



Miljø- og
Fødevareministeriet
Miljøstyrelsen

Udvikling af måleenhed til kortlægning af samtidig beluftningseffektivitet og lattergas fra emission af renseanlæg

MUDP rapport

Maj 2018

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Jens Munk-Poulsen DHI,
Mikkel Holmen Andersen DHI

ISBN: 978-87-93710-19-1

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

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 1. | Forord | 6 |
| 2. | Indledning | 7 |
| 2.1 | Introduktion til beluftningseffektivitet og lattergasemission | 7 |
| 2.2 | Udvikling, test og kalibrering af ny flowmåler | 8 |
| 3. | Verifikation af emissionsberegning | 10 |
| 3.1 | Sammenhæng mellem O ₂ og N ₂ O gasoverførsel | 10 |
| 3.2 | Test af emissionsberegning med offgas-måler i fuldskala på Marselisborg Renseanlæg | 12 |
| 3.3 | Emissionsberegning til brug for Stjernholms OXxOFF | 14 |
| 3.3.1 | Drift af kommerciel sensor | 14 |
| 3.4 | Samtidige målinger af beluftningsaktivitet og lattergasemission for Randers Centralrenseanlæg | 15 |
| 3.5 | Beluftningsoptimering og lattergasemission på Nr. Vium Renseanlæg | 17 |
| 3.5.1 | OTR styringsoptimering med Stjernholms OXxOFF | 18 |
| 3.5.2 | Lattergasemission under energioptimeringer på Nr. Vium | 19 |
| 3.6 | Sammenhængen mellem målt N ₂ O emission og litteraturværdier | 20 |
| 4. | Konklusion | 21 |
| 4.1 | Klimabevidst energioptimering på Nr. Vium Renseanlæg med Stjernholms OXxOFF | 21 |
| 4.2 | Klarlægning af mindre N ₂ O emission fra Randers Centralrenseanlæg ift. Litteraturværdier | 21 |
| 4.3 | Potentiale for sensor til øget fokus på lattergasemission som CO ₂ kilde | 21 |
| 5. | Referencer | 23 |
| | Bilag 1.Kravspecifikation for måleudstyr til emissionsmålinger af lattergas | 24 |
| | Bilag 2.Principper for OXxOFF beregninger | 27 |
| | Bilag 3.Forretningsmæssigt potentiale for kombineret måleenhed | 28 |
| | Bilag 4.N₂O sensorbaserede emissionsberegninger | 31 |

1. Forord

Lattergas (N_2O) er en kraftig drivhusgas, som er omkring 300 gange stærkere end CO_2 . N_2O reducerer desuden jordens ozonlag. Lattergas indgår i det danske CO_2 -regnskab og udgør ca. 10% af den samlede danske udledning af drivhusgasser /1/.

Biologiske renseanlæg har i stort omfang kvælstoffjernelse, som kan resultere i dannelse af N_2O . Både nitrifikation og denitrifikation vil udvikle N_2O i varierende omfang.

Viden om og målinger af danske renseanlægs produktion af lattergas er begrænset. Forsyningsselskaber publicerer i nogle tilfælde CO_2 -opgørelser, men kun få medtager effekten af N_2O , og der vil da som oftest være tale om en estimeret emission baseret på generelle nøgletal, f.eks. antal g N_2O pr. person-ekvivalent pr. år.

Unisense's lattergassensor og Stjernholms OXxOFF er to sensorer, som i dette projekt er kombineret til et samlet målesystem ud fra et ønske om at forene Stjernholms OXxOFF-målers ilt- og flowmålinger af offgassen med en Unisense lattergassensor, så der opnås et pålideligt måleværktøj til samtidig monitorering af beluftningseffektivitet og lattergasemission fra bundbelufteede procesanlæg. I projektet er der ud over pilotskalaforsøg brugt 2 fuldskala test sites: Randers Centralrenseanlæg, som primært renser husspildevand, og Nr. Vium Renseanlæg, som håndterer mejerispildevand. Nr. Vium er medtaget som ekstra test site i forhold til ansøgningen, idet der på Nr. Vium er foretaget procesoptimeringer på baggrund af målinger af beluftningseffektivitet under samtidig måling af lattergasemission.

Projektet er udført af Randers Spildevand A/S, Unisense Environment A/S, DHI og Stjernholm A/S (projektholder). Projektet har modtaget støtte fra Miljøstyrelsens udviklings- og demonstrationspulje (MUDP).

Denne rapport er skrevet til teknikere med et godt kendskab til renseanlæg, renseprocesser og målinger. Rapporten udgør en del af den formidling, som bliver udført i forbindelse med projektet, og skal oplyse om hovedresultaterne af projektet, samt i hvilken grad målene for projektet er nået.

2. Indledning

Formålet med dette projekt har været at udvikle en kosteffektiv måleenhed til online-måling af beluftningseffektivitet og lattergasemissioner fra renseanlæg, da de hidtil anvendte offgas målere til lattergas er dyre og ikke lavet til brug i procesanlæg. Den nye måleenhed etableres ved at integrere to relativt nyudviklede produkter fra danske SMV'er: En sensor til online-måling af lattergas i væskefasen fra Unisense Environment A/S, som med succes blev afprøvet i et projekt under Vandsektorens Teknologiuudviklingsfond (VTUF) (5/), samt en offgas-måler OXxOFF fra Stjernholm A/S, som online giver information om luftflow og beluftningseffektivitet. En kombination af disse måleinstrumenter vil via modelberegninger præcist kunne fastlægge emissionen af lattergas fra en beluftningstank, hvor strippingen af lattergas til atmosfæren typisk finder sted. Samtidig giver kombinationen af de to sensorer mulighed for at påvise beluftningseffektivitet under samtidig målinger af lattergasemissionen, hvilket giver den klimamæssigt bedste energioptimering.

Integrationen af de to produkter giver mulighed for online-måling af lattergas fra renseanlæg, og dermed kan lattergas kvantitativt indgå i CO₂ regnskabet for forsyningsselskaberne. Det har også været muligt at integrere måledata i renseanlæggenes SRO system og dermed muliggøre en senere udvikling af styrestrategi til samtidig minimering af både energiforbrug til beluftning og lattergasemission (udvikling af sådanne strategier ligger uden for formålet med dette projekt). Endelig kan den nye viden danne grundlag for, at der politisk kan skabes mulighed for etablering af en incitamentstruktur med henblik på at nedbringe emissioner af lattergas fra renseanlæg, hvorved det vil være muligt i væsentligt omfang at reducere det samlede CO₂ aftryk fra vandsektoren

2.1 Introduktion til beluftningseffektivitet og lattergasemission

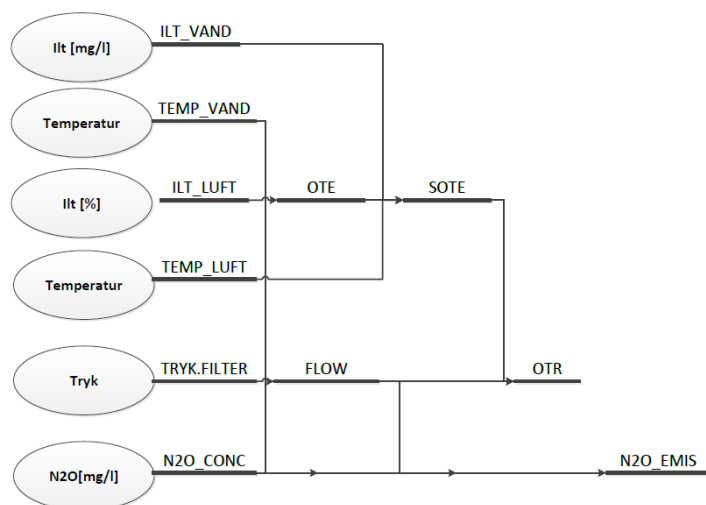
Med øget fokus på energioptimeringer og klimaneutralitet er det interessant at kunne måle, hvor effektivt et beluftningssystem fungerer. Disse målinger kan udføres med integrationen mellem Stjernholms OXxOFF og Unisense's lattergassensor.

Første trin i offgasmåleren er at opsamle gassen, som forlader vandoverfladen, og føre gassen ind i en iltmåler. Ilttoptaget i vandet kan herefter beregnes ved at måle iltindholdet i den gas, som er til overs, efter den indblæste luft har forladt vandfasen. Iltindholdet i luften omkring os, som indblæses i vandet, sættes til 100%. Boblerne fra bundbelufterne overfører ilt til vandfasen, og derfor er iltindholdet i den opsamlede luft lavere end 100%. Jo dybere tanken er, og jo bedre beluftningsinstallationen er udført, desto lavere iltindhold har den opsamlede luft. Mindre effektive iltningssystemer har et iltindhold i offgassen på 90-93%, mens meget effektive systemer har et indhold på 65-70%.

Målinger af iltudnyttelsen (OTE = oxygen transfer efficiency) angiver, hvor meget af den indblæste luft der er blevet udnyttet i processtanken. Jo højere iltudnyttelse man kan opnå, jo mere energieffektivt kører ens beluftningssystem. Målinger af iltudnyttelsen kan sammenlignes med måling af hvor langt en bil kører på literen, og giver bl.a. mulighed for at opdage, når beluftningsudstyrets effektivitet aftager. I de to ovenstående tilfælde er iltudnyttelsen OTE henholdsvis 7-10% og 30-35%.

Ved både at måle luftflow og iltudnyttelsen kan iltoverførselshastigheden registreres (OTR = oxygen transfer rate), dvs. hvor mange kg ilt der overføres i timen. Jo højere iltoverførselshastighed, jo mere ilt er der behov for, og jo mere er anlægget belastet. Mere om dette kan læses i bilag C

Ved sammenkobling af Stjernholms OXxOFF luftflowmåler og Unisense's lattergassensor kan man måle lattergasemissionen, som er en vigtig fraktion af det totale CO₂ aftryk fra spildevandsbehandlingsanlæg. Ved modelberegning af lattergasemissionen er beregningen ud over lattergas koncentrationen meget følsom over for upræcise flowmålinger, og det er derfor vigtigt at have helt styr på denne parameter.



Med et øget fokus på energioptimeringer og energiproduktion er fokus på lattergas og klimaneutralitet ekstra vigtigt, idet de to primærdrivende effekter på lattergasemissionen er lave COD/N forhold og lave iltkoncentrationer. Så når man tager kulstof ud i forklaringen for at få bedre gaspotentiale på rådnetårne og kører med lave iltkoncentrationer for at spare på strømforbruget, er bivirkningen ofte en øget lattergasemission. Med muligheden for at måle emissionen kan man gå fra udelukkende at energioptimere strømforbruget til at klimaoptimere, hvor der også tages hensyn til emissioner af lattergas.

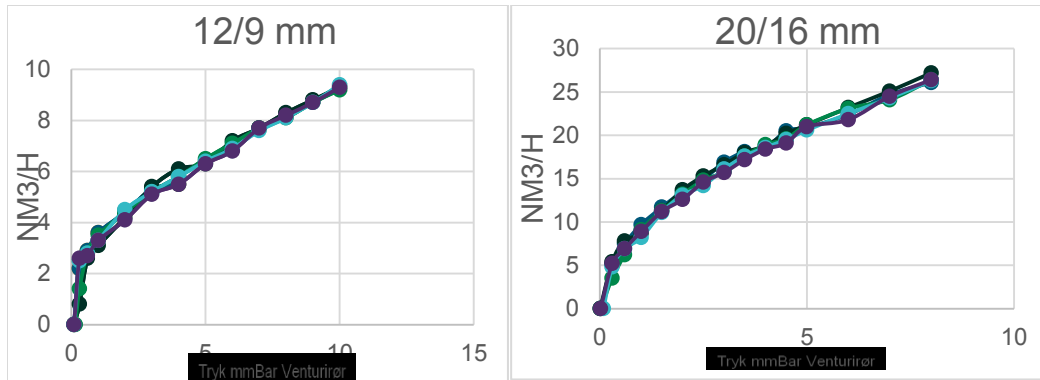
Ud af denne integration kommer en kravspecifikation til brug for produktion af kommerciel integreret sensor som afrapportering for arbejdsplan 1.

2.2 Udvikling, test og kalibrering af ny flowmåler

Idet præcise flowmålinger er en forudsætning for beregning af lattergasemission og iltningsskapitet, har det været nødvendigt at teste, om den benyttede flowmåle-metode kan måle i det ønskede måleområde, og om der kan opnås valide målinger. Tidligt i projektet blev det klart, at flowmåleren på Stjernholms OXxOFF var overdimensioneret og ikke kunne måle de lave flows, som var ønsket. Derfor har DHI undersøgt muligheden for at benytte 3D-printede venturirør til Stjernholms OXxOFF flowmålinger, da denne målemetode er noget billigere end den tidligere benyttede metode i Stjernholms OXxOFF (trykmåling med pitotrør).

Undersøgelsen viste, at venturirør i 3D print med god tilnærmelse kunne måle flow i det forventede måleområde. Venturirørene skal passe til to flowintervaller: I det lave måleområde skal røret kunne måle et flow fra 1 Nm³/h til 10 Nm³/h og tryk fra 1 mbar til 10 mbar. Røret til det høje måleområde skal kunne måle flow fra 4 Nm³/h til 40 Nm³/h og tryk fra 1 mbar til 10 mbar. Test af venturirørene udføres ved, at et venturirør monteres med en trykmåler (Huba Control) og sættes efter en flowmåler (VPFlowscope), som er påsat en blæser.

Differenstrykket måles med trykmåleren ved forskellige flows og plottes som funktion af flowet, som er målt med flowmåleren. Der laves 7 målinger for hvert rør. Sammenhængen mellem tryk og flow beskrives med en formel, som er lavet ud fra plottet:



| | |
|----------|--|
| 12/9 mm | Flow [m ³ /h] = - 0,0056x ⁴ + 0,1291x ³ - 1,0262x ² + 3,9313x + 0,1763 |
| 20/16 mm | Flow [m ³ /h] = - 0,0138x ⁴ + 0,3002x ³ - 2,3145x ² + 9,4906x + 1,2784 |

Rørens ujævne overflade kan have givet turbulens, hvilket kan danne grundlag for afvigelser i resultaterne. Der anbefales at undersøge, om en coating af venturirørerne kan minimere afvigelser. Afvigelserne er dog ikke af en størrelse, der påvirker måleresultaterne i nævneværdig grad.

De specialdesignede og kalibrerede flowmålere er efterfølgende blevet bygget ind i OXxOFF designet og anvendt i projektets OXxOFF'er.

3. Verifikation af emissionsberegning

For at opnå et endeligt proof-of-concept samt validere den samlede måleløsning er det nødvendigt at undersøge måleenhedens driftssikkerhed på rigtigt spildevand samt at dokumentere, at de foretagne modelberegne N_2O emissioner stemmer overens med faktisk målte emissioner af lattergas. DHI råder over et pilotanlæg i Aarhus, som er opsat og kører på Marselisborg Renseanlæg og fødes med spildevand. Derudover råder DHI over et meget følsomt offgas-måleudstyr, der måler lattergaskoncentrationen i den opsamlede offgas.

3.1 Sammenhæng mellem O_2 og N_2O gasoverførsel

Til beregning af lattergasemissionen i OXxOFF benyttes en $k_{L,a}$ værdi for lattergas. Denne $k_{L,a}$ værdi er omkostningstung at måle, da den enten skal måles med offgas-målemetode eller med en besværlig afgangstest. Derimod kan man udlede $k_{L,a}$ for ilt via iltoverførselshastigheden, OTR, som Stjernholm OXxOFF'en beregner sig til ud fra direkte målinger. Der er derfor opsat en teoretisk korrelation til beregning af $k_{L,a}$ for lattergas ved hjælp af $k_{L,a}$ for ilt og diffusionskoefficienterne for ilt og lattergas.

Når vi på denne baggrund har $k_{L,a}$ for lattergas og lattergaskoncentrationen i væskefasen, kan emissionen beregnes som:

$$r_{N_2O} = c_{N_2O} \times k_{L,a_{N_2O}} (0)$$

hvor gasoverførselshastigheden for lattergas beregnes ved hjælp af gasoverførselshastigheden for ilt, som er direkte afledt af OTR målt af OXxOFF af følgende formel:

$$\frac{k_{L,N_2O} a}{k_{L,O_2} a} = \left(\frac{D_{N_2O}}{D_{O_2}} \right)^{0,5}$$

$$(1) \quad k_{L,a_{N_2O} 20^\circ C} = k_{L,a_{O_2} 20^\circ C} \times \sqrt{\frac{D_{N_2O}}{D_{O_2}}} = k_{L,a_{O_2} 20^\circ C} \times 0,9137$$

Hvor:

$k_{L,a_{N_2O} 20^\circ C}$ = gasoverførseshastighed for lattergas

$k_{L,a_{O_2} 20^\circ C}$ = gasoverførseshastighed for ilt

D_{N_2O} = diffusionkoefficient for lattergas [$1,77 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$]

D_{O_2} = diffusionskoefficient for ilt [$2,12 \cdot 10^{-9} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$]

c_{N_2O} = koncentrationen af lattergas i væskefasen

Idet en lille variation i $k_{L,a}$ -værdien vil have signifikant betydning for den beregnede lattergas-emission, var det ønskeligt at undersøge, hvor præcis denne omregning er for rent vand i pilot-anlægget:

| | | | | Q_{air} | | | | |
|--------------------------|--------------|--------------|--|-----------|-------|--------|--------|------|
| | | | | L/h | 500 | 1000 | 1500 | 2500 |
| All @ 20 °C | | | | | | | | |
| Measured Tank A | $k_L a O_2$ | d^{-1} | | 61,70 | 90,69 | 115,39 | 173,36 | |
| Measured Tank A | $k_L a N_2O$ | d^{-1} | | 17,31 | 33,97 | 49,65 | 67,60 | |
| Calculated Tank A | $k_L a N_2O$ | d^{-1} | | 56,4 | 82,9 | 105,4 | 158,4 | |
| | | Error | | 226% | 144% | 112% | 134% | |
| Measured Tank B | | | | | | | | |
| Measured Tank B | $k_L a O_2$ | d^{-1} | | 71,1 | 85,4 | 98,4 | 129,8 | |
| Measured Tank B | $k_L a N_2O$ | d^{-1} | | 22,2 | 33,6 | 48,6 | 68,6 | |
| Calculated Tank B | $k_L a N_2O$ | d^{-1} | | 64,9 | 78,0 | 89,9 | 118,6 | |
| | | Error | | 193% | 133% | 85% | 73% | |

På pilotanlæggets to næsten identiske tanke, A og B, har DHI og Unisense Environment testet $k_L a$ for både lattergas og ilt og fundet, at $k_L a$ målingerne varierer, selv om tankene er stort set identiske. De eneste variationer tankene imellem er den fysiske placering af bundbelufte i forhold til sensorer i tanken, der samtidig fungerer som bafflere. Begge tanke er fuldt opblandede.

Ved omregning af gasoverførselskonstanter fra ilt til lattergas, fås i begge tanke en betydelig overestimering af gasoverførslen for lattergas i forhold til de målte gasoverførselshastigheder. Konklusionen er derfor, at beregninger med formel 1 er usikre og medfører væsentlig overestimering af lattergasemissionen.

I det mest afvigende tilfælde estimerer konversionsberegningen gasoverførslen som tre gange højere end det målte, hvilket medfører en fejl på 226% af de målte lattergasemissioner. På denne baggrund har det været nødvendigt at udvikle og anvende en anden målemetode til beregning af lattergasemissionen.

Fra Schultze et al. /2/ fås en stripningsmodel, hvor vi i vores tilfælde med en beluftet kolonne vil strikke lattergassen med den luft, som blæses gennem diffusorerne. Stripningen vil følge nedenstående formel:

$$r_{N_2O} = H_{N_2O} S_{N_2O} \left[1 - \exp\left(\frac{kLa_{N_2O} V_l}{H_{N_2O} Q_g}\right) \right] \frac{Q_g}{V_l} \quad (2)$$

Hvor:

r_{N_2O} er emissionen fra den beluftede kolonne [mg N₂O/L/dag]

kLa_{N_2O} er gasoverførselshastigheden [dag⁻¹]

S_{N_2O} er koncentrationen af N₂O i væskefasen [mg/L]

H_{N_2O} er Henrys konstant for lattergas [dimensionsløs]

Q_g er luftflowet, der beluftes med [L/hr]

V_l er voluminet af tanken [L].

Til beregning af $k_L a_{N_2O}$ 20 °C har Foley et al. /3/ lavet laboratorieforsøg, der giver en empirisk formel for $k_L a_{N_2O}$ på baggrund af gashastigheden. Gashastigheden beregnes som det beluftede areal [m²] og det totale luftflow, Q_A [m³s⁻¹] idet:

$$v_g = \frac{Q_A}{\text{Beluftet areal}} \quad (3)$$

Ud fra gashastigheden får således $k_L a_{N_2O \ 20^\circ C}$ som:

$$k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} = \left(\frac{D_R}{D_L}\right)^{-0,49} \times 34500 \times (v_g)^{0,86} \quad (4)$$

$$k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} = \left(\frac{D_R}{0,815 \text{ m}}\right)^{-0,49} \times 34500 \times (v_g)^{0,86} \quad (5)$$

Hvor:

$k_L a_{N_2O \ 20^\circ C}$ = lattergas overførselskoefficient [d^{-1}]

D_L = dybden af laboratoriereaktoren [0,815 m]

D_R = højden over dissuoren (m)

v_g = den specifikke gashastighed [$m^3 m^{-2} s^{-1}$]

Slutteligt temperaturkompenseres $k_L a_{N_2O \ 20^\circ C}$ til procestemperaturen

$$K_L a_{N_2O, Procestemp} = k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} \times (1.024)^{(T_{Proces} - 20^\circ C)} \quad (6)$$

Hvor:

T_{Proces} er procestemperaturen [$^\circ C$]

$K_L a_{N_2O, Procestemp}$ er den temperaturkorrigerede gasoverførselshastighed [dag^{-1}]

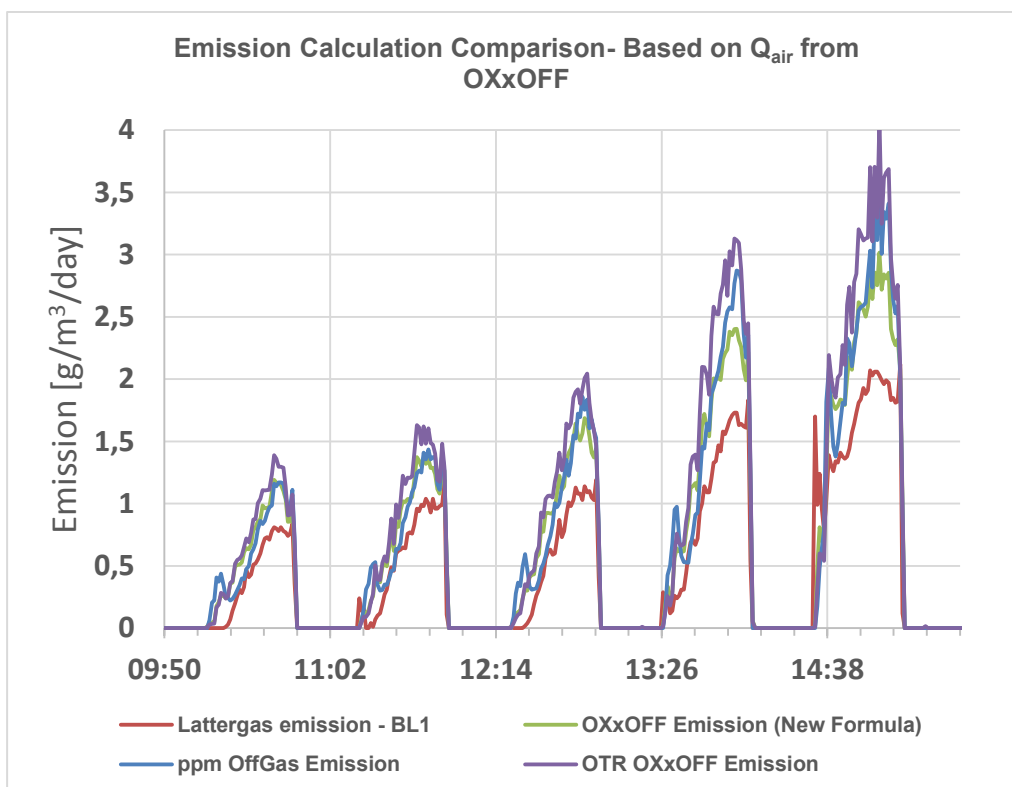
Det er således muligt at beregne emissionen på baggrund af den målte lattergaskoncentration i væskefasen, det målte luftflow, anlæggets fysiske dimensionering samt konstanter kendt fra litteraturen. For at eftervise, at vi med denne nye formel kan lave en mere præcis emissionsberegning, er der foretaget en validering ved hjælp af et præcist N_2O offgas-målesystem og foretaget en sammenligning med den oprindelige OXxOFF formel (0). Denne verifikation er også sket igennem andre samarbejder, som Unisense Environment har haft /4/.

3.2 Test af emissionsberegning med offgas-måler i fuldskala på Marselisborg Renseanlæg

Idet stighøjden i pilotanlægget ikke er tilstrækkelig til at opnå nok gasoverførsel og dermed robuste måleresultater, fortages der målinger på Marselisborg Renseanlæg med offgas-sensor, således at emissionsberegningen kan valideres. Idet $k_L a$ -sammenhængen ikke kan bruges jf. ovenstående afsnit, sammenholder vi offgas-målerens resultater med stripningsformel (2) med Stjernholms OXxOFF flowmåler, beregning med $k_L a$ fra OXxOFF (lilla) og beregning af emissionen med formel (2), men på baggrund af renseanlæggets luftflowmåler (rød).

Til forsøgene er der brugt en offgas-måler, som er kalibreret op mod to kalibreringsgasser ved henholdsvis 0 og 1000 ppm, jf. beskrivelser fra producenten. Der er foretaget to beregninger, der beror på den nye formel - den ene ved brug af Stjernholms OXxOFF luftflowmåling og den anden med data fra renseanlæggets egen luftflowmåler.

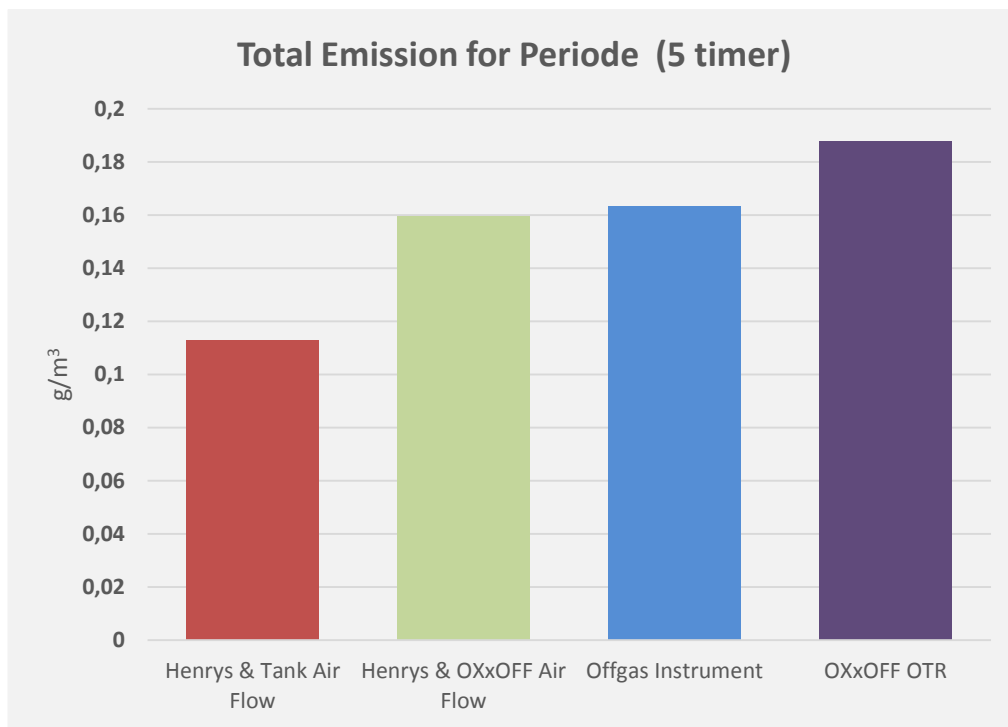
Emissionen fra en aktivslamtank på Marselisborg Renseanlæg med bundbeluftning blev opgjort ved opsamling af offgas fra overfladen. Der er målt N_2O i gasfasen, luftflow, temperatur samt iltudnyttelse til $k_L a$ bestemmelse for beluftningssystemet. Dermed findes de data, som skal anvendes i de forskellige modeller for stripping af N_2O , og man kan sammenligne en målt emission via offgasmålinger med en modelberegnet emission.



Ovenfor ses de målinger, der er lavet på Marselisborg Renseanlæg med Stjernholms OXxOFF sammenholdt med kalibreret offgas-sensor.

Tre forskellige måder at beregne lattergasemissionen på og sammenholdt med offgas referencinstrumentet. Den første beregning (**Lattergas emission – BL1**) er baseret på den nye formel (2) og bruger hele luftningstankens luftflow (dermed en fuld emissionsberegning). Den næste beregning (**OXxOFF Emission - New Formula**) er baseret på den nye formel (2) og OXxOFF'ens luftflowmåling over 1 m² af det samlede beluftede areal på 500 m². Den sidste beregning (**OTR OXxOFF Emission**) er baseret på den oprindelige formel (0) og OXxOFF'ens luftflowmåling over 1 m² af det samlede beluftede areal på 500 m².

Forsøgene med offgasmåleren er et bevis for, at de matematiske modelberegninger er valide. Det ses af nedenstående graf, at det integrerede resultat over måleperioden at offgas instrumentet og den nye emissions formel med flowmåling fra Stjernholms OXxOFF ligger meget tæt. Her kan 97,7% af den målte emission genfindes med den nye formel, hvorimod den gamle, som beror på iltoverførselshastigheden OTR, genfinder 115 % af den målte lattergasemission.



Der er dermed rigtig god sammenhæng mellem offgas-instrumentet og den opdaterede formel, som bruger Henrys tal og Stjernholms OXxOFF luftflowmåling. Som vist i $k_L a$ -forsøgene, vil en emissionsberegning på baggrund af OTR som forventet overestimere lattergasemissionen.

Det er derfor anbefalingen til Stjernholm A/S, at de fremadrettet benytter den nye formel til beregning af lattergasemissionen i Stjernholms OXxOFF.

Som det ses af figuren, er der stor forskel mellem Stjernholms OXxOFF lattergasemission og den emission, som beregnes ved brug af luftflow fra renseanlæggets måler. Denne forskel beror alene på forskellen i luftflow. Stjernholms OXxOFF ligger midt i beluftningsfeltet og måler derfor den mængde ilt, der er lokalt, hvor OXxOFF-måleren er placeret. Midt i beluftningsfeltet, hvor Stjernholms OXxOFF ligger, vil der være højere flow end ude ved kanten af beluftningsfeltet. Anlæggets flowmåler sidder på manifolden til tanken og måler alt luft tilført til tanken, og en emissionsberegning for hele tanken bør derfor baseres på denne flowmåling.

3.3 Emissionsberegning til brug for Stjernholms OXxOFF

For videre brug i Stjernholms OXxOFF anvendes den nye emissionsformel, som er beskrevet ovenfor. Den nye formel (2) er ikke blevet implementeret i Stjernholms OXxOFF PLC program i dette projekt, men emissionsberegninger for de to anlæg i nærværende rapport er lavet med denne formel.

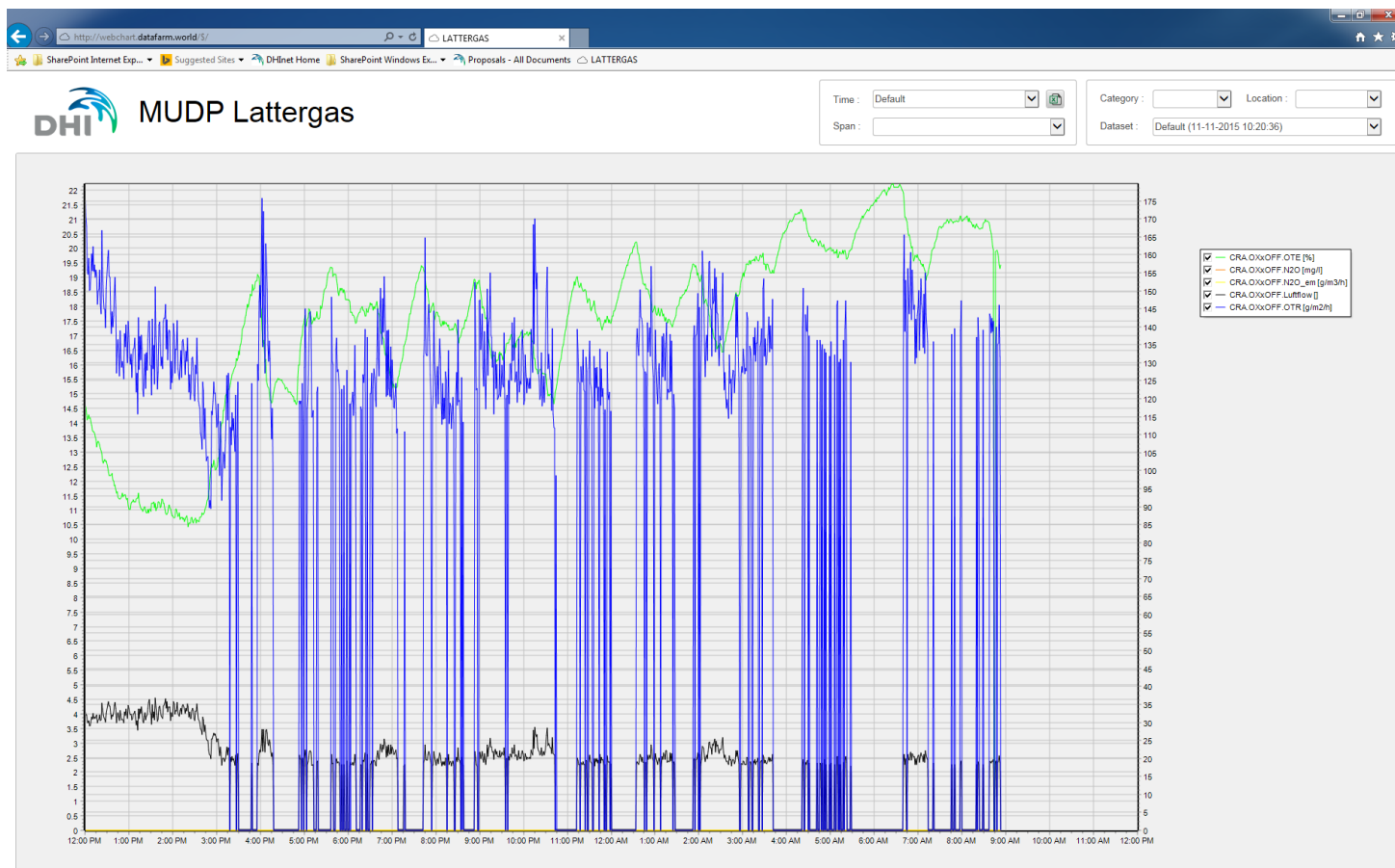
3.3.1 Drift af kommerciel sensor

Baseret på resultater og erfaringer opnået i pilot- og verifikationsforsøg er der udarbejdet en kravspecifikation til en kommerciel prototype. Denne inkluderer en fuld elektrisk og fysisk integration af Unisense Environments lattergassensor i Stjernholms OXxOFF PLC. Der vil således være en række outputsignaler fra måleenheden inkluderende luftflow, iltoverførselshastighed og lattergasemission.

Sensorer og beregninger er etableret jf. kravspecifikationerne på baggrund af indledende undersøgelser, som er vedlagt i Bilag 1. I forbindelse med projektet er kommunikationen til renseanlæggets SRO-system foregået via 4-20 mA signaler fra Stjernholms OXxOFF. Data har via SRO-systemet været tilgængelige via DIMS.core Webchart, så alle projektdeltagere i projektpe-

rioden har kunnet tilgå dem via internettet. Dette interface er en del af den formidling, som er leveret i arbejds pakke 3.

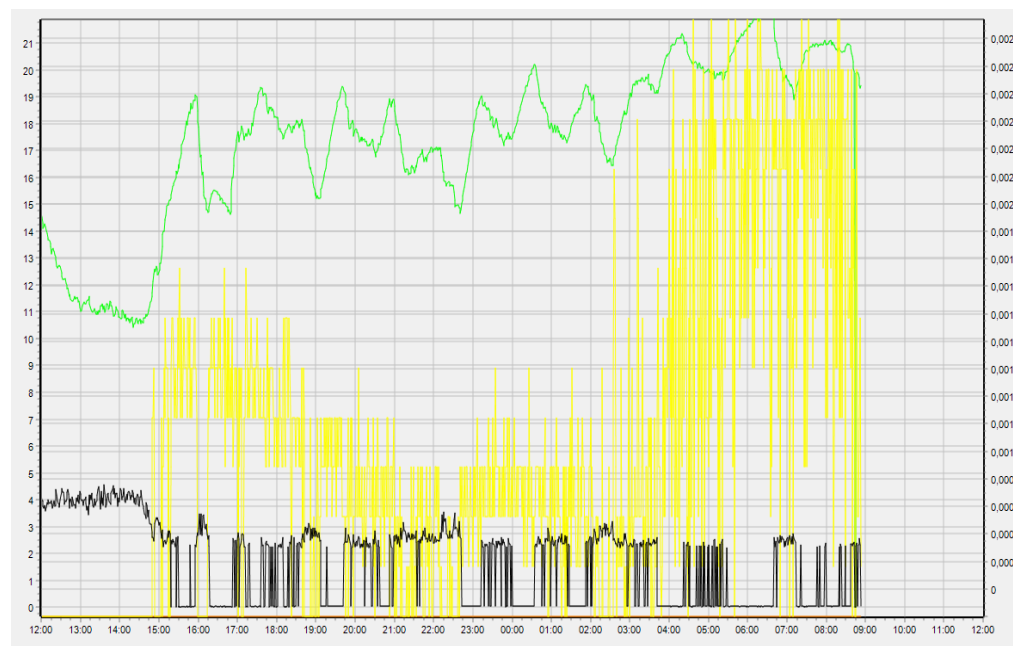
For Stjernholms OXxOFF installation på Nr. Vium Renseanlæg er OXxOFF'ens underliggende sensorer, inkl. lattergassensorens databehandling, varetaget inde i selve PLC'en i Stjernholms OXxOFF, som modtager det rå signal, hvorimod der i prototypen i Randers er opsat et opdelt setup, hvor lattergassensoren hænger for sig selv, og Unisense's sensor transmitter kommunikerer et skaleret og databehandlet analogt (4-20mA) signal over i Stjernholms OXxOFF. Sidstnævnte løsning skaber en klar grænseflade for ansvar for sensoren mellem Unisense Environment A/S og Stjernholm A/S.



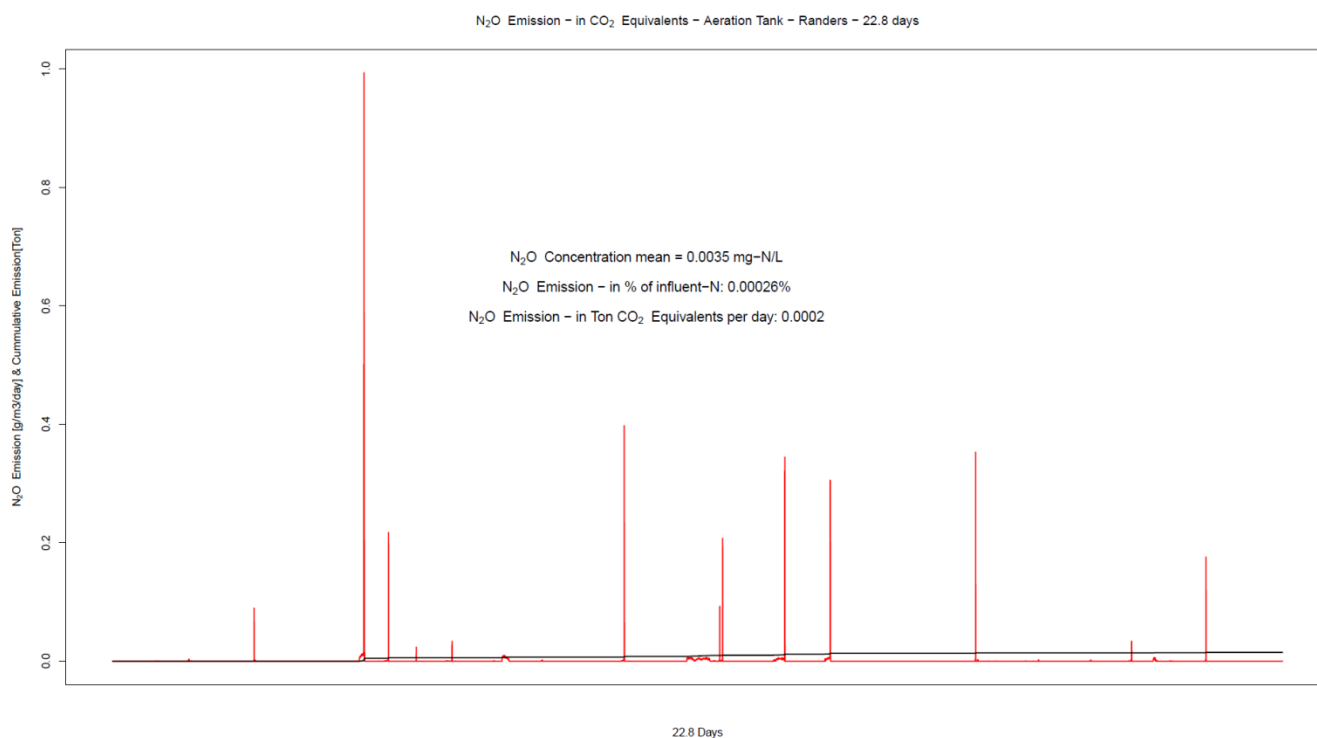
3.4 Samtidige målinger af beluftningsaktivitet og lattergasemission for Randers Centralrenseanlæg

Randers Centralrenseanlæg er et 130.000 PE recirkulations-renseanlæg med 7 parallelle processtanksæt. Renseanlægget er dog kun belastet med ca. 80.000 PE, svarende til det antal personer, der bor i renseanlæggets opland. På Randers Centralrenseanlæg har sensoren været placeret to forskellige steder i luftningstank 4 - dels ca. ¼ inde i den S-formede luftningstank, hvor ammonium-, nitrat- og iltkoncentrationer er relativt høje, og dels i den sidste ¼ af luftningstanken, hvor nitrat- og iltkoncentrationer er relativt lave. På denne måde er det tilstræbt at dække de mest ekstreme procesforhold, der kan findes i luftningstankene. De ved emissionsberegningerne anvendte luftflow er målt med Stjernholms OXxOFF, idet renseanlæggets egen luftflowmåling er en samlet måling for hele beluftningssystemet placeret før lufttilførslen til hver af de tre grene i S'et i de 7 luftningstanke, som reguleres individuelt baseret på iltmålinger.

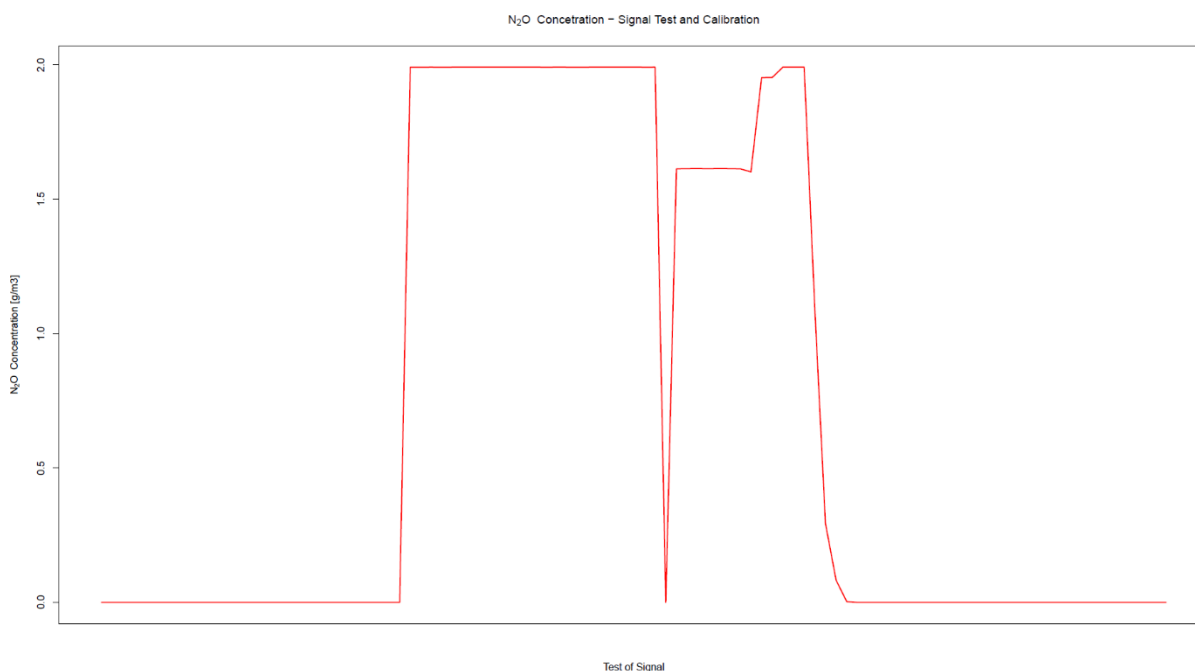
Nedenfor er et eksempel på samtidige målinger af beluftningseffektivitet og lattergasemission. Den grønne graf er iltudnyttelsen (venstre akse), den gule lattergasemissionen (højre akse), og den sorte graf er flow (venstre akse).



Over en måleperiode på 22,8 dage er der på Randers Centralrenseanlæg registreret en lattergasemission på 0,0002 ton CO₂-ekvivalent pr. dag. Dette er så tæt på detektionsgrænsen, at der praktisk talt ikke har været lattergasemission i den periode, hvor vi har målt. Dette hænger sammen med den lave belastning på anlægget. Under den samme måleperiode blev beluftningseffektiviteten også fuldt, og for størstedelen af tiden var der en meget fornuftig iltningsstyring, omend der også er et optimeringspotentiale ved en opdateret iltningsstyring.



For at kontrollere, at lattergaskoncentrationen er målt korrekt, er der påtrykt et fast signal lige før den ovenstående måleperiodes begyndelse på 2,0 mg/L. Der er inden målingerne desuden 0-punktskalibreret for at sikre, at de lave værdier, der måles, er valide. Kalibrering med 1,5 mg/L N₂O er også foretaget lige inden 0-punktskalibreringen, som det ses af nedenstående graf.



3.5 Beluftningsoptimering og lattergasemission på Nr. Vium Renseanlæg

I forbindelse med Stjernholms OXxOFF-installation på Nr. Vium Renseanlæg har Arla i samarbejde med projektkredsen lavet optimering af iltstyringen med baggrund i OXxOFF'ens OTR-værdi som styresignal. Ved at optimere på beluftningssystemet på Nr. Vium Renseanlæg har man sparet 35% på strømforbruget til blæserne. Denne besparelse er opnået ved brug af Stjernholms OXxOFF som online-måler af OTR, idet den nye styring regulerer efter det aktuelle iltbehov. Ved at regulere efter OTR opnås højere iltudnyttelse og lavere flow på blæserne. Beluftningseffektiviteten, som er målet for, hvor meget ilt man tilfører (enten som Kg ilt/kWh (SAE) eller Kg ilt/DKK), stiger, og potentialet for besparelsen på Nr. Vium beløber sig til ca. 1 million DKK om året ved fuld implementering af en Stjernholm OXxOFF-styring.

3.5.1 OTR styringsoptimering med Stjernholms OXxOFF

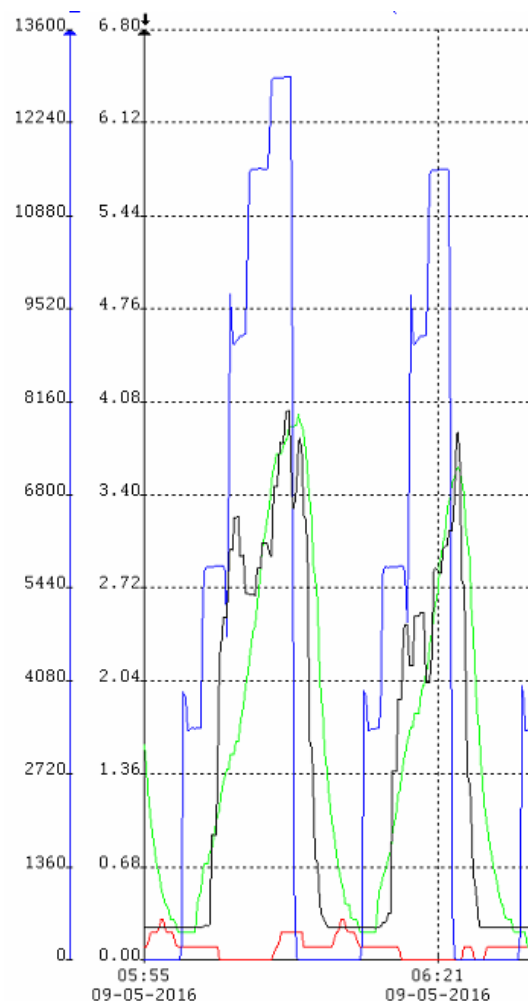
Først undersøges den etablerede styring med Stjernholms OXxOFF, hvorefter målte data benyttes til at udvikle en ny styring med Stjernholms OXxOFF.

Den oprindelige styring består af en ON/OFF bånd-controller, der initierer en tidsbaseret forøgelse af blæserintensiteten. Controlleren tænder for luften, når iltkoncentrationen ved Iltmåler 2 er under 0,5 mg/l, og slukker igen, når koncentrationen overstiger 3,5 mg/l. Når der slukkes, initieres en tvangspause på fem minutter, indtil trin 5, som bevares, indtil kontrolleren slukker.

| Trin | Intensitet [m ³ /h] |
|------|--------------------------------|
| 1 | 3300 |
| 2 | 5680 |
| 3 | 9145 |
| 4 | 11780 |
| 5 | 13181 |

Hvis der er stor belastning på anlægget, observeres der lange perioder i trin 5, mens det under lav belastning kan ske, at beluftningen slukker allerede i trin 4 eller endda trin 3.

Iltudnyttelser, iltningseffektivitet og energiforbrug blev undersøgt for hver af de 5 trin for at have et validt datagrundlag for implementering af styringen på baggrund af OTR (beluftningskapaciteten). Se figuren ved siden af og tabellen herunder for test af de 5 beluftningstrin.



2 iltningscykluser fra 9/5. Blå: m³/h luft. Rød: Ilt 1, Sort: OXxoff Ilt, Grøn: Ilt 2. Alle iltmålinger benytter sort y-akse.

| Trin | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----------------------------------|------|------|------|-------|-------|
| Luftflow [m ³ /h] | 3914 | 5896 | 8970 | 11440 | 12752 |
| OTE Avg [%] | 16,5 | 13,6 | 11,4 | 8,74 | 7,99 |
| SOTE Avg [%] | 20,2 | 15,7 | 12,7 | 9,71 | 8,85 |
| OTR Avg [kg/h] | 191 | 238 | 303 | 296 | 301 |
| O ₂ Start [mg/l] | 0,24 | 0,24 | 0,23 | 0,23 | 0,24 |
| O ₂ Slut [mg/l] | 2,61 | 2,02 | 1,58 | 1,29 | 0,89 |
| kW i drift [kW] | 80,7 | 131 | 194 | 254 | 295 |
| SAE Avg [Kg O ₂ /kWh] | 2,36 | 1,81 | 1,56 | 1,05 | 1,02 |

Som det ses af ovenstående tabel, er der betydeligt bedre iltoverførsel pr. kWh ved det første trin, hvorfor det er ønskeligt at køre i dette trin.

Den nye styring tager udgangspunkt i en sekventiel OXxOFF og PI-reguleret proces med et OTR-setpunkt, som styrer blæserintensiteten. Blæserflowet bruges til at beregne en start OTR-værdi, som sekventielt opdateres gennem en trinvis process. Der er en række fordele ved en PI-reguleret proces, fremfor en fast ON-OFF reguleret tidsstyring. Processen bliver dynamisk reguleret, således at den kan svinge op, når der er behov for mere ilt, men også ned igen, hvis der ikke er så meget behov for ilt. I-leddet gør, at disse udsving bliver mere jævne.

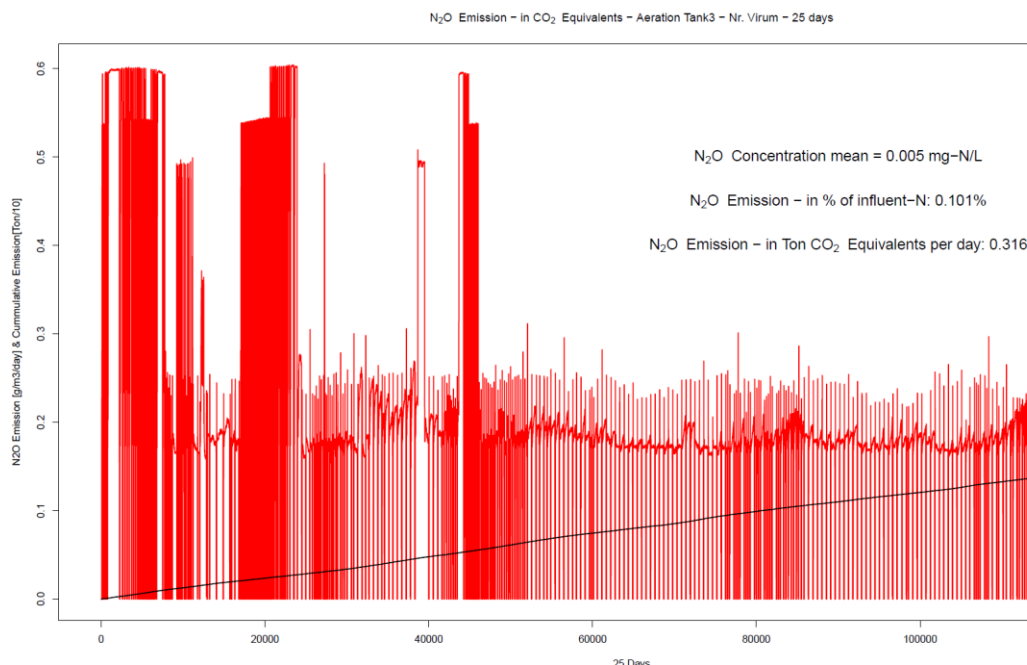
Tanken bag ved denne styring er, at den iltoverførsel, der er i starten, er et udtryk for det generelle iltbehov i den nuværende spildevandssammensætning. Der laves derfor en opstartstid, hvor Stjernholms OXxOFF estimerer driftsperiodens OTR og bruger denne som setpunkt i driftsperioden, inden der er en fast indlagt pause. Derefter gentages driftsperioden igen.

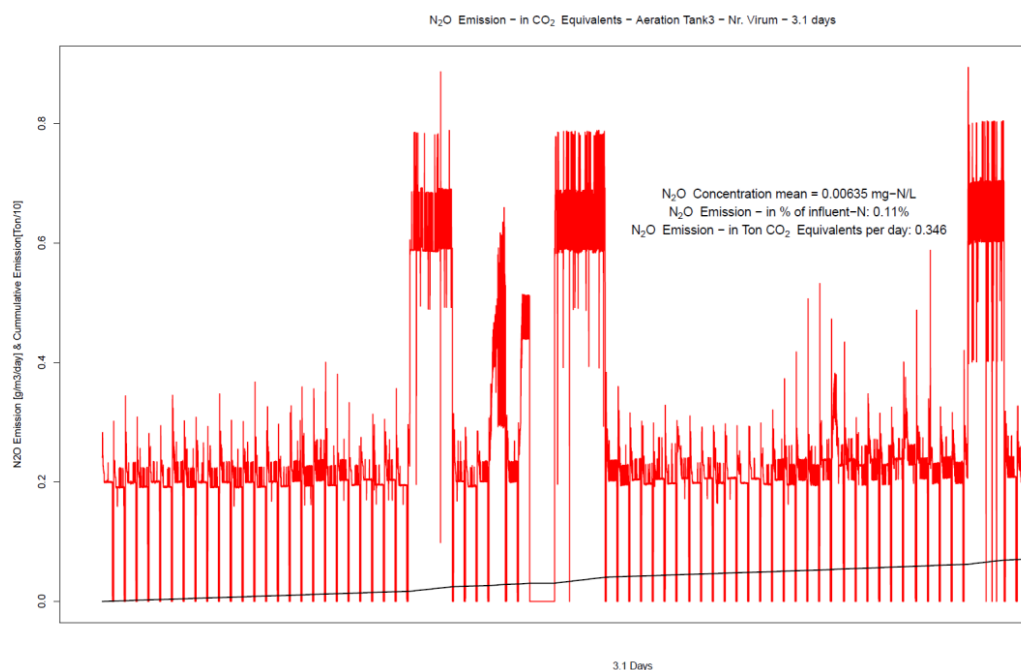
Som beskrevet tidligere giver den nye styring energibesparelser på 35%, som det også fremgår af tabellen herunder.

| | kWh/dag | kWh/kg COD | OTE |
|-----------------------|---------|------------|-------|
| Gammel Styring | 2948 | 0,372 | 15,38 |
| Ny Styring | 1916 | 0,288 | 22,36 |
| % Besparelse | 35,0 | 22,5 | 31,2 |

3.5.2 Lattergasemission under energioptimeringer på Nr. Vium

Under hele optimeringsforløbet på Nr. Vium Renseanlæg blev lattergaskoncentrationer og emissioner fulgt. For at dokumentere, at de opnåede store besparelser på beluftningen ikke er sket på bekostning af en øget lattergaskoncentration, blev der lavet før- og efterberegninger af lattergasemissionen.





Før optimeringen udledte Nr. Vium Renseanlæg 0,101% af tilløbs-N som emission af lattergas, og efter optimeringen udledte de meget tæt på det samme, nemlig 0,110% af tilløbs-N.

3.6 Sammenhængen mellem målt N₂O emission og litteraturværdier

For beregninger til CO₂-regnskaber benyttes normalt - i mangel af bedre - en fast faktor på 0,5% af N-influent som mål for, hvad der udledes som lattergasemission. På de renselanlæg, som vi har målt på i dette projekt, ligger raterne af kvælstof emitteret som lattergas imidlertid noget lavere, idet lattergasemissionen på Nr. Vium Renseanlæg er målt til 0,11%, svarende til ca. 1/5 af litteraturværdien, mens den på Randers Centralanlæg kun er 0,00026 %, hvilket er så lidt, at det reelt er negligerbart i forhold til CO₂ regnskabet for dette renselanlæg. Sidstnævnte resultat er en positiv overraskelse, idet Randers Centralrenseanlæg generelt drives med relativt lave iltsetpunkter, som ydermere alternerer for om muligt at opnå simultan denitrifikation. En sådan driftsform vil normalt indebære en forøget risiko for dannelse og emission af lattergas. De beskedne lattergasemissioner kan dog skyldes, at renselanlægget er relativt lavt og stabilt belastet (belastningen er ca. 60% af designkapaciteten og består næsten udelukkende af hus-spildevand).

4. Konklusion

4.1 Klimabevidst energioptimering på Nr. Vium Renseanlæg med Stjernholms OXxOFF

I projektet er det lykkedes at analysere Nr. Vium Renseanlæg og opnå en stor forståelse for anlæggets dynamik. På baggrund af denne indsigt blev der designet en række test af anlæggets respons i form af OTE, OTR og iltkoncentrationer på bestemte blæserintensiteter. Disse test har givet yderligere viden om anlægget.

Med dem in mente er der blevet lavet en række nye styringer, hvor online offgas-målinger er en integreret og essentiel del. Disse styringer har medført et markant fald i energiforbruget til beluftning (35%) og dermed en klar gevinst for Arla og samfundet i forbindelse med reduceret ressourceforbrug. Umiddelbart er rensekvaliteten i forhold til COD og Total-N ikke blevet påvirket inden for testperioden.

4.2 Klarlægning af mindre N₂O emission fra Randers Centralrenseanlæg ift. Litteraturværdier

Den teoretisk beregnede lattergasemission fra et renseanlæg beregnes til at være 0,5% af tilløbs-N i de danske drivhusgas-opgørelser (CO₂ og grønne regnskaber), hvilket ofte vil resultere i en emissionsandel for lattergas på ca. 20-40% af den samlede drivhusgas-emission. På baggrund af de målte data vurderes det, at lattergasemissionen på Randers Centralrenseanlæg er så sparsom, at dette bidrag er unødvendigt at medtage i CO₂-regnskabet, idet emissionsberegninger viser, at der stort set ikke forekommer lattergasemissioner fra renseanlæggets luftningstanke.

Som nævnt i tidligere afsnit kan dette skyldes, at anlægget er forholdsvis lavt og stabilt belastet, hvilket gør, at kvælstofprocesserne er i balance. Dette viser, at der kan findes driftsformer, der giver meget lave lattergasemissioner, hvilket betyder, at der er et betydeligt reduktionspotentiale for de anlæg, der ligger markant højere (jf. resultaterne fra tidligere undersøgelser).

Det er derfor vigtigt at måle lattergasemissionen, da det har stor betydning for det samlede CO₂ aftryk for et renseanlæg, hvor stor denne er. Af tidligere projekter, som DHI og Unisense har medvirket i, er det ligeldes vist, at der er stor forskel på størrelsen af lattergasemissionen fra anlæg til anlæg, foruden den ovenfor viste forskel mellem den teoretisk beregnede og den målte lattergasemission. På baggrund heraf vurderes det, at lattergasemissionen bør måles online, således at renseanlæggenes styring løbende kan justeres, hvis lattergasemissionerne bliver for høje, og så anlæggets CO₂-regnskab baseres på den reelt forekommende lattergasemission i stedet for teoretiske værdier.

Kombinationen af Stjernholms OXxOFF måler og Unisense's lattergassensor giver mulighed for at måle emissionen kosteffektivt, yderst præcist og online.

4.3 Potentiale for sensor til øget fokus på lattergasemission som CO₂ kilde

Elproduktion giver en uønsket kuldioxidudledning (CO₂-udledning), da energiproduktionen stadig i væsentligt omfang kommer fra forbrænding af fossilt brændstof i form af kul eller gas med tilhørende elproduktion. Den danske CO₂-udledning er knap 0,2 kg pr. kWh (0,478 kg/kWh i 2010).

Forsyningsselskaberne har ud over omkostningerne til elforbruget ofte et krav om at reducere kuldioxidudledningen, da en nedgang i udledningen af denne klimagas (som øger temperaturen på jorden) er et nationalt og internationalt mål.

CO₂-regnskabet er et samlet mål for udledningen af den totale mængde af klimagasser. I stedet for at nævne de enkelte gasser, omregnes udledningen til en klimaeffekt, som modsvarer kuldioxid. En af de vigtigste klimagasser ud over CO₂ er lattergas (N₂O), hvor udledning af 1 kg har en effekt, som svarer til 300 kg CO₂.

Lattergas er vigtig for forsyningernes CO₂-regnskab, da der produceres lattergas under rensningen for kvælstof. Her er det vigtigt, at renseprocesserne kan producere lattergas i mængder, som kan udgøre fra 10-100% af CO₂-regnskabet. En uhensigtsmæssig styring af renseprocesserne kan øge lattergasudledningen med mere end 100% i forhold til en styring, som indbefatter måling af N₂O og dermed lavere emission. De enkelte forsyninger har hidtil været uforskyldte i denne manglende kontrol med lattergasudledningen, idet stoffet har været vanskeligt og dyrt at måle.

Der findes nu en veldokumenteret sensor til måling af lattergas i procestankene, og emissionen kan estimeres med rimelig sikkerhed via en emissionsmodel og et kendskab til reaktorudformingen samt til luftflowet, der gennemløber tankene.

Luftflowet kan bestemmes via flowmåleren i Stjernholms OXxOFF, men man skal her nøje vurdere, om denne måling kan anvendes til at opskalere til luftflowet for det samlede anlæg: Er luftflowet fra 1 m² repræsentativt for det samlede anlæg jf. resultaterne fra verifikationen på Marselisborg Renseanlæg? Alternativt kan man anvende luftflowmålere placeret på det samlede beluftningssystem eller dele af dette.

Ved starten af projektet var det forventet, at man kunne opnå en mere nøjagtig bestemmelse af N₂O-emissionen ved en online bestemmelse af k_La-værdien for ilt via Stjernholms OXxOFF. Gennem projektet har det imidlertid vist sig, at en anden emissionsmodel, hvor man ikke er afhængig af en k_La for ilt, giver en mere nøjagtig bestemmelse af emissionen. Den nye emissionsmodel er også verificeret i andre studier, bl.a. /4/.

Kombinationen af de to sensorer giver stadig en unik mulighed for en samtidig reduktion af energiforbruget til beluftning og en minimering af den samlede klimapåvirkning. Det vil også være et godt værktøj til trouble shooting på anlæg med en kompleks opbygning, hvor der ikke umiddelbart kan etableres et repræsentativt målepunkt for hele systemet. Enheden kan således forholdsvis let flyttes rundt. I dette projekt har der primært været fokuseret på bundbeluftede anlæg, og for overfladebeluftede anlæg er der stadig en udfordring, idet den anvendte emissionsmodel ikke kan anvendes her. Her vil man nok stadig være afhængig af k_La-betragtninger – og forsøge, om der kan skabes en sammenhæng mellem OTR og energiforbruget til beluftningen.

Som tidligere nævnt er der i dette projekt fundet lavere emissioner end i tidligere studier, hvilket viser, at der rent faktisk findes en anlægs- og driftsplatform med marginale lattergasudledninger. En platform, der løbende vil blive defineret og udbygget i takt med øgede målinger og erfaringer. Dette betyder også, at der er et markant potentiale i måling og minimering af lattergas, som kan høstes i de kommende år og nedbringe den samlede drivhusgasemission fra spildevandssektoren.

5. Referencer

- /1/ http://www.dmu.dk/foralle/luft/co2_ven_eller_fjende/co2_udslippet_i_danmark_og_resten_af_verden/

- /2/ Schulthess, R. & Gujer W. (1996): *Release of nitrous oxide (N₂O) from denitrifying activated sludge: Verification and application of a mathematical model*. Water Res. 30, 521-530.

- /3/ Foley, J., de Haas, D., Yuan, Z.; Lant, P. (2010): *Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment plants*. Water Res. 44, 831-844.

- /4/ Ricardo Marques, A., Rodriguez-Caballero, Adrian Oehmen, Maite Pijuan (2016): *Assessment of online monitoring strategies for measuring N₂O emissions from full-scale wastewater treatment systems*. Water Res. 99, 171-179

- /5/ *Monitorering og minimering af lattergasemission fra renseanlæg*. <http://vtu-fonden.dk/projektzonen/projekter/2011/7271.aspx>

Bilag 1. Kravspecifikation for måleudstyr til emissionsmålinger af lattergas

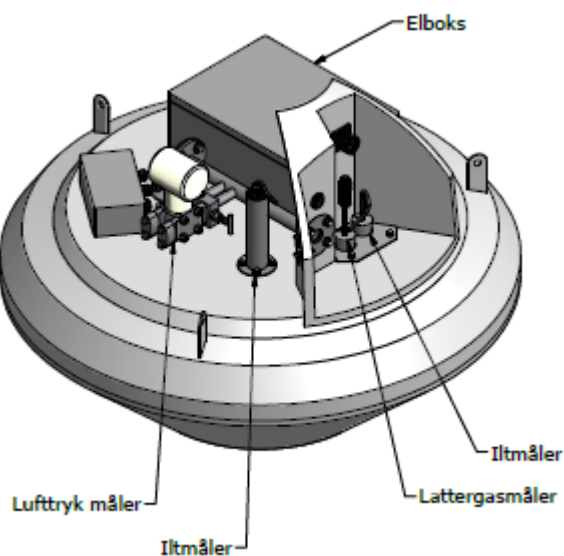
Introduktion

I forbindelse med MUDP-projektet "Udvikling af Måleenhed til kortlægning af samtidig beluftningseffektivitet og lattergas fra emission af renseanlæg" er Stjernholms OXxOFF en vigtig enhed for udviklingen af målesystemet. Stjernholms OXxOFF's udformning sikrer stabilitet, når den ligger i vandet, hvilket er nødvendigt for pålidelige målinger af offgas.

Sensorspecifikation

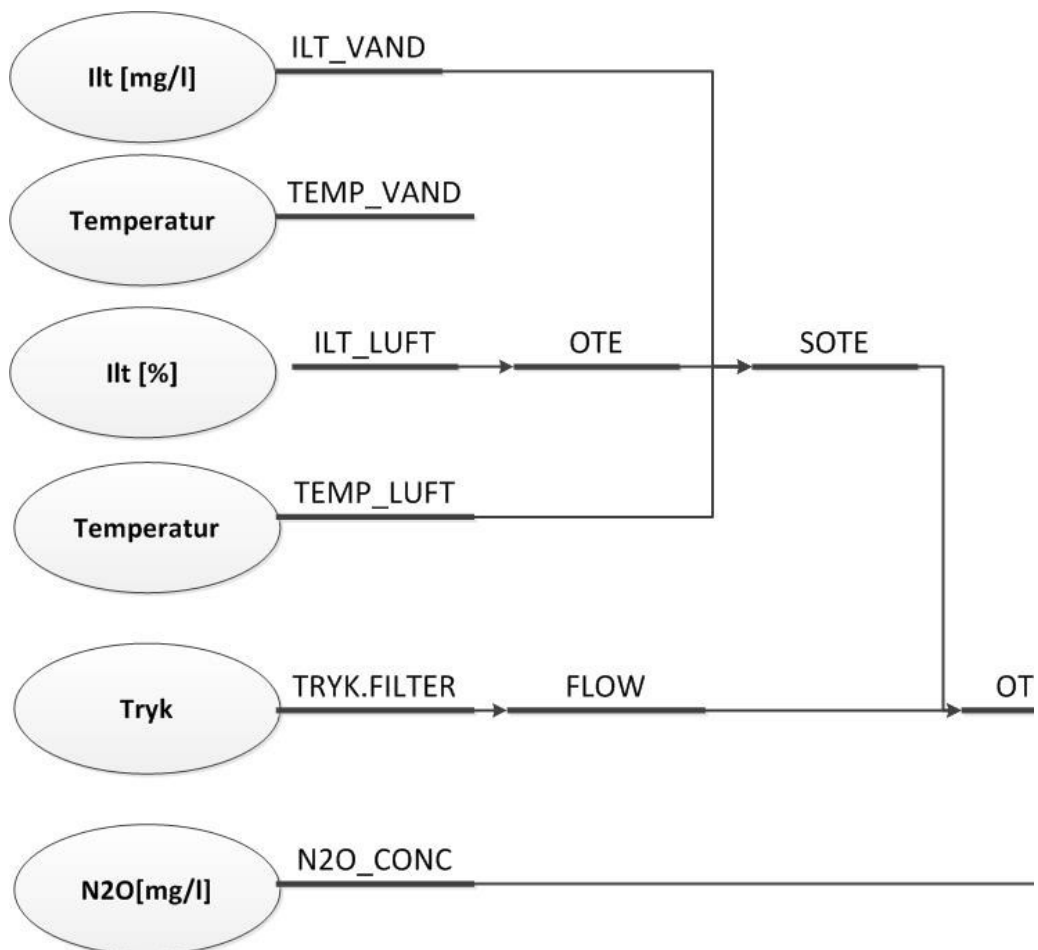
For måling af lattergasemission og energieffektivitet er følgende sensorer en forudsætning:

- Iltmåling i vandfasen
- Iltmåling i luftfasen
- Lattergasmåling i vandfasen
- Flowmåling af offgas flowet.



Målinger fra måleenheden

Ud fra ovenstående 4 sensorer kan værdierne indrammet i cirkel i oversigten herunder måles direkte, og derudfra kan de understregede måleenheder måles/beregnes. Det er de understregede måleenheder, der ønskes som output. Herunder er vist, hvilke målinger der skal bruges til de forskellige outputs:



For registreringer af flowmålinger med tryktransducer er det vigtigt at finde det minimale tryk, ved hvilket flowmåleren lige akkurat kan måle. For alle tryk under dette minimum skal flowmålerresultatet sættes til 0. Ligeledes er det ved beregninger af OTR vigtigt, at værdien sættes til 0, når der ikke detekteres et flow.

Output fra måleenhed

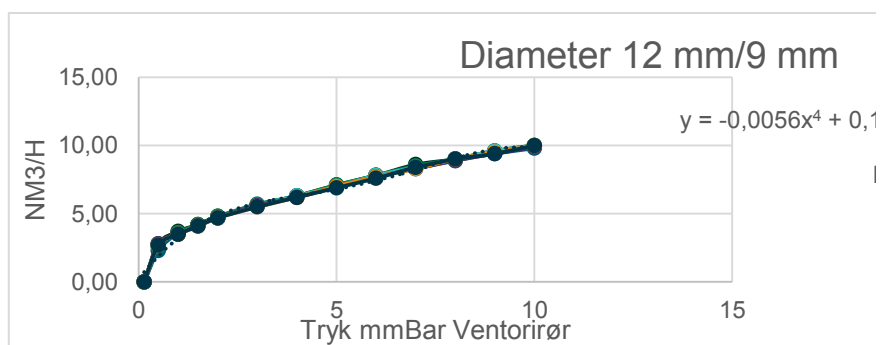
For brug i dette projekt anbefales følgende output skaleringer:

| | | |
|-------------|----------|-----------|
| Ilt_vand | 0-10 | [mg/L] |
| Temp_vand | 0-30 | [C] |
| Ilt_luft | 1 – 100 | [%] |
| Temp_vand | 0 – 30 | [C] |
| Tryk.Filter | 0-10 | [mbar] |
| Flow | 0 – 9,95 | [m3/hr] |
| OTE | 0-40 | [%] |
| SOTE | 0-40 | [%] |
| OTR | 0-1200 | [g/m2/hr] |
| N2O_conc | 0-2 | [mg-N/L] |
| N2O_emis | 0-5 | [g/m3/hr] |
| | | |

Venturi rør til flowmålinger

Forud for specifikation af måleenhed til lattergasmålinger er der i anden sammenhæng udført undersøgelser for at verificere præcisionen af flowmålinger med venturirør i stedet for pitotrør. Det viser sig, at for brug i Stjernholms OXxOFF er der to rør, der kan dække det behov,

Stjernholm A/S har til flowmålinger. I indeværende projekt benyttes det mindste venturirør, idet testforsøg viser, at dette venturirør giver stabile tryk.



Under 0,5 bar stoler vi ikke på flowmålingerne, hvorfor der ved trykmålinger under 0,5 altid skal komme et flow på 0 ud som output fra måleenheden, når dette venturirør benyttes.

Bilag 2. Principper for OXxOFF beregninger

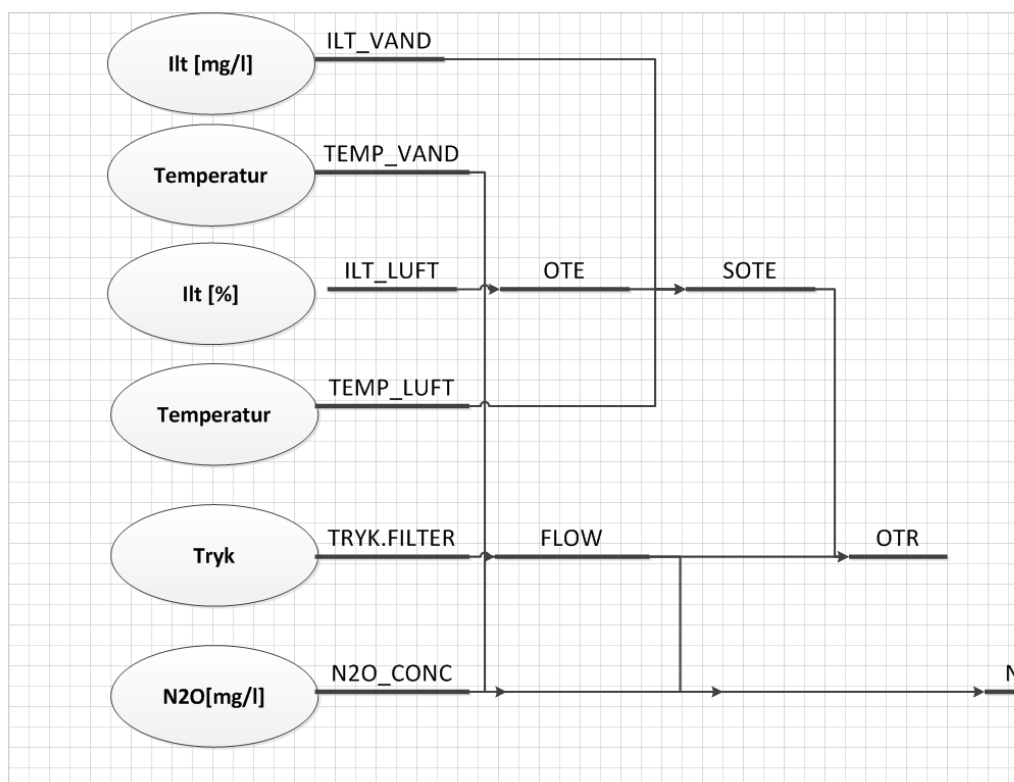
OTE: Iltudnyttelsen er måling af den mængde ilt, der er forbrugt. Den luft, kompressoren leverer til beluftsingsfeltet, er 100% mættet med ilt (atmosfærisk luft). I Stjernholms OXxOFF sidder der en iltensor inde i hatten, som måler, hvor meget ilt der er i den luft, der kommer op gennem bassinet. Forskellen på det, der kommer ind, og det, der kommer ud af bassinet, er OTE.

SOTE: Standard Iltudnyttelsen er OTE, hvor der korrigeres for ilt-indholdet i vand. Da iltudnyttelsen falder, jo mere ilt der er i vandet, er dette den mest nøjagtige måde at opgøre iltudnyttelsen på.

OTR: Iltoverførselshastigheden er det aktuelle iltforbrug i g/h. Altså præcis hvor mange gram ilt, der bliver overført fra luftbobler til væsken. Beregningen af OTR er baseret på iltudnyttelsen og flowet, som også måles i Stjernholms OXxOFF.

Lattergasemission: Den mængde lattergas, der emitteres, måles ved hjælp af Unisense's lattergassensor og Stjernholms OXxOFF flowmåler. Før denne afrapportering brugte Stjernholms OXxOFF OTR til emissionsberegning. Projektets resultater har vist, at man i stedet skal bruge flowet samt temperaturen for at beregne lattergasemissionen med størst mulig præcision.

Den nye processtegning ser derfor således ud:



Bilag 3. Forretningsmæssigt potentiale for kombineret måleenhed

Forsyningselskaber fokuserer på at mindske omkostninger og miljøbelastning

I top fem af driftsomkostninger på renseanlæg ligger udgifterne til energi. Det er samtidig en post, som ledelsen kan kontrollere og i mange tilfælde reducere. Valg af maskiner og deres styring har stor betydning for ressourceforbrug og påvirkning af miljøet. Påvirkningen af miljøet bliver opgjort blandt andet som CO₂ udledning.

Der er i vores dagligdag kommet en fokus på ressourceforbrug og klimabelastning, der måske kan bruges som eksempel til at få medarbejdere i branchen til at fokusere mere på energi og klimabelastning.

De færreste vil købe en bil uden at vurdere forbrug af brændstof i en sammenligning af biler, man overvejer at købe. Liter brændstof svarer til forbrug af energi.

Biler sælges i dag med en klar besked om afstanden, man kan køre pr. liter forbrugt brændstof (km/L). Opgørelsen svarer til, hvor mange kg ilt beluften tilfører renseprocessen pr. kWh el forbrugt til beluften. Kilo ilt modsvarer km og liter brændstof modsvarer kWh.

Klimagasudledningen ved kørsel bliver opgjort som CO₂ udledt pr. km.

I den almindelige kørsel har de fleste nyere biler måling af km pr. liter brændstof, og det er et tal, mange holder løbende øje med og forsøger at have så højt som muligt, da det sparer penge og forurener mindre.

Vi skulle gerne nå dertil, at spildevandsbranchen er lige så fokuseret på tilsvarende nøgletal for energiforbrug og drivhusgasemission.

Energieffektiv beluftning mindsker omkostningerne til energi

Energiforbruget til aktiv slamanlæg er domineret af elforbruget til beluftning, som tilfører ilt til renseprocesserne. 25-70% af energiforbruget går til denne proces.

Energieffektiviteten udtrykt som kg ilt/kWh er 1-1,5 for overfladebeluftere og fra 1,5 til 3 for finboblet diffusorbeluftning. Valget af beluftningssystem har derfor stor betydning for omkostningerne til energi, og her vil overgang fra overfladebeluftning til en effektiv bundbeluftning reducere omkostningerne med i størrelsesordenen 50%.

Det har tidligere været umuligt at måle effektiviteten af beluftning. Driftspersonalet har derfor oftest ikke opdaget, hvis den er blevet dårligere, f.eks. hvis bundbeluftningsudstyret er tilstoppet eller blevet slidt. Effektiviteten er samtidig afhængig af mængden af luft, som bliver udledt som bobler fra hver diffusor. Derved vil energiforbruget være afhængigt af styringen af renseprocesserne, som generelt styres efter iltbehovet. Med andre ord ved driftspersonalet meget lidt konkret om den mest energiforbrugende installation på renseanlæg!

Elforbrug og klimapåvirkning – CO₂-udledning

El-produktionen giver en uønsket kuldioxidudledning (CO₂-udledning), da energiproduktionen stadig i vidt omfang kommer fra forbrænding af fossilt brændstof i form af kul eller gas med tilhørende el-produktion. Den danske CO₂-udledning er knap 0,2 kg pr. kWh.

Forsyningsselskaberne har ud over omkostningerne til elforbruget ofte et krav om at reducere kuldioxidudledningen, da en nedgang i udledningen af denne klimagas (som øger temperaturen på jorden) er et nationalt og internationalt mål.

CO₂-regnskabet er et samlet mål for udledningen af den totale mængde af klimagasser. I stedet for at nævne de enkelte gasser, omregnes udledningen til en klimaeffekt, som modsvarer kuldioxid. En af de vigtigste klimagasser ud over CO₂ er lattergas (N₂O), hvor udledning af 1 kg har en effekt, som svarer til 300 kg CO₂.

Lattergas er vigtig for forsyningernes CO₂-regnskab, da der produceres lattergas under rensningen for kvælstof. Her er det vigtigt, at renseprocesserne kan producere lattergas i mængder, som kan udgøre fra 10-100% af CO₂-regnskabet. En uhensigtsmæssig styring af renseprocesserne kan øge lattergasudledningen med mere end 100% i forhold til en styring, som indbefatter måling af N₂O og dermed lavere emission. De enkelte forsyninger har hidtil været uforskyldte i denne manglende kontrol med lattergasudledningen. Det skyldes, at stoffet har været vanskeligt og dyrt at måle.

Nye måleteknikker leverer kontrol med energieffektiviteten og med klimagasudledningen

En enhed har mulighed for at blive forsyningernes bedste ven i jagten på reduktion af elforbrug og udledningen af klimagasser – nemlig offgas-måleren.

Første trin i offgas-måleren er at opsamle gassen, som forlader overfladen, og føre gassen ind i en iltmåler. Iltoptaget i vandet kan man beregne ved at måle iltindholdet i den gas, som er til overs, efter den indblæste luft har forladt vandfasen. Iltindholdet i luften omkring os, som indblæses i vandet, sættes til 100%. Boblerne fra bundbelufterne overfører ilt til vandfasen, og derfor er iltindholdet i den opsamlede luft lavere end 100%. Jo dybere tanken er, og jo bedre beluftningsinstallationen er udført, desto lavere iltindhold har den opsamlede luft. Mindre effektive iltningssystemer har et iltindhold i offgassen på 90-93%, mens meget effektive systemer har et indhold på 65-70%. I de to tilfælde er iltudnyttelsen henholdsvis 7-10% og 30-35%.

Forbedret el-effektivitet – op til 20-80%

I tilfældet med den lave effektivitet har man ved rengøring og udskiftning af diffusorer opnået stigninger på 20-80%, hvilket tilnærmelsesvis vil give tilsvarende lavere elforbrug og dermed elbesparelser.

I tilfældet med høj effektivitet har man målt mere end 50% fald i forbindelse med ændret luftindblæsning, som er forårsaget af anlæggets iltstyring, som igen er forårsaget af øget spildevandsbelastning. Dermed er der perioder, hvor der er mulighed for at opnå en energibesparelse ved at justere luftindblæsningen, og det kan ske uden væsentligt ændret effektivitet i spildevandsrensningen.

Klimagasudledning og styring af produktionen af lattergas

Offgas-måleren kan med fordel fås bestykket med elektrode, som kan måle lattergaskoncentrationen i vandet. Denne bestyknings giver to usædvanlige fordele. For det første kan vi måle, under hvilke betingelser der bliver udviklet lattergas. For det andet kan vi beregne, hvor meget lattergas der bliver udledt til atmosfæren.

Målinger med offgas-udstyr og lattergassensor vil gøre det muligt at identificere både effektiv og ineffektiv drift af beluftningssystemet, og samtidig kan konsekvenserne i form af lattergasproduktionen og -emissionen følges. Herefter vil der efter en gennemgang af data for både iltningseffektivitet og lattergas kunne udpeges strategier for opnåelse af både mindre energiforbrug og mindre lattergasemission.

Bilag 4. N₂O sensorbaserede emissionsberegninger



N₂O Mass Transfer Coefficient Calculation from Aeration Field Size and Air Flow

In the aerated reactor the size of the total aeration field (m²) and the total air flow Q_A (NOTE the unit! m³s⁻¹) for the aerated reactor is known. The superficial gas velocity of the aerated reactor is calculated by dividing the total air flow with the aeration field size:

$$v_g \cong \frac{Q_A}{\text{Aeration field size}} \quad (1.1)$$

From the superficial gas velocity of the aerated reactor the N₂O mass transfer coefficient k_La_{N₂O} can be calculated using the empirical formula 3.2 based on laboratory experiments at 20°C in mixed WWTP liquorⁱ:

$$k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} = \left\{ \frac{D_R}{D_L} \right\}^{-0.49} \times 34500 \times (v_g)^{0.86} \quad (1.2)$$

$$k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} = \left\{ \frac{D_R}{0.815 \text{ m}} \right\}^{-0.49} \times 34500 \times (v_g)^{0.86} \quad (1.3)$$

v_g: Superficial gas velocity of the reactor (m³m⁻²s⁻¹) D_L: Depth of the laboratory reactor (0.815 m)
D_R: Depth over the diffuser of the reactor (m) k_La_{N₂O}: N₂O mass transfer coefficient (d⁻¹)

Finally the k_La_{N₂O} calculated above is temperature corrected to the process temperature T_{Process}:

$$k_L a_{N_2O \ T_{Process}} = k_L a_{N_2O \ 20^\circ C} \times (1.024)^{(T_{Process} - 20^\circ C)} \quad (1.4)$$

N₂O Emission Formula

The dissolved N₂O concentration and mixed liquor temperature are measured with the N₂O Wastewater System and values used to calculate the temperature compensated N₂O concentration in the aerated reactor (g-N/m³). From the input of the air flow Q_A in the aerated reactor the temperature compensated N₂O mass transfer coefficient k_La_{N₂O} is calculated using equations 1.1- 1.4.

With the values k_La_{N₂O} and Q_A known the N₂O emission rate per reactor volume can be calculated using the formula belowⁱⁱ:

$$\text{Aerated zones:} \quad r_{N_2O, T_{Process}} = H_{N_2O, T_{Process}} \times S_{N_2O} \left[1 - e^{-\frac{k_L a_{N_2O} \cdot V_R}{H_{N_2O} \cdot Q_A}} \right] \times \frac{Q_A}{V_R} \quad (2)$$

$$\text{Non - aerated zones:} \quad r_{N_2O, T_{Process}} = k_L a_{N_2O, T_{Process}}^{Non-aerated} \times \left[S_{N_2O} - \frac{C_{N_2O, air}}{H_{N_2O, T_{Process}}} \right] \quad (3)$$

r_{N₂O, T_{Process}}: N₂O emission rate (g-N N₂O m⁻³ d⁻¹)

H_{N₂O, T_{Process}}: Henrys constant (dimensionless)

S_{N₂O}: N₂O concentration (g-N N₂O m⁻³)

Q_A: Total air flow through reactor per day (m³d⁻¹)

V_R: Volume of aerated part of reactor (m³)

k_La_{N₂O}: N₂O mass transfer coefficient (d⁻¹)

C_{N₂O, air}: N₂O concentration in air equilibrium (g-N/m³)

The dimensionless Henrys constant $H_{N_2O, T_{Process}}$ is like the N_2O Wastewater sensor signal dependent on process temperature and the temperature correction is calculated using equations 4.1- 4.2.

$$H_{N_2O, T_{Process}} = \frac{1}{k_H \cdot R \cdot (T_{Process} + 273.15) \cdot 10^3 \frac{L}{m^3}} \quad (4.1)$$

$$k_H = k_H^\ominus \times e^{\left(\frac{-\Delta \text{solnH}}{R} \left(\frac{1}{T_{Process} + 273.15} - \frac{1}{T^0 + 273.15} \right) \right)} \quad (4.2)$$

k_H^\ominus : Henrys constant at the std. temp. ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$) $T_{Process}$: Mixed liquor temperature ($^\circ\text{C}$)

T^0 : Standard temperature = 25°C

$-\Delta \text{solnH}/R$: The enthalpy of the solution (K)

From literature the N_2O mean values for k_H^\ominus , $-\Delta \text{solnH}/R$ and supporting constant numbers are given in the below table:

| k_H^\ominus ($\text{mol} \cdot \text{L}^{-1} \cdot \text{bar}^{-1}$) | $\frac{-\Delta \text{solnH}}{R}$ (K) | $C_{N_2O, air}$ ($\text{g} \cdot \text{N} / \text{m}^3$) | R ($\text{m}^3 \cdot \text{bar} \cdot \text{mol}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$) | $k_{L a_{N_2O}}^{Non-aerated}$ |
|--|--------------------------------------|--|---|--------------------------------|
| 0.0247 | 2675 | 0.0003 | 8.314×10^{-5} | 2 – 4 |

ⁱ Foley, J., de Haas, D., Yuan, Z.; Lant, P. (2010) Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient removal wastewater treatment, plants. *Water Res.* 44, 831-844.

ⁱⁱ Schulthess, R. & Gujer W. (1996) Release of nitrous oxide (N_2O) from denitrifying activated sludge: Verification and application of a mathematical model, *Water Res.* 30, 521-530.

Udvikling af måleenhed til kortlægning af samtidig beluftningseffektivitet og lattergas fra emission af renseanlæg

Formålet med dette projekt har været at udvikle en kosteffektiv måleenhed til online-måling af beluftningseffektivitet og lattergasemissioner fra renseanlæg, da de hidtil anvendte offgas målere til lattergas er dyre og ikke lavet til brug i procesanlæg. Den nye måleenhed etableres ved at integrere En sensor til online-måling af lattergas i væskefasen fra Unisense Environment A/S og en offgas-måler OXxOFF fra Stjernholm A/S, som giver online information om luftflow og beluftningseffektivitet.

Kombinationen af de to sensorer giver mulighed for at måle lattergas fra renseanlæg, og dermed kan lattergas indgå i CO2 regnskabet for forsyningsselskaber.



Miljøstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.mst.dk