemme den samlede emission fra en slagtesvineproduktion for ca. 6 kr. pr stiplads eller 1,5 kr. pr produceret gris. Denne pris tager dog udgangspunkt i en stor besætning på 7500 stipladser. I mindre produktioner vil prisen være tilsvarende højere. I den anvendte teststald med 2800 stipladser vil det billigste online målesetup (uden gyllemålinger) løbe op i ca. 18 kr. per stiplads eller ca. 4,5 kr. per produceret gris. Man må dog forvente, at måleteknologi bliver både bedre og billigere i de kommende år, ligesom øvrige IT-produkter, der anvendes i erhvervet. En halvering af sensorpris for en elektrokemisk sensor placeret decentralt vil resultere i en omkostning på omkring 0,80 kr. og 2 kr. per produceret gris i hhv. stalde med 7500 stipladser (med 13 sektioner) og ca. 2800 stipladser (med 8 sektioner).

Der er tale om et statistisk sikkert målesetup, der inden for en samlet usikkerhed og bias på 6 % kan bestemme den årlige ammoniakemission ud fra et antal repræsentative målinger af ammoniakkoncentration og luftflow. Fuldskala test af sensorsetup har desuden verificeret, at udvalgte sensorsetup kan bestemme ammoniakemissionen med under 5 % usikkerhed, når det sammenlignes med avanceret laboratorie setup og måling i samtlige sektioner.

On-line målinger vil ud over at dokumentere udledning til omgivelserne også kunne bruges til at optimere staldmiljø, miljøteknologi og spare energi og CO<sub>2</sub>-udledning.

I fremtiden bliver det formentligt økonomisk overkommeligt at overvåge ammoniakemission fra alle staldsektioner og hele bedriften vha. flere sensorer. Det vil kunne give landmænd helt nye muligheder for at dokumentere og reagere på afvigende mønstre i gaskoncentrationer og inddrage denne parameter i styring af ventilation. Nye stalde bliver ofte indrettet med delvis luftrensning, og her vil man kunne regulere/optimere andelen af luft som udsuges som punktudsugning og sendes til luftrenser. Det er f.eks. muligt at skrue ned for en renser nogle timer i døgnet, hvor elprisen er højere. Derved kan der spares penge på delrensning, uden det går ud over staldmiljø eller omgivende miljø.



Løbende målinger af ammoniak i svinestalden vil også kunne anvendes som supplement til alm. overvågning af grisenes gødeadfærd, idet svineri i stierne fører til højere ammoniak-koncentrationer og dårligt staldmiljø. Et overblik over ammoniakudledningen fra forskellige staldsektioner giver landmanden et unikt nyt styringsværktøj til at opdage og tage affære ved begyndende dårligt staldmiljø. Et godt staldmiljø er vigtigt i forhold til dyrevelfærd, og sundhed og produktivitet vil som følge heraf evt. kunne forbedres. God luftkvalitet vil resultere i lavt smittepres ift. luftvejs-sygdomme.

Overvågning af ammoniakemission på sektionsniveau har i denne undersøgelse vist, at der er op til 40 % variation fra sektion til sektion målt som gennemsnit over en måned for slagtesvin med samme alder. Ammoniakkoncentrationen i stalden vil evt. kunne reduceres ved øget fokus på sektioner, der underperformer. I staldsektioner, hvor ammoniakemissionen er markant højere end gennemsnittet, kunne man forstille sig, at driftslederen vil få en alarm. Han har herefter mulighed for at inspicere sektionen og opdage og rette en evt. fejl i klimastyring eller management af sektioner, der klarer sig dårligt.

Landmanden har med aktuelle målinger desuden et værktøj, der vil kunne bruges til at se effekten på det generelle emissionsniveau fra stalden, hvis der indføres ændringer i produktionen eller anvendes kombinationer af teknologi. Dette kunne f.eks. være sænkning af temperaturen vha. højtrykskøling eller optimere aminosyresammensætningen i foderet. Hvis landmanden har delvis luftrensning, er det ligeledes muligt at øge andelen af luft, der tildes rensen. Der er perspektiver for at forbedre optimal, delvis luftrensning gennem styring af luftfordeling fra sektion til luftrenser. Dette vil kunne sikre, at den mest forurenede luft altid prioriteres til luftrenser og ikke blot en fast minimumsventilation fra de enkelte sektioner. Det vil betyde, at en større del af staldens samlede emission vil kunne behandles af luftrenser og derved enten reducere omkostninger til rensning eller reducere den samlede emission.

Ved omlægning af miljølovgivningen til en output-baseret regulering af svinestalde vil landmanden få den fordel at kunne udnytte staldkapaciteten fuldt ud ved en eventuel produktionsforbedring. Landmanden genererer data, der kan danne grundlag for dokumentation af produktionen samt for ansøgninger om udvidelser eller etablering af lignende anlæg på andre lokaliteter. Hvis en sådan emissionsbaseret regulering indføres, vil landmanden få mulighed for at optimere driften af ventilation, gylleudslusning, luftrensning, gyllekøling eller anden miljøteknologi ud fra et mål for max udledning.

I dag fastlægges emission fra landbrug alene ud fra normtal. Normtallene for emission fra stald er baseret på forsøg ved forskellige afprøvningsværter med henblik på bestemmelse af procentvis tab af NH<sub>3</sub>-N fra forskellige staldtyper samt dokumentere reduktionsprocenter for emission ved anvendelse af forskellige miljøteknologier ved disse stalde. Et normtal er et udtryk for den gennemsnitlige udledning ved sammenlignelige anlæg. Når der foretages målinger, ser man imidlertid meget stor variation i emissionen fra forskellige staldsystemer og endog mellem staldsektioner, fordi der er forskel i daglig drift på ejendommen og mellem besætninger. Der er f.eks. forskel på indhold af protein i foderet og dermed også på mængden af udskilt kvælstof, der potentielt kan nedbrydes til ammonium og fordampe som ammoniak fra staldrum eller lager. Desuden har management inkl. styring af ventilation betydning for dyrenes gødeadfærd, ikke mindst i stalde med en andel af fast gulv, hvor der er risiko for, at grise gøder især i varme perioder. Viden om forhøjet ammoniakudledning fra en staldsektion forårsaget af varmestress kunne f.eks. reduceres eller forhindres ved øget brug af højtrykskøling eller ændring af ventilationen.

### Er måling realistisk?

Online ammoniakmålinger har været anvendt ved nogle stalde i en årrække, bl.a. ved luftrensere og især i delstater i Tyskland, hvor der er den såkaldt 'Filterpflicht', dvs. krav om 100 % luftrensning ved stalde med mere end 2000 stipladser og arbejdsmiljøkrav om maks. 20 ppm ammoniak. Kravene til dokumentation for andre miljøteknologier er også stigende. Målinger har gennem flere år været anvendt i nogle fjerkræbesætninger til simpel overvågning af dyrenes velfærd og menneskers arbejdsmiljø, men det har altid været et problem at finde sensorer, der var billige og samtidig nøjagtige og robuste nok til også at bestemme miljøbelastning fra stalden. Flere undersøgelser viser, at høje ammoniakkoncentrationer påvirker grisenes velfærd og produktivitet i negativ retning. Der er således ved smågrise fundet forhøjede koncentrationer af cortisol ved 35 ppm ammoniak i tidligt fravænnede grisenes opholdszone – og de opholder sig som bekendt meget tæt på spaltegulve, hvor koncentration godt kan være det dobbelte af rummets gennemsnitlige koncentration. Højt cortisolniveau er et stress tegn, og det kan bl.a. give risiko for halebidning og anden unormal adfærd. Hos fjerkræ ser man trædepudesvidninger, hvis der dannes for meget ammoniak i gødningen/strølsen.

AgroTech har foretaget simuleringer af forskellige måle-setup og kombinationer af disse for at udvælge de bedste setup i relation til prisen, til test i fuld skala samt for at ekstrapolere målte performance parametre til et helt produktionsår. Simuleringerne er foretaget på baggrund af måledata fra eksisterende produktioner. Beregningerne viser, at det er muligt at bestemme den årlige emissionen på besætningsniveau med under 6 % usikkerhed og bias vha. måling i blot 4 ud af i alt 13 slagtesvinesektioner. Man kan naturligvis opnå højere sikkerhed ved at måle i alle ventilationsafkast, men det bliver forholdsvis dyrere. Hvis man kan fastslå emissionen med 95 % nøjagtighed på denne måde vha. elektrokemiske sensorer til en samlet omkostning på ca. 6 kr. pr. stiplads eller 1,50 kr. pr produceret gris med det nuværende prisniveau, vil det også være sandsynligt, at priserne på måle-setuppet vil falde og sikkerheden stige, fordi udviklingen i sensorteknologi og IT går meget stærkt i dag. Lavere pris på sensorer vil gøre det økonomisk overkommeligt at placere sensorer i samtlige staldsektioner, hvilket yderligere vil forbedre muligheden for at bruge ammoniakmåling til at driftsoptimere ved at benchmarke ammoniakudledningen mellem hold, sektioner og besætninger. Stalde, som i dag bygget med delvist luftrensning via centralt luftudsug, ville få mulighed for at måle den samlede emission fra hele stalden i blot et punkt i store dele af året. Dette er bl.a. illustreret på figur 29, hvor måling før renser kun ligger få procent fra den "sande værdi" målt i 8 sektioner. Bestemmelse af emissionen fra en stald med centralt afkast vil sandsynligvis kunne gøres væsentligt billigere i fremtiden end de oplyste priser i denne undersøgelse.

### Hvad kan en landmand potentielt opnå ved måling af ammoniak udledning?

Landmanden vil være interesseret i at dokumentere udledningen fra egen stald, hvis han er overbevist om, at han vil kunne holde sig under reduktionskravet, har en driftssikker miljøteknologi og en driftsledelse og styring af staldklima mv., der er bedre en gennemsnittets. Desuden er det naturligvis en forudsætning, at der kan opnås en økonomisk gevinst i form af flere producerede grise.

Hvis man forestiller sig, at stalden dimensioneres til produktion af grise med 900 gram daglig tilvækst og grisene med tiden vokser hurtigere, f.eks. 1000 gram fra 30-110 kg, så vil der være en sektion i overskud. I den situation vil landmanden have mulighed for at producere grise fra en lavere indsættelsesvægt, højere afgangsvægt eller bruge en sektion som

buffersektion og derved tømme andre sektioner hurtigere. Der er altså mulighed for at opnå en højere staldudnyttelse og opnå et større dækningsbidrag på stalden på 5-10 %.

Det er antaget her, at stalden har en udledning, der er lavere end normtallet for produktionen. Det skal dog bemærkes, at der ligger forslag til ny regulering ud fra normtal baseret på en emission pr. m<sup>2</sup> staldgulv i stedet for pr. produceret gris. Indføres dette vil den øgede produktion også kunne opnås uden yderligere dokumentation af ammoniakemissionen.

Emission pr. areal vil dog blive udregnet ud fra en konservativ vurdering af et generaliseret staldsystem. Effekter af stålriste, optimal indretning med zoneopdeling, overbrusning, reduceret foderspil, bedre rengøring, optimeret udslusning, køling af indblæsningsluft, reduceret ventilation, foder-gylleaditiver samt godt management vil ikke blive medtaget, medmindre man måler den aktuelle udledning. Ved et målebaseret reguleringsystem belønnes godt management, og landmanden behøver ikke nødvendigvis at benytte miljøteknologi, der er verificeret. Det kan også lette vejen for ny miljøteknologi, hvor dokumentation ofte er en stor barriere for miljøteknologivirksomheder.

Det er allerede i dag muligt at integrere en ammoniaksensor fra f.eks. Dräger i SKOV's FarmOnline system med tilhørende logning af flow via. Dynamic Air. Integrationen af data og en evt. benchmarking er dog ikke udviklet endnu. AgroTech har udviklet Analyseplatformen, der kan integrere måledata fra en hvilken som helst sensor og præsentere det for brugeren. Systemet vil dog skulle skræddersyes specifikt til en landmandsapplikation, hvis platformen skal kunne bruges som beslutningsstøtteværktøj. Ved brug for dokumentation af udledning vil man via. analyseplatformen nemt kunne downloade en rapport for sidste års emissionstal og indsende til de relevante myndigheder. Det er også muligt at embedsmænd fra kommunen vil få et specielt login, der giver mulighed for at hente rapporten direkte på nettet og evt. løbende kontrollere emissionen. Den aktuelle emission målt med systemet kan i tvivlstilfælde eller ved rutinekontrol efterprøves vha. punktmålinger af et uafhængigt analyseinstitut.

Der er naturligvis en række spørgsmål, som opstår i kølvandet på en målebaseret regulering, f.eks. om der skal være en form for straf, hvis landmanden ikke overholder emissionsloft et år. Det er desuden endnu ikke endeligt afklaret, om de testede sensorer vil kunne holde til miljøet i længere tid. Holdbarheden kan vi p.t. kun sige noget om ud fra leverandørens fortælling om, at der er sensorer, der har kørt i 3 år i en besætning, men der gennemføres forsøg ved DELTA, som forhåbentlig kan give et mere sikkert grundlag for konklusion vedr. dette. Endelig er der spørgsmålet, om målesetup er tilstrækkeligt sikret mod manipulation med data. Det vurderes, at der ikke er større risiko for dette i forhold til i forhold til andre erhvervsmiljøreguleringer, som også er baseret på en vis grad af egenkontrol.

Det er vigtigt, at målesetup er så robust, at der ikke opstår utætheder og tilstopninger, som vil betyde fejlmålinger/datatab i kortere eller længere perioder.

### Test af sensorer

I projektet blev der afprøvet flere kommercielt tilgængelige sensorkandidater til emissionsbaseret regulering.

Mange elektrokemiske sensorer har problemer med at de 'drifter', hvilket betyder, at kalibreringen ikke holder særlig længe, og sensoren ofte bør udskiftes. Den nye testede sensor fra Dräger har imidlertid indbygget en activator, som katalyserer en kemisk reaktion, der gendanner overfladen på den elektrode, som skal måle ammoniakken. Dette betyder mindre risiko for drift og længere holdbarhed. Det er resultatet af 20 års målrettet udvikling i Dräger og anvendelse i andre industrier, som nu måske også finder anvendelse ved landbrug. Sensorerne kan placeres decentralt inde i stalden eller som del af en central løsning, hvor luft ledes forbi en sensor fra forskellige staldrum på skift. Dette har den store fordel, at man undgår service og vedligehold på slanger og filtre, der potentielt kan resultere i fejlmålinger ved utætheder eller tilstopninger.

Optisk måling med laser via TDLAS sensorer er en anden mulig kandidat, til måling af ammoniakkoncentration, som projektet har undersøgt. Her har det Schweiziske firma Axetris et bud med deres TDLAS DL200 (Tuneable Diode Laser Sensor). Den har en hurtig indsvingningstid og meget lille behov for kalibrering/kontrol. Udfordringen her er prisen og kravet om en målekasse med meget præcis temperaturstyring.

I projektet har Force Technology desuden undersøgt muligheden for at anvende vaskeflasker til dokumentationsformål. Det er en gammel kendt metode, men udfordringen ligger i at lave proportional sampling af luft fra staldventilationen, så man får et korrekt billede af, hvor meget ammoniak der kommer ud ad skorstenen. Det skal her bemærkes, at det danske firma Veng System også arbejder på udvikling af proportional sampling og analyse af ammonium i vaskeflasker, men systemet var desværre ikke klar til demonstration i dette projekt. Metoden er meget præcis, men har den ulempe, at den ikke giver online målinger. Målefejl og høje emissioner kan derfor ikke opdages, før målingen er færdig, og metoden er derfor mindre egnet til optimering af management.

Teknologisk Institut har i projektet arbejdet med at finde alternative målemetoder til at bestemme og/eller kontrollere luftflow. De har fundet en lovende teknologi i nogle helt nye ultralyds sensorer, som kan monteres uden på ventilationsafkast på et staldloft, i modsætning til målevinger, som ofte anvendes til flowbestemmelsen, der sidder i luftstrømmen og påvirker ventilatorens flow eller energiforbrug. Ultralydssensoren er egentlig udviklet til baksensor til mobilindustrien, men projektet har vist, at teknologien kan bruges til bestemmelse af flowet i et staldafkast med samme nøjagtighed som målevinge. Der er dog stadig nogle udfordringer omkring montage og drift, som vil kræve yderligere udvikling.

Det bedste alternativ til målevinger ser ud til at være trykdifferens måling, der ligesom ultralydmåling er en non-invasiv måling med en høj målenøjagtighed. Skov A/S har udviklet et system ved navn Dynamic Air, der kan integreres i deres ventilationssystem. Princippet vil kunne udnyttes af andre producenter, men det kræver en spjældstyring.

### Måling på gylle

Hyppige målinger af næringsstoffer i gylle vil kunne give supplerende information om den samlede udledning, og samtidig vil man kunne måle andre parametre, som måske vil kunne anvendes som beslutningsstøtte i forbindelse med biogasproduktion. DHI (Dansk Hydraulisk Institut) har i projektet udviklet en automatisk gylleprøvesamler og kombinerer det med en analyserobot, som kan flyttes mellem besætninger. Analyserobot og automatisk prøvetager er endnu ikke driftssikker og investeringsprisen uforholdsmæssig dyr. Teknologien vurderes derfor ikke at være realistisk til anvendelse i forbindelse med hverken regulering eller beslutningsstøtte.



*Figur 33 Slagtesvinestald, hvor test af sensorsetup er gennemført.*

## Konklusion

---

Emissionerne fra en svineproduktion er fra primært to kilder. Det, der består af indholdsstoffer i gyllen og det, der kommer via luftudkastet fra stalden. I staldluften har fokus været på ammoniak og i gyllen på makronæringsstofferne kvælstof og fosfor.

Der er i projektet udviklet en mobil prøvetagningsrobot til gylle. Med den udviklede prøvetagningsrobot er det muligt i perioder at følge næringsstof indholdet i den gylle, der pumpes fra stalden. Analysesikkerheden for kvælstof og fosfor følger standard analysesikkerhed gennemført i laboratoriet. Målinger er tænkt som kontrol af emissionsmålinger på luft og sekundært som beslutningsstøtte til planteproduktion og biogasanlæg. DHI udvalgte et setup bestående af en prøveudtager og en homogenisator samt en spectrofotokemisk robotanalysator fra Hach Lange. Dette måle-setup er tænkt som en mobil prøvestation, der kan flyttes rundt mellem flere bedrifter, og oplysninger vil skulle kombineres med balanceberegninger for N og P for bedriften, hvis det skal færdigudvikles til anvendelse i reguleringsformål.

Med henblik på bestemmelse af årlig ammoniakemission via ventilationen fra slagtesvinestalde er der udviklet og testet 3 målesetup med online måling af ammoniak kombineret med to mulige metoder til flowbestemmelse samt et system med vaskeflasker til måling af akkumuleret emission. Både setup med enkelte sensorer placeret centralt samt decentralt setup med et antal sensorer placeret i staldsektionerne er undersøgt.

Ved test i stald med i alt 8 sektioner var det muligt at bestemme den årlige ammoniakemission med en samlet usikkerhed og bias på under 6 % ved måling i 4 af de 8 sektioner. Måling i 8 sektioner vs. 4 mindsker usikkerheden og bias på bestemmelse af ammoniakemissionen fra hele besætningen på årsbasis til under 2 %. Simuleringer viste endvidere, at emissionen kan bestemmes med tilsvarende sikkerhed ved måling i 4 af i alt 13 sektioner, som en slagtesvinestald med ugedrift typisk er opdelt i. Der er ikke væsentlig forskel på usikkerheden ved de udvalgte sensor setups til bestemmelse af emission, når der foretages 24 målinger pr. dag over et helt år. Gennemsnitlig daglig NH<sub>3</sub>-konc. rammer 5-20 % fra referencemålingen. Set over en længere periode rammer det betydeligt bedre, så konc. kun varierer i området 5-10 % fra referencen.

Omkostningerne ved et sådant målesetup for besætningsstørrelser på 7500 stipladser ligger på 6-8 kr. pr. stiplads afhængigt af sensorvalg. Prisen er inklusive vedligehold og genanskaffelse. Elektrokemisk bestemmelse er det billigste online måleprincip, mens den vådkemiske analysemetode er den dyreste grundet høje driftsomkostninger. Omkostningerne er over dobbelt så store ved en besætningsstørrelse på 2800 stipladser svarende til stalden, hvor udstyret blev testet. Der forventes fortsat en hurtig udvikling imod bedre og billigere sensorer på markedet.

Måling af flow med trykdifference sensorer har i forsøgene vist sig at være tilstrækkelig sikre. Anvendelse af ultralydscensorer til samme formål vil kræve yderligere udvikling.

Centrale løsninger har generelt den ulempe, at der er stort krav til vedligeholdelse og kontrol af varmetracede slanger og multiplexersystem samt risiko for, at der over tid kan opstå utætheder og fejl som følge af dette. Der er derfor større perspektiv i at måle decentralt med flere sensorer, og de nye sensorer fra Dräger har i forsøgene performet stabilt og må derfor betegnes som et godt bud til måling i de enkelte staldrum. Længerevarende test af sensorerne i praksis vil dog være nødvendig for en endelig vurdering af princippet.

Sammenligning mellem ens sektioner viser stor variation mellem ammoniakemissionen fra disse.

Decentrale online løsninger med måling i samtlige sektioner kan derfor give mulighed for beslutningsstøtte i form af optimeret drift af miljøteknologi, f.eks. optimeret delrensning af luft med hensyn til ændrede andele af luft fra enkelte sektioner, køling af luft mv. Der er tillige potentiale for reduktion af emission gennem overvågning af enkelte sektioner og anvendelse af ammoniak som styringsparameter for ventilation og driftsledelse.

Samlet vurderes det, at der er teknisk grundlag for at gå videre med at undersøge muligheder for at indføre emissionsbaseret regulering i større svineproduktioner på baggrund af målinger med ammoniaksensorer placeret i ensartede sektioner. Det forventes, at prisudviklingen med tiden vil betyde, at flere kan anvende målinger, og at målingerne vil kunne anvendes til beslutningsstøtte.