



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Emissionsmonitoring/ beregning og minimeringstiltag for lattergas på Marselisborg Renseanlæg

MUDP rapport

Marts 2021

Udgiver: Miljøstyrelsen

Forfatter:

Anders Lynggaard-Jensen, Aarhus Vand A/S

Maiken Bjørn Madsen, Aarhus Vand A/S

Fotos:

Aarhus Vand A/S

ISBN: 978-87-7038-278-6

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.	Baggrund og formål	4
1.1	Baggrund	4
1.2	Formål	4
2.	Emissionsovervågning	5
2.1	Beskrivelse af Marselisborg Renseanlæg	5
2.1.1	Organisk og hydraulisk belastning	6
2.1.2	Alternerende proces	6
2.2	Rejektvandsbehandling med ANAMMOX-proces	9
2.3	Opsætning af målere til emissionsovervågning i hovedstrøm og sidestrøm	9
2.3.1	Procestanke	9
2.3.2	DEMON®-anlæg	11
2.4	Emissionsberegninger	11
2.4.1	Nuværende beregninger for N ₂ O emission	11
2.4.2	Real tids emissionsberegning	12
2.5	Emissionsovervågning i procestanke	14
2.6	Emissionsovervågning i Demon-anlæg	17
2.7	Resultater og evaluering	19
2.8	Konklusion	23
3.	Emissionsminimering - hovedstrøm	24
3.1	Metode og udførelse	24
3.1.1	Heterotrof denitrifikation	24
3.1.2	Glykoldosering	25
3.2	Resultater og Evaluering	25
3.3	Konklusion	27
4.	Emissionsminimering - Sidestrøm	28
4.1	Beskrivelse af opsætning	28
4.2	Installation og drift af lattergas sensorer	29
4.3	Beskrivelse af Emissionsberegning	30
4.4	Beskrivelse af standard styring	32
4.5	Beskrivelse af forsøg	34
4.6	Udjævning af belastning	34
4.7	Demon proces respons	36
4.8	Styring efter lattergas	39
4.9	Konklusion	42
5.	Referencer	43

1. Baggrund og formål

1.1 Baggrund

På Marselisborg Renseanlæg er der gennem en årrække monitoreret for lattergas produktionen og emissionen i en af anlæggets fire aktivslam tanke. Aarhus Vand har således i samarbejde med DHI og med støtte fra DANVA (VTUF) udviklet og implementeret online og realtids beregninger for lattergas emissionen. I dette projekt udvides monitoreringen/beregningerne til at omfatte endnu en luftningstank samt anlæggets Demon rejektivandbehandlingsanlæg.

Herudover skulle projektet implementere og teste lattergas minimeringsstyringer for både hoved- og side-strømmen på Marselisborg Renseanlæg. Da det mod forventning viste sig at blæserne på Demon anlægget på Marselisborg rensanlæg ikke kunne gå langt nok ned i ydelse blev lattergas minimeringsstyring flyttet til tilsvarende Demon anlæg på Viby rensanlæg, hvor blæserydelsen kan gå længere ned.

Projektet har opgraderet og vedligeholdt lattergas sensor installationerne på Marselisborg Renseanlæg. Det var nødvendigt at udskifte den eksisterende luftflowmåler, og der er blevet installeret en ekstra lattergassensor og luftflowmåler i hovedstrømmen, således at 1/2-delen af den samlede biologiske rensning bliver monitoreret – én tank i hver linje monitoreres. Dette giver også mulighed for at sammenligne lattergasemissionen i de to linjer, og planen er at kunne se effekten af lattergas minimeringstiltag foretaget i den ene linje.

Herudover er indkøbt en ny komplet lattergas sensor installation til anammox anlægget (Demon) på Marselisborg, til monitorering af lattergasemissionen, således at der skabes et mere fuldstændigt grundlag for estimering af den samlede lattergasemission baseret på målinger. Denne skal så sammenlignes med sædvanligt estimat baseret på tillædt kvælstof til anlægget.

Der gennemføres implementering og evaluering af styringstiltag til minimeringen af lattergasemissionen fra hovedstrømmen på Marselisborg Renseanlæg, hvor Aarhus Vand tidligere i samarbejde med DHI manuelt har testet forskellige kulstofstyringer til emissionsminimering forårsaget af kulstofmangel. Det var planlagt at anvende en del af en intern kulstofkilde (supernatant fra koncentreringstank), men dette kom i strid med anden anvendelse af denne, hvorfor der blev implementeret et doseringsanlæg med palletank til indkøbt kulstofkilde. Dosering sker på baggrund af realtidsmåling af lattergassen.

Da implementering og test af minimeringstiltag på rejektivandbehandlingsanlæg blev flyttet til Viby rensanlæg var det nødvendigt at renovere lattergas sensor installationen der, samt opgradere med en lattergassensor mere – da planen er at styre efter lattergas (og andre målinger) anses det for nødvendigt at have en sensor i hver tank i Demon anlægget.

1.2 Formål

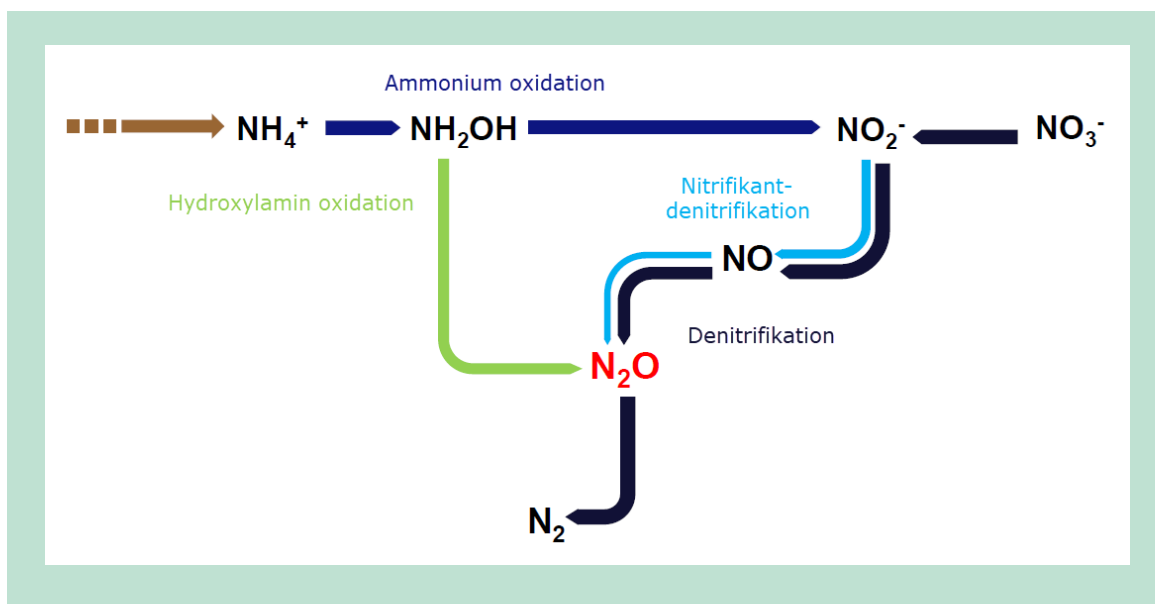
Projektets formål kan sammenfattes som:

- Estimere lattergasemissionen fra Marselisborg rensanlæg på baggrund af realtidsmålinger og beregninger og sammenligne med estimat baseret på tillædt kvælstof til anlægget.
- Implementere og teste styring af kulstoffdosering til aktivslam tank på et rensanlæg med det formål at minimere lattergasemission, hvis denne dannes ved kulstofmangel.
- Implementere og teste styring af luftflow til Anammox proces (Demon) med det formål at minimere lattergasemission, hvis denne dannes ved høj belastning af nitrifikationen.

2. Emissionsovervågning

Dette afsnit indeholder beskrivelse af det arbejde, der er udført for at overvåge lattergasproduktion og -emission på Marselisborg Renseanlæg i projektperioden. Afsnittet beskriver anlægget generelt, stofbelastning, drift af den biologiske hovedproces, rektvandsbehandling med Anammox®-processen, instrumentering i hovedproces og DEMON®-anlæg og lattergasemissionsberegning. For lattergasemission beregnes den forventede emission på baggrund af tilløbs- og afløbsmængder og den faktiske mængde på baggrund af realtidsmålinger fra lattergas sensorer fra Unisense.

Lattergasemission kan foregå via 3 forskellige pathways som vist i FIGUR 1. Lattergas er et biprodukt af hydroxylamin oxidation og nitrifikant-denitrifikation. Lattergas er også et intermediat i denitrifikationsprocessen. Hydroxylamin oxidation fremmes hvis der er højt iltindhold eller høj NH_4^+ koncentration i procestanken. Nitrifikant-denitrifikation fremmes hvis der er lavt iltindhold eller høj NO_2^- koncentration i procestanken. Denitrifikation hæmmes hvis der er ilt til stede, hvis der er høj NO_2^- koncentration eller hvis der er kulstofmangel. Dette kan resultere i, at denitrifikationsprocessen ikke færdiggøres og dermed stopper omdannelsen ved lattergas. (Jensen, 2019)



FIGUR 1. Processer i hovedstrømmen på renseanlæg, der kan danne lattergas. Lattergas kan dannes i nitrifikationsfasen og i denitrifikationsfasen.

2.1 Beskrivelse af Marselisborg Renseanlæg

Marselisborg Renseanlæg er det største af Aarhus Vands 4 renseanlæg med en godkendt kapacitet på 220.000 PE. Anlægget er belastet med 30.000 PE fra bl.a. fødevarerindustrier og olieoprensning. Derudover er der mulighed for aftømning for slamsugere, både eksterne og interne. Der aftømmes ca. 25 læs fra slamsugere pr. dag. Anlægget består af forbehandling der inkluderer grovrister, finrister og sand- og fedtfang. Forbehandlingen er efterfulgt af et primærtrin hvor COD fældes med FeCl_3 . 50% af COD belastningen fjernes i primærtrinnet som primærslam, der pumpes på rådnetårnene. Det resterende spildevand og slam behandles i et biologisk trin der fjerner kvælstof. Fosfor fjernes med FeCl_3 i det biologiske trin og i sandfilter. Efter det biologiske trin ledes spildevandet til efterklaringstanke hvor slam sedimenterer og rensat spildevand ledes til sandfiltre til efterpolering. Herfra ledes det rensede spildevand til recipient, som er Aarhus Bugt. Slammet fra efterklaringstankene forafvandes og pumpes til rådnetårnene. Det udrådnede slam slutaftvandes og køres bort. Rektvandet fra slutaftvandingen ledes til struvitanlæg for at udvinde fosfor. Efter struvitudvinding ledes rektvandet til DEMON-anlæg hvor ammonium fjernes. Herefter ledes rektvandet tilbage til den biologiske proces.

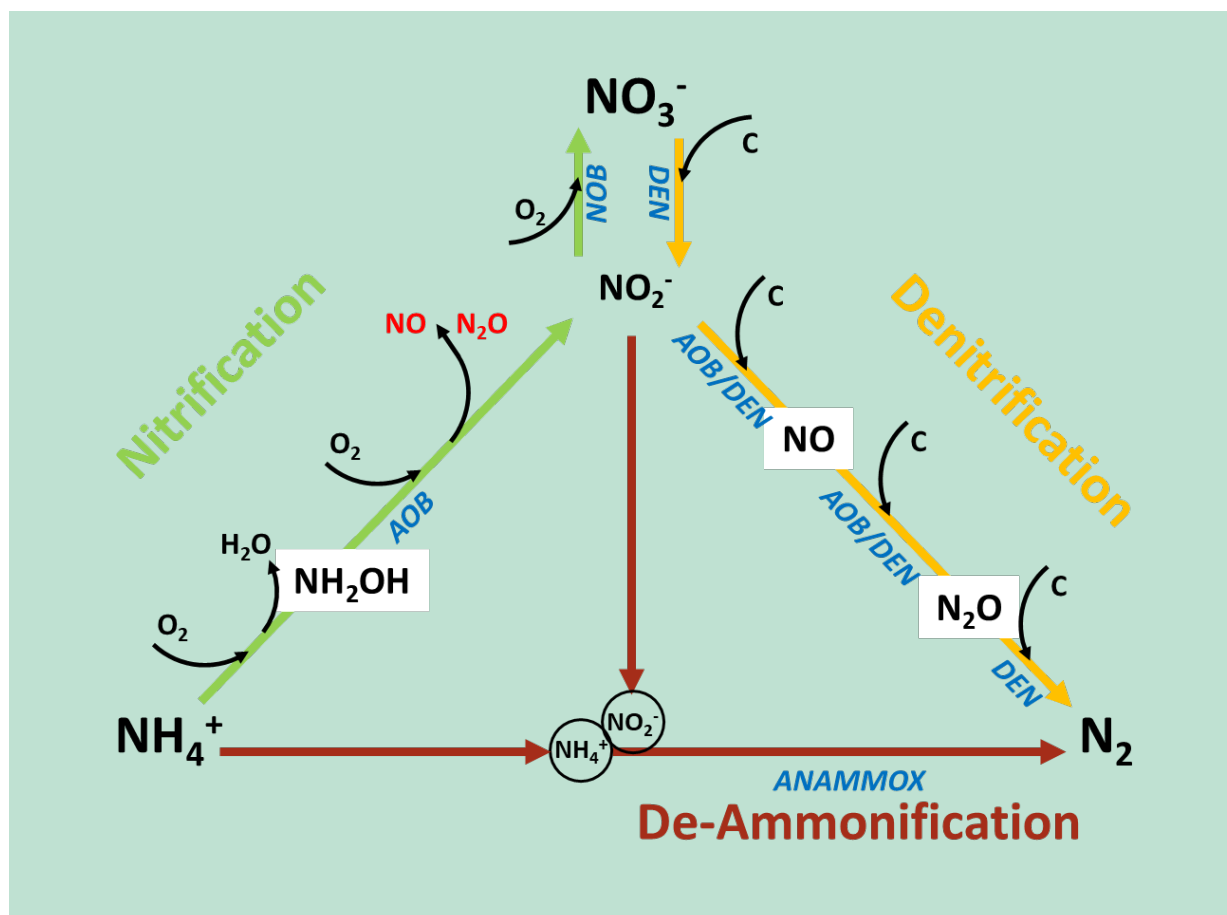
2.1.1 Organisk og hydraulisk belastning

TABEL 1. Organisk og hydraulisk belastning for 2019 på Marselisborg Renseanlæg

Parameter	Enhed	Indløb	Udløb
Årsflow	m ³ /år	11.071.530	10.908.381
BOD	Kg/år	2.957.406	21.352
COD	Kg/år	6.766.265	311.276
Total N	Kg/år	530.728	67.594
Total P	Kg/år	68.553	3.066
SS	Kg/år		46.769
Nedbør	mm/år	824	
PE (BOD)	60 g/p·d	135.041	
PE (COD)	120 g/p·d	154.481	

2.1.2 Alternerende proces

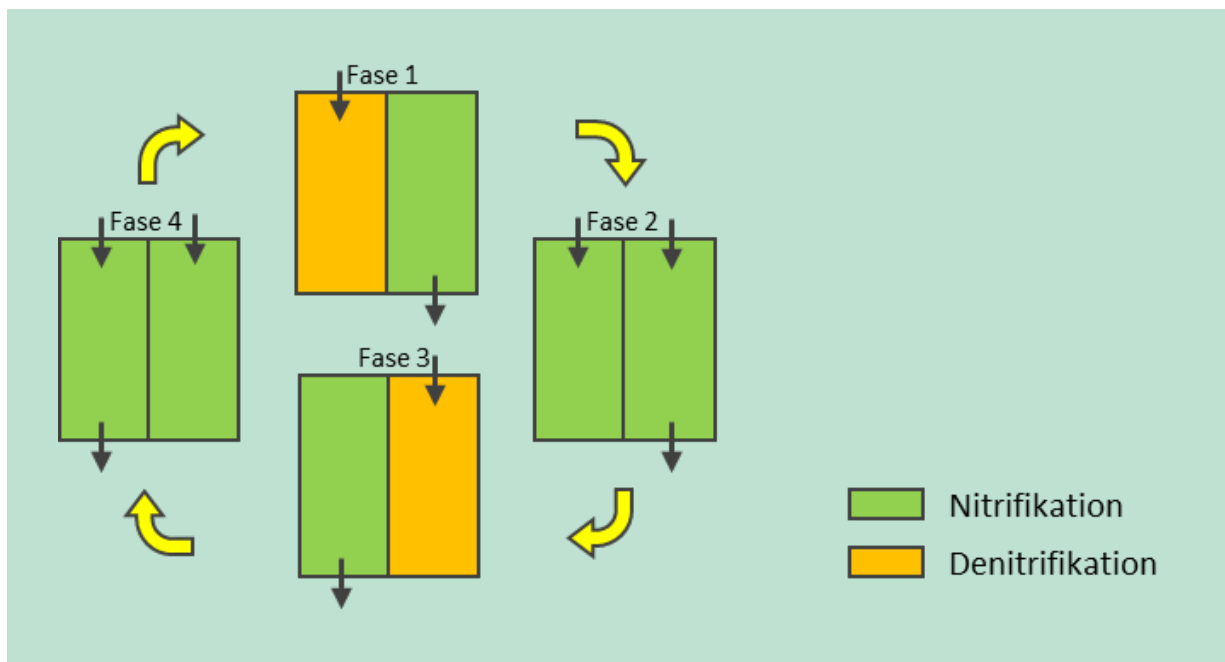
Kvælstoffjernelse sker på Marselisborg renselanlæg dels som alternerende proces (nitrifikation/ denitrifikation) i hovedstrøm og som Demon-proces (de-ammonifikation) i sidestrømsproces til rektvandsbehandling.



FIGUR 2. Sammenhæng mellem nitrifikation/denitrifikation og de-ammonifikation. Lattergas produktion ses som biprodukt (rød skrift) under nitrifikationen og som mellemprodukt under denitrifikationen.

FIGUR 2 viser en forsimplet sammenhæng mellem de forskellige kvælstof omsætningsprocesser. Lattergas kan dannes som biprodukt under nitrifikation og dannes som mellemprodukt under denitrifikation. Dannelsen som biprodukt under nitrifikation sker hvis omsætningshastigheden af ammonium er høj – oxidationen kan ikke følge med. Mellemproduktet er en del af denitrifikationsprocessen og dannes altid, men omsættes herefter til frit kvælstof. Hvis der er kulstofmangel, kan denitrifikationen ikke løbe til ende og lattergas vil ophobes i systemet.

Den alternerende proces kører i et tankpar med to hovedfaser (fase 1 og Fase 3 jf. FIGUR 3) og 2 mellemfaser (Fase 2 og fase 4). Denitrifikation sker i tanken med tilløb og ingen beluftning, og nitrifikation i tanken med afløb og beluftning. Når nitrifikationstanken skifter til at være denitrifikationstank fjernes den dannede nitrat med det kulstof der er i tilløbet. Mellemfasen sørger for at ammonium ikke bliver for høj i afløb ved skift. En cyklus på Marselisborg Renseanlæg i projektperioden varer 70 minutter.



FIGUR 3. Cyklus for alternerende proces.

Marselisborg renseanlæg har to tankpar (FIGUR 4), der er spejlinger af hinanden. Dvs. at tank 1 og 4 følges ad og tank 2 og 3 følges ad. I perioden er kørt med faste fase længder, og faseskift i de to tankpar følger hinanden. Styringen af beluftningen sker i henhold til et ammonium belastningsestimat, hvor blæsertryk er en funktion af belastningsestimatet.

Herudover beluftes tankene også i forbindelse med lugtfjernelse fra ventilationsluften, der kommer fra de overdækkede primærtanke. Ventilationsluften tilføres kun tanke med nitrifikation.



2.2 Rejektvandsbehandling med ANAMMOX-proces

Ved traditionel biologisk kvælstoffjernelse benyttes nitrificerende og denitrificerende bakterier, som fjerner kvælstof ved omsætning af organisk stof. Denne proces er meget energikrævende sammenlignet med kvælstoffjernelse med ANAMMOX bakterier. Brugen af ANAMMOX bakterier gør det muligt at omsætte NO_2^- og NH_4^+ til frit N_2 under anoxiske forhold uden brug af ilt og organisk stof.

Det reducerede behov for organisk stof til kvælstoffjernelse har flere fordele. Disse fordele består i øget kvælstoffjernelseskapacitet på renseanlægget, da der kan høstes mere organisk stof i primærtrinnet, som dermed ikke belaster procestankene. En afledt, positiv konsekvens af dette er reduceret energiforbrug til kvælstoffjernelse i procestankene. Derudover øges energiproduktionen også, da der er større gaspotentiale i primærslam end i bioslam. Ulemperne ved denne form for kvælstoffjernelse er, at omsætningsprocessen er meget langsom, og at ANAMMOX bakterierne vokser meget langsomt ved de lave temperaturer, som det danske spildevand har.

På Marselisborg Renseanlæg er der i 2014 implementeret kvælstoffjernelse med ANAMMOX bakterier i sidestrømmen. DEMON® anlægget udgøres af to nedgravede tanke på hver 140 m³, en master- og en slave-tank. Der er recirkulering imellem de to tanke, så det er en antagelse, at der er samme driftsbetingelser i begge tanke. Rejektvandet fra tankene ledes tilbage til hovedstrømmen og ind i procestankene.

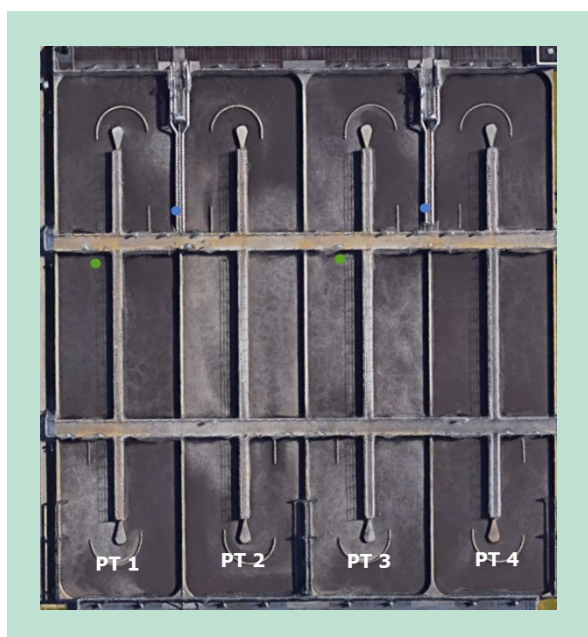
DEMON® anlægget på Marselisborg Renseanlæg drives ved en temperatur på 28-34 °C afhængig af årstiden.

2.3 Opsætning af målere til emissionsovervågning i hovedstrøm og sidestrøm

På Marselisborg renseanlæg er der opsat 2 stk. N_2O sensorer i procesafsnittet og 1 stk. N_2O sensorer i DEMON anlæggets mastertank. Der er ligeledes installeret 2 stk. luftflowmålere på luftrør til procesafsnittet.

2.3.1 Procestanke

Af FIGUR 5 ses et satellitfoto af procestankene på Marselisborg Renseanlæg hvor to N_2O sensorer (Model: Nitrous Oxide sensor, Fabrikat: Unisense) og to luftflowmålere (Model: 640S-NAA-L13-M1-E3(26')-P2-V4-DD-0, fabrikat: Sierra) er installeret i forbindelse med dette projekt. De grønne prikker markerer placeringen af N_2O sensorerne, og disse ses også på billederne i FIGUR 6. De blå prikker markerer placeringen af luftflowmålerne, der også ses på billederne i FIGUR 7.



FIGUR 5. Satellitfoto over procestankene (PT) på Marselisborg Renseanlæg. N_2O sensorerne er placeret i hhv. PT 1 og 3 (grøn markering). Luftflowmålerne er placeret på rørene til hhv. PT 1 og 3 (blå markering).



FIGUR 6. TH: N₂O sensor i PT1. sensoren er neddykket ca. 30 cm under overfladen. TV: N₂O sensor i PT3. Sensoren er neddykket ca. 30 cm under overfladen. På billedet ses også controlleren begge sensorer er koblet på.



FIGUR 7. TV: Placering af luftflowmåler, markeret med blå, til PT1 med overholdt respektafstande. TH: Placering af luftflowmåler, markeret med blå, til PT3 med overholdte respektafstande. Der ses ligeledes et rødt display til manuel aflæsning af flow.

2.3.2 DEMON®-anlæg

I DEMON®-anlægget på Marselisborg Renseanlæg er der installeret 1 stk. N₂O sensor (Model: Nitrous Oxide sensor, Fabrikat: Unisense). Sensoren er neddykket ca. 30 cm under vandoverfladen. Af FIGUR 8 ses placering af sensor, og at DEMON-anlægget består af 2 stk ældre, nedgravede kemikalietanke.



FIGUR 8. DEMON®-anlægget på Marselisborg er etableret i to ældre, nedgravede kemikalietanke. På billedet ses sensorplacering og N₂O sensoren er markeret med en grøn cirkel.

2.4 Emissionsberegninger

2.4.1 Nuværende beregninger for N₂O emission

I dag beregnes N₂O emission fra renseanlæg som en kombination af kvælstofmængden i indløbsspildevandet og udløbsspildevandet. Mængderne er beregnet ud fra analyser lavet på flowproportionale døgprøver. For indløbsmængder vil datagrundlaget være 12 stk. analyser og for udløbsmængder er datagrundlaget 24 stk. analyser. Den beregnede N₂O emission omregnes til CO₂ bidrag i kg CO₂. Formlen er således (DANVA, 2012)

$$CO_2 \text{ emission [tons } CO_2] = \frac{((m_N \cdot EMF_{N_2O \text{ indløbsspildevand}}) + (D_{udledt3} \cdot EMF_{N_2O \text{ udløbsspildevand}}))}{1000} \cdot GWP_{N_2O} \quad (2.1)$$

m_N : masse af N i indløbsspildevand (tons N)

$EMF_{N_2O \text{ spildevand}}$: emissionsfaktor (4,99 kg N_2O tons⁻¹ N i indløbsspildevand)

$D_{udledt3}$: N udledning fra renseanlæg (kg N)

$EMF_{N_2O \text{ udløbsspildevand}}$: emissionsfaktor (0,0157 kg N_2O kg⁻¹ N udledt)

GWP_{N_2O} : Global Warming Potential (296 kg CO_2 /kg N_2O)

Formlen består af 2 led, hhv. for indløbsspildevand og udløbsspildevand. Det er første led, omhandlende indløbsspildevand, der kan undersøges i dette projekt eftersom det ikke er muligt at kontrollere de biologiske processer i recipienten. Det er dog muligt at påvirke processerne på renseanlægget, og derfor kan det første led påvirkes.

I TABEL 2 er N_2O emission for årene 2016-2019 beregnet som angivet i formel (2.1)

TABEL 2. N_2O emission udtrykt som CO_2 -eq pr. år i 2016-2019

Årstal	TN indløb [tons N]	TN udløb [kg N]	N_2O emission fra indløb [tons N_2O]	N_2O emission fra indløb som CO_2 eq [tons CO_2]	N_2O emission fra udløb [tons N_2O]	N_2O emission fra udløb som CO_2 eq [tons CO_2]
2019	531	67.594	2,65	784	1,06	314
2018	478	61.269	2,39	706	0,90	267
2017	582	63.966	2,90	860	1,00	297
2016	669	67.477	3,34	988	1,06	313

2.4.2 Real tids emissionsberegning

En anden måde at beregne N_2O emissionen fra renseanlæg er gennem masseoverførselskoefficienten ($K_L a$) for N_2O , procestankvolumen og temperaturen i procestankene. Denne metode benyttes af Unisense og er også den metode der benyttes i realtid i dette projekt til at beregne N_2O -emissionen.

2.4.2.1 Beregning af masseoverførselskoefficient for N_2O

I en beluftet procestank kendes det beluftede areal (m^2) og det totale luftflow ($m^3 s^{-1}$). Gashastigheden (v_g) i procestanken beregnes som i ligning (2.2)

$$v_g \cong \frac{Q_A}{\text{beluftet areal}} \quad (2.2)$$

Ud fra gashastigheden i procestanken kan N_2O masseoverførselskoefficienten v. standard betingelser ($k_{L a_{N_2O}}$) beregnes ved at benytte formel (2.3) (Foley, de Haas, Yuan, & Lant, 2010):

$$k_{L a_{N_2O \text{ } 20^\circ C}} = \left\{ \frac{D_R}{D_L} \right\}^{-0.49} \times 34500 \times (v_g)^{0.86} \quad (2.3)$$

$$k_{L a_{N_2O \text{ } 20^\circ C}} = \left\{ \frac{D_R}{0.815 \text{ m}} \right\}^{-0.49} \times 34500 \times (v_g)^{0.86} \quad (2.4)$$

v_g : Gashastighed i procestank ($m^3 m^{-2} s^{-1}$)

D_R : dybde over diffusere i procestanke (m)

D_L : Reaktordybde i laboratorieskala (0.815 m)

$k_{L a_{N_2O}}$: N_2O masseoverførselskoefficient (d^{-1})

2.4.2.2 Temperaturkompensering for $k_{L a_{N_2O}}$

$k_{L a_{N_2O}}$ beregnet i afsnit 2.4.2.1 skal kompenseres for temperaturen i procestankene ($T_{Process}$):

$$k_{L a_{N_2O \text{ } T_{Process}}} = k_{L a_{N_2O \text{ } 20^\circ C}} \times (1.024)^{(T_{Process} - 20^\circ C)} \quad (2.5)$$

2.4.2.3 N₂O Emissionsformel

Når k_{L,N_2O} og Q_A kendes kan N₂O emissionsraten beregnes ved at benytte formel (2.6) og (2.7) (Schulthess & Gujer, 1996):

$$\text{Beluftede områder: } r_{N_2O, T_{Process}} = H_{N_2O, T_{Process}} \times S_{N_2O} \left[1 - e^{-\frac{k_{L,N_2O}}{H_{N_2O}} \cdot \frac{V_R}{Q_A}} \right] \times \frac{Q_A}{V_R} \quad (2.6)$$

$$\text{Ikke - beluftede områder: } r_{N_2O, T_{Process}} = k_L a_{N_2O, T_{Process}}^{Non-aerated} \times \left[S_{N_2O} - \frac{C_{N_2O, air}}{H_{N_2O, T_{Process}}} \right] \quad (2.7)$$

$r_{N_2O, T_{Process}}$: N₂O emissionsrate (g-N N₂O m⁻³ d⁻¹)

$H_{N_2O, T_{Process}}$: Henrys konstant (dimensionsløs)

S_{N_2O} : N₂O koncentration (g-N N₂O m⁻³)

Q_A : luftflow i procestanke (m³d⁻¹)

V_R : beluftet volumen i procestanke (m³)

k_{L,N_2O} : N₂O masseoverførselskoefficient (d⁻¹)

Den dimensionsløse Henrys konstant $H_{N_2O, T_{Process}}$ afhænger af procestemperaturen og beregnes ved at benytte formel (2.8) og (2.9):

$$H_{N_2O, T_{Process}} = \frac{1}{k_H \cdot R \cdot (T_{Process} + 273.15) \cdot 10^3 \frac{L}{m^3}} \quad (2.8)$$

$$k_H = k_H^\theta \times e^{\left(\frac{-\Delta \text{soln}H}{R} \left(\frac{1}{T_{Process} + 273.15} - \frac{1}{T^\theta + 273.15} \right) \right)} \quad (2.9)$$

k_H^θ : Henrys konstant ved standardbetingelser (mol·L⁻¹·bar⁻¹)

T^θ : Standard temperatur = 25°C

$T_{Process}$: Procestemperatur (°C)

$-\Delta \text{soln}H/R$: Opløsningens enthalpi (K)

Følgende konstanter er brugt i beregningerne 2.6, 2.7 og 2.9.

TABEL 3. Konstanter benyttes til beregning af N₂O emission og Henrys konstant

k_H^θ (mol·L ⁻¹ ·bar ⁻¹)	$-\Delta \text{soln}H/R$ (K)	$C_{N_2O, air}$ (g-N·m ³)	R (m ³ ·bar·mol ⁻¹ ·K ⁻¹)	$k_L a_{N_2O, T_{Process}}^{Non-aerated}$
0,0247	2675	0,0003	8,314·10 ⁻⁵	2-4*

*) Her er anvendt værdien 2, der ofte anbefales i litteraturen.

2.5 Emissionsovervågning i procestanke

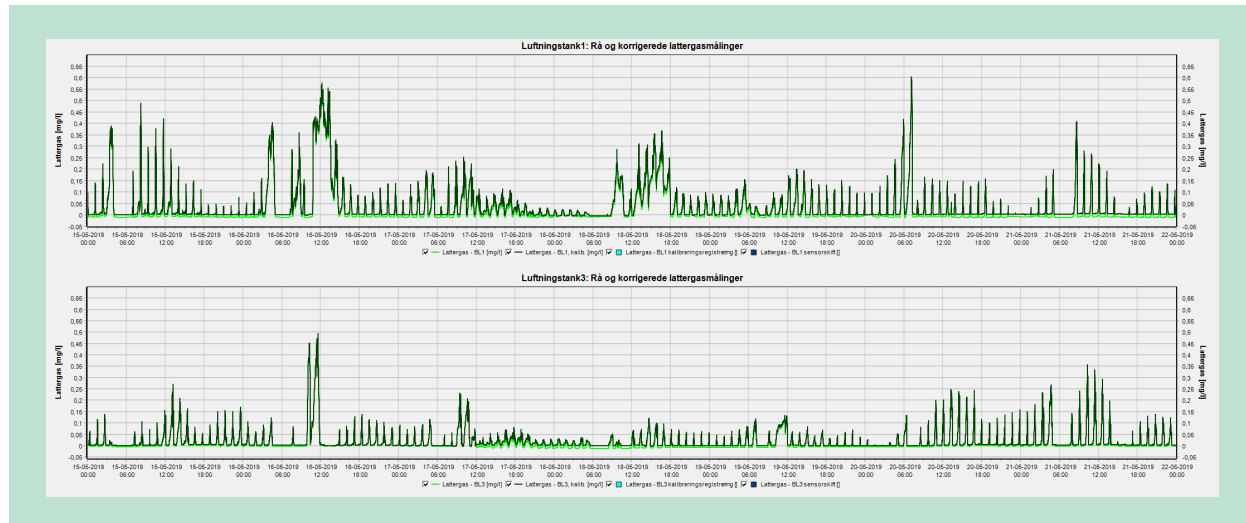
For at beregne lattergasemissionen fra luftningstankene konfigureres løbende beregning af denne fra tank 1 og tank 3. Resultaterne akkumuleres til døgnværdier og summeres, hvorefter der multipliceres med to for at få bidraget fra alle 4 luftningstanke.

De anvendte tidsserier til realtidsberegning af lattergasemissionen i luftningstank 1 er listet i Bilag 1. De 5 første tidsserier udgøres af signaler fra lattergassensor, luftflowmåler, temperaturføler samt statusinformation vedr. den fase tanken befinder sig i og ventilposition for tilgang af ventilationsluft. Disse logges og lagres én gang i minuttet og anvendes herefter i realtidsberegninger - software sensorer, der beregnes og lagres én gang i minuttet.

Sensorsignaler exponential filtreres inden anvendelse for at reducere støj på signalet. Herudover er det fundet nødvendigt at indføre en mellemregning for lattergassensoren, hvor denne kan kompenseres for nulpunktsdrift samt nogle ikke forklarede peak-værdier og drop til nulpunkt. Den anvendte korrektion, der logges til senere erfaringsudveksling, er foretaget semiautomatisk på forskellige tidspunkter gennem projektet. Korrektion for nulpunktsdrift findes ved at aflæse sensorsignalet, når procesforholdene definerer at lattergaskoncentrationen er nul. Metoden for beregninger i procestank 1 er også benyttet til beregninger for procestank 3.

De viste grafer i dette afsnit er alle i perioden 15-05-19 til 22-05-19. Der er valgt at vise en uge som eksempler, da det ellers vil blive vanskeligt at se detaljer i graferne. Perioden d. 15-05-19 til 22-05-2019 er valgt fordi sensorerne er kalibreret få dage forinden, og derfor forventes det, at data i denne periode er retvisende.

Af FIGUR 9 ses de rå (lysegrøn) og de korrigerede (mørkegrøn) målte N_2O -koncentrationer for procestank 1 og procestank 3 angivet i mg N/l. Koncentrationerne svinger hen over døgnet og ugen. I procestank 1 svinger koncentrationen mellem 0 og 0,6 mg/l og i procestank 3 svinger koncentrationen mellem 0 og 0,5 mg/l. En forklaring på, at N_2O -koncentrationen er lavere i procestank 3 kan være, at NH_4 -belastningen er lavest i procestank 3, og at der derfor ikke dannes så meget N_2O .



FIGUR 9. Rå (lysegrøn) og korrigerede (mørkegrøn) målte N_2O -koncentrationer for procestank 1 og procestank 3 i perioden 15-05-19 til 22-05-19 begge dage inklusiv.

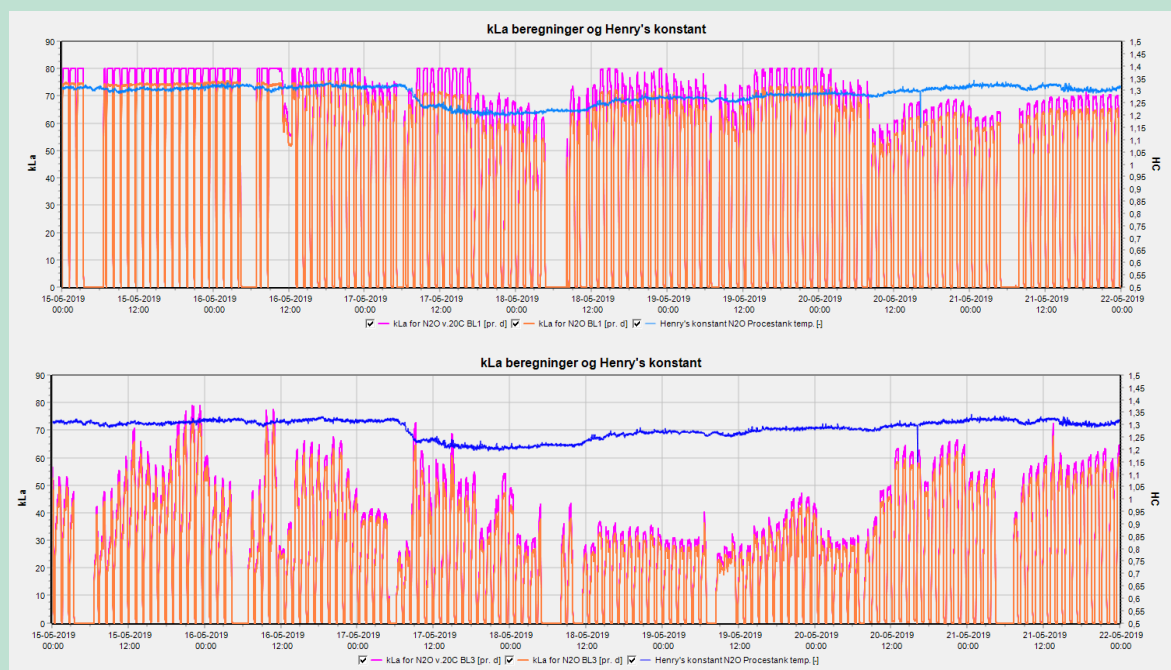
Luftflow fra ventilationsluft beregnes ud fra et fast flow fra den tilkoblede kapselblæser samt ventilstillinger i de fire luftningstanke. I fase 1 er luftflow = 0 (ventil i tank er lukket), i fase 2 og 4 det kvarte af det faste flow (alle ventiler åbne), og i fase 3 det halve af det faste flow (2 ventiler åbne).

Status for luftflow fra turboblæser er ikke kun styret af fasetallet, idet ammonium-belastningsestimat kan slukke blæseren ved lav belastning – også i nitrifikationsfaserne (fase 2, 3, 4). Derfor er beregnet en status ud fra flow-målersignal i stedet for fasetal.

Luftningstankens volumen er 4000 m³ og den har en dybde på 4 m. Diffusorarealer er 500 m² for luft fra turboblæser og 65 m² for ventilationsluft, altså beluftede volumener på 2000 m³ henholdsvis 260 m³.

Gashastigheden, v_g over diffusorfeltet beregnes som det aktuelle luftflow divideret med diffusorarealet. Herfra beregnes k_La for lattergas ved 20°C for de to diffusorarealer og luftflow, hvorefter de fundne værdier temperaturkompenseres. Formler ses i afsnit 2.4.2

Herudover beregnes Henry's konstant for lattergas ved den aktuelle temperatur, hvorefter de nødvendige tidsserier for beregning af den specifikke lattergas emission logget/beregnet med en frekvens på et minut haves tilgængelige (Bilag 1). Formel for beregning af Henrys konstant kan ses i afsnit 2.4.2 og værdierne for perioden 15-05-19 til 22-05-19 kan ses i FIGUR 10.



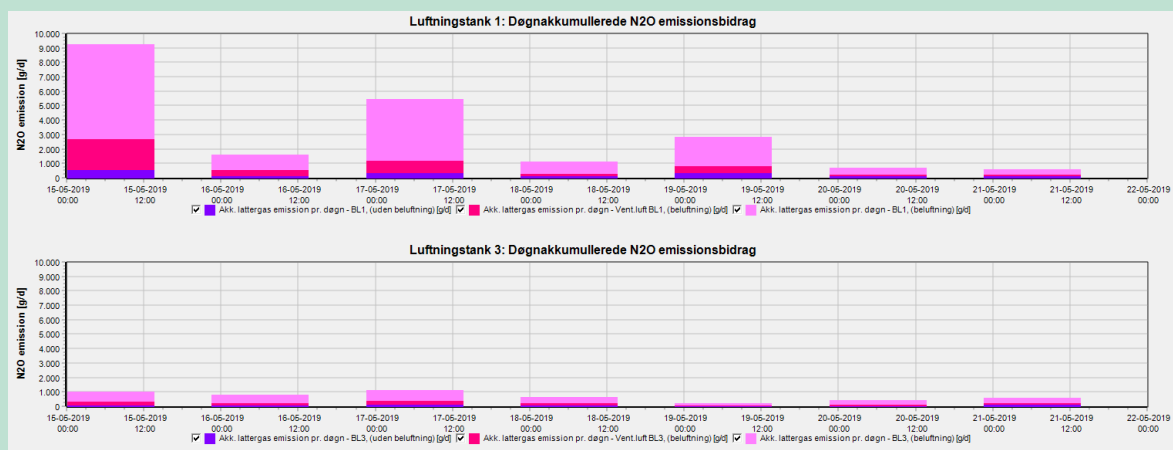
FIGUR 10. Beregnede værdier for k_La og Henrys konstant for procestank 1 (øverst) og procestank 3 (nederst). Lyserød er k_La -beregning ved standardbetingelser, orange er aktuel k_La værdi og blå er Henrys konstant.

Den specifikke lattergasemission beregnet som g N₂O-N/m³/d beregnes for beluftet (turboblæser luft og ventilationsluft hver for sig) og ikke-beluftet volumen som vist i afsnit 2.4.2.3

De specifikke værdier målt i g N₂O-N/m³/d omregnes til g N₂O-N/min ved at anvende de aktuelle beluftede volumener. Beluftede volumen for turboblæser luft vil være status for turboblæser (stoppet = 0 eller startet = 1) ganget med 2000 m³, og for ventilationsluft er den 260 m³, hvor status allerede er indregnet via ventilstillinger. Ikke-beluftet volumen beregnes som:

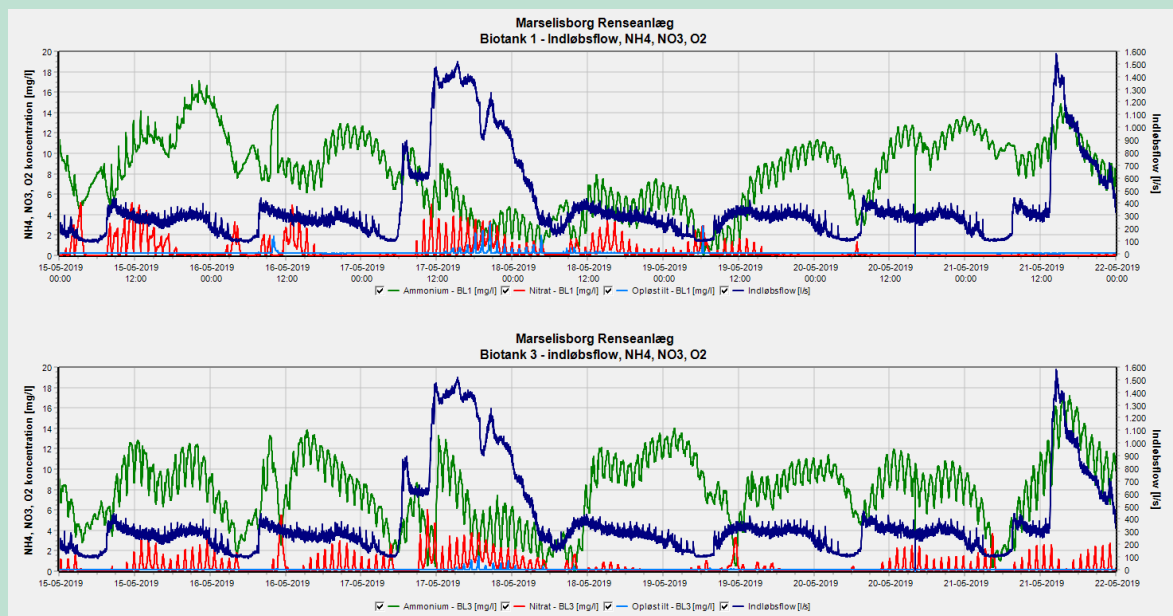
$$4000 \text{ m}^3 - 2000 \text{ m}^3 \cdot \text{blæserstatus} - 260 \text{ m}^3 \cdot \text{ventilationsventilstatus} \quad (2.10)$$

De tre beregnede lattergasemissioner målt som mængde pr. minut akkumuleres over døgnet og summeres. Dette er vist i FIGUR 11 hvor bidragene fra hhv. ikke-beluftet volumen (lilla), ventilationsbeluftet volumen (pink) og turboblæserbeluftet volumen (lyserød) er summeret.



FIGUR 11. Akkumuleret lattergasemission fra procestank 1 (øverst) og 3 (nederst) pr. døgn i perioden 15-05-19 til 22-05-19. Den lille viser emissionsbidraget når der ikke er beluftning, den pink viser emissionsbidraget fra ventilationsluften og den lyserøde viser emissionsbidraget fra beluftningen fra turboblæseren.

De 28 tidsserier benyttet til emissionsberegning i dette afsnit kan ses i Bilag 1. Tidsserierne er som minuttværdier samlet i dataset der kan udtrækkes fra systemdatabasen og afrapporteres til styrelsens dataopsamlingsprojekt i form af csv filer. Herudover er tilføjet yderligere tidsserier: NH₄, NO₃, O₂ og indløbsflow. Disse ses i perioden 15-05-19 til 22-05-19 i FIGUR 12. .



FIGUR 12. Den viste periode er 15-05-19 til 22-05-19. Den øverste graf viser procesværdier for procestank 1 og den nederste graf viser procesværdier for procestank 3. Fælles for de 2 grafer er den mørkeblå kurve, som viser indløbsflowet til renseanlægget i l/s. på begge kurver vises koncentrationer i mg/l for NH₄-N (grøn), NO₃-N (rød) og O₂ (lyseblå).

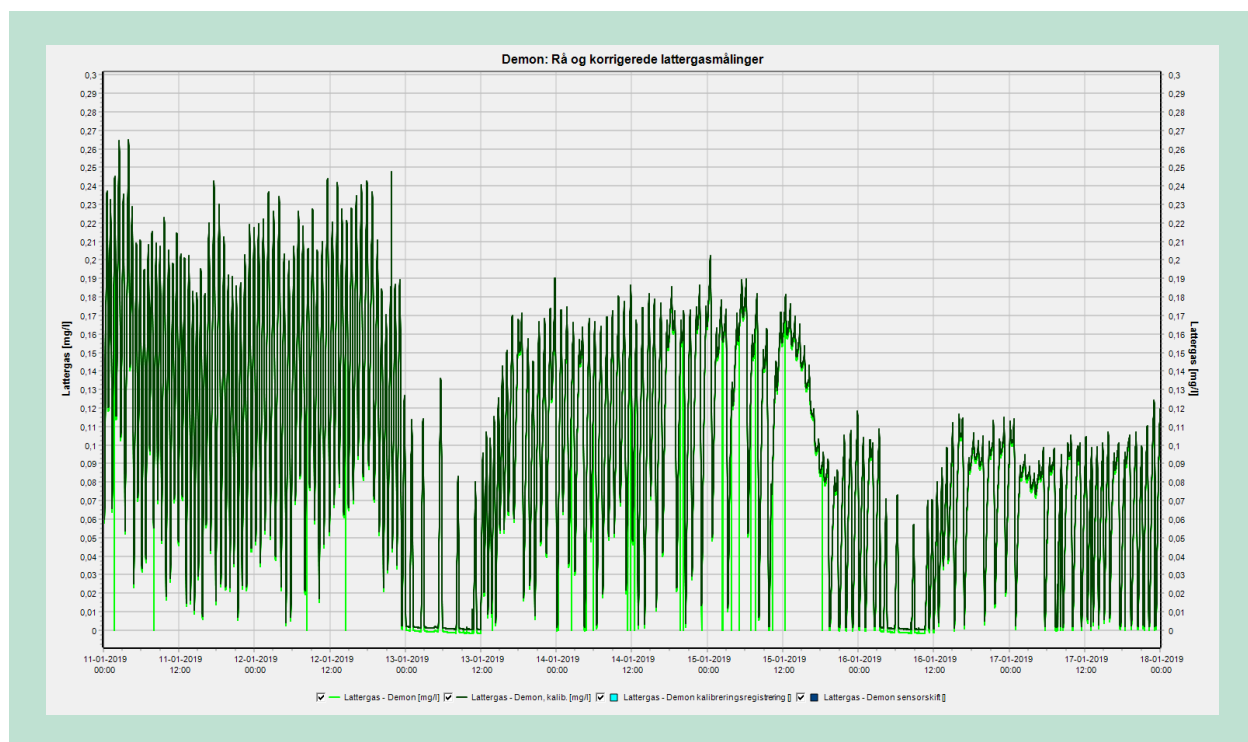
Til daglig kan beregningsgangen følges grafisk sammenholdt med andre driftsdata. Samme fremgangsmåde er anvendt på luftningstank 3, hvor tidsserierne også er samlet i et dataset. Disse tidsserier kan også ses i Bilag 1.

2.6 Emissionsovervågning i Demon-anlæg

Rejektvand fra slutfavnding på dekanter behandles i en Demon sidestrømsproces. Processen kører i to tidligere kemikalietanke, hvor der er etableret så stor recirkulation mellem tankene, så disse betragtes som en. Målinger sker således kun i den ene tank – mastertanken. De to tanke er herudover tilbygget en sedimentationstank og en hydrocyklon, der sørger for at tilbageholde anammox granulerne i Demon-anlægget.

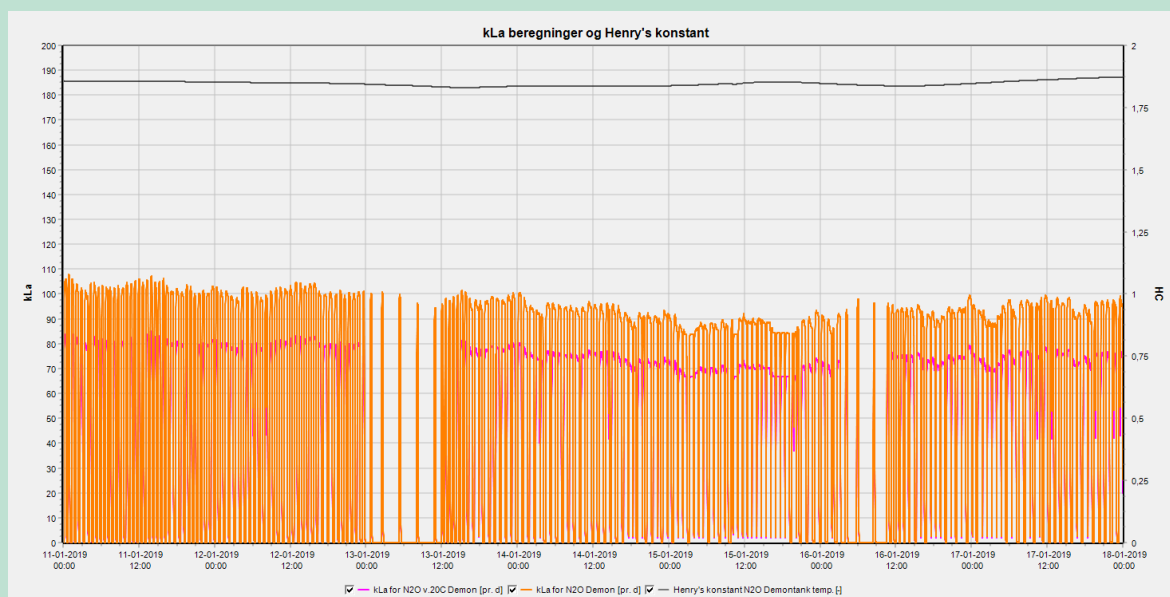
Det totale volumen af Demon-tankene er 280 m³, og tankene er 3,5 m dybe. Diffusorarealet er i alt 70 m², hvilket giver et beluftet volumen på 245 m³. Styringen er baseret på en standard Demon styring, hvor hovedstyring er intermitterent beluftning med et ilt-setpunkt og styret i et pH-interval. Målinger og beregninger sker som beskrevet i afsnit 2.5.

Af FIGUR 13 ses de rå (lysegrøn) og de korrigerede (mørkegrøn) målte N₂O-koncentrationer for Demon angivet i mg N₂O-N/l. Perioden d. 11-01-19 til 18-01-2019 er valgt fordi sensoren er kalibreret få dage forinden, og derfor forventes det, at data i denne periode er retvisende. Koncentrationerne svinger hen over døgnet og ugen. Koncentrationen svinger mellem 0 og 0,3 mg/l.



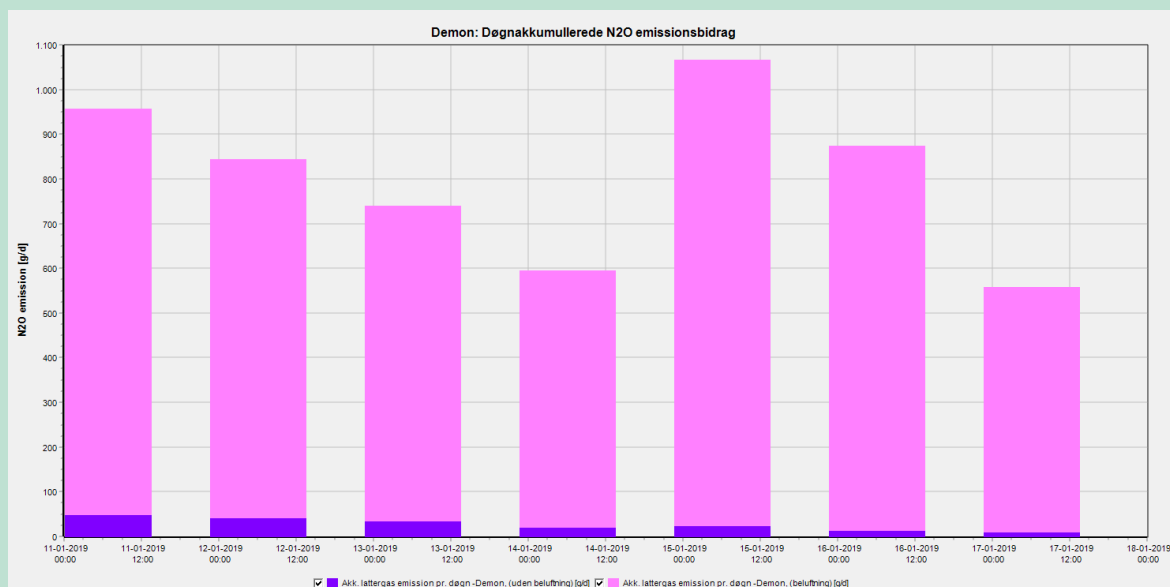
FIGUR 13. Rå (lysegrøn) og korrigerede (mørkegrøn) målte N₂O-koncentrationer for DEMON i perioden 11-01-19 til 18-01-19 begge dage inklusiv.

For DEMON anlægget er beregnet Henrys konstant og k_{La} værdi for at kunne bestemme N₂O emissionen. For perioden 11-01-19 til 18-01-19 ses Henrys konstant og k_{La} i FIGUR 14.



FIGUR 14. Beregnede værdier for k_{La} og Henrys konstant for DEMON. Lyserød er k_{La} -beregning ved standardbetingelser, orange er aktuel k_{La} værdi og blå er Henrys konstant.

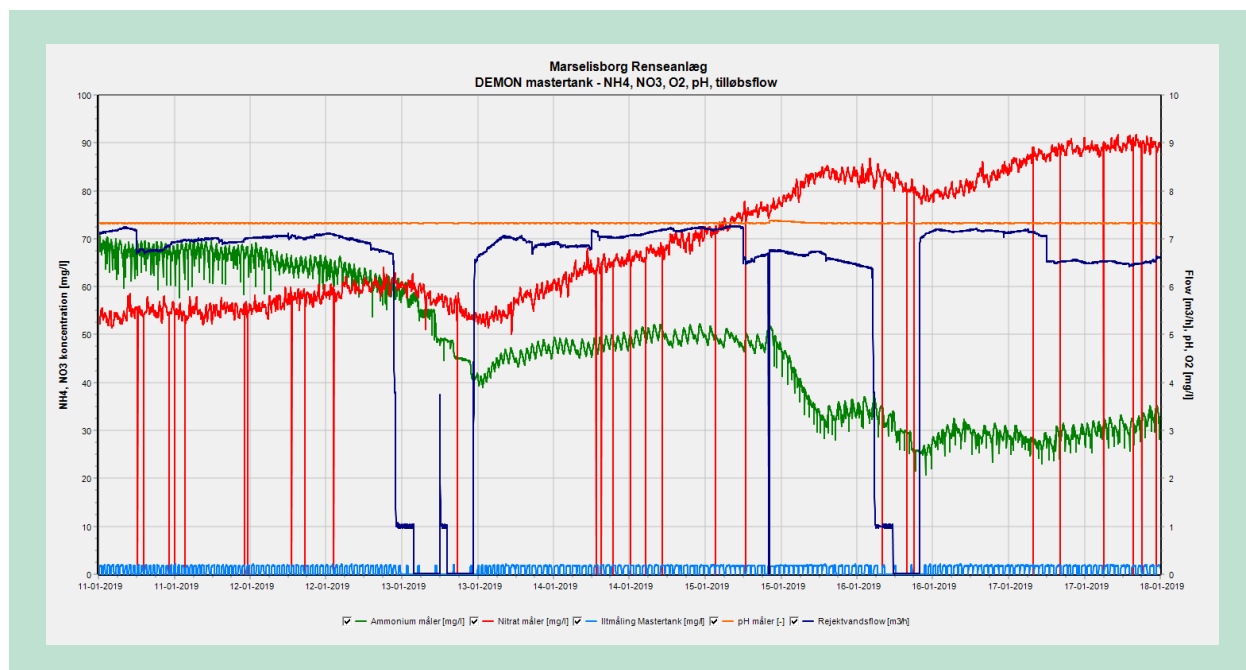
Luftflowet beregnes ud fra frekvensen der sendes til kapselblæseren, idet der er en ganske fin og lineær sammenhæng mellem frekvens og flow. Emissionen fra beluftning og ikke-beluftning beregnes og summeres over døgnet. Emissionen fra perioden 11-01-19 til 18-01-19 ses i FIGUR 15.



FIGUR 15. Akkumuleret lattergasemission fra DEMON mastertank pr. døgn i perioden 11-01-19 til 18-01-19. Den lille farve viser emissionsbidraget, når der ikke er beluftning og den pink viser emissionsbidraget fra beluftningen.

De 22 tidsserier benyttet til emissionsberegning i dette afsnit kan ses i Bilag 1. Tidsserierne er som minuttværdier samlet i dataset der kan udtrækkes fra systemdatabasen og afrapporteres til styrelsens dataopsamlingsprojekt i

form af csv filer. Herudover er tilføjet yderligere tidsserier: NH₄, NO₃, O₂, pH og tilløbsflow. Disse ses i perioden 11-01-19 til 18-01-19 i FIGUR 16.



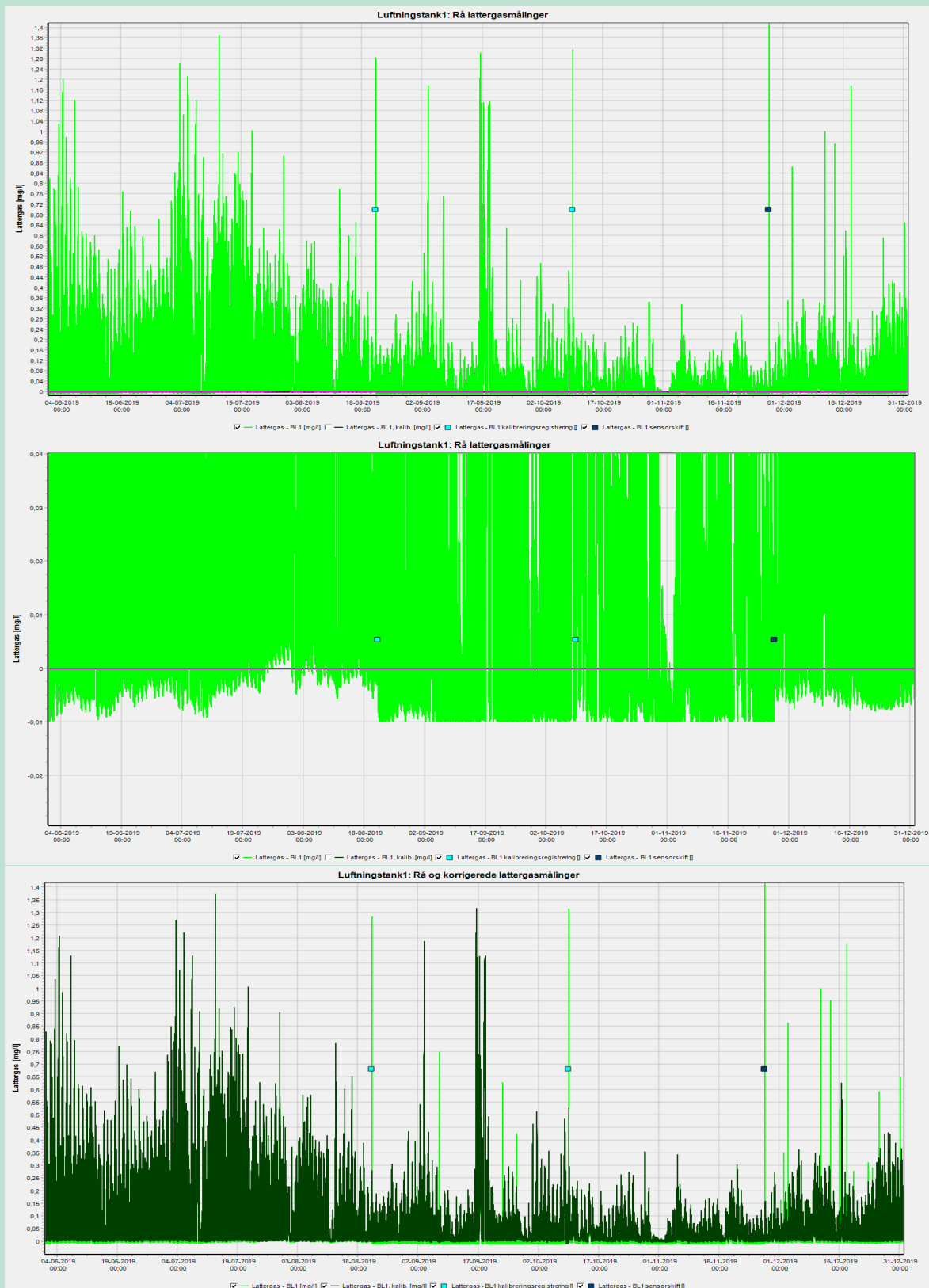
FIGUR 16. Den viste periode er 11-01-19 til 18-01-19. Grafen viser procesværdier for DEMON mastertank. Der vises tilløbsflow (mørkeblå) i m³/h, NH₄-N (grøn), NO₃-N (rød) og O₂ (lyseblå) i mg/l og pH (orange).

2.7 Resultater og evaluering

I perioden hvor N₂O-koncentrationen blev målt i vandfasen med Unisense sensorer var sensorsignalet ustabil forstøt på den måde, at der var nogle uforklarlige peaks og at signalet drev meget. Signalet drev ikke entydigt i en retning eller indenfor en bestemt periode.

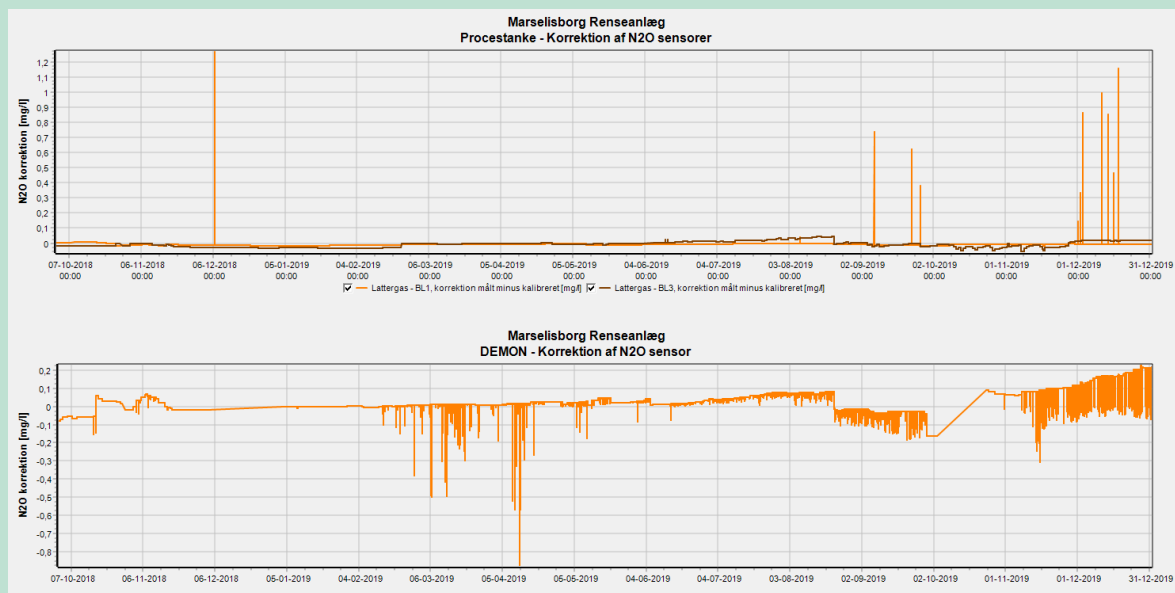
Af eksemplet i FIGUR 17 ses de rå lattergas målinger i perioden 01-06-19 til 01-01-20 i procestank 1. På den midterste graf ses at 0-punktet driver både op og ned, men at det oftest ikke er muligt helt at indstille 0-punktet. I denne periode er sensoren blevet kalibreret 2 gange og sensorhovedet er skiftet 1 gang. På den nederste graf ses at der er nogle høje, uforklarlige peaks, som er fjernet i den korrigerede måling. Mønsteret er det samme i procestank 3, men graferne er udeladt for overskuelighedens skyld.

Ifølge Unisense skal sensorerne kalibreres hver 2. måned og sensorhovedet skiftes hver 6. måned. Når der ses på hvor hurtigt 0-punktet driver, kan det overvejes om sensorerne skal kalibreres oftere end hver 2. måned. Alternativt kan der indføres en autokorrektion (se kapitel 4), hvis der kan skabes de rette procesforhold.

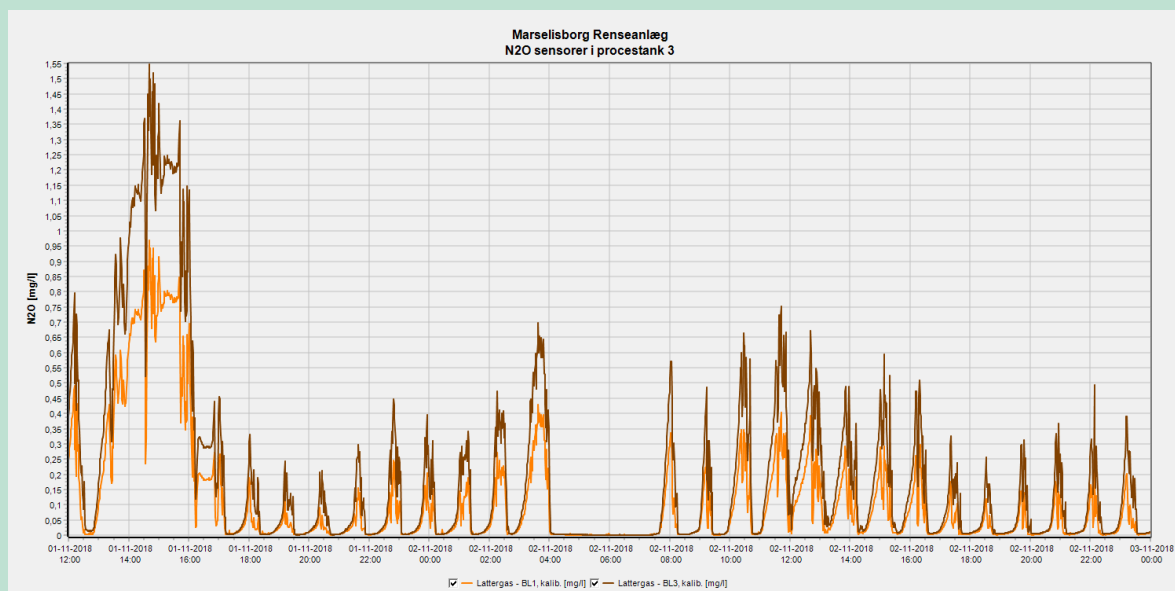


FIGUR 17. Lattergasmålinger i mg/l for procestank 1. De lyseblå prikker er kalibreringer af sensor mens den mørke prik er sensorudskiftning. Øverst og i midten: Rå lattergasmålinger. Den sorte streg angiver 0 mg/l. På den midterste graf er der zoomet ind omkring 0-punktet. Nederst: Rå (lysegrøn) og korrigerede (mørkegrøn) lattergas-målinger i mg/l for procestank.

For at beregne emissionen så retvisende som muligt blev den rå lattergasmåling korrigeret for 0-punkt og uforklarlige peak-værdier som beskrevet i 2.5. Af FIGUR 18 ses at der dagligt er behov for korrektion af lattergasmålingerne, og at behovet for korrektion er størst i Demon tanken, hvor der også er nogle meget store, negative værdier, der skal korrigeres for.



FIGUR 18. Korrektion af de rå lattergasmålinger. Øverst: korrektion af lattergas målinger i procestank 1 (orange) og procestank 3 (brun). Nederst: korrektion af lattergasmåling i Demon.

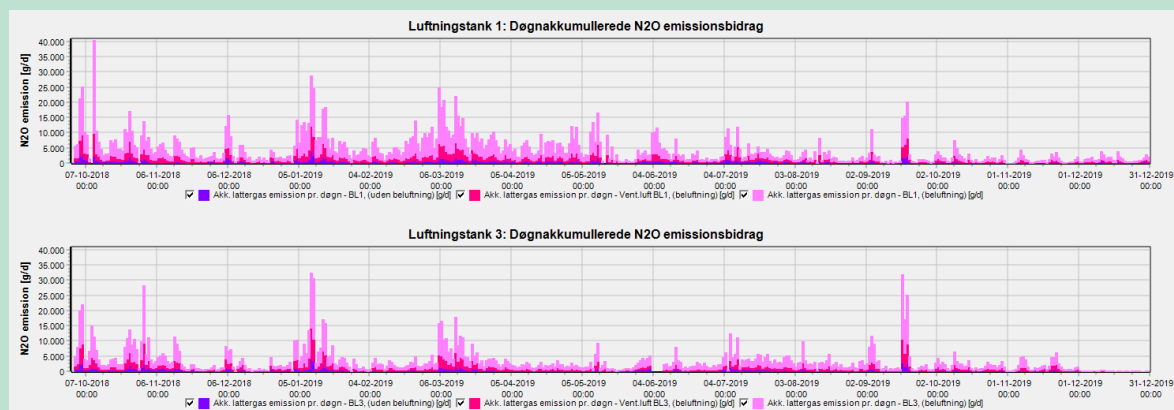


FIGUR 19. De 2 lattergas sensorer ved siden af hinanden i procestank 3 umiddelbart efter kalibrering samme dag.

For at undersøge om 2 sensorer, i umiddelbar nærhed af hinanden viste samme måling, blev begge sensorer kalibreret d. 01-11-19 og derefter sat ved siden af hinanden i samme tank, procestank 3. Dette ses i FIGUR 19.

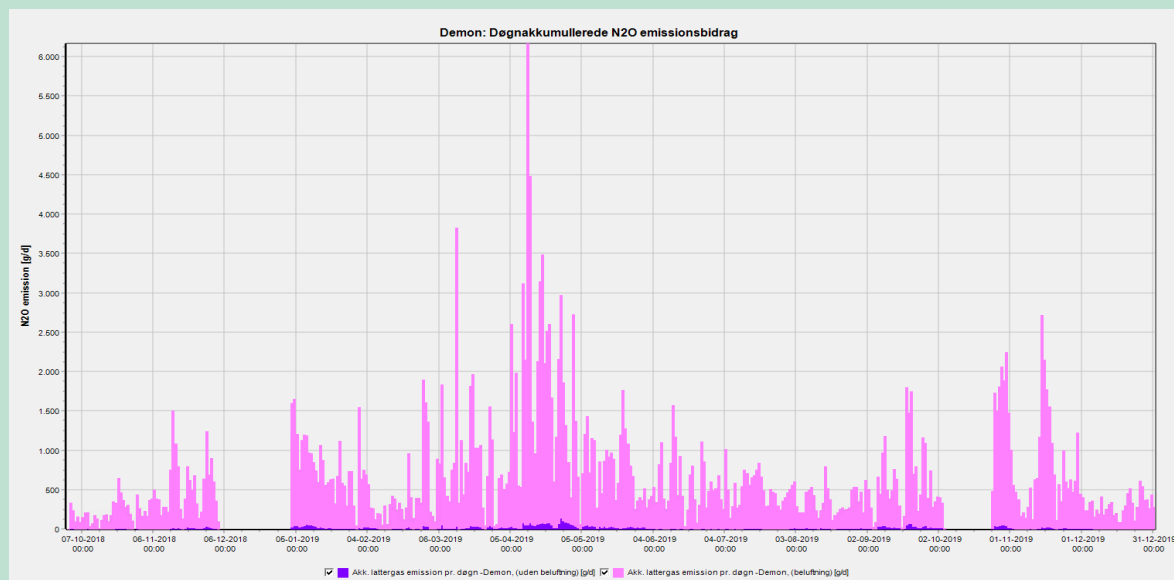
Begge sensorer falder til 0 punktet på samme tidspunkt kl. 4 om natten og detekterer ligeledes lattergas produktion på samme tidspunkt. Den sensor, der før sad i procestank 1, viser dog væsentligt lavere niveau af lattergas i vandfasen og dette vil nødvendigvis påvirke emissionsberegningen.

Af FIGUR 20 ses den døgnakkumulerede N_2O emission i perioden 1/10-18 til d. 1/1-20 beregnet ud fra de korrigerede lattergasmålinger. Det ses at emissionen varierer meget tankene imellem. En del af dette skyldes, at belastningen til tankene kan være vanskelig at kontrollere, og lattergasproduktionen i tankene derfor vil være forskellig.



FIGUR 20. Døgnakkumulerede N_2O emissionsbidrag for procestank 1 (øverst) og procestank 3 (nederst) i perioden 01-10-2018 til 01-01-2020.

Af FIGUR 21 ses det døgnakkumulerede emissionsbidrag fra Demon i perioden 01-10-2018 til 01-01-2020. Da andelen af beluftet areal i Demon-anlægget er større end i procestankene vil bidraget fra det ikke-beluftede areal også være væsentligt mindre og tæt på forsvindende lille.



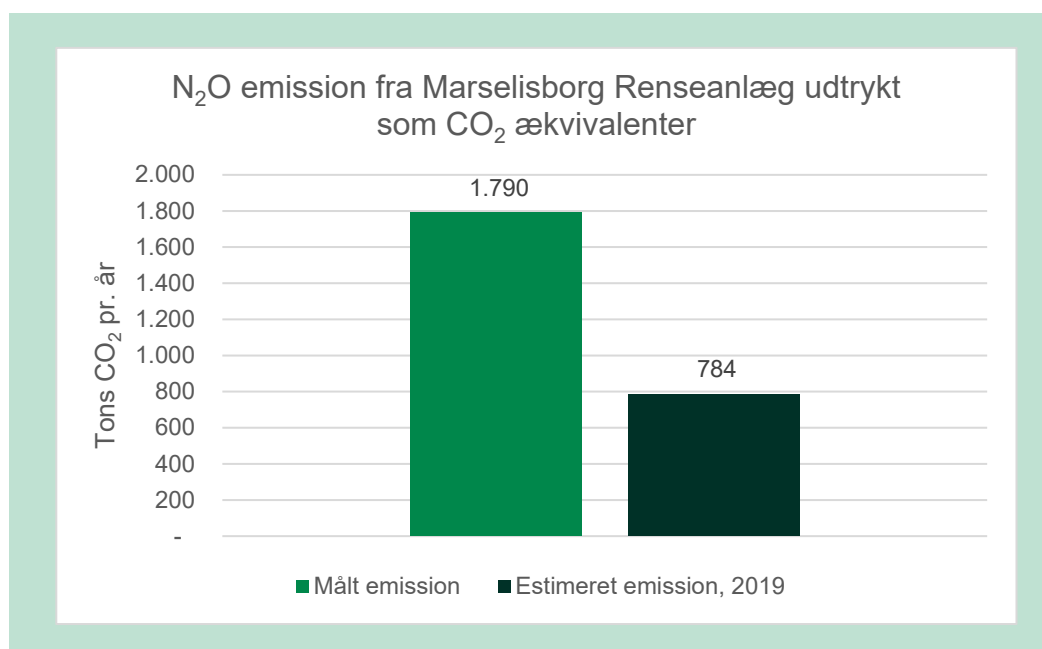
FIGUR 21. Døgnakkumulerede N_2O emissionsbidrag for Demon i perioden 01-10-2018 til 01-01-2020.

Den totale emission fra procestankene er beregnet som gennemsnittet af emissionen fra procesank 1 og 3 ganget med 4, da der er 4 procestanke. Dette resultat summeret med emissionsbidraget fra Demon svarer til den samlede emission fra renseanlægget. Den samlede emission på et år ses i TABEL 4.

TABEL 4. Den årlige emission fra de overvågede tanke og det samlede Marselisborg Renseanlæg udtrykt som tons N₂O pr. år og tilsvarende CO₂ ækvivalenter som tons CO₂ pr. år.

Proces	N ₂ O emission [tons/år]	CO ₂ -eq [tons/år]
Procestank 1	1,64	484
Procestank 3	1,26	374
Demon	0,25	73,9
Samlet anlæg	6,05	1.790

Hvis den årlige, målte emission fra det samlede anlæg sammenlignes med den estimerede emission fra renseanlæggets indløb i TABEL 2 ses det at der er stor forskel på den årlige udledning afhængigt af den benyttede metode. CO₂-aftrykket for renseanlægget ekskl. den N₂O-emission der måtte komme fra det kvælstof der udledes til recipient viser, at den målte emission er mere end dobbelt så stor som den estimerede emission. Dette ses i FIGUR 22.



FIGUR 22. N₂O-emission fra Marselisborg Renseanlæg udtrykt som CO₂-ækvivalenter. Den målte emission er beregnet ud fra målinger i perioden 01-10-2018 til 01-01-2020 og den estimerede emission er beregnet ud til kvælstofmængden i indløbet til renseanlægget i 2019.

2.8 Konklusion

N₂O-emissionsovervågning af Marselisborg Renseanlæg har ved sammenligning med det aktuelt benyttede N₂O estimat vist, at der er meget stor forskel på, om emissionen beregnes ud fra N₂O målt i vandfasen i procestankene eller om emissionen beregnes ud fra den tilledte mængde kvælstof til renseanlægget. Beregningen ud fra den målte lattergas viser at emissionen er mere end dobbelt så stor, som hvis beregningen laves ud fra kvælstoftilløb til renseanlægget.

Overvågningen har også givet erfaringer med Unisense lattergassensorerne, som viser tendens til at drive omkring 0-punktet, så det er vanskeligt at afgøre, om den aktuelle måling er retvisende eller ikke. Ligeledes blev der testet, om 2 ny-kalibrerede sensorer kunne måle sammen koncentration af lattergas i den samme tank. Denne test blev udført over 2 dage, og i disse dage målte de 2 sensorer kun det samme, når den målte værdi var 0.

3. Emissionsminimering - hovedstrøm

Da der blev ansøgt om dette projekt var formodningen, at der var kulstofmangel i hovedstrømmen på Marselisborg Renseanlæg, da ~60% COD blev fældet med jernklorid i primærtankene. Sidenhen er der blevet etableret et fosfor-genvindingsanlæg, der udfælder struvit. Dette anlæg blev sat i drift i januar 2017. P-genvindingsprocessen kræver at fosfor fjernes med bio-P i stedet for kemikalie udfældning. Dette betyder, at der skal være væsentligt mere kulstof til stede i hovedprocessen end tidligere, og derfor er COD-fældningen i primærtrinnet reduceret til ~50%. Driftbetingelserne på Marselisborg Renseanlæg er ændrede ved dette projekts start og derfor er der risiko for, at den akutte kulstofmangel ikke ses på samme måde som før fosforfjernelse med bio-P.

3.1 Metode og udførelse

I projektet undersøges det om dosering af eksternt kulstof i form af glykol kan understøtte at denitrifikationen forløber helt til frit kvælstof (FIGUR 2). Der beregnes den nødvendige støkiometriske kulstofbehov ved heterotrof denitrifikation

3.1.1 Heterotrof denitrifikation

Reaktioner:

1. $2\text{NO}_3^- + 4\text{H}^+ + 4\text{e}^- \rightarrow 2\text{NO}_2^- + 2\text{H}_2\text{O}$
2. $2\text{NO}_2^- + 4\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow 2\text{NO} + 2\text{H}_2\text{O}$
3. $2\text{NO} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2\text{O} + \text{H}_2\text{O}$
4. $\text{N}_2\text{O} + 2\text{H}^+ + 2\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2 + \text{H}_2\text{O}$

Sum: $2\text{NO}_3^- + 12\text{H}^+ + 10\text{e}^- \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}$

Der bruges dermed støkiometrisk 40% af kulstofkilden i den første reaktion og 20% i hver af de resterende. Med kulstofkilderne a: methanol, b: ethanol, c: eddikesyre og d: glykol bliver reaktionerne for fuld denitrifikation:

- a. $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 5/6 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 5/6 \text{CO}_2 + 13/6 \text{H}_2\text{O}$
- b. $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 5/12 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 10/12 \text{CO}_2 + 21/12 \text{H}_2\text{O}$
- c. $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 5/8 \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 10/8 \text{CO}_2 + 14/8 \text{H}_2\text{O}$
- d. $\text{NO}_3^- + \text{H}^+ + 1/2 \text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2 \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + \text{CO}_2 + \text{H}_2\text{O}$

og for denitrifikation:

- a. $\text{NO}_2^- + \text{H}^+ + 3/6 \text{CH}_3\text{OH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 3/6 \text{CO}_2 + 9/6 \text{H}_2\text{O}$
- b. $\text{NO}_2^- + \text{H}^+ + 3/12 \text{C}_2\text{H}_5\text{OH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 6/12 \text{CO}_2 + 15/12 \text{H}_2\text{O}$
- c. $\text{NO}_2^- + \text{H}^+ + 3/8 \text{CH}_3\text{COOH} \rightarrow 1/2 \text{N}_2 + 6/8 \text{CO}_2 + 10/8 \text{H}_2\text{O}$
- d. $\text{NO}_2^- + \text{H}^+ + 1/3 \text{C}_2\text{H}_6\text{O}_2 \rightarrow 1/3 \text{N}_2 + 2/3 \text{CO}_2 + 7/5 \text{H}_2\text{O}$

Støkiometriske doseringsmængder til omsætning af nitrat, nitrit eller lattergas bliver:

TABEL 5. Støkiometriske doseringsmængder til omsætning af nitrat, nitrit eller lattergas

Kulstofkilde	Molvægt	Dentrifikation (=100% COD)		Denitritation (=60% COD)		Lattergasfjernelse (=20% COD)	
COD	[g/mol]	[mol COD/mol N]	[kg COD/kg N]	[mol COD/mol N]	[kg COD/kg N]	[mol COD/mol N]	[kg COD/kg N]
Methanol	32	0,83	1,90	0,50	1,14	0,17	0,38
Ethanol	46	0,42	1,37	0,25	0,82	0,08	0,27
Eddikesyre	60	0,63	2,68	0,38	1,61	0,13	0,54
Glykol	62	0,50	2,21	0,33	1,46	0,1	0,44

Da glykol er den kulstofkilde der er lettest tilgængelig benyttes denne til minimeringsforsøg. Glykol hjemkøbes i palletank, og har ikke nogen specielle krav til sikring af arbejdsmiljø, brandfare eller lignende. Palletanken påmonteres en doseringspumpe, der kan modtage start/stop signal fra SRO-anlægget.

For at beregne den nødvendige glykol dosering til PT1 beregnes et gennemsnit af emission pr. dag jf. beregning i afsnit 2.4.2 fra perioden 01-02-20 til 21-05-2019. Gennemsnittet for denne periode er 101 kg N₂O/d i procestank 1 svarende til 4.590 mol N/d. Jf. TABEL 5 går der 0,1 mol COD i form af glykol til omsætning af 1 mol N i form af N₂O, svarende til 459 mol glykol/d. Da der er 35% glykol i den doserede vare skal der doseres 257 l/d svarende til 12 l/cyklus.

3.1.2 Glykoldosering

Doseringsstrategien i procestank 1 er at dosere kulstoffet i slutningen af denitrifikationsfasen således, at det N₂O der måtte være tilbage i fasens slutning kan benytte det nødvendige kulstof så denitrifikationen forløber helt til N₂. Da der kun er en N₂O sensor i tanken antages det at N₂O koncentrationen er den samme i hele tanken.

Da der kun er et doseringspunkt i procestanken skal doseringen foregå over den tidsperiode det tager for spildevandet at nå én gang rundt i tanken. På baggrund af tidligere hastighedsmålinger i vandet, forventes det, at én omgang i tanken tager 5 minutter. Med antagelsen om fuld opblanding i tanken ved dosering af glykol skal de beregnede 12 l/cyklus doseres over 5 minutter, og det betyder, at der skal doseres 2,5 l/min i 5 minutter. Da den doserede glykol ikke udelukkende denitrificerer lattergas, doseres der et overskud af glykol. Pumpen kalibreres til at dosere 5 l/min, hvilket er pumpens max. kapacitet.

Glykoldoseringspunktet placeres lige ved indløbskippen, fordi det er der, der er mest turbulens i vandet, og dermed sikres den bedst mulige indblanding. Pumpen er ikke frekvensstyret, så det er en on-off regulering, der aktiveres af en målt N₂O koncentration og et fasetal. Grænsen kan justeres hvis det ønskes, og har under disse forsøg været 0,1 mg/l. Det vælges ligeledes hvornår i fasen doseringen skal starte. Under disse forsøg er doseringen startet 10 minutter før denitrifikationsfasens afslutning, så der dermed doseres i 5 minutter og efterfølgende er 5 minutter til at denitrifikationen kan foregå.

3.2 Resultater og Evaluering

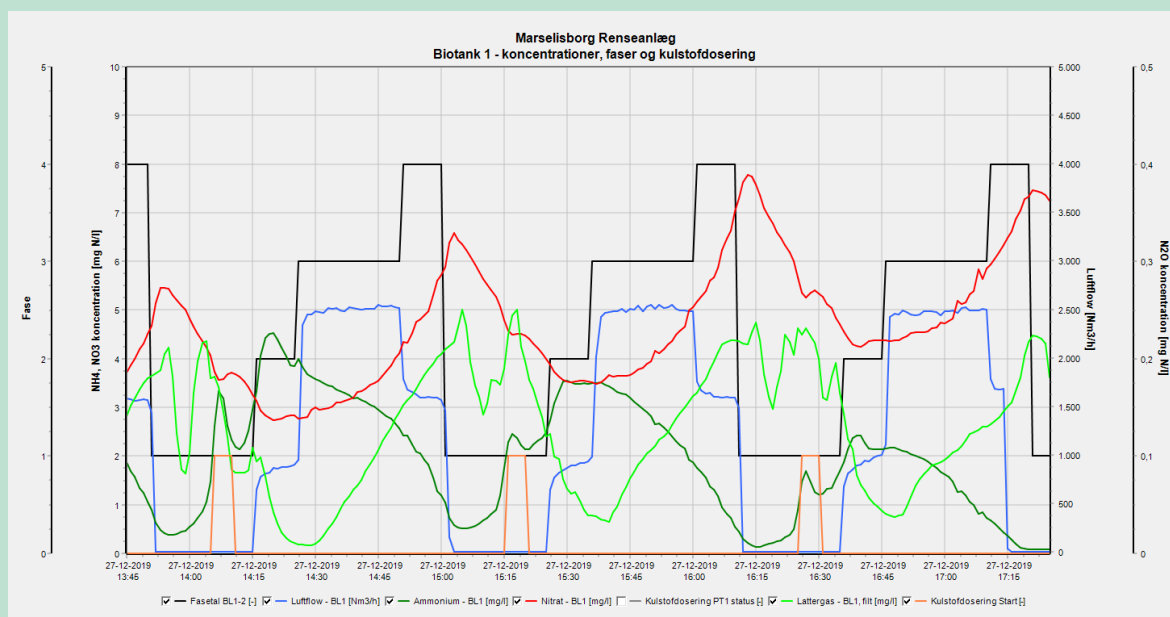
Af FIGUR 23 ses 3 hele cyklusser, hvor der er doseret kulstof i 5 minutter i slutningen af denitrifikationsfasen (fase 1). I disse 3 cyklusser ser der ikke ud til at være kulstofmangel, da både N₂O og NO₃⁻ niveauet falder samtidigt. I en situation med kulstofmangel i en denitrifikationsfase forventes N₂O at akkumulere, da NO₃⁻ kun vil opnå delvis denitrifikation. Det vil også være muligt at se både NO₃⁻ og N₂O akkumulere, hvis kulstofmanglen er meget udtalt.

I disse 3 cyklusser doseres glykol på trods af, at der ikke er tegn på kulstofmangel. Årsagen til glykoldoseringen er, at N₂O koncentrationen overstiger den grænseværdi, der tidligere er fastsat i styringen. I en situation hvor der ikke er kulstofmangel er det u hensigtsmæssigt at dosere yderligere kulstof, da kulstoffet efterfølgende vil danne mere bioslam og kræve ekstra luft til omsætning i den aerobe fase. Ydermere er eksternt kulstof en ekstra driftomkostning, og der kan spares penge ved kun at dosere når det er nødvendigt.

Såfremt der skal arbejdes videre med en mere intelligent styring, der styrer efter lattergas sensoren vil det være en fordel hvis det er muligt at detektere, om der er reduktion i N₂O koncentrationen i minutterne op til doseringen, så der derved ikke doseres kulstof uden kulstofmangel.

En anden observation i FIGUR 23 er at der forsvinder N₂O i fase 2 og dannes N₂O i fase 3 og 4. Årsagen til, at N₂O forsvinder i fase 2 er, at det tilbageværende N₂O fra fase 1 bliver blæst ud af vandfasen, når der beluftes i procestanken. I fase 3 og 4 dannes N₂O som biprodukt under ammonium oxidation som vist i FIGUR 1 og FIGUR 2. Dette biprodukt dannes hvis NH₄⁺ omsætningsraten er høj. Omsætningsraten kan stige hvis ammoniumbelastningen i procestankene er høj, hvis der er meget biomasse til rådighed eller en kombination af de to.

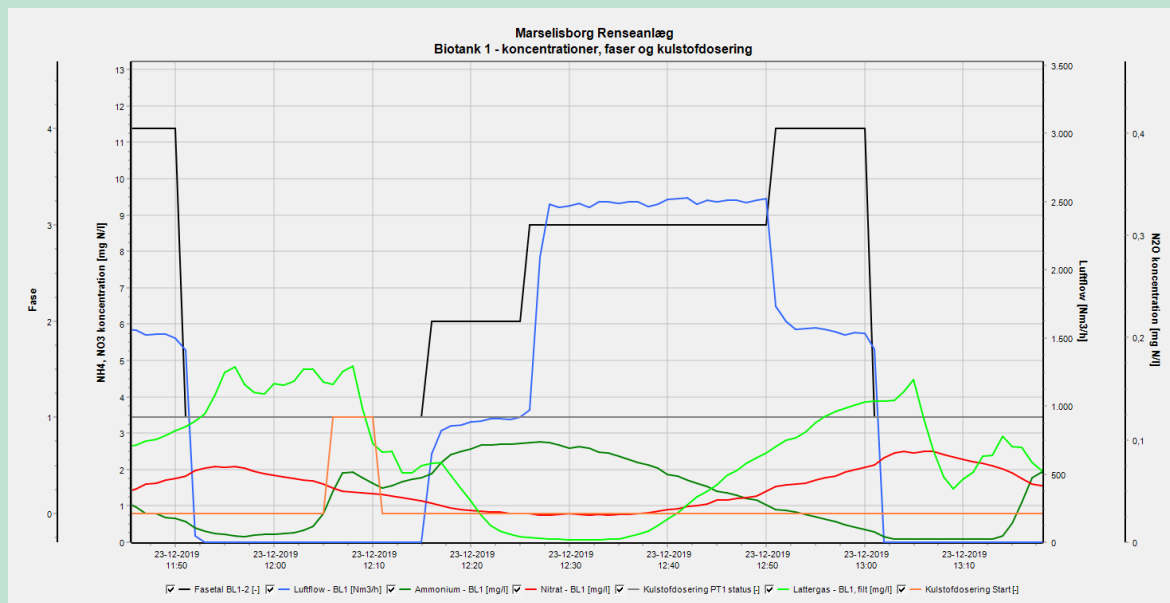
Kulstofdosering i beluftsfasen vil ikke minimere N_2O emissionen, da det eksterne kulstof vil blive omsat af biomasse og ilt, så hvis det ønskes at minimere N_2O i beluftsfasen kan det undersøges, om belastningsudligning vil reducere N_2O dannelsen i beluftsfasen.



FIGUR 23. Målinger igennem 3 cyklusser af nitrat (rød), ammonium (mørkegrøn), lattergas (lysegrøn), luft flow (blå), fasetal (sort) og kulstofdosering (orange) i procestank 1 d. 27-12-19.

Af FIGUR 24 ses at N_2O (lysegrøn) stabiliserer sig mens NO_3^- (rød) bliver mindre når beluftsningen (blå) stopper. 10 minutter inden der igen beluftes tændes for glykoldoseringen og efter kort tid falder N_2O koncentrationen hastigt. Disse observationer viser at der kan være tale om kulstofmangel, og i den situation hjælper kulstofdoseringen med at nedbringe lattergaskoncentrationen i vandfasen og dermed lattergasemissionen i den efterfølgende beluftsfasen.

Det ses også af FIGUR 24 at N_2O koncentrationen falder i den næste anoxiske fase, så kulstofmanglen har kun været aktuel i en cyklus.



FIGUR 24. Målinger af NO₃ (rød), NH₄ (mørkegrøn), N₂O (lysegrøn), luft flow (blå), fasetal (sort) og kulstofdosering (orange) i procestank 1 d. 23-12-19.

3.3 Konklusion

Ved forsøg på emissionsminimering med glykol som ekstern kulstofkilde i procestank 1 på Marselisborg Renseanlæg er det vist, at det er muligt at reducere N₂O koncentrationen i vandfasen under denitrifikationsfasen, og dermed reducere lattergasemissionen fra procestanken.

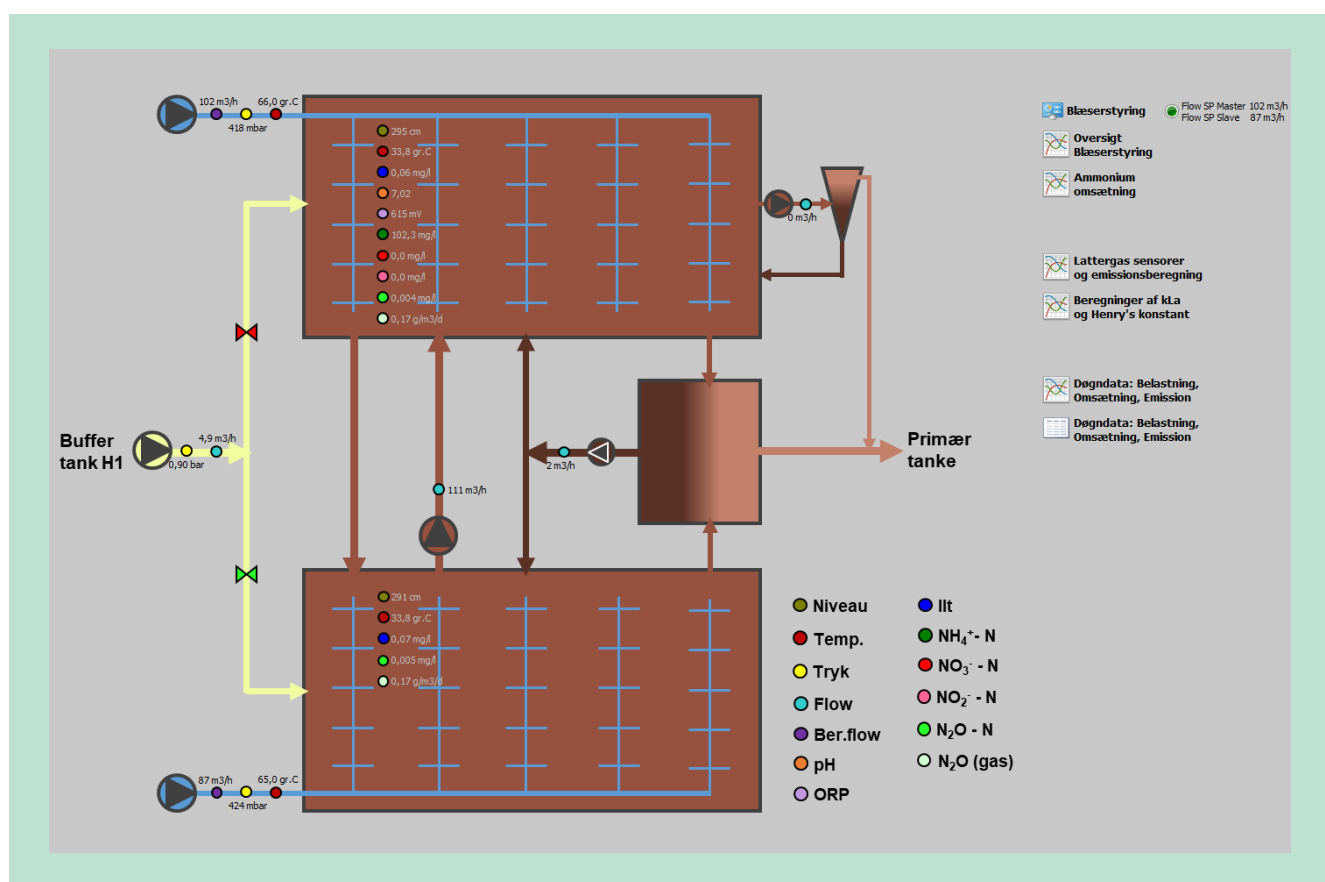
Denne strategi er nyttig såfremt der er kulstofmangel til denitrifikation. Det har dog vist sig at den største mængde N₂O dannes i beluftsfasen under høj ammonium belastning, og strategien for minimering af N₂O i denne fase bør være en anden. Et forslag til yderligere minimeringsundersøgelser kunne være at udjævne ammonium belastning til procestankene så der ikke dannes så meget N₂O i beluftsfasen.

4. Emissionsminimering - Sidestrøm

Forsøg med emissionsminimering i sidestrømmen blev flyttet til Viby renseanlæg, da det blev konstateret at blæserne i Demon anlægget på Marselisborg renseanlæg ikke kunne justeres langt nok ned, i fht. de krav en alternativ styring stillede til luftflowet.

4.1 Beskrivelse af opsætning

Rejektvand fra slutaftvanding på dekanter behandles – som på Marselisborg renseanlæg - i en Demon sidestrømsproces, og processen kører også her i to tanke (FIGUR 25). Recirkulation mellem tankene er mere end 100 m³/h således, at opholdstiden er mindre end en time. Antagelsen har derfor været at systemet er helt opblundet, og de fleste målinger foretages således kun i den ene tank – mastertanken.



FIGUR 25. Demon implementering på Viby renseanlæg i to tanke (LxBxH pr. tank = 7,2 m; 3,5 m; 3,6 m). Master tank øverst. Rejektvand kan føres til begge tanke, men fødes sædvanligvis i den nederste tank (slave). Tankene har fælles sedimentationstank og en hydrocyklon, der sørger for at tilbageholde anammox granulerne i processtankene. Lattergas måles og emission beregnes i begge tanke.

Diffusorerne dækker i hver tank ca. 90 % af bundarealet svarende til 22,7 m², hvilket giver et beluftet volumen på 81,7 m³ i hver tank til anvendelse i formlerne for lattergasemissionen (afsnit 2.4). Styringen er baseret på en standard Demon styring, med intermitterent beluftning efter ilt-setpunkter i hver tank (derfor iltsensor i begge tanke) og styret med start og stop i et pH-interval. Alle sensorer på FIGUR 25 – undtagen lattergas sensorer – har været installeret siden implementering af processen.

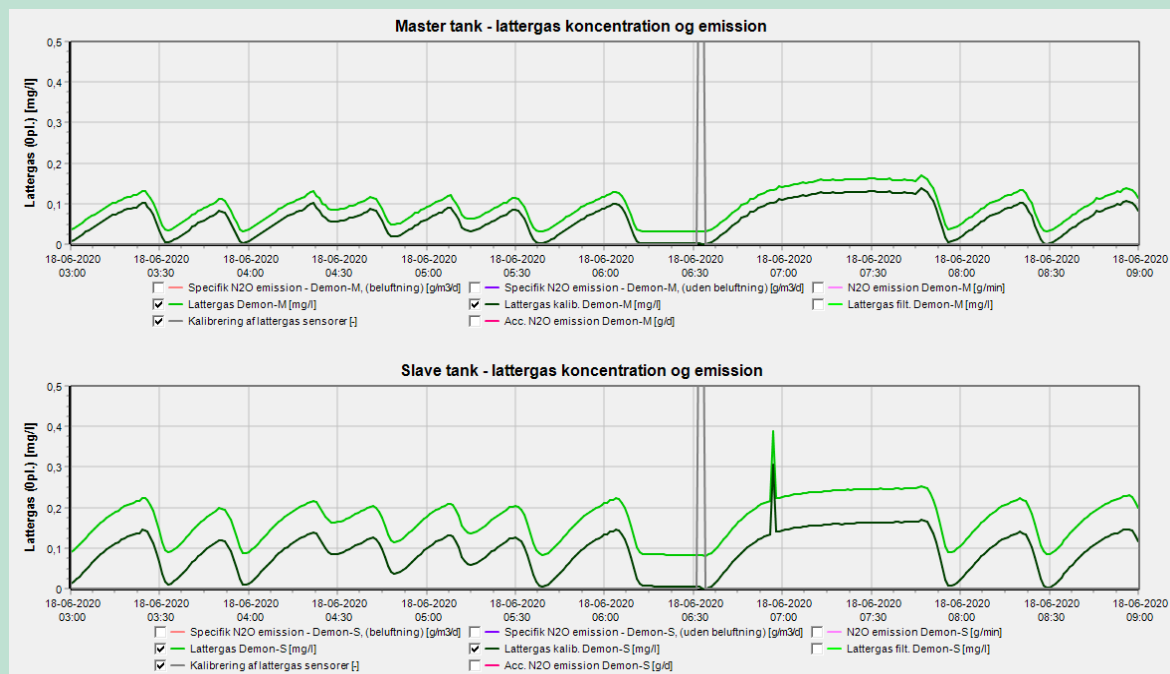
4.2 Installation og drift af lattergas sensorer

Da det ønskes at afprøve en alternativ styring baseret på lattergas installeres lattergas sensorer i begge tanke i Demon anlægget. Indkøring og drift af disse er beskrevet i detaljer i Bilag 2 og summeret i TABEL 6.

TABEL 6. Oversigt drift af lattergassensorer i Demon anlægget på Viby renseanlæg.

Dato	Master tank	Slave tank
23-11-2018	Eksist. udtjent sensor skiftet med reserve fra Marselisborg	
07-05-2019	Ny sensor installeret	
02-10-2019	Ny sensor installeret	Installeret sensor fra master tank
15-10-2019	Manuelle korrektioner af offset i perioden frem til 6/11	Manuelle korrektioner af offset i perioden frem til 6/11
24-10-2019		Kalibrering af sensor
06-11-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
15-11-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
22-11-2019		Ny sensor installeret – ej aktiv, data korrigeret til 29/11
29-11-2019		Kalibrering af sensor
18-12-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
30-01-2020	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
03-02-2020	Kalibrering af sensor	
05-02-2020	Efterfølgende manuel korrektion af offset frem til 14/3	Efterfølgende manuel korrektion af offset frem til 14/3
14-03-2020	Automatisk korrektion af offset implementeret	Automatisk korrektion af offset implementeret
26-03-2020	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor og placeret i master tank
23-04-2020		Sensor i stykker (stadig placeret i master tank)
03-06-2020	Ny sensor installeret	Ny sensor installeret

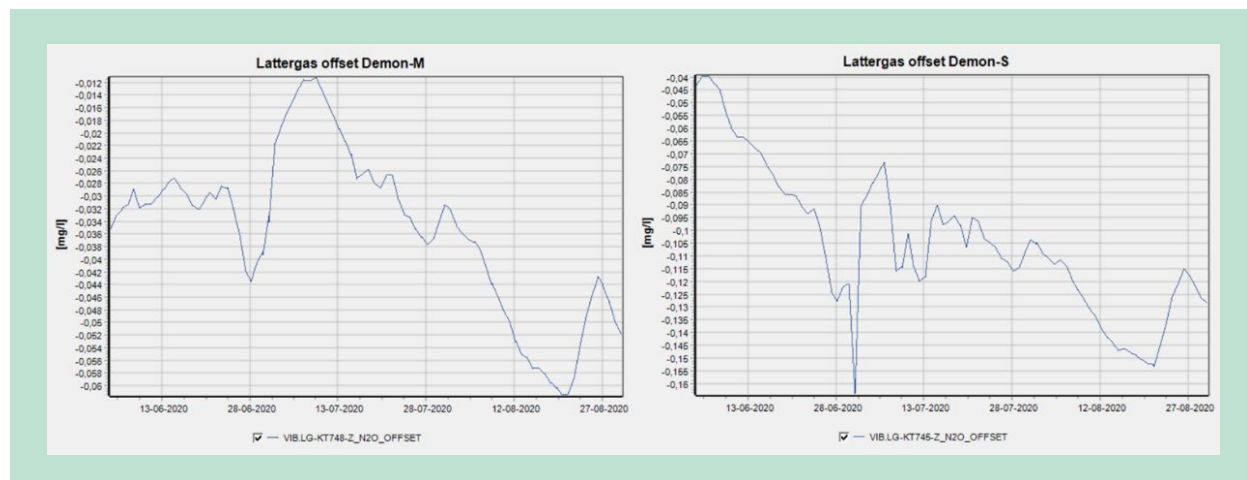
Det viste sig at drift i sensorsignalet er det største problem, når der skal måles i Demon processen. Da denne drift skyldes et offset fra nul – og ikke en skalering – kan der, som tidligere vist på Marselisborg renseanlæg, kompenseres for dette, hvis der findes tidspunkter hvor procesforholdene dikterer at lattergaskoncentrationen er nul.



FIGUR 26. Daglig kompensering (kl. 06:30) for offset på lattergassensorer i Demon processen.

En automatisk offset kompensering i Demon processen sker nu dagligt, idet blæserne tvangsslukkes i en halv time kl. 06:00, hvilket dikterer at lattergaskoncentrationen skal være nul (se FIGUR 26). Offset aflæses (lysegrøn kurve) og fratrækkes løbende således, at den korrigerede værdi (mørkegrøn kurve) høves som ny sensorværdi

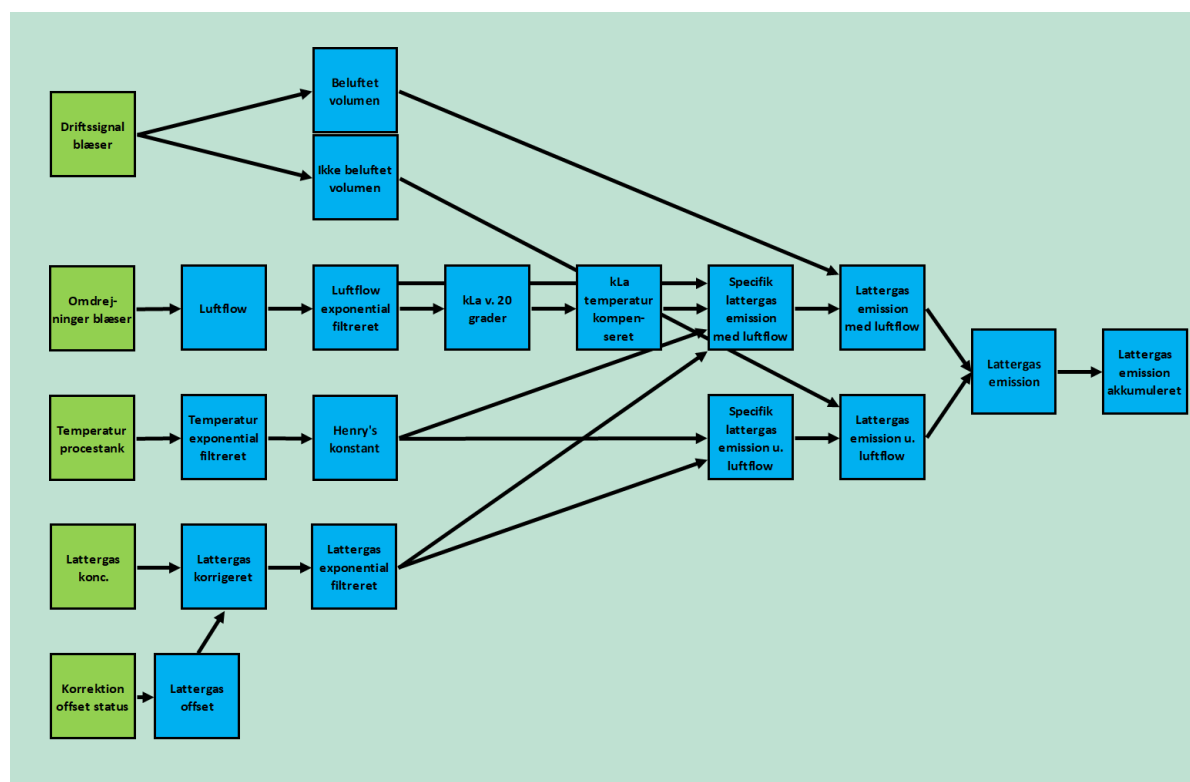
(softwaresensor) indtil næste morgen hvor korrektionen gentages. Korrektionens størrelse er ikke konstant og ikke umiddelbart forudsigelig (FIGUR 27), og varierer fra tidspunkt ved kalibrering mellem ca. 1 og 5 % af fuldt måleområde.



FIGUR 27. Offset på de to lattergassensorer i tre måneder efter udskiftning af sensorerne

4.3 Beskrivelse af Emissionsberegning

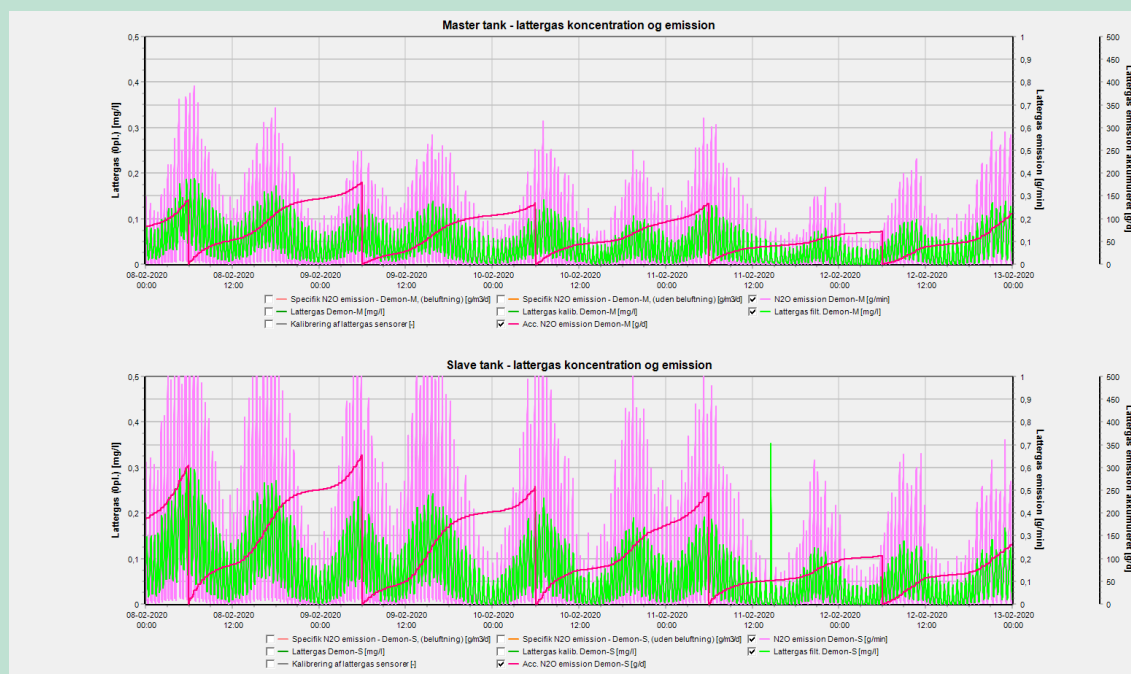
Master og slavetank har hver sin emissionsberegning, da de hver især er bestykket med de nødvendige sensorer, og har uafhængige blæsere – og dermed luftindblæsning.



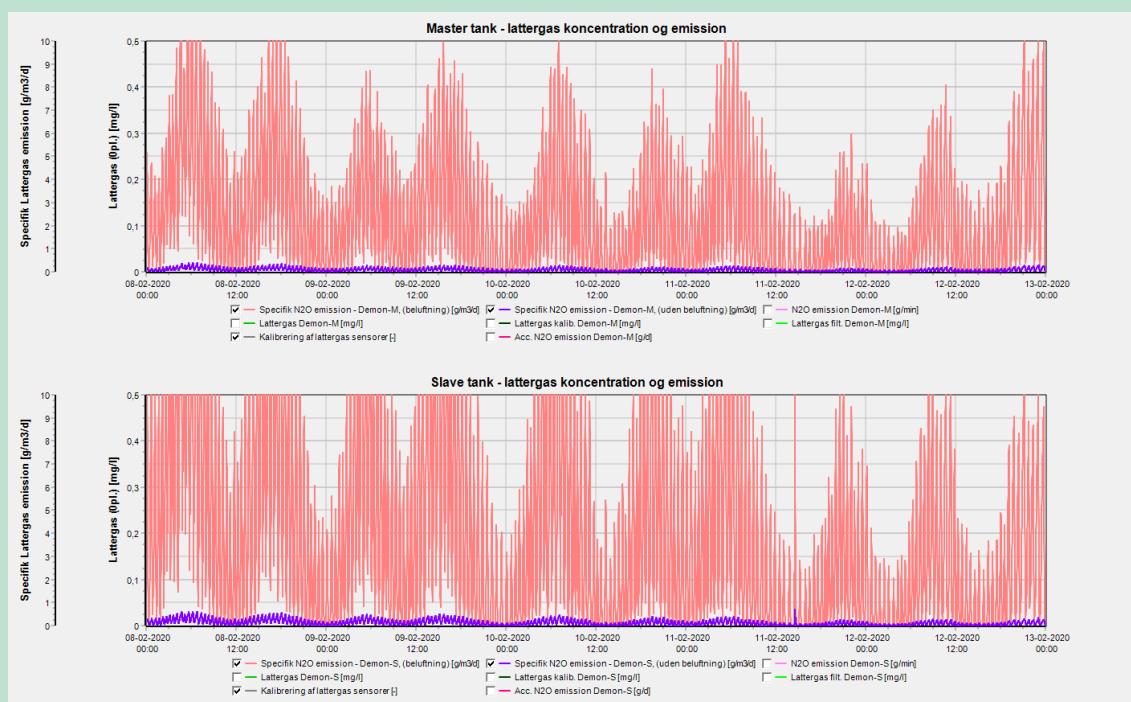
FIGUR 28. Emissionsberegning i hver af de to tanke. Målinger er grønne og softwaresensorer er blå.

Real tids beregningerne udføres efter samme formler som anvendt på Marselisborg renseanlæg og de tilhørende tidsserier og beregningssekvens er skitseret i FIGUR 28 (sensorer er grønne og software sensorer blå) og dokumenteret i Bilag 2. Resultater fra emissionsberegningerne, der sker løbende hvert minut, kan følges på de opsatte plots indsat på temabillede (FIGUR 25) ved at klikke på den relevante plotikon.

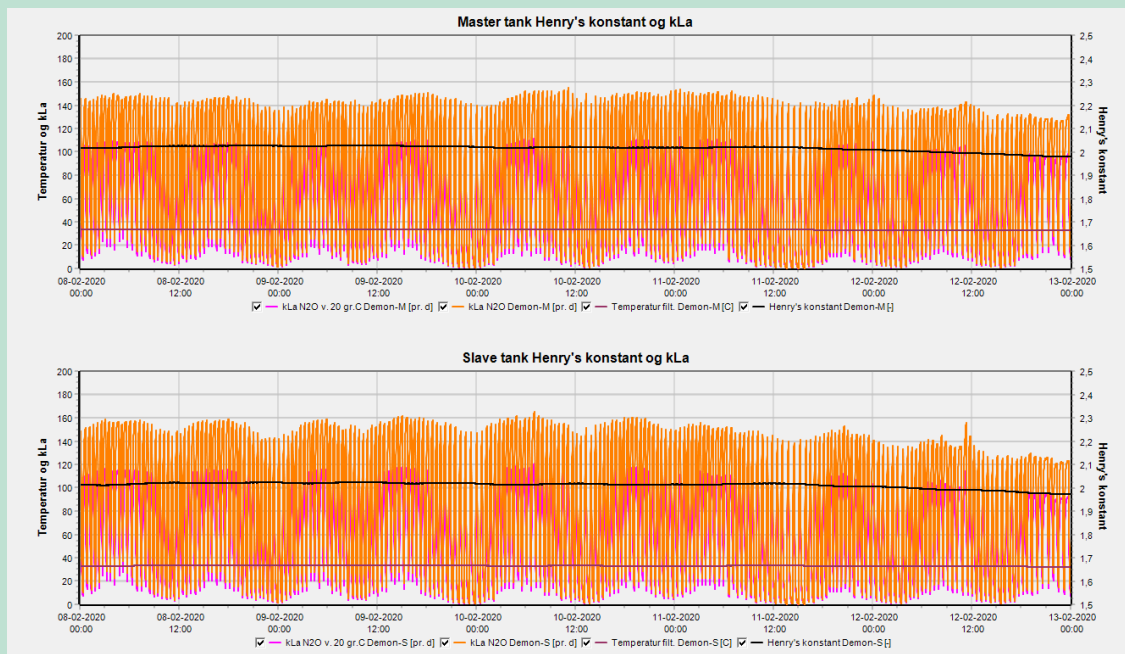
Emissionsberegningerne er gengivet i FIGUR 29 - FIGUR 31, hvor der er vist en 5 dages periode (8.-13 februar 2020 – få dage efter kalibrering af lattergassensorerne og efter start på manuel korrektion af lattergasmålingerne og genberegning af emissionerne). Variationen i beregningsresultaterne følger styring (hurtig variation) og belastning (langsom variation) – se senere.



FIGUR 29. Måling af opløst lattergas og løbende beregning af lattergasemission og akkumuleret lattergasemission for de to Demon procestanke



FIGUR 30. Løbende beregning af specifik lattergasemission med og uden beluftning for de to tanke.

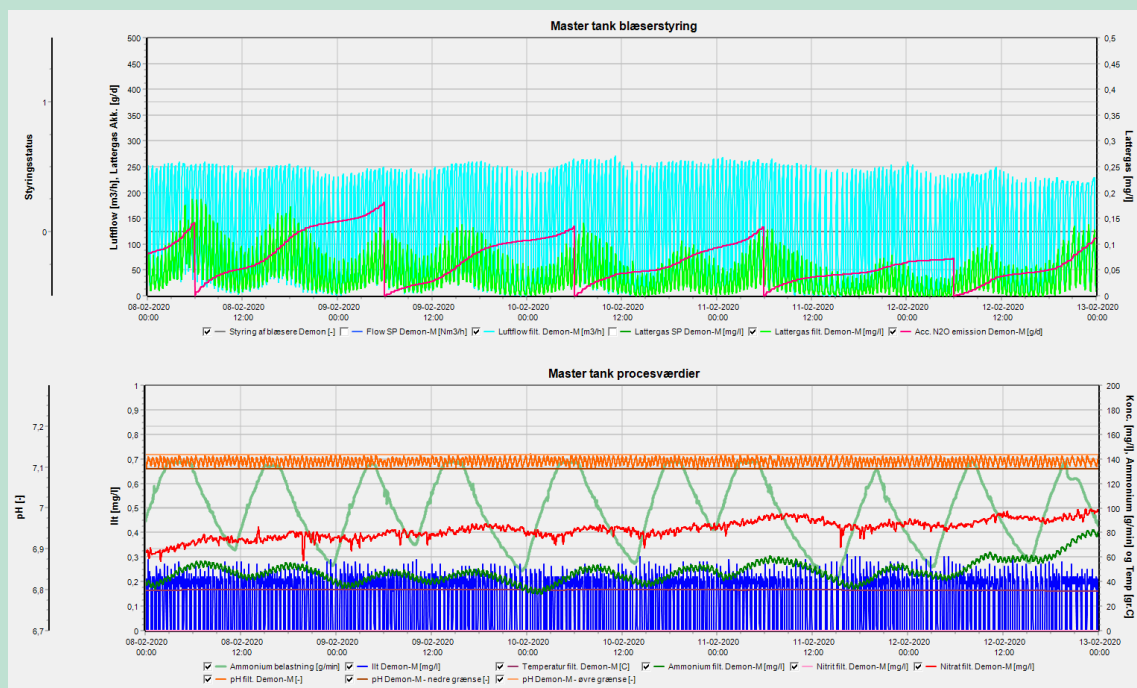


FIGUR 31. Løbende beregning af Henry's konstant og temperaturkompenseret k_{La} for de to tanke.

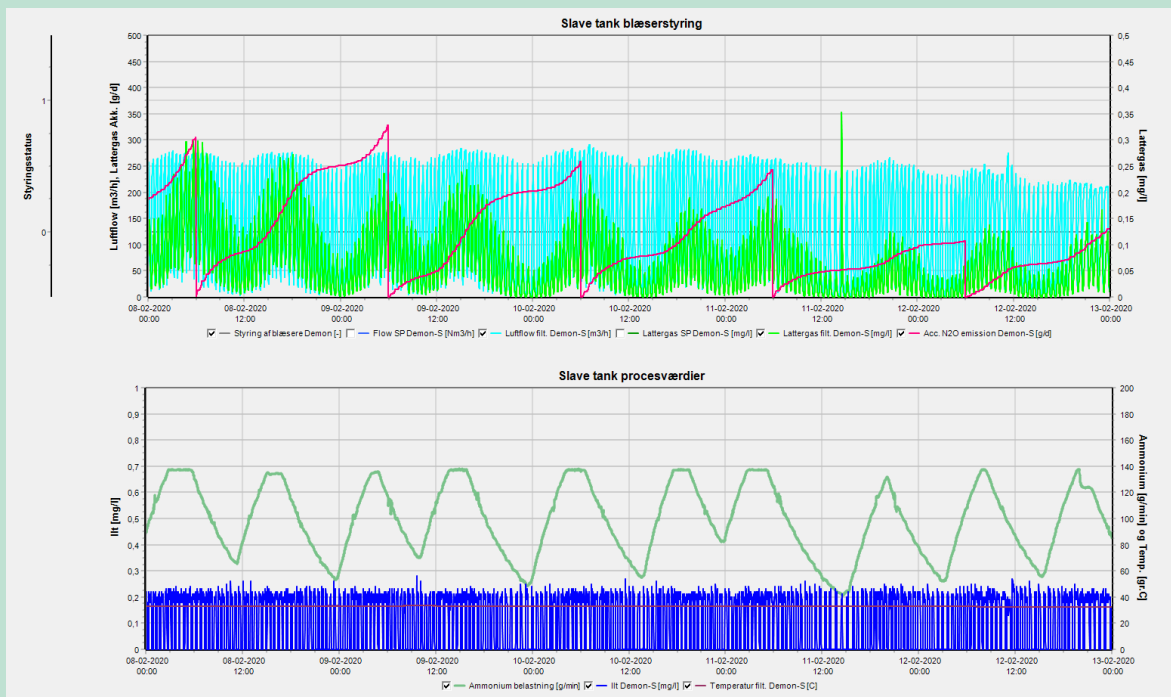
Størrelsesordenen af den akkumulerede emission er som på Marselisborg, og det ses – som forventet - at emissionen uden beluftning stort set er negligerbar i forhold til emissionen med beluftning.

4.4 Beskrivelse af standard styring

Demon processen er leveret med en standard styringsbeskrivelse, som Aarhus Vand har implementeret. FIGUR 32 og FIGUR 33 giver et overblik over styringens funktionalitet.

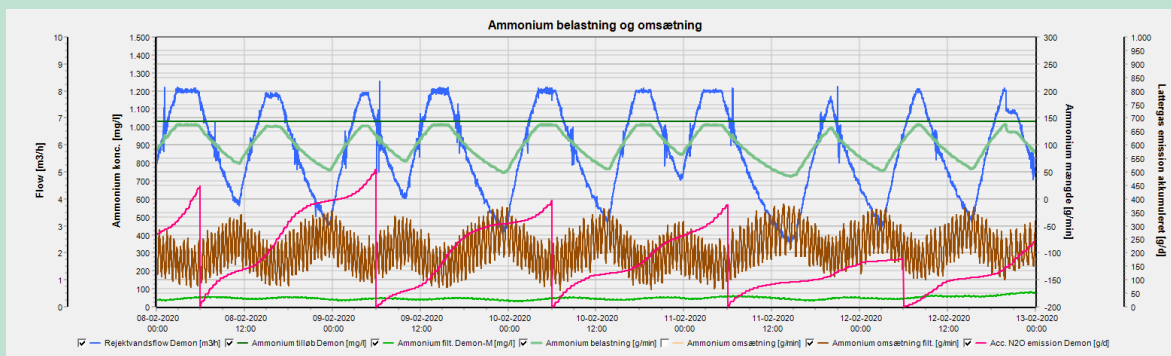


FIGUR 32. Procesværdier og lattergasemission i Demon master tank som resultat af standardstyringen.



FIGUR 33. Procesværdier og lattergasemission i Demon slave tank som resultat af standardstyringen

Styringen kører som en start/stop styring af blæserne mellem justerbare øvre og nedre pH grænser i master tanken, og når blæserne kører justeres omdrejningstallet efter faste iltsetpunkter i begge tanke. På dette tidspunkt er øvre og nedre grænse for pH sat til 7,130 henholdsvis 7,095, og iltsetpunkterne er sat til 0,2 mg/l. Herudover er der mulighed for at blæserne skal slukke et valgbart tidsrum med et valgbart mellemrum og at blæserne skal slukke, hvis iltkoncentrationen overstiger et valgbart maximum. Disse ekstra muligheder skal være med til at sikre at der ikke beluftes for meget. Det er denne styring der giver den hurtige variation, da nitrifikationen giver anledning til et pH fald, der slukker for blæserne når den nedre grænse krydses. Den efterfølgende pH stigning, der skyldes indkommende rejeckt vand starter blæserne igen, når den øvre grænse krydses.



FIGUR 34. Ammonium koncentrationer, belastning og beregnet omsætning samt den resulterende lattergasemission (akkumuleret over døgnnet).

Den langsomme variation skyldes belastningen fra ammonium i rejeckt vandet. Denne beregnes som flow til Demon tankene multipliceret med ammoniumkoncentrationen, hvor koncentrationen baseres på en prøve taget en gang om ugen. Rejeckt vandet fra dekantere opsamles i bufertank, så der altid kan tilføres en belastning til Demon processen, men som det kan ses i FIGUR 34, varierer

flowet og dermed belastningen på dette tidspunkt en hel del. Dette ses også på den beregnede omsætningshastighed for ammonium, der regnes negativ, da der fjernes ammonium. Hastigheden er størst, når der er størst belastning – og som forventet er lattergasudviklingen også størst ved de største omsætningshastigheder – der hvor den akkumulerede kurve er stejlest.

4.5 Beskrivelse af forsøg

Det blev på et relativt tidligt tidspunkt i forsøgene afprøvet om det kunne lade sig gøre at styre direkte efter lattergassensorerne. Der blev derfor lavet en PID styring af blæserne direkte efter et setpunkt for lattergaskoncentrationen. Det vil sige, at hvis den målte koncentration ligger over setpunkt, blev der skruet ned for blæserne, og hvis den lå under setpunkt blev der skruet op for blæserne.

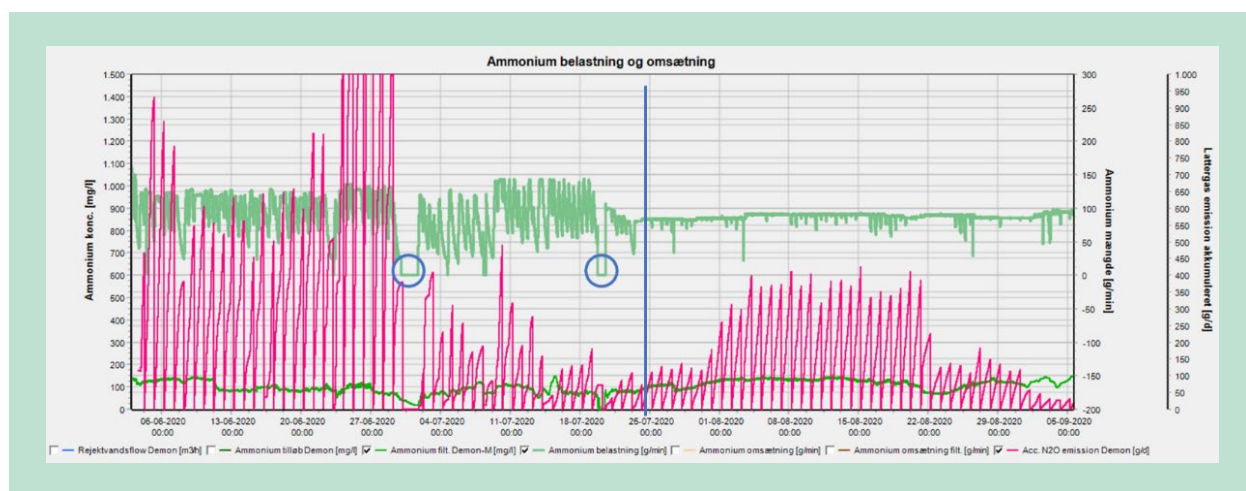
Lattergassen dannes under nitritationen, hvis omsætningen af ammonium til nitrit ikke helt kan følge med, så ideen er at skrue ned for luftflow, hvis lattergasproduktionen bliver for høj, og skrue op for luftflow, hvis lattergasproduktionen bliver meget lav. På den måde kan der - med en given kapacitet i anlægget samt belastningen til anlægget - vægtes omsætning af ammonium mod produktionen af lattergas.

Det viser sig at der faktisk kan styres ret præcist efter lattergaskoncentrationen, men da setpunktet naturligvis skal vælges så lavt som muligt, og at der på dette tidspunkt er en ukendt ikke konstant offset på målingen, fås en meget svingende pH og ammoniumfjernelse, selv om der stort set ikke er forskel på setpunkt og målt værdi. Dette forstærkes af at ammoniumbelastningen er noget svingende, hvilket jo så også gælder tilførsel af ny alkalinitet til kompensering af pH faldet.

Det blev derfor besluttet at styre dekanter/buffertank til at give så jævn en belastning som muligt på Demonanlægget samtidigt med, at der skulle arbejdes med at lave en autokalibreringsmetode for lattergassensorerne (beskrevet i forrige afsnit). Herudover skulle der laves en tilføjelse til lattergasstyringen, således at styringens arbejdsområde kan tilpasses belastningen.

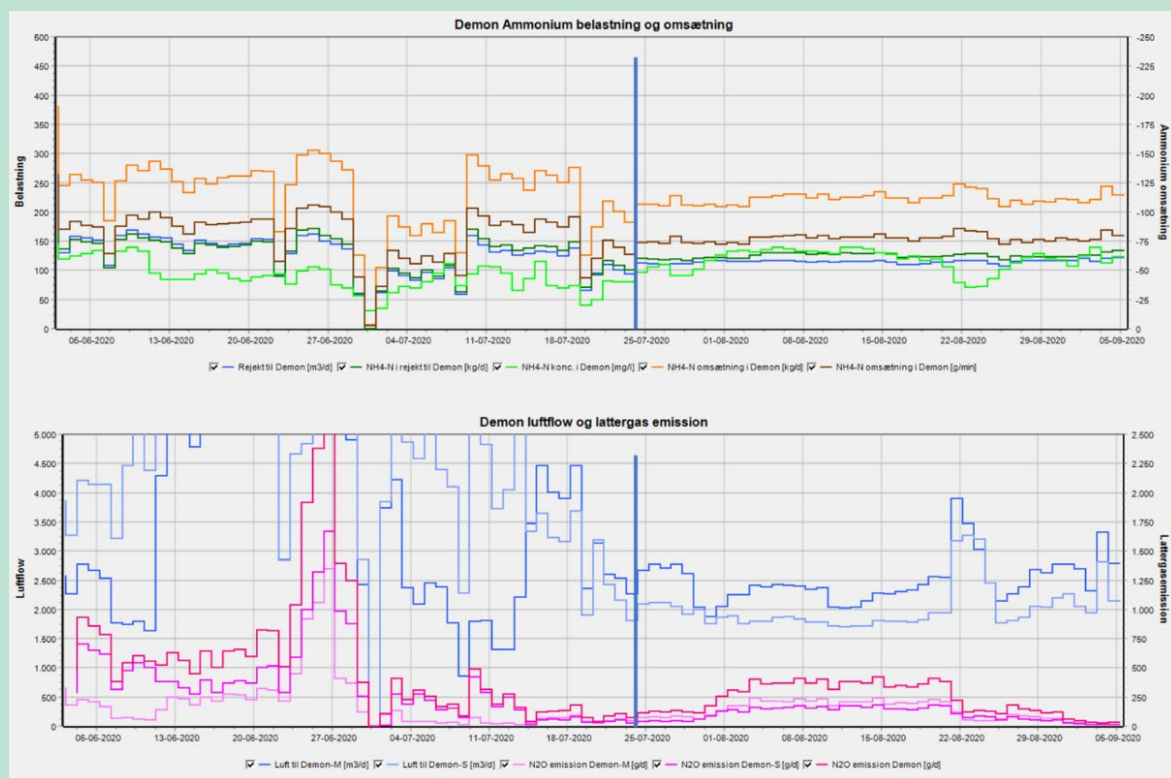
4.6 Udjævning af belastning

Med daglig autokalibrering implementeret og installering af to nye sensorer primo juni 2020 kunne der startes med forsøg på ændring af drift og styring. Der blev startet med en reference periode, hvor belastningen med rektvand blev drevet som vanligt, ligesom standard styringen af Demon processen havde sædvanlige indstillinger. Denne periode varede indtil udjævning blev foretaget d. 24/7 – dog var der nogle dage, hvor dekanterne var stoppet. Udjævning af belastningen er siden udført med behørigt hensyn til dekanterdrift og buffertank kapacitet.

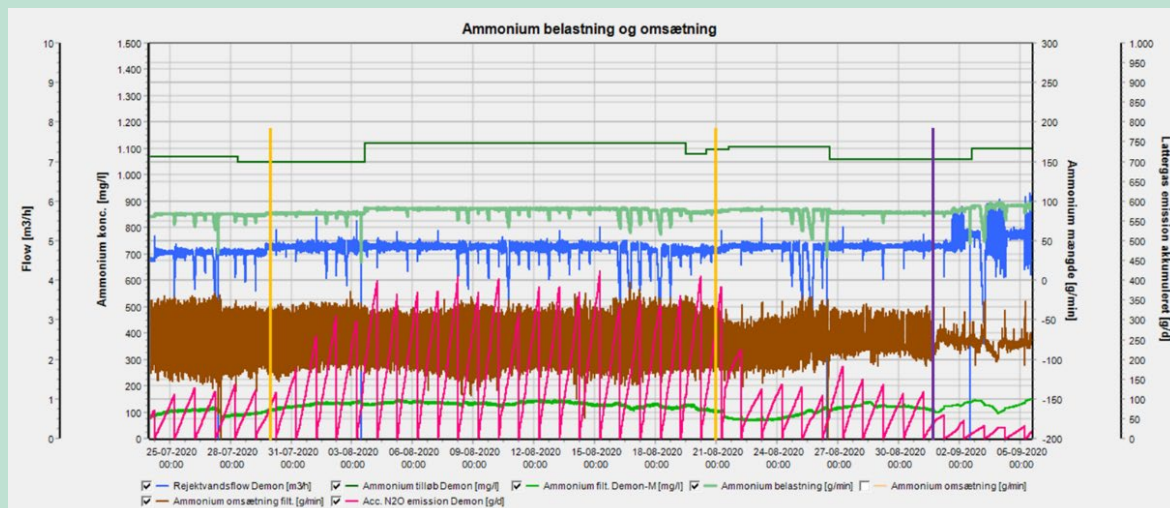


FIGUR 35. Ammoniumbelastning og -koncentration i procestanke og samlet lattergasemission i forsøgsperioden. Udjævning startet ved blå markering. Dekanterstop ved blå cirkler.

Ammoniumbelastningen, koncentrationen af ammonium i Demon tankene og den resulterende lattergasemission er vist i FIGUR 35 for forsøgsperioden, og døgnværdier for samme periode er vist i FIGUR 36. Det er på den baggrund svært at sige noget entydigt om at lattergasemissionen bliver mindre når belastningen udjævnes, men driften bliver i hvert fald mere forudsigelig og stabil. Der arbejdes nu videre med data fra perioden med udjævning af belastning, hvor resultatet af driften er vist i FIGUR 37.



FIGUR 36. Døgnværdier for forsøgsperioden – ammonium/belastning samt luftflow og lattergasemissioner. Udjævning startet ved blå markering

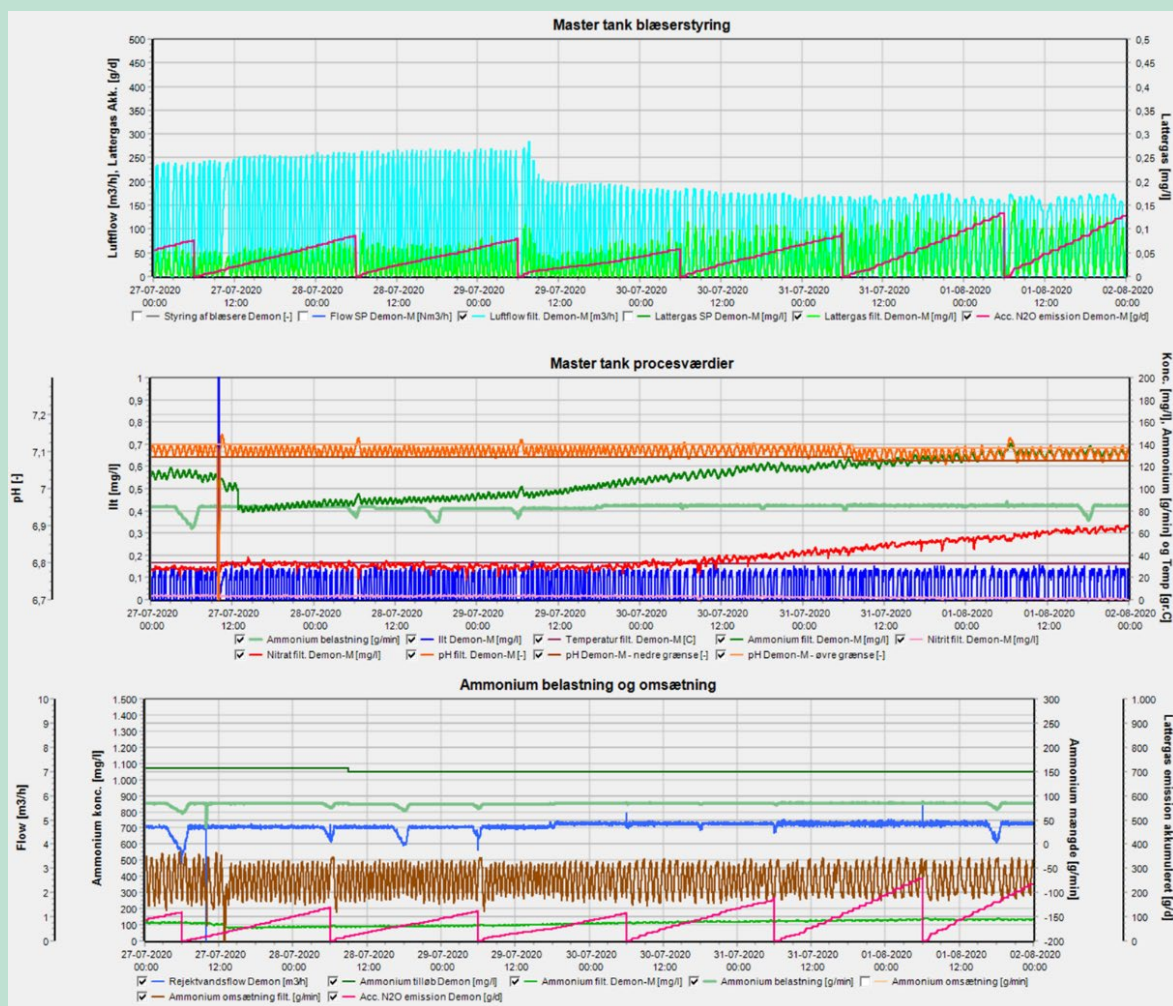


FIGUR 37. Driftsresultat med udjævnet belastning. Ændring i procesrespons ved gule markeringer og start på styring efter lattergas ved violet markering.

4.7 Demon proces respons

I perioden med udjævnet belastning er indstillingerne af standard styringen den samme gennem hele perioden, alle sensorerne er vedligeholdt forskriftsmæssigt, og der er ikke indrapporteret nogen driftsmæssige ændringer, så de tydelige ændringer i responsen fra Demon processen må skyldes ændringer i rejektivandet.

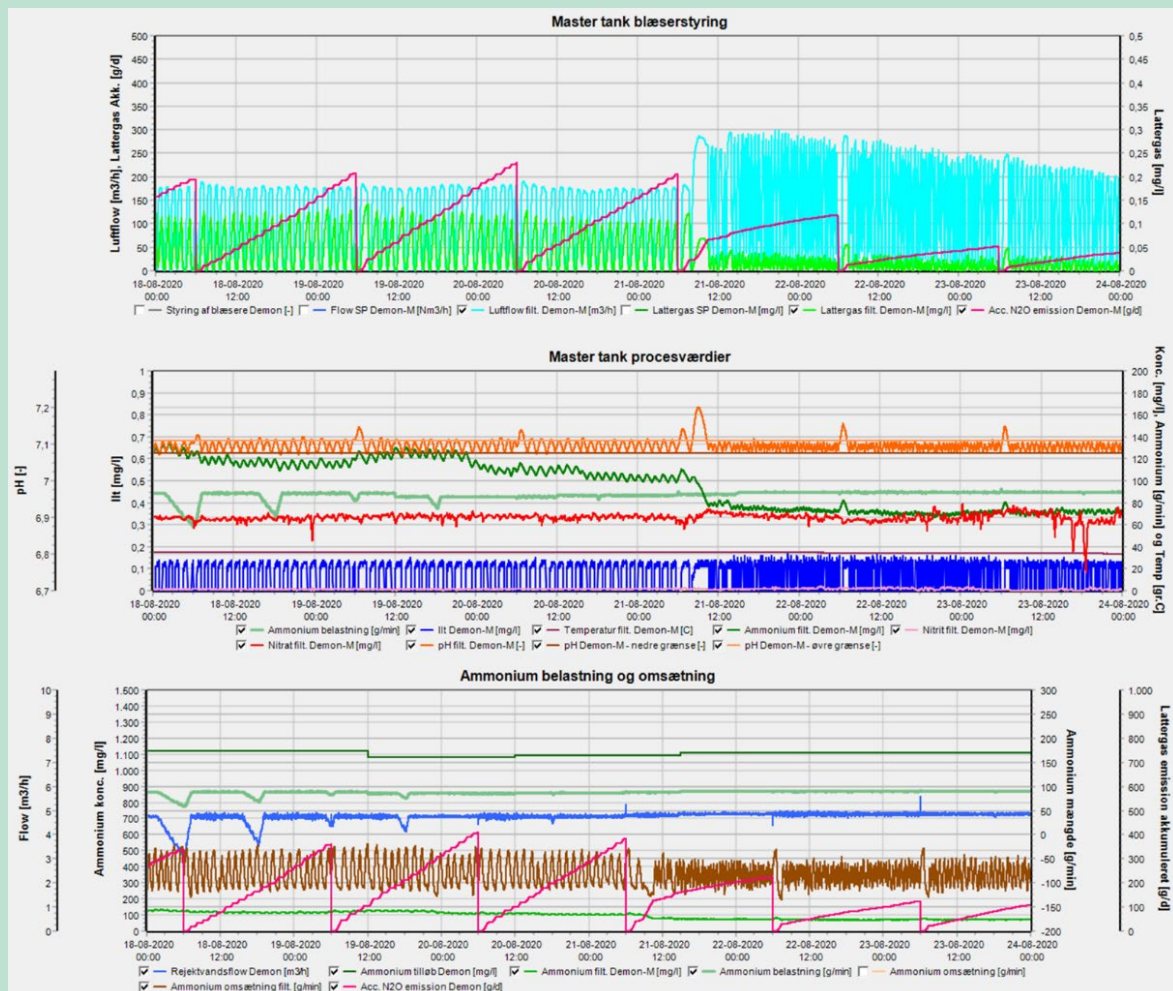
FIGUR 38 og FIGUR 39 viser ændringerne i proces responsen og lattergasemissionen (kun mastertank og totalt). Sammenlignes med FIGUR 32 og FIGUR 34, ses at den langsomt varierende komponent er fjernet på grund af udjævning af belastningen.



FIGUR 38. Ændring i Demon proces respons d. 29/7, 2020.

FIGUR 38 viser en overgang, hvor luftflowet bliver mindre og lattergasemissionen, ammonium- og nitratkoncentrationen begynder at stige. Det gennemsnitlige døgnflow i de 5 døgn før skiftet er 4750 m³ og i de 5 døgn efter 3950 m³. Setpunkt for luftflow er uændret, og at dette fint opfyldes med et mindre luftflow viser også at iltforbruget er faldet. pH holdes inden for de fastsatte grænser, men der er en tendens til at perioden bliver længere, hvilket kan skyldes en stigning i alkalinitet i rejekt eller en lavere omsætning af ammonium, hvor et mindre iltforbrug og en stigende ammoniumkoncentration taler for det sidste.

Dette kan dog ikke bekræftes fra den beregnede omsætning, hvor døgn gennemsnit er det samme før og efter (ca. 74 g/min). En usikkerhed her er at ammonium belastning og dermed omsætning beregnes ud fra en ammoniumkoncentration, der er baseret på en ugentlig prøvetagning.

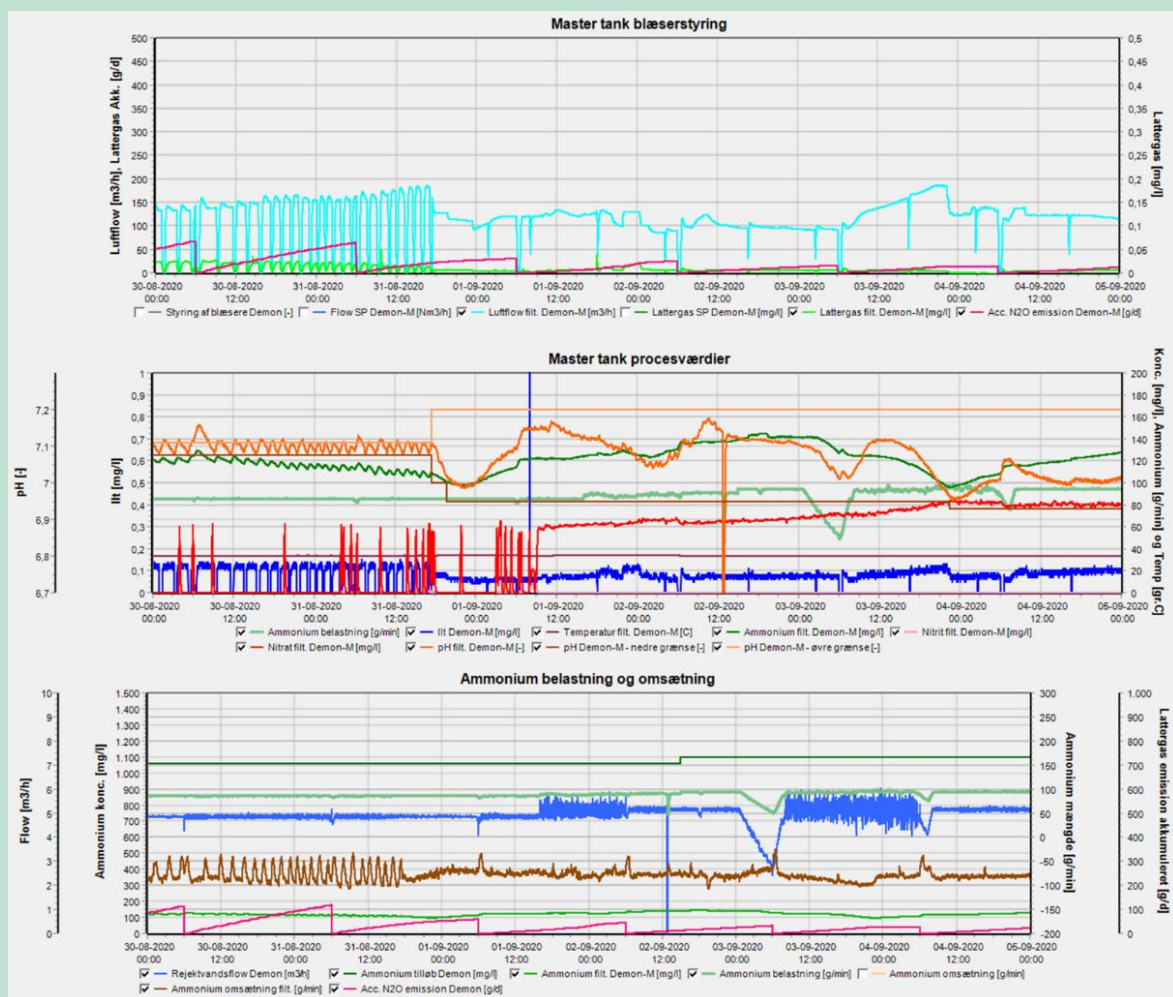


FIGUR 39. Ændring i Demon proces respons d. 21/8, 2020.

FIGUR 39 viser det modsatte af FIGUR 38 – luftflow stiger markant, selv om iltsetpunkt er det samme – døgnluftmængde før er 4480 m³ og efter 7080 m³, pH falder hurtigere under beluftning og ammoniumkoncentration falder til lavere niveau. Beregnet omsætning stiger fra ca. 78 g/min til 84 g/min, og lattergasemissionen falder til det halve. Da der ikke har været ændringer omkring selve Demon processen må den ændrede respons skyldes ændring i sammensætningen af belastningen, da flow er konstant.

FIGUR 40 viser den ændrede respons når luftflow styres efter lattergaskoncentration i stedet for ilt, samtidig med at det snævre pH interval udvides til at være uden for indflydelse. Styringen er forklaret i næste afsnit, men som et af de vigtigste resultater ses at lattergasemissionen falder markant. Middelværdien af de 3 døgn før idriftssættelse er på 122 g/d – hvilket er et lavt niveau sammenlignet med tidligere resultater, og middelværdien i de 3 døgn efter idriftssættelse er 34 g/d. Dette svarer til 1,1 g N₂O-N / kg NH₄⁺-N omsat før idriftssættelse og 0,3 g N₂O-N / kg NH₄⁺-N omsat efter idriftssættelse.

Fra FIGUR 40 ses også den balance, der skal opnås mellem ammoniumomsætning (og det medfølgende pH-fald) og lattergasemissionen – et lavt lattergas setpunkt giver en lav omsætning, og dermed et lavt alkalitetsforbrug. Herudover er det også nødvendigt at se på den absolutte værdi af pH. Anammox processen forløber hurtigere ved højere pH, men ved højere pH er der større risiko for struvit udfældning.



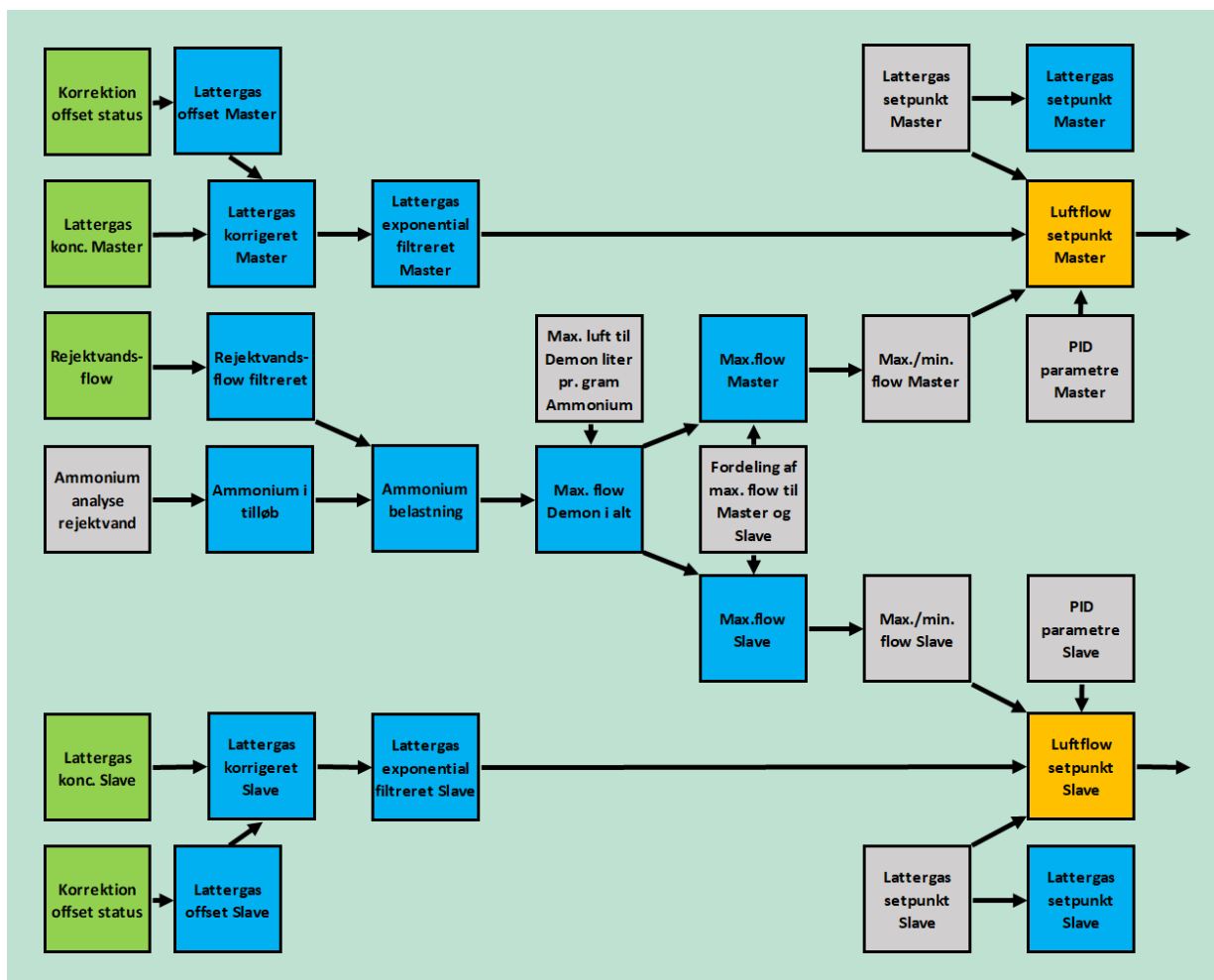
FIGUR 40. Ændring i Demon proces respons d. 31/8, 2020 – forsøg med idriftssættelse af styring af luftflow efter lattergassensorer.

4.8 Styring efter lattergas

Opbygningen af PID regulatorerne til styring af luftflowet til Demon tankene ud fra lattergassensorerne er vist i diagrammet i FIGUR 41. Arbejdsområdet er indtil videre tilpasset, således at der ved indtastning vælges et minimum luftflow – her en anelse større end minimum luftflow blæserne kan yde. Dette har vist sig nødvendigt da blæserne faktisk er for store, og derfor vil de ved lav belastning komme til at stå at starte og stoppe hele tiden.

Dette skal derfor håndteres på anden vis, således at luftflow til lavere belastning kan leveres. Det maksimale luftflow beregnes ud fra en faktor gange belastningen, hvor faktoren repræsenterer det luftbehov Demon anlægget har for at omsætte den indkommende belastning målt i liter luft pr. gram ammonium. Den beregnede max. luftmængde fordeles herefter til de to tanke.

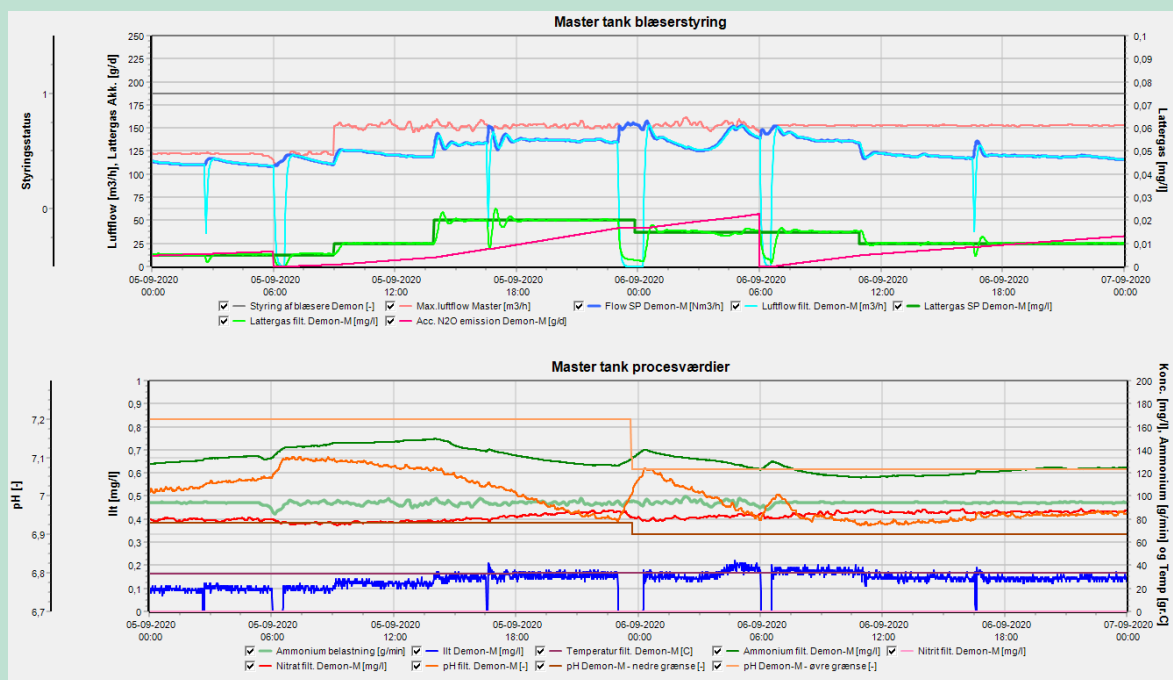
Brugerdialogen til justering af styringen er vist i FIGUR 42, hvor indtastningsfelterne kan genkendes fra de grå felter i diagrammet i FIGUR 41.



FIGUR 41. Styring af luftflow i hver af de to tanke. Målinger er grønne, softwaresensorer er blå, indtastninger og beregnede enkeltværdier er grå og selve styringen af en komponent er gul.

	Master	Slave
Setpunkter	0,01	0,01
Max. luftflow [m3/d]	154,98	132,02
Min. luftflow m3/d	82	82
Forstærkningsfaktor, Kc	10	10
Tidsskridt ml. regulering, Ts [min]	1	1
Integrations tid, Ti [min]	5	5
Differentialtid, Td [min]	0	0
Styringer aktive	☒	☒
Max. total luftflow begge tanke som liter/g NH4	50	
Fordeling af max luftflow	0,54	0,46

FIGUR 42. Brugerdialog til styringen.



FIGUR 43. Afprøvning af forskellige lattergas setpunkters indflydelse på ammoniumkoncentration og pH.

Demon processens respons på ændrede setpunkter for lattergaskoncentrationen er vist i FIGUR 43. Det ses at luftflow kan styres så lattergaskoncentrationen er stort set sammenfaldende med sit setpunkt. De små skarpe fald i luftflow skyldes at standardstyringen som nævnt har en funktion, hvor der slukkes for blæserne i et valgt tidsrum, hvis dette ikke er sket inden for en valgt tidsperiode. For at eliminere effekten af dette er denne funktion indstillet til at slukke for blæserne i 5 minutter efter 10 timers uafbrudt drift af blæserne.

Faldet i luftflow efter kl. 06:00 hver dag stammer fra tvangslukning af blæserne i forbindelse med autokalibreringen, og den længerevarende afbrydelse af blæserne i midten af kurven skyldes den stadig aktive funktion i standardstyringen, der holder øje med pH. Blæserne stopper da pH falder til nedre grænse, og de starter igen når pH rammer den øvre grænse.

Alle ovenstående afbrydelser af luftflow giver anledning til fald i lattergaskoncentrationen og stigning i pH og ammoniumkoncentration – og kan naturligvis også følges i iltkoncentrationen. Herudover ses at størrelsen af luftflow udover at styres af setpunkt for lattergassen er afhængig af sammensætningen af den indkommende belastning. I starten af den viste tidsperiode på 2 dage er setpunktet 0,005 mg/l N₂O, hvilket ikke er nok til at omsætte al indkommende ammonium, og indkommende alkalinitet er tilstrækkelig til at hæve pH.

Efter autokalibreringen stiger luftflow en anelse og rammer det maximalt tilladte (som ikke er justeret ind endnu). Ammonium koncentrationen stiger med samme hældning, men der er ikke nok alkalinitet til at vedligeholde pH, da denne er svagt faldende. Alt dette kan skyldes, at der er mere ammonium i indkommende rejeckt vand eller mindre alkalinitet – eller begge dele.

Setpunktet hæves nu til 0,01 mg/l N₂O i en periode og derefter til 0,02 mg/l N₂O, og det ses at ammoniumomsætningen kommer i gang, og at processen forløber så hurtigt at den bruger mere alkalinitet end der tilføres. Dette varer ved indtil blæserne afbrydes pga. nedre pH grænse. Efter afbrydelsen ændres setpunktet til 0,015 mg/l N₂O, dog uden den helt store forskel på fjernelsen af ammonium eller raten pH falder med. Dog ses først et fald i luftflow (som forventet) og herefter stigning som kun kan forklares med ændring i belastningen.

Efter den anden autokalibrering aftager faldet i pH og ammoniumkoncentration, da luftflow også falder. Herefter sættes lattergas setpunkt til 0,01 mg/l N_2O , hvorefter ammonium og pH stiger en smule, og derefter bliver konstante. Dvs. at der omsættes hvad der kommer ind og alkaliniteten i rejektet er tilstrækkelig til at vedligeholde pH, så med den aktuelle belastning er processen i balance med en lattergasudvikling på 0,01 mg/l N_2O . På den anden side betyder dette dog også at processen i dette tidsrum er presset kapacitetsmæssigt, når det er nødvendigt at acceptere en lattergasudvikling på 0,01 mg/l N_2O .

4.9 Konklusion

En stor del af kalendertiden er gået med arbejdet omkring lattergassensorerne – også i samarbejde med Unisense – og efter udvikling og implementering af en autokorrektion af offset på lattergassensorerne, og montering af helt nye sensorer i starten af juni 2020 har målingerne været helt tilfredsstillende, og resultaterne pålidelige.

Der er således nu implementeret en lattergas emissionsovervågning baseret på lattergassensorerne og beregninger efter DIMS.CORE OnlineLibrary: N_2O EmissionFunctions v2.2. Lattergas emissionen fra Demon anlægget kan hermed i perioderne med pålidelige målinger og inden den nye styring efter lattergas opgøres til at være omkring 400 g $\text{N}_2\text{O-N}$ / d (0,15 ton / år), og med en estimeret omsætning på ca. 120 kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ / d, bliver emissionen ca. 3,3 g $\text{N}_2\text{O-N}$ / kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ omsat.

Standardstyringen er gransket, og i et forsøg på at mindske lattergasemissionen fra Demon processen er belastningen på denne blevet udjævnet så godt det nu er muligt, og det ser ud til at det faktisk kan være med til at mindske lattergasemissionen, da procesresponsen bliver betydeligt mere stabil / styrbar. Samtidigt rejser det dog et spørgsmål om, hvor konstant sammensætningen af rejektvandet er. Eksempelvis alkaliniteten, der - ud fra procesrespons med fuldstændig samme indstillinger for styring – helt åbenbart ikke kan være konstant. Hvis det kunne lade sig gøre, ville en bedre karakterisering af rejektvandet bestemt være ønskelig.

Der er implementeret en ny styring baseret på lattergassensorer i begge tanke, og PIDstyring af luftflow til hver tank ud fra lattergas setpunkter og målinger. Luftflow kan begrænses i fht. ammoniumbelastningen i rejektvandet, hvis det ikke er muligt at opnå lattergas setpunkterne. Lattergasemissionen efter styringen er blevet idriftssat ligeså på ca. 0,5 g $\text{N}_2\text{O-N}$ / kg $\text{NH}_4^+\text{-N}$ omsat, for den uge styringen har været idriftssat, men endnu ikke optimeret.

Arbejdet med styringen er ikke færdigt, men fortsættes, da de foreløbige resultater ser rimeligt lovende ud i relation til minimering af lattergasemissionen – og også at gøre den mere styrbar. Der skal således i styringen tages højde for pH fald og stigning i ammoniumkoncentrationen – lattergas setpunkterne skal sørge for at pH og ammoniumkoncentration holdes inden for ønskede værdier.

Det har også vist sig at blæserne (stadig) er for store, så det skal forsøges at køre med én blæser, hvis en af dem kommer under minimumsværdien. Som det er nu, tillades det ikke at slukke blæserne – dvs. at lattergas koncentrationen bliver for høj, hvilket allerede ses her i den første uge efter idriftssættelse. Samtidig betyder det jo også noget for energiforbruget, at blæserne kører med for høj ydelse. En evt. mulig besparelse bør derfor kvantificeres – både i kWh og CO_2 ækvivalenter.

5. Referencer

- Andersen, M. H. (Februar 2016). *Empowering Deammonification Process Controls with Direct Nitrous Oxide Monitoring*. Hentet fra LinkedIn.com: <https://www.linkedin.com/pulse/empowering-deammonification-process-controls-direct-nitrous-andersen>
- Andersen, M. H., Sørensen, M. M., & Andreasen, K. (Oktober 2016). VTUF Projekt ID nr. 7777.2014. *Intelligent og miljømæssig bæredygtig energieffektivisering af renseanlæg – Emissionsminimering af drivhusgasser*. VTUF.
- BIOFOS A/S, DTU Kemiteknik, Unisense A/S. (Juli 2019). VUDP 87.2016. *Demonstration af ny kontrolmetode til at reducere lattergasudledningen fra renseanlæg*.
- DANVA. (2012). *CO₂-regnskab for forsyninger - en guide*. DANVA.
- DHI A/S, Aarhus Vand A/S. (2016). DIMS.CORE OnlineLibrary: N₂O Emission Functions v2.2.
- Foley, J., de Haas, D., Yuan, Z., & Lant, P. (Februar 2010). Nitrous oxide generation in full-scale biological nutrient. *Water Research*.
- Grontmij Nederland B. V. (Maj 2014). DEMON Process Design. *Marselisborg Waste Water Treatment Plant Aarhus, Denmark*. Grontmij Nederland B. V.
- Jensen, M. (Januar 2019). Biologisk Kvælstoffjernelse og Lattergasproduktion. *Efteruddannelseskursus - På vej mod et CO₂ neutralt renseanlæg: Måling, betydning og regulering af lattergas*.
- Peng, L., Ni, B.-J., Ye, L., & Yuan, Z. (December 2015). Selection of mathematical models for N₂O production by ammonia oxidizing bacteria under varying dissolved oxygen and nitrite concentrations. *Chemical Engineering Journal*.
- Peng, Y.-z., MA, Y., & Wang, S.-y. (Marts 2007). Denitrification potential enhancement by addition of external carbon sources. *Journal of Environmental Sciences*, s. 284-289.
- Schulthess, R., & Gujer, W. (Marts 1996). Release of nitrous oxide (N₂O) from denitrifying activated sludge: Verification and application of a mathematical model. *Water Research*.
- Uri, N., Eriksen, S., Nielsen, P. H., Andersen, M. H., Hafner, S., Li, Z., & Chandran, K. (2017). Continuous aeration control to reduce N₂O emissions in a full-scale sidestream deammonification reactor. *Water Environment Federation*.
- Aarhus Vand A/S. (December 2018). VUDP 88.2016. *Emissions- og energioptimering af deammonifikationsprocesser*. DANVA.

Bilag 1. Tidsserier til N2O emissionsberegning og styring af kulstofdoserering i procestanke

Tabel 7. Tidsserier brugt til beregninger i procestank 1.

LUFTNINGSTANK 1						
Luft, lattergas, Henry's konstant og kLa						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.LG-BL741-M_N2O	Lattergas - BL1	N2O	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.FT-BL751-M_FLOW	Luftflow - BL1	Q	Luft	Nm3/h	Sensor	0
MAR.TT-BL701-M_TEMP	Vandtemp. Biotanke	T	Aktivslam	°C	Sensor	0
MAR.XX-BL012-M_FASEABCD	Fasetal BL1-2	Status	Komp.	-	Status	0
MAR.VM-BL105-I_AABEN	Ventil T1 luft fra primærtanke	Status	Komp.	-	Status	0
MAR.LG-BL741-Z_N2O_KALIB	Lattergas - BL1, kalib.	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
MAR.VM-BL600-Z_AABEN_ANTAL	Antal åbne ventiler til luft fra primærtanke	Antal	Komp.	-	Beregning	3
MAR.LG-BL741-Z_N2O_KORREKTION	Lattergas - BL1, målt minus kalibreret	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.FT-BL751-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow - BL 1, filt.	Q	Luft	Nm3/h	Beregning	5
MAR.TT-BL701-Z_TEMP_EXPFILT	Temperatur Procestanke, filt	T	Aktivslam	°C	Beregning	5
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EXPFILT	Lattergas - BL1, filt	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.VM-BL105-Z_FLOW	Luftflow fra primærtanke - BL 1	Q	Luft	Nm3/h	Beregning	5
MAR.FT-BL751-Z_STATUS	Blæserstatus BL1	Status	Komp.	-	Beregning	10
MAR.TT-BL701-Z_HC_N2O	Henry's konstant N2O Procestank temp.	Faktor	Aktivslam	-	Beregning	10
MAR.FT-BL751-Z_KLA_N2O_20C_M1	kLa for N2O v.20C BL1	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	10
MAR.VM-BL105-Z_KLA_N2O_20C_M1	kLa for N2O v.20C Vent.luft BL1	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	10
MAR.FT-BL751-Z_KLA_N2O_M1	kLa for N2O BL1	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
MAR.VM-BL105-Z_KLA_N2O_M1	kLa for N2O Vent.luft BL1	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
MAR.FT-BL751-Z_VOL_AER	Beluftet volumen, BL1	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.FT-BL751-Z_VOL_NAER	Ikke beluftet volumen, BL1	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1_SPEC	Spec. N2O emission - BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_NAER_SPEC	Spec. N2O emission - BL1, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT_SPEC	Spec. N2O emission - Vent.luft BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1	N2O emission - BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_NAER	N2O emission - BL1, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT	N2O emission - Vent.luft BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1_ACC	Akk. N2O emission - BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_NAER_ACC	Akk. N2O emission - BL1, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT_ACC	Akk. N2O emission - Vent.luft BL1, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL741-Z_N2O_EMIS_ACC	Akk. N2O emission total - BL1	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	50
Tidsserier med yderligere information						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.FT-RI001-M_INDLOBSFLOW	Indløbsflow	Q	Spildevand	l/s	Sensor	0
MAR.QT-BL750-M_O2	Opløst ilt - BL1	O2	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.AM-BL721-M_NH4N	Ammonium - BL1	NH4-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.NI-BL722-M_NO3N	Nitrat - BL1	NO3-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
Tidsserier til styring af kulstofdoserering						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.LG-BL741-S_D_CDOS_STATUS	Kulstofdoserering PT1 status	Status	Komp.	-	Status	0
MAR.LG-BL741-S_D_CDOS	Kulstofdoserering PT1 SP	Status	Komp.	-	Setpunkt	0
MAR.XX-BL012-M_SETP_FASEA	Fase A - tank 1 og 2 anvendt	Tid	Komp.	min	Setpunkt	0
MAR.XX-BL012-M_TID_FASEA	Fase A - tank 1 og 2 forløbet tid	Tid	Komp.	min	Tæller	0
MAR.LG-BL741-Z_N2O_HIGH	Lattergas tærskelværdi dosering	N2O	Aktivslam	mg/l	Tærskel	5
MAR.XX-BL012-Z_TID_FASEA_SLUT	Fase A - tank 1 og 2 tid til slut	Tid	Komp.	min	Tæller	10
MAR.XX-BL012-Z_FASESKIFT	Faseskift (=1) / cyklusstart (=3) BL1-2	Status	Komp.	-	Status	10
MAR.LG-BL741-Z_CDOS_START	Kulstofdoserering Start	Status	Komp.	-	Styring	20

Tabel 8. Tidsserier brugt til beregninger i procestank 3

LUFTNINGSTANK 3						
Luft, lattergas, Henry's konstant og kLa						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.LG-BL743-M_N2O	Lattergas - BL3	N2O	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.FT-BL753-M_FLOW	Luftflow - BL 3	Q	Luft	Nm3/h	Sensor	0
MAR.TT-BL701-M_TEMP	Vandtemp. Biotanke	T	Aktivslam	°C	Sensor	0
MAR.XX-BL034-M_FASEABCD	Fasetal BL3-4	Status	Komp.	-	Status	0
MAR.VM-BL107-I_AABEN	Ventil T3 luft primærtanke	Status	Komp.	-	Status	0
MAR.LG-BL743-Z_N2O_KALIB	Lattergas - BL3, kalib.	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
MAR.VM-BL600-Z_AABEN_ANTAL	Antal åbne ventiler til luft fra primærtanke	Antal	Komp.	-	Beregning	3
MAR.LG-BL743-Z_N2O_KORREKTION	Lattergas - BL3, målt minus kalibreret	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.FT-BL753-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow - BL 3, filt.	Q	Luft	Nm3/h	Beregning	5
MAR.TT-BL701-Z_TEMP_EXPFILT	Temperatur Procestanke, filt	T	Aktivslam	°C	Beregning	5
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EXPFILT	Lattergas - BL3, filt	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.VM-BL107-Z_FLOW	Luftflow fra primærtanke - BL3	Q	Luft	Nm3/h	Beregning	5
MAR.FT-BL753-Z_STATUS	Blæserstatus BL3	Status	Komp.	-	Beregning	10
MAR.TT-BL701-Z_HC_N2O	Henry's konstant N2O Procestank temp.	Faktor	Aktivslam	-	Beregning	10
MAR.FT-BL753-Z_KLA_N2O_20C_M1	kLa for N2O v.20C BL3	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	10
MAR.VM-BL107-Z_KLA_N2O_20C_M1	kLa for N2O v.20C Vent.luft BL3	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	10
MAR.FT-BL753-Z_KLA_N2O_M1	kLa for N2O BL3	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
MAR.VM-BL107-Z_KLA_N2O_M1	kLa for N2O Vent.luft BL3	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
MAR.FT-BL753-Z_VOL_AER	Beluftet volumen, BL3	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.FT-BL753-Z_VOL_NAER	Ikke beluftet volumen, BL3	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1_SPEC	Specifik N2O emission - BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_NAER_SPEC	Specifik N2O emission - BL3, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT_SPEC	Specifik N2O emission - Vent.luft BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1	N2O emission - BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_NAER	N2O emission - BL3, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT	N2O emission - Vent.luft BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1_ACC	Akk. N2O emission - BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_NAER_ACC	Akk. N2O emission - BL3, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_AER_M1_VENT_ACC	Akk. N2O emission - Vent.luft BL3, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-BL743-Z_N2O_EMIS_ACC	Akk. N2O emission total pr. døgn - BL3	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	50
Tidsserier med yderligere information						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.FT-RI001-M_INDLOBSFLOW	Indløbsflow	Q	Spildevand	l/s	Sensor	0
MAR.QT-BL754-M_O2	Opløst ilt - BL3	O2	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.AM-BL729-M_NH4N	Ammonium - BL3	NH4-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.NI-BL730-M_NO3N	Nitrat - BL3	NO3-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0

Tabel 9. Tidsserier brugt til beregninger i Demon processen.

DEMON PROCES						
Luft, lattergas, Henry's konstant og kLa						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.TT-KT730-M_TEMP	Temperatur master tank	T	Aktivslam	°C	Sensor	0
MAR.LG-KT742-M_N2O	Lattergas - Demon	N2O	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.BL-KT011-M_FRQ	Hastighed - Kapselblæser	OMDR	Komp.	Hz	Sensor	0
MAR.BL-KT011-Z_FLOW	Beregnet luftflow til Demon	Q	Luft	m3/h	Beregning	3
MAR.LG-KT742-Z_N2O_KALIB	Lattergas - Demon, kalib.	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
MAR.LG-KT742-Z_N2O_KORREKTION	Lattergas - Demon, målt minus kalibreret	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.TT-KT730-Z_TEMP_EXPFILT	Temperatur Rejektvand master, filt	T	Aktivslam	°C	Beregning	5
MAR.BL-KT011-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow - Demon, filt.	Q	Luft	m3/h	Beregning	5
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EXPFILT	Lattergas - Demon, filt	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
MAR.BL-KT011-Z_STATUS	Blæserstatus Demon	Status	Komp.	-	Beregning	10
MAR.TT-KT730-Z_HC_N2O	Henry's konstant N2O Demontank temp.	Faktor	Aktivslam	-	Beregning	10
MAR.BL-KT011-Z_KLA_N2O_20C_M1	kLa for N2O v.20C Demon	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	10
MAR.BL-KT011-Z_KLA_N2O_M1	kLa for N2O Demon	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
MAR.BL-KT011-Z_VOL_AER	Beluftet volumen, Demon	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.BL-KT011-Z_VOL_NAER	Ikke beluftet volumen, Demon	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	20
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_AER_M1_SPEC	Spec. N2O emission - Demon, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_NAER_SPEC	Spec. N2O emission - Demon, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/m3/d	Beregning	30
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_AER_M1	N2O emission - Demon, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_NAER	N2O emission - Demon, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/min	Beregning	35
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_AER_M1_ACC	Akk. N2O emission - Demon, (beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_NAER_ACC	Akk. N2O emission - Demon, (uden beluftning)	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	40
MAR.LG-KT742-Z_N2O_EMIS_ACC	Akk. N2O emission total - Demon	N2Ogas	Luft	g/d	Beregning	50
Tidsserier med yderligere information						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc.order
MAR.FT-SB762-M_FLOW	Rejektvandsflow	Q	Spildevand	m3/h	Sensor	0
MAR.QT-KT731-M_O2	Iltmåling Mastertank	O2	Spildevand	mg/l	Sensor	0
MAR.AM-KT732-M_NH4N	Ammonium måler	NH4-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
MAR.NI-KT725-M_NO3N	Nitrat måler	NO3-N	Spildevand	mg/l	Sensor	0
MAR.PH-KT727-M_REDOX	pH måler	pH	Aktivslam	-	Sensor	0

Bilag 2. Installation og drift af lattergas sensorer i Demon proces på Viby renseanlæg. Dokumentation af tidsserier.

Beslutningen om at flytte forsøg med emissionsminimering på sidestrømmen fra Marselisborg til Viby blev ikke kun taget pga. blæsernes størrelse. Det spillede også ind, at der allerede sad en lattergassensor med transmitter i master tanken, der dog ikke havde været anvendt i mere end et år. Den blev udskiftet med en sensor fra Marselisborg, som var leveret (og bestilt) med for stort måleområde. Som det ses i Tabel 10 skete dette i november 2018, hvor sensoren blev anvendt til at køre lattergasmålingen ind igen.

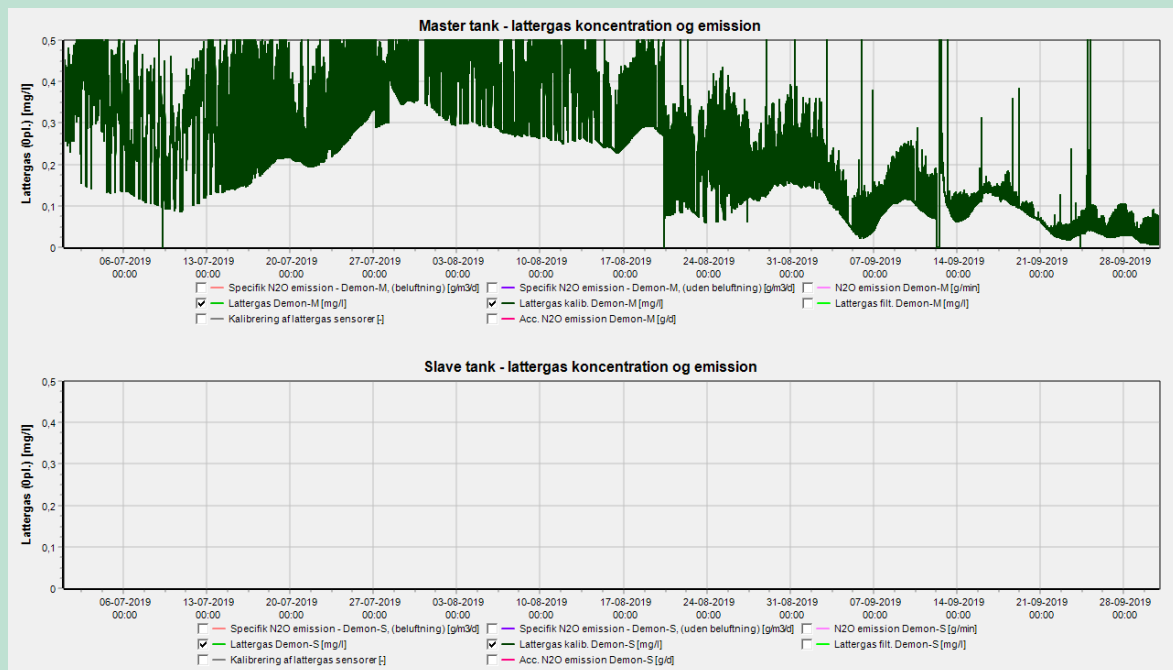
Tabel 10. Oversigt drift af lattergassensorer i Demon proces på Viby renseanlæg.

Dato	Master tank	Slave tank
23-11-2018	Eksist. udtjent sensor skiftet med reserve fra Marselisborg	
07-05-2019	Ny sensor installeret	
02-10-2019	Ny sensor installeret	Installeret sensor fra master tank
15-10-2019	Manuelle korrektioner af offset i perioden frem til 6/11	Manuelle korrektioner af offset i perioden frem til 6/11
24-10-2019		Kalibrering af sensor
06-11-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
15-11-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
22-11-2019		Ny sensor installeret – ej aktiv, data korrigeret til 29/11
29-11-2019		Kalibrering af sensor
18-12-2019	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
30-01-2020	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor
03-02-2020	Kalibrering af sensor	
05-02-2020	Efterfølgende manuel korrektion af offset frem til 14/3	Efterfølgende manuel korrektion af offset frem til 14/3
14-03-2020	Automatisk korrektion af offset implementeret	Automatisk korrektion af offset implementeret
26-03-2020	Kalibrering af sensor	Kalibrering af sensor og placeret i master tank
23-04-2020		Sensor i stykker (stadig placeret i master tank)
03-06-2020	Ny sensor installeret	Ny sensor installeret

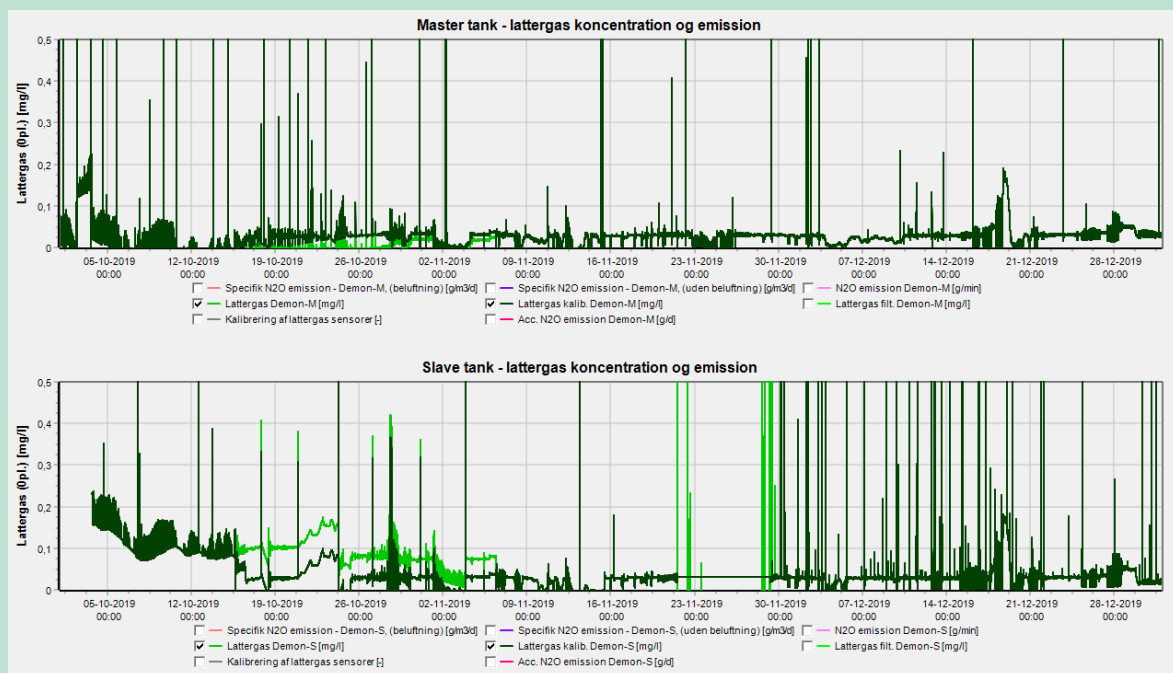
Den blev dog erstattet af en ny sensor i starten af maj 2019. Denne blev primo oktober 2019 flyttet til slave tanken, mens der blev indkøbt endnu sensor, som blev placeret i master tanken og tilkoblet den eksisterende transmitter. Fra dette tidspunkt blev der arbejdet med at få erfaringer med sensorernes driftsstabilitet over længere tid ved de højere temperaturer og forventede højere koncentrationer, der er i Demon processen – også i samarbejde med leverandøren Unisense.

Det viser sig at der er en mindre og uforudsigelig drift i sensorens offset. Normalt vil en drift i denne størrelsesorden ikke betyde så meget, men da sensoren skal anvendes ved meget lave værdier i forbindelse med den planlagte styring, er det drivende offset ikke acceptabelt. Derfor etableres en automatisk korrektion én gang i døgnet, ved at skabe procesbetingelser, hvor det vides at sensoren skal vise nul.

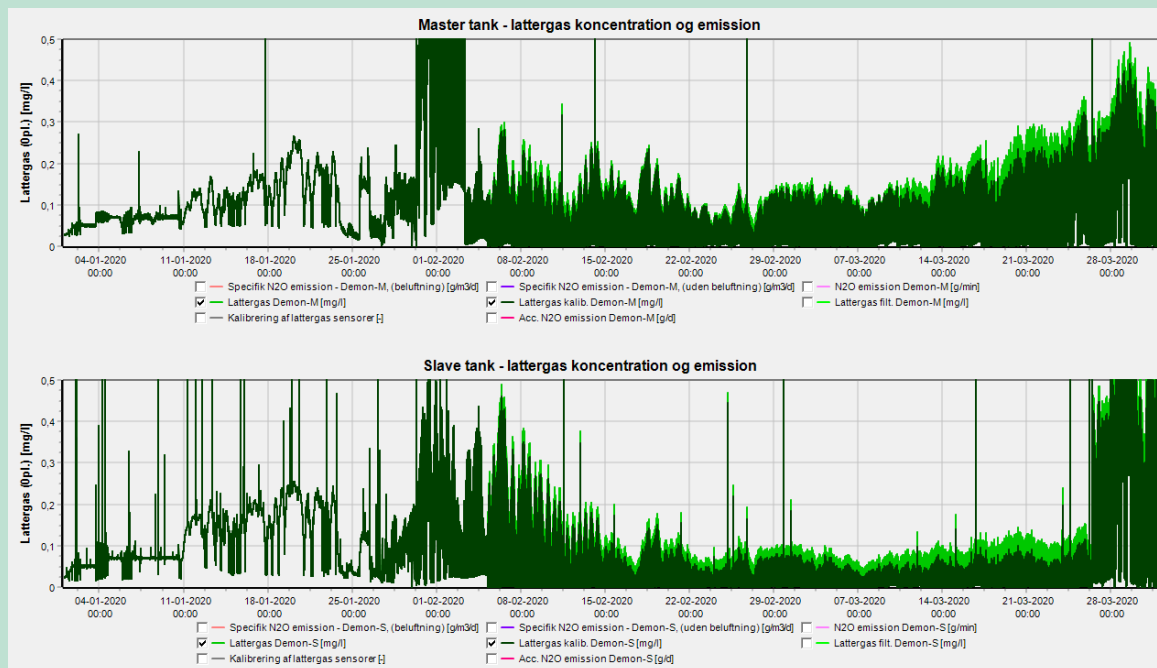
Tabel 10 viser milepælene i dette arbejde, der samtidigt er beskrevet via FIGUR 44-FIGUR 48 på de følgende sider, hvor også den målte lattergas i perioden kan ses – dog er denne kun korrigeret fra starten af februar – og automatisk fra medio marts. Det vil sige, at fra starten af februar afspejler den korrigerede lattergasmåling driften af Demon processen, og fra starten af juni startes – med installation af nye sensorer - en reference- og forsøgsperiode.



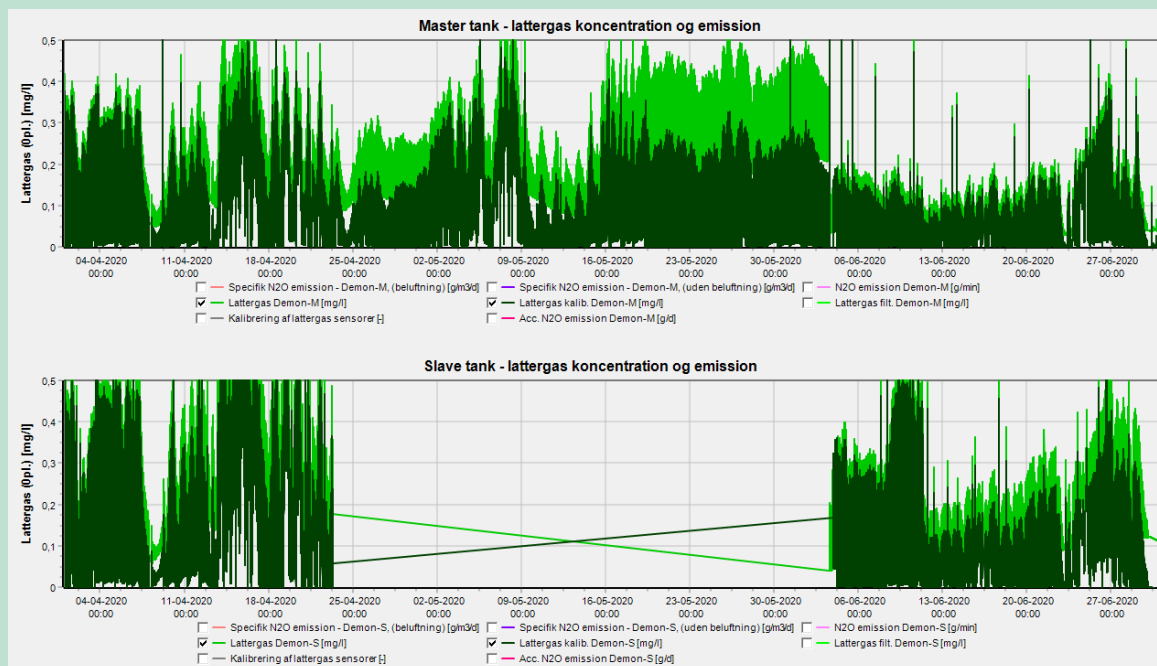
FIGUR 44. Målt lattergas i tredje kvartal 2019.



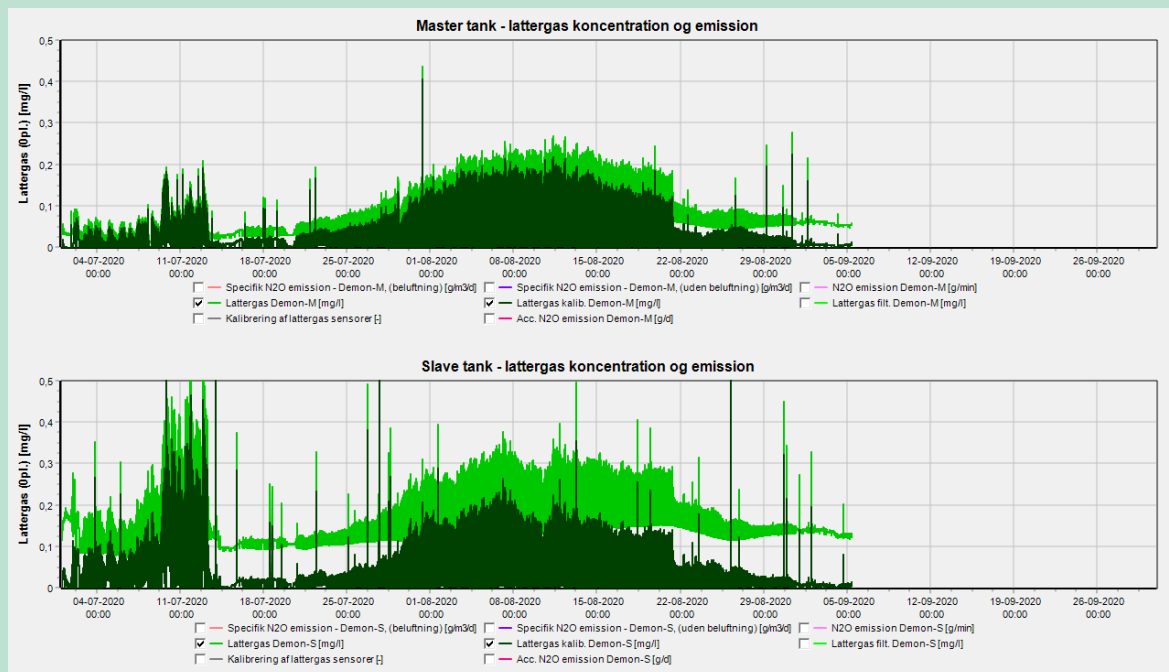
FIGUR 45. Målt og i en del af perioden korrigeret lattergas i fjerde kvartal 2019.



FIGUR 46. Målt og korrigeret (fra start februar) lattergas i første kvartal 2020.



FIGUR 47. Målt og korrigeret lattergas i andet kvartal 2020.



FIGUR 48. Målt og korrigeret lattergas i tredje kvartal 2020.

Tabel 11. Tidsserier til Emissionsberegninger i mastertank.

MASTER TANK						
Beluftning, Henry's konstant og kLa						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT026-I_DRIFT	Drift af Kapselblæser Demon-M	Eff.	Luft	kWh	Status	0
VIB.BL-KT026-M_OMDR	Omdrejninger blæser Demon-M	OMDR	Komp.	%	Status	0
VIB.TT-KT737-M_TEMP	Temperatur Demon-M	T	Aktivslam	C	Status	0
VIB.BL-KT026-Z_FLOW	Luftflow Demon-M	Q	Luft	m3/h	Beregning	5
VIB.TT-KT737-Z_TEMP_EXPFILT	Temperatur filt. Demon-M	T	Aktivslam	C	Beregning	5
VIB.BL-KT026-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow filt. Demon-M	Q	Luft	m3/h	Beregning	10
VIB.TT-KT737-Z_HC_N2O	Henry's konstant Demon-M	Faktor	Aktivslam	-	Beregning	10
VIB.BL-KT026-Z_VOL_NAER	Ikke beluftet volumen, Demon-M	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	10
VIB.BL-KT026-Z_VOL_AER	Beluftet volumen, Demon-M	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	10
VIB.BL-KT026-Z_KLA_N2O_20C	kLa N2O v. 20 gr.C Demon-M	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	15
VIB.BL-KT026-Z_KLA_N2O	kLa N2O Demon-M	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
Lattergas koncentration						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT600-M_KALIB	Kalibrering af lattergas sensorer	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.LG-KT748-M_N2O	Lattergas Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Status	0
VIB.LG-KT748-Z_N2O_OFFSET	Lattergas offset Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
VIB.LG-KT748-Z_N2O_KALIB	Lattergas kalib. Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
VIB.LG-KT748-Z_N2O_KALIB_EXPFILT	Lattergas filt. Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	10
Beregning af lattergas emission						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS_AER_SPEC	Specifik N2O emission - Demon-M, (beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/m3/d	Beregning	30
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS_NAER_SPEC	Specifik N2O emission - Demon-M, (uden beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/m3/d	Beregning	30
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS_AER	N2O emission Demon-M (beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	35
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS_NAER	N2O emission Demon-M (uden beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	35
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS	N2O emission Demon-M	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	40
VIB.LG-KT748-Z_N2O_EMIS_ACC	Acc. N2O emission Demon-M	N2Ogas	Aktivslam	g/d	Beregning	45

Tabel 12. Tidsserier til Emissionsberegninger i slvetank.

SLAVE TANK						
Beluftning, Henry's konstant og kLa						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT020-I_DRIFT	Drift af Kapselblæser Demon-S	Eff.	Luft	kWh	Status	0
VIB.BL-KT020-M_OMDR	Omdrejninger blæser Demon-S	OMDR	Komp.	%	Status	0
VIB.TT-KT751-M_TEMP	Temperatur Demon-S	T	Aktivslam	C	Status	0
VIB.BL-KT020-Z_FLOW	Luftflow Demon-S	Q	Luft	m3/h	Beregning	5
VIB.TT-KT751-Z_TEMP_EXPFILT	Temperatur filt. Demon-S	T	Aktivslam	C	Beregning	5
VIB.BL-KT020-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow filt. Demon-S	Q	Luft	m3/h	Beregning	10
VIB.TT-KT751-Z_HC_N2O	Henry's konstant Demon-S	Faktor	Aktivslam	-	Beregning	10
VIB.BL-KT020-Z_VOL_NAER	Ikke beluftet volumen, Demon-S	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	10
VIB.BL-KT020-Z_VOL_AER	Beluftet volumen, Demon-S	Vol.	Aktivslam	m3	Beregning	10
VIB.BL-KT020-Z_KLA_N2O_20C	kLa N2O v. 20 gr.C Demon-S	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	15
VIB.BL-KT020-Z_KLA_N2O	kLa N2O Demon-S	kLa	Aktivslam	pr. d	Beregning	20
Lattergas koncentration						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT600-M_KALIB	Kalibrering af lattergas sensorer	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.LG-KT745-M_N2O	Lattergas Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Status	0
VIB.LG-KT745-Z_N2O_OFFSET	Lattergas offset Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
VIB.LG-KT745-Z_N2O_KALIB	Lattergas kalib. Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
VIB.LG-KT745-Z_N2O_KALIB_EXPFILT	Lattergas filt. Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	8
Beregning af lattergas emission						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS_AER_SPEC	Specifik N2O emission - Demon-S,	N2Ogas	Aktivslam	g/m3/d	Beregning	30
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS_NAER_SPEC	Specifik N2O emission - Demon-S, (uden beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/m3/d	Beregning	30
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS_AER	N2O emission Demon-S (beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	35
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS_NAER	N2O emission Demon-S (uden beluftning)	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	35
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS	N2O emission Demon-S	N2Ogas	Aktivslam	g/min	Beregning	40
VIB.LG-KT745-Z_N2O_EMIS_ACC	Acc. N2O emission Demon-S	N2Ogas	Aktivslam	g/d	Beregning	45

Tabel 13. Tidsserier til visning af drift resultat.

DEMON						
Driftsresultat						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.AM-KT739-M_NH4N	Ammonium Demon-M	NH4-N	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
VIB.PH-KT734-M_PH	pH Demon-M	pH	Aktivslam	-	Sensor	0
VIB.PH-KT734-M_NED_GR	pH Demon-M - nedre grænse	pH	Aktivslam	-	Tærskel	0
VIB.PH-KT734-M_OVR_GR	pH Demon-M - øvre grænse	pH	Aktivslam	-	Tærskel	0
VIB.QT-KT738-M_O2	Ilt Demon-M	O2	Spildevand	mg/l	Sensor	0
VIB.QT-KT750-M_O2	Ilt Demon-S	O2	Aktivslam	mg/l	Sensor	0
VIB.FT-SB767-M_FLOW	Rejektvandsflow Demon	Q	Spildevand	m3/h	Sensor	0
VIB.BL-KT026-Z_FLOW	Luftflow Demon-M	Q	Luft	m3/h	Beregning	5
VIB.BL-KT020-Z_FLOW	Luftflow Demon-S	Q	Luft	m3/h	Beregning	5
VIB.AM-SB600-Z_NH4N	Ammonium tilløb Demon	NH4-N	Slam	mg/l	Beregning	5
VIB.AM-KT739-Z_NH4N_KALIB_EXPFILT	Ammonium filt. Demon-M	NH4-N	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
VIB.FT-SB767-Z_FLOW_EXPFILT	Rejektvandsflow Demon filt.	Q	Aktivslam	l/s	Beregning	5
VIB.BL-KT026-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow filt. Demon-M	Q	Luft	m3/h	Beregning	10
VIB.BL-KT020-Z_FLOW_EXPFILT	Luftflow filt. Demon-S	Q	Luft	m3/h	Beregning	10
VIB.AM-KT600-Z_NH4N_QDEK	Ammonium belastning	NH4-N	Rejektvand	g/min	Beregning	10
VIB.AM-KT739-Z_NH4N_RATE	Ammonium omsætning	NH4-N	Aktivslam	g/min	Beregning	15
VIB.AM-KT739-Z_NH4N_RATE_EXPFILT	Ammonium omsætning filt.	NH4-N	Aktivslam	g/min	Beregning	20
VIB.LG-KT600-Z_N2O_EMIS_ACC	Acc. N2O emission Demon	N2Ogas	Aktivslam	g/d	Beregning	50

Tabel 14. Tidsserier til styring efter lattergas i master tank.

MASTER TANK						
Styring efter lattergas						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT026-S_D_SP	Luftflow. Demon-M SD	Q	Luft	%	Setpunkt	0
VIB.BL-KT600-S_D_SP_STATUS	Styring af blæsere Demon	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.FT-SB767-M_FLOW	Rejektvandsflow Demon	Q	Spildevand	m3/h	Sensor	0
VIB.BL-KT600-M_KALIB	Kalibrering af lattergas sensorer	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.LG-KT748-M_N2O	Lattergas Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Status	0
VIB.LG-KT748-Z_N2O_OFFSET	Lattergas offset Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
VIB.LG-KT748-Z_N2O_KALIB	Lattergas kalib. Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
VIB.AM-SB600-Z_NH4N	Ammonium tilløb Demon	NH4-N	Slam	mg/l	Beregning	5
VIB.LG-KT748-Z_N2O_SP	Lattergas SP Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Setpunkt	5
VIB.AM-KT600-Z_NH4N_QDEK	Ammonium belastning	NH4-N	Rejektvand	g/min	Beregning	10
VIB.LG-KT748-Z_N2O_KALIB_EXPFLT	Lattergas filt. Demon-M	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	10
VIB.BL-KT600-Z_MAXLUFT	Belastningsstyret max.luftflow	Q	Luft	m3/h	Beregning	15
VIB.BL-KT610-Z_MAXLUFT	Max.luftflow Master	Q	Luft	m3/h	Beregning	18
VIB.BL-KT026-Z_FLOW_SP	Flow SP Demon-M	Q	Komp.	Nm3/h	Styring	20

Tabel 15. Tidsserier til styring efter lattergas i slave tank.

SLAVE TANK						
Styring efter lattergas						
Name	Description	Parameter	Media	Unit	Time series type	Calc. order
VIB.BL-KT020-S_D_SP	Luftflow Demon-S SD	Q	Luft	m3/h	Setpunkt	0
VIB.BL-KT600-S_D_SP_STATUS	Styring af blæsere Demon	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.FT-SB767-M_FLOW	Rejektvandsflow Demon	Q	Spildevand	m3/h	Sensor	0
VIB.BL-KT600-M_KALIB	Kalibrering af lattergas sensorer	Status	Komp.	-	Status	0
VIB.LG-KT745-M_N2O	Lattergas Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Status	0
VIB.LG-KT745-Z_N2O_OFFSET	Lattergas offset Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	3
VIB.LG-KT745-Z_N2O_KALIB	Lattergas kalib. Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	5
VIB.AM-SB600-Z_NH4N	Ammonium tilløb Demon	NH4-N	Slam	mg/l	Beregning	5
VIB.LG-KT745-Z_N2O_SP	Lattergas SP Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Setpunkt	5
VIB.AM-KT600-Z_NH4N_QDEK	Ammonium belastning	NH4-N	Rejektvand	g/min	Beregning	10
VIB.LG-KT745-Z_N2O_KALIB_EXPFLT	Lattergas filt. Demon-S	N2O	Aktivslam	mg/l	Beregning	10
VIB.BL-KT600-Z_MAXLUFT	Belastningsstyret max.luftflow	Q	Luft	m3/h	Beregning	15
VIB.BL-KT620-Z_MAXLUFT	Max.luftflow Slave	Q	Luft	m3/h	Beregning	18
VIB.BL-KT020-Z_FLOW_SP	Flow SP Demon-S	Q	Komp.	Nm3/h	Styring	20

Emissionsmonitoring/beregning og minimeringstiltag for lattergas på Marselisborg Renseanlæg

Dette projekts formål kan sammenfattes som:

- Estimere lattergasemissionen fra Marselisborg renseanlæg på baggrund af realtidsmålinger og beregninger og sammenligne med estimat baseret på tilladt kvælstof til anlægget.
- Implementere og teste styring af kulstofdosering til aktivslam tank på et renseanlæg med det formål at minimere lattergasemission, hvis denne dannes ved kulstofmangel.
- Implementere og teste styring af luftflow til Anammox proces (Demon) med det formål at minimere lattergasemission, hvis denne dannes ved høj belastning af nitrifikationen.

N₂O-emissionsovervågning af Marselisborg Renseanlæg har ved sammenligning med det aktuelt benyttede N₂O estimat vist, at der er meget stor forskel på, om emissionen beregnes ud fra N₂O målt i vandfasen i procestankene eller om emissionen beregnes ud fra den tilladte mængde kvælstof til renseanlægget. Beregningen ud fra den målte lattergas viser at emissionen er mere end dobbelt så stor, som hvis beregningen laves ud fra kvælstof-tilløb til renseanlægget.

Overvågningen har også givet erfaringer med Unisense lattergassensorerne, og målingerne har bl.a. vist tendens til at drive omkring 0-punktet, så det er vanskeligt at afgøre, om den aktuelle måling er retvisende eller ikke.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk