

# N<sub>2</sub>O kontrol

## Helstøbt styring og dokumenteret effekt



## **N<sub>2</sub>O KONTROL – HELSTØBT STYRING OG DOKUMENTERET EFFEKT**

VUDP-FORENINGEN PROJEKTRAPPORT

**DATO:** 03-2026

---

### **Projekt ID:**

2023.46

### **Udgiver:**

VUDP Foreningen, Godthåbsvej 83, 8660 Skanderborg.

### **Udarbejdet af:**

Lise Price (Küger A/S), Carina Cupit Bayley (Krüger A/S) og Artur Tomasz Mielczarek (BIOFOS)

### **Finansiering:**

Vejledningen er finansieret af VUDP-Foreningen, Vandsektorens forening til forbedring af vandsektorens effektivitet og kvalitet.

### **Samarbejdspartnere:**

Det VUDP-støttede projekt N<sub>2</sub>O Kontrol er et bredt samarbejde mellem 8 danske forsyninger og Krüger, hvis formål er at muliggøre, at de danske renseanlæg kan opnå 50 % reduceret lattergasemission i 2025. Krüger har i projektet bidraget med udvikling og demonstration af lattergasstyringer på 8 renseanlæg, mens forsyningerne bl.a. har bidraget med værdifuld viden om proces teknisk drift af de enkelte renseanlæg såvel som faglig sparring mhp. styringsoptimering, fortolkning af data mv.

Projektets samarbejdspartnere inkluderer:

- BIOFOS
- Krüger
- Mølleåværket
- Halsnæs forsyning
- Hjørring Vandselskab
- Fors
- Vesthimmerland Forsyning
- Aalborg Forsyning
- BlueKolding

# Indhold

|                                                                                                         |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Sammenfatning .....                                                                                     | 3  |
| English summary .....                                                                                   | 4  |
| Projektets betydning for vandbranchen.....                                                              | 5  |
| Marked og/eller anvendelsesmuligheder .....                                                             | 5  |
| Næste skridt .....                                                                                      | 5  |
| Formidlingsplan .....                                                                                   | 6  |
| Introduktion .....                                                                                      | 7  |
| De deltagende renseanlæg .....                                                                          | 9  |
| Projektbeskrivelse.....                                                                                 | 11 |
| Formål .....                                                                                            | 11 |
| Output .....                                                                                            | 11 |
| Projektræsultater.....                                                                                  | 12 |
| 1. Helstøbt software løsning til reduktion af lattergas på renseanlæg.....                              | 12 |
| 1.1 N <sub>2</sub> O kontrol – element i beluftsstyringer som reducerer N <sub>2</sub> O emission ..... | 13 |
| 1.1.1 AI N <sub>2</sub> O kontrol .....                                                                 | 13 |
| 1.1.2 Regelbaseret N <sub>2</sub> O kontrol .....                                                       | 14 |
| 1.2 N <sub>2</sub> O emission – realtidsberegning af lattergasemission .....                            | 15 |
| 1.3 DNA Fantastic.....                                                                                  | 16 |
| 1.4 Optimal slamalder baseret på forekomsten af AOB'er .....                                            | 17 |
| 1.5 Helstøbt reduktion af N <sub>2</sub> O emission .....                                               | 18 |
| 2. Implementering af N <sub>2</sub> O kontrol – processtyringer til reduktion af N <sub>2</sub> O ..... | 20 |
| 2.1 Virkning af styringer til reduceret lattergasemission .....                                         | 20 |
| 2.1.1 Melby Renseanlæg og AI-baseret styring af lattergasudledning.....                                 | 20 |
| 2.1.2 Avedøre Renseanlæg – regelbaseret styring af lattergasudledning .....                             | 21 |
| 3. N <sub>2</sub> O kontrol - effekt på energi, miljø & klima .....                                     | 23 |
| 3.1 Effekt på energiforbrug - vurdering af N-tid på tværs af anlæg .....                                | 23 |
| 3.2 Effekt på miljø .....                                                                               | 24 |
| 3.3 Effekt på klima .....                                                                               | 25 |
| 3.4 Overordnet effekt af N <sub>2</sub> O kontrol.....                                                  | 26 |
| 3.4.1 AI N <sub>2</sub> O kontrol .....                                                                 | 27 |
| 3.4.2 Regelbaseret N <sub>2</sub> O kontrol.....                                                        | 27 |
| 4. Lattergasdynamik på danske renseanlæg.....                                                           | 28 |
| 4.1 Udledningsprofiler og pathways til lattergasudledning.....                                          | 29 |
| 4.2 AOB'er og variation i ammoniumoxiderationsraten (AOR) på renseanlæggene .....                       | 34 |
| 4.2.1 AOB-profiler og sæsonvariation i renseanlæggenes mikrobiom .....                                  | 34 |
| 4.2.2 N <sub>2</sub> O produktion som konsekvens af høj ammoniumoxiderationsrate (AOR) .....            | 36 |
| 4.3 Renseanlæggenes mikrobiologiske samfund .....                                                       | 38 |
| 5. Metode til aktivt at arbejde med reduktion af lattergas på renseanlæg .....                          | 39 |
| 6. En omfattende database for lattergasdynamik og emission fra renseanlæg .....                         | 42 |
| 7. Usikkerheder .....                                                                                   | 43 |
| Konklusion .....                                                                                        | 44 |
| Litteraturliste .....                                                                                   | 46 |

## Sammenfatning

Lattergas ( $N_2O$ ) er en potent drivhusgas og spildevandsbranchens udledning af denne har længe været i fokus, da det vurderes, at store dele af branchens klimaaftryk stammer fra  $N_2O$  emissionen fra de biologiske renseprocesser. Det blev tilbage i 2020 således politisk besluttet, at der for branchen skulle indføres en grænseværdi for renseanlæggenes lattergasudledning (anlæg > 30.000 PE) med målet om at nedbringe emission med 50% (*Klimaplan for en grøn affaldssektor og cirkulær økonomi, 2020*).

Ved at anvende enkelte styringstiltag kan lattergasudledningen fra renseanlæg reduceres til en vis grad. Dog er det essentielt at sammentænke de mulige reduktionstiltag og de bagvedliggende mikrobiologiske processer, for at opnå til helstøbt  $N_2O$  kontrol under hensyntagen til anlæggenes eksisterende krav. Netop dette fokuserer  $N_2O$  Kontrol projektet på – at udvikle og demonstrere en helstøbt software løsning til reduktion af lattergas på renseanlæg (afsnit 1).

I løbet af projektperioden blev løsningens elementer -  **$N_2O$  Kontrol** ( $N_2O$ -styring),  **$N_2O$  emission, DNA fantastic** og **Optimal slamalder** - implementeret på renseanlæggene mhp. af opnå lattergasreduktion på de deltagende anlæg (afsnit 2). I projektet demonstreres bl.a., at:

- Det er muligt >50% reduktion i lattergasudledningen via målrettet styring særligt på anlæg med høje emissionsfaktorer (afsnit 3). Dog er effekten af målrettet styring mere begrænset på anlæg med lave emissionsfaktorer.
- Optimering af kvælstoffjernelse på renseanlæggene, via optimerede fase-længder og beluftningsintensitet, understøtter ikke alene en reduceret  $N_2O$ -udledning fra renseanlæggene, men det er også muligt at øge rensegraden og dermed reducere kvælstofudledning til recipient samt at reducere N-tiden (beluftningen), som dermed kan medføre energibesparelser (afsnit 3).

Nærværende projekt tilbyder desuden en vigtig indsigt i renseanlæggenes  $N_2O$ -dynamik og udledningsprofiler samt de bagvedliggende mikrobielle samfund, der leder til  $N_2O$ -produktionen på anlæggene (afsnit 4). Identificering af hvilke mikrobiologiske *pathways* der leder til lattergasproduktion giver en værdifuld indsigt i hvornår og hvorfor lattergas opstår på det enkelte renseanlæg og understøtter anvendelsen af drifts- og styringstiltag, til at reducere både produktionen og emissionen af lattergas på anlæggene.

Fra de afprøvede styringsstrategier (afsnit 3), indsigten i  $N_2O$ -dynamik og -udledning samt de mikrobiologiske samfund der giver ophav hertil (afsnit 4), har projektet udviklet en metode til forsyninger fremadrettet kan arbejde målrettet med reduktion af lattergas fra renseanlæggene (afsnit 5). Metoden tager udgangspunkt i de mikrobiologiske *pathways*, der giver ophav til lattergasproduktion på det enkelte renseanlæg og angiver en trin-for-trin vejledning til identificering af relevante styringsstrategier, der kan nedbringe  $N_2O$ -produktionen og -emissionen.

Med projektets indsatser, er det lykkedes at skabe en omfattende database og lattergasdynamik og -emission fra renseanlæg (i Hubgrade), der samler enestående viden om lattergasudledning, mikrobiologien bag lattergasproduktionen samt hvilke styringsstrategier der kan ibrugtages til at skabe en varig reduktion af udledningen fra renseanlæg (afsnit 6). Projektet har således banet vejen for, at danske forsyninger kan opnå 50% reduktion af lattergasemissionerne fra renseanlæg, og dermed bidrage til den politiske målsætning om en energi- og klimaneutral dansk vandbranche.

## English summary

Nitrous oxide ( $\text{N}_2\text{O}$ ) is a potent greenhouse gas and the  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from wastewater treatment plants (WWTP) has long been in focus, as it is estimated that large parts of the wastewater sector's climate footprint originates from  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from biological treatment processes. Back in 2020, it was thus politically decided to introduce a future limit value for WWTPs emission of nitrous oxide emissions (plants > 30,000 PE) with the aim of reducing the plant emissions by 50% (Climate Plan for a Green Waste Sector and Circular Economy, 2020).

By applying simple mitigation/control strategies, nitrous oxide emissions from WWTPs can be reduced to a certain extent. However, it is essential to integrate these strategies and the underlying microbiological processes in order to achieve a comprehensive  $\text{N}_2\text{O}$  control while taking the plants' existing discharge limits into account. This is the main focus of the  $\text{N}_2\text{O}$  Kontrol project – developing and demonstrating a comprehensive software solution for reducing  $\text{N}_2\text{O}$  at WWTPs (section 1).

During the project, the solution's elements -  **$\text{N}_2\text{O}$  Kontrol** ( $\text{N}_2\text{O}$  mitigation/control),  **$\text{N}_2\text{O}$  emission, DNA fantastic** and **Optimal sludge age** - were implemented at the WWTP (in Hubgrade) with the aim of reduction of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions at the participating plants (section 2). The project demonstrates, that:

- It is possible to achieve >50% reduction in  $\text{N}_2\text{O}$  emissions through targeted control strategies, particularly at plants with high  $\text{N}_2\text{O}$  emission factors (section 3). However, the effect of targeted control strategies is more limited at plants with low emission factors.
- Optimizing nitrogen removal at WWTPs, through optimized phase lengths and aeration intensity, not only supports reduced  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from the plants, but it is also possible to achieve increased treatment efficiency and thereby reduce nitrogen discharge to the down stream water bodies as well as reduce N-time (aeration) - which can lead to energy savings (section 3).

The  $\text{N}_2\text{O}$  Kontrol project also offers important insights into the  $\text{N}_2\text{O}$  emission profiles and dynamics of the WWTPs and the microbial communities that lead to  $\text{N}_2\text{O}$  production at the plants (section 4). Identifying which microbial pathways that lead to  $\text{N}_2\text{O}$  production can provide valuable insight and support which of the mitigation strategies to use for reducing  $\text{N}_2\text{O}$  production at individual plants.

From the tested control/mitigation strategies (section 3), the insight into  $\text{N}_2\text{O}$  dynamics and emissions at the plants as well as the microbiological communities that lead to  $\text{N}_2\text{O}$  production (section 4), the project has developed a method for targeted reduction of  $\text{N}_2\text{O}$  from WWTPs (section 5). The method is based on the microbiological pathways that lead to  $\text{N}_2\text{O}$  production and provides step-by-step guidance for identifying relevant control/mitigation strategies that are able to reduce  $\text{N}_2\text{O}$  production and emissions from plants.

With the project's efforts, it was possible to create a comprehensive database on nitrous oxide dynamics and emissions from WWTPs (in Hubgrade), which collects unique knowledge of  $\text{N}_2\text{O}$  emissions, the microbiology behind  $\text{N}_2\text{O}$  production, and which mitigation/control strategies that can be applied for a lasting reduction of emissions from WWTPs (section 6). The project has laid the foundation for Danish utilities to achieve a 50% reduction in  $\text{N}_2\text{O}$  emissions from WWTPs, and thereby contribute to the political goal of an energy and climate-neutral Danish water sector.

## Projektets betydning for vandbranchen

I N<sub>2</sub>O Kontrol projekt demonstreres hvordan en helstøbt softwareløsning kan reducere lattergasemission fra danske renseanlæg, uden behov for større anlægsændringer eller kapacitetsudvidelser. Med en solid forståelse for anlæggenes lattergasdynamik og de mikrobiologiske *pathways* der leder til lattergasproduktion under kvælstoffjernelse i processen, er det muligt at opnå 50% reduktion i lattergasudledningen fra anlæg med høje N<sub>2</sub>O emissionsfaktorer. Projektet bidrager således til, at danske renseanlæg kan reducere lattergas, idet Miljøstyrelsens regulering træder i kraft og dermed også til målsætningen om en klima- og energineutral vandbranche.

Projektet stiller også en konkret metode til rådighed for danske forsyninger, så de selv kan identificere og implementere relevante styringsstrategier på deres individuelle renseanlæg og dermed reducere lattergasemissionerne. Danske forsyninger har generelt et stort fokus på at reducere deres klimaaftryk, og der er en betydelig interesse og nysgerrighed for løsninger, der kan bidrage til reduktioner uden at kræve store investeringer. Projektets resultater og værktøjer imødekommer netop dette behov ved at demonstrere, hvordan N<sub>2</sub>O-emissioner kan reduceres gennem en helstøbt softwareløsning.

## Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Med N<sub>2</sub>O Kontrol projektet videreudvikles og sammentænkes en række stylinger i Hubgrade platformen til en holistisk N<sub>2</sub>O reduktion på renseanlæg, der bestemt er parat til både det danske og internationale marked. Det danske marked er langt fremme, og teknologien bliver højaktuel for Miljøstyrelsens regulering af lattergasemissioner træder i kraft. Med danske forsyninger som *front runners* for reduktion af lattergas, bliver den danske vandbranche et eksempel for det internationale marked, når lattergas ligeledes får fokus her. Aktuelt er der særligt fokus i bl.a. UK og USA på måling af lattergas mhp. at etablere et større vidensniveau hvad angår baseline emissioner. Når internationale renseanlæg engang underlægges regulering af lattergasemissioner, vil teknologien og styringsværktøjerne skabt i dette projekt hurtigt kunne tilbydes til og implementeres på det internationale marked - hvor Hubgrade i forvejen også er vidt udbredt.

## Næste skridt

Mange af de deltagende forsyninger ønsker fortsat at styre renseanlæggene med N<sub>2</sub>O Kontrol (element i beluftsstyringerne) samt at fortsætte realtidsberegningerne af lattergasemission fra anlæggene (N<sub>2</sub>O emission). Herudover ønsker en række af forsyningerne også at beholde labmodulet med beregning af Optimal slamalder (baseret på AOB'er), som indikerer om der er tilstrækkelige mængder af nitrifikanter til fuldstændig nitrifikation, og dermed sænker lattergasproduktionsraten i processen.

Krüger videreudvikler AI N<sub>2</sub>O Kontrol i Hubgrade og vil løbende implementere og afprøve dette styringselement på både recirkulerende og altemnerende renseanlæg. N<sub>2</sub>O Kontrol elementerne er nu en fast del af Krügers lattergaspakke<sup>1</sup>, og indgår således som modul i tilbuddet til danske forsyninger om reduktion af N<sub>2</sub>O udledning via målrettet styring. Foruden dette har projektet givet inspiration til det videre arbejde med reduktion af lattergasproduktionen i processen, hvor bl.a. Optimal slamalder (koblet med DNA fantastic) kan implementeres til forbedret slamudtag, COD-dosering (og/eller bypass af evt. forklaringskøle) under høj lattergaskoncentration i DN-faserne kunne implementeres og afprøves ifm. beluftsstyringerne (AI og regelbaseret).

Uden om projektet har Krüger drevet både en lattergas ERFA-gruppe samt en følgegruppe af renseanlæg, der ligeledes har afprøvet en række af de N<sub>2</sub>O reducerende elementer, som præsenteres i nærværende projekt (afsnit 1). I denne forbindelse har Krüger bl.a. udarbejdet en rapport til samtlige følgegruppe-anlæg med forslag til handlingsplaner for reduktion af lattergas på de

---

<sup>1</sup> <https://www.kruger.dk/lattergas>

individuelle renseanlæg. Følgegruppe-anlæggene kan således fortsætte arbejdet med reduktion af lattergas.

BIOFOS vil fortsætte arbejdet med at måle og reducere udledningen af lattergas fra deres renseanlæg. Resultaterne fra projektet vil blive anvendt aktivt i BIOFOS' arbejdet med at udvikle og implementere nye reduktionsstrategier. Samtidig vil indsatsen blive udvidet, så den ikke kun omfatter Avedøre, men også Lynetten og Damhusåen renseanlæg - til en langvarig reduktion af forsyningens klimaaftryk fra lattergasudledningen. BIOFOS er også aktiv i forskellige ERFA-grupper, hvor viden om lattergas deles med fagpersoner fra danske forsyninger, studerende og gæster - både danske og internationale.

Hvorum alt afventer de danske spildevandsforsyninger stadig den kommende regulering af lattergasemissioner fra renseanlæg. Når reguleringen træder i kraft, vil forsyningerne lettere være i stand til at vurdere de miljømæssige og økonomiske investeringer der skal til, for at reducere lattergas på renseanlæggene i tilstrækkelig grad. I denne forbindelse vil reguleringsformen - afgift eller grænseværdi og i så fald hvilke(n) - være en afgørende driver for, hvilke tiltag der implementeres på renseanlæggene - og i hvilket omfang. Projektet tilbyder - både nu og på sigt - en helstøbt løsning til reduktion af lattergasudledning uden behov for væsentlige investeringer i eks. kapacitetsudvidelser.

## Formidlingsplan

Resultaterne skabt i N<sub>2</sub>O Kontrol projektet er løbende blevet formidlet og vil fortsat blive formidlet via nedenstående:

- Dansk Vand Konference mhp. at inspirere danske forsyninger til reduktionen af lattergas.
- LinkedIn ifm. løbende formidling af projektets resultater samt formidling af den endelig VUDP projektrapport.
- Krüger-Veolia markedsføring, herunder også N<sub>2</sub>O reduktionsmodulet i Krügers lattergaspakke.
- Krügers lattergas ERFA-gruppe, hvor 30-40 danske forsyninger er præsenteret og løbende erfaringsudveksler.
- BIOFOS har præsenteret projektet og det tilhørende arbejde ved flere lejligheder - både for besøgende studerende, internationale gæster og delegationer samt på ERFA-møder for fagkolleger

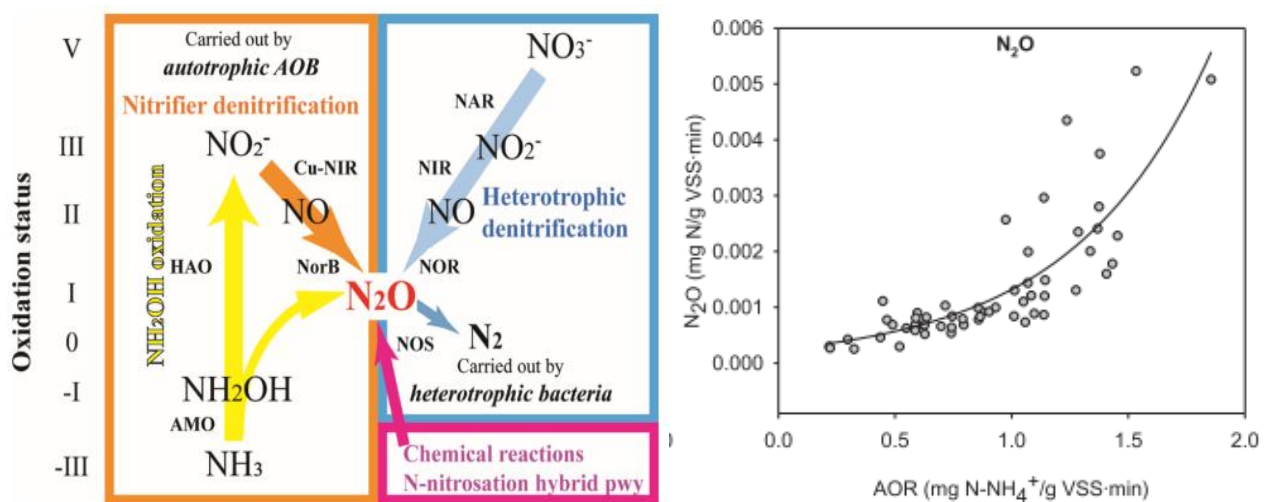
## Introduktion

Lattergas ( $\text{N}_2\text{O}$ ) er en potent drivhusgas og spildevandsbranchens udledning af denne har længe været i fokus, da det vurderes, at store dele af branchens klimaaftryk stammer fra  $\text{N}_2\text{O}$  emissionen fra de biologiske renseprocesser. Det blev tilbage i 2020 således politisk besluttet, at der for branchen skulle indføres en grænseværdi for renseanlæggenes (anlæg  $> 30.000$  PE) lattergasudledning med målet om at nedbringe anlæggenes emission med 50% (*Klimaplan for en grøn affaldssektor og cirkulær økonomi, 2020*).

I de foregående år var der udstedt en MUDP-pulje til måling og kvantificering af de danske renseanlægs lattergasudledning som foranlediget et stort datagrundlag der i dag ligger til grund for den danske baseline emissionsfaktor på  $0,84 \text{ N}_2\text{O-N}/\text{TN}_{\text{ind}}$  (Miljøstyrelsen, 2020). Studiet er siden blevet udvidet og der er forelagt specifikke forslag til reguleringsmetoder samt retningslinjer for bl.a. måling, beregning og ekstrapolation af emissionerne, såvel som forslag til emissionsreducerende tiltag (Miljøstyrelsen, 2024).

Den nært forestående regulering af lattergasemissionen fra de danske renseanlæg medfører et akut behov for styringstiltag, der kan indføres på renseanlæggene mhp. at emissionerne hurtigt kan nedbringes under hensyntagen til, at anlæggenes øvrige kravværdier overholdes. Lattergasproduktion og -emission er dog komplekst, mikrobiologisk såvel som proces teknisk, og kan være meget forskelligt fra anlæg til anlæg. Det er således nødvendigt at indføre **helstøbt lattergasstyring** der rummer det enkelte renseanlægs mikrobiologiske processer, styringstekniske muligheder, udledningskrav mv.

Lattergas produceres som et naturligt biprodukt under flere trin i biologisk kvælstoffjernelse under spildevandsrensning. Dog risikeres udledning af lattergas til atmosfæren i tilfælde af, at den biologiske omsætning til frit nitrogen er ufuldstændig (Duan *et al.*, 2021, se også figur 1, venstre).



Figur 1: Pathways der leder til lattergasproduktion under biologiske kvælstoffjernelse (venstre, Duan *et al.*, 2021) samt korrelationen mellem den specifikke lattergasproduktionsrate og den mikrobiologiske ammoniumoxideringsrate, AOR (højre, Law *et al.*, 2012).

Biologisk lattergasproduktion kan under spildevandsrensning opstå via følgende *pathways* (figur 1, venstre):

- Nitrifikant nitrifikation (*hydroxylamine pathway*), hvor ammoniumoxiderende bakterier faciliterer ufuldstændig omdannelse af hydroxylamin ( $\text{NH}_2\text{OH}$ ) til nitrit ( $\text{NO}_2^-$ ) og således ophober lattergas.
- Nitrifikant denitrifikation, hvor nitritoxiderende bakterier faciliterer ufuldstændig omdannelse af nitrit til nitrat ( $\text{NO}_3^-$ ) og således ophober lattergas.
- Heterotrof denitrifikation hvor denitrifikanter faciliterer ufuldstændig omdannelse af nitrogenoxid ( $\text{NO}$ ) til frit nitrogen ( $\text{N}_2$ ) og således ophober lattergas.

Hertil er det påvist, at raten hvormed lattergas produceres korrelerer med den mikrobiologiske aktivitet – hvor en høj ammoniumomsætningsrate (AOR) dikterer en høj lattergasproduktionsrate (Law et al., 2012, se også figur 1, højre). Det er således muligt at reducere lattergasproduktionen på et renseanlæg bl.a. ved at optimere mængden og aktiviteten af de bakterier der foretager ammoniumoxidation.

Medvidere indvirker andre forhold såsom tilgængelig ilt under nitrifikationen og tilgængeligt kulstof under denitrifikationen på, at der i processen kan ske en fuldstændig omsætning af kvælstof til frit nitrogen uden at lattergas i mellemtiden udledes til atmosfæren.

En række tidligere studier har afprøvet forskellige tiltag til at reducere lattergasemissioner fra renseanlæg, herunder bl.a.:

- Simultan nitrifikation/denitrifikation (Miljøstyrelsen, MUDP rapport, 2022)
- Optimeret nitrifikationsfase (Ekström et al., 2017)
- Optimeret COD/N ratio (Andalib et al., 2018)
- Optimeret slamalder (Lotito et al., 2012)

Ved at anvende enkelte styringstiltag kan lattergasudledningen reduceres til en vis grad. Dog er det essentielt at sammentænke de mulige reduktionstiltag og de bagvedliggende mikrobiologiske processer, for at opnå til helstøbt  $\text{N}_2\text{O}$  kontrol, således at:

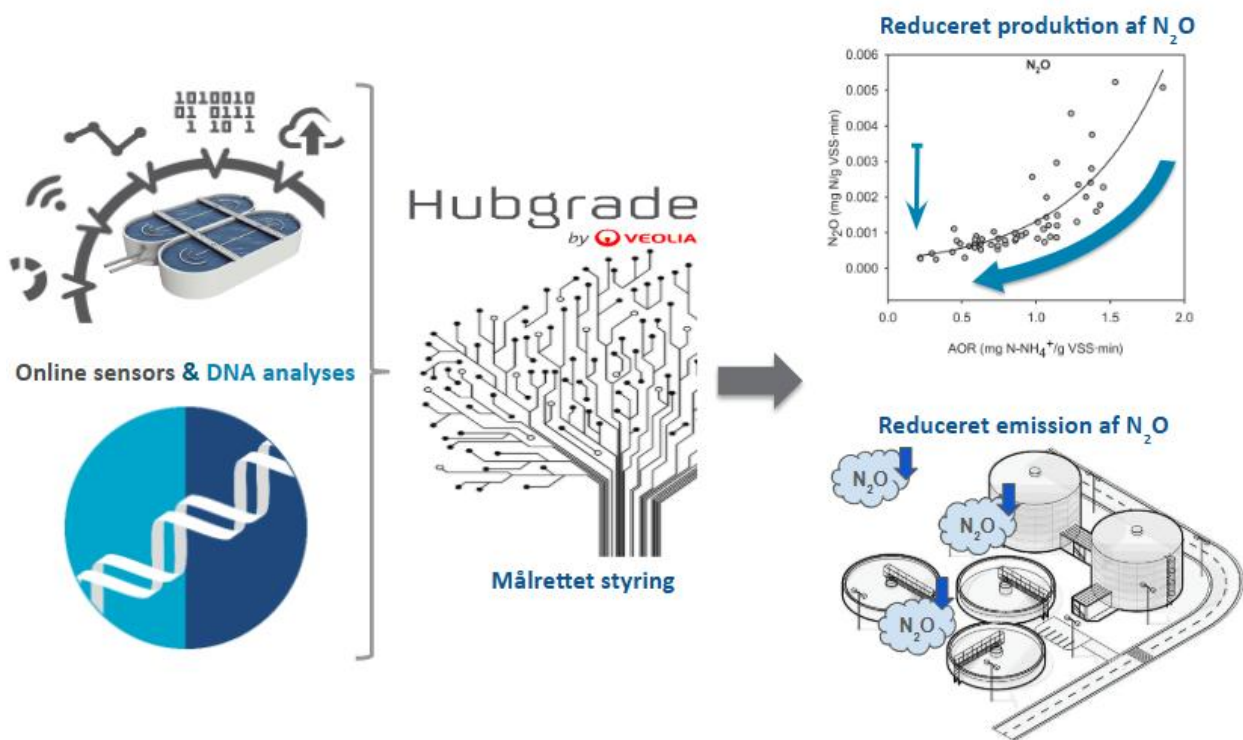
- lattergasproduktionen under den biologiske renseproces holdes lav, og at
- lattergasemissionen i videst muligt omfang reduceres, når lattergas opstår i processen

stadig under hensyntagen til renseanlæggenes eksisterende udledningskrav såvel som de eksisterende procestekniske muligheder (anlægsconfiguration, beluftning mv.).

Netop dette fokuserer  $\text{N}_2\text{O}$  Kontrol projektet på – at udvikle og demonstrere en helstøbt løsning til reduktion af lattergas på renseanlæg. Styringerne bygger videre på Krügers (Veolias) eksisterende software og user interface (platform) til monitorering og styring af renseanlæg, Hubgrade Wastewater Performance Plant<sup>2</sup>. I projektet udvikler Krüger en helstøbt løsning til reduktion af lattergas, der bl.a. kombinerer sensordata og DNA-data (figur 2). Styringerne implementeres og demonstreres i fuldskala på renseanlæggene hos de 8 deltagende forsyninger.

---

<sup>2</sup> <https://www.kruger.dk/hubgrade>



Figur 2: Illustration af helstøbt styring der kombinerer online sensorer på renseanlægget og DNA-data med målrettet styring og reduktion af lattergasproduktion såvel som -emission.

## De deltagende renseanlæg

**Aalborg Renseanlæg Øst** (under Aalborg Forsyning) er et 96.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Aalborg. Anlægget belastes aktuelt med omtrent 110.000 PE/år og modtager spildevand fra både husholdninger og industri i oplandet. Anlægget består af 2 proceslinjer (biodenitro), hvor begge linjer er bestykket med sensorer til overvågning af den biologiske proces. Samtlige tanke er bestykket med bundbeluftningssystem.

**Agtrup Renseanlæg** (under BlueKolding) er et 125.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Kolding. Anlægget er aktuelt belastet med ca. 90.000 PE/år og modtager spildevand primært fra husholdninger i oplandet og i mindre grad industri. Agtrup Renseanlæg består af 2 linjer af procestanke (biodenitro), hvoraf kun tankene i den ene linje (L1) aktuelt er bestykket med sensorer til overvågning af den biologiske proces. Den anden linje (L2) driftes med udgangspunkt i proceskoncentrationerne i L1. Samtlige tanke er bestykket med bundbeluftningssystem.

**Avedøre Renseanlæg** (under BIOFOS) er et 460.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Hvidovre. Anlægget er aktuelt belastet med ca. 400.000 PE/år og modtager primært alm. kommunalt spildevand fra husholdninger i oplandet. Anlægget består af 4 linjer af procestanke (biodenitro), hvoraf samtlige 4 linjer er bestykket med sensorer til at overvåge den biologiske proces. Samtlige tanke er bestykket med bundbeluftningssystem.

**Bjergmarken Renseanlæg** (under Fors) er et MBNDK-anlæg dimensioneret til 125.000 PE og beliggende i Roskilde. Anlægget er aktuelt belastet med ca. 83.000 PE og modtager primært almindeligt kommunalt spildevand fra husholdninger i oplandet uden væsentlig industripåvirkning.

Anlægget består af et hovedanlæg med to linjer af bundbeluftede procestanke (Bidenipho) samt en 2. etape bestående af ét sæt overfladebeluftede bidenitrotanke. Samtlige tanke og proceslinjer er udstyret med sensorer til overvågning af den biologiske proces.

**Hjørring Renseanlæg** (under Hjørring Vandselskab) er et 120.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Hjørring. Anlæggets belastning varierer en del fra år til år, dog er det aktuelt belastet med omtrent 87.000 PE, hvor industrispildevand udgør en større fraktion af belastningen (30-40%). Anlægget er et recirkulerende anlæg bestående af 4 stk. serieforbundne procestanke (med recirkulering imellem), hvoraf to tanke driftes udelukkende som DN-tanke, mens de øvrige to tanke driftes som N-tanke med alternerende beluftning der styres aktiveres afhængigt af hinanden. Tankene har forskellig sensorbestykning, hvor den primære procesovervågning foregår i den første DN-tank samt de to N-tanke. De 2 stk. N-tanke er bestykket med bundbeluftningssystem.

**Løgstør Renseanlæg** (under Vesthimmerlands Forsyning) er et 73.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Løgstør. Anlæggets belastning varierer kraftigt grundet en nærliggende fødevarerproduktion, der udgør størstedelen af stoftilførsel. Aktuelt overbelastes anlægget. Løgstør renseanlæg består af 2 proceslinjer (biodinitro), hvor kun den ene linje er bestykket med sensorer til at overvåge proceskoncentrationerne. Særligt for Løgstør Renseanlæg er, at L1 er bestykket med bundbeluftningssystem, mens L2 er bestykket med overfladebeluftning.

**Melby Renseanlæg** (under Halsnæs Forsyning) er et MBNDK anlæg godkendt til 41.600 PE, og belastes aktuelt med 35.500 PE. Omtrent 80% af belastningen kommer fra kommunalt spildevand (husholdninger og sommerhusområder) mens ca. 20% af belastningen stammer fra industri. Renseanlægget er et recirkulerende anlæg bestående af 5 anaerobe tanke og 6 tanke med alternerende beluftning. Anlægget er bestykket med bundbeluftningssystem og en række sensorer til overvåge proceskoncentrationerne i to af tankene.

**Mølleåværket** (under Lyngby Taarbæk Forsyning) er et 150.000 PE MBNDK anlæg lokaliseret i Lyngby. Anlæggets belastning varierer fra år til år, dog er det aktuelt belastet med omtrent 145.000 PE. Mølleåværket har 6 biodinitrotanke med bundbeluftningssystem og er det eneste anlæg for husspildevand i Danmark, der både har et MBR og MBBR-anlæg<sup>3</sup>. Halvdelen af belastningen bliver efter den mekaniske rensning tilledt de 4 biodinitrotanke (LT1-4) hvorimod den anden del af belastning først løber igennem 2 bidenitro tanke efterfulgt af 2 ekstra trin: efterdenitrifikation i MBBR (Moving Bed Biofilm Reactor) og MBR (Membrane Bio Reactor) som fjerner de sidste stofpartikler.

De otte renseanlæg i projektet anvender primært kontinuerte væskefasesensorer til måling af opløst N<sub>2</sub>O-N baseret på Unisense-teknologi (<https://unisense-environment.com/products/n2o-wastewater-sensor/>). Målingerne kombineres med data om lufttilførsel og procesforhold i Hubgrade til beregning af den faktiske N<sub>2</sub>O-emission. På Agtrup Renseanlæg blev der i den første periode anvendt sensorer fra Duotec til måling af N<sub>2</sub>O (<https://www.teknologisk.dk/ydelser/ny-sensor-skal-hjaelpe-reseanlaeg-med-at-maale-klimaaftryk-fra-lattergas/44496>) hvorefter der er overgået til væskefasesensorer fra Unisense.

---

<sup>3</sup> MBBR (moving bed bioreactor) anlægget fungerer som efterdenitrifikation mens MBR (membrane bioreactor) anlægget er installeret som filtreringstrin.

## Projektbeskrivelse

### Formål

Formålet med N<sub>2</sub>O Kontrol er, at muliggøre, at de danske renseanlæg kan opnå 50 % reduceret lattergasemission. Den bedste metode til at reducere lattergasemissionen fra renseanlæg er via udvikling og implementering af dynamiske styringsløsninger med dokumenteret effekt.

Projektet bygger videre på de seneste års landvindinger inden for viden om lattergas i renseanlæg og udviklingen af nye dynamiske styrings- og kontrolmetoder. Projektet inkluderer en stor gruppe af forskellige renseanlæg og fokuserer på fuldskala demonstration og grundig driftsdokumentation.

Baseret på Veolias eksisterende software teknologi, Hubgrade<sup>4</sup>, udvikler projektet en ny helstøbt løsning til kontrol af lattergas på renseanlæg, demonstrerer den i fuldskala på 8 renseanlæg og dokumenterer effekten efter langvarig drift.

### Output

Med projektparternes tætte samarbejde og projektets aktiviteter, leveres følgende:

1. en ny, helstøbt softwareløsning til reduktion af lattergas på renseanlæg (afsnit 1),
2. implementering af styringer til lattergasreduktion på 8 forskellige renseanlæg (afsnit 2),
3. grundig dokumentation af styringernes effekt på energi, miljø og klima (afsnit 3),
4. viden og indsigt i lattergasdynamikken i danske renseanlæg (4),
5. en vejledning og metode til aktivt at arbejde med reduktion af lattergas i renseanlæg (afsnit 5) og
6. en omfattende database for lattergasdynamik og -emission i renseanlæg (afsnit 6).

Projektet N<sub>2</sub>O Kontrol blev påbegyndt i midten af 2023. De fleste af renseanlæggene var i forvejen styret via Hubgrade, mens Hubgrade blev implementeret og indkørt fra bunden på Hjørring Renseanlæg og Løgstør Renseanlæg i starten af projektet. I projektets baseline måleår (2023-2024) blev forskellige styringstiltag ang. beluftning (regelbaseret og AI, se afsnit 1.1) testet på renseanlæggene, hvorefter der i fra 2024-2025 blev implementeret N<sub>2</sub>O Kontrol (aktiv styring af lattergas, se afsnit 2) i de udvalgte valgte beluftningsstyringer til det enkelte renseanlæg.

---

<sup>4</sup> Hubgrade er Veolias eksisterende digitale softwareløsning til styring, dataopsamling og realtidsberegninger ifm. drift af bl.a. renseanlæg.

## Projekresultater

### 1. Helstøbt software løsning til reduktion af lattergas på renseanlæg

I projektet er der udviklet en samlet og helstøbt løsning til reduktion af lattergasemission fra renseanlæg (figur 3). Løsningen er et resultat af både videreudvikling af eksisterende Hubgrade moduler samt nyudvikling af moduler, og inkluderer samlet set følgende delelementer:

- **N<sub>2</sub>O kontrol** (N<sub>2</sub>O-styring), der via styring af renseanlæggenes beluftningssystem reducerer lattergasproduktionen samt -emissionen fra de biologiske processer (se afsnit 1.1). For at imødekomme styringsmulighederne på renseanlæg med forskellig anlægskonfiguration (bio-denitro/alternerende og recirkulerende anlæg) er 2 typer af beluftningsstyring videreudviklet med **N<sub>2</sub>O kontrol**, herunder:
  - **AI N<sub>2</sub>O kontrol** der reducerer lattergas via *model predictive control* under hensyntagen til energiforbrug, afløbskvalitet, spildevandsafgift (afsnit 1.1.1).
  - **Regelbaseret N<sub>2</sub>O kontrol** der reducerer lattergas under hensyntagen til afløbskvalitet (afsnit 1.1.2).
- **N<sub>2</sub>O emission**, der håndterer N<sub>2</sub>O måledata fra renseanlæggene og foretager realtidsberegning af N<sub>2</sub>O emissionerne (se afsnit 1.2).
- **DNA fantantastic**, der håndterer renseanlæggenes mikrobielle DNA-data (se afsnit 1.3)
- **Optimal slamalder**, der på baggrund af bl.a. DNA-data fra det specifikke renseanlæg beregner den optimale aerobe slamalder til fuldstændig nitrifikation, hvormed mikrobiologien for de bedst mulige forudsætninger for at opretholde en lav ammoniumoxideringsrate (AOR) og dermed en lav lattergasproduktionsrate (se afsnit 1.4).



Figur 3: Elementer i en samlet og helstøbt softwareløsning til reduktion af N<sub>2</sub>O emission fra renseanlæg.

## 1.1 N<sub>2</sub>O kontrol – element i beluftningsstyringer som reducerer N<sub>2</sub>O emission

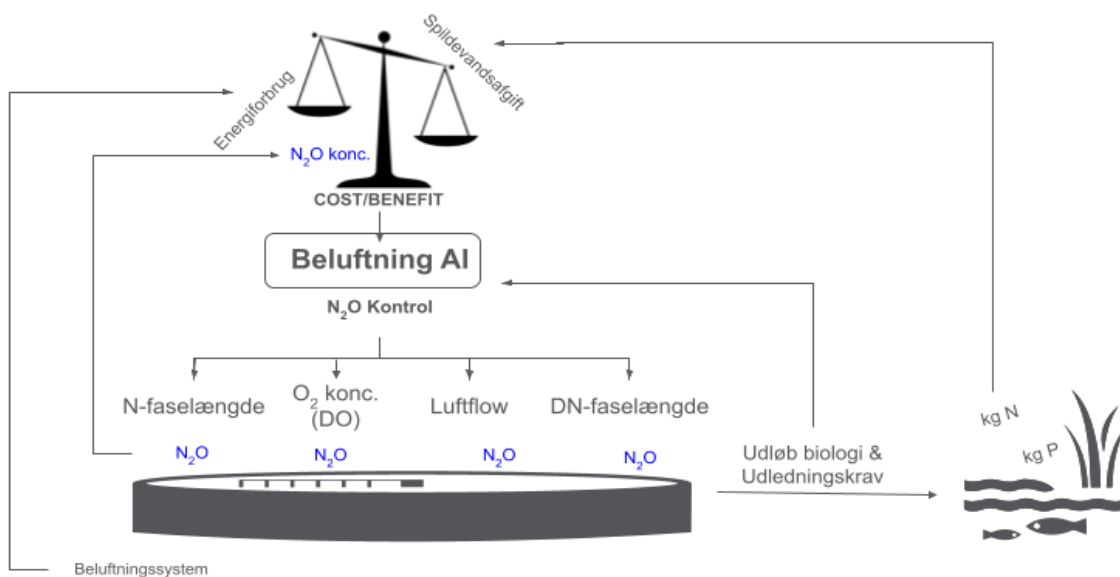
I løbet af projektperioden er N<sub>2</sub>O kontrol-modulerne i Hubgrade, AI og regelbaseret, hhv. blevet udviklet og videreudviklet. Modulerne blev implementeret i Hubgrades eksisterende beluftningsstyringer, således at beluftning af renseanlæggenes biologiske tanke løbende tilpasses N<sub>2</sub>O-koncentrationen i processen.

### 1.1.1 AI N<sub>2</sub>O kontrol

Den AI-baserede N<sub>2</sub>O kontrol (AI-baseret N<sub>2</sub>O-styring) blev i projektet implementeret som en del af Hubgrade styringen 'Beluftning AI'. Styringen blev indledningsvist udviklet og tilpasset recirkulerende anlæg, og indeholder en underliggende cost/benefit beregning af de samlede omkostninger ift. energiforbrug på beluftning og spildevandsafgift ved udledningen af det rensede spildevand. I løbet af projektet blev der bl.a. udviklet og implementeret en AI-baseret model i styringen, der forudsiger udviklingen af lattergaskoncentrationen i processen (Debel *et al.*, 2025). N<sub>2</sub>O-N koncentrationen i processen giver input til cost/benefit analysen og påvirker beregningen, så AI-styringen prioriterer procesforhold, der fordrer lavere N<sub>2</sub>O produktion og dermed indirekte mindre emission (se principskitse i fig. 4).

AI styringen inkluderer fastsatte anlægsspecifikke grænser for tilladt udledning af kvælstof med specificering af, hvorvidt totalkvælstof eller ammonium skal prioriteres højest eller eventuelt prioriteres lige. Styringen skal til alle tider opretholde de valgte grænser og prioriteringer før N<sub>2</sub>O minimering kan prioriteres, og den varierer setpunkter til iltkoncentration og luftflow samt længerne af N- og DN-faserne inden for disse rammer. Når udledningskvaliteten er opretholdt, varierer styringen parametre (DO, luftflow og faselængde) alt efter, hvad beregnes som økonomisk er mest optimalt på det givne tidspunkt. Det er for hvert renseanlæg muligt at fastsætte anlægsspecifikke grænser for bl.a. afløbskvalitet, samt min. og max. DO og luftflow setpunkter mv.

Styringen blev i projektperioden også afprøvet på alternerende anlæg, men krævede ekstra udvikling. Styringen er siden blevet videreudviklet og finpudset til alternerende anlæg og igen under afprøvning på referenceanlæg uden for nærværende projekt.



Figur 4: Principskitse i Hubgrade styringen Beluftning AI inkl. N<sub>2</sub>O kontrol.

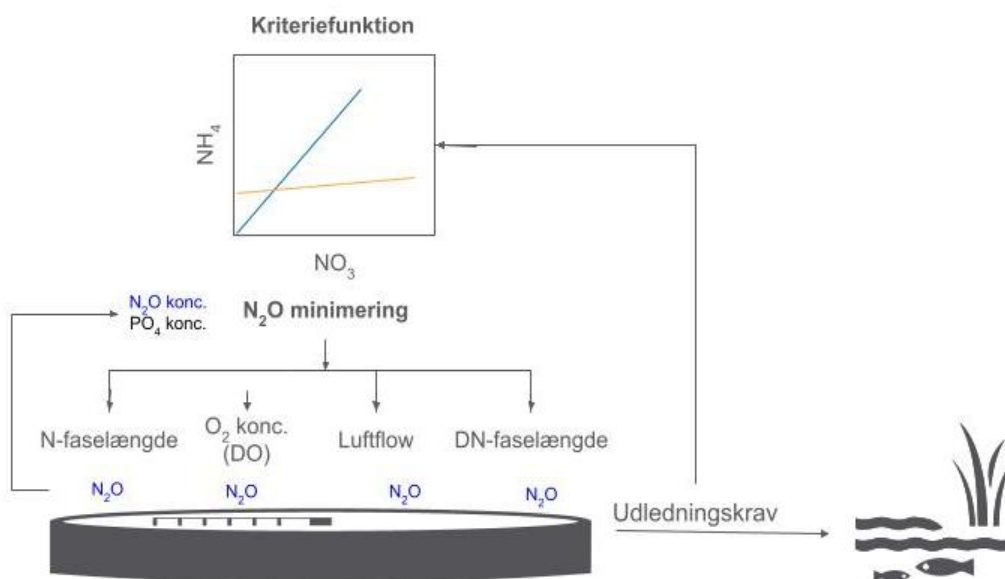
### 1.1.2 Regelbaseret N<sub>2</sub>O kontrol

Den regelbaserede N<sub>2</sub>O kontrol (regelbaseret N<sub>2</sub>O-styring) blev i projektet videreudviklet og implementeret som en del af Hubgrade styringen 'Beluftning'. Selve beluftningens aktivering er dikteret af en kriteriefunktion (NH<sub>4</sub> vs. NO<sub>3</sub> koncentrationen), der bestemmer om N-fase eller DN-fasen i tanken skal afsluttes. Under projektet er N<sub>2</sub>O-minimeringsmodulet i denne styring videreudviklet, så den i dag indeholder grænser for N<sub>2</sub>O-N koncentrationen i væskefasen, som både afslutter N-fasen og som forlænger DN-fasen, selvom kriteriefunktionen dikterer anderledes (se principskitse i fig. 5).

Her er det muligt at fastsætte en grænse for maksimalt tilladte NH<sub>4</sub> koncentration der tillader at N<sub>2</sub>O minimeringen er aktiv. Overskrides den fastsatte NH<sub>4</sub> koncentration vil kriteriefunktionen overstyre N<sub>2</sub>O minimeringen, og beluftning vil være aktiv.

Det samme gør sig iøvrigt gældende for fosfor, hvor en fastsat grænse for maksimalt tilladte PO<sub>4</sub> koncentrationen tillader om N<sub>2</sub>O minimeringen er aktiv. Overskrides PO<sub>4</sub> den fastsatte koncentration under DN-fasen tillades N<sub>2</sub>O minimeringen i form af forlængelse af DN-fasen ikke.

Efter videreudviklingen af N<sub>2</sub>O minimering-modulet blev det idriftsat og afprøvet på de alternerende renseanlæg i nærværende projekt.



Figur 5: Principskitse i Hubgrade styringen Beluftning inkl. N<sub>2</sub>O minimering.

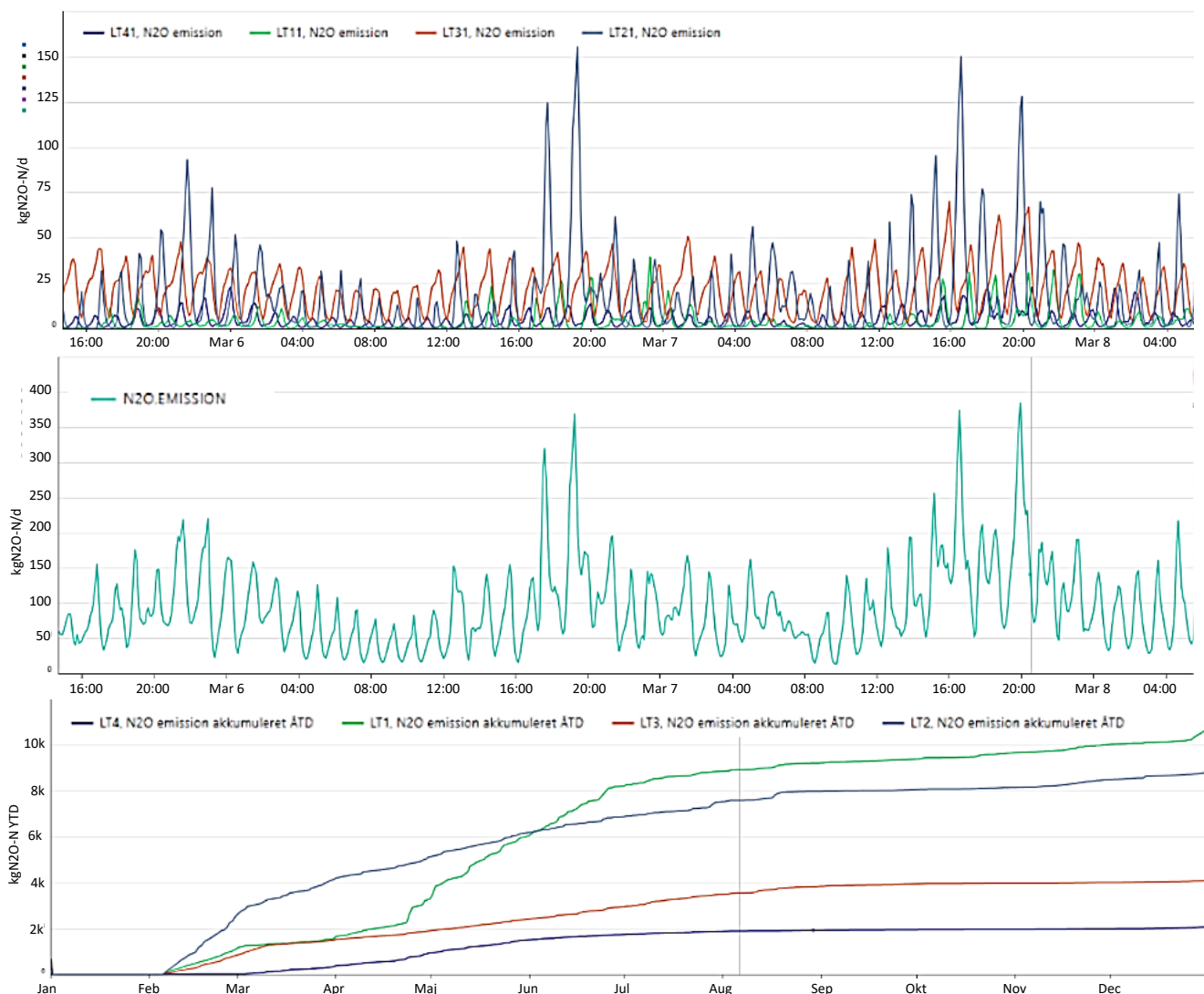
Under projektets gennemførelse viste det sig nødvendigt at supplere den AI-baserede styring med regelbaseret styring, da AI-løsningen endnu ikke muliggjorde de forventede emissionsreduktioner på alle anlæg (især på dem med alternerende drift). Den regelbaserede kontrol har derimod fungeret som en robust og driftsklar løsning, der muliggør en stabil reduktion af N<sub>2</sub>O-emissioner, samtidig med at der opbygges data og erfaring til videreudvikling af AI-løsningen.

AI-kontrollen er fortsat under udvikling og viser lovende resultater, men er endnu ikke på samme modenhedsniveau som den regelbaserede styring. De to tilgange skal derfor ses som komplementære, hvor den regelbaserede kontrol sikrer kortsigtet effekt, mens AI forventes at muliggøre yderligere optimering på længere sigt.

## 1.2 N<sub>2</sub>O emission – realtidsberegning af lattergasemission

N<sub>2</sub>O emission er et eksisterende beregningsmodul i Hubgrade, der via N<sub>2</sub>O-N koncentrationer i væskefasen samt lufttilførsel til procestanken foretager realtidsberegning af N<sub>2</sub>O emissionen på renseanlægget<sup>5</sup>. Beregningsmodulet blev i starten af projektet implementeret på samtlige af de deltagende renseanlæg. Det var således muligt at følge dynamikken i lattergasudledningen fra det enkelte renseanlæg - i realtid - samt løbende evaluere N<sub>2</sub>O-reducerende tiltag såvel som overordnet klimabelastning fra renseanlægget (se eksempel fra Avedøre Renseanlæg i fig. 6).

På de nedenstående grafer (fig. 6) ses resultaterne af emissionsberegningerne for Avedøre Renseanlæg. På anlægget er der installeret N<sub>2</sub>O-sensorer i alle proceslinjer (LT1-LT4), hvilket muliggør beregning af N<sub>2</sub>O-N emissionen for hver enkelt linje (øverste graf), den samlede emission for alle fire linjer (midterste graf) samt den akkumulerede emission over året (nederste graf). Dette giver et unikt indblik i den enkelte proceslinjes bidrag til anlæggets samlede lattergasemission.

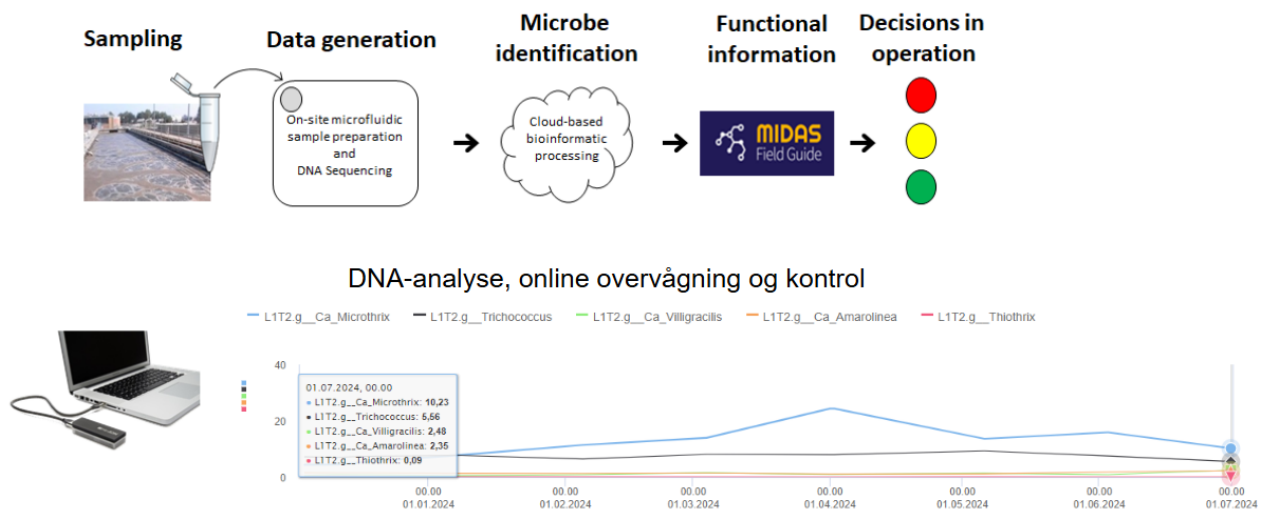


<sup>5</sup> jf. Leverandørens (Unisense) anvisninger som beregning af N<sub>2</sub>O masseoverførsel.

Figur 6: Beregning af  $N_2O$ -N emissioner for de enkelte proceslinjer (øverst), samlet emission for alle biologiske proceslinjer på anlægget (midterste graf) samt akkumuleret emission over året (nederst). Emissionerne er beregnet på baggrund af  $N_2O$ -N målinger i væskefasen samt lufttilførsel til og temperatur i procestankene (fx LT31 –  $N_2O$  Emission). De enkelte bidrag er herefter summeret til den samlede emission for alle procestanke ( $N_2O$ .EMISSION). Den akkumulerede  $N_2O$ -N emission for hver linje er beregnet som summen af den daglige  $N_2O$ -N emission. For Avedøre Renseanlæg starter den akkumulerede opgørelse i februar 2025, da dette var tidspunktet, hvor målingerne blev genoptaget efter reparation af måleudstyret.

## 1.3 DNA Fantastic

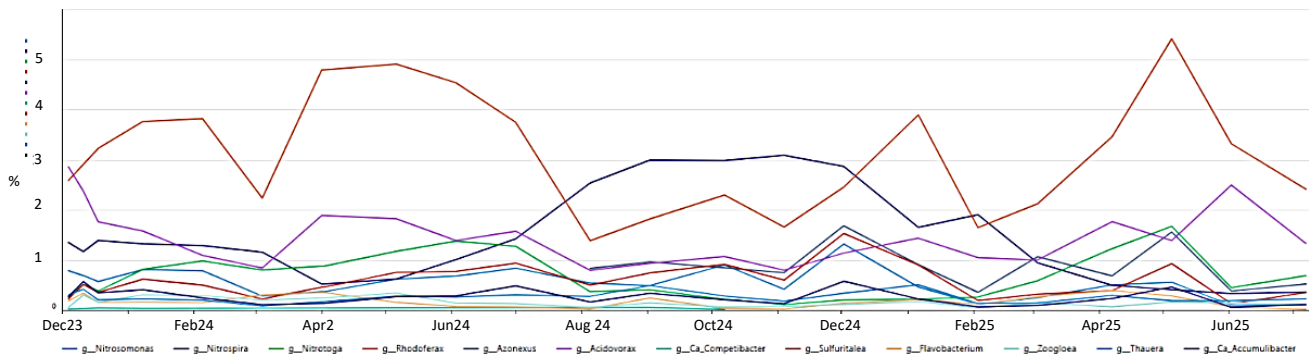
DNA Fantastic er et eksisterende Hubgrade-modul, som tilbyder en overskuelig og effektiv overvågning af mikrobiologien på det enkelte renseanlæg. Modulet kortlægger regelmæssigt den mikrobiologiske sammensætning via DNA-sekventering og klassificering af prøver af aktivt slam fra anlæggenes biologiske tanke (se principskitse i fig. 7).



Figur 7: Kortlægning af det mikrobiologiske samfund via DNA-sekventering og klassificering samt visualisering af genera i Hubgrade-modulet DNA Fantastic (relativ forekomst af bakterier som nitrifikanter, denitrifikanter, PAO mv.)

DNA Fantastic blev implementeret på samtlige deltagende renseanlæg ved projektets start. I løbet af projektperioden blev der på hvert renseanlæg løbende udtaget prøver af aktivt slam, som blev sekventeret med henblik på klassificering af bakteriesammensætningen<sup>6</sup>. Resultaterne blev præsenteret i DNA Fantastic-modulet og anvendt til kontinuerlig overvågning af udviklingen i de mikrobiologiske samfund, herunder den relative forekomst af nitrifikanter, denitrifikanter, fosfat akkumulerende organismer (PAO), trådformede bakterier m.fl. Denne overvågning giver bl.a. mulighed for at følge specifikke bakteriegrupper – særligt nitrifikanter og denitrifikanter – som kan bidrage til dannelse af lattergas på renseanlæggene (se eksempel fra Aalborg Renseanlæg i figur 8).

<sup>6</sup> Sekventering og klassificering udført af DNASense (<https://dnasense.com/>)



Figur 8: Graf for den relative forekomst af alle kendte nitrifikanter og denitrifikanter i Aalborg Øst renseanlæg. Nitrifikanter (*Nitrosomonas*, *Nitrospira* og *Nitrotoga*) og Denitrifikanter (*Rhodoferrax*, *Azonexus*, *Acidovorax*, *Ca\_Competibacter*, *Sulfuritalea*, *Flavobacterium*, *Zoogloea*, *Thauera* og *Ca\_Accumulibacter*) fra Aalborg Øst renseanlæg. Udtagede slamprøver fra december 2023 til juli 2025 blev løbende sekventeret og klassificeret af DNASense.

## 1.4 Optimal slamalder baseret på forekomsten af AOB'er

I projektet blev der udviklet et nyt modul i Hubgrade til beregning af optimal slamalder (teoretisk minimum slamalder) baseret på det faktiske indhold af ammoniumoxiderende bakterier (AOB) på renseanlæggene. Modulet anvender resultater fra DNA-sekventeringer, som kombineres med omsætningshastigheden af ammonium (ammonium omsat pr. tidsenhed) samt mængden af slam i procestanken (SS-koncentration).

Hubgrade-plattformen samler alle nødvendige data og muliggør derfor, at beregningen udføres i realtid - baseret på sensordata (2 min. interval) og DNA-data (1 prøve pr. måned). Den beregnede optimale slamalder kan anvendes til at korrigere udtaget af overskudsslam på det enkelte renseanlæg, for således at opnå en optimal slamalder baseret på mængden af AOB'er i anlægget.

Modulet baserer sig på princippet vist i fig. 9: Kendes den specifikke væksthastighed for de nitrificerende bakterier ( $\mu_{AOB}$ ), kan der fastlægges en processpecifik minimum slamalder, som sikrer, at AOB'er ikke "udvaskes" fra systemet via for kraftig slamudtag, og at der således opretholdes stabil nitrifikation i anlægget. For nitrificerende bakterier gælder, at biomassen kun kan opretholdes, hvis:  $\mu_{AOB} \geq 1 / SRT$ , hvor:

- $\mu_{AOB}$  = faktisk specifik væksthastighed (korrigeret for temperatur, ilt og hæmning)
- SRT = slamalder i det aerobe system

Dette resulterer i en teoretisk minimum slamalder:  $SRT_{MIN} = 1 / \mu_{AOB}$ .

Denne værdi kan anvendes direkte som input til eks. slamalderstyring i Hubgrade eller tilsvarende styringssystemer.



### Beregning af teoretisk minimums aerob slamalder:

$$\theta_c \geq \frac{1}{\mu_N}$$

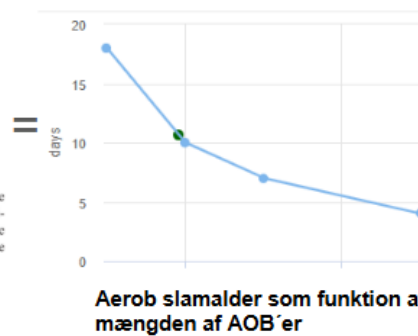
(35.9)

#### 35.3.4 Nitrification rate

Once the growth of the nitrifying bacteria is ensured by using a satisfactory sludge age based on the specific growth rate, it becomes necessary to calculate the nitrification rate, that is, the rate at which ammonia is converted into nitrate. The nitrification rate is a function of the mass of nitrifying organisms present in the aerated zones of the reactor and can be expressed as follows:

$\Delta TKN / \Delta t = (\text{unitary nitrification rate}) \times (\text{concentration of nitrifying bacteria})$

$$\frac{\Delta TKN}{\Delta t} = \left( \frac{\mu_N}{Y_N} \right) \cdot X_N \quad (35.10)$$



Figur 9: Principskitse - Teoretisk minimum slamalder for fuldstændig nitrifikation baseret på beregning af teoretisk minimum aerob slamalder sammen med SS-koncentration omregnet til  $X_N$ , ammoniumomsættelseshastigheden som  $\Delta TKN$  og udbytte af nitrificerende bakterier  $Y_N$ . Beregning af teoretisk slamalder: Von Sperling & de Lemos Chernicharo (2005).

Figur 10 nedenfor illustrerer funktionen/grafen, som den afbildes i Hubgrade platformen for Renseanlæg Aalborg Øst. Den beregnede minimum slamalder er vist som den lyseblå kurve, mens den beregnede mængde af AOB'er (ud fra DNA-analyseresultater og SS-koncentrationen) er vist i lilla. De to følger hinanden tæt og varierer med skiftende SS-koncentration i procestanken. Den grønne og den grå kurve viser til sammenligning den beregnede slamalder via fra Hubgrades traditionelle slamalderstyring, der ikke medtager den relative forekomst af AOB'er i processen, og som i dette tilfælde ligger lavere. Ved at anvende den beregnede minimum slamalder som et mål for slamudtag sikres, at mængden af AOB'er i Renseanlæg Aalborg Øst er stor nok til at facilitere fuldstændig nitrifikation.



Figur 10: Eksempel på slamalder som funktion af mængden af AOB'er (Nitrosomons) på Aalborg Øst renseanlæg i 2025. Grafen viser, at den AOB-baserede minimum slamalder følger variationer i AOB-indhold og SS-koncentration tæt og giver et mere procesnært styringsgrundlag end traditionelle, statiske slamalderkriterier. Figuren illustrerer følgende tidsserier: BIOLOGY.MASS.AOB – AOB-biomasse i processen, SETTling.AEROB MIN SRT OBSERVED – beregnet minimum slamalder baseret på AOB, EFTERKLARINGSTANK.LINE 1.AEROB SLUDGE AGE – faktisk slamalder, EFTERKLARINGSTANK.LINE 1.AEROB SLUDGE AGE SÆTPUNKT – traditionelt sætpunkt.

## 1.5 Helstøbt reduktion af $N_2O$ emission

Kombinationen af de nyudviklede og videreudviklede moduler i Hubgrade udgør en helstøbt løsning, der målrettet reducerer lattergasemissionen fra renseanlæg. AI og regelbaseret  $N_2O$  kontrol sikrer løbende optimering af beluftningen, så produktionen af  $N_2O$  minimeres uden at gå på kompromis med afløbskvalitet eller energiforbrug. Samtidig muliggør realtidsberegningen af  $N_2O$ -emission en kontinuerlig overvågning og evaluering af reduktionstiltagene, hvilket skaber grundlag for løbende justeringer og procesoptimering.

DNA Fantastic-modulet giver indsigt i mikrobiologien, herunder de bakteriegrupper, som direkte påvirker lattergasproduktionen, mens beregningen af optimal slamalder baseret på ammonium-oxiderende bakterier sikrer, at den biologiske proces fungerer effektivt og stabilt med minimal  $N_2O$ -produktion.

Ved at kombinere styring, overvågning og biologisk indsigt skabes et integreret beslutningsgrundlag, som både reducerer emissioner og giver mulighed for dokumenterbar optimering. Samlet set vurderes det, at denne helstøbte løsning kan bidrage med op til 50% reduktion af lattergasudledningen. På anlæg med høj baseline emission kan reduktionspotentiallet være højere, mens reduktionspotentiallet på anlæg lav baseline emission vurderes at blive lavere. Dog kan effekten variere utrolig meget fra anlæg til anlæg og dette vil derfor ikke gælder alle anlægskonfigurationer.

## 2. Implementering af N<sub>2</sub>O kontrol – processtyringer til reduktion af N<sub>2</sub>O

Samtlige delelementer (se figur 1) i den helstøbte løsning til reduktion af lattergasemissioner blev implementeret på de 8 deltagende renseanlæg i løbet af projektet. Det første år af projektperioden fungerede som baseline år - en længerevarende referenceperiode for renseanlæggenes "normale" lattergasdynamik og -emission. Herefter blev styringerne til lattergasreduktion (AI N<sub>2</sub>O kontrol og regelbaseret N<sub>2</sub>O Kontrol, se afsnit 1.1) idriftsat - se tabel 1 herunder.

| Partner                  | Renseanlæg   | N <sub>2</sub> O kontrol |              |
|--------------------------|--------------|--------------------------|--------------|
|                          |              | AI                       | Regelbaseret |
| BIOFOS                   | Avedøre      |                          | x            |
| Mølleåværket             | Mølleåværket |                          | x            |
| Halsnæs Forsyning        | Melby        | x                        |              |
| Hjørring Vandselskab     | Hjørring     | x                        |              |
| Fors                     | Bjergmarken  |                          | x            |
| Vesthimmerland Forsyning | Løgstør      |                          | x            |
| Aalborg Forsyning        | Aalborg RAØ  |                          | x            |
| BlueKolding              | Agtrup       |                          | x            |

Tabel 1: Idriftsat styring ved hvert af de 8 deltagende renseanlæg.

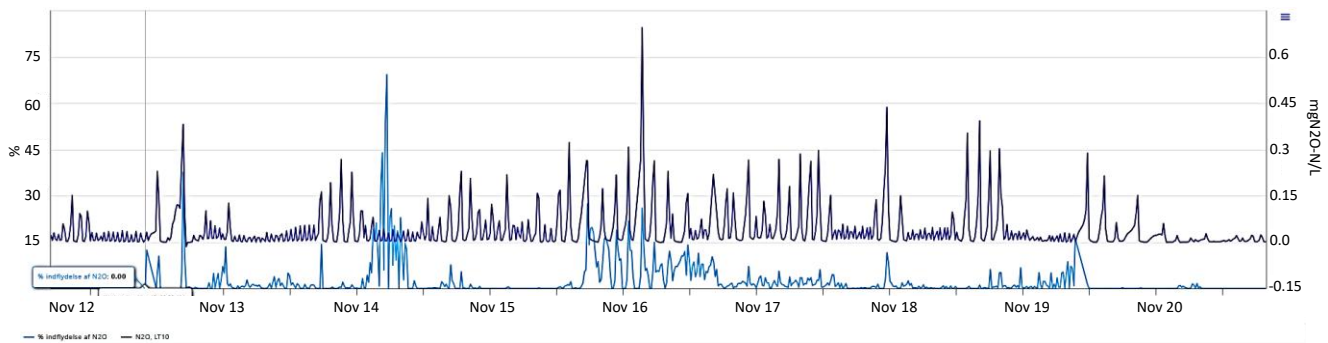
### 2.1 Virkning af styringer til reduceret lattergasemission

De to styringer til lattergasreduktion (AI og regelbaseret) agerer forskelligt, men virker overordnet set ens: Når N<sub>2</sub>O koncentrationen i processen er høj under perioder med nitrifikation vil styringerne reducere og/eller helt slukke beluftningen for at igangsætte en periode med denitrifikation hvor lattergas omsættes biologisk i stedet for aktivt at blive strippet fra væskefasen under beluftningen. Når N<sub>2</sub>O koncentrationen i processen er høj under perioder med denitrifikation vil styringerne forlænge perioden uden beluftning så lattergassen kan omsætte så meget som muligt inden denitrifikationen ophører og nitrifikationen igen påbegyndes. Styringerne har dog udelukkende lov til at kontrollere beluftningen og lattergasudledningen på denne måde, så længe processens/udløbets øvrige krav er overholdt - disse fastsættes for det individuelle renseanlæg. Kravene gælder bl.a. at kvælstofkoncentrationer ikke må overstige en fastsat maksimal grænse.

#### 2.1.1 Melby Renseanlæg og AI-baseret styring af lattergasudledning

Det er desværre ikke muligt i Hubgrade platformen – som ved den regelbaserede styring (se afsnit 2.1.2) – entydigt at illustrere, hvornår AI-styringen prioriterer N<sub>2</sub>O-fjernelse i processen grundet styringens og algoritmens kompleksitet. AI-styringen balancerer i cost/benefit beregningerne løbende N<sub>2</sub>O-reduktion mod øvrige krav, herunder NH<sub>4</sub> og total-N, samt driftsmæssige hensyn som energiforbrug og afløbskvalitet.

Nedenstående figur 11 viser styringens procentvise påvirkning fra N<sub>2</sub>O-N parameteren i beregningen samt den målte N<sub>2</sub>O-N koncentration i processen. I situationer, hvor procesværdierne for NH<sub>4</sub> og NO<sub>3</sub> ligger under grænseværdierne, vil styringen i højere grad prioritere N<sub>2</sub>O-fjernelse.

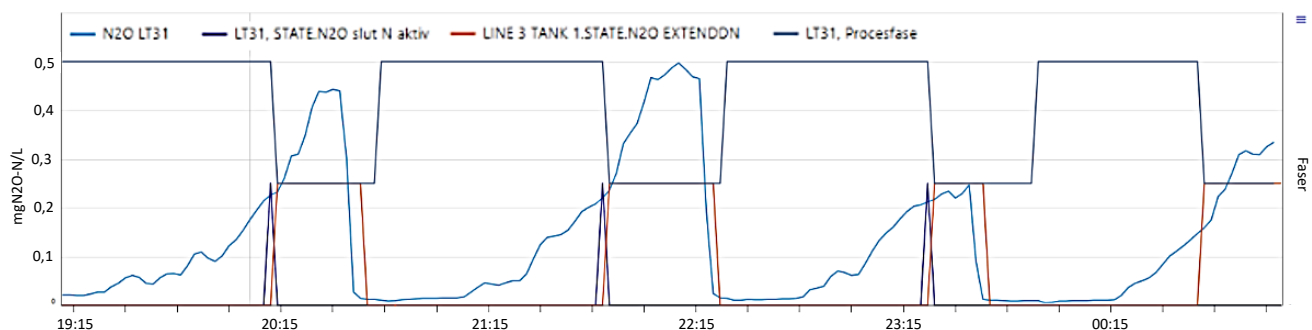


FIGUR 11: Illustration af N<sub>2</sub>O-N målingen (mg/l) og den relative (%) påvirkning af AI-styringen på Melby RA.

### 2.1.2 Avedøre Renseanlæg – regelbaseret styring af lattergasudledning

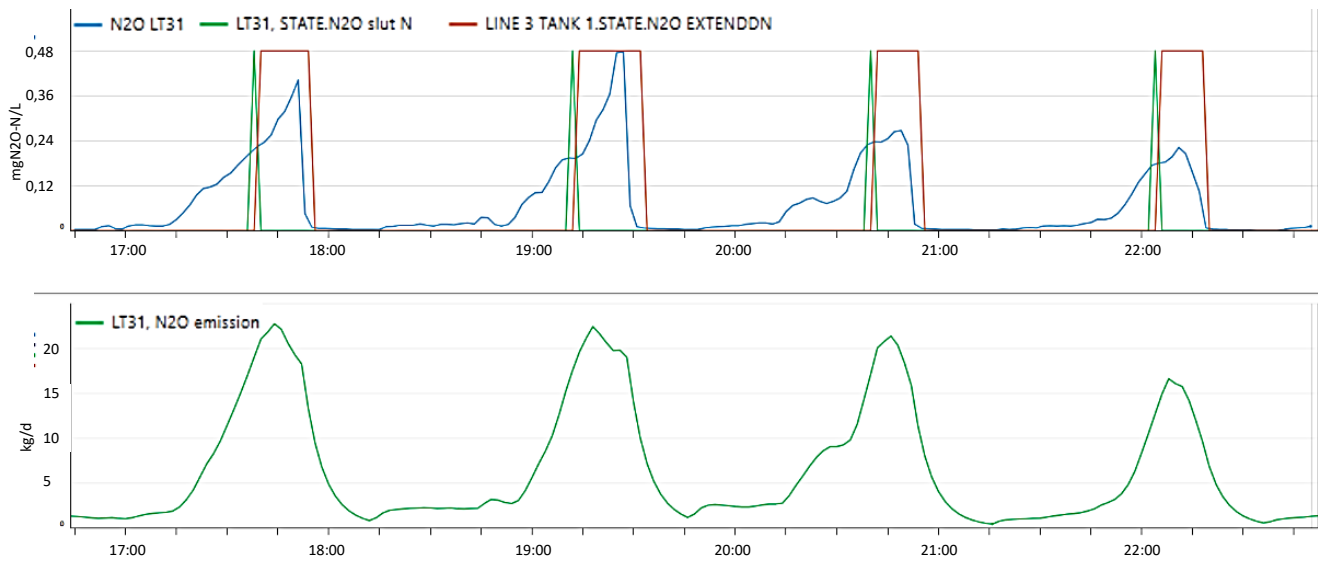
For at illustrere den regelbaserede N<sub>2</sub>O-styring vises i Hubgrades brugerflade de nedenstående grafer, som eksempler på, hvordan styringsfunktionerne arbejder i praksis.

Figur 12 viser et eksempel på samspillet mellem funktionerne "Afslut N" og "Forlæng DN". I situationen illustreres et forløb, hvor N<sub>2</sub>O-N koncentrationen i processen overstiger den fastsatte grænseværdi (i dette tilfælde 0,2 mg/l), hvorefter "Afslut N"-funktionen aktiveres. Effekten heraf ses ved, at procesfasen skifter fra fase 2 (beluftning) til fase 1 (ikke-beluftning). Efterfølgende aktiveres "Forlæng DN"-funktionen, som forlænger den ikke-beluftede fase ud over det, som den underliggende kriteriefunktion ellers ville diktere. Den forlængede DN-fase opretholdes, indtil N<sub>2</sub>O-N koncentrationen i processen igen er reduceret til under grænseværdien, hvorefter den normale faseveksling genoptages.



Figur 12: N<sub>2</sub>O målingen ses i lyseblå (N<sub>2</sub>O LT31), i grå ses procesfasen (LT31 Procesfase), i mørkeblå (STATE.N<sub>2</sub>O slut N aktiv) styringen som ved høj N<sub>2</sub>O afslutter beluftningsfasen og i orange (STATE.N<sub>2</sub>O EXTEND DN) forlængelse af den ikke beluftet fase når N<sub>2</sub>O overskrider grænseværdien.

Den nedenstående graf (fig. 13) viser et eksempel på, hvordan den regelbaserede styring påvirker N<sub>2</sub>O-emissionen fra processen. N<sub>2</sub>O-emissionen stiger i takt med, at N<sub>2</sub>O-N koncentrationen øges i den beluftede fase. Efter overgangen fra beluftning (N-fase) til ikke-beluftning (DN-fase) ses en forsinkelse på ca. 10 minutter, hvor N<sub>2</sub>O-emissionen fortsat stiger. Denne forsinkelse skyldes, at den aktive stripping af N<sub>2</sub>O ophører, når beluftningen stopper, samtidig med at ilt stadig er til stede i processtanken. Først når det resterende ilt er forbrugt, reduceres N<sub>2</sub>O-produktionen, og N<sub>2</sub>O-emissionen falder efterfølgende i DN-fasen.



Figur 13: Øverst ses N<sub>2</sub>O målingen i lyseblå (N<sub>2</sub>O LT31), i grøn (STATE.N<sub>2</sub>O slut N aktiv) i orange (STATE.N<sub>2</sub>O EXTEND DN). Nederste graf N<sub>2</sub>O udvikling i N<sub>2</sub>O emission (LT31, N<sub>2</sub>O emission) i procestanken.

### 3. N<sub>2</sub>O kontrol - effekt på energi, miljø & klima

#### 3.1 Effekt på energiforbrug - vurdering af N-tid på tværs af anlæg

Renseanlæg er som udgangspunkt utrolig forskellige, både hvad angår konfiguration, beluftning, bestyknin g med måleudstyr mv. Derfor er det nærliggende at evaluere styringernes effekt baseret på udvalgte nøgletal/KPI'er (*key performance indicators*) og sammenligne referenceår (baseline) med måleår, hvor styringerne har været aktive.

For at vurdere effekten af N<sub>2</sub>O-styringen (N<sub>2</sub>O Kontrol - element i beluftningsstyring) på energiforbruget på tværs af de deltagende renseanlæg anvendes procent nitrifikationstid (% N-tid) som indikator. Dette nøgletal er udvalgt, da ikke alle af de deltagende renseanlæg er udstyret med målere på blæsernes energiforbrug. I stedet benyttes den andel af tiden, hvor processen er i beluftning som indirekte KPI for energiforbruget.

I 2 tabellen nedenfor er % N-tid opgjort for en række af de deltagende renseanlæg i både referenceperioden (baseline år) og styringsperioden (måleår), hvor længden af perioderne varierer mellem fra anlæg til anlæg grundet div. anlægs- og driftsændringer udenfor projektet.

Løgstør og Hjørring renseanlæg indgår ikke i denne sammenligning, da det ikke var muligt at implementere styringerne, således at beluftningen gav plads til tilstrækkelig aktiv styring af lattergasudledningen.

|                                             | Aalborg<br>RA Øst  | Agtrup             | Mølleå-<br>værket  | Bjerg-<br>marken   | Avedøre<br>L1+2    | Avedøre<br>L3+4    | Melby              |
|---------------------------------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|--------------------|
| Reference-<br>periode                       | Sep 24 -<br>Feb 25 | Okt 24 - Jan<br>25 | Okt 24 -<br>Jan 25 | Jan 24-<br>Mar 24  | -                  | -                  | Sep 24-<br>Maj 25  |
| <b>Reference<br/>N-tid (%)</b>              | <b>32</b>          | <b>26</b>          | <b>42</b>          | <b>41</b>          | -                  | -                  | <b>35</b>          |
| kg N <sub>2</sub> O-N/TN<br>fjernet (%)     | 0,16               | 0,19               | 0,12               | 3,70               | -                  | -                  | 0,37               |
| N <sub>2</sub> O-styrings<br>periode        | Mar 25 -<br>Okt 25 | Feb 25 -<br>Okt 25 | Feb 25 -<br>Okt 25 | Jan 25 -<br>Okt 25 | Apr 25 -<br>Okt 25 | Apr 25 -<br>Okt 25 | Maj 25 -<br>Okt 25 |
| <b>N<sub>2</sub>O styring<br/>N-tid (%)</b> | <b>49</b>          | <b>27</b>          | <b>43</b>          | <b>38</b>          | <b>60</b>          | <b>55</b>          | <b>53.5</b>        |
| kg N <sub>2</sub> O-N/TN<br>fjernet (%)     | 0,35               | 0,26               | 0,14               | 0,50               | 3,07               | 1,06               | 1,37               |

Tabel 2: Oversigt over renseanlæggenes referenceperiode, hvor N<sub>2</sub>O-styringen ikke var aktiv, herunder gennemsnitlig nitrifikationstid (N-tid) og emissionsfaktor (kg N<sub>2</sub>O-N pr. kg fjernet TN). Tabellen viser endvidere perioden, hvor N<sub>2</sub>O-styringen var aktiv, med tilhørende gennemsnitlig N-tid og emissionsfaktor (kg N<sub>2</sub>O-N pr. kg fjernet TN) for N<sub>2</sub>O-styringsperioden.

**Aalborg Øst Renseanlæg**s biologiske tanke gennemgik ombygning i en stor del af 2025, hvilket i perioder medførte, at kun halvdelen af det samlede procesvolumen var tilgængeligt for den fulde indløbsmængde/belastning. Denne anlægssituation har påvirket N<sub>2</sub>O-emissionerne i sådan en grad, at renseanlæggets baseline emission (kg. N<sub>2</sub>O-N/ kg. TN fjernet (%)) er steget i måleperioden sammenlignet med baseline perioden. Samtidig steg N-tiden (grundet det begrænsede

procesvolumen til at håndtere belastningen), da de to proceslinjer skiftevis skulle modtage hele flowet. Som følge heraf vil det først være muligt i løbet af 2026 at drage en endelig konklusion om effekten af N<sub>2</sub>O-styringen på energiforbruget, N-tiden og baseline emissionen på Aalborg Renseanlæg Øst.

**Agtrup Renseanlæg** har generelt meget lave N<sub>2</sub>O-N koncentrationer i processen, og N<sub>2</sub>O-styringen har derfor kun været aktiv i begrænset omfang i løbet af måleperioden. N-tiden er tilsvarende ikke blevet nævneværdigt påvirket ifm. måleperioden. I projektets start begyndte anlægget måling af lattergasemissioner via off gas sensorer (i 2024), hvilket viste sig hensigtsmæssigt ift. styringsinput under DN-faser. Anlægget skiftede derefter til væskefasensor, men har derfor kun ca. 2,5 måneders N<sub>2</sub>O-emissionsdata for referenceperioden.

**Mølleåværket** har ligeledes meget lave N<sub>2</sub>O-N koncentrationer, hvilket resulterede i, at styringen kun sjældent aktiveredes i løbet af måleperioden. Der ses derfor ingen markant forskel i hverken N-tid eller N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor mellem reference- og måleperioden.

**Bjergmarken Renseanlæg** har via N<sub>2</sub>O-styringen reduceret N-tiden fra 41 % til 38 %, samtidig med at N<sub>2</sub>O-emissionsfaktoren er reduceret markant - fra 3,7 % i referenceperioden til blot 0,5 % i måleperioden. I referenceperioden var "Afslut N"-elementet i N<sub>2</sub>O styringen allerede aktiv, mens "Forlæng DN"-elementet først blev aktiveret i måleperioden, hvilket har bidraget væsentligt til reduktionen i N<sub>2</sub>O-emission.

**Avedøre** Renseanlæg har tilsvarende oplevet en reduktion i N-tiden fra 60 % til 55 % som følge af N<sub>2</sub>O-styringen, hvilket indikerer et stort potentiale for energibesparelser gennem reduceret beluftning. Ligeledes ses en markant forskel i emissionsfaktoren for linjer med og uden styring, hvor linjer med N<sub>2</sub>O-styring (L3+L4) udleder blot en tredjedel af den lattergas, ift. linjer uden styringen (L1+L2).

**Melby** Renseanlæg har derimod haft en stigning i både N-tid (%) og N<sub>2</sub>O-emissioner under måleperioden. Ifm. måleåret blev beluftningsstyringen af processen ændret fra regelbaseret til AI-baseret, og i overgangsperioden ses en midlertidig stigning i både N-tid og N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor. Dette skyldes primært, at der i den AI-baserede styring blev fastsat strengere krav til kvælstofudledning, således at rensegraden på anlægget blev øget væsentligt (se også afsnit 3.2). De strengere krav til kvælstofudledningen fordrede en højere væsentlig højere N-tid på anlægget (fra 35% til 53.5%), hvilket begrænsede DN-tiden og dermed også muligheden for biologisk omdannelse af N<sub>2</sub>O til N<sub>2</sub> under denitrifikationen.

Samlet set observeres en tydelig sammenhæng mellem N-tid og N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor for de anlæg, som ikke har været påvirket af ombygninger. For de seks reaseanlæg (tab. 2) er det tydeligt, at højere N-tid bevirker højere N<sub>2</sub>O-emissionsfaktorer. Dette understøtter, at aktiv N<sub>2</sub>O-styring og optimeret kvælstoffjernelse - blandt andet via optimering af fase længder og beluftningsintensitet - bidrager til reduktion af lattergasemissioner, og samtidig kan medføre energibesparelser gennem reduceret beluftning.

## 3.2 Effekt på miljø

N<sub>2</sub>O-styringerne medfører øget denitrifikationstid (DN-tid) i processen, hvilket i nogle tilfælde kan påvirke ammoniumkoncentrationen (NH<sub>4</sub>) i anlægget. For de syv reaseanlæg (med undtagelse af Aalborg Renseanlæg Øst, hvor den igangværende ombygning har forringet reaseffekten) er der imidlertid ikke observeret nogen væsentligt forringelse af den samlede kvælstofkoncentration (TN) i udløbet (se tabel 3). Tværtimod bevirker styringerne optimeret kvælstoffjernelse, og rensegraden på samtlige anlæg steg således i måleåret (tab. 3, 2025).

|               | Aalborg<br>Øst | Avedøre | Agtrup | Bjerg-<br>marken | Hjørring | Melby | Mølleå-<br>værket |
|---------------|----------------|---------|--------|------------------|----------|-------|-------------------|
| <b>2024</b>   |                |         |        |                  |          |       |                   |
| Rensegrad (%) | 91,3           | 90,4    | 85,2   | 90,6             | 87       | 80,2  | 83,6              |
| TN ud (mg/l)  | 4,1            | 5,0     | 4,1    | 3,3              | 3,9      | 4,79  | 7,50              |
| TN ud (ton)   | 28,6           | 136,8   | 52,6   | 28,3             | 19,5     | 21,0  | 73,3              |
| <b>2025</b>   |                |         |        |                  |          |       |                   |
| Rensegrad (%) | 87,3           | 91,3    | 87,2   | 95,2             | 89       | 91,0  | 87,0              |
| TN ud (mg/l)  | 7,9            | 4,9     | 5,7    | 2,7              | 5,0      | 3,5   | 7,9               |
| TN ud (ton)   | 50,6           | 122,1   | 47,6   | 17,6             | 24,2     | 10,6  | 72,6              |

Tabel 3: Oversigt over anlæggenes rensesgrad i procent (%), total kvælstof (TN) i koncentration (mg/l) og mængder (ton) i referenceåret (2024) og under aktiv N<sub>2</sub>O-styring i måleåret (2025). Resultaterne er beregnet på baggrund af analysedata forsyningernes akkrediterede målinger (egenkontrol)

Både Bjergmarken og Avedøre Renseanlæg, som havde de højeste N<sub>2</sub>O-emissionsfaktorer i referenceperioden og samtidig opnåede reduktioner i baseline emissioner under måleåret (tab. 2, 4 og 5), har holdt stabilt lave TN-koncentrationer i udløbet i 2025 (måleår) sammenlignet med 2024 (referenceår). Det bør desuden bemærkes, at nedbøren har været markant forskellig, idet 2024 var et vådt år, mens 2025 har været et tørt år.

Rensegraden er generelt forbedret for alle anlæg undtagen Aalborg Øst (tab. 3), hvilket vurderes at være en naturlig konsekvens af den igangværende ombygning og det begrænsede procesvolumen på renseanlægget. På baggrund af de tilgængelige data kan det derfor konkluderes, at N<sub>2</sub>O-styringen ikke har haft en negativ miljømæssig effekt i form af forringet kvælstoffjernelse.

Den samlede udledning af kvælstof til recipient (tons N) er endvidere reduceret på fem ud af de syv renseanlæg (tab. 3) i tråd med, at rensesgraden på anlæggene blev forbedret. Dette understøtter, at N<sub>2</sub>O-styringerne både bidrager til reduktion af lattergasemissioner og forbedrer den overordnede rensesgrad og kvælstoffjernelse på anlæggene.

### 3.3 Effekt på klima

Da N<sub>2</sub>O er en særdeles potent drivhusgas, kan selv meget lave emissioner have en betydelig klimateffekt. Med udgangspunkt i de to anlæg med høj oprindelig baseline N<sub>2</sub>O-emission (Bjergmarken og Avedøre Renseanlæg), har den udvidede regelbaserede N<sub>2</sub>O-styring har opnået en stor positiv klimateffekt. Via styringen har anlæggene reduceret deres baseline emission (kg N<sub>2</sub>O-N/ kg TN ind) over halvdelen ift. den oprindelige emission i referenceåret (tab. 4 og 5).

Den observerede klimateffekt skyldes dels en reduktion i nitrifikationstiden, men især en markant reduktion i N<sub>2</sub>O-emissionerne, som udgør den klart største klimabelastning sammenlignet med energiforbruget til beluftning.

Både Bjergmarken og Avedøre Renseanlæg opnåede en markant reduktion i N<sub>2</sub>O-emissionsfaktoren som følge af implementeringen af N<sub>2</sub>O-styringerne - en reduktion af emissionsfaktoren på hhv. 67% og 58% (mdr. gns.).

Via aktiv N<sub>2</sub>O-styring er det således muligt at opnå en væsentlig reduktion af lattergasemissionen fra disse anlæg med høj baseline emissionsfaktor, mens reduktionspotentialt på anlæg med generelt lav baseline emissionsfaktor må betragtes som mere begrænset.

| Bjergmarken<br>Renseanlæg | Basis<br>styring | N <sub>2</sub> O Udvidet<br>styring | Relativ forskel<br>oprindelig<br>(%) | ift. Reduktion<br>udledning<br>emissionsfaktor<br>(%) | i     |
|---------------------------|------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-------|
| Jan                       | 5.08%            | 0.23%                               |                                      | 4.5                                                   | 95%   |
| Feb                       | 1.08%            | 0.55%                               |                                      | 51.4                                                  | 49%   |
| Mar                       | 3.31%            | 0.99%                               |                                      | 30.1                                                  | 70%   |
| Apr                       | 0.84%            | 0.58%                               |                                      | 69.4                                                  | 31%   |
| Maj                       | 1.18%            | 0.42%                               |                                      | 35.7                                                  | 64%   |
| Jun                       | 0.65%            | 0.39%                               |                                      | 59.7                                                  | 40%   |
| Jul                       | 0.62%            | 1.03%                               |                                      | -164.8                                                | -65%* |
| Aug                       | 0.43%            | 0.21%                               |                                      | 48.4                                                  | 51%   |
| Gennemsnit                | 1.65%            | 0.55%                               |                                      |                                                       | 67%   |

Tabel 4: Basis N<sub>2</sub>O-styring refererer til N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor for 2024 hvor "Afslut N"-elementet var aktivt. Udvidet N<sub>2</sub>O-styring referer til N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor for 2025 hvor både "Afslut N" og "Forlæng DN" -elementerne i N<sub>2</sub>O-styringen var aktive. Emissionsfaktorerne er angivet i kg N<sub>2</sub>O-N / kg TN<sub>ind</sub>. \*Periode med Roskilde Festival.

| Avedøre<br>Renseanlæg<br>2025 | Uden N <sub>2</sub> O-<br>styring | Med udvidet<br>N <sub>2</sub> O-styring | Relativ forskel<br>oprindelig<br>(%) | ift. Reduktion<br>udledning<br>emissionsfaktor<br>(%) | i   |
|-------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------------------------|-----|
| Apr                           | 3.60%                             | 1.32%                                   |                                      | 36.8                                                  | 63% |
| Maj                           | 4.69%                             | 1.65%                                   |                                      | 35.2                                                  | 65% |
| Juni                          | 3.07%                             | 1.59%                                   |                                      | 51.9                                                  | 48% |
| Juli                          | 2.54%                             | 1.35%                                   |                                      | 53.2                                                  | 47% |
| Aug                           | 1.57%                             | 0.77%                                   |                                      | 48.6                                                  | 51% |
| Sep                           | 0.39%                             | 0.20%                                   |                                      | 52.6                                                  | 49% |
| Oktober                       | 0.50%                             | 0.06%                                   |                                      | 11.8                                                  | 88% |
| Gennemsnit                    | 2.34%                             | 0.99%                                   |                                      |                                                       | 58% |

Tabel 5: N<sub>2</sub>O emissionsfaktorer fra Avedøre Renseanlæg 2025 for procestanke uden N<sub>2</sub>O-styring (tanksæt 1 og 2) og procestankene med udvidet N<sub>2</sub>O-styring (tanksæt 3 og 4). Emissionsfaktorerne er angivet i kg N<sub>2</sub>O-N / kg TN<sub>ind</sub>.

### 3.4 Overordnet effekt af N<sub>2</sub>O kontrol

Den største effekt af N<sub>2</sub>O-kontrol (N<sub>2</sub>O-styringerne) ses på de anlæg, hvor en høj baseline emissionsfaktor muliggør et stort reduktionspotentialt. De høje N<sub>2</sub>O koncentrationer kan via

målrettet styring blive nedbragt, og N- og DN-faser optimeret til en mere fuldstændig omsætning af lattergassen nede i processen for at undgå stribning fra væske- til gasfase og dermed udledning.

N<sub>2</sub>O-kontrol (N<sub>2</sub>O styringerne) har derimod en mindre effekt på anlæg med lav baseline emissionsfaktor og lave N<sub>2</sub>O-koncentrationer i de biologiske tanke. Her aktiveres styringerne sjældnere (grundet de lave koncentrationer) og har derfor begrænset indflydelse varigheden af N- og DN-faser i processen. Der er således ikke et nævneværdigt reduktionspotentiale på denne type anlæg, hvilket begrænser funktionen af målrettet styring.

### 3.4.1 AI N<sub>2</sub>O kontrol

På Melby Renseanlæg opnåede AI-baseret N<sub>2</sub>O-kontrol ikke en reduktion på 50 % af N<sub>2</sub>O-emissionsfaktoren i projektperioden. Flere forhold har haft afgørende betydning for dette resultat, heraf særligt:

- Melby Renseanlægs reduktionspotentiale var i forvejen lavt grundet lav baseline emissionsfaktor (tab. 2, referenceperiode).
- Overgangen fra konventionel beluftning til Beluftning AI (inkl. N<sub>2</sub>O-styring) medførte en ændret styringsfilosofi (strengere krav til TN-udledning), som i perioden resulterede i øget nitrifikationstid (% N-tid i måleperioden, tab. 2), højere N<sub>2</sub>O-N-koncentrationer i processen og dermed en forøget N<sub>2</sub>O-emission. Til gengæld blev der opnået en markant forbedret rensegrad i samme periode, resulterende i en lavere kvælstofbelastning af renseanlæggets recipient (tab. 3).

Det skal endvidere bemærkes, at AI N<sub>2</sub>O-kontrol har været under løbende udvikling i projektperioden. Efter projektets afslutning er styringen blevet opdateret og væsentligt forbedret, herunder med bedre håndtering af balancen mellem N<sub>2</sub>O-minimering, N-tid og rensekrav. Effekten af disse forbedringer vil blive evalueret uden for projektet i løbet af 2026.

### 3.4.2 Regelbaseret N<sub>2</sub>O kontrol

Muligheden for at opnå en reduktion på 50% af baseline emissionsfaktoren afhænger i høj grad af det eksisterende emissionsniveau for anlæggene. Det er bestemt muligt at opnå 50% reduktion ved anlæg med eksisterende høje N<sub>2</sub>O-koncentrationer og emissionsniveauer og hvor reduktionspotentialet dermed er stort. På anlæg med høje baseline N<sub>2</sub>O-emissioner, såsom Avedøre og Bjergmarken, er det lykkedes at reducere emissionsfaktoren med over 50 % via målrettet N<sub>2</sub>O-styring. Her kan målrettet styring af processens faser netop bevirke laver emissioner ved at give plads til optimeret kvælstoffjernelse og N<sub>2</sub>O omsætning uden unødvendig stripping fra væskefase til gasfasen (og dermed udledning til atmosfæren) under beluftning. På Avedøre og Bjergmarken Renseanlæg er det således lykkedes at reducere emissionsfaktoren med langt over 50% via målrettet N<sub>2</sub>O-styring og regelbaseret N<sub>2</sub>O kontrol (se tab. 2, 4 og 5). Derudover viser resultaterne fra bl.a. Melby Renseanlæg, at ændrede driftsmål (fx skærpede krav til kvælstoffjernelse) kan modvirke N<sub>2</sub>O-reduktionen, da f.eks. øget nitrifikationstid kan føre til højere N<sub>2</sub>O-emissioner.

I modsætning hertil på anlæg med lave baseline emissioner er reduktionspotentialet begrænset og 50 %-målet er ikke opnået i samme grad. Dette skyldes primært lave N<sub>2</sub>O-koncentrationer i processen, hvilket medfører, at styringerne aktiveres sjældnere og dermed har begrænset effekt på procesfaserne. I disse tilfælde kan det være vanskeligt at opnå 50% reduktion af anlæggenes emissionsfaktor.

Et centralt spørgsmål ift. fremtidig regulering af lattergasemissioner fra renseanlæg er derfor det eksisterende niveau af lattergasemissioner, såfremt målrettet N<sub>2</sub>O-styring skal være forsyningernes strategi for at nedbringe emissionerne med 50% (fastsat af klimaplanen, 2020). Som alternativt til driftsoptimering (herunder N<sub>2</sub>O-styring) vil belastningsreducering og kapacitetsudvidelse også være håndtag, som forsyningerne kan benytte sig af for at opnå reduktion i lattergasemissionen, men disse

er dog forbundet med betydelige omkostninger (Miljøstyrelsen, 2024). Hvordan den fremtidige regulering af lattergasemissioner fra renseanlæg implementeres i praksis - grænseværdi (absolut, relativ eller anlægsspecifik) eller evt. afgift - vil blive afgørende for de fremtidige investeringer, som forsyningerne ser ind i.

Flere undersøgelser peger på, at de store renseanlæg bidrager med langt størstedelen af den samlede  $N_2O$ -udledning fra branchen - og her er reduktionspotentiallet netop stort. Set i dét lys, vil en målrettet og grundig indsats på de største anlæg have størst relativ effekt sammenlignet med en fælles grænseværdi fastsat på baggrund af 50% reduktion på tværs af alle renseanlæg.

Med nærværende projekt muliggøres, at målrettet  $N_2O$ -styring netop kan imødekomme branchens behov for reduceret lattergasemission - særligt på store renseanlæg med høje emissionsniveauer, hvor potentiallet reduktion og forbedret klimateffekt er højt.

På baggrund af indsamlet data (gennemsnitsværdier præsenteret i Tabel 4 og 5) kan reduktionen i  $N_2O$ -emissionsfaktor omregnes til  $CO_2$ -ækvivalenter. For Bjergmarken reduceres emissionsfaktoren fra 1,65 % til 0,55 %, svarende til en reduktion på 1,10 %-point. Ved anvendelse af GWP100 = 273 svarer dette til en besparelse på ca. 4,7 kg  $CO_2e$  pr. kg TN ind.

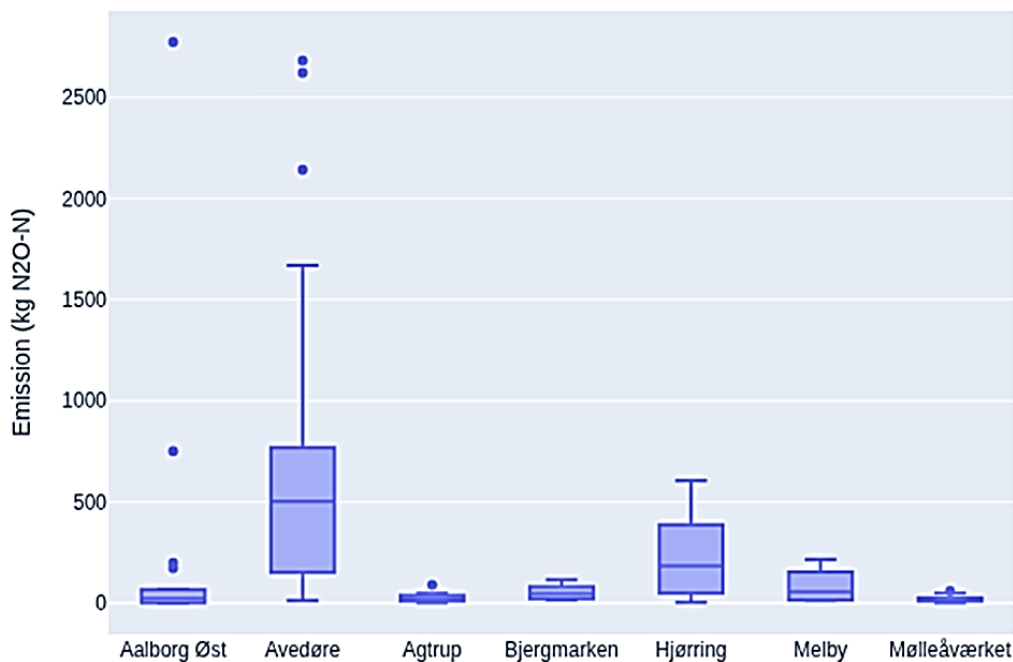
For Avedøre reduceres emissionsfaktoren fra 2,34 % uden  $N_2O$ -styring til 0,99 % med udvidet  $N_2O$ -styring, svarende til en reduktion på 1,35 %-point. Dette giver en beregnet besparelse på ca. 5,8 kg  $CO_2e$  pr. kg TN ind.

## 4. Lattergasdynamik på danske renseanlæg

Lattergasudledning fra renseanlæg er typisk meget dynamisk og kan variere en del både fra år til år og fra dag til dag men også fra time til time. Udledningen er for mange anlæg også sæsonbetonet, hvor lattergas i højere grad forekommer i forårs- og sommermånederne, mens udledningen er relativt mere begrænset i efteråret og om vinteren. Det er derfor nærværende at følge renseanlæggenes lattergasudledning over en længere måleperiode, for til fulde at synliggøre deres dynamik og forskellen imellem dem.

Ved  $N_2O$  Kontrol projektets start blev der på hvert anlæg etableret lattergasemissionsberegninger i Hubgrade (se også afsnit 1.2), hvorfor det var muligt at følge lattergasudledningen i realtid på tværs af anlæg.

Lattergasudledningen anlæggene i mellem varierede en del i løbet af projektperioden (ca. 2 år med emissionsberegninger), og særligt i de absolutte månedlige emissioner (kg.  $N_2O-N/mdr$ ) observeredes markante forskelle i både emissionsniveau og variationsbredde mellem anlæggene (fig. 14). I figur 14 er anlæggenes månedlige emission præsenteret som boks-diagrammer, hvor boksen repræsenterer datasættets centrale fordeling og spredning, og medianen angiver det typiske niveau for den månedlige  $N_2O$ -udledning. Månedlige emissioner uden for boksene fremstår som punktvisse afvigelse/outliers fra hovedfordelingen.



Figur 14. Spredning af månedlige N<sub>2</sub>O-emissioner af projektets renseanlæg

Avedøre Renseanlæg skiller sig ud som det anlæg med de højeste månedlige emissioner og de mest markante udsving. Niveauet ligger generelt langt over de andre anlæg, og der forekommer flere meget høje målinger. Samlet set viser Avedøre både høje udledninger og store månedlige variationer.

Hjørring Renseanlæg har de næsthøjeste emissioner. Målingerne ligger betydeligt over mellemgruppen og spænder fra lave til relativt høje værdier. Selvom udledningerne ikke når helt samme niveau som Avedøre, dækker de stadig et bredt spænd, og de højeste målinger ligger klart over anlæggets median.

Melby og Bjergmarken ligger i en mellemgruppe. Melby har et lidt højere niveau og mere variation end Bjergmarken, men begge anlæg holder sig generelt inden for et lavt til middel udledningsniveau. Variationerne er til stede, men langt mindre udtalte end hos Avedøre og Hjørring.

Aalborg Øst, Agtrup og Mølleåværket udleder generelt mindst. De fleste målinger ligger samlet omkring lave værdier. Aalborg Øst har dog nogle få højere målinger, som skyldes driftsændringer i perioder, mens Agtrup og Mølleåværket fremstår stabile og uden større afvigelser.

Samlet viser data, at anlæggenes lattergasemission adskiller sig tydeligt fra hinanden. Anlæg med høje emissioner har også størst variation i udledningen, mens anlæg med lave emissioner har typisk mere stabile emissioner over tid.

## 4.1 Udledningsprofiler og pathways til lattergasudledning

De omfattende og langvarige lattergasmålinger og udledningsprofiler fra de deltagende renseanlæg, giver mulighed for en grundig forståelse af de mikrobiologiske pathways der fører til lattergasproduktion (og udledning) for hvert renseanlæg. I kombination med projektets resultater hvad angår N<sub>2</sub>O-styringsstrategi (se afsnit 1.1) kan denne data skabe grundlag for en generel metode til at nedbringe N<sub>2</sub>O-produktionen og dermed begrænse udledningen (se afsnit 5).

I nærværende afsnit analyseres derfor de mikrobiologiske pathways der er årsag til dynamikken i lattergasproduktionen på de enkelte renseanlæg. Analysen er baseret på kontinuerlige  $N_2O$ -målinger og beregnet  $N_2O$ -N emission, som giver mulighed for at identificere både tidsmæssige mønstre og procesrelaterede årsager til  $N_2O$ -produktionen.

Tabel 6 tabel opsummerer de væsentligste årsager til  $N_2O$ -produktion på tværs af renseanlæggene i projektet, fundet via grundig manuel gennemgang af proceskurver fra hvert anlæg, hvor  $N_2O$ -N koncentrationen er sammenholdt med ilt- og fase-profiler over tid.

Overordnet viser profilerne, at peaks i  $N_2O$ -produktion, og dermed også  $N_2O$ -emission, primært forekommer som en reaktion på ændringer i den indkommende belastning til de biologiske procestanke. De højeste emissionsniveauer observeres typisk i forårs- og sommerperioden, hvor både temperatur og biologisk aktivitet er forhøjet. Samtidig ses de største emissionsfaktorer generelt på de større og mere belastede renseanlæg (som eks. Avedøre).

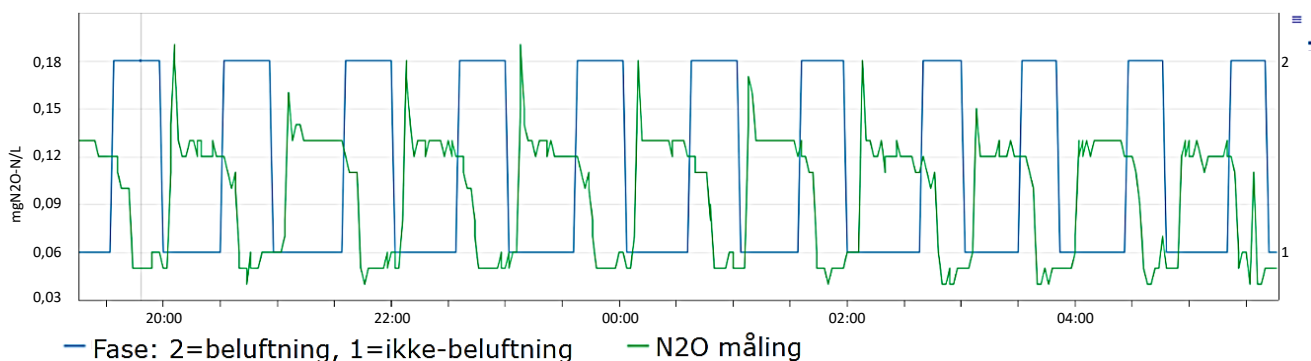
Der er dog markante undtagelser fra ovenstående tendenser. Eksempelvis har Mølleåværket et relativt lavt emissionsniveau på trods af, at anlægget oplever høj hydraulisk og organisk belastning. Denne begrænsede emission kan skyldes anlæggets rensestrategi, herunder en relativt høj denitrifikationstid (DN-tid, se også tabel 2), som giver bedre betingelser for fuldstændig omsætning af  $N_2O$  til  $N_2$ .

| Anlæg       | Primær mikrobiologisk pathway | Beskrivelse af anlæggenes lattergasudledning og årsag til $N_2O$ -produktion                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |
|-------------|-------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Aalborg Øst | Heterotrof denitrifikation    | <ul style="list-style-type: none"> <li>Højest <math>N_2O</math>-produktion i det sene forår og om sommeren</li> <li>Dog meget lave emissioner, da langt det meste <math>N_2O</math> også omsættes under DN-faserne i processen</li> <li>Højeste <math>N_2O</math>-emissioner observeres under spidsbelastninger relateret til ombygning, hvor procesvolumen har været begrænset.</li> </ul> |
| Avedøre     | Nitrifier nitrification       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Højeste <math>N_2O</math>-emissioner observeres i foråret og sommeren, men generelt høje emissioner hele året sammenlignet med andre anlæg.</li> </ul>                                                                                                                                                                                               |
| Bjergmarken | Nitrifier denitrification     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Højeste <math>N_2O</math>-emissioner observeres i foråret og sommeren, mens generelt middel emissioner hele året sammenlignet med andre anlæg.</li> </ul>                                                                                                                                                                                            |
| Agtrup      | Nitrifier denitrification     | <ul style="list-style-type: none"> <li>Generelt lavt emissionsniveau.</li> <li>Lav målt ilt niveau sammenlignet med ilt sætpunktet tyder på utilstrækkelig ilt / ophobning af <math>NO_2</math> som kan resultere i <math>N_2O</math>-produktion. Dog generelt i små koncentrationer - under 0,1 mg <math>N_2O</math>-N/l.</li> </ul>                                                       |
| Melby       | Nitrifier nitrification       | <ul style="list-style-type: none"> <li>Middel emissionsniveau.</li> <li><math>N_2O</math> ophobes under N-fasen, mens koncentrationen</li> </ul>                                                                                                                                                                                                                                            |

|              |                                                      |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |
|--------------|------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
|              |                                                      | stiger markant, idet ilttilførslen afbrydes. Dette indikerer, at den ophørte stripping fra væske- til gasfase medfører en hurtig stigning i $N_2O$ -koncentrationen i væskefasen. Efterfølgende falder koncentrationen kraftigt, når processen bliver fuldt anoxisk og $N_2O$ omsættes hurtigt i DN-fasen.                                                                                                                 |
| Hjørring     | Heterotrof denitrifikation & nitrifier nitrification | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generelt højt emissionsniveau.</li> <li>• Tydelig ophobning af <math>N_2O</math> i DN-tankene, hvilket indikerer lavt COD/N forhold og dermed mangel på COD til at gennemføre komplet denitrifikation.</li> <li>• Derudover ses ophobning af <math>N_2O</math> i N-tankene, hvor <math>N_2O</math>-N koncentrationen stiger i takt med, at <math>NH_4</math> omsættes.</li> </ul> |
| Mølleåværket | Nitrifier nitrification                              | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Generelt lavt emissionsniveau.</li> <li>• Laver <math>N_2O</math>-N koncentrationer det meste af året - under 0,1 mg/l gennem det meste af året. Dog stiger koncentrationen lidt i forårmånederne.</li> </ul>                                                                                                                                                                     |

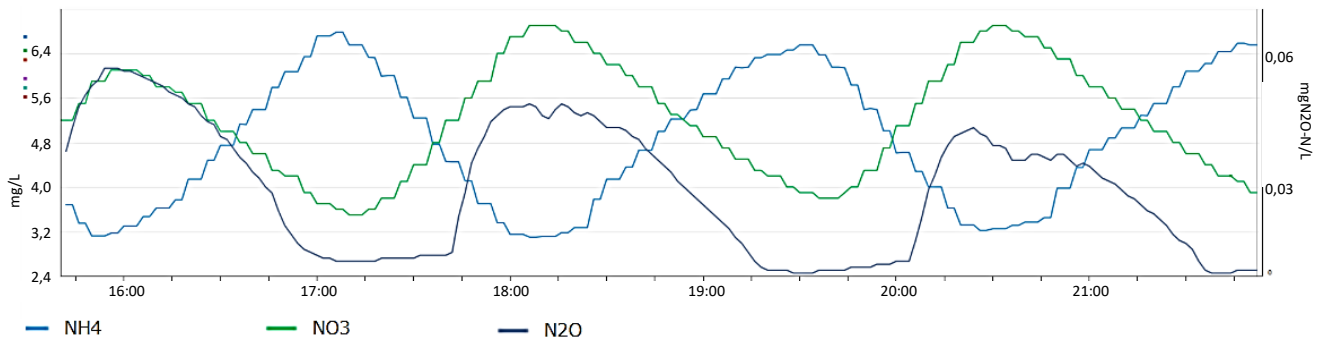
Tabel 6: Identifikation af dominerende primær mikrobiologisk pathways der giver ophav til  $N_2O$ -produktion på det enkelte renseanlæg, samt beskrivelse af generelle tendenser og observationer i anlæggenes proceskoncentrationer og emissionsprofiler.

Den fuldstændige omsætning af  $N_2O$  under DN-fasen er nødvendigt for at holde stabilt lave emissioner fra renseanlæggene. Nedenfor i figur 15 illustreres hvordan heterotrof denitrifikation på Aalborg Renseanlæg fører til lattergasproduktion, hvor  $N_2O$  produceres tydeligt under DN-faserne. Det er derfor essentielt, at DN-fasen er lang nok til at facilitere fuldstændig omsætning af  $N_2O$  inden beluftning aktiveres for at undgå stripping fra væske- til gasfasen. En høj  $N_2O$ -produktion under DN-perioder kan indikere, der ikke er tilstrækkeligt COD til komplet gennemførelse af denitrifikationen.



Figur 15. Eksempel på lattergasdannelse via heterotrof denitrifikation på Aalborg Renseanlæg Øst d. 27. februar 2025.  $N_2O$ -N måling illustreret i grøn og processens faser i blå.

Lattergas ophobes på mange af renseanlæggene også under nitrifikationen (figur 16). I tilfælde af nitrifier denitrification ophobes lattergas i slutningen af N-fasen, hvor  $NH_4$ -koncentrationen er på sit laveste og  $NO_3$ -koncentrationen er høj. Dette indikerer, at processen oplever begrænset tilgængelig ilt og muligvis også ophobning af  $NO_2$ , der medfører  $N_2O$ -produktion.

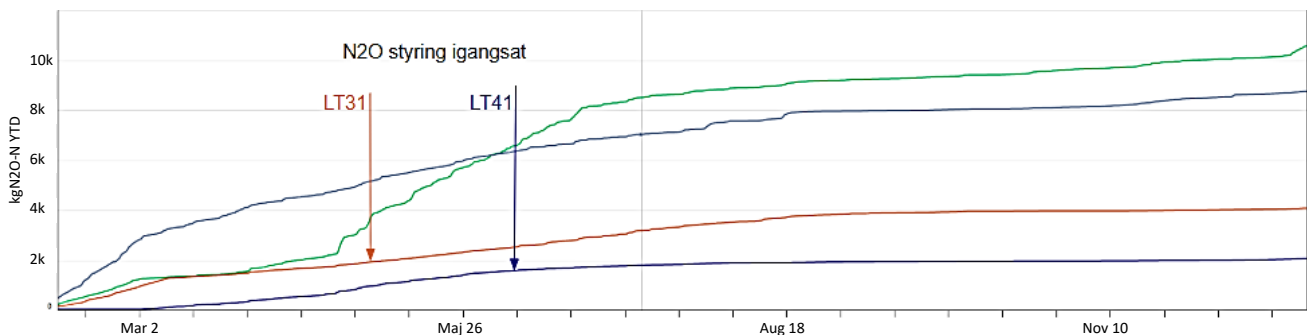


Figur 16. Eksempel på hvordan lattergas ophobes under nitrifier denitrification.  $\text{NH}_4$ -koncentrationen i processen er angivet med blå kurve,  $\text{NO}_3$ -koncentrationen med grøn kurve og  $\text{N}_2\text{O}$ -N koncentrationen med grå kurve.

Via grundig gennemgang af sit renseanlægs proceskurver, er det muligt at identificere den primære årsag til lattergasproduktion, og dermed også vælge lige netop den styringsstrategi der kan nedbringe lattergasproduktion og -emission fra anlægget (se også afsnit 5).

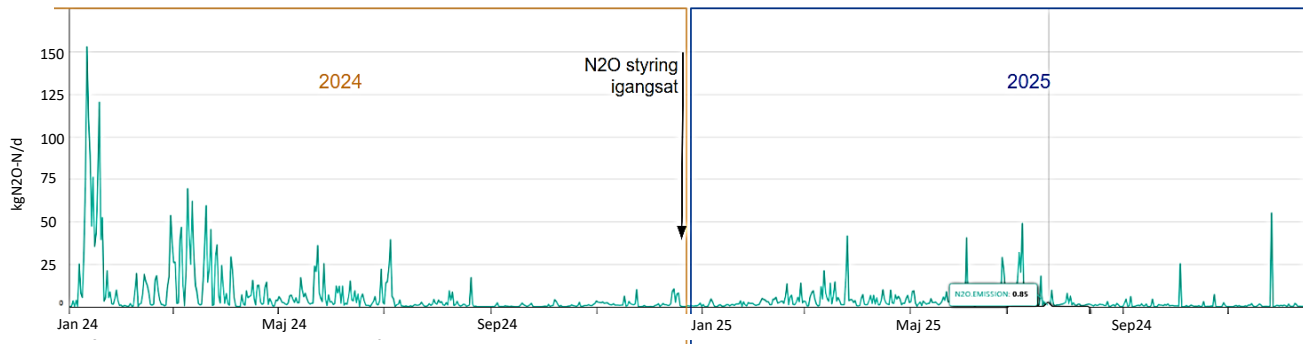
Den anlægsspecifikke optimale styringsstrategi til at nedbringe lattergasemissionerne kan have en afgørende betydning på et renseanlægs emissionsfaktor. Ved implementering af disse strategier ændrer anlæggenes emissionsprofiler sig tydeligt.

I tilfælde af Avedøre Renseanlæg, blev  $\text{N}_2\text{O}$ -styringen (regelbaseret, udvidet, se også afsnit 2) aktiveret på linje 3+4, mens linje 1+2 i måleperioden fungerede som negativ kontrol, der afspejlede den generelle lattergasemission uden aktiv og målrettet  $\text{N}_2\text{O}$ -styring. For dette anlæg er det tydeligt, at linjer med  $\text{N}_2\text{O}$ -styring holder en stabil lav lattergasemission over tid, mens emissionen fra linjer uden  $\text{N}_2\text{O}$ -styring akkumulerer over året (fig. 17).



Figur 17. Akkumuleret årlig emission (kg  $\text{N}_2\text{O}$ -N/år) fra linje 1 og 2 (uden  $\text{N}_2\text{O}$ -styring) og linje 3 og 4 (med  $\text{N}_2\text{O}$ -styring) på Avedøre Renseanlæg fra marts til december 2025. Pilene indikerer hvornår  $\text{N}_2\text{O}$ -styring aktiveredes på de enkelte linjer.

Ligeledes ses en betydelig ændring i emissionsprofilen på Bjergmarken Renseanlæg, som følge af forbedring  $\text{N}_2\text{O}$ -styring (fig. 18). Renseanlægget havde i referenceåret (2024) anvendt basis  $\text{N}_2\text{O}$ -styring hvor "forlæng N" elementet var aktivt, men igangsatte den udvidede styring (inkl. "forlæng DN" elementet) ifm. måleåret (2025). Der observeres en tydelig forskel i daglige lattergasemissioner (kg  $\text{N}_2\text{O}$ -N/d) mellem de to år, hvor emissionerne i måleåret ligger markant lavere.



Figur 18: Daglig N<sub>2</sub>O-emission (kg N<sub>2</sub>O-N/d) fra Bjergmarken Renseanlæg i 2024 (referenceår) og 2025 (måleår). Pilen angiver tidspunktet for igangsætning af udvidet N<sub>2</sub>O-styring på anlægget.

Via målrettet N<sub>2</sub>O-styring (N<sub>2</sub>O Kontrol) kan emissionerne således reduceres betydeligt og endda uden større investeringer i form af belastningsudlignende foranstaltninger eller kapacitetsudvidelser på renselanlæggene.

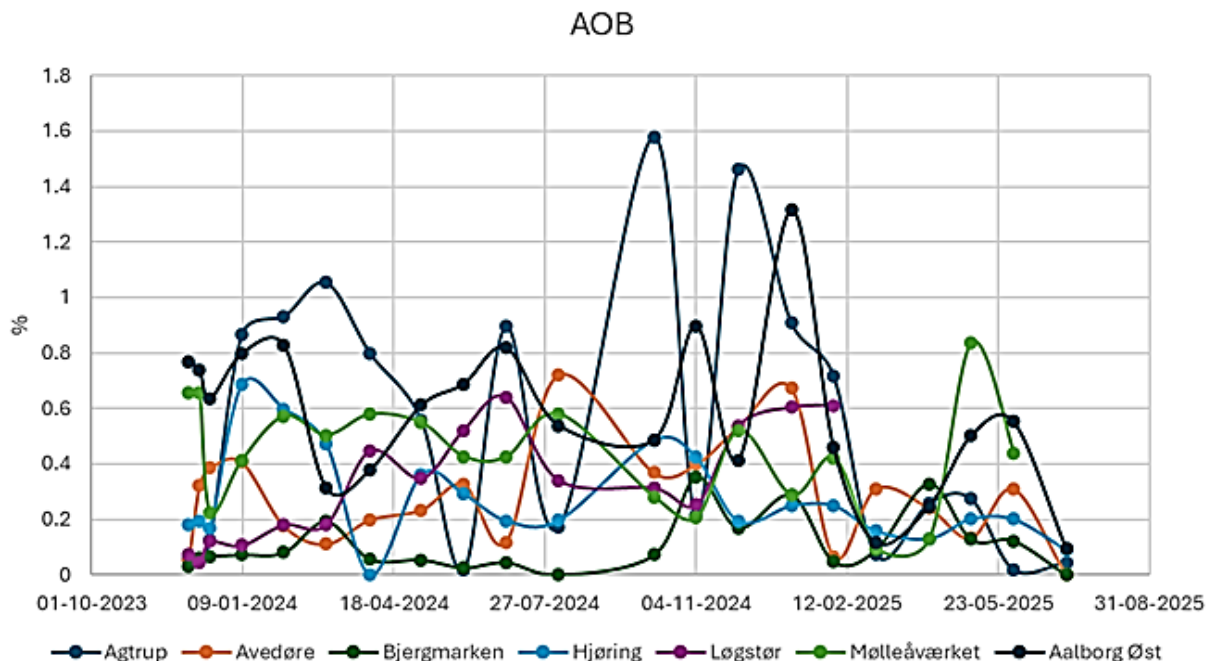
## 4.2 AOB'er og variation i ammoniumoxiderationsraten (AOR) på renseanlæggene

Ammoniumoxiderende bakterier (AOB) og nitritoxiderende bakterier (NOB) er essentielle for nitrifikationsprocessen i biologiske renseanlæg, hvor ammonium omdannes til nitrat. Efter nitrifikationen følger denitrifikationen, hvor denitrifikanter reducerer nitrat til frit kvælstof ( $N_2$ ). Under visse driftsforhold, såsom lavt iltniveau, begrænset kulstofkilde eller hurtige procesændringer, kan både AOB'er og denitrifikanter producere lattergas ( $N_2O$ ) som et biprodukt. Derfor er det essentielt at overvåge deres (relative) forekomst i renseanlæggene, da ændringer i det mikrobiologiske samfund og deres diversitet kan påvirke både generel renseeffektivitet, effektiviteten af kvælstoffjernelse såvel som risikoen for lattergasproduktion - og dermed udledning.

### 4.2.1 AOB-profiler og sæsonvariation i renseanlæggenes mikrobiom

I figur 19 nedenunder opsummeres udviklingen af Nitrosomonas' relative forekomst over tid, i de deltagende renseanlæg mikrobiom. Nitrosomonas er en kendt ammoniumoxiderende bakterie (AOB) og faciliterer første trin i nitrifikationen ( $NH_4^+ \rightarrow NO_2^-$ ). Dataene viser en tydelig sæsonvariation i forekomsten af Nitrosomonas på tværs af de undersøgte anlæg. Generelt ligger niveauerne højere i vintermånederne, hvor driftsforhold som længere slamalder og lavere temperaturer typisk understøtter en stabil og aktiv AOB-population. I forårs- og sommermånederne observeres derimod et gradvist fald i deres relative forekomst, og i flere tilfælde meget lave eller helt ikke-detekterbare værdier. Dette kan skyldes, at mange renseanlæg driftes med en kortere slamalder, når forårs- og sommermånederne tillader høj biologisk aktivitet.

Samlet set fremstår Nitrosomonas hyppighed som relativt variabel, og det er individuelt fra anlæg til anlæg, hvor stor en andel denne AOB udgør af den samlede bakteriepopulation. Den robuste population antyder dog, en generel solid ammoniumfjernelse på renseanlæggene - på tværs af årets måneder. Der er dog nogle datapunkter, der ligger meget tæt på nul eller præcis nul, hvilket indikerer en tilsyneladende mangel på nitrifikanter. Dette skyldes sandsynligvis usikkerheder i den anvendte DNA-metode, da nitrifikationsprocessen blev observeret på alle anlæg.

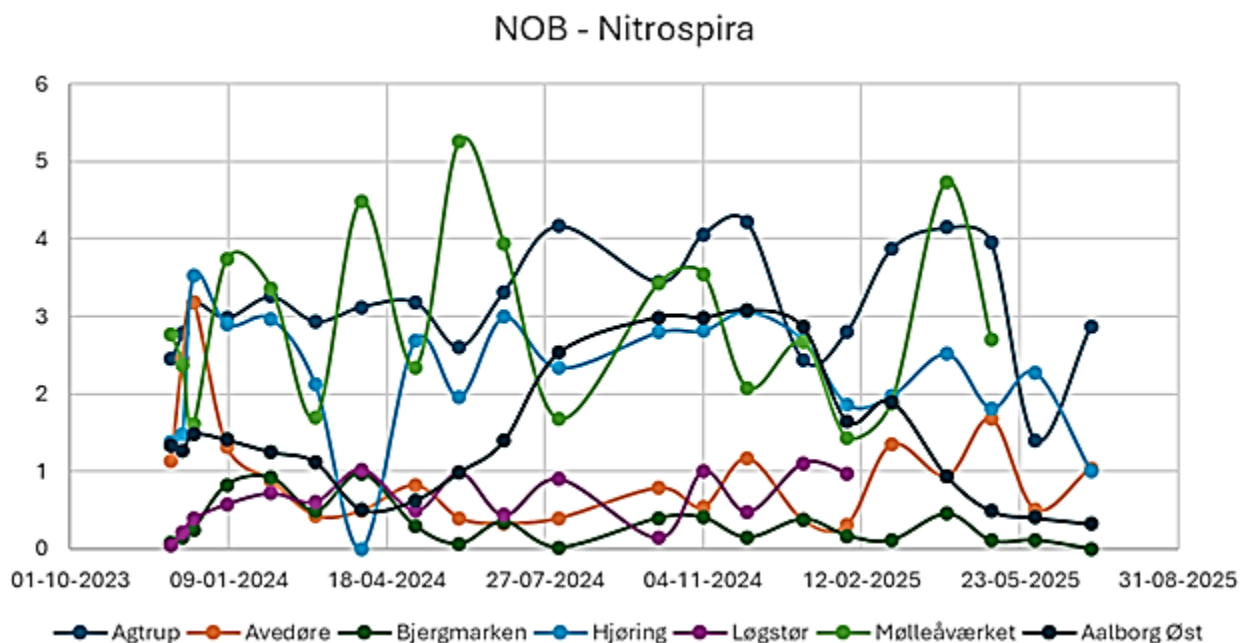


Figur 19. Tidslinje over relative hyppighed af AOB-population - Nitrosomonas.

Den efterfølgende del af nitrifikationsprocessen, hvor nitrit oxideres til nitrat, udføres af nitritoxiderende bakterier (NOB). Her viser datasættet tydeligt, at Nitrospira forekommer i langt højere koncentrationer end Nitrotoga gennem hele måleperioden (fig. 20 og 21). Niveauerne for Nitrospiras relative forekomst ligger generelt på 1-4% (for nogle anlæg endda højere), mens Nitrotoga ofte udgør mindre end 1% af bakteriepopulationen.

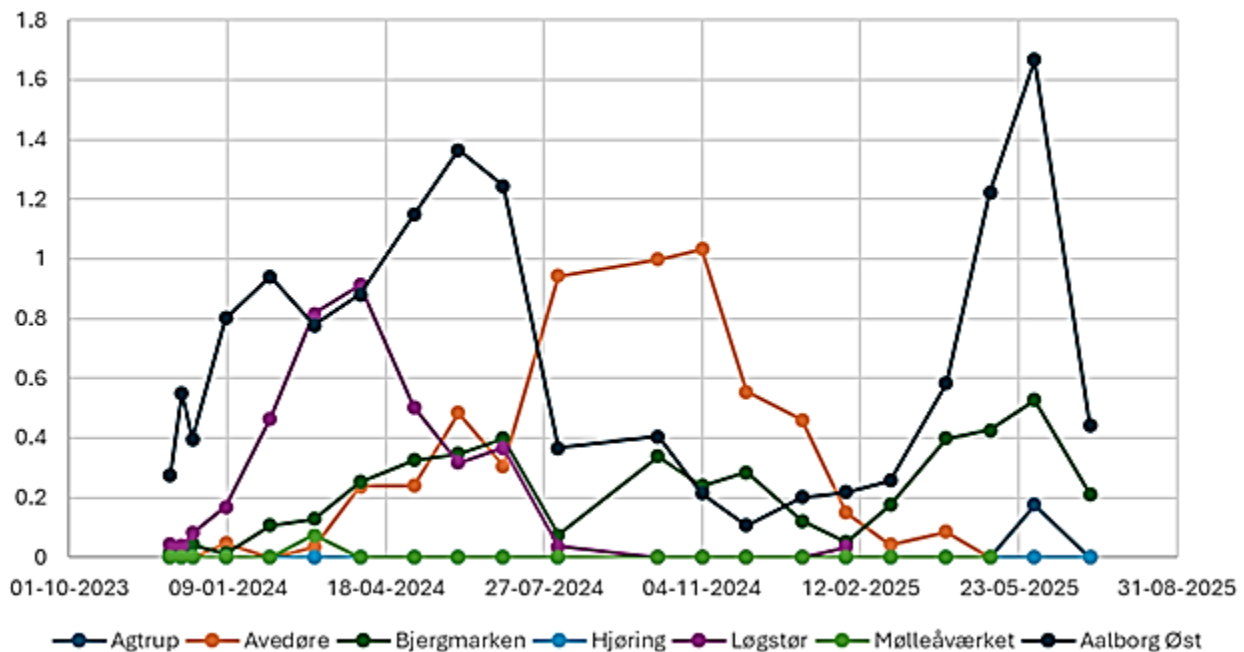
Niveauer for Nitrospira fremstår relativt stabilt på tværs af både renseanlæg og sæsoner, dog ses tydelig opblomstring i fra midt til slut 2024. De højeste niveauer optræder især i oktober og november 2024, hvor flere anlæg topper samtidigt. I begyndelsen af 2025 ligger Nitrospira-niveauet fortsat højt, men falder gradvist frem mod sommeren 2025.

Nitrotoga viser derimod en relativ lav og mere sporadisk tilstedeværelse i renseanlæggenes mikrobiom. I nogle måneder - særligt om vinteren - registreres Nitrotoga ikke. Perioder med en tydeligere forekomst ligger primært i forår og sommer 2024, hvor der på enkelte anlæg måles værdier mellem 0,3 og 1,3. Den mest markante stigning ses i juni og juli 2024, hvor flere anlæg udviser forhøjede værdier samtidig. Efter sommeren 2024 falder Nitrotoga igen markant og forbliver lav eller ikke-detekteret resten af perioden.



Figur 20. Tidslinje over relative hyppighed af NOB-population - Nitrospira.

### NOB - Nitrotoga



Figur 21. Tidslinje over relative hyppighed af NOB-population - Nitrotoga.

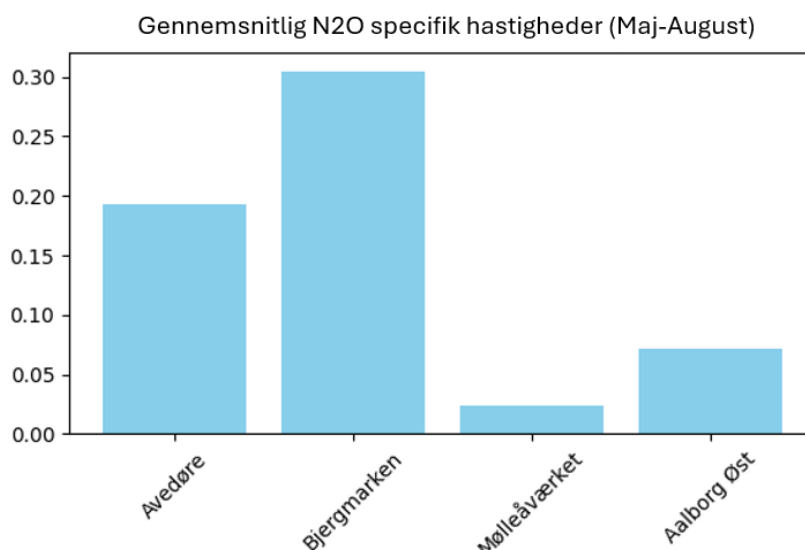
#### 4.2.2 N<sub>2</sub>O produktion som konsekvens af høj ammoniumoxiderationsrate (AOR)

En af de pathways, der fører til dannelse af lattergas i renseprocesser, opstår, når AOB-bakterierne – altså ammoniumoxiderende bakterier, der udfører det første trin i nitrifikationen – bliver udsat for meget høje ammoniakkoncentrationer. Under sådanne belastede forhold bliver AOBer 'overanstrengte' og arbejder derfor markant hurtigere for at omsætte ammoniak til nitrit. Denne hastighed, som beskriver hvor hurtigt bakterierne optager og omsætter ammonium, kaldes ammoniumoxiderationsrate (AOR, se også afsnit 1).

Når AOBer overbelastes kan det bl.a. føre til, at der dannes flere intermediære forbindelser (hydroxylamin pathway), som er forbundet med øget N<sub>2</sub>O-produktion. Dette gør AOR til en vigtig indikator for processens stabilitet og risikoen for lattergasproduktion og -udledning.

I projektet blev der derfor udviklet en online beregningsmodel (som en del af Optimal slamalder), som kontinuerligt estimerer ammoniumoptagelseshastigheden baseret på realtidsdata (sensordata). Modellen udnytter både information om fjernet N<sub>2</sub>O per VSS, men også andelen af AOBer i VSS (DNA data). Ved at kombinere disse parametre fås et mere præcist billede af, hvordan AOB-populationen agerer under forskellige belastningsforhold, og hvordan disse påvirker N<sub>2</sub>O-produktionen. Formålet er at skabe et styringsværktøj, der ikke blot overvåger processen, men på sigt kan bruges til aktiv styring og driftsoptimering.

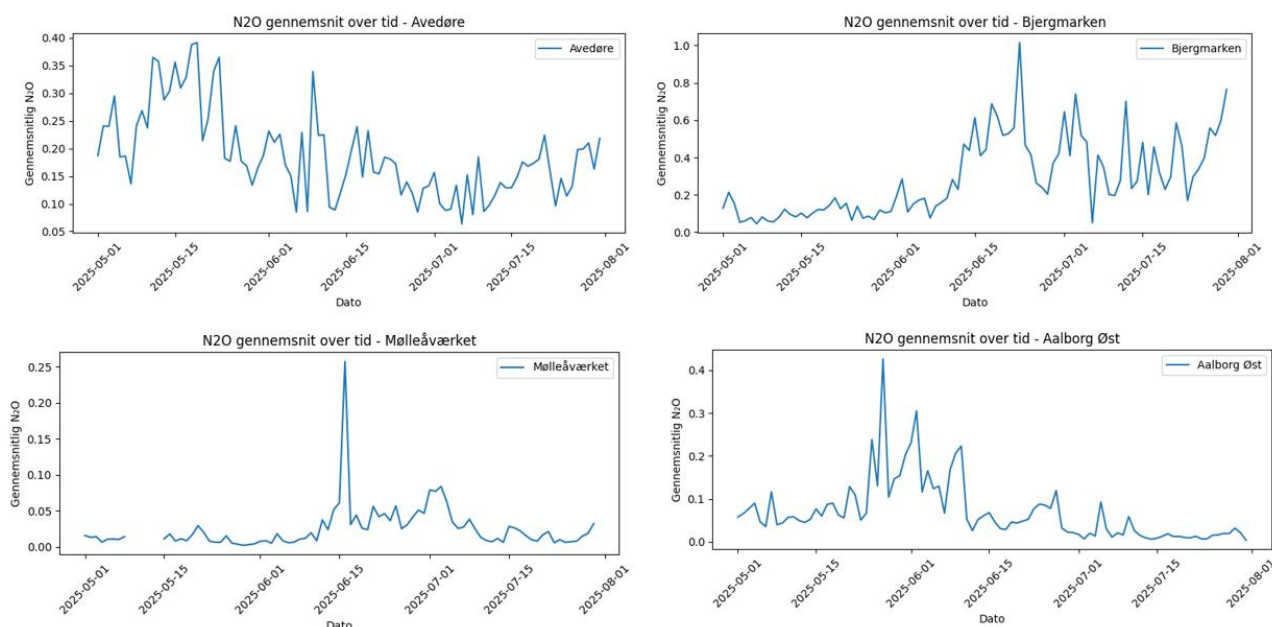
Grafen nedenfor (fig. 22) viser de gennemsnitlige N<sub>2</sub>O-specifikke rater mellem maj og august for fire udvalgte renseanlæg. Grafen viser, at Avedøre og Bjergmarken har markant højere rater, mens Mølleåværket og Aalborg Øst ligger væsentligt lavere. Dette stemmer godt overens med de emissions- og afløbsresultater fra renseanlæggene. Renseanlæg, som er højt belastede og "presser" deres biologiske processer for at overholde lave udledningskrav, har en tendens til at producere og udlede større mængder N<sub>2</sub>O.



Figur 22. Gennemsnitlig lattergas specifik hastighed

Graferne nedenfor (fig. 23) viser, at raterne også ændrer sig over tid. Det er tydeligt, at alle renseanlæggene har varierende rater og nogle – som i tilfældet med Aalborg Øst – kan opleve en markant stigning, når den biologiske proces udfordres (her på grund af udskiftning af diffusorer og reduktion af bassinvolumen).

Denne metode til styring af lattergasproduktionen giver driftsoperatørerne indsigt i den biologiske proces og hjælper indirekte med at optimere procesydelsen for dermed at reducere dannelsen af lattergas.



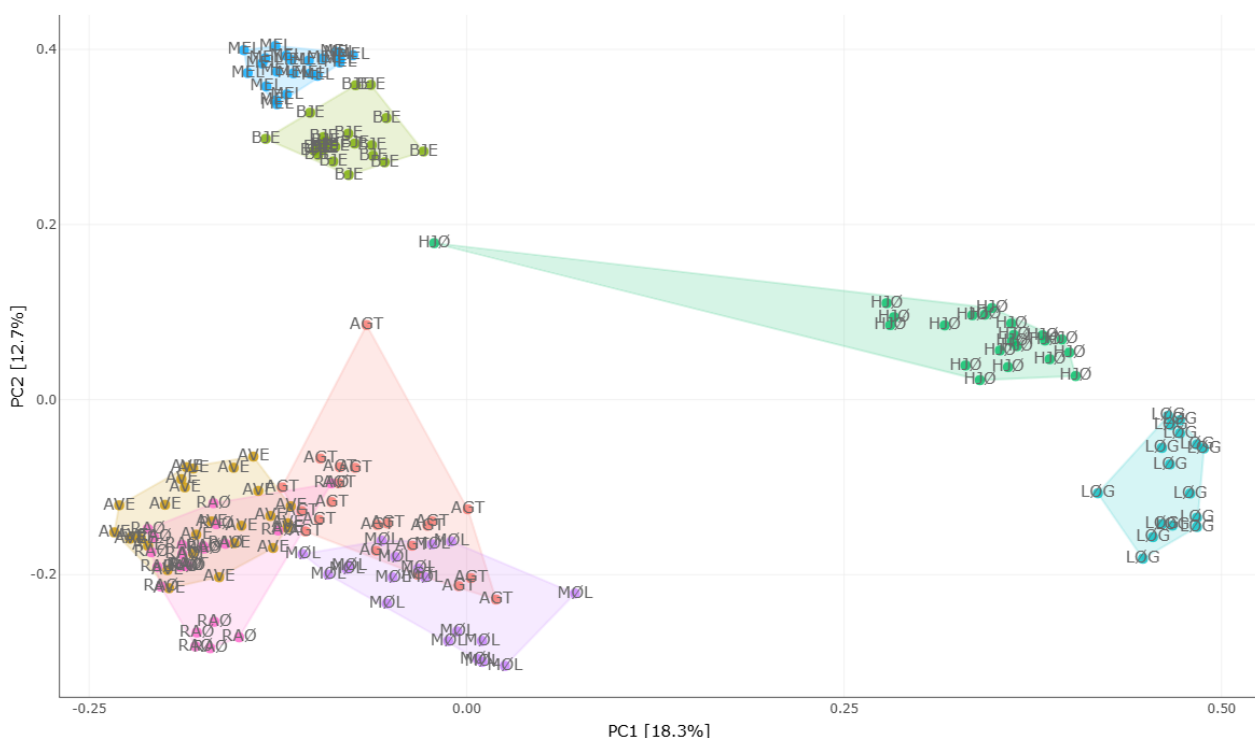
Figur 23. Tidslinje af lattergas specifik hastighed

### 4.3 Renseanlæggenes mikrobiologiske samfund

For at visualisere sammenhænge og ligheder samt forstå data bedre, bruger man typisk statistiske metoder. Principal Component Analysis (PCA) er en statistisk metode, der ofte anvendes til analyse af DNA og andre biologiske datasæt med høj dimension. PCA reducerer kompleksiteten i store datasæt ved at omdanne korrelerede variable til et mindre antal ukorrelerede komponenter, kaldet hovedkomponenter. Denne reduktion gør det lettere at identificere mønstre og forskelle mellem prøver. PCA er særligt nyttig til visualisering af variationer i bakterieforekomst, da scoreplots grafer giver en klar og overskuelig repræsentation af klynger, populationsstruktur eller adskillelse mellem grupper – i dette tilfælde anlæg. Nedenfor (fig. 24) visualiseres forskelle mellem renseanlæg baseret på deres helt unikke mikrobiom.

Grafen illustrerer (fig. 24), hvordan renseanlæg med lignende mikrobielle sammensætninger grupperer sig. Som det tydeligt fremgår, har nogle af renseanlæggene – især de store kommunale anlæg – en tendens til at samle sig i samme klynger. Samtidig viser grafen, at der stadig findes betydelige forskelle i de mikrobielle samfund på tværs af anlæggene, hvilket understreger, at aktiv slam ikke er ens med hensyn til deres mikrobielle samfund. Dette blev også vist i AAU-studiet (Vestergaard et al.), hvor det blev dokumenteret, at det mikrobiologiske samfund i aktivt slam bliver styret og formet af de indkomne bakterier fra afløbssystemet.

Disse forskelle kan delvist forklare, hvorfor de enkelte renseanlæg producerer lattergas i varierende omfang, idet de mikrobielle variationer påvirker de biologiske processer og de biokemiske veje, hvor  $N_2O$  kan dannes. Det er dog ikke kun forekomsten af bakterier, der styrer dette, men også mængden af kvælstof i indløbet, styringstiltag, iltningsmønstre, anlæggets design m.m. Man kan heller ikke tydeligt se grupperinger mellem de renseanlæg, som er kendetegnet ved de høje emissioner



Figur 24. PCA plot der illustrerer forskellene mellem den mikrobiologiske sammensætning i renseanlæggene

## 5. Metode til aktivt at arbejde med reduktion af lattergas på renseanlæg

Nærværende projekt har afprøvet en række styringsstrategier til reduceret lattergasemissioner på tværs af renseanlæg, med forskellige årsager til lattergasproduktion men også frembragt et omfattende datasæt til at koble styringsstrategi og emissionsdynamik med mikrobiologisk DNA-data.

For at muliggøre, at samtlige forsyninger kan arbejde aktivt med reduktion af renseanlæggenes lattergasudledning, er der udarbejdet en metode/et beslutningstræ til aktiv reduktion af lattergas på renseanlæg, uanset om anlæggene anvender avanceret online styring eller ej.

Beslutningstræet er baseret på identifikation af de mikrobiologiske  $\text{N}_2\text{O}$ -produktionsveje (pathways) og giver konkrete driftsmæssige styringshåndtag til både at reducere  $\text{N}_2\text{O}$ -produktion og begrænse  $\text{N}_2\text{O}$ -emission fra renseanlæg (se fig. 25).

For at anvende beslutningstræet, skal der først opstilles en samlet proceskurve, som indeholder målinger af  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NH}_4$ ,  $\text{NO}_3$  og  $\text{O}_2$  i procestanken(e) for en eller flere udvalgte perioder på renseanlægget. Herefter følges nedenstående trin til at identificere hvilken pathway der giver ophav til lattergas, og hvilke driftsmæssige håndtag der kan afhjælpe:

1. **Identifikation af  $\text{N}_2\text{O}$ -produktion.** Undersøg  $\text{N}_2\text{O}$ -målingen for at vurdere, om der overhovedet observeres  $\text{N}_2\text{O}$  i procestanken.
  - a. Hvis  $\text{N}_2\text{O}$ -koncentrationen aldrig overstiger ca. 0,1 mg  $\text{N}_2\text{O}$ -N/l, er der en meget begrænset  $\text{N}_2\text{O}$ -produktion på anlægget, og det kan være vanskeligt at identificere en entydig årsag eller behov for tiltag.
2. **Vurdering af procesfasen.** Hvis der observeres  $\text{N}_2\text{O}$ -koncentrationer, skal det vurderes om den største stigning i koncentrationen sker i forbindelse med  $\text{NH}_4$ -fjernelse (nitrifikation), eller  $\text{NO}_3$ -fjernelse (denitrifikation).
  - a.  **$\text{N}_2\text{O}$ -produktion under denitrifikation.** Hvis  $\text{N}_2\text{O}$  produceres (koncentrationen stiger) under denitrifikation, skal det vurderes, om der er tydelig  $\text{NO}_3$ -fjernelse (falder  $\text{NO}_3$ -koncentrationen også?): Hvis ja, så dannes  $\text{N}_2\text{O}$  sandsynligvis via den heterotrofe denitrifikations-pathway.
    - **Tiltag:** Forlæng DN-fasen, så de denitrificerende bakterier får tid til at reducere  $\text{N}_2\text{O}$  til  $\text{N}_2$ .
    - Alternativt kan COD/N-forholdet vurderes og kulstofdoseringen optimeres.
  - b.  **$\text{N}_2\text{O}$ -produktion under nitrifikation men uden betydelig  $\text{NH}_4$ -fjernelse.** Hvis  $\text{N}_2\text{O}$  observeres under nitrifikation (beluftning), men uden en samtidig effektiv  $\text{NH}_4$ -fjernelse (fald i  $\text{NH}_4$ -koncentrationen), kan det indikere, at de ikke er tilstrækkeligt ilt tilgængeligt for nitrifikanterne.
    - **Tiltag:** Øg beluftningsintensiteten / ilt setpunktet for at sikre tilstrækkeligt ilt til fuldstændig nitrifikation.
3.  **$\text{N}_2\text{O}$ -produktion under nitrifikation og med tydelig  $\text{NH}_4$ -fjernelse.** Hvis  $\text{N}_2\text{O}$  produceres under nitrifikation (beluftning) og der samtidig observeres effektiv  $\text{NH}_4$ -fjernelse (fald i  $\text{NH}_4$ -koncentrationen), skal beluftningsintensiteten vurderes:

a. **Ved lav iltkoncentration** kan  $N_2O$  stamme fra nitrifier denitrifikation pathway.

→ **Tiltag:** Øg beluftsintensiteten for at sikre tilstrækkeligt ilt til fuldstændig nitrifikation.

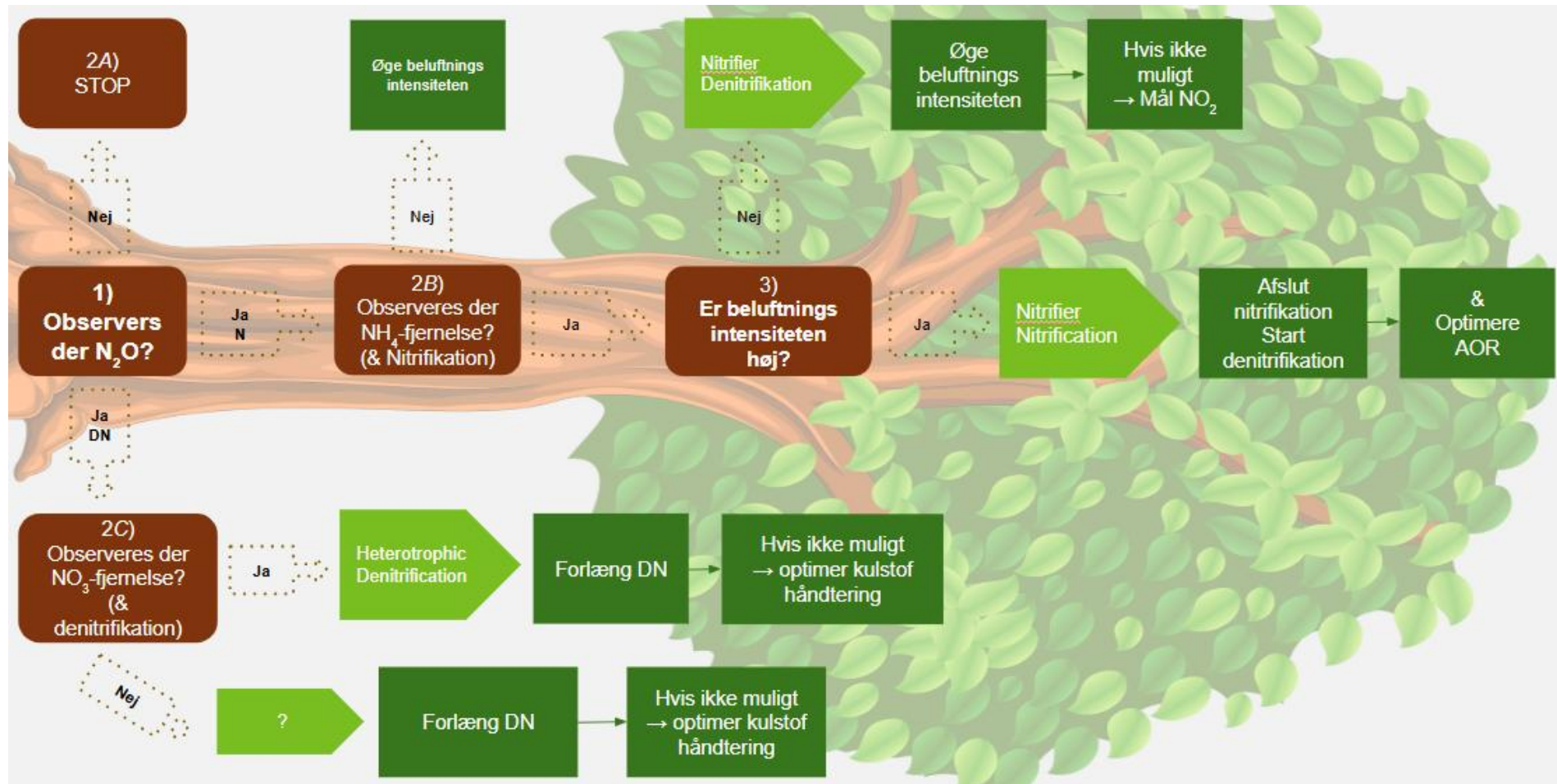
→ Supplerende kan  $NO_2$ -målinger være relevante, da ophobning af  $NO_2$  kan fremme  $N_2O$ -produktionen.

b. **Ved høj beluftsintensitet** er  $N_2O$ -produktionen sandsynligvis relateret til nitrifier nitrifikation pathway.

→ **Tiltag:** Reducer ammoniumomsættelseshastigheden ved enten at

- sænke beluftsintensiteten under høj belastning eller
- afslutte nitrifikationen tidligere for at undgå stripping af  $N_2O$ .

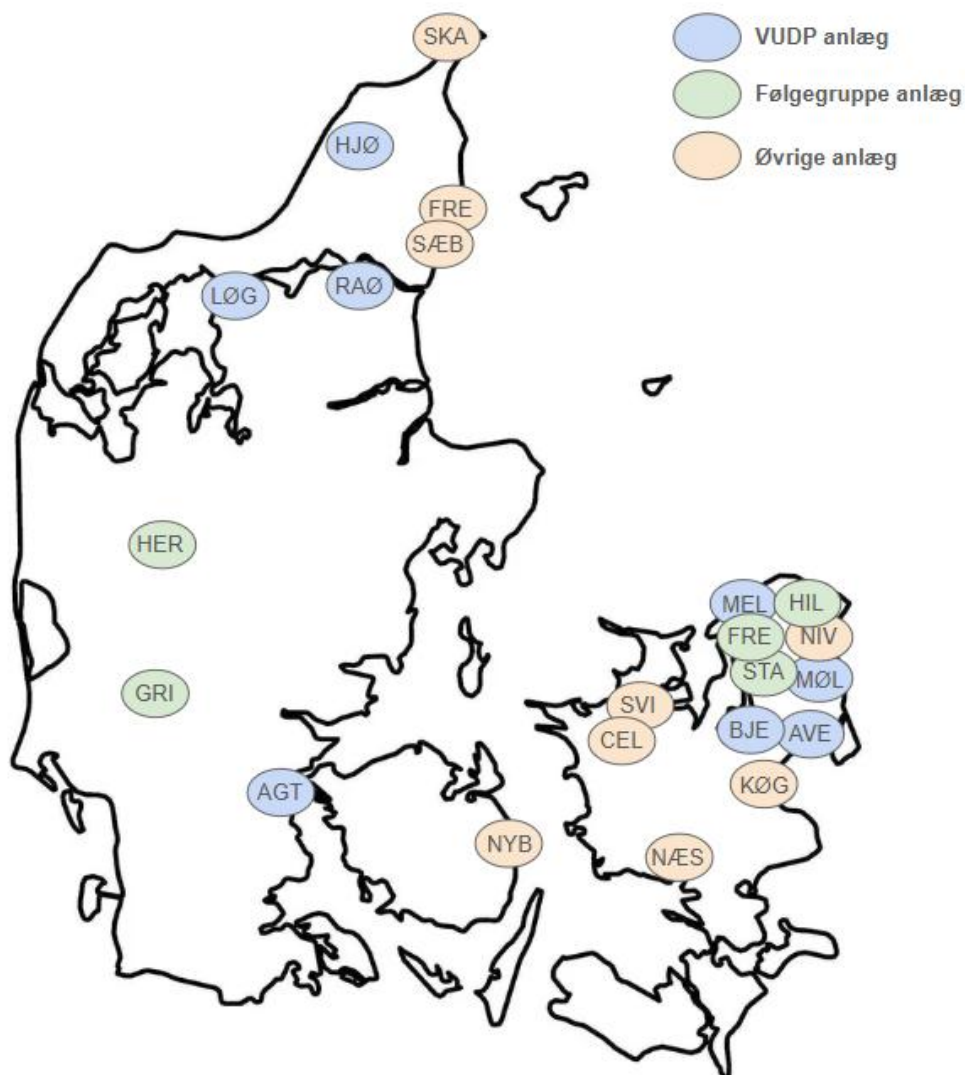
Ved at følge ovenstående metode til identificering af hvilken mikrobiologisk pathway der giver ophav til lattergasproduktion på sit renselanlæg er det muligt at vurdere hvilke styringsmæssige tiltag og driftsoptimeringer der kan nedbringe lattergasudledning. Det er fra projektpartnerens side et ønske, at metoden kan anvendes på tværs af danske forsyninger i arbejdet med nedbringe lattergasemissionerne fra samtlige renselanlæg på landsplan. De danske forsyninger opfordres derfor til at afprøve metoden og implementere de relevante styringsstrategier og driftstiltag på deres renselanlæg.



Figur 25. Beslutningstræ til bestemmelse af hvilken mikrobiologisk pathway N<sub>2</sub>O (hovedsageligt) bliver produceret af.

## 6. En omfattende database for lattergasdynamik og emission fra renseanlæg

Med N<sub>2</sub>O Kontrol har projektets partnere bidraget til forøget viden om lattergasdynamik og de styringsstrategier, der kan reducere lattergasemissionen fra renseanlæg. Lattergasdata og metadata<sup>7</sup> fra de 8 deltagende renseanlæg er i dag samlet i Hubgrade, der blandt andet fungerer som en omfattende database for lattergasdynamik og -emission. Herudover er der i Hubgrade foretaget kontinuerte målinger og beregninger af lattergasemissioner fra både følgegruppe-anlæg og øvrige renseanlæg i Danmark, der har valgt at være med som forløbere i kampen for reduceret emission. Vores omfattende Hubgrade database for lattergasdynamik inkluderer i dag 22 danske anlæg (samt ét i Holland) og samler hermed viden om lattergasdynamik og -emission på tværs af landsdele, anlægstyper og procesforhold (se figur 26). Data og den tilhørende database er tilgængelige og kan deles efter nærmere aftale med Veolia Kruger (Mette Brynjolf - mette.brynjolf@veolia.com).



Figur 26. Danske Renseanlæg med kontinuerte lattergasemissionsberegninger i Hubgrade, herunder de deltagende renseanlæg i nærværende VUDP-projekt, følgegruppe anlæg samt øvrige anlæg.

<sup>7</sup> Proceskoncentrationer, beregninger, det mikrobiologiske samfund mv.

## 7. Usikkerheder

Der eksisterer noget usikkerhed bag de metoder og beregninger, der er anvendt i nærværende projekt, hvoraf nogle redegøres kort herunder.

Ved anvendelse af DNA-analyser - både til bestemmelse af relativ forekomst af div. genera samt af AOB'er og NOB'er som helhed - afhænger identificeringen af gensekvenser af screening op mod eksisterende bioinformatiske databaser. Her anvendes den nok mest anerkendte database til identifikation af mikroorganismer indenfor spildevand (MiDAS databasen), som sikrer at alle i forvejen kendte genera kan identificeres i renseanlæggenes mikrobiologi. Dog afhænger identifikationen netop af at mikroorganismene i forvejen er kendte og desuden at deres identitet er koblet med biokemiske pathways - i dette tilfælde bl.a. nitrifikation og denitrifikation (se også afsnit 1). Til trods for at databasen rummer den største samling af gensekvenser (som kan kobles til biologiske pathways), er det utænkeligt at alle mikroorganismer i renseanlæg - og deres funktion - skulle være identificeret (gennemgået af Dueholm, et al). Dette understøtter data i Hubgrade - hvor der for nogle renseanlæg ikke identificeres AOB'er til trods for, at der foregår effektiv ammoniumomsætning på anlæggene. Det må således forventes, at der på renseanlæggene findes en stort mørketal af bakterier der spiller en rolle i kvælstofomsætning (herunder også  $N_2O$ ) uden at det i dag er muligt at identificere dem eller koble deres identitet til specifikke biologiske pathways. Dvs. at den relative forekomst af de præsenterede genera (afsnit 4) skal tages med et vist forbehold, foruden at det er en månedlig øjebliksprøve at renseanlæggenes mikrobiom.

I samme tråd er der usikkerheder forbundet med beregning af den specifikke AOR (i Optimal slamalder). Beregningerne baseres nemlig på den relative forekomst af AOB'er ifm. den samlede slammængde, hvorfor den specifikke AOR er et *best guess* ud fra de kendte AOB'er hvis relative forekomst kan bestemmes via DNA-sekventering. Herudover tilføjes også en usikkerhed ift. relativ forskel på dataopløsningen, da beregningerne baseres på  $NH_4$  og  $N_2O$  koncentrationer registreret via sensorer på minutniveau samt AOB'ers relative forekomst der blot analyseres på månedsniveau. Den beregnede optimale slamalder ligeledes er et *best guess*, hvor den lave opløsning på DNA-data sætter præcedens for resultatets kvalitet.

Slutteligt er der ligeledes usikkerheder forbundet med beregning af renseanlæggenes baseline  $N_2O$  emission (afsnit 3), grundet den relative forskel på dataopløsningen mellem reeltidsberegning af  $N_2O$  emission (på minutniveau) sammenholdt med den beregnede kvælstofbelastning til processen (1-2 døgnmålinger pr. måned). Denne usikkerhed er dog ikke unik for nærværende projekt, men afspejler en generel sårbarhed, når data fra kontinuerlige processpecifikke  $N_2O$  målemetoder (data fra væskefase- og off-gas sensorer) skal sammenholdes med et mere sparsomt grundlag for renseanlæggenes kvælstofbelastning.

## Konklusion

I N<sub>2</sub>O Kontrol har projektets parter arbejdet målrettet med lattergasudledning fra renseanlæggene mhp. at muliggøre, at de danske renseanlæg kan opnå 50% reduceret emission. Der er således blevet **udviklet en helstøbt software løsning til reduktion af lattergas fra renseanlæggene**, herunder N<sub>2</sub>O Kontrol (målrettet N<sub>2</sub>O-styring) samt den række elementer til overvågning og kontrol med udledningen fra anlæggene (afsnit 1).

I løbet af projektperioden blev løsningens elementer - N<sub>2</sub>O Kontrol (N<sub>2</sub>O-styring), N<sub>2</sub>O emission, DNA fantastic og Optimal slamalder - implementeret på renseanlæggene mhp. af opnå lattergasreduktion på de deltagende anlæg (afsnit 2).

Særligt på renseanlæg med høj N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor (> DK baseline) var reduktionspotentialt stort og via målrettet N<sub>2</sub>O-styring, og **lykkedes det at nedbringe emissionsfaktoren for Avedøre og Bjergmarken Renseanlæg med over 50%** (afsnit 3). På anlæg med med lav N<sub>2</sub>O-emissionsfaktor (< DK baseline) var effekten af målrettet N<sub>2</sub>O-styring (N<sub>2</sub>O Kontrol) begrænset, da N<sub>2</sub>O-N koncentrationen i processen ofte var meget og derfor havde begrænset indflydelse varigheden af N- og DN-faser samt beluftsintensiteten i processen. Den samlede udledning af kvælstof fra renseanlæggene blev endvidere reduceret i tråd med, at rensegraden på anlæggene blev forbedret. Dette understøtter, at **N<sub>2</sub>O-styringerne som helhed bidrager til optimeret kvælstoffjernelse, dvs. både reduktion af lattergasemissioner samt forbedring af overordnede kvælstoffjernelse**. Endvidere observeredes en tydelig sammenhæng mellem anlæggenes relative N-tid (%) og N<sub>2</sub>O-emissionsfaktorer - hvor højere N-tider medfører højere emissionsfaktorer. Dette understøtter, at aktiv N<sub>2</sub>O-styring og optimeret kvælstoffjernelse - blandt andet via optimering af faselængder og beluftsintensitet - bidrager til reduktion af lattergasemissioner, og samtidig **kan medføre energibesparelser gennem reduceret beluftning**.

De deltagende renseanlæg adskiller sig ikke alene i design, kapacitet og belastning, men også særligt i deres **profiler for lattergasproduktion og sammensætningen af deres mikrobielle samfund** (afsnit 4). Anlæggenes **lattergasdynamik** er således netop utrolig anlægsspecifik. Derfor er det afgørende, at driftsoperatørerne forstår og kan identificere de specifikke pathways, der fører til dannelsen af N<sub>2</sub>O, for dermed at kunne styre emissionerne og handle på den mest optimale og effektive måde. Denne indsigt er værdifuld og kan understøtte flere af de drifts- og styringstiltag, der anvendes til at reducere produktionen af lattergas. Det er samtidig vigtigt at pointere, at operatørerne i nogle tilfælde må tilpasse deres driftspraksis, hvis reduktion af N<sub>2</sub>O bliver et reelt driftsmål, da traditionelle driftsmetoder, herunder eks. meget hurtig kvælstoffjernelse (høj AOR) eller skærpede udledningskrav, faktisk kan øge udledningen af lattergas.

Med resultaterne fra nærværende projekt, har det været muligt at udarbejde **en vejledning og metode til aktivt at arbejde med reduktion af lattergas fra renseanlæg** (afsnit 5). Metoden kan anvendes af forsyninger til at nedbringe emissionerne fra renseanlæg uanset, om der anvendes dynamiske styringsværktøjer eller ej. Metoden beror på identifikation af de mikrobiologiske *pathways* der leder til lattergas på det specifikke renseanlæg, og **angiver de relevante styringsstrategier der i de enkelte tilfælde kan afhjælpe på N<sub>2</sub>O-produktion og -emission**. De danske forsyninger opfordres derfor til at afprøve metoden og implementere de relevante styringsstrategier og driftstiltag på deres renseanlæg - mhp. et fælles mål om at nedbringe emissionerne med 50% og dermed spildevandsbranchens samlede klimapåvirkning.

Med N<sub>2</sub>O Kontrol og parternes indsatser i projektet, er det lykkedes at skabe en **omfattende database og lattergasdynamik og -emission fra renseanlæg** (afsnit 6). I Hubgrade samles enestående viden om lattergasudledning, mikrobiologien bag lattergasproduktionen samt hvilke styringsstrategier der kan ibrugtages til at skabe en varig reduktion af udledningen fra renseanlæg. Projektet har således **banet vejen for, at danske forsyninger kan opnå 50% reduktion**

**lattergasemissionerne fra renseanlæg,** og dermed bidrage til den politiske målsætning om en energi- og klimaneutral dansk vandbranche.

## Litteraturliste

- Andalib M, Taher E, Donohue J, Ledwell S, Andersen MH, Sangrey K. Correlation between nitrous oxide (N<sub>2</sub>O) emission and carbon to nitrogen (COD/N) ratio in denitrification process: a mitigation strategy to decrease greenhouse gas emission and cost of operation. *Water Sci Technol*. 2018 Jan;77(1-2):426-438. doi: 10.2166/wst.2017.558. PMID: 29377827.
- Debel L, Stentoft P. A., Stokholm-Bjerregaard M, Ortiz-Arroyo Daniel, Durdevic Petar: Model predictive control for nitrous oxide mitigation in a full-scale wastewater treatment plant: A data-driven simulation study, *Journal of Water Process Engineering*, Volume 76, 2025, 108128, ISSN 2214-7144,
- Duan H, Zhao Y, Koch K, Wells GF, Zheng M, Yuan Z, Ye L. Insights into Nitrous Oxide Mitigation Strategies in Wastewater Treatment and Challenges for Wider Implementation. *Environ Sci Technol*. 2021 Jun 1;55(11):7208-7224. doi: 10.1021/acs.est.1c00840. Epub 2021 May 12. PMID: 33975433.
- Dueholm, M. K. D., Nierychlo, M., Andersen, K. S., Rudkjøbing, V., Knutsson, S., MiDAS Global Consortium, Albertsen, M., & 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), 1888. <https://doi.org/10.1038/s41467-022-29438-7>
- Ekström, S. E. M., Vangsgaard, A. K., Lemaire, R., Valverde Pérez, B., Benedetti, L., Jensen, M. M., Plósz, B. G., Thornberg, D., & Smets, B. F. (2017). Simple control strategy for mitigating N<sub>2</sub>O emissions in phase isolated full-scale WWTPs. In *Proceedings of 12th IWA Specialized Conference on Instrumentation, Control and Automation IWA Publishing*.
- Kampschreur, M. J., Temmink, H., Kleerebezem, R., Jetten, M. S., & van Loosdrecht, M. C. (2009). Nitrous oxide emission during wastewater treatment. *Water research*, 43(17), 4093-4103.
- Klimaplan for en grøn affaldssektor og cirkulær økonomi, 16. juni 2020. <https://www.kefm.dk/Media/4/3/aftaletekst%20Klimaplann%20for%20en%20gr%C3%B8n%20affaldssektor%20og%20cirkul%C3%A6r%20%C3%B8konomi.pdf>
- Law Y, Ni BJ, Lant P, Yuan Z. N<sub>2</sub>O production rate of an enriched ammonia-oxidising bacteria culture exponentially correlates to its ammonia oxidation rate. *Water Res*. 2012 Jun 15;46(10):3409-19. doi: 10.1016/j.watres.2012.03.043. Epub 2012 Apr 3. PMID: 22520859.
- Lotito, A. M., Wunderlin, P., Joss, A., Kipf, M., & Siegrist, H. (2012). Nitrous oxide emissions from the oxidation tank of a pilot activated sludge plant. *Water Research*, 46(11), 3563-3573.
- Miljøstyrelsen, 2020: MUDP Lattergaspulje – Dataopsamling på måling og reduktion af lattergasemissioner fra renseanlæg. ISBN: 978-87-7038-254-0.
- Miljøstyrelsen, MUDP rapport, 2022: Realtidsstyring af lattergasemissioner fra renseanlæg. ISBN: 978-87-7038-374-5.

Miljøstyrelsen, 2024: Forslag til reguleringsmetoder til reduktion af  
lattergasemission fra renseanlæg. ISBN: 978-87-7038-629-6.

Vestergaard, S. Z., Dottorini, G., Peces, M., Murguz, A., Dueholm, M. K. D.,  
Nierychlo, M., & Nielsen, P. H. (2024). Microbial core communities in activated  
sludge plants are strongly affected by immigration and geography.  
*Environmental Microbiome*, 19, Article 63.

Von Sperling, M., & de Lemos Chernicharo, C. (2005). *Biological wastewater  
treatment in warm climate regions volume II*. IWA publishing.