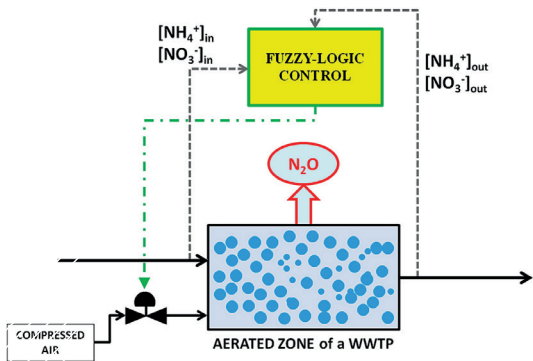


Demonstration af en ny kontrolmetode

til at reducere lattergasudledningen fra renselanlæg



DEMONSTRATION AF EN NY KONTROLMETODE TIL AT REDUCERE LATTEGAS UDLEDNINGEN FRA RENSEANLÆG DANVA VUDP PROJEKTRAPPORT

DATO: 10. juli 2019

Projekt ID: 87.2016

Udgiver:
DANVA

Udarbejdet af:
Artur Tomasz Mielczarek, BIOFOS A/S
Dines Thornberg, BIOFOS A/S
Gürkan Sin, DTU Kemiteknik
Xueming Chen, DTU Kemiteknik
Kirsten Habicht, Unisense A/S
Mikkel Holmen Andersen, Unisense A/S

Finansiering:
Vejledningen er finansieret af
VUDP, Vandsektorens Udviklings- og Demonstrationsprogram

Samarbejdspartnere:
BIOFOS A/S, DTU Kemiteknik, Unisense A/S

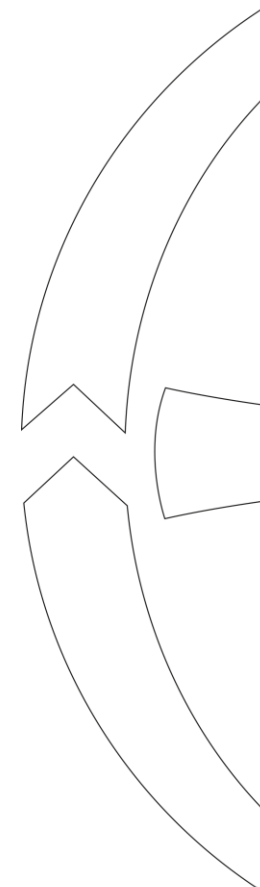
Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning):

Spildevand

Klimatilpasning

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	3
2	English summary	4
3	Introduktion	5
4	Projektets betydning for vandbranchen	6
4.1	Næste skridt	6
4.2	Marked eller anvendelsesmuligheder	6
4.3	Formidlingsplan	7
5	Projektet	8
5.1	Formål	8
5.2	Output	8
5.3	Projektresultater	8
5.4	Konklusion	12



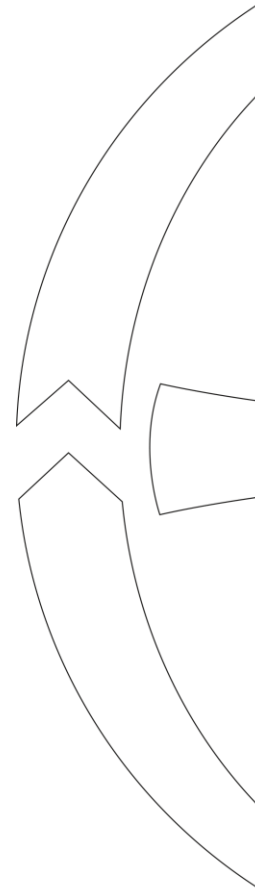
1 Sammenfatning

I perioden fra 2017 til 2019 har BIOFOS A/S, DTU Kemiteknik og Unisense A/S med midler fra VUDP gennemført projektet: Demonstration af en ny kontrol metode til at reducere lat-tergas (N_2O) udledningen fra rensaanlæg.

Projektet baseres på et fuldskala dansk rensaanlæg (Rensaanlæg Avedøre, der drives af BIOFOS) med planlægnings- og kontrolsystemer, der almindeligvis er vedtaget af europæiske rensningsanlæg og har til formål at opnå fuldskala N_2O -emissionsstørrelse (med brug af Unisense N_2O sensorer) og egenskaber til en bedre forståelse af styring og kontrol. Analyseresultaterne er brugt til at vurdere anvendeligheden af en Fuzzy Logic kontroller, udviklet af forskergruppen fra DTU.

De hovedresultater, der er opnået i projektet, er som følger:

- En langsigtet (12 måneders) overvågningskampagne for N_2O -emissioner på Rensaanlæg Avedøre er gennemført med succes. Resultaterne viser, at forholdsvis lav N_2O -emission fandt sted i sæsoner med en faldende vandtemperatur, mens relativt høj N_2O -emission forekom i sæsoner med en stigende vandtemperatur.
- Hovedkomponenten af Fuzzy Logic kontrolleren, som er en beluftningsregulering for at afbalancere AOB og NOB aktiviteterne, er blevet testet. Med andre ord har vi manuelt manipuleret og testet ilt-setpunkter på Avedøre WWTP, som kan gøres i STAR®. Resultaterne viser, at den nye kontrolstrategi i den aerobe fase kunne omfatte indførelse af et reduceret ilt-setpunkt i kontrolsystemet, hvilket ville hæmme N_2O -produktionen.
- Tilbagevendende cykliske (sæson) mønstre i høje N_2O -emissioner og korrelationer mellem emissioner og procesparametre blev analyseret. Vi fandt tre typer af tilbagevendende cykliske mønstre i sæsoner med relativt høj N_2O -emission, der forekommer under forskellige faser og under forskellige forhold. Ingen af de undersøgte procesvariable havde dog en stærk sammenhæng med N_2O -emissionshastigheden, hvilket betyder, at N_2O -emission er et komplekst, ikke-lineært fænomen, der er påvirket af mange procesvariable og deres eventuelle vekselvirkninger.



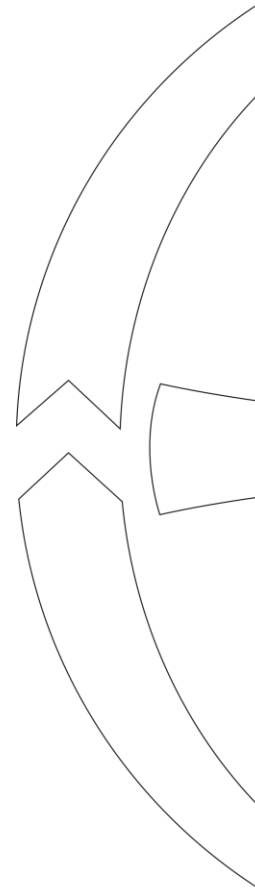
2 English summary

In the period from 2017 to 2019 BIOFOS A/S, DTU Kemiteknik and Unisense A/S, with the support from VUDP has completed the project: Demonstration of the new control method for reduction of laughing gas (N_2O) emission from wastewater treatment plants.

This project was based on a full-scale Danish WWTP (Avedøre WWTP operated by BIOFOS A/S) with plant design and control scheme commonly adopted by European WWTPs and aimed to obtain full-scale N_2O emission magnitude (with the use of Unisense's N_2O sensors) and characteristics for a better understanding of the control problem. The results of the analyses were used to assess the applicability of the Fuzzy Logic controller developed by the DTU research team.

Major achievements that has been completed in the project are as follows:

- A long-term (12-month) monitoring campaign of N_2O emission at Avedøre WWTP was successfully performed. Results showed that relatively low N_2O emission took place in seasons with a decreasing trend of water temperature, while relatively high N_2O emission occurred in seasons with an increasing trend of water temperature.
- The main component of the Fuzzy Logic controller, which is the aeration regulation to balance the AOB and NOB activities, has been tested. In other words, we have manually manipulated and tested the DO set-point at Avedøre WWTP, which is double in the STAR®. Results showed that the new control strategy over the aerobic phase could include introducing a decreased DO set-point in the control system, which would curb the N_2O production.
- Recurring cyclic patterns in high N_2O emission seasons and correlations between emissions and process parameters was analysed. We found three types of recurring cyclic patterns in seasons with relatively high N_2O emission occurring under different phases and in different conditions. However none of the studied process variables had a strong correlation with N_2O emission rate, which indicated that N_2O emission is a complex nonlinear phenomena affected by different key process variables and intercorrelations between them.



3 Introduktion

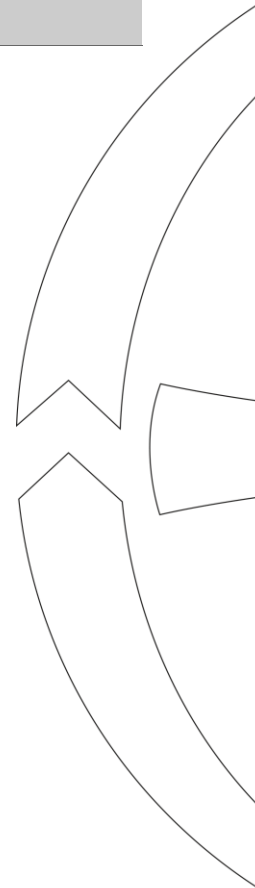
I perioden fra 2017 til 2019 har BIOFOS A/S, DTU Kemiteknik og Unisense A/S med midler fra VUDP gennemført projektet: Demonstration af en ny kontrol metode til at reducere lattergas udledningen fra renselanlæg.

Afrapporteringen af projektet indeholder to rapporter med en Hovedslutrapport (nærværende rapport) og en Teknisk Rapport (udarbejdet af DTU Kemiteknik)

Fordelingen af opgaver undervejs i projektet har været som angivet i Tabel 1.

Tabel 1. Opgavefordeling i løbet af projektet.

Partner Navn	Opgaver
BIOFOS A/S	<ul style="list-style-type: none">- Projektansøger- Indsamling af data og implementering af ny styring- Afrapportering af slutrapport
DTU Kemiteknik	<ul style="list-style-type: none">- Implementering og testing af Fuzzy Logic kontrol algoritme- Modellering og data analyser- Afrapportering af Teknisk Rapport
Unisense A/S	<ul style="list-style-type: none">- Produktion og kontrol af lattergas sensorer- Data analyser



4 Projektets betydning for vandbranchen

Indtil for nylig blev renseanlæggenes bidrag med lattergas (N_2O) til drivhusgasudledninger, beregnet ved at anvende IPCCs standard udledningsfaktorer. Disse data hviler på et spinkelt grundlag fra få udenlandske renseanlæg.

Nye sensorer fra bl.a. Unisense har vist, at udledning af lattergas fra renseanlæg kan variere voldsomt. Der findes renseanlæg, som næsten ikke udleder noget og der findes renseanlæg, hvor 90% af CO_2 fodaftrykket udgøres af lattergas. Det er vigtigt at vide, hvorfor der er denne forskel, og det giver muligheden for at drive anlægget på en måde, der minimerer udledningerne.

De danske forsyninger har også det som en vigtig målsætning at bidrage til en forbedret klima udvikling både mht. adaptation og forebyggelse. Mindre drivhusgasudledning er et vigtigt led i at forsinke (fjerne) den CO_2 forårsagede udvikling i klimaet.

Ydermere, vil danske renseanlæg i en nær fremtid blive forpligtet til at indberette deres CO_2 -fodaftryk, og vil skulle opgave det direkte bidrag fra N_2O -udledning. For at bidrage til teknologiske løsninger på dette vigtige område af GHG'er emissioner, har dette projekt demonstreret og afprøvet en nyudviklet Fuzzy Logic kontrol teknologi på fuldskala anlæg.

4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

I Danmark vil resultaterne fra projektet give forsyningsselskaberne et nyt værktøj, der kan hjælpe dem med at reducere direkte bidrag af N_2O -emissioner og dermed CO_2 fodaftryk for deres renseanlæg.

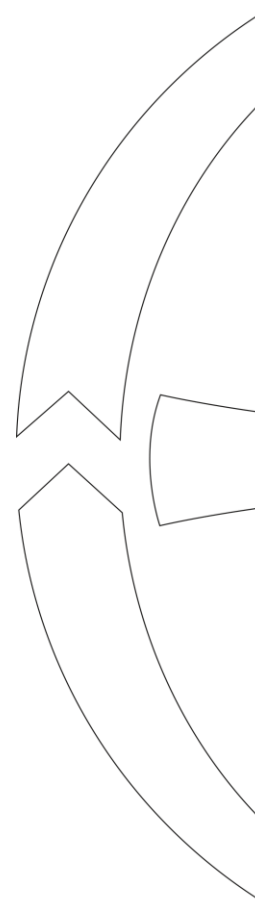
Den testede metode kræver minimal investering, fordi intelligent kontrol kan kobles på eksisterende beluftningssystemer.

I udlandet vil der opstå en potentiel eksportmulighed for danske rådgivning / ingeniørvirksomheder i to trin:

- en ny måde at sælge Unisense N_2O sensor til overvågning og kontrol og licensordninger
- rådgivning om brug af ny styringsteknik på renseanlæg med vanskelige N_2O -emissions problemer.

4.2 Næste skridt

Potentialet hos forsyningsvirksomheder for at minimere N_2O -emissioner er stor, og en rigtig processtyring og kontrol kan reducere det betydeligt. Mens resultaterne bekræftede den grundlæggende teori, at Fuzzy Logic kontrolleren (regulering af ilt-setpunktet) kan hjælpe med at reducere N_2O -emission i den aerobe fase, er den nuværende Fuzzy Logic kontroller



alene ikke tilstrækkelig til at adressere N₂O-bidraget fra den anoxiske fase på grund af denitrifikationsprocessen. I dette tilfælde er de andre N₂O-kontrolstrategier, der er foreslået i dette projekt, mere væsentlig.

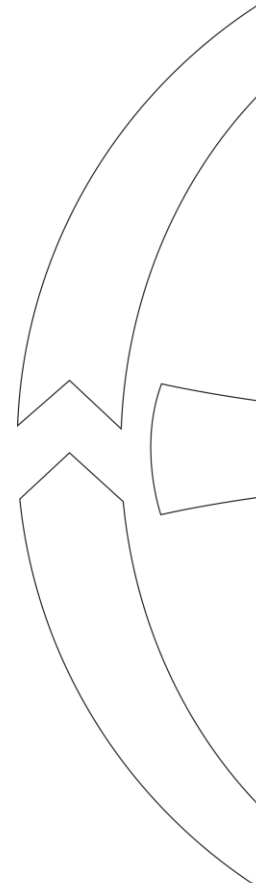
Ydermere vil online målingerne af lattergasproduktion og -emission over længere perioder hjælpe med forståelse af, hvordan og hvornår lattergas dannes (også på de andre renseanlæg).

En modificeret og optimeret Fuzzy Logic kontroller kunne i fremtiden muliggøre, at driftsoperatørerne optimerer styringen af processerne for at undgå de kritiske forhold som bidrager til dannelse af lattergas i vandfasen og leder til N₂O-emissioner.

4.3 Formidlingsplan

Projektets resultater er blevet formidlet som beskrevet i nedenstående skema.

Formidler	Titel	Udgivelsested	Dato for udgivelse
Artur Mielczarek (præsentation)	N ₂ O emissions at Avedøre WWTP	PING 2019	2019
Xueming Chen (præsentation)	Data-driven development and full-scale testing of N ₂ O control strategies	Watermatex 2019	2019
Artur Mielczarek (præsentation)	Lattergas emission på Renseanlæg Avedøre	DVK 2018	2018
BIOFOS (poster)	Demonstration af en ny kontrol metode til at reducere lattergas udledningen fra renseanlæg	DANVA Årsmøde	2017
Mikkel Holmen Andersen	Effect of nitrogen loading and control strategies on online N ₂ O emission and CO ₂ -eqv. accounting at full-scale	IWA World Water Congress & Exhibition Abstract indsendt	2020



5 Projektet

5.1 Formål

Formålet med projektet var at afprøve, demonstrere og validere en nyudviklet N₂O-emission kontrol teknologi (DTU patenteret teknologi) på fuldskala renseanlæg for at reducere N₂O-emissioner og dens bidrag til den samlede CO₂-foraftryk af renseanlæg.

Teknologien var udviklet ved hjælp af modelsimuleringer på DTU Kemiteknik med lovende resultater. Dette projekt kombinerede N₂O-sensorer fra Unisense og Fuzzy Logic kontrol teknologi DTU, som blev testet på fuldskala Renseanlæg Avedøre, som drives af BIOFOS.

5.2 Output

Projektet har følgende primære output:

- 1) Fuld skala test og godkendt N₂O styringsteknik.
- 2) Forbedret forståelse af N₂O kontrol parametre gennem en fuldskala afprøvning.
- 3) Bedre protokol og metode til at konfigurere og indstille N₂O controller til forskellige anlæg.

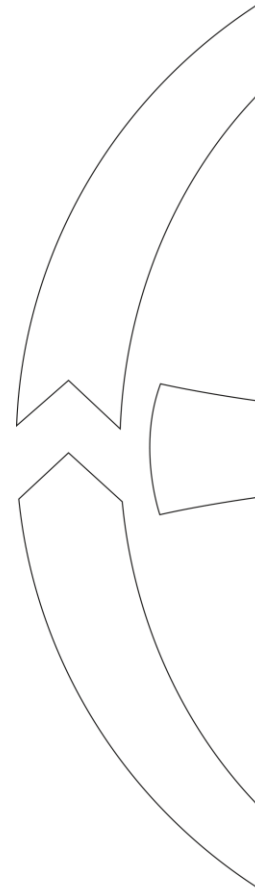
Konklusioner og strategier er beskrevet i detaljer i den Tekniske Rapport – "Quantification and Analyses of N₂O Emission and Testing of Relevant N₂O Control Technology at Avedøre WWTP".

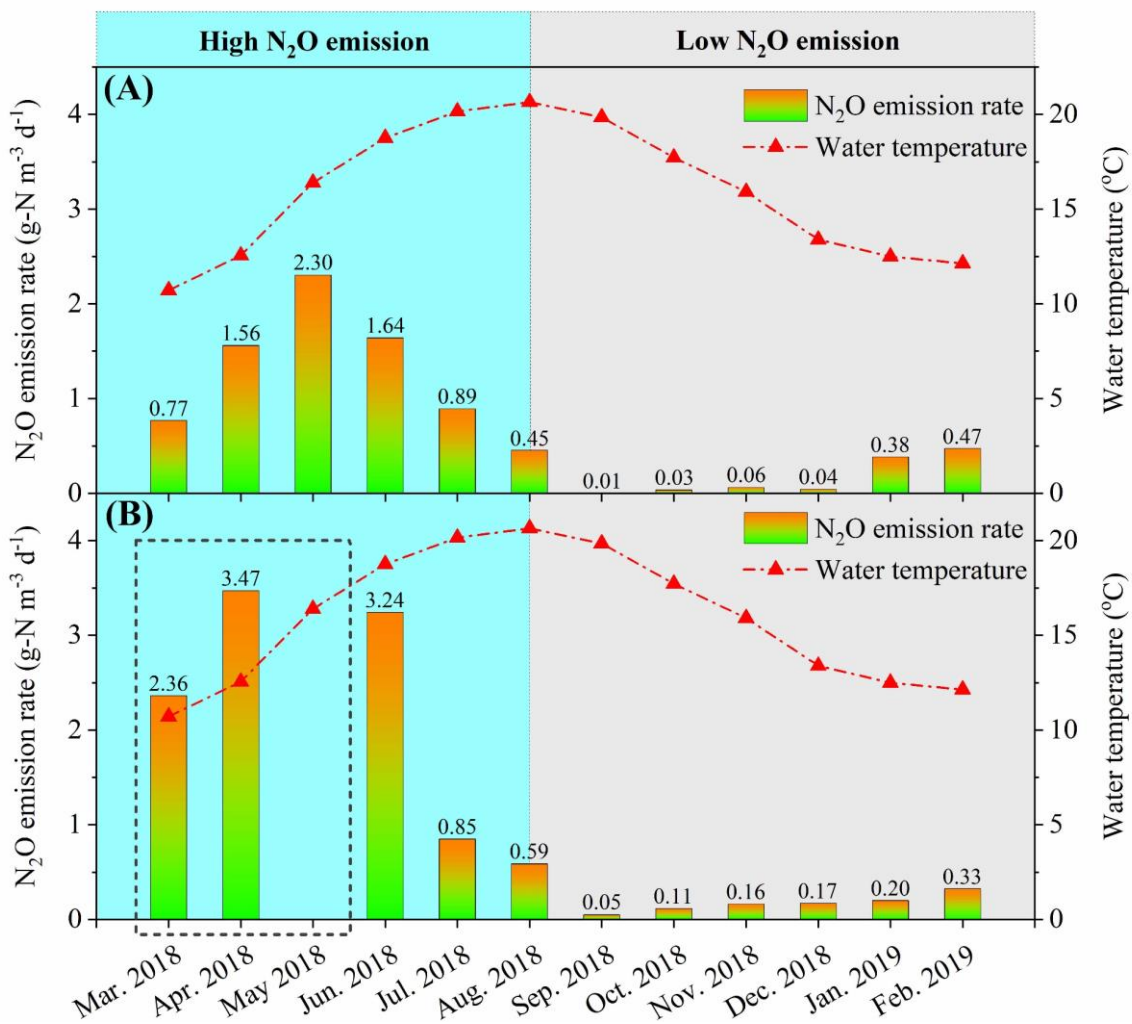
5.3 Projektresultater

Der henvises generelt til den del af Tekniske Rapport, som er angivet under Afsnit 3 med hensyn til mere detaljerede beskrivelse af projektresultaterne. Hovedresultaterne er opsummeret nedenfor.

- Sæsonbestemt lattergasemissioner på Renseanlæg Avedøre.

Overvågningsperioden kan opdeles i to delperioder: en med relativt høj N₂O-emission og delperiode med relativt lav N₂O-emission. Som angivet i Fig. 1 blev delperioden med relativt høj N₂O-emission karakteriseret ved en stigende vandtemperatur i luftningstanke (dvs. mellem marts 2018 og august 2018), mens delperioden med relativt lav N₂O-emission var under den faldende vandtemperaturen (dvs. fra august 2018 til februar 2019).

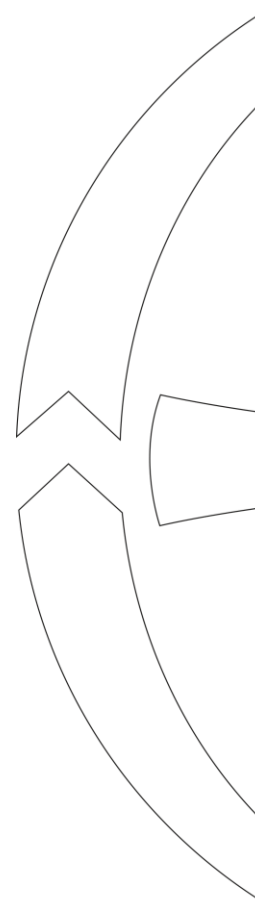


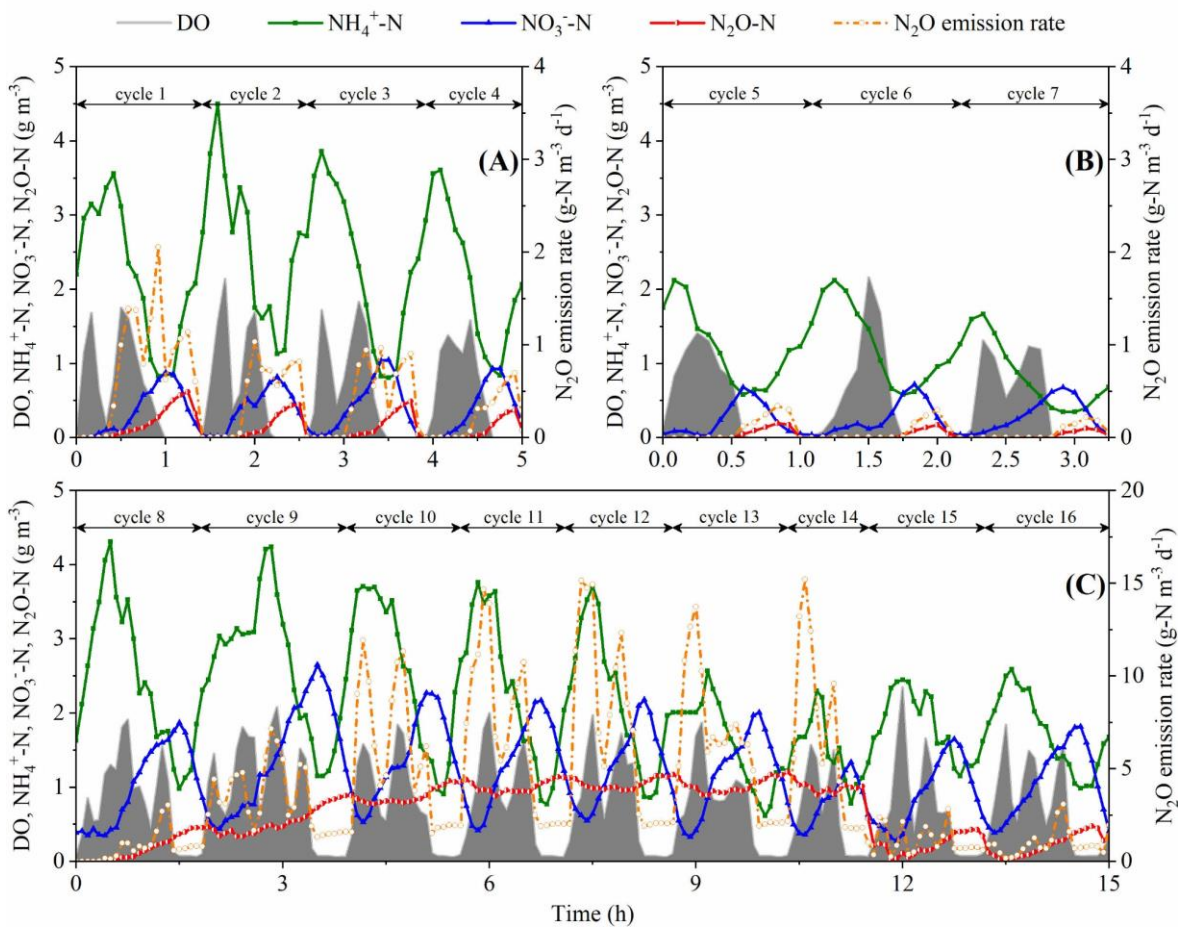


Figur 1. Sæsonbestemt lattergasemissioner på Renseanlæg Avedøre

- N₂O-emissionsegenskaber og korrelationer med procesvariable

Figur 2 gengiver tre typer af tilbagevendende cykliske mønstre i høje N₂O-emissionssæsoner, dvs. delperioder med relativt høj N₂O-emission. Her er en cyklus defineret til at bestå af en foregående aerob fase (beluftet) og en efterfølgende anoxisk/anaerob fase (ikke beluftet), reguleret af STAR Control®.





Figur 2. Tre cykliske mønstre i høje N₂O-emissionssæsoner

Figur 2A- N₂O-produktionen starter først når ilt niveauet er tilstrækkeligt og det ser ud til at produktionen af N₂O forekommer parallelt med NO₃ dannelse. N₂O dannelse kommer nok overvejende fra hydroxylamin-pathway i denne fase. "Lagfasen" der angiver forsinkelsen i dannelse af N₂O i forhold til NO₃ kan muligvis forklares ved heterotrofisk konsumtion

I begyndelsen af den anoxiske fase fortsætter produktionen af N₂O (heterotrof bidrag) og når NO₃ er opbrugt, starter N₂O at blive forbrugt.

Figur 2B- Lavt NH₄ niveau førte til lav N₂O produktionen. Lattergas var ikke detekteret under en aerob fase – bevis for heterotrof konsumtion af N₂O. Det indikerer en dobbelt rolle af de heterotrofe bakterier i N₂O omsætning

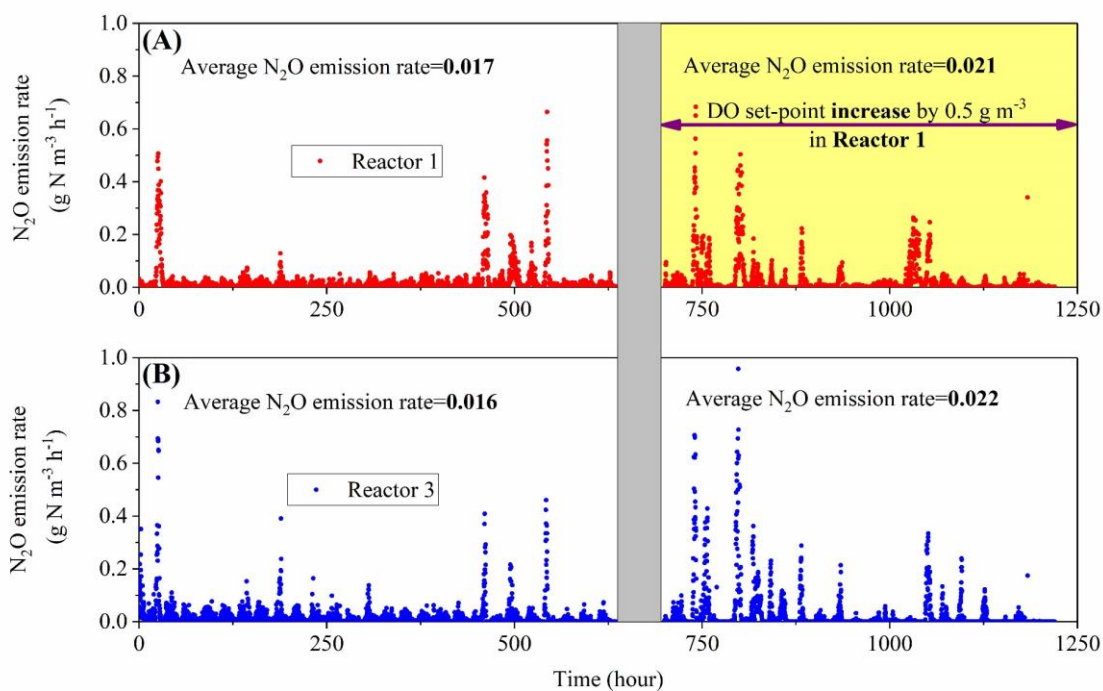
Figur 2C- N₂O produktionen sker under både aerobe og anoxiske faser. Der var dog ingen N₂O konsumtion i den anoxiske fase – ufuldstændig denitrifikation (Dette pga. højt niveau af NO₃ i slutningen af den anoxiske fase– utilstrækkelig længde af anoxiske fase). Akkumuleret N₂O var strippet med det samme i aerob fase – resulterende i høj lattergas emission.

Akkumuleret N₂O bliver overført til næste fase, så længe heterotrof konsumtion ikke er til stede.

- Ændring af ilt-sætpunkt og dens indvirkning på N₂O-emission ved Avedøre WWTP

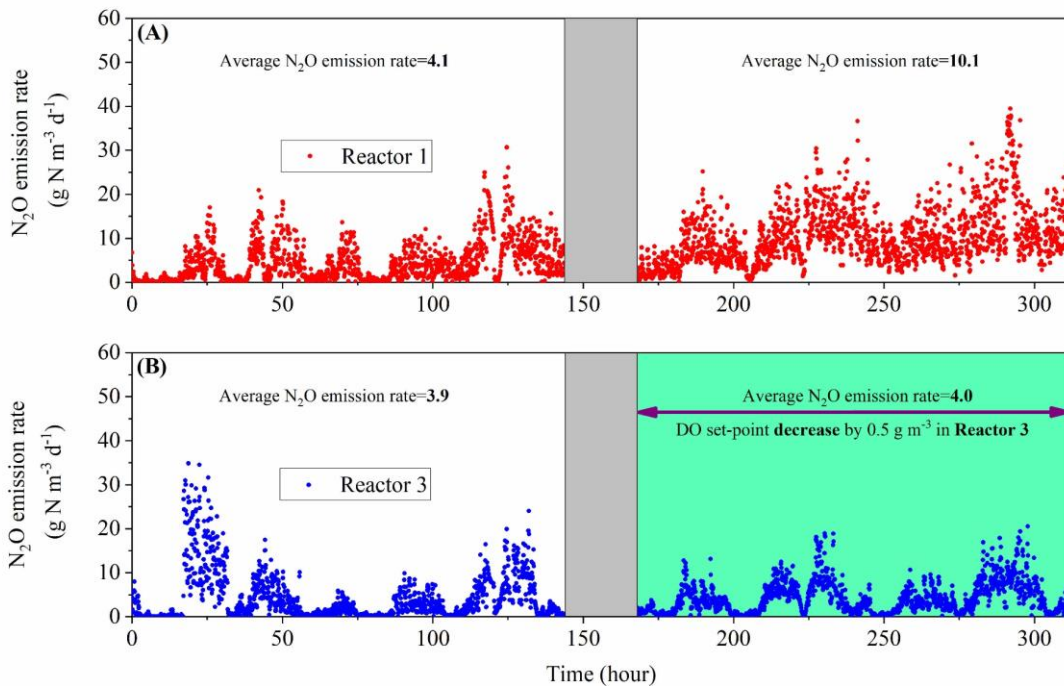
Ilt-sætpunkt i STAR® kontrolsystemet på Renseanlæg Avedøre blev manipuleret til at teste hovedkomponenten af Fuzzy Logic kontrolleren.

Figur 3 gengiver resultaterne fra forsøget med *øget* ilt-sætpunkt, hvor der ikke kunne identificeres en markant påvirkning af testen (dvs. lattergasemissionen var den samme i reference- og i test-tanken).



Figur 3. Ilt-sætpunkt test – en øgning på 0,5 mg/L i tank 1 (Rød)

Figur 4 gengiver resultaterne fra forsøget med *formindsket* ilt-sætpunkt. I dette forsøg har vi observeret 60% lavere lattergasemission i testen sammenlignet med referencetanken.



Figur 4. Iltsetpunkt test - en sænkning på 0,5 mg/L i tank 3 (Blå)

5.4 Konklusion

- En over 12 måneders overvågningskampagne for N₂O-emissioner på Renseanlæg Avedøre er gennemført med succes. Resultaterne viser, at forholdsvis lav N₂O-emission fandt sted i sæsoner med en faldende tendens af vandtemperaturen, mens relativt høj N₂O-emission forekom i sæsoner med en stigende vandtemperatur.
- Aerob fase bidrager til N₂O-produktion/-emission via hydroxylamin produktion af ammonium oxiderende bakterier (AOB), mens heterotrof denitrifikation havde en dobbeltrolle i den anoxiske fase og kunne være ansvarlig for både netto N₂O-produktion og -forbrug.
- Man kan bruge høje NH₄ niveauer og NO₃ "slut"-niveauer i den foregående aerob fase som indikatorer. Den potentielle kontrol over den anoxiske fase omfatter forlængelse af de anoxiske faser eller tilsætning af ekstern kulstof kilde som et middel til at regulere akkumulering af N₂O i den anoxiske fase.
- Kontrol over den aerobe fase kan omfatte indføring et reduceret ilt-setpunkt i styresystemet, hvilket i testen er påvist at reducere N₂O emissionen.
- Bidraget af denitrifikationsprocessen i den anoxiske fase til N₂O-emissionen blev også observeret. Dette viser, at den anvendte Fuzzy Logic kontroller ikke alene kan være tilstrækkelig til at reducere N₂O-emission fra renseanlæg med anlægskonfiguration og styring som på Renseanlæg Avedøre. Det er nødvendigt at udvide / modificere Fuzzy Logic kontroller til også at omfatte denitrifikationsprocessen.

6 Litteraturliste

IPCC Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change; IPCC, Geneva, Switzerland, 2014; p 151.

Hanaki, K.; Hong, Z.; Matsuo, T. Production of Nitrous Oxide Gas during Denitrification of Wastewater. *Water Sci. Technol.* **1992**, 26, (5-6), 1027-1036.

Czepiel, P.; Crill, P.; Harriss, R. Nitrous Oxide Emissions from Municipal Wastewater Treatment. *Environ. Sci. Technol.* **1995**, 29, (9), 2352-2356.

Aboobakar, A.; Cartmell, E.; Stephenson, T.; Jones, M.; Vale, P.; Dotro, G. Nitrous oxide emissions and dissolved oxygen profiling in a full-scale nitrifying activated sludge treatment plant. *Water Res.* **2013**, 47, (2), 524-534.

Ahn, J. H.; Kim, S.; Park, H.; Rahm, B.; Pagilla, K.; Chandran, K. N₂O Emissions from Activated Sludge Processes, 2008–2009: Results of a National Monitoring Survey in the United States. *Environmental Science & Technology* **2010**, 44, (12), 4505-4511.

Yoshida, H.; Mønster, J.; Scheutz, C. Plant-integrated measurement of greenhouse gas emissions from a municipal wastewater treatment plant. *Water Research* **2014**, 61, 108-118.

Daelman, M. R. J.; van Voorthuizen, E. M.; van Dongen, U. G. J. M.; Volcke, E. I. P.; van Loosdrecht, M. C. M. Seasonal and diurnal variability of N₂O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Science of The Total Environment* **2015**, 536, 1-11.

Boiocchi, R.; Gernaey, K. V.; Sin, G. A novel fuzzy-logic control strategy minimizing N₂O emissions. *Water Res.* **2017**, 123, 479-494.

Schulthess, R. V.; Gujer, W. Release of nitrous oxide (N₂O) from denitrifying activated sludge: Verification and application of a mathematical model. *Water Res.* **1996**, 30, (3), 521-530.

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

Marques, R.; Rodriguez-Caballero, A.; Oehmen, A.; Pijuan, M. Assessment of online monitoring strategies for measuring N₂O emissions from full-scale wastewater treatment systems. *Water Research* **2016**, 99, 171-179.

Peng, L.; Ni, B.-J.; Ye, L.; Yuan, Z. The combined effect of dissolved oxygen and nitrite on N₂O production by ammonia oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge. *Water Res.* **2015**, 73, (0), 29-36.

Kampschreur, M. J.; Tan, N. C. G.; Kleerebezem, R.; Picioreanu, C.; Jetten, M. S. M.; Loosdrecht, M. C. M. Effect of dynamic process conditions on nitrogen oxides emission from a nitrifying culture. *Environ. Sci. Technol.* **2008**, 42, (2), 429-435.

Peng, L.; Ni, B.-J.; Eler, D.; Ye, L.; Yuan, Z. The effect of dissolved oxygen on N₂O production by ammonia-oxidizing bacteria in an enriched nitrifying sludge. *Water Res.* **2014**, (0).

Wunderlin, P.; Mohn, J.; Joss, A.; Emmenegger, L.; Siegrist, H. Mechanisms of N₂O production in biological wastewater treatment under nitrifying and denitrifying conditions. *Water Res.* **2012**, *46*, (4), 1027-1037.

Rassamee, V.; Sattayatewa, C.; Pagilla, K.; Chandran, K. Effect of Oxidic and Anoxic Conditions on Nitrous Oxide Emissions from Nitrification and Denitrification Processes. *Biotechnol. Bioeng.* **2011**, *108*, (9), 2036-2045.

Chandran, K.; Stein, L. Y.; Klotz, M. G.; van Loosdrecht, M. C. M. Nitrous oxide production by lithotrophic ammonia-oxidizing bacteria and implications for engineered nitrogen-removal systems. *Biochem. Soc. Trans.* **2011**, *39*, 1832-1837.

Chen, X.; Yuan, Z.; Ni, B.-J. Nitrite accumulation inside sludge flocs significantly influencing nitrous oxide production by ammonium-oxidizing bacteria. *Water Res.* **2018**, *143*, 99-108.

Chen, X.; Ni, B.-J.; Sin, G. Nitrous Oxide Production in Autotrophic Nitrogen Removal Granular Sludge: A Modeling Study. *Biotechnol. Bioeng.* **2019**, *0*, (ja).

Pan, Y. T.; Ni, B. J.; Bond, P. L.; Ye, L.; Yuan, Z. G. Electron competition among nitrogen oxides reduction during methanol-utilizing denitrification in wastewater treatment. *Water Res.* **2013**, *47*, (10), 3273-3281.

Ni, B. J.; Yuan, Z. G. Recent advances in mathematical modeling of nitrous oxides emissions from wastewater treatment processes. *Water Res.* **2015**, *87*, 336-346.

Schalk-Otte, S.; Seviour, R. J.; Kuenen, J. G.; Jetten, M. S. M. Nitrous oxide (N₂O) production by *Alcaligenes faecalis* during feast and famine regimes. *Water Res.* **2000**, *34*, (7), 2080-2088.

Massara, T. M.; Malamis, S.; Guisasola, A.; Baeza, J. A.; Noutsopoulos, C.; Katsou, E. A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Sci. Total Environ.* **2017**, *596*, 106-123.

Yang, Q.; Liu, X.; Peng, C.; Wang, S.; Sun, H.; Peng, Y. N₂O Production during Nitrogen Removal via Nitrite from Domestic Wastewater: Main Sources and Control Method. *Environ. Sci. Technol.* **2009**, *43*, (24), 9400-9406.

Vasilaki, V.; Volcke, E. I. P.; Nandi, A. K.; van Loosdrecht, M. C. M.; Katsou, E. Relating N₂O emissions during biological nitrogen removal with operating conditions using multivariate statistical techniques. *Water Research* **2018**, *140*, 387-402.

Wunderlin, P.; Lehmann, M. F.; Siegrist, H.; Tuzson, B.; Joss, A.; Emmenegger, L.; Mohn, J. Isotope Signatures of N₂O in a Mixed Microbial Population System: Constraints on N₂O Producing Pathways in Wastewater Treatment. *Environ. Sci. Technol.* **2013**, *47*, (3), 1339-1348.

