



Miljøministeriet
Miljøstyrelsen

Biokinetisk lattergasreduktion i renseanlæg BIOKIN VTU-restmidler

MUDP Rapport

August 2024

Udgiver: Miljøstyrelsen

Redaktion:

Mikkel Algren Stockholm-Bjerregaard (Krüger A/S)

Lise Højgaard Price (Krüger A/S)

Anne Holm Jensen (Aalborg Kloak A/S)

Laura Kamstrup (Lemvig Vand A/S)

Artur Tomasz Mielczarek (BIOFOS A/S)

ISBN: 978-87-7038-632-6

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

English summary	4
1. Forord	5
2. Indledning	6
3. Resultater	8
3.1 Arbejdspakke 1: Kinetics	8
3.2 Arbejdspakke 2: N ₂ O Warning	11
3.3 Arbejdspakke 3: N ₂ O Control	12
3.4 Arbejdspakke 4: Projektledelse	14
4. Referenceliste	15
Bilag 1. Beskrivelse af de deltagende renseanlæg	17
Bilag 1.1 Aalborg Renseanlæg Øst	17
Bilag 1.2 Harbøre Renseanlæg	18
Bilag 1.3 Avedøre Renseanlæg	19
Bilag 2. Teoretisk baggrund	21
Bilag 2.1 Kvælstofkredsløbet i spildevandsrensning	21
Bilag 2.2 Nitrifikation	21
Bilag 2.3 Denitrifikation	22
Bilag 2.4 N ₂ O pathway	22
Bilag 2.5 Biotenitro-proces	23
Bilag 2.6 Sammenhæng mellem driftsbetingelser og N ₂ O-produktion	23
Bilag 2.7 Sæsonvariation	24
Bilag 2.8 Nitrit	24
Bilag 2.9 COD/N	24
Bilag 2.10 Hurtigt skiftende procesbetingelser	24
Bilag 2.11 Ilt	24
Bilag 2.12 Den specifikke ammoniakoxideringshastighed	25
Bilag 2.13 Mikrobielt samfund	25
Bilag 2.14 Strategier til reduktion af N ₂ O	26

English summary

BIOKIN demonstrates, that the use of DNA abundance data offers a new direct way to reduce the nitrous oxide production from biological nitrogen removal. By controlling the aeration and optimizing the specific ammonium removal rate the nitrous oxide production can be reduced.

BIOKIN has established an effective supply chain for the visualization of fast DNA analysis data, calculation of N₂O emission and operational integration with relevant real time data. A feature has been developed in Hubgrade that calculates kinetic rates of the nitrogen removal in real-time and the kinetic rates has been correlated to the N₂O production. It was shown that the DNA corrected kinetic rates showed a positive correlation to N₂O production and that the kinetic rates and hence the N₂O production could be reduced by controlling the aeration intensity of the system.

BIOKIN has delivered several concrete outputs:

- N₂O liquid sensors from Unisense Environment have been installed at Harboøre wastewater treatment plant (WWTP) and existing sensor heads at Aalborg East and Avedøre WWTPs replaced.
- Harboøre and Avedøre WWTPs was connected to Hubgrade through an OPC bridge.
- All three plants were upgraded with new N₂O emission calculation features in Hubgrade.
- A new dynamic feature was developed in Hubgrade ("DNA Fantastic") to import, visualize, and operationalize data from DNA sequencing (in a 3. party laboratory) of the microbial community in the activated sludge from the three WWTPs.
- A new feature was developed in Hubgrade to calculate dynamic kinetic rates in real-time at the three WWTPs.
- 6 months of regular DNA sequencing has been performed with a turn-around time down to one week.
- 6 full-scale "batch" experiments have been performed at Avedøre and Aalborg East combined.

1. Forord

BIOKIN projektet er støttet af VTU-restmidler administreret af Miljøteknologisk Udviklings- og Demonstrationsprogram (MUDP) under Miljøministeriet. Krüger A/S har været hovedansøger og projektleder.

Projektet har været et samarbejde mellem Krüger, BIOFOS, Aalborg Forsyning og Lemvig Vand. Projektet har kun kunnet lade sig gennemføre i kraft af et stærkt og tillidsfuld samarbejde mellem parterne.

Projektet har også fungeret som specialeprojekt for Lise Højgaard Price fra DTU som nu er ansat som procesingeniør i Krüger. Der skal lyde en særlig tak til Borja V. Pérez for hans faglige input og vejledning af Lise.

Tak til DNASense Aps for et strålende samarbejde og lynhurtig sekventering.

2. Indledning

Lattergas (N_2O) emission fra spildevandsrensning udgør ca. 48 % af renseanlæggenes samlede klimagasudledning (Miljøstyrelsen, 2020) og det er nødvendigt at reducere denne mængde betragteligt for at indfri sektorens ambition om at blive klimaneutral i 2030 (Folketinget, 2020). Lattergasproduktionen sker, under bestemte betingelser, som en naturlig del af den biologiske kvælstoffjernelse. Det har imidlertid vist sig svært at forudse, hvilke betingelser og omstændigheder der giver, eller nærmere ikke giver anledning til lattergasproduktion. Det er netop styring og kontrol af de betingelser, der har det største potentiale til at forhindre lattergasemissionen.

Lattergasproduktionen i renseanlæg sker i særdeleshed i forbindelse med den iltede omsætning af ammonium. Omsætningshastigheden af ammonium i renseanlæg påvirker lattergasproduktionen, men denne relation er ikke specifik nok til at fungere som input til direkte kontrolmetoder (Duan et al., 2021). Det skyldes at det er den enkelte bakteries specifikke aktivitet, der afgør om der produceres lattergas, hvorfor det ikke er tilstrækkeligt kun at fokusere på den samlede omsætningshastighed.

Kontrol af den specifikke ammoniumomsætning kan potentielt helt forhindre aerob lattergasproduktion. Udfordringen er at gøre det dynamisk og i realtid.

Gennem det nyligt afsluttede "Online DNA" projekt (støttet af Innovationsfonden med deltagelse af bl.a. Krüger, BIOFOS og Aalborg Forsyning) er det lykkedes at koble online driftsdata med hurtige DNA-målinger og derigennem at bestemme og forudse denne specifikke omsætningshastighed. Det er netop foreningen af DNA-målinger med online driftsdata, der har gjort dette muligt. Bestemmelsen af de dynamiske specifikke omsætningshastigheder i realtid udgør netop den løftestang der, gennem styring, kan realisere det store uindfriede potentiale for reduceret lattergasproduktion.

Formålet med indeværende projekt er at dokumentere sammenhængen mellem den dynamiske specifikke omsætningshastighed af ammonium og den målte lattergasproduktion.

Helt centralt i projektet ligger den synergi og ekstra værdiskabelse der kommer af, i praksis at forene DNA-målinger og online sensordata i aktiv styring. Featuren "DNA Fantastic", en del af platformen Hubgrade Performance Plant™, er netop forberedt til holistisk at kunne forene bioinformatik fra DNA-analyser (udbredelse af specifikke bakterietyper) med online sensordata og anvende disse i aktiv styring. Det er netop foreningen af online driftsdata og DNA-målingerne der gør det muligt at beregne de dynamiske specifikke omsætningshastigheder i realtid.

Fordi DNA-analyser først for nyligt blev hurtige (og billige) nok til at anvende i praksis i aktiv styring, har det ikke tidligere været teknisk muligt at beregne de specifikke omsætningshastigheder dynamisk og derfor heller ikke at koble denne til målinger af N_2O i realtid.

Den brik der mangler, er at dokumentere korrelationen mellem specifik omsætningshastighed af ammonium og N_2O -produktion. De resterende led fra måling til kontrol bygger på velafprøvede teknologier – men foreningen af dem er ny.

Projektets mål og konkrete bidrag som oplyst i ansøgningen er vist i FIGUR 1.

Formål - Projektets mål og konkrete bidrag	Succeskriterier –	Resultater og leverancer	Arbejdspakker, Aktiviteter, milepæle
"Kinetics" Udvikling og test af feature der dynamisk kan beregne den specifikke omsætningshastighed af ammonium.	De beregnede dynamiske specifikke omsætningshastigheder er stabile og beskriver den totale observerede ammonium omsætning tilfredsstillende.	De beregnede dynamiske specifikke omsætningshastigheder præsenteres online i DNA Fantastic.	(AP1) Kinetics (M1.1) Etablering af supply-chain for DNA analyse, N ₂ O data og driftsdata. (M1.2) Standardisering og indbygning af "kinetics" i DNA Fantastic feature (M1.3) Data til beregning af nøgletal for N ₂ O emissionen indsamles
"N₂O warning" Udvikling og test af feature der kobler "Kinetics" med N ₂ O produktionen og beregner en grænseværdi der advarer om N ₂ O-risiko.	Der genereres en grænseværdi for den specifikke omsætningshastighed der kan bruges som input i styring og kontrol af N ₂ O.	Den beregnede grænseværdi der forhindrer N ₂ O produktion præsenteres online i DNA Fantastic.	(AP2) N₂O warning (M2.1) Kinetics beregninger korrigeres med N ₂ O data og grænseværdier beregnes. (M2.2) Standardisering og indbygning af "N ₂ O warning" i DNA Fantastic feature.
"N₂O control" Test af styringsstrategier der aktivt holder omsætningshastigheden under grænseværdien fra "N ₂ O warning"	Aktiv styring kan kontrollere og begrænse den specifikke omsætningshastighed og dermed modvirke N ₂ O produktion.	Forskellige styrings-strategier afprøves i praksis og virkningsgraden dokumenteres.	(AP3) N₂O control (M3.1) Det demonstreres at styring kan begrænse den specifikke omsætningshastighed. (M3.2) Styringens virkningsgrad evalueres. (M3.3) Nøgletal indberettes.
Projektledelse	Milepæle realiseres i henhold til tidsplan	Effektiv videndeling og formidling	(AP4) Projektledelse (M.4.1) Afholdelse af workshop (M.4.2) Afholdelse af webinar om projektets resultater (M.4.3) Udgivelse af artikel i fagrelevant tidsskrift

FIGUR 1. Skematisk oversigt over projektet som angivet i ansøgningen.

3. Resultater

I det følgende præsenteres resultater fra tre fuldskala renseanlæg, der demonstrerer, at den specifikke omsætningshastighed af ammonium kan anvendes til dynamisk reduktion af lattergasproduktion fra renseanlæg. Desuden at nøglen til at reducere lattergasproduktionen er knyttet til en optimeret blæserstyring.

I løbet af projektet er der realiseret en del konkrete resultater:

- Der er installeret N_2O -sensorer på Harboøre renseanlæg og renoveret eksisterende på Aalborg Øst og Avedøre renseanlæg.
- Der er installeret kommunikation mellem Avedøre og Harboøre renseanlæg og Hubgrade Performance Plant™, i cloud via OPC Bridge.
- Der er opsat en feature i Hubgrade til N_2O -emissionsberegninger i realtid på alle tre anlæg.
- Der er udviklet og idriftsat en automatiseret feature ("DNA Fantastic") i Hubgrade til import, visualisering og operationalisering af data fra DNA-laboratorieanalyse af det mikrobiologiske samfund i det aktive slam fra de tre renseanlæg.
- Der er udviklet og idriftsat en ny feature i Hubgrade til dynamisk beregning af kinetik (biologiske omsætningshastigheder) på de tre anlæg.
- Der er gennemført 6 måneders regelmæssig DNA-sekventering af slam med ned til 1 uges turn-around tid på alle tre renseanlæg.
- Der er gennemført 6 fuldskala batch-forsøg på hhv. Avedøre og Aalborg Øst renseanlæg.

Derudover har det været muligt at drage en række delkonklusioner som sammen bidrager til det proof-of-concept som projektet leverer:

- Det er afgørende at kende mængden af nitrificerende bakterier (AOB).
- DNA-målinger kan bruges som erstatning for en "rigtig" biomasse måling.
- Der er et sammenfald mellem ammoniumomsætningshastigheden per AOB og N_2O -produktionen per AOB.
- N_2O -reduktion kræver tilstrækkelig AOB-biomasse og balanceret omsætningshastighed.
- Man kan påvirke omsætningshastigheden og N_2O -produktionen via blæserstyring.

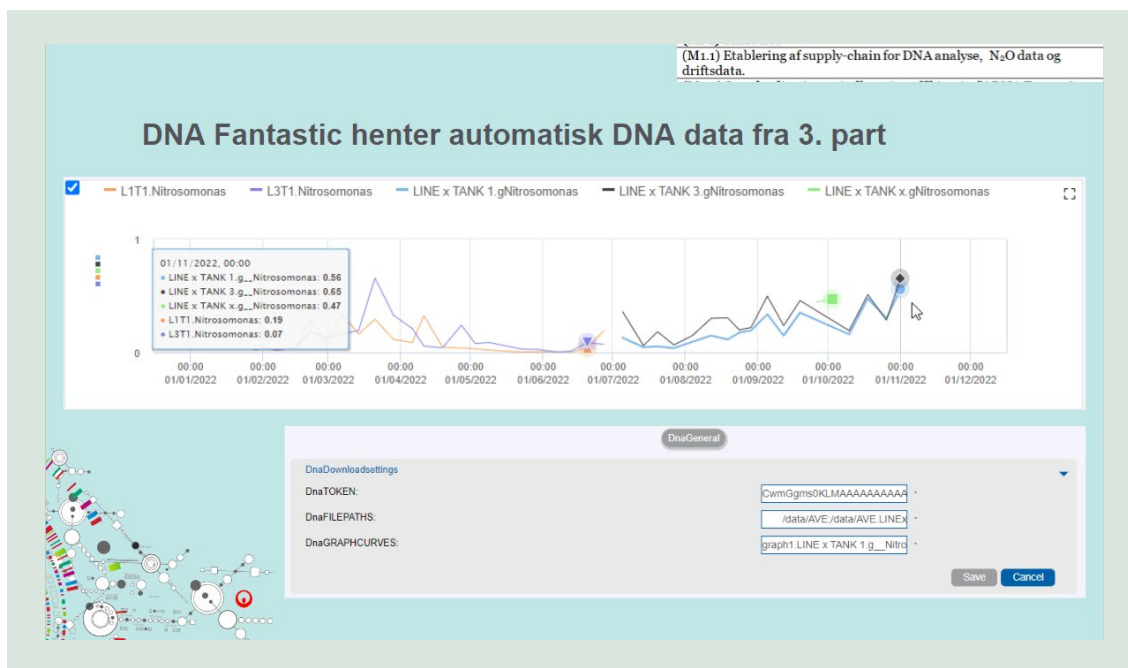
3.1 Arbejdspakke 1: Kinetics

Udvikling og evaluering af en digital feature, der dynamisk kan beregne nitrifikanternes specifikke omsætningshastighed baseret på almindelige driftsdata og regelmæssig DNA-analyse.

Leverancer i denne arbejdsopgave:

(M1.1) Etablering af supply-chain for DNA-analyse, N_2O data og driftsdata.

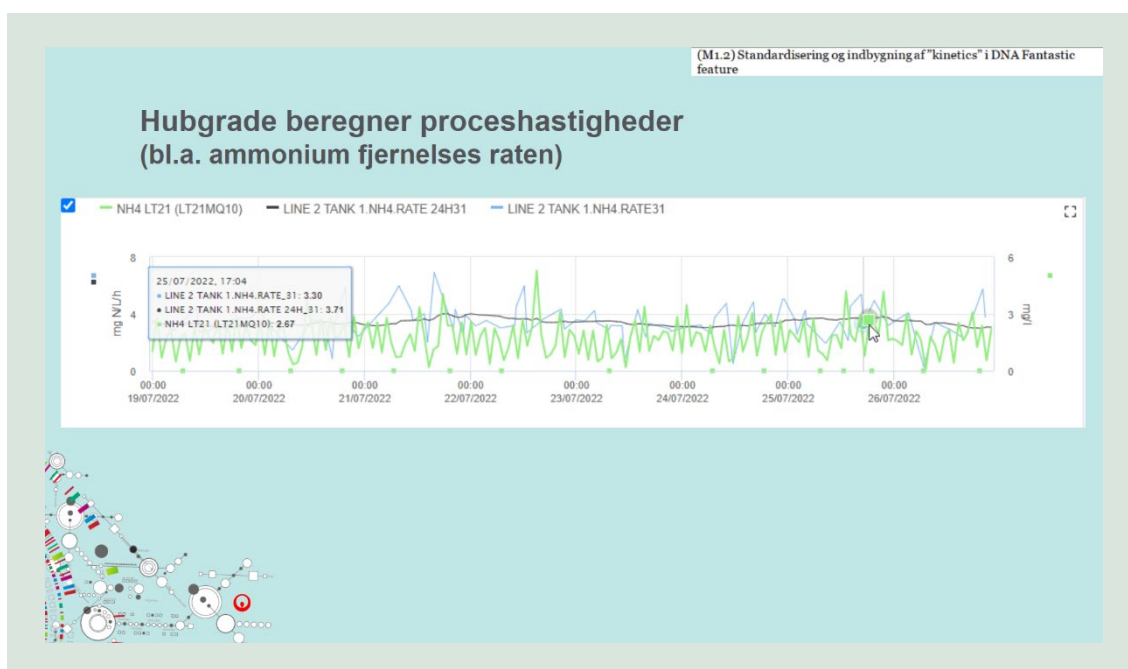
Der blev i projektet etableret en supply-chain der effektivt kunne realisere en turn-around tid fra prøveudtagning, forsendelse, DNA-ekstraktion og sekventering til operationalisering og visualisering i Hubgrade Performance Plant™, inden for 5 arbejdsdage. Dette var en forudsætning for effektivt at kunne inddrage DNA-data i beregningen af omsætningshastigheder i en relevant tidsopløsning. Se FIGUR 2.



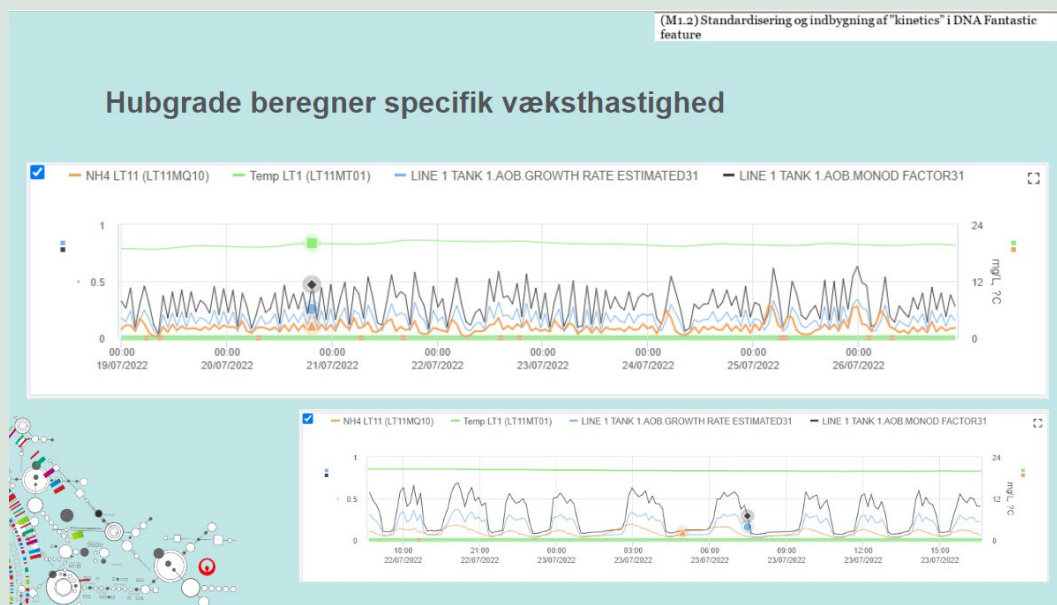
FIGUR 2. Eksempel på visualisering af DNA-data fra Avedøre renseanlæg i Hubgrade Performance Plant™.

(M1.2) Standardisering og indbygning af "kinetics" i DNA Fantastic feature

Beregningen af omsætningshastigheder og specifikke vækstrater skulle programmeres og standardiseres i Hubgrade Performance Plant™, så de kunne udføres på alle de deltagende 3 renseanlæg i realtid. Se FIGUR 3 og FIGUR 4.



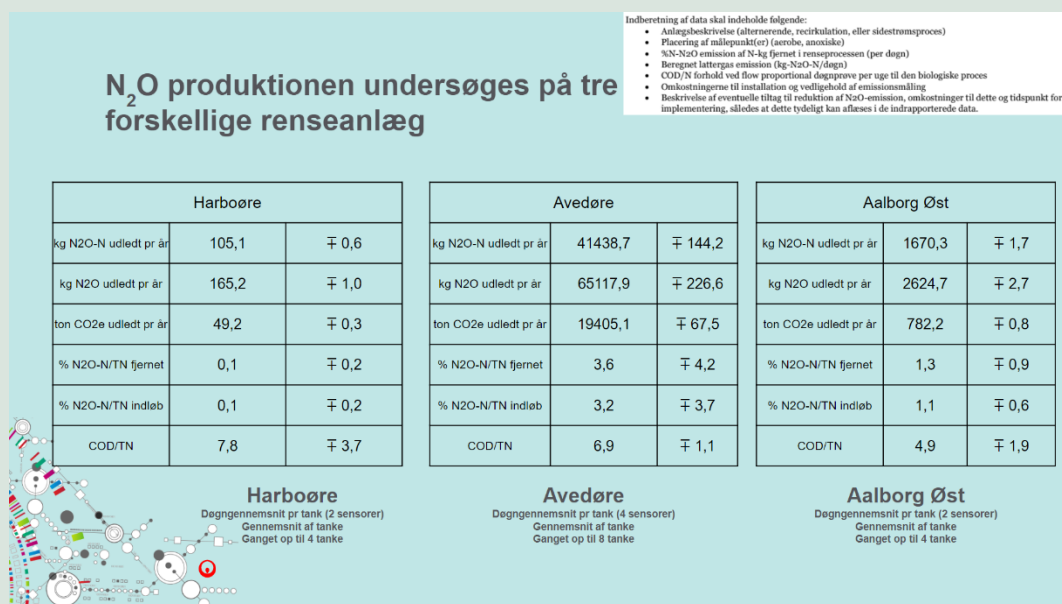
FIGUR 3. Eksempel på visualisering af omsætningshastigheder af ammonium fra Avedøre renseanlæg i Hubgrade Performance Plant™.



FIGUR 4. Eksempel på visualisering af specifikke væksthastigheder for nitrifikanter fra Avedøre rensaanlæg i Hubgrade Performance Plant™. Den nederste kurve er et mindre udsnit af den øverste.

(M1.3) Dataindsamling til beregning af nøgletal for lattergasemissionen.

Den nødvendige data indsamles således, at der opbygges den nødvendige dokumentation for en fyldestgørende evaluering af projektets udbytter. Derudover, at der kan beregnes nøgletal for lattergasemissionen til indberetning til Miljøstyrelsen. Se FIGUR 5.



FIGUR 5. Beregnede nøgletal for de tre deltagende rensaanlæg for perioden fra januar til og med august 2022 (Harbøre) og perioden januar til og med december 2022 (Aalborg øst og Avedøre). Alle tre anlæg er alternerende aktiv slam anlæg, med målepunkter for lattergas i procestankene.

3.2 Arbejdspakke 2: N₂O Warning

Udvikling og demonstration af feature der kobler "Kinetics" med N₂O-produktionen og beregner en grænseværdi der advarer om N₂O risiko.

Leverancer i denne arbejdsmappe:

(M2.1) Kinetics beregninger korreleres med N₂O-data og grænseværdier beregnes.

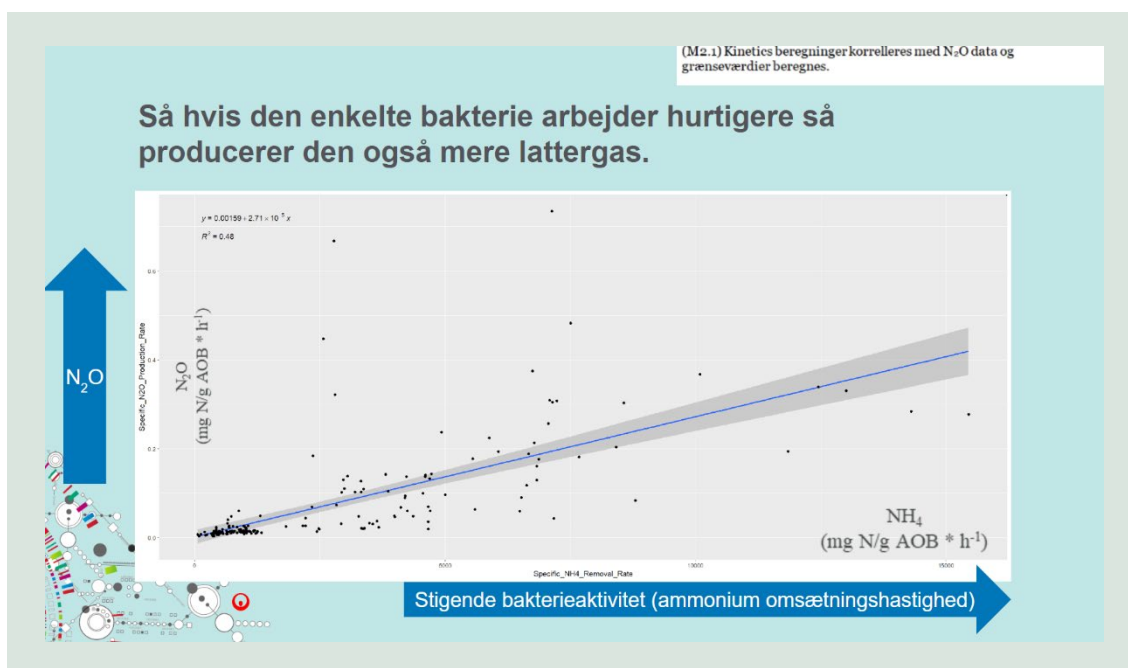
For at kunne levere denne ydelse skal der udføres en målekampagne som leverer det tilstrækkelige datagrundlag med DNA-målinger, beregnede specifikke omsætningshastigheder og sideløbende N₂O-målinger. På baggrund af disse data fastlægges en grænseværdi for den specifikke omsætningshastighed der forhindrer N₂O-produktion.

Ved at beregne den estimerede specifikke væksthastighed ud fra temperatur, ammonium koncentration og iltmætning i realtid kunne denne sammen med udbyttefaktoren og den mikrobiologiske sammensætning bruges til at estimere den aktuelle ammonium-omsætningshastighed. Beregningerne udføres via Monod's ligninger som beskrevet i von Sperling (2007). Denne estimerede værdi beregnes i realtid og vil også kunne bruges til at fremskrive en forventning til omsætningshastigheden ved en given planlagt iltmætning. Dette vil gøre proaktiv og præventiv styring mulig.

Det viste sig dog desværre, at der i praksis var dårlig overensstemmelse mellem ilt-sætpunkt, blæserydelse og ilt-mætning (målt med sensor). I praksis var iltmålingerne i både Aalborg Øst og Avedøre (der var meget begrænset N₂O-produktion i Harboøre, som derfor ikke er nævnt) underestimerede. Med dette menes, at både Aalborg Øst og Avedøre som regel har et målt opløst ilt (DO) som ligger under sætpunktet og som ofte er tilnærmelsesvist nul – specielt under høj belastning eller i begyndelsen af en beluftningsperiode. Det skyldes, at den luft der tilføres processen via bundbeluftning i praksis er brugt op inden spildevandet når iltsensoren i toppen af væskefasen.

Det har den konsekvens, at den beregnede værdi for omsætningshastigheden af ammonium ikke er korrekt fordi den estimeres til tilnærmelsesvist nul fordi DO måles til nul – på trods af, at der tilføres store mængder luft og omsætningen af ammonium kan observeres med ammoniumsensoren. Der er brug for at videreudvikle styringen til at agere på baggrund af tilsat ilt frem for målt ilt. Dette princip fortsættes i VUDP projektet "N₂O Kontrol".

For at dokumentere sammenhængen mellem den specifikke omsætningshastighed af ammonium og den specifikke produktionshastighed af lattergas anvendes derfor den observerede (frem for den estimerede) ammoniumomsætningshastighed. Se FIGUR 6.



FIGUR 6. Viser sammenhængen mellem den specifikke ammoniumomsætnings-hastighed og den specifikke lattergasproduktions-hastighed, begge som døgn-gennemsnit, for Avedøre rensesanlæg.

(M2.2) Standardisering og indbygning af "N2O warning" i DNA Fantastic feature.

For at kunne levere denne ydelse skal beregningen af grænseværdien importeres til det standardiserede miljø i Hubgrade Performance Plant™.

Styringen i Hubgrade er forberedt til at kunne indbygge en grænseværdi baseret på den specifikke ammoniumomsætnings-hastighed således, at den korrelerede lattergasproduktion kan reduceres. Det har i praksis ikke været muligt at advare mod lattergasproduktion med udgangspunkt i den estimerede ammoniumomsætnings-hastighed, pga. de beskrevne udfordringer med misvisende lave iltmålinger.

Den dokumenterede korrelation mellem den specifikke lattergasproduktion og den målte specifikke ammoniumomsætnings-hastighed bygger på en lineær regression af nylige koncentrations-målinger, som i sin natur er bagud skuende – altså baseret på en historisk dataserie (om end kun 2-12 min gamle). Det gør den målte specifikke ammonium-omsætnings-hastighed dårligt egnet til varsling og direkte input til kontrol.

Der mangler en kobling mellem den tilførte mængde luft og den aktuelle specifikke ammonium-omsætnings-hastighed for at operationalisere korrelationen med den specifikke lattergasproduktion i en styring. Det kræver altså en substitution af målt DO med tilført DO i beregningen af den specifikke væksthastighed eller en modelbaseret prædiktions af ammoniumomsætnings-hastigheden baseret på aktuelle procesforhold i den biologiske proces. Dette er uden for målsætningen af BLOKIN projektet men løftes i det VUDP støttede projekt "N2O Kontrol".

3.3 Arbejdspakke 3: N2O Control

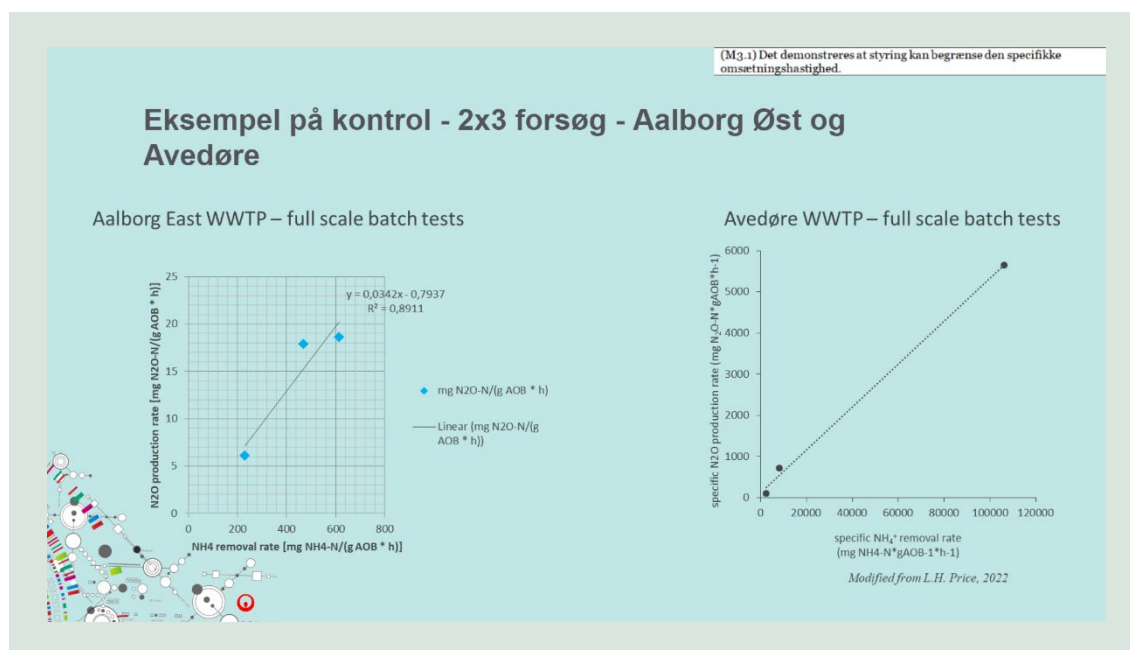
Test af styringsstrategier der aktivt holder omsætnings-hastigheden under grænseværdien fra "N2O warning".

Leverancer i denne arbejdspakke:

(M3.1) Det demonstreres at styring kan begrænse den specifikke omsætnings-hastighed.

For at kunne levere denne ydelse skal der udføres en række kontrollerede fuldskalaforsøg hvor parametre som DO, belastningen og slamalderen justeres i den aktuelle styring på det enkelte rensesanlæg med det formål at reducere den specifikke omsætningshastighed, men fastholde den totale.

Der blev udført 2x3 fuldskalaforsøg på hhv. Avedøre og Aalborg Øst rensesanlæg. Forsøgene bestod i at fastholde en periode med denitrifikation og spildevandstilløb indtil der blev opnået en "høj" ammoniumkoncentration. Herefter blev tilløb og afløb afskåret og nitrifikation (beluftning) aktiveret. Dermed opnåedes en fuldskala batch proces uden usikkerheder skabt af kontinueret flow. I de 6 forsøg (som i sig selv havde forskellig belastning, slammængde og relativ hyppighed af nitrificerende bakterier) blev ilt-sætpunkt og lufttilførsel varieret med det formål at påvirke og variere den specifikke ammoniumomsætningshastighed og dokumentere den korrelerede effekt på den specifikke lattergasproduktion. Resultaterne er vist i FIGUR 7.



FIGUR 7. Viser resultaterne af de 2x3 fuldskala batch tests på hhv. Aalborg Øst (venstre) og Avedøre (højre) rensesanlæg. Der ses en tilnærmelsesvis lineær sammenhæng mellem specifik ammoniumomsætningshastighed og den specifikke lattergasproduktionshastighed i begge anlæg. Der er stor forskel på akserne for de to rensesanlæg som dels hænger sammen med forskellige niveauer af lattergas i de to anlæg, men i særdeleshed er knyttet til forskelle i den relative hyppighed af nitrifikanter. Angivelsen af g AOB er tilnærmet da en DNA-måling ikke entydigt fortæller noget om biomasse andel, men derimod den relative hyppighed af en bestemt region på 16S rRNA genet for den undersøgte slægt.

(M3.2) Styringens virkningsgrad evalueres.

For at kunne levere denne ydelse skal styringernes virkningsgrad evalueres og dokumenteres.

Det er tydeligt fra FIGUR 7, at der som forventet kan observeres en lavere lattergasproduktion når ammoniumomsætningen reduceres. Det er også tydeligt, at lufttilførslen netop er et effektivt middel til at regulere ammoniumomsætningshastigheden. Dog kræves det at der etableres en direkte sammenhæng mellem lufttilførslen og ammoniumomsætningen i praksis på det enkelte anlæg. Da dette ikke var en del af scope for indeværende projekt tilvejebringes dette i det VUDP-støttede "N2O Kontrol" projekt.

På et overordnet niveau kan det ses at de i alt 6 fuldskala batch tests, at det er muligt at reducere den specifikke lattergasproduktionshastighed med ca. 70-80 % sammenlignet med maksimumsværdierne (fra 18-19 til 6 i Aalborg og 6000 til 1000 i Avedøre). Dette skal i praksis afpasses efter renseanlæggets rensegrad og -krav.

(M3.3) Nøgletal beregnes og indberettes til Miljøstyrelsen. Slutrapport

Nøgletal er oplyst i FIGUR 5.

3.4 Arbejdspakke 4: Projektledelse

Projektledelse, herunder afholdelse af styregruppemøder og projektopfølgingsmøder, workshops og formidling, bl.a. via afholdelse af webinar og udgivelse af artikler i fagrelevante tidsskrifter.

(M.4.1) Afholdelse af workshop

Der er afholdt 3 interne workshops i løbet af projektets forløb. 1 på hvert renseanlæg.

(M.4.2) Afholdelse af webinar om projektets resultater

Der er ikke afholdt et dedikeret webinar om projektets resultater. Til gengæld er projektet formidlet til følgende konferencer:

- NORDIWA 2023
- Dansk Vand Konference 2022
- IWA WWCE 2022
- Temadag (MiDAS) på Aalborg Universitet 2022

(M.4.3) Udgivelse af artikel i fagrelevant tidsskrift eks. Spildevand

Der er udgivet en artikel i Spildevands Teknisk Forenings tidsskrift "Spildevand" #1 2023 side 36-37 med titlen "Online data om bakteriers DNA vil optimere lattergasbekæmpelse".

4. Referenceliste

- Ahn, J. H., Kim, S., Park, H., Rahm, B., Pagilla, K., & Chandran, K. (2010). N₂O emissions from activated sludge processes, 2008-2009: Results of a national monitoring survey in the united states. *Environmental Science and Technology*, 44(12), 4505–4511. <https://doi.org/10.1021/es903845y>
- Blackburne, R., Vadivelu, V. M., Yuan, Z., & Keller, J. (2007). Determination of Growth Rate and Yield of Nitrifying Bacteria by Measuring Carbon Dioxide Uptake Rate. *Water Environment Research*, 79(12), 2437–2445. <https://doi.org/10.2175/106143007x212139>
- Blum, J. M., Jensen, M. M., & Smets, B. F. (2018). Nitrous oxide production in intermittently aerated Partial Nitritation-Anammox reactor: oxic N₂O production dominates and relates with ammonia removal rate. *Chemical Engineering Journal*, 335(October 2017), 458–466. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2017.10.146>
- Chen, X., Mielczarek, A., Habicht, K., Thornberg, D., Andersen, M., & Sin, G. (2019). Data-driven development and full-scale testing of N₂O control strategies. *Abstract from The 10th IWA Symposium on Modelling and Integrated Assessment*. https://backend.orbit.dtu.dk/ws/portalfiles/portal/238194900/Data_driven_development_and_full_scale_testing_of_N2O_control_strategies.pdf
- Daelman, M. R. J., van Voorthuizen, E. M., van Dongen, U. G. J. M., Volcke, E. I. P., & van Loosdrecht, M. C. M. (2015). Seasonal and diurnal variability of N₂O emissions from a full-scale municipal wastewater treatment plant. *Science of the Total Environment*, 536, 1–11. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.122>
- Domingo-Félez, C., & Smets, B. F. (2019). Regulation of key N₂O production mechanisms during biological water treatment. *Current Opinion in Biotechnology*, 57, 119–126. <https://doi.org/10.1016/j.copbio.2019.03.006>
- Duan, H., Zhao, Y., Koch, K., Wells, G. F., Zheng, M., Yuan, Z., & Ye, L. (2021). Insights into Nitrous Oxide Mitigation Strategies in Wastewater Treatment and Challenges for Wider Implementation. *Environmental Science & Technology*, 55(11), 7208–7224. <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c00840>
- Dueholm, M. K. D., Nierychlo, M., Andersen, K. S., Rudkjøbing, V., Knutsson, S., Arriaga, S., Bakke, R., Boon, N., Bux, F., Christensson, M., Chua, A. S. M., Curtis, T. P., Cytryn, E., Erijman, L., Etchebehere, C., Fatta-Kassinos, D., Frigon, D., Garcia-Chaves, M. C., Gu, A. Z., ... Nielsen, P. H. (2022). MiDAS 4: A global catalogue of full-length 16S rRNA gene sequences and taxonomy for studies of bacterial communities in wastewater treatment plants. *Nature Communications*, 13(1), 1–15. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29438-7>
- Folketinget. (2020). Klimaplan for en grøn affaldssektor. *Klimaplan for En Grøn Affaldssektor Og Cirkulær Økonomi*, 1–17. www.regeringen.dk/media/9591/aftaletekst.pdf
- Gruber, W., Niederdorfer, R., Ringwald, J., Morgenroth, E., Bürgmann, H., & Joss, A. (2021a). Linking seasonal N₂O emissions and nitrification failures to microbial dynamics in a SBR wastewater treatment plant. *Water Research X*, 11, 100098. <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100098>
- Gruber, W., Niederdorfer, R., Ringwald, J., Morgenroth, E., Bürgmann, H., & Joss, A. (2021b). Linking seasonal N₂O emissions and nitrification failures to microbial dynamics in a SBR wastewater treatment plant. In *Water Research X* (Vol. 11). <https://doi.org/10.1016/j.wroa.2021.100098>
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S. M., & van Loosdrecht, M. C. M. (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water Research*, 43(17), 4093–4103. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2009.03.001>
- Krüger. (n.d.). *Bio Denitro™*. <https://www.kruger.dk/biodenitro-bio-denitro>
- Law, Y., Ni, B. J., Lant, P., & Yuan, Z. (2012). N₂O production rate of an enriched ammonia-oxidising bacteria culture exponentially correlates to its ammonia oxidation rate. *Water Research*, 46(10), 3409–3419. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2012.03.043>
- Law, Y., Ye, L., Pan, Y., & Yuan, Z. (2012). Nitrous oxide emissions from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological*

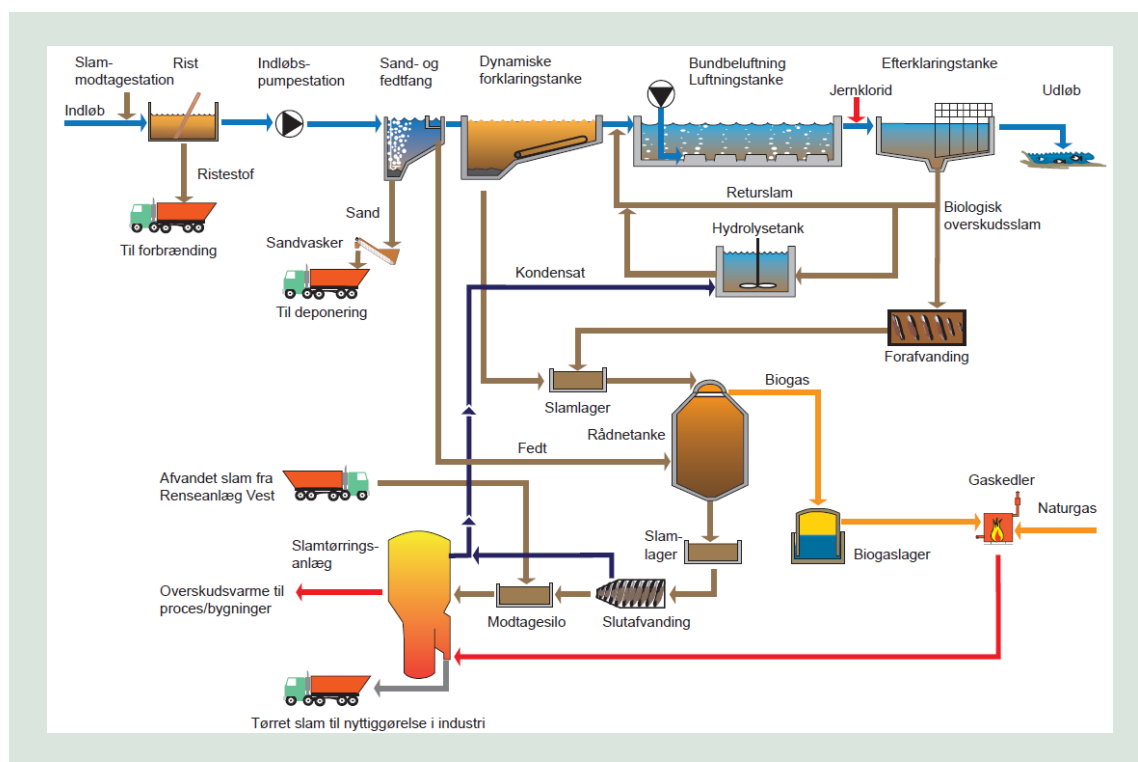
- Sciences*, 367(1593), 1265–1277. <https://doi.org/10.1098/rstb.2011.0317>
- Massara, T. M., Malamis, S., Guisasola, A., Baeza, J. A., Noutsopoulos, C., & Katsou, E. (2017). A review on nitrous oxide (N₂O) emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. *Science of the Total Environment*, 596–597, 106–123. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.03.191>
- Miljøstyrelsen. (2020). *MUDP Lattergaspulje Dataopsamling på måling og reduktion af lattergasemissioner fra renseanlæg* (Issue December).
- Price, L. H. (2022). *Towards new N₂O mitigation strategies based on the correlation of nitrogen transformation rates and microbial diversity in activated sludge*. Technical University of Denmark.
- Soler-Jofra, A., Pérez, J., & van Loosdrecht, M. C. M. (2021). Hydroxylamine and the nitrogen cycle: A review. *Water Research*, 190, 116723. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2020.116723>
- Valk, L. C., Peces, M., Singleton, C. M., Laursen, M. D., Andersen, M. H., Mielczarek, A. T., & Nielsen, P. H. (2022). Exploring the microbial influence on seasonal nitrous oxide concentration in a full-scale wastewater treatment plant using metagenome assembled genomes. *Water Research*, 219(May), 118563. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2022.118563>
- Vasilaki, V., Massara, T. M., Stanchev, P., Fatone, F., & Katsou, E. (2019). A decade of nitrous oxide (N₂O) monitoring in full-scale wastewater treatment processes: A critical review. *Water Research*, 161, 392–412. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.04.022>
- von Sperling, M. (2007). *Biological wastewater treatment series: Activated sludge and aerobic biofilm reactors* (Vol. 5, Issue August). IWA Publishing.

Bilag 1. Beskrivelse af de deltagende renselanlæg

Bilag 1.1 Aalborg Renselanlæg Øst

TABEL 1. Design og belastningsoversigt over Aalborg Renselanlæg Øst.

Anlæg	Design	Rådnetank	Forklaring	Kulstof	Belastning (Godkendt kapacitet)	Industribidrag
Aalborg Øst	MBNDK	Ja	Ja	Ja	82.000 (110.000)	10%



FIGUR 8. Skematisk oversigt over Aalborg Renselanlæg Øst.

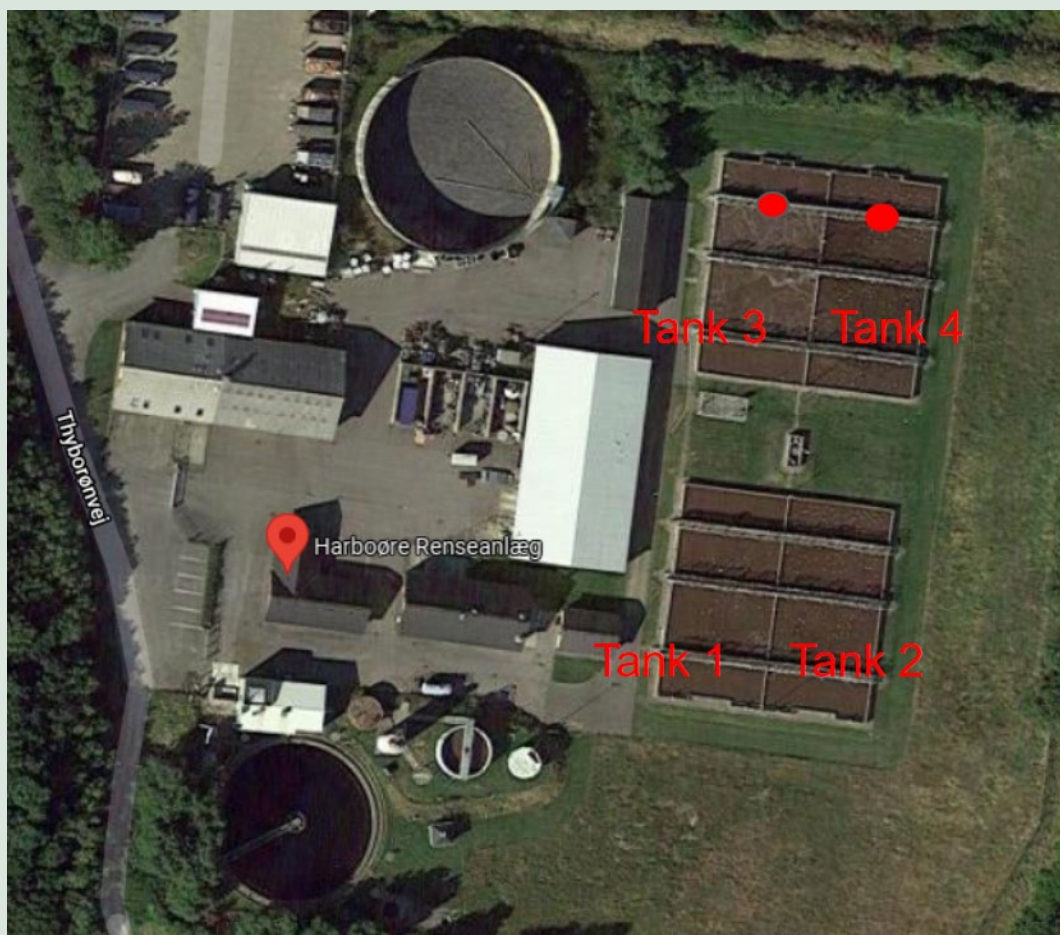


FIGUR 9. Sensorplacering i Aalborg Renseanlæg Øst.

Bilag 1.2 Harboøre Renseanlæg

TABEL 2. Design og belastningsoversigt over Harboøre Renseanlæg.

Anlæg	Design	Rådnetank	Forklaring	Kulstof	Belastning (Godkendt kapacitet)	Industribidrag
Harboøre	MBNDK Alternierende	Nej	Nej	Nej	21.000 (80.000)	70 %

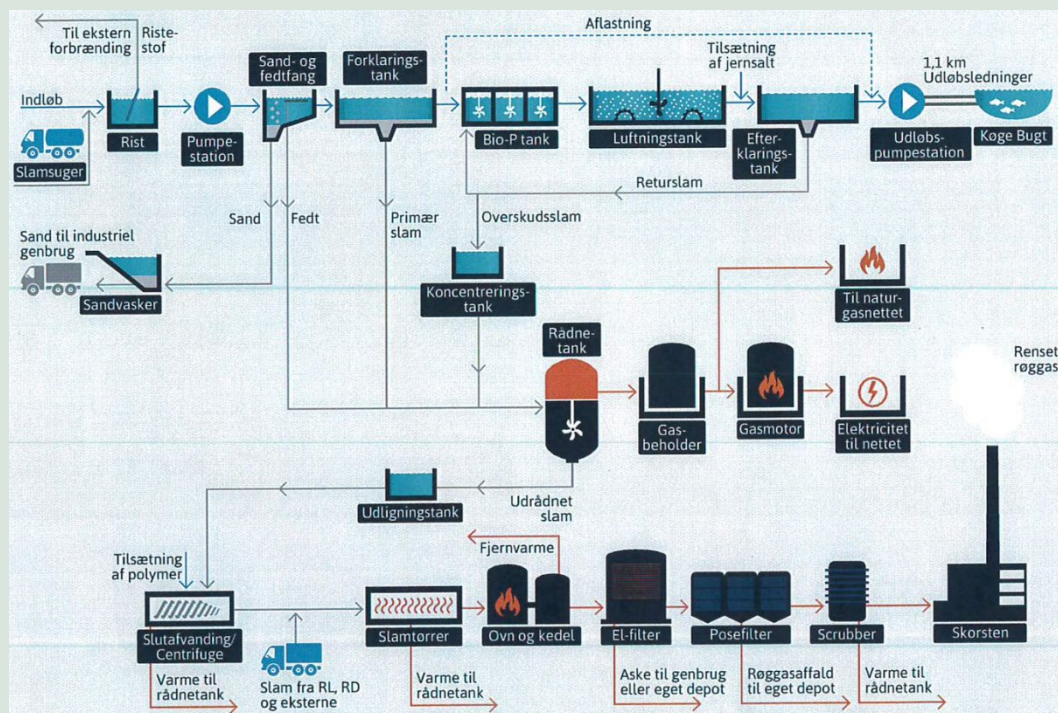


FIGUR 10. Sensorplacering i Harboøre Renseanlæg.

Bilag 1.3 Avedøre Renseanlæg

TABEL 3. Design og belastningsoversigt over Avedøre Renseanlæg.

Anlæg	Design	Rådnetank	Forklaring	Kulstof	Belastning (Godkendt kapacitet)	Industribidrag
Avedøre	MBNDK Alternierende Aktivt slam	Ja	Ja	Nej	390.000 (345.000)	



FIGUR 11. Skematisk oversigt over Avedøre Renseanlæg.



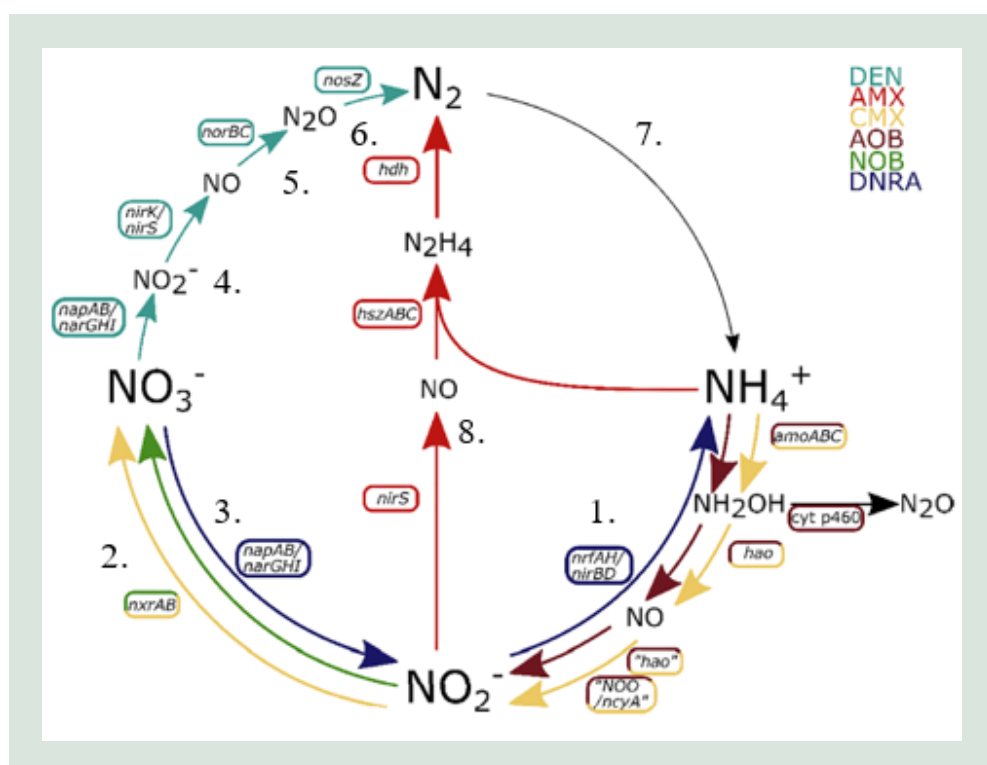
FIGUR 12. Sensorplacering i Avedøre Renseanlæg.

Bilag 2. Teoretisk baggrund

Dette bilag er en fri oversættelse af hele uddrag fra, den i forordet nævnte, specialeafhandling af Price (2022).

Bilag 2.1 Kvælstofkredsløbet i spildevandsrensning

Biologiske kvælstofomdannelse i rensesanlæg sker i 8 trin for alle kvælstofstrømme (FIGUR 13), hvor trin 1 og 2 udgør nitrifikationsprocessen og 3 til 6 denitrifikationsprocessen (Kampschreur et al., 2009). Og sluttelig Trin 7 nitrogenfiksering, trin 8 Anammox, oxidation af nitrit til N_2 og dissimilatorisk nitrit reduktion (det omvendte af trin 1).



FIGUR 13. Kvælstofkredsløbet. Modificeret version af (Valk et al., 2022) og (Kampschreur et al., 2009). DEN =anoxiske heterotrofe denitrifieringsbakterier, AMX =anammox, CHM =comammox, AOB =ammoniumoxiderende bakterier, NOB =nitrit-oxiderende bakterier og DNRA =dissimilatorisk nitrat reduktion til ammonium.

De 6 trin, der er relevante for nitrifikation og denitrifikation, er vist nedenfor og beskrevet i detaljer i de følgende afsnit:

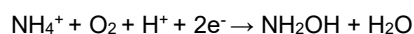
1. Aerob ammonium oxidation ($\text{NH}_4^+ \rightarrow \text{NO}_2^-$),
2. Aerob nitrit oxidation ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}_3^-$),
3. Reduktion af nitrat til nitrit ($\text{NO}_3^- \rightarrow \text{NO}_2^-$),
4. Reduktion af nitrit til nitrogenoxid ($\text{NO}_2^- \rightarrow \text{NO}$),
5. Reduktion af nitrogenoxid til dinitrogenoxid ($\text{NO} \rightarrow \text{N}_2\text{O}$),
6. Reduktion af nitrogenoxid til dinitrogengas ($\text{N}_2\text{O} \rightarrow \text{N}_2$).

Bilag 2.2 Nitrifikation

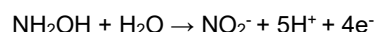
Nitrifikation er en biologisk proces i to trin, der beskriver oxidationen af NH_4^+ til NO_2^- og derefter yderligere oxidation til NO_3^- . Nitrifikationsprocessen udføres kun af specialiserede grupper af

mikrober; ammonium-oxiderende bakterier (AOB), der oxiderer NH_4^+ til NO_2^- , og nitrit-oxiderende bakterier (NOB), der oxiderer NO_2^- til NO_3^- (Gruber et al., 2021a; Kampschreur et al., 2009). Comammox-bakterier (COMplete AMMonia OXidation) kan dog fuldstændigt omdanne ammonium til nitrat i et enkelt trin.

Nitrifikant nitrifikation er oxidation af ammonium (NH_4^+) til nitrit (NO_2^-) af ammoniumoxiderende bakterier (AOB), der får energi fra oxidationen med molekylær ilt (O_2) som elektron acceptor. AOB'er er aerobe kemolithoautotrofe bakterier, og deres katabolisme består i at omdanne elektron-donoren NH_4^+ til NO_2^- med ilt som elektron acceptor (Soler-Jofra et al., 2021). Processen består af to trin: NH_4^+ reduceres først til mellemproduktet hydroxylamin (NH_2OH) katalyseret af enzymet ammoniakmonooxygenase (AMO).



Efterfølgende oxideres NH_2OH til NO , som er ustabil og hurtigt omdannes til NO_2^- af hydroxylamin-oxido-reduktase (HAO).



Kombinationen af de to redoxprocesser er kendt som nitritation, en reaktion hvor der produceres to mol protoner pr. mol ammonium, der oxideres:



Slægter, der almindeligvis er involveret i nitrifikation, er *Nitrosomonas* og *Nitrospira* (og potentiel comammox) og i Danmark, findes de i mængder på henholdsvis 0,2% og 0,5%. (Dueholm et al., 2022). NOB's oxidation af NO_2^- til NO_3^- udføres af NOB'erne, hvor *Nitrotoga* er blandt de mest udbredte, med en forekomst på 0,2% ifølge MiDAS 4 som er baseret på undersøgelser af bakteriesammensætningen i spildevandsrensingsanlæg (Dueholm et al., 2022).

Bilag 2.3 Denitrifikation

Under denitrifikationsprocessen sker der en sekventiel reduktion af NO_3^- til NO_2^- , NO , N_2O og N_2 under anoxiske forhold (Domingo-Félez & Smets, 2019). At denitrifikation foregår under ilt-begrænsende forhold, betyder at nitrogenoxid anvendes som elektron acceptor og derfor reduceres til N_2 af heterotrofe bakterier. I modsætning til AOB kan disse bakterier omdanne N_2O og kan derfor potentielt fungerer som N_2O -reducerende bakterier. Disse bakterier er en meget diverse gruppe af mikroorganismer, der kan koble oxidation af organiske eller uorganiske elektron-donorer til reduktionen af NO_2^- , NO_3^- , NO og N_2O (Kampschreur et al., 2009).

Den heterotrof denitrifikations pathway forløber ved hjælp af anoxiske heterotrofe denitrifikanter (DEN):

- NO_3^- reduceres anaerobt af heterotrofe bakterier gennem mellemprodukterne NO_2^- , NO og N_2O , før cyklussen afsluttes ved N_2 (trin 4 til 6 i FIGUR 13). NO_2^- omdannes til mellemprodukterne NO og N_2O , før det reduceres til produktet N_2 .

Nitrifikant denitrifikations pathway med ammonium oxiderende bakterier (AOB):

- I nitrifikant denitrifikationsprocessen kan AOB, ved lave ilt-niveauer, reducere NO_2^- til N_2 ved brug af ammonium eller hydrogen som elektrondonor (Kampschreur et al., 2009).

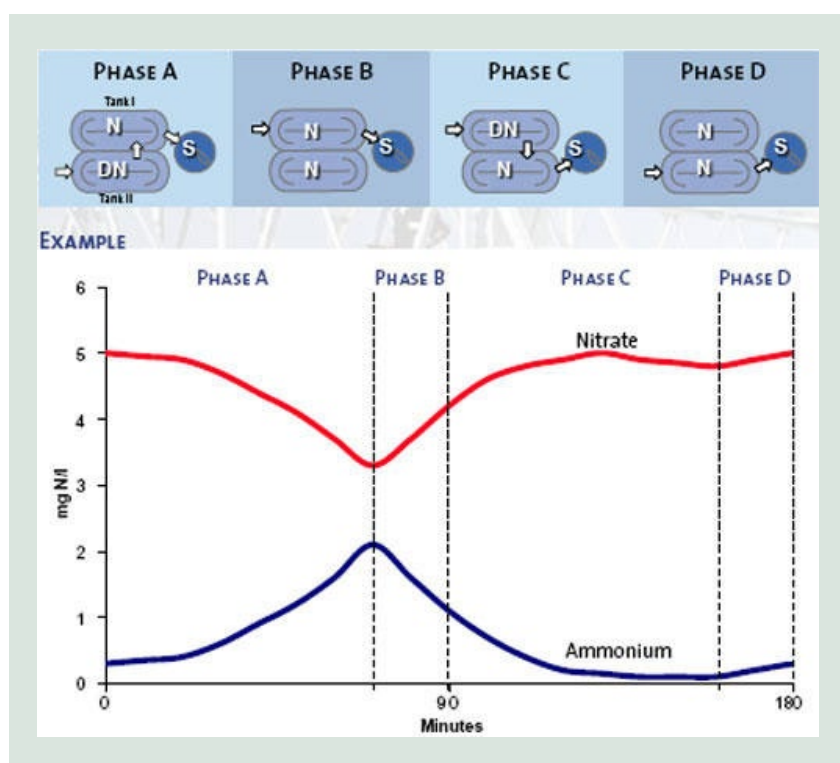
Bilag 2.4 N_2O pathway

N_2O produceres og udledes under biologisk kvælstoffjernelse fra spildevand gennem nitrifikations- og denitrifikationsprocessen. N_2O produceres af ammonium oxiderende bakterier (AOB) via nitrifikant nitrifikation (NN), nitrifikant denitrifikation (ND) og heterotrofe denitrificerende bakterier (DNB) via den heterotrofe denitrifikations pathway (HD). Abiotiske reaktioner er af mindre betydning i biologiske kvælstoffjernelsessystemer (Daelman et al., 2015; Gruber et al., 2021a).

Bilag 2.5 Biodenitro-proces

To essentielle faktorer for effekten af de biologiske processer, der er beskrevet i det foregående kapitel, er sammensætningen af det rå spildevand og rensningsanlæggets design. Biodenitro™-processen er en af mange procesdesigns, der bruges til at fjerne kvælstof fra spildevand. Metoden blev udviklet i 1970'erne som en billig og effektiv metode til biologisk behandling af spildevand.

Biodenitro™-konfigurationen bruger to tanke pr. linje i vekslende drift. I fase A tilføres spildevand til tank II under denitrifikationsfasen (DN). De heterotrofe denitrifikantor bruger NO_3^- fra den foregående fase som iltkilde, mens de nedbryder den organiske bestanddele, og N_2 frigives til atmosfæren. Når tank II fyldes med rå spildevand, løber en tilsvarende mængde vand og aktivt slam ind i tank I under nitrifikationsfasen (N) med biologisk nedbrydning af det resterende organiske stof og omdannelse af NH_4^+ til NO_3^- . Slutteligt strømmer det rensede spildevand fra tank I til bundfældningstanken (S) FIGUR 14.



FIGUR 14. Den øverste del viser de 4 hovedfaser i en BioDenitro-proces, og grafen nedenfor viser koncentrationen af NO_3^- og NH_4^+ i tank II skiftevis gennem faserne. N= nitrifikation, DN=denitrifikation (Krüger, n.d.).

I fase B ledes det rå spildevand til tank I, mens begge tanke beluftes for at reducere ammoni-umindholdet i tank II, før spildevandet bortledes fra denne tank. Fase C og D svarer til fase A og B, bortset fra at spildevandstilførslen, fraførelsen og procesbetingelserne i tankene byttes om. Når fase D er afsluttet, starter driftscyklussen forfra.

Bilag 2.6 Sammenhæng mellem driftsbetingelser og N_2O -produktion

N_2O emitteres primært under den beluftede fase (80-90%), da det transporteres fra vandfasen til gasfasen ved beluftning, men produceres under nitrifikations- og denitrifikationsfasen (Chen et al., 2019). Fordi N_2O dannet under denitrifikation strippes til gasfasen under nitrifikation i de beluftede zoner, er de individuelle bidrag fra nitrifikation og denitrifikation svære at skelne mellem (Kampschreur et al., 2009). Den eneste biologiske måde, N_2O kan reduceres på, ved reduktion under denitrifikationsprocessen (Daelman et al., 2015).

Bidraget fra de forskellige pathways afhænger af aktiviteten af andre mikrobielle grupper og varierer med NH_4^+ , NO_2^- , DO-koncentrationer, temperatur og pH (Blum et al., 2018;

Kampschreur et al., 2009; Massara et al., 2017). En af de mere "almindelige" cykliske mønstre er:

Når NH_4^+ koncentrationerne falder på grund af oxidation med AOB under nitrifikationsprocessen (aerob fase), produceres NO_3^- koncentrationer, og N_2O produceres som et mellemprodukt.

Når man går ind i den anoxiske fase, falder NO_3^- , da det reduceres yderligere til NO_2 , NO , N_2O og N_2 , mens N_2O indledningsvist stiger på grund af heterotrof produktion og derefter falder på grund af heterotrof forbrug (Chen et al., 2019).

Når N_2O ikke er helt fjernet ved afslutningen af den anoxiske fase, overføres det til den efterfølgende aerobe fase. Det kan fortsætte i flere cykler, hvilket resulterer i en akkumulering af N_2O .

Denne dynamik kan bruges som en indikator til at igangsætte N_2O -begrænsningsstrategier (høj NH_4^+ koncentration i den aerobe fase og den høje NO_3^- koncentration i slutningen af den aerobe fase) (Chen et al., 2019).

Bilag 2.7 Sæsonvariation

Generelt er den højeste N_2O -emission blevet rapporteret mellem marts og juni og den laveste mellem juli og november, hvilket indikerer en sammenhæng mellem N_2O og sæsonen (Chen et al., 2019; Valk et al., 2022). Derudover forventes emissionerne af N_2O at være højere ved højere temperaturer på grund af højere mikrobielle omdannelseshastigheder (Ahn et al., 2010). Denne effekt forventes at blive observeret om foråret og efteråret.

Måske er det ikke kun temperaturvariationen, men også andre faktorer, der spiller en rolle i de observerede sæsonbestemte N_2O -emissioner. Eksempelvis ser det ud til, at årstidsbestemte variationer og dynamikker i det mikrobielle samfunds sammensætning har en betydelig indflydelse på ydeevnen hos værdifulde bakteriearter, der er involveret i nitrifikation (Daelman et al., 2015; Gruber et al., 2021a).

Bilag 2.8 Nitrit

Forholdet mellem en forhøjet NO_2^- koncentration og udledningen af N_2O er blevet rapporteret i adskillige undersøgelser, hvilket indikerer, at en høj NO_2^- koncentration er en vigtig faktor for udledningen af N_2O (Ahn et al., 2010; Daelman et al., 2015; Gruber et al., 2021a; Kampschreur et al., 2009). NO_2^- er en af de mest kritiske faktorer, der bidrager til N_2O -produktion i forbindelse med nitrifikation for forskellige AOB'er, herunder *Nitrosomonas* og flere stammer af *Nitrosospora* spp. (Ahn et al., 2010). Da AOB har en højere iltaffinitet end NOB, kan lave iltkoncentrationer desuden resultere i akkumulering af NO_2^- (Blackburne et al., 2007). Høj nitritkoncentration produceret i nitrifikationsfasen kan føre til øget denitrifikation af AOB (Ahn et al., 2010; Kampschreur et al., 2009).

Bilag 2.9 COD/N

Begrænset tilgængelighed af bionedbrydeligt organisk kulstof øger N_2O -emission under denitrifikation (Blum et al., 2018; Kampschreur et al., 2009; Vasilaki et al., 2019). Ved et COD/N-forhold på under 3,5 er 20-30% af kvælstofbelastningen blevet udledt som N_2O , mens COD/N-forhold på over ti er blevet observeret at føre til en stigning i mængden af aerobt denitrificerende mikroorganismer og muligvis også til en stigning i N_2O -emissioner (Kampschreur et al., 2009).

Bilag 2.10 Hurtigt skiftende procesbetingelser

I flere undersøgelser er der blevet observeret øget N_2O -emission som reaktion på hurtigt skiftende miljøforhold såsom toksisk chok, øget ammoniumkoncentration kombineret med en forhøjet iltkoncentration og ændringer i NO_2^- koncentration (Daelman et al., 2015; Gruber et al., 2021b; Kampschreur et al., 2009).

Bilag 2.11 Ilt

Koncentrationen af opløst ilt (DO) er en vigtig parameter, der er afgørende for N_2O -emission under nitrifikation og denitrifikation (Daelman et al., 2015). På den ene side er det vigtigt at holde beluftningen nede for at undgå, at N_2O strippes fra vandet. På den anden side er det afgørende at have nok opløst ilt til, at AOB'erne kan fuldføre nitrifikationen. Under alle omstændigheder er

det vigtigt at regulere DO for at reducere den nitrifikationsassocierede produktion af N_2O (Chen et al., 2019).

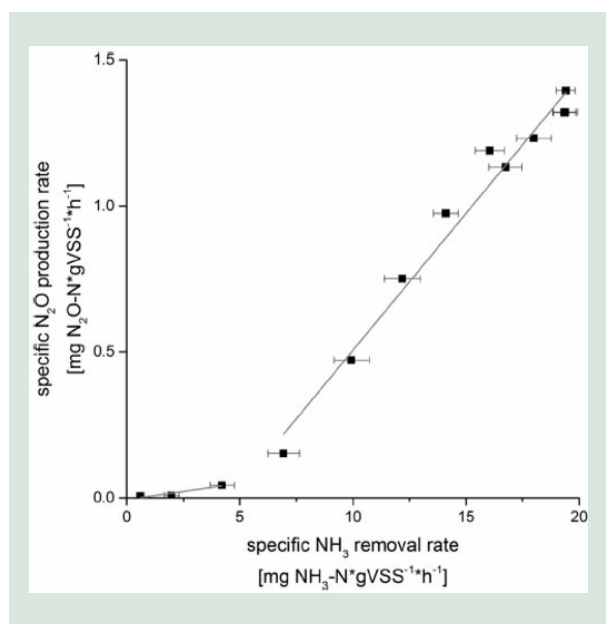
Luftstripping er dog ikke den eneste årsag til N_2O -emission og afspejler måske ikke direkte produktionen af N_2O . Der er blevet argumenteret for, at genopretningen fra lave DO-forhold snarere end den lave DO i sig selv fører til akkumulering af NO_2^- , hvilket kan resultere i N_2O -produktion (Ahn et al., 2010).

For meget beluftning i nitrifikationstanken kan føre til øget iltkoncentration i denitrifikationsfasen, hvilket også kan føre til N_2O -emissioner (Kampschreur et al., 2009). Tilstedeværelsen af ilt (utilstrækkelig anoxi) under denitrifikationsprocessen hæmmer reduktionen af N_2O og resulterer i ufuldstændig denitrifikation (Daelman et al., 2015; Kampschreur et al., 2009). Ilt hæmmer både syntesen og aktiviteten af denitrifikationsenzymmer. Af alle de enzymer, der er involveret i denitrifikation, er N_2O -reduktase (*norZ*), det enzym, der katalyserer reduktionen af N_2O til N_2 , det mest følsomme over for ilt, hvilket fører til N_2O , selv når ilt kun er til stede i små mængder under denitrifikationen (Kampschreur et al., 2009).

Bilag 2.12 Den specifikke ammoniakoxideringshastighed

Undersøgelser har tidligere rapporteret en sammenhæng mellem ammoniumoxideringshastigheden (AOR) og N_2O -produktionen og fundet en positiv sammenhæng mellem N_2O -emissioner og AOR.

FIGUR 15 illustrerer en eksponentiel stigende sammenhæng mellem N_2O -produktion og øget AOR (Law, Ye, et al., 2012). Det tyder på, at i situationer med høj kvælstofomsætning og høj kvælstofbelastning kan N_2O -produktion under nitrifikant nitrifikation pathwayen spille en afgørende rolle i et fuldskalasystem. Flere forfattere har argumenteret for, at nettoproduktionshastigheden af N_2O under beluftede faser korrelerede med høje ammoniakfjerneshastigheder og NH_4^+ koncentrationer (Blum et al., 2018; Law, Ni, et al., 2012; Massara et al., 2017).



FIGUR 15. Korrelation mellem specifik N_2O -produktionshastighed og specifik ammoniakfjerneshastighed. Netto N_2O -produktionsrater som en funktion af NH_3 -fjerneshastigheden (Law, Ni, et al., 2012).

Bilag 2.13 Mikrobielt samfund

Den aktiverede slamproces til biologisk behandling af spildevand er verdens mest omfattende anvendelse af bioteknologi målt i volumen (Dueholm et al., 2022). Men i modsætning til industriel bioteknologi er de mikrobielle samfund ikke specielt konstrueret til opgaven, og vores viden om

deres mangfoldighed og funktion er stadig langt fra komplet (Dueholm et al., 2022). Men de sidste årtiers fremskridt inden for molekylære DNA-baserede teknikker og faldet i priserne på DNA-sekventering har gjort det muligt at bruge 16S DNA-analyser til at få et smugkig ind i mikroorganismen i den biologiske behandling.

Mikroorganismer er et kritiske element i aktive slamprocesser, og deres evne til at danne flokke og bundfælde vigtig for processen. DNA-sekventering er et lovende felt for videns baseret og optimeret kontrol og regulering af spildevandsrensningsanlæg. DNA-sekventering giver nye muligheder for at kontrollere emissioner, hvilket potentielt kan føre til bedre kontrol end i dag. Desuden er dynamikken i mikrobielle samfund blevet foreslået som en potentiel drivkraft for langsigtet N_2O -dynamik (Daelman et al., 2015; Gruber et al., 2021).

Det mikrobielle samfund udgør rygraden i det aktive slam i et rensningsanlæg og orkestrerer den biologiske fjernelse af forurenende stoffer i spildevandet. Derfor kan forstyrrelser i slammets mikrobiom påvirke interne dynamikker, der påvirker strukturelle og funktionelle grupper og fører til N_2O -emission dokumenteret af Gruber et al., (2021).

Sæsonafhængig NO_2 akkumulering og N_2O -emissioner er blevet forbundet med ændringer i det aktive slams mikrobiom. Effektiviteten af de biologiske processers kvælstoffjernelse afhænger af en passende balance mellem aktiviteterne i de forskellige mikrobielle grupper. Derfor kan ændringer i de kvælstofomsættende populationer reducere nitrifikationen og potentielt øge N_2O -produktionen (Gruber et al., 2021).

For at reducere N_2O -emissioner fra rensningsanlæg er det afgørende at forstå de drivkræfter, der fører til den mikrobielle populationsdynamik i det aktiverede slam (Gruber et al., 2021). Derudover er der behov for mere arbejde med henblik på at belyse de mikrobielle samfunds genetiske N_2O -reduktionspotentialer, da mange mikrobielle arter er nye, og der kun findes lidt eller ingen viden om deres (potentielle) N_2O reducerende funktioner. Der er dog blevet foreslået nogle sammenhænge mellem mikrobielle samfund og N_2O -produktion. Yderligere har lav diversitet vist sig at være signifikant negativt korreleret med N_2O -emissioner (Gruber et al., 2021).

For eksempel faldt den mikrobielle mangfoldighed i tempererede klimaer i begyndelsen af vintersæsonen (november og december), begyndte at stige i slutningen af foråret (april/maj) og toppede i slutningen af efteråret (oktober) (Gruber et al., 2021). Sådanne årlige mønstre i mikrobielle omdannelser kan også være bestemt af variationer i forekomsten af forskellige bakterier i det mikrobielle samfund.

Mikrobielle ubalancer kan føre til N_2O -emission, da en lav forekomst af AOB i det mikrobielle samfund kan forårsage ufuldstændig ammoniumoxidation, hvilket resulterer i, at AOB kommer i en stresstilstand, når NH_4^+ koncentrationen bliver meget høj sammenlignet med den mængde AOB, der er til stede til at oxidere NH_4^+ . Desuden reagerer hver AOB på den høje NH_4^+ koncentration ved at øge AOR, hvilket er blevet korreleret med stigende N_2O -koncentration. Derfor er AOB'erne mere tilbøjelige til at udføre ufuldstændig N_2O , hvis de er kommet i en stresset tilstand.

Bilag 2.14 Strategier til reduktion af N_2O

Graden af N_2O -emission afgøres af forskellige parametre med modstridende årsager og effekter. Derfor er der behov for en holistisk kontrolstrategi, der tager højde for det mikrobielle samfunds kinetik med fuldskala-parametre og -eksperimenter. Der findes ingen alment anerkendt model, der forklarer den langsigtede og kortsigtede N_2O -emissionsdynamik og overvåger procesbetingelserne. Derfor er det stadig nødvendigt at tilvejebringe et solidt datagrundlag til validering af de nuværende emissionsmodeller (Gruber et al., 2020; Vasilaki et al., 2019).

Nogle af de aktuelle diskussioner om N_2O -emissionsindikationer og kontrolmekanismer til at mindske N_2O -emissionen omhandler:

Opløst ilt (DO) skal være højt nok under nitrifikation for at minimere N_2O -emission gennem nitrifikant denitrifikation og for at undgå nitritakkumulationsinduceret N_2O -emission. Men for høj beluftning under nitrifikation kan føre til øget stripping af N_2O (Kampschreur et al., 2009; Ahn 2010). Det er blevet vist, at en reduktion af ilt-sætpunktet kan føre til en reduceret N_2O -emission

(Chen et al., 2019). Under denitrifikation skal den opløste iltkoncentration være lav nok til ikke at hæmme denitrifikationsprocessen.

Afsæt tilstrækkelig tid til fuldstændig denitrifikation. Undgå gentagne skift mellem aerobe og anoxiske forhold, før processerne er tilendebragte. F.eks. ved at forlænge længden af den anoxiske fase.

Tilsæt ekstra COD for at sikre fuldstændig denitrifikation og styrke processens N_2O reduktion. Tilføjelsen af en ekstern organisk kulstofkilde kan føre til en reduktion af N_2O -emissionen (Kampschreur et al., 2009).

Minimer spidsbelastningen af NH_4^+ ved hjælp af flowudligning. Undgå pludselige NH_4^+ toppe ved kontinuerligt at tilføre rå spildevand og undgå spidsbelastninger. Mikrobiologien beskyttes mod pludselige stressende forhold ved at undgå hurtigt skiftende procesforhold. Det kan også løses ved at blande koncentrat med højt kvælstofindhold med primært spildevand for at udligne kvælstofbelastningen i indløbet (Ahn et al., 2010). Dette kan også opnås ved at øge hyppigheden af N- og DN-faseskift, så AOB aldrig oplever for høje NH_4^+ koncentrationer.

Indstilling af SRT, så den passer til sæsonen. For eksempel sikrer en længere SRT om vinteren, at AOB'erne har tid nok til at vokse, og en kortere SRT om sommeren, da den højere temperatur fremskynder kinetikken.

Minimering af NO_2^- ophobning er afgørende for at mindske N_2O -emission og ikke forårsage N_2O -emission via ND-pathwayen (Ahn et al., 2010; Kampschreur et al., 2009).

Biokinetisk lattergasreduktion i renseanlæg

BIOKIN demonstrates, that the use of DNA abundance data offers a new direct way to reduce the nitrous oxide production from biological nitrogen removal. By controlling the aeration and optimizing the specific ammonium removal rate the nitrous oxide production can be reduced. BIOKIN has established an effective supply chain for the visualization of fast DNA analysis data, calculation of N₂O emission and operational integration with relevant real time data. A feature has been developed in Hubgrade that calculates kinetic rates of the nitrogen removal in real-time and the kinetic rates has been correlated to the N₂O production. It was shown that the DNA corrected kinetic rates showed a positive correlation to N₂O production and that the kinetic rates and hence the N₂O production could be reduced by controlling the aeration intensity of the system.

Dansk Resumé

BIOKIN demonstrerer, at anvendelsen af DNA-data fra renseanlæg muliggør en ny måde at reducere produktionen af lattergas fra biologisk kvælstoffjernelse. Ved at kontrollere beluften og optimere den specifikke ammoniumfjernelsesrate kan produktionen af lattergas reduceres.

BIOKIN har skabt et effektivt system til hurtig visualisering af DNA-analysedata, beregning af N₂O-udledning og operationalisering samt integrering af relevante realtidsdata. En funktion er blevet udviklet i Hubgrade, der beregner kinetiske rater for kvælstoffjernelse i realtid, og de kinetiske rater er blevet korreleret med N₂O-produktionen. Det blev vist, at de DNA-korrigerede kinetiske rater viste en positiv korrelation til N₂O-produktion, og at de kinetiske rater og dermed N₂O-produktionen kunne reduceres ved at kontrollere beluftsintensiteten i systemet.



Miljøstyrelsen
Tolderlundsvej 5
5000 Odense C

www.mst.dk