

Energi- og emissionsoptimering ved deammonifikation



EMISSIONS- OG ENERGIOPTIMERING AF DEAMMONIFIKATIONSPROCESSER

DATO: 19. december 2018

Projekt ID: 88.2016

VUDP, Emissions- og energioptimering af deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm

Udgiver:
DANVA

Udarbejdet af:
Aarhus Vand A/S

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

Samarbejdspartnere:
Aarhus Vand A/S
EnviDan A/S
Aarhus Universitet
DHI A/S
VandCenterSyd A/S
BIOFOS A/S

Kategori (Spildevand, drikkevand eller klimatilpasning): Spildevand

HOVEDRAPPORT

Indholdsfortegnelse

1	Sammenfatning	3
2	English summary	4
3	Introduktion	5
4	Projektets betydning for vandbranchen	6
4.1	Marked og/eller anvendelsesmuligheder	7
4.2	Næste skridt	7
4.3	Formidlingsplan	9
5	Projektet	10
5.1	Formål	10
5.2	Output	11
5.3	Projektresultater	11
5.4	Konklusion	12
6	Litteraturliste	14

1 Sammenfatning

I perioden fra 2016 til 2018 har Aarhus Vand, Vandcenter Syd, Aarhus Universitet, DHI, EnviDan A/S og BIOFOS A/S, med tilskud fra VUDP, gennemført projektet: Emissions- og energioptimering af deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm.

Projektet består af følgende 3 arbejdsplaner:

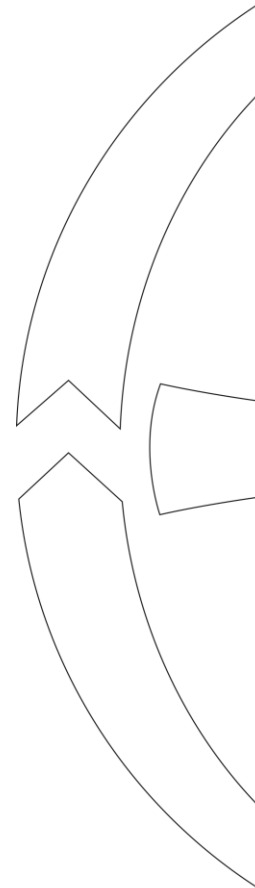
- Arbejdsplan 1: Aktivitetsbestemmelse i kvælstof pathways i laboratorie skala
- Arbejdsplan 2: Online styring af sidestrøms anammox med fokus på reduktion af emissioner
- Arbejdsplan 3: Bestemmelse af anammox-aktivitet i hovedstrømmen.

I **Arbejdsplan 1** blev en analysemetode til anammox aktivitetsbestemmelse udviklet, og der blev udført forsøg i laboratoriet som viste, at anammox-aktiviteten i hovedstrømmen bidrager med ca. 1% af den samlede kvælstoffjernelse i hovedstrømmen. Der er ligeledes gennemført målekampagner i et fuldskalaanlæg i løbet af sommeren 2018 til at kortlægge, om nitrit-shunt var bidragsyder til den samlede kvælstoffjernelse på Marselisborg Renseanlæg.

Det blev dog konkluderet, at en nitrit-shunt i vid udstrækning kunne udelukkes i Marselisborg Renseanlægs procesanlæg i løbet af prøveudtagningen i august 2018.

I **Arbejdsplan 2** blev en understøttende procesmodel udviklet med modelværktøjet WEST. Modellen blev brugt som afsæt til at afprøve en ny blæserstyring på sidestrøms-anammox på Ejby Mølle Renseanlæg. Denne styring var med kontinuerlig beluftning, og resultatet viste, at N₂O-emissionen blev reduceret med 63%.

I **Arbejdsplan 3** blev driftsbetingelserne på Marselisborg Renseanlæg i projektperioden kortlagt. Energiforbruget til kvælstoffjernelse i hovedstrømmen blev opgjort og viste et fald i energiforbrug fra 2016-2017. Hypotesen om, at anammox-aktivitet skulle være årsag til faldet i energiforbrug, blev afvist, men det kunne derimod ikke afvises, at der har været en delvis nitrit-shunt i sommerperioden, da energiforbruget faldt. Undersøgelserne blev lavet i sommeren 2018, og angiveligt pga. driftsforstyrrelser i foråret 2018 var det heller ikke muligt at bekræfte, at der tidligere har været nitritshunt i hovedstrømmen.



2 English summary

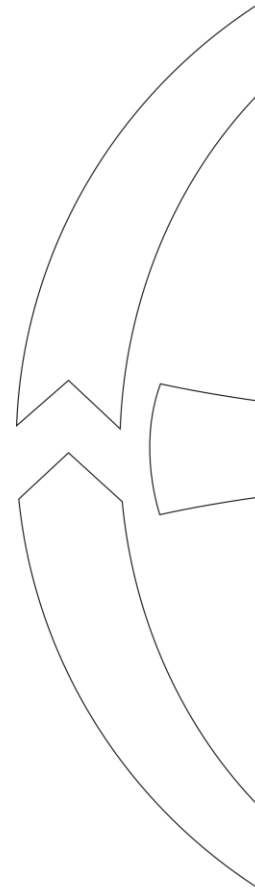
From 2016 to 2018 Aarhus Vand, VandCenterSyd Syd, Aarhus Universitet, DHI, EnviDan A/S and BIOFOS A/S has with funding from VUDP carried out the project "Emission and Energy Optimization of Deammonification Processes" consisting of 3 work packages:

- Work Package 1: Activity determination in nitrogen pathways in laboratory scale
- Work Package 2: Online Management of Side Stream Anammox Focusing on Reduction of Emissions
- Work Package 3: Determination of Anammox Activity in the Main Stream

In **Work Package 1**, an analysis method for anammox activity determination was developed and laboratory tests were conducted which showed that the anammox activity in the main stream contributes approximately 1% of total nitrogen in the main stream. Measurement campaigns have also been carried out in full scale during the summer of 2018 to determine whether nitrite shunt was a contributor to the total nitrogen removal at Marselisborg WWTP. However, it was concluded that a nitrite shunt could largely be excluded from Marselisborg WWTP's biological process during the sampling in August 2018.

In **Work Package 2**, a process model was developed using the WEST modelling tool. The model was used as an offset to test a new aeration control on side stream anammox at Ejby Mølle WWTP. This control was with continuous aeration and the result showed that the N₂O emission was reduced by 63%.

In **Work Package 3**, operating conditions at Marselisborg wastewater treatment plant (WWTP) during the project period were collected and presented. The energy consumption for nitrogen removal in the main stream was calculated and showed a decrease in energy consumption from 2016-2017. The hypothesis that anammox activity should be the reason for the decrease in energy consumption was rejected but it is still a possibility that there was a partial nitrite shunt in the summer period when energy consumption decreased. The tests were made in the summer of 2018 and allegedly due to operational disturbances in the spring of 2018 it was not possible to confirm that there had previously been nitrite shunt in the mainstream.



3 Introduktion

I perioden fra 1.1.2016 til 31.12.2018 har Aarhus Vand, Vandcenter Syd, Aarhus Universitet, DHI, EnviDan A/S og BIOFOS A/S med tilskud fra VUDP gennemført projektet: Emissions- og energioptimering af deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm. Afrapporteringen af projektet indeholder følgende delrapporter:

- Hovedrapport (nærværende rapport)
- Arbejdspakke 1: Aktivitetsbestemmelse i kvælstof pathways i laboratorie skala
- Arbejdspakke 2: Online styring af sidestrøms anammox med fokus på reduktion af emissioner
- Arbejdspakke 3: Bestemmelse af anammox-aktivitet i hovedstrømmen.

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

Tabel 1. Opgavefordeling i løbet af projektet "Emissions- og energioptimering af deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm".

Partner navn	Opgaver
Aarhus Vand	<ul style="list-style-type: none"> - Projektansøger - Afrapportering og udførelse af arbejdsopgave 3 - Afrapportering af slutrapport
VandCenterSyd	<ul style="list-style-type: none"> - Afrapportering og udførelse af arbejdsopgave 2
Aarhus Universitet	<ul style="list-style-type: none"> - Afrapportering og udførelse af arbejdsopgave 1 - Bidrag til arbejdsopgave 3 i form af fuldskala målekampagne, hvilket er afrapporteret under arbejdsopgave 1
EnviDan	<ul style="list-style-type: none"> - Bidrag til arbejdsopgave 3 i form af fuldskala styringsanbefalinger
DHI	<ul style="list-style-type: none"> - Bidrag til arbejdsopgave 3 i form af aktivitetsbestemmelse i laboratorieskala - Opbygning af procesmodel til simulering lattergasemissionen og input til afrapportering af arbejdsopgave 2
BIOFOS	<ul style="list-style-type: none"> - Følgegruppe

4 Projektets betydning for vandbranchen

Aarhus Vand og VandCenterSyd har siden 2014 arbejdet med deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm. Gennemførelsen af dette projekt har betydet, at der nu er tilvejebragt videnskabelige underbygninger af deammonifikationsprocessernes potentialer i såvel hoved- som sidestrøm.

Ved projektets start i 2016 var der optræk til et paradigmeskift i vandbehandlingen på renseanlæggene, idet deammonifikationsprocesser var under fuldskalaafprøvning i sidestrømsanlæg, og samtidig var de under overvejelse til yderligere energieffektiviseringer af vandrensingsprocessen i hovedstrømmen. Projektet har derfor lagt vægt på at udvikle og teste metoder til aktivitetsbestemmelser af anammox aktiviteter i side- og hovedstrøm.

I projektet er der også lagt vægt på at beskrive fuldskala procesbetingelser, styringsprincipper og belastningsforhold, som har afgørende indflydelse på deammonifikationsprocessernes energieffektiviseringspotentiale, og for sidestrømmen er der også undersøgt N_2O emissionen.

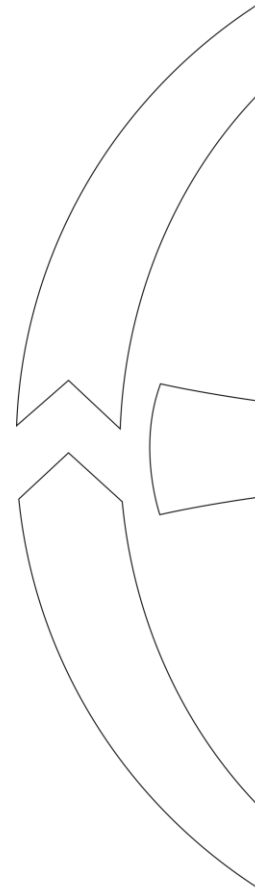
Hovedresultaterne kan direkte anvendes af andre vandselskaber ved valg af nye processer til at energioptimere eksisterende renseanlæg.

Et af de væsentligste resultater er, at de nuværende kendte anammox processer i hovedstrømmen med de givne procestemperaturer i Danmark (10-20 °C) ikke ser ud til at have et potentiale. Forsøg med anammox granuler viste således, at de ved temperaturer under 15 °C bidrager med <1% af kvælstofomsætningen. DNA-sekventering af slam i hovedstrømmen og i sidestrømmen fra 2018 viser, at der er forskellige bakterier i hoved- og sidestrøm, på trods af, at overskudsslam fra sidestrømmen fødes til hovedstrømmen lige før procestankene. Disse resultater indikerer ligeledes, at en hovedstrøms-anammox er svært opnåelig ved de typiske procestemperaturer i danske renseanlæg.

Det blev undersøgt om en delvis nitrit-shunt i hovedstrømmen kunne være årsag til et observeret fald i energiforbruget til kvælstoffjernelse i hovedstrømmen fra 2016-2017 på et konkret renseanlæg. Undersøgelserne blev udført om sommeren i 2018 og viste, at det ikke kunne afvises, at der nogen steder i procestankene kunne være nitrit-shunt, men at den på daværende tidspunkt kun medvirkede i mindre grad til kvælstofomsætningen. Analyser af fuldskala procesdata fra Marselisborg Renseanlæg, viser at det er muligt, at en nitrit-shunt har været til stede i højere grad i 2016-2017, men dette blev ikke bekræftet.

I forhold til en styringsstrategi for en fremmelse af nitritshunten anbefales et styringsprincip med lavt ilt setpunkt, kort slamalder, intermitterende drift med korte aerobe og anoxiske faser samt opretholdelse af en ammoniumkoncentration på over 2-3 mg NH_4-N/l i væskefasen.

Undersøgelser af muligheden for reduktion af lattergasemission fra sidestrømmen viste, at det var muligt med ændret styring af en testreaktor, at nedbringe lattergas emission med 63% sammenlignet med kontrolreaktoren. Styringsformen var kontinuerlig beluftning i stedet for start-stop styring af blæserne. Denne styring havde også en positiv effekt på energiforbruget, som faldt med ca. 15% i testperioden. De 15% tilskrives at hydrocyclonen var i drift i mindre tid, når beluftningen var kontinuerlig.



4.1 Marked og/eller anvendelsesmuligheder

Målet med arbejdsopgave 1 var at tilpasse og teste analysemetoder til bestemmelse af anammox aktivitet. Metoden blev udviklet og testet af DHI og Aarhus Universitet. Den kan udføres på videnskabelige laboratorier til at teste anammox granulers aktivitet på slamprøver fra både side- og hovedstrømsanlæg. I projektføreløbet blev det klart, at metoden ikke umiddelbart kunne håndteres og anvendes på spildevandsselskabernes egne laboratorier.

Med hensyn til anvendelse af anammox processer i hovedstrømmen har dette projekt medvirket til at afklare, at med de undersøgte anammox bakterier vil de energimæssige gevinster være marginale ved de typiske processtemperaturer i danske renselanlæg. Markedspotentialet er derfor begrænset til lokaliteter, som arbejder med spildevandstemperaturer mellem 25-30 °C.

I projektføreløbet er der målt specifikt elforbrug til kvælstoffjernelse på et fuldskalaanlæg, som tyder på, at kvælstoffjernelsen ved de rette procesbetingelser også sker ved en nitritshunt (nitrifikation-denitrifikation). Driftsformen (intermitterende beluftning), temperaturen i processtankene, lavt iltindhold og lavt C/N-forhold tyder på at være de afgørende faktorer.

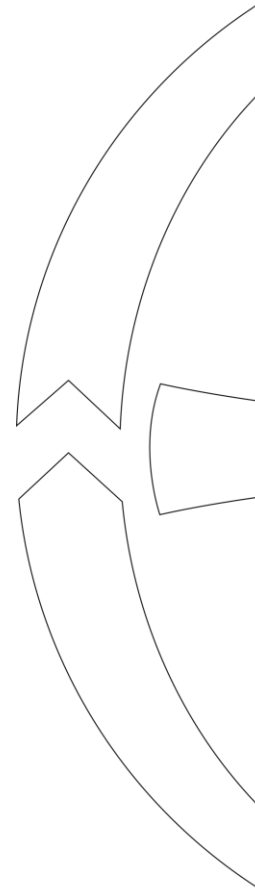
Projektet har tydeligt eftervist, at der er en potentielt væsentlig udfordring med store udledninger af lattergas i forbindelse med kvælstofomsætningen i sidestrøms behandling ved brug af deammonifikationsprocesser. De kommercielt tilgængelige styringsprincipper synes ikke at tage hensyn til uønskede effekt. Igennem projektet er der dels afprøvet en alternativ styring og dels matematisk modelleret en styring med udgangspunkt i en kalibreret model for sidestrømsbehandlingen. Begge de to styringsprincipper viser tydeligt, at det er muligt at reducere lattergas betydeligt. Den afprøvede styring viser en 63% reduktion af lattergas samtidig med en mindre reduktion af energiforbruget, i størrelsesordenen 15%. Udfordringen med de udviklede styringer er nødvendigheden af større procesmæssig opmærksomhed og det vil derfor kræve et svagt øget tidsforbrug indtil disse nye styringsprincipper er fuldstændig indarbejdet.

Der bygges, og er bygget, et relativt stort antal anlæg hvor denne styringsstrategi potentielt kan implementeres. I dag bygges anlæg til sidestrømsbehandling både som kontinuert drevne anlæg og som diskontinuert (SBR) drift. Det må klart anbefales at fremtidige anlæg udføres som kontinuerte anlæg for herved at kunne minimere den betragtelige drivhusgas udledning og samtidig spare en mindre mængde energi.

Med de gældende regler er der ikke noget økonomisk incitament for at reducere lattergas emissioner, dog bør alle ansvarlige forsynings være bevist om den potentielt negative effekt en sidestrømsbehandling kan give anledning til. Det forventes derfor, at den beskrevne og afprøvede styring på sigt vil vinde massivt indpas i nye design af disse anlæg.

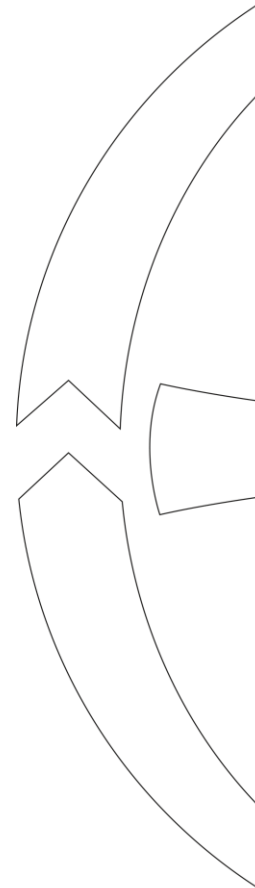
4.2 Næste skridt

Potentialet i Danmark for yderligere energieffektiviseringer relateret til kvælstoffjernelsen i hovedstrømmen ligger i implementering af styringer, der kan tilgodese en nitritshunt (nitrifikation-denitrifikation). I projektet tekniske afrapportering af arbejdsopgave 3 er der peget på C/N-forhold, lavt iltniveau og intermitterende drift, som vigtige parametre der kan arbejdes videre med.



DNA-sekventeringer, der er anvendt som værktøj i arbejdsplan 3 kan, når databasegrundlaget er større, også være med til at give identifikationer af hvilke bakterietyper, som er afgørende for, at en nitrit-shunt kan opretholdes.

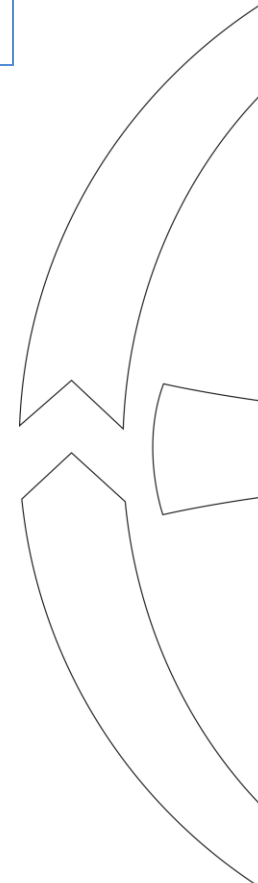
Det anbefales, at der arbejdes videre med en yderligere optimering af de testede og beskrevne styringsstrategier for herved at opnå yderligere erfaringer. Sideløbende anbefales det at fremtidige anlæg designes med en mulighed for bedre styring af beluftningen, specielt i de lave niveauer. Ejby Mølle Renseanlæg er ikke i grunddesignet optimeret til meget små luftmængder, og derfor må det forventes, at yderligere forbedringer vil kunne opnås med et optimeret design. Det må ligeledes anbefales at der snarest muligt i sektoren gøres en reel indsats i forhold til reduktion af N₂O emissioner. Dette projekt viser vejen for et meget betydeligt næste skridt.



4.3 Formidlingsplan

Projektets resultater bliver formidlet som beskrevet i nedenstående skema:

Formidler	Titel	Udgivelsessted	Dato for udgivelse
Per Overgaard Pedersen Mikkel Holmen Andersen	Værdiløs rust eller guldklumper - Anammox i hovedstrømmen?	Dansk Vand Konference 2018	2018
Nerea Uri Carreño	Mitigating N ₂ O Emissions from a Full-Scale Anammox Reactor	Dansk Vand Konference 2018	2018
Lars Haslev Drejer Nerea Uri Carreño Enrico Remigi Mikkel Holmen Andersen	GHG simulations and controller optimizations of the deammonification process	WEFTEC 2018	2018
Anja Kamp	Anammox and partial nitrification in the mainstream of a wastewater treatment plant in a temperate region (Denmark)	Magasinet <i>Water Research</i>	2019



5 Projektet

5.1 Formål

Det overordnede formål med projektet har været at undersøge, om implementeringen af deammonifikationsprocesser i side- og hovedstrøm har et energioptimeringspotentiale ved kvælstoffjernelsen i danske renseanlæg. Disse processer benytter anammoxbakterier, som uden kulstof og teoretisk med 60 % mindre ilt, konverterer ammonium og nitrit til frit kvælstof. Implementeringen er derfor primært drevet af lavere omkostninger til installation og drift. Nedenfor beskrives formålet med projektets del-arbejdspakker, som beskrevet i projektansøgningen:

Arbejdspakke 1: Aktivitetsbestemmelse i kvælstof pathways

Formålet med Arbejdspakke 1 er at tilpasse og teste laboratorie analysemetoder til bestemmelse af anammox-aktivitet. Ved laboratorieskala forsøg, hvor analyser laves kort efter prøvetagning, vil der være helt andre krav til behandlingen af prøver fra fuldskalaanlæg. Anammox-aktiviteten bestemmes med en anerkendt ^{15}N -mærkingsteknik af substraterne og er en teknik som muliggør bestemmelse af dels anammox potentialet, dels processens bidrag til den samlede reduktion af nitrat til frit kvælstof. I Arbejdspakke 1 vil både prøveforbehandlingen og analyseresultaterne blive valideret. I projektet vil der udføres kontrollerede laboratoriereaktorforsøg under fuldskalabetingelser, hvor analyseresultaterne fra laboratorieskala sammenholdes med metoden fra fuldskalaanlæg. Arbejdspakkens mål er, at frembringe en metode, som spildevandsselskaberne selv kan håndtere, og som anvendes i de efterfølgende arbejdsplaner.

Arbejdspakke 2: Online styring af sidestrøms anammox med fokus på emissionsreduktion

Formålet med Arbejdspakke 2 er at udvikle og teste konkrete forslag til robuste og klimavenlige styringsprincipper af sidestrømsdeammonifikation, og at udvikle en understøttende procesmodel. Projektet vil kombinere data på to nøgleparametre: lattergas og nitrit målt online, med anlæggets andre data og teste nye kontrolstrategier. Til styrkelse af optimeringsarbejdet bliver en procesmodel opbygget på baggrund af afledte data og anammox-aktivitetsbestemmelser. Gennem en optimeret styring af omsætningen af ammonium og nitrit forventes udledningen af lattergas reduceret markant (~90 %). Styrringerne testes hos VandCenterSyd og søges integreret i fuldskalastyringen. Arbejdspakkens mål er at kontrollere og aktivt minimere lattergas-emissionen i sidestrømmen med henblik på implementering af tilsvarende tiltag på hovedstrømmen.

Arbejdspakke 3: Anammox-aktivitetsbestemmelse i hovedstrømmen

Formålet med arbejdsplanen 3 er at bestemme de reelt opnåede omsætningsrater for anammox i hovedstrømmen således, at det kan dokumenteres hvor stor en andel af kvælstoffjernelsen, der kan tilskrives nitritation-denitritation (nitrit shunt) eller partiel nitritation-anammox (deammonifikation). Der foretages anammox-aktivitetsbestemmelser i fuldskala, med de i Arbejdspakke 1 udviklede testmetoder, på flere af parternes renseanlæg. Analyseprogrammet forløber over en længere periode således, at anammox-aktivitetens afhængighed af spildevandstemperaturen under danske forhold undersøges. Sammenhænge mellem det enkelte renseanlægs nuværende drift, inkl. online monitorering, og den opnåede anammox-aktivitet undersøges. Heraf udarbejdes anbefalinger til det mest optimale procesdesign og styring for at opnå den mest energi- og emissionseffektive kvælstoffjernelse. I anbefalingen inddrages ligeledes renseprocessens overordnede emission. De opnåede resultater kan anvendes i fremtidig dimensionering og procesmodellering.

5.2 Output

Teknisk arbejdsrapporter bestående af flg. delrapporter:

Arbejdspakke 1: Final Report from Aarhus University, som i hovedtræk omfatter flg.:

- "Method to measure anammox and denitrification in activated sludge of a wastewater treatment plant at different temperatures"
- Results of anammox and denitrification rate measurements in the main- and side stream of Marselisborg WWTP at different temperatures.

Arbejdspakke 2: "Arbejdspakke 2 resultater", som i hovedtræk omfatter:

- Modellering af deammonifikationsprocesser for sidestrømmen på Ejby Mølle Renseanlæg
- Fuldskala kontinuert beluftningskontrol
- Resultater (6-månders fuldskaladrift) fra side-strømmen på Ejby Mølle renseanlæg.

Arbejdspakke 3: Bestemmelse af anammox-aktivitet i hovedstrømmen, som i hovedtræk omfatter flg.:

- Kortlægning af nuværende drift i hovedstrømmen på Marselisborg Renseanlæg
- Projektresultater fra fuldskaladrift på Marselisborg Renseanlæg i perioden 2014-2018.

5.3 Projektresultater

Der henvises generelt til de tekniske delrapporter, som er angivet under afsnit 5.2 med hensyn til den mere detaljerede beskrivelse af projektresultaterne. Nedenfor er hovedresultaterne opsummeret for hvor arbejdspakke.

Arbejdspakke 1

Der blev udviklet en analysemetode til aktivitetsbestemmelse af anammox i spildevand. Anammox aktiviteten i hovedstrømmen på Marselisborg Renseanlæg blev bestemt ved laboratorieforsøg til at bidrage til ca. 1% af kvælstoffjernelsen i hovedstrømmen.

Arbejdspakke 2

Der blev udviklet en understøttende procesmodel i WEST, som viste at det var muligt at minimere N₂O-aftrykket betragteligt ved ændret styring af DEMON-anlægget på Ejby Mølle Renseanlæg. En simpel styring med kontinuerlig beluftning blev afprøvet i fuldskala. Det var muligt at vise, at det er muligt at minimere N₂O-aftrykket fra sidestrøms-anammox proces med 63% ved at styre DEMON tanken med kontinuerlig beluftning i stedet for start-stop-beluftning.

Arbejdspakke 3

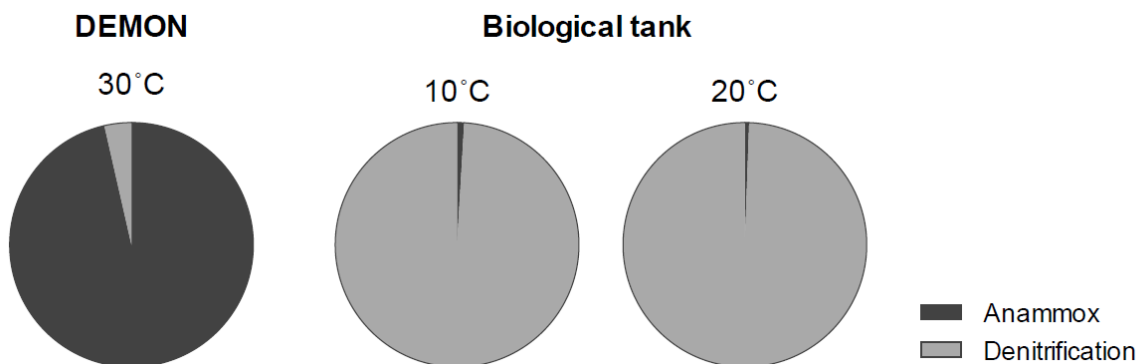
Data for energiforbrug på Marselisborg Renseanlæg viser, at der muligvis har været nitritshunt i hovedstrømmen fra 2016-2017. En målekampagne udført af Aarhus Universitet med undersøgelse af kvælstofbalancer og omsætningsrater udført i sommeren 2018 kunne dog ikke bekræfte, at nitrit-shunten bidrog væsentligt til kvælstofomsætningen i måle-

perioden. Målingerne viste dog, at der var et mindre bidrag fra en delvis nitrit-shunt i hovedstrømmen ved procestankenes bund. Da der var en del driftsforstyrrelser på Marselisborg Renseanlæg i perioden op til målekampagnen, har dette haft en indflydelse på resultatet. Det var dog ikke muligt at tilskrive nitritshunten en betydende andel i kvælstofomsætningen, som i målekampagnen skete ved traditionel nitrifikation og denitrifikation. DNA-analyser af slam fra hovedstrømmen og DEMON viser, at bakteriearterne er forskellige i de to tanke på trods af, at overskudsslam fra DEMON-tanken føres til procestankene. For at fremme en nitritshunt i hovedstrømmen anbefales det at styre efter lavt ilt setpunkt, kort slamalder, intermitterende drift med korte aerobe og anoxiske faser samt opretholdelse af en ammoniumkoncentration på over 2-3 mg NH₄-N/l i væskefasen

5.4 Konklusion

Projektets hovedkonklusioner er flg.:

- Der er udviklet en laboratorieanalysemetode til bestemmelse af anammox aktivitet i hoved- og sidestrømsanlæg. Ved anvendelse af metoden er der fundet resultater for anammox og denitrifikationens bidrag i side-strømmen (benævnt: DEMON) og i hovedstrømmen (benævnt: Biological tank), som vist på nedenstående figur 1.



Figur 1. Relativt bidrag af anammox og denitrifikation i DEMON og biologiske tanke. For DEMON er dataene vist til 30 ° C, som en typisk procestemperatur, og for de biologiske tanke vises dataene til 10 °C og 20 °C, hvilket afspejler in situ temperaturen på de biologiske tanke til hhv. vinter- og sommermånedene.

- Analysemetoden er fortsat på et stadie, hvor den kun kan anvendes på videnskabelige laboratorier og den kan ikke umiddelbart anvendes på renseanlæggenes driftslaboratorier
- Det er ved modelberegninger i WEST og en simpel ændring af styringen med kontinuerlig beluftning blev eftervist i fuldskala, at det er muligt at nedbringe N₂O-emission fra sidestrøms-anammox med 63% ved at ændre blæserstyring til kontinuerlig drift
- bidraget fra anammox og nitritshunt til kvælstoffjernelse i hovedstrømmen på Marselisborg Renseanlæg viste sig, at være minimalt i den gennemførte målekampagne i sommeren 2018. Målekampagnen viste, at nitrit-shunten var til stede tæt

ved tankens bund i begrænsede dele af procestanken. Den bidrog dog ikke væsentligt i måleperioden.

- Analyser af driftsdata fra 2016-17 tyder dog på, at nitrit-shuntten har bidraget noget mere i sommerperioden. Dette har projektet dog ikke kunnet verificere, idet metoden til aktivitetsbestemmelse var under udvikling på dette tidspunkt.
- Ved de procestemperaturer der er almindelige for et dansk renselanlæg, og med den teknologi der er kendt nu, er det usandsynligt at fjernelse af kvælstof med anammoxbakterier kan implementeres.
- der mulighed for videre undersøgelse af implementering af nitritshunt, da disse bakterier har større aktivitet ved lavere temperaturer end anammoxbakterierne.
- For at fremme en nitritshunt i hovedstrømmen anbefales det at styre efter lavt ilt setpunkt, kort slamalder, intermitterende drift med korte aerobe og anoxiske faser samt opretholdelse af en ammoniumkoncentration på over 2-3 mg $\text{NH}_4\text{-N/l}$ i væskefasen.

6 Litteraturliste

Jimenez, Jose [Jose Jimenez], (2014): "Short-Cut Nitrogen Removal: A State of the Art Review", Brown and Caldwell, http://cwwuc.org/pdf/Short-Cut%20Nitrogen_Jimenez_Final.pdf

[Wett et al., 2012]: Wett, B.; Podmirseg, S. M.; Hell, M.; Nyhuis, G.; Bott, C.; Murthy, S., (2012) "Expanding DEMON Side stream Deammonification Technology Towards Mainstream Application. Proceedings of the International Water Association Conference on Autotrophic Nitrogen Removal"; Milan Italy June 26-29.

[Kornaros and Dokianakis, 2010]: Kornaros, M.; Dokianakis, S., (2010) "Partial Nitrification/Denitrification Can Be Attributed to the Slow Response of Nitrite Oxidizing Bacteria to Periodic Anoxic Disturbances". *Environ. Sci. Technol.*; 44, 7245-7253.

[Ge et al., 2014]: Ge, S.; Peng, Y.; Qiu, S.; Zhu, A.; Ren, N., (2014) "Complete Nitrogen Removal from Municipal Wastewater via Partial Nitrification by Appropriately Alternating Anoxic/Aerobic Conditions in a Continuous Plug-Flow Step Feed Process". *WaterRes.*; 68, 740-749.

[Blackburne et al., 2008]: Blackburne, R.; Yuan, Z.; Keller, J., (2008) "Partial Nitrification to Nitrite Using Low Dissolved Oxygen Concentration as the Main Selection Factor". *Biodegradation*, 19 (2), 303-312.

J. Pérez, T. Lotti, R. Kleerebezem, C. Picioreanu, M.C.M. van Loosdrecht, (2014) "Outcompeting nitrite-oxidizing bacteria in single-stage nitrogen removal in sewage treatment plants: A model-based study". *Water Research* 66 (2014) 208-218.

Andersen, Mikkel H. (2016): "Test of Specific Anammox Activity in the Main- and Side stream at Marselisborg WWTP", *DHI 2016*

Xiaojin Li, Stephanie Klaus, Charles Bott, Zhen He, (July 2018), "Status, Challenges, and Perspectives of Mainstream Nitritation-Anammox for Wastewater Treatment"

Krüger Veolia (2009): "Bio-denitro® Bio-deniphospho®", http://technomaps.veoliawatertechnologies.com/krugeras/ressources/documents/2/2868/Bio-denitro_web.pdf

A. C. Brotto, H. Li, M. Dumit, J. Gabarró, J. Colprim, S. Murthy, and K. Chandran, (2015) "Characterization and mitigation of nitrous oxide (N₂O) emissions from partial and full-nitrification BNR processes based on post-anoxic aeration control", *Bio-technology and Bioengineering*, 112(11):2241-2247.

Castro-Barros, C., Daelman, M. R. J., Mampaey, K. E., Loosdrecht, M. C. M. van, & Volcke, E. I. P. (2015). "Effect of aeration regime on N₂O emission from partial nitritation-anammox in a full-scale granular sludge reactor", *68(2015)*, 793-803

K. Chandran, L. Y. Stein, M. G. Klotz, and M. C. van Loosdrecht. "Nitrous oxide production by lithotrophic ammonia-oxidizing bacteria and implications for engineered

nitrogen-removal systems". *Biochemical Society Transactions*, 39(2):1832–1837, 2011.

k. Chandran, D. Houweling, T. Constantine, J. Sandino, P. Nielsen, C. Steen, S. Eriksen, L. Havsteen, N. Uri. "Low energy and no external carbon nitrogen removal using optimized process control strategies". WEFTEC 2015.

Egli, K., Fanger, U., Alvarez, P. J. J., Siegrist, H., van der Meer, J. R., & Zehnder, A. J. B. (2001). "Enrichment and characterization of an anammox bacterium from a rotating biological contactor treating ammonium-rich leachate". *Archives of Microbiology*, 175(3), 198–207.

Joss, A., Eugster, J., Roger, K. O., Rottermann, K., Burger, S., Fabijan, P. Siegrist, H. (2009). "Full-Scale Nitrogen Removal from Digester Liquid with Partial Nitritation and Anammox in One SBR", 5301–5306.

D. Salzgeber, A. Joss, and H. Siegrist. (2007), "Autotrophe Schlammwasserentstickung (Nitritation/Anammox)": Im SBR-Verfahren (Sequencing batch reactor). *GWA Gas, Wasser, Abwasser: Jahresheft*, 87(3):205–209.

B. Wett. (2007), "Key Parameters for Control of DEMON Deammonification Process Key Parameters for Control of DEMON Deammonification".

S. Welker, S. Agrawal, M. Weber, H. Horn, S. Lackner. (2017), "Influence of particulate matter from digested sludge on partial nitritation-anammox". *IWA Conference on Sustainable Wastewater Treatment and Resource Recovery: Research, Planning, Design and Operation 2017*.