

VUDP Projekt 88.2016

Energi- og emissionsoptimering ved anvendelse af deammonifikationsprocesser i hoved- og sidestrøm

DHI: Mikkel Andersen (MHAN) & Lars Nyrup Drejer (LNDR)
VCS: Per Henrik Nielsen (PHN), Søren Eriksen (SER), Nerea Uri (NUR)

Arbejdspakke 2 resultater

Overblik

Optimering af styringen af sidestrømsprocessen til minimering af energi og klimaaftrykket har været det centrale formål med arbejdspakke 2. Dels var opgaven at udvikle og teste konkrete forslag til robuste og klimavenlige styringsprincipper af sidestrømsdeammonifikation i fuld skala, og dels at udvikle en understøttende procesmodel. Ved at anvende data fra to helt nye sensorer for lattergas og nitrit og kombinere det med anlæggets andre måledata er flere kontrolstrategier blevet testet. Til styrkelse af optimeringsarbejdet er en procesmodel blevet opbygget i WEST på baggrund af projektets data, samt anammox-aktivitetsbestemmelser. Endeligt er en række forskellige forslag til robuste og klimavenlige styringsprincipper testet i WEST modelleringssoftwaren for at opnå en reduktion af sidestrømsprocessens CO₂-fodaft tryk svarende til hovedstrømmens CO₂-fodaft tryk eller bedre.



Figure 1 Foto fra Ejby Mølle Renseanlæg af de to DEMON® tank. Hydrocyklonerne kan ses på toppen af tankene med det buede røde rør.

På Ejby Mølle rensaanlæg findes der to sidestrøms deammoniseringsreaktorer som er idriftsat i december 2014. Reaktorerne drives parallelt, har et volumen på 320 m³ hver og en designbelastningskapacitet på små 400 kg-N per dag. Begge reaktorer blev bygget som kontinuerlig omrørte tanke med en intern klaringstank og har begge en hydro-cyklon som bruges til at separere og holde granulært-anammox slam i reaktoren mens overskudslam mistes i overløbet. Hydro-cyklonen tillader derfor en adskillelse af tilbageholdelsestid i reaktoren for de forskellige bakterier. Dette er fordelagtigt for den langsomt voksende anammox bakterie som har brug for en langt højere retentionstid end den normale aktivslam biomasse.

DEMON-reaktorer opereres normalt ved anvendelse af en patenteret pH-baseret kontrolleret alternerende luftning, der tillader både ammonium og nitrit omsætning kan finde sted i samme procesenhed. Ammonium Oxiderende Bakterier (AOB) er generelt anerkendt som den vigtigste bidragsydere til nitrit produktion og især til lattergas produktionen, hvorimod anammox bakterier ikke menes at bidrage til produktion af lattergas. Driftsbetingelser som nitritniveauer, koncentrationer af opløst oxygen (DO), pH- og antal beluftningscykler spiller alle en vigtig rolle i produktion og emission af lattergas. I projektet er den specifikke rolle i hver af disse driftsbetingelser blevet testet.

Med to ens procestanke er VCS's DEMON anlæg ideelt til at lave test forsøg med. Udover den alternerende luftning styring (baseline styring) er en kontinuerlig beluftning testet i søster-reaktoren. Endeligt er en række lattergas og nitrit baseret styringer blevet testet i WEST (N₂O, NO₂ styring). Alle forsøg er lavet under samtidig registrering og beregning af energi- og klima-aftrykket.

Verifikation af lattergas emissionsberegninger

Den største klima-påvirkning fra deammonifikationsprocessen kommer fra lattergas. Som udgangspunktet for at kunne belyse denne klima-påvirkning kontinuerligt blev der installeret en ny N₂O sensor i hver DEMON tank. Ud fra sensor signalerne og beluftningsmængden kan der beregnes en lattergas emissionen og dermed også en CO₂-ekvivalent emission. Beregningen er vigtig da den skal danne et sammenligningsgrundlag for CO₂-ekvivalent emission fra de forskellige styringsforslag.

$$r_{N_2O, T_{Process}} = H_{N_2O, T_{Process}} \times S_{N_2O} \left[1 - e^{-\frac{k_L a_{N_2O}}{H_{N_2O}} \cdot \frac{V_R}{Q_A}} \right] \times \frac{Q_A}{V_R}$$

(1)

Beregningerne er lavet ift. formlen (1), og yderlig information og baggrund for beregningerne kan findes i artiklen og denne referencer¹.

For at validere emissionsberegning af CO₂-aftrykket blev der efter implementering af emissionsberegningerne foretaget en målekampagne med avanceret offgas måleudstyr. Denne validering blev foretaget på både den normal alternerende drift (baseline styring) og på den kontinuerte beluftede (kontinuert styring).

På billedet herunder (Figur 2) ses den blå gaslange fra offgas måleren, som opsamlede offgas fra toppen tankes gaskegle. Offgas måleren er et avanceret infrarødt spektrofotometer der kan måle lattergasindholdet i offgassen med stor nøjagtighed.

Baresela et al. (2016) "Comparison of nitrous oxide (N₂O) emissions calculations at a Swedish wastewater treatment plant based on water concentrations versus off-gas concentrations", ACCR, Vol 7, p185-191.
N₂O Emission Calculation Compendium (2014) Unisense Environment.



Figure 2 Foto fra toppen af den ene DEMON tank på Ejby Mølle renselanlæg. Den blå slange opsamler gas fra toppen af processen og sender den ned til offgas instrumentet på jorden.

Under offgas valideringstesten bliver der indsamlet lattergas data fra både SRO-anlægget og fra offgas måleren. Efterfølgende blev data behandlet og sammenstillet. På Figur 3 vises sammenligning af N₂O emissionen beregnet ud fra en N₂O sensor (liquid) eller fra offgas måleren. Der er for den alternerende tank god overensstemmelse mellem de to målinger. Forskellen mellem de to målinger skyldes primært at opblandingen af gassen i toppe af tanken er langsom og derfor fanges den fulde dynamik for strippingprocessen ikke af offgas måleren. For den korte måleperiode var der en emissions procent på 3 – 3.3% af den omsatte mængde ammonium. Dette svarer til 5-6 gange N₂O emissionen fra et gennemsnitligt aktivslamanlæg og er i god overensstemmelse med data fra hele perioden.

Alternating Aeration

Reference Reactor	Offgas Emission	Liquid Sensor Emission	ΔGas/Liquid
N-g N ₂ O/measurement	772,22	865,29	-10,8%
%N of N-treated	3,28%	3,68%	-
%N of N-Load	3,09%	3,46%	-

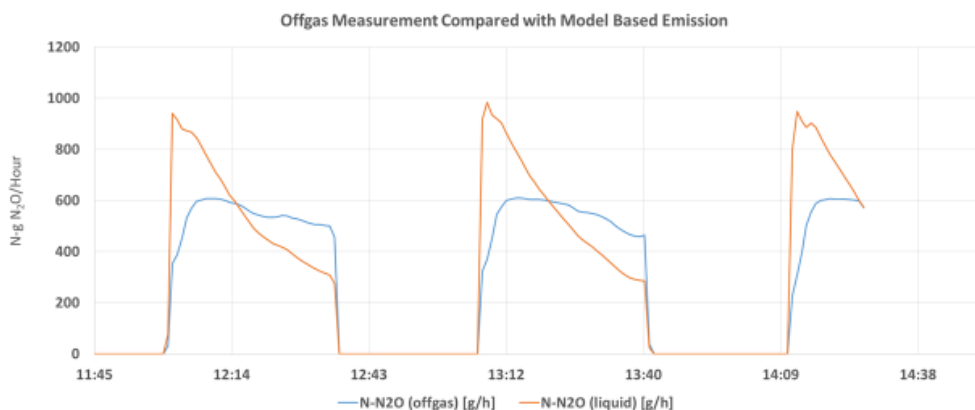


Figure 3 Sammenligning af N₂O emissionen beregnet ud fra en N₂O sensor (liquid) eller fra offgas måleren. Der er for den alternerende tank en god overensstemmelse mellem de to målinger.

For den nye kontinuerlige beluftede styringsstrategi i søster tanken vises ligeledes sammenligning af N₂O emissionen beregnet ud fra en N₂O sensor (liquid) og fra offgas måleren (Figur 4). Der er for den kontinuerlige beluftede tank ikke en god overensstemmelse mellem de to målinger. Det er efterfølgende konstateret at en kalibrering af N₂O sensorerne i procestanke ikke var registreret korrekt, og desværre var det ikke muligt at genskabe kalibreringen fuldt ud. Men baseret på offgas måleren er der med den nye styring for den korte måleperiode en reduceret emissionsprocent på 1.7-1.8% af den omsatte mængde ammonium.

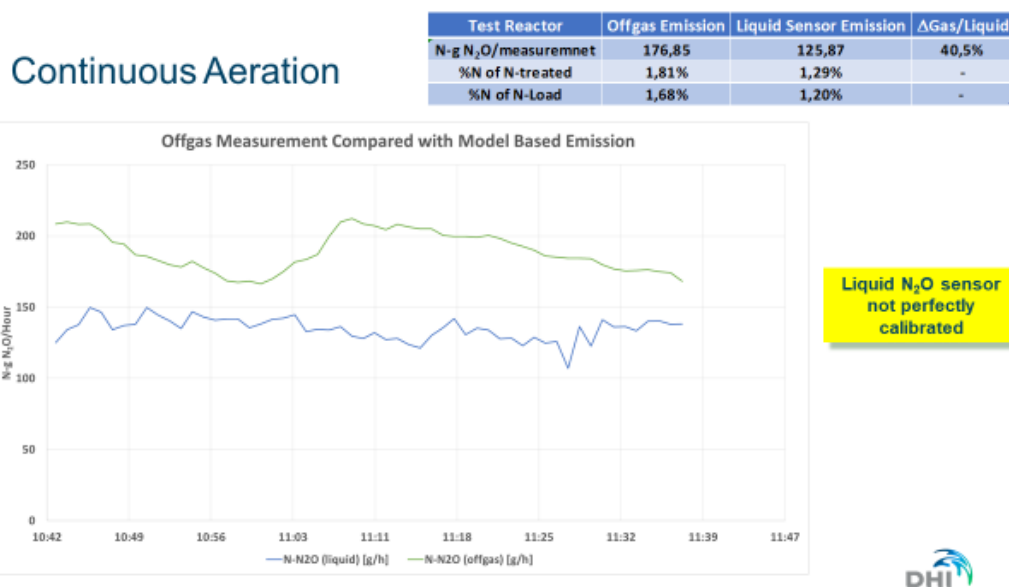


Figure 4 Sammenligning af N₂O emissionen beregnet ud fra en N₂O sensor (liquid) eller fra offgas måleren i den kontinuerte tank. Der er for den alternerende tank en manglende overensstemmelse mellem de to målinger. Det er efterfølgende konstateret at en kalibrer

Modellering af deammonifikationsprocessen for sidestrømmen

Med afsæt i anlægsbeskrivelsen og dimensioner for Ejby Mølles sidestrømsreaktorer, er der opbygget en simuleringmodel for anlægget og tilhørende biokinetiske model for deammoniserings-processen (Figur 5). Modellen og simuleringerne af Ejby Mølle sidestrømsreaktorerne er blev udført i WEST (DHI) og modellen har en enkelt aktiveret slamreaktionsenhed. Tilløbsflowets indhold er holdt konstant (steady state) for de fleste simuleringer. Der er i modellen mulighed for at regulere mængden af kulstof under simuleringerne, da kulstofindholdet i vandet fra afvandingsprocessen af udrådnet slam varierer en del i datasættet. For at få modellen til at fungere korrekt, er den interne klaringsenhed og hydro-cyklon modelleret i særskilte processer. Det giver i simuleringen mulighed for at opnå en tilsvarende hydrocyklon funktionalitet ved at vælge kun anammox-komponenten og styringer til at undgå svingninger i separationseffektivitet og overskudsslam.

Model layout

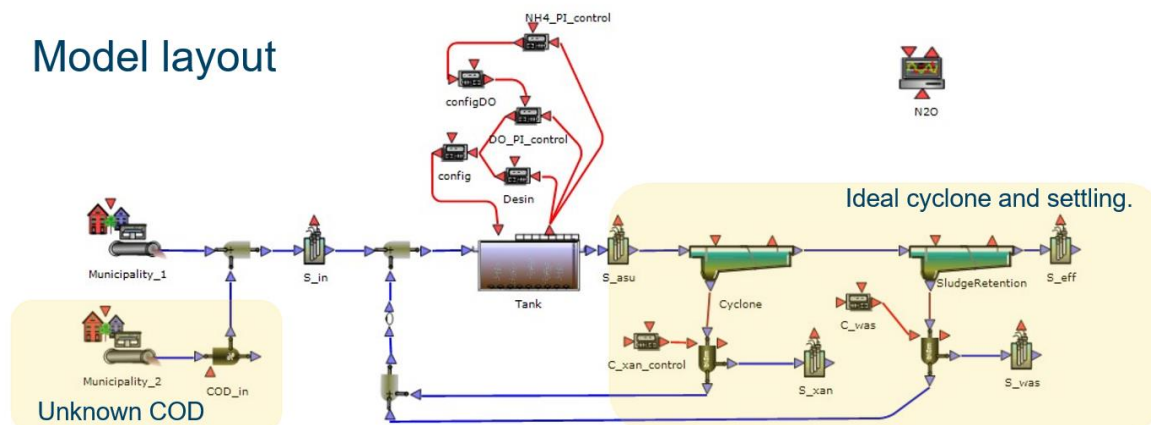
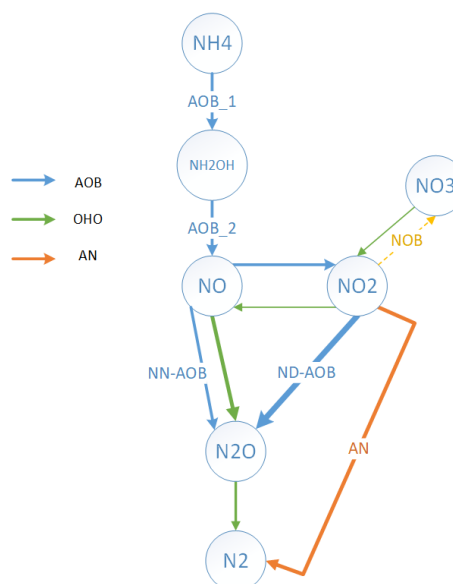


Figure 5 Skematisk tegning af DEMON reaktoren på Ejby Mølle Renseanlæg. På figurens ses både den interne klaringskøle og hydro-cyklonen. Derudover ses på toppen af figuren en række styringsmoduler som er implementeret og testet i projektet.

Den valgte biokinetiske model er en ASM-G1-model som er baseret på et klassisk aktiv slam model framework. ASM-G1-modellen beskriver ud over standard modellen også en model for drivhusgasemissioner for både den normale alternerende beluftning og den kontinuerlige luftningsstrategi. Modellen omfatter 4 veje til lattergasproduktion: (1) En biomasse og demmonifiseringsreaktion. (2) Nitritation ved AOB og nitrering ved nitritoxiderende bakterier (NOB). (3) NN- og ND-stierne for AOB-bakterierne, der frembringer N₂O og (4) og endelig en 4-trins denitrifikationsproces for den heterotrofiske biomasse (OHO). Modellen for DEMON reaktoren vil være tilgængelig gennem WESTs proces bibliotek.



Ved hjælp af både online- og laboratorie-målinger fra anlægget er fra Ejby Mølle har modellen blevet kalibreret i forhold til lange tidsserier for både den alternerede beluftningsstrategi og den kontinuerlige luftningsstrategi. Den kalibrerede model blev derefter brugt til at vurdere potentialet i nye kontrolstrategier med hensyn til drivhusgasemissioner.

Modellering af baseline deammonifikationsprocessen

Modellen blev kalibreret med datasæt fra målekampagner fra DEMON anlægget, i henhold til både den alternerende styringsstrategi og den kontinuerte styringsstrategi. I målekampagnerne var der en del bevægelse i reaktorens drift, hvilken også kan ses ud af det udvalgte reference datasæt (de blå kurver i Figur 6). Med muligheden for at teste modellen mod de to forskellige styringskonfigurationer og data, er der lavet en afvejet og optimal model kalibrering i mellem de to proceskonfigurationer. Dette har reduceret risikoen for at overfitte parametrene til datasættet. Ifølge Figur 6 passer kalibreringen til de generelle procesbetingelser for datasættet.

Det skal bemærkes at målingerne ikke er fra en stationær proces. Proceduren var at danne et stationært og repræsentativt døgn som gentages, og derved forcere en stationær proces til kalibrering. Derfor kan det ses at måledata driver for NO₃, mens simuleringsdata konvergerer omkring et smalt stationært bånd for alle analytter.

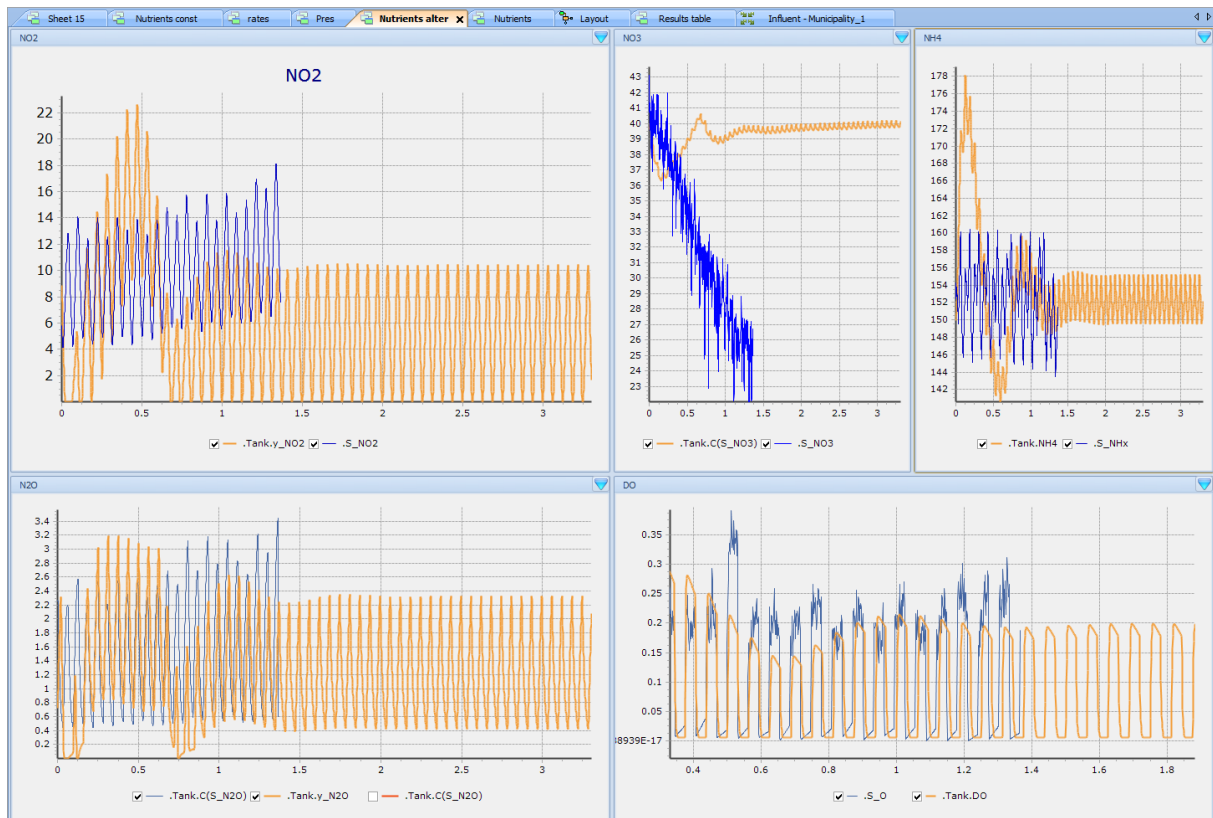


Figure 6 Simuleringsresultat for den alternerende beluftning. De blå kurver er fuldskala reference datasættet fra den kørende DEMON® reaktor.

Modellering af kontinuert beluftning

I forsøgsreaktoren ved Vandcenter Syd, blev den kontinuerte beluftningsstyring trimmet løbende, for at holde processen i et godt område ift. ammoniumomsætning og for at undgå nitrit akkumulering. I WEST modellen er den samme øvelse ligeledes blevet løst med en controller, der tilretter det ønskede ilt-niveau efter et ammonium sætpunkt. Det vigtigste at bemærke i figuren 7 er, at deammonificeringsprocessen, der er en anaerob proces, har de rette substrater og forhold for at løbe selvom beluftningen er aktiv. At dette kan lade sig gøre skyldes at de observerede kinetiske rater dækker over en ilt gradient i biomasse partiklerne der beskytter anammox bakterien. Den eneste måde at bestemme hvordan denne gradient skal udtrykkes i model parametrene, er ved at have to adskilte driftpunkter, som kinetikken kan fittes til. Ved at tune procesparametrene til et område, der fungerer både ved kontinuert beluftning og pH-baseret styring, opnås den funktionalitet i modellen.

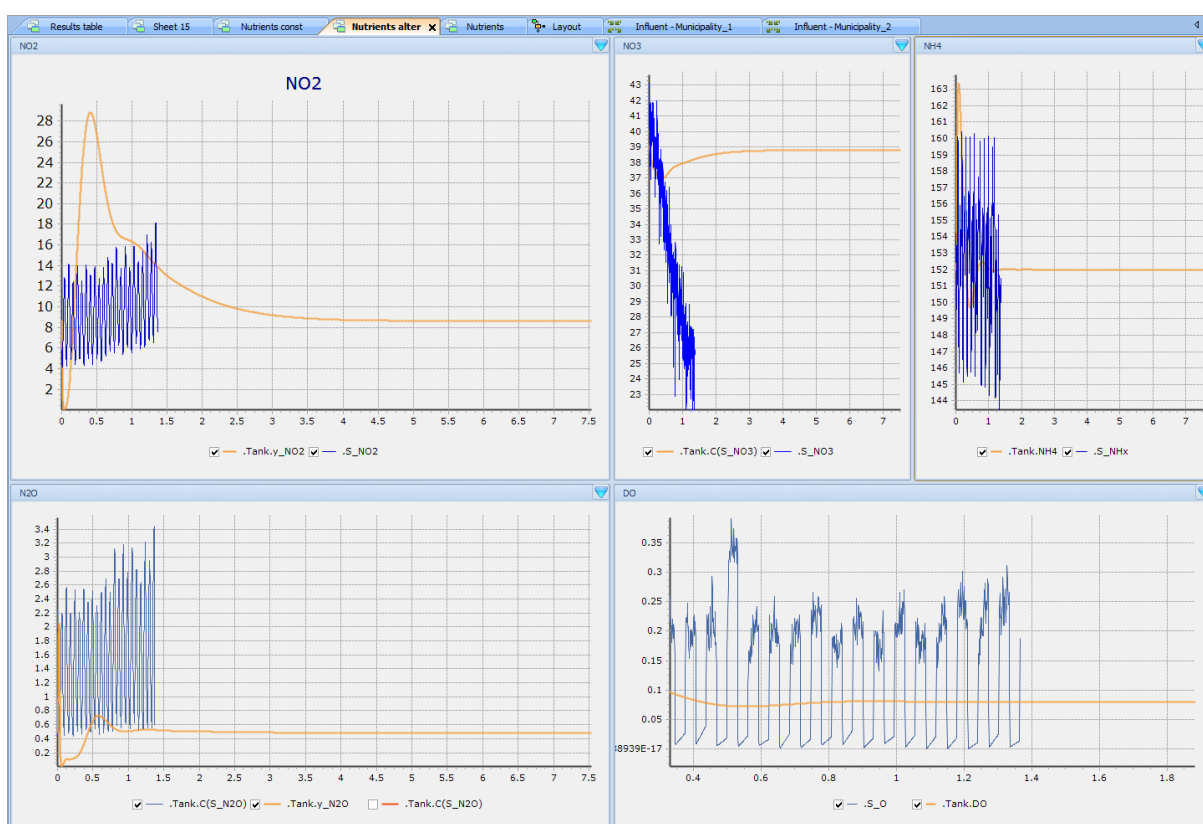


Figure 7 Simuleringsresultat for den alternerende beluftning. De blå kurver er fuldskala reference datasættet fra den kørende DEMON® reaktor.

Simuleringstest af alternativer til kontinuert beluftningsdrift

To nye kontinuerlige tidsstyringsstrategier blev testet ved at anvende NO₂-sensoren til sætpunktet til den bedste ydelse hvad angår carbon footprint, hvor nitrifications- og deammoniseringsprocesserne var optimalt afbalanceret.

N₂O og NO₂ kontrolleret beluftning

To nye kontinuerlige tidsstyringsstrategier blev testet ved at anvende enten NO₂ eller N₂O sensoren til sætpunktet til den bedste ydelse, hvad angår carbon footprint, hvor nitrifications- og deammoniseringsprocesserne var optimalt afbalanceret (Figur 8).

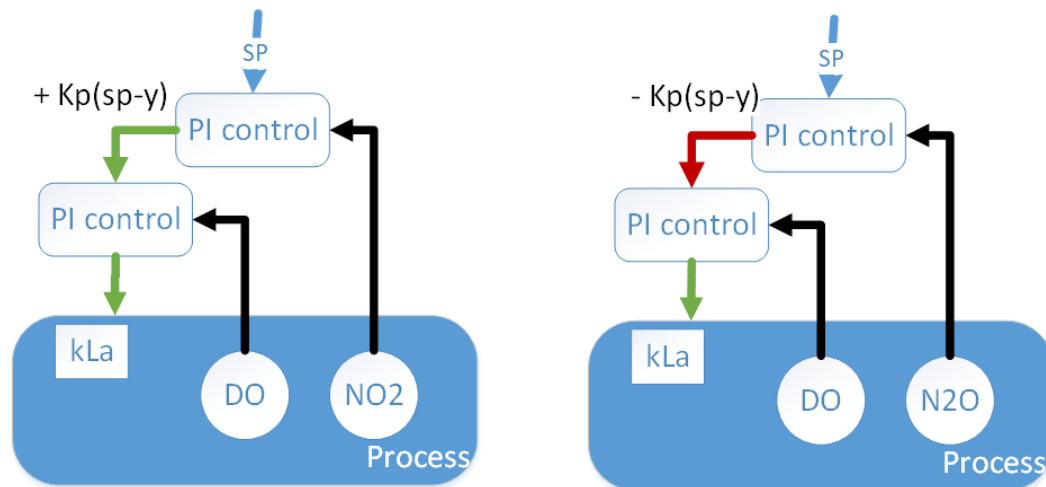


Figure 8 Skematisk repræsentation af PI Cascade controller for NO₂ og N₂O styringer af beluftningen i DEMON® reaktorerne.

N₂O kontrolleret beluftning baseret på load-baserede DO krav er i projektet blevet designet (DeSin Controller, se herunder). Desværre er beluftningsudstyret på DEMON anlægget for stort for at implementere en N₂O kontrolleret beluftning. Ombygningsomkostningerne anslås at være 50-70k DKK og kunne desværre ikke dækkes af projektbudgettet. Flere muligheder er igennem arbejds pakken blevet diskuteret inkl. stigning i belastning og en deling af luftflowet, men ingen af disse muligheder viste sig at være rentable eller pålidelige.

Deammonification Sinus kontrolleret beluftning

For at kunne balancere den kontinuerlige beluftning bedre mellem de forskellige delprocesses i DEMON anlægget som leder til lattergas og for at kunne modstå spidsbelastninger er der behov for en begrænset men styret dynamik af beluftningen.

Et forsøg på at adressere disse udfordringer er designet af en beluftningsstyring for kontinuerlig beluftning med et tvunget oscillerende mønster foreslået (Deammonification Sinus controller).

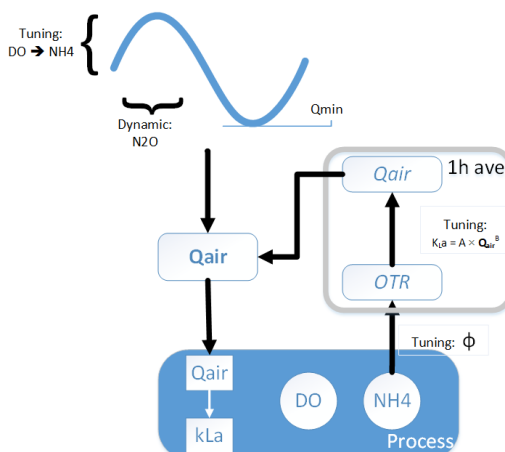


Figure 9 Skematisk repræsentation af funktionaliteten af DeSin controlleren beluften i deammonifikationsreaktoren på baggrund af ammonium load og lattergas koncentrationerne i tanken.

DeSin-controlleren beregner en gennemsnitlig iltforbrug ud fra et ammoniumsbelastningsestimat. Ud fra dette håndhæver beluftsstyring et cyklisk belufts mønster, hvilket skaber kontinuerlig beluftning men under varierende intensitet (Figur 9). Fase længden og amplituden beregnes løbende ud fra input fra enten en N₂O sensor (eller NO₂ – sensor) og leder til en reduktion af N₂O-opbygningen.

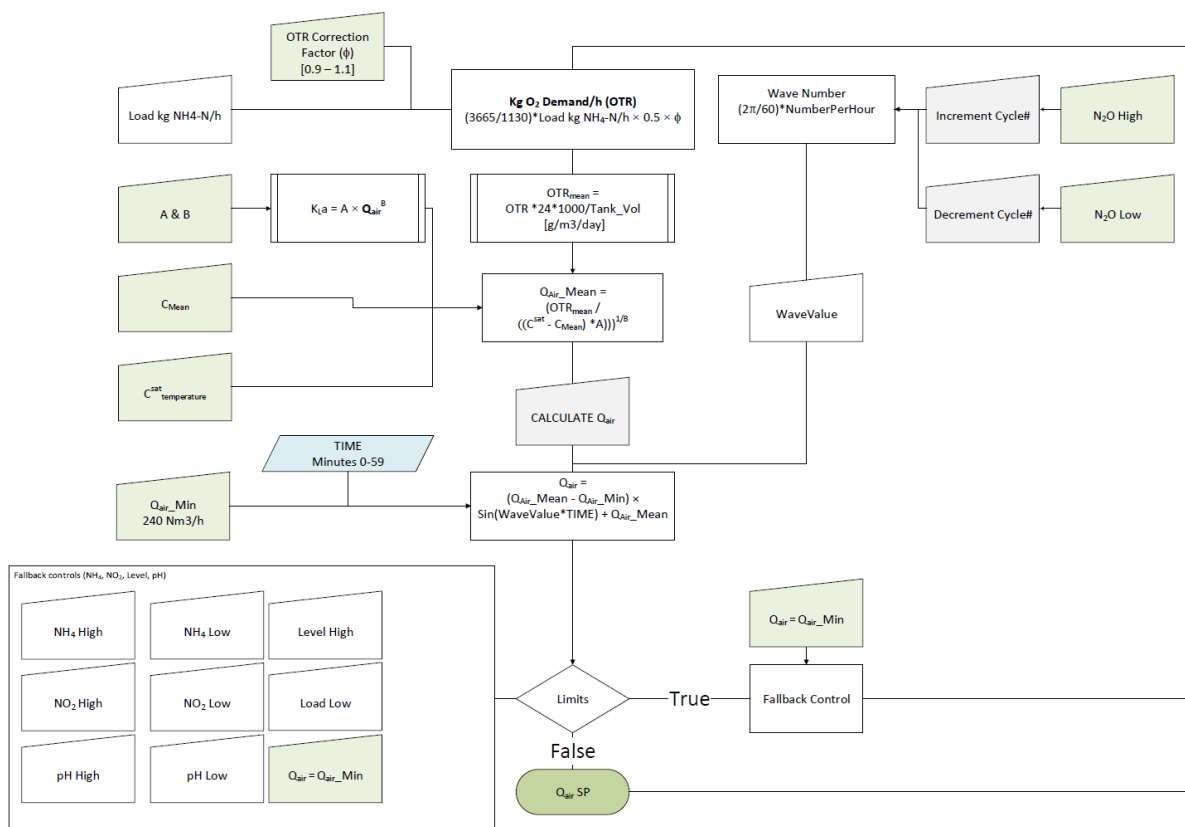


Figure 10 Controller flow diagram af den modulerede beluftsstyring som er testet i WEST. På diagrammet er kun beregningen af den modulerede belufts frekvens vist hvor der i modellen er indlagt forskellige 'fall-back' kontroller.

På figuren 10 herunder ses resultater fra en simuleringskørsel med DeSin kontrolleren. De blå kurver er reference data fra baseline simuleringen af DEMON processen med alternerende drift. DeSin kontrolleren er fint i stand til at minimere mængden af N_2O ved at modulere beluftningsmængden og dermed er den samlede N_2O emission også reduceret.

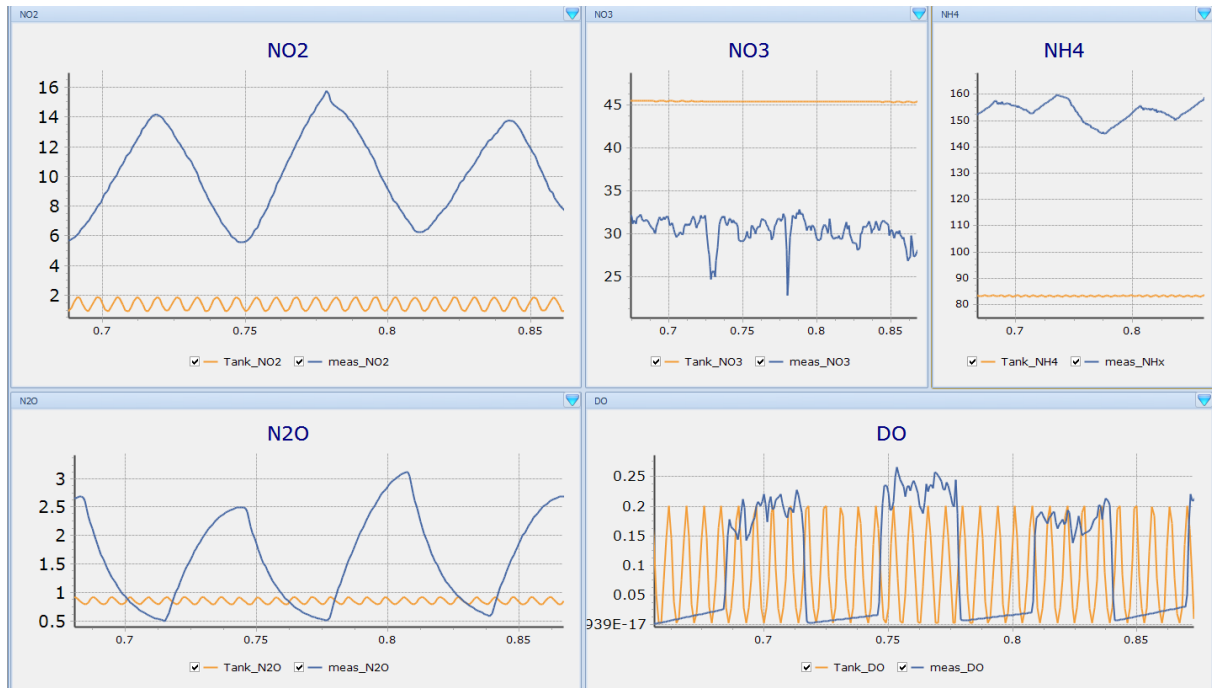


Figure 11 Resultater fra en simuleringskørsel med DeSin kontrolleren. De blå kurver er reference data fra baseline simuleringen af DEMON processen med alternerende drift.

Opsummering af simuleringresultater

Til sammenfatning af arbejdsplan 2, er alle resultaterne fra fuldskala forsøgene og WEST simuleringerne opstillet i nedenstående tabel. Der er god overensstemmelse mellem proces data fra både den alternerende og den kontinuerte beluftningsstyring i fuld skala og simuleringerne i WEST. I forhold til baseline data og simuleringen af denne, reducerer alle de nye styringer N₂O emissionen med mere end 50% fra 5% KgN₂O-N/Kg-NH₄-N til 2,1% KgN₂O-N/Kg-NH₄-N. Samtidig reduceres energiforbruget med ~15% fra 1,7 kWh/ Kg-NH₄-N til 1,4 kWh/Kg-NH₄-N.

Table 1 Resultater fra Ejby Mølle (Nerea et al., 2016) markeret med grå, og simulering er resultatet af forskellige kontrolstrategier.

N₂O: GWP100 - 265g CO₂e/g-N₂O (416g CO₂e/g-N₂O-N), IPCC, AR5.

Setup		Load	NH ₄ -N Removal	Energy	N ₂ O Emission	Energy CO ₂ -e	GHG CO ₂ -e	Total CO ₂ -e	NH ₄ Conc.	NO ₂ Conc.
	Aeration	Kg NH ₄ -N/d	%	kWh/kg-N	% gN ₂ O-N/ g NH ₄ -N	kgCO ₂ /d	kgCO ₂ /d	kgCO ₂ /d	g/m ³	g/m ³
Full-scale Plant Data	Intermittent	208	92,6	1,70	5,0			-	150	10
Full-scale Plant Data	Continuous	48	91,8	1,40	2,2			-	120	9
Reference Simulation	Intermittent SP NH ₄	208	89,5	1,70	4,84	85,92	3748	3834	152	4,9
Reference Simulation	Continuous SP NH ₄	208	89,6	1,34	2,2	67,73	1705	1773	120	50
Simulation NO ₂ Control	Continuous SP NO ₂	208	89,8	1,35	2,2	68,23	1709	1778	140	8
Simulation N ₂ O Control	Continuous SP N ₂ O	208	90,2	1,37	2,1	69,25	1600	1669	100	40
DeSin	Q _{min} = 1	208	93,0	1,67	4,6	84,41	3718	3802	102	1,3
DeSin	Q _{min} =240	208	91,0	1,39	2,1	70,26	1677	1747	105	30
DeSin	Q _{min} = 120	208	93,1	1,50	3,4	75,82	2739	2815	103	15

kWh: 243 g CO₂e/kWh, EnergiNet for 2017

Fuldskala kontinuert beluftningskontroller

Kontinuert beluftning

Siden begge Demon-reaktorer blev idriftsat i 2015, er N₂O i vandfasen blevet kontinuert målt online. Trenden for målingerne ses i figur 12. Den sorte linje viser målingerne af N₂O i reaktoren, her ses det at N₂O koncentrationerne øges under anoxiske forhold og aftager ved oxiske forhold. Antager man at det N₂O som frigives fra vandfasen under oxiske forhold ikke er signifikant, samt at reaktoren har et volumen på ~300 m³, er det muligt at udregne hvor meget N₂O, som akkumuleres per tidsenhed. Det antages at koncentrationen af N₂O som er frigivet under den oxiske fase svarer til den koncentrationen af N₂O der akkumuleres ved anoxiske forhold. Mængden N₂O udledt under den oxiske fase er lig med mængden af N₂O dannet under den anoxiske fase, hvilket betyder at det meste N₂O produceres under den anoxiske fase og bliver udledt fra væskefasen under den aerob.

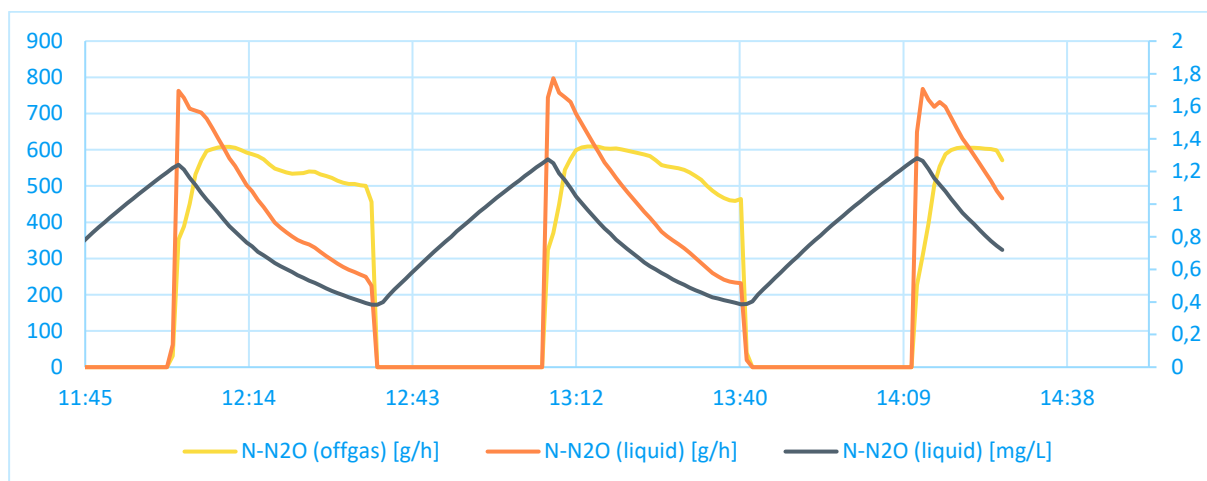


Figure 12 Typisk lattergas curver på Demon anlægget i Ejby Mølle. Flydende online målinger (blå), offgas målinger (gul) og beregnet off-gas fra flydende målinger (orange).

Ammonium oxiderende bakterier (AOB) reducerer NO_3^- til NO og N_2O via enzymerne "nitrit reductase" og "nitric oxide reductase". AOB er også hovedproducenterne af N_2O under oxisk begrænsede forhold via "nitrifier-denifikations pathwayen" (Chandran et al., 2011). Dog er N_2O også et kendt mellemled ved heterotrofisk denitrifikation og må ikke overses selvom anammox reaktorerne ikke har betydelige mængder kulstof tilgængeligt. De tre hovedveje for produktionen af N_2O er vist i figur 13.

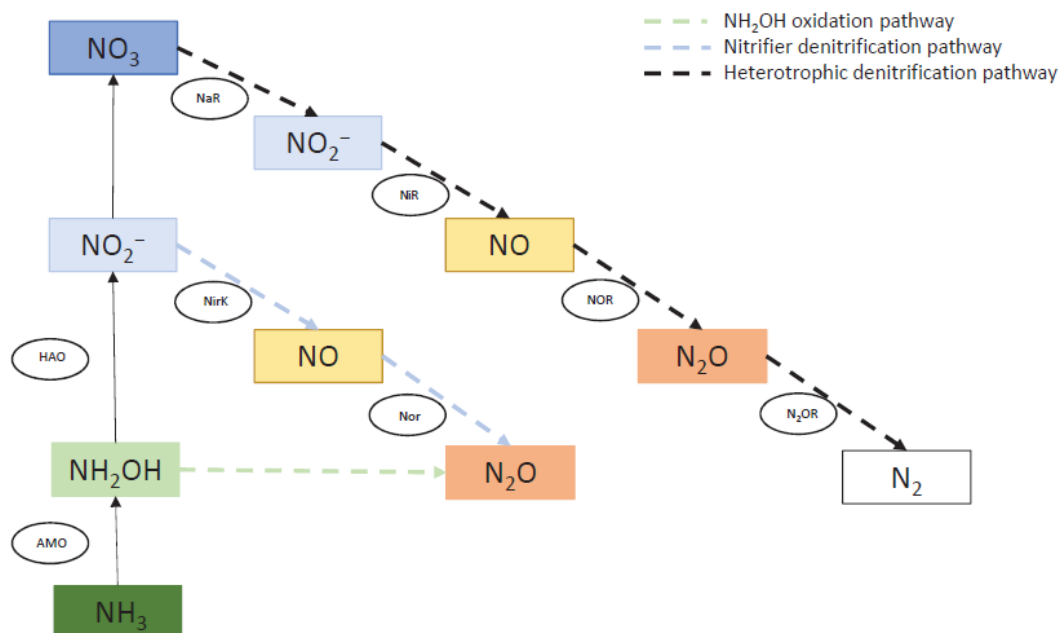


Figure 13 Lattergas produktion "pathways"s

Skiftet mellem anoxiske forhold og høj beluftning blev foreslået af (Chandran et al., 2011), som værende af betydning for dannelsen af N_2O i reaktorerne. De observerede at i reaktorer, som konstant blev udsat for disse skiftende forhold, havde en oxidation af akkumuleret NH_4 , som medfører høj specifik nedbrydelse og en akkumulation af hydroxylamin, som muligvis kan reduceres til N_2O . Få år senere foreslog Castro-Barros et al. (2015) og Brotto et al. (2015), at en øget omsætning af NH_4 samt

en overgang fra anoxisk til høj beluftning udløser N_2O udledninger og derfor må det også medføre en reduktion af N_2O . N_2O reduceres når forholdene skifter fra at være anoxiske til at have en lav koncentration af ilt.

Der er udført flere forsøg med reaktorer som er delvist nitrations-anammox, de forsøg har vist en mulig anammox aktivitet ved lave koncentrationer af opløst oxygen (Wett (2007); Salzgeber et al. (2007); Joss et al. (2009)). På trods af at anammox bakterier hæmmes selv ved lave koncentrationer af opløst oxygen (Egli et al. (2001)), kan flokkulering og granuledannelse forhindre hæmning af anammox-processen. Dette skyldes at oxygen optages i de ydre lag, mens de indre lag forbliver anoxiske. Når deammonificerings aktiviteten er tilpas høj ved lave koncentrationer af ilt, kan processen styres ved hjælp af kontinuert beluftning. Dette er interessant set fra et driftsmæssigt synspunkt, da det giver fordele i forhold til periodiske beluftninger. En klar fordel ved dette er, simplificeret drift og dermed lavere behov for vedligeholdelse idet der ikke sker skifte mellem beluftning og ingen beluftning som kan have en negativ effekt på membrandiffuserne og blæserinstallationen. Joss et al., (2009) foreslog også at når der køres med de delvise nitrations-anammox reaktorer, vil det forbedre fjernelsen af nitrogen i reaktorerne, da nitrogen produceres og konsumeres samtidigt. Dog vil der under forhold med lav koncentration af ilt være en udledning af N_2O , som dannes af ammonium oxiderende bakterier.

Alt i alt er der flere grunde til at undersøge muligheden for at reducere eller helt fjerne den anoxiske fase, da det giver en mulighed for at reducere N_2O udledningerne. I dette projekt viser vi, at når man fjerner den anoxiske fase fuldstændig fra en enkelt-trins deammonifikations-reaktor, er muligheden for at reducere udledningen af N_2O signifikant. I dette tilfælde, er reduktionen mere end 50% sammenlignet med kontrolreaktoren. Men det kan være udfordrende at styre en Demon-reaktor under kontinuert beluftning,. Det har ikke været muligt at finde tidligere forsøg, hvor denne tese har været testet. Demon-reaktorer er designet til at have periodiske beluftninger, fordi der er både anammox slam og flokkuleret slam (AOB) som skal leve i reaktoren. Anammox kræver anoxiske forhold, hvorimod AOB kræver oxiske forhold. Hypotesen for dette projekt er, at fordi anammox er kornet, vil AOB vokse i de ydre lag, hvor de konsumerer oxygen, og derved opretholder et anoxisk indre lag som anammox kan vokse i. Den vigtigste udfordring i dette projekt er derfor at sørge for at der nok oxygen tilstede for at ammonium oxiderende bakterier har en elektron acceptor, og samtidig ikke for meget oxygen så anammox hæmmes. Derfor er testtanken heller ikke drevet med brug af "rengøringsprogram" via hydrocyklonen i forsøgsperioden, for at kunne opretholde en kontinuert beluftet reaktor, og derved opnå større anammox granuler.

Metode

I dette forsøg var den ene af de to Demon reaktorer styret af kontinuert beluftning i seks måneder, mens den anden reaktor var drevet med periodisk beluftning, styret af pH eller NO_2 koncentrationen.

Kontrolreaktoren som var udsat for en simpel kontinuert beluftning kontrolleret af indholdet af NH_4 . Den består af et feedback system, som kan ses i figur 14, hvor de forskellige niveauer af NH_4 i spildevandet kan aktivere hastigheden af blæserne. Operatøren sætter et maksimum niveau af NH_4 og et konfidensinterval. Ved at vælge et minimum og maksimums interval for koncentrationen af NH_4 , har man et minimums og maksimums blæserhastighed. I dette tilfælde, var ønsket at opretholde en lav koncentration af ilt, og den maksimale blæser hastighed blev derfor sat til 50% af den fulde kapacitet. pH, nitrit og ilt sensorer blev brugt som baggrundsmålinger som kunne stoppe beluftningen, hvis pH faldt til minimums værdi (sat af operatøren), eller nitrit og ilt steg til maksimumværdi.

For at undersøge effekten af ikke at køre vaskeprogrammet i reaktoren med hydrocyklonen med henblik på at få større anammox korn, blev dette program slået fra under forsøgsperioden.

For at overvåge processerne i de to Demon reaktorer blev der brugt online sensorer. NH_4 er målt med NitraVis 700/x IQ, DO er målt med en optisk sensor FDO 700 IQ, NO_x (nitrit og nitrat) er målt med NitraVis 700/x UV/VIS sensor, og pH/ORP er målt med SensoLyt R 700 IQ; alt udstyr er fra WTW GmbH, Tyskland. N_2O koncentrationen blev målt med en Clark sensor fra Unisense i Århus. N_2O

koncentrationerne blev målt hvert 10. sekund under hele forsøgsperioden. Stikprøver blev også udført og analyseret for NH₄-N, NO₂-NO₃ og suspenderet stof af laboratoriepersonalet på anlægget.

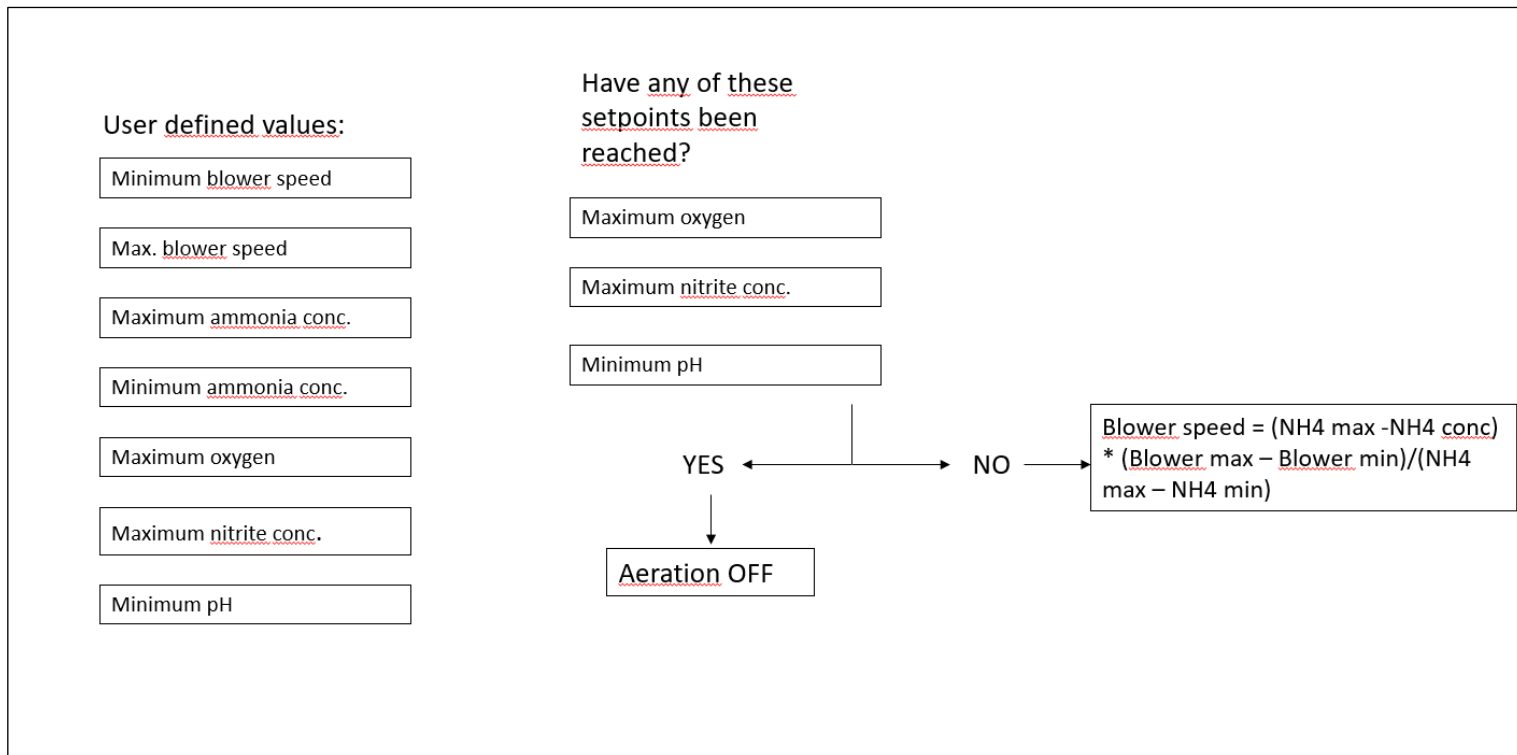


Figure 14 Styring for kontinuerlig beluftning



Figure 15 Demon hydrocyklon

Hovedspørgsmålene for vores undersøgelser er:

- Kan vi opretholde fjernelsen af nitrogen med lave koncentrationer af ilt?
- Vil NOB udkonkurrere anammox?
- Kan vi fjerne eller reducere "nitrifier-denitrifikation pathway" for produktionen af N₂O?
- Hvad er effekten af at stoppe vaskeprogrammet i hydrocyklonen?

Resultaters

Reaktorens ydeevne

Tabel 2 viser en opsummering af resultaterne fra de seks måneders forsøg, som ser meget lovende ud. I den reaktor som har haft kontinuer beluftning under hele forsøgsperioden, har det været muligt at opretholde en konstant lav koncentration af ilt uden en signifikant akkumulering af nitrit. Det indikerer at koncentrationen af ilt har været så lav at anammox har kunne vokse og forhindre akkumulering af nitrit. Derudover har den kontinuerede beluftninger givet anledning til at den totale fjernelse af nitrogen er på niveaumed fjernelsen i kontrolreaktoren, som havde periodisk beluftning.

Reaktoren var en del tid om at akklimatisere sig til beluftningsmønstret. I løbet af de første par dage var der en akkumulering af nitrit, som medførte at koncentrationen af nitrit nåede sin maksimumværdi og beluftningen stoppede. Derfor var reaktoren ikke konstant beluftet i den første uge af forsøgsperioden. Fjernelsen af NH₄-N var på samme niveau i begge reaktorer under hele forsøgsperioden, figur 16 viser at fjernelsen af begge komponenter ligger mellem 85 og 95%.

Table 2 Resultater fra forsøgsperioden

	Belastning	NH₄-N fjernelse	Energiforbrug	N₂O udledning
	kg NH ₄ -N /m ³ /dag	%	kWh / kg NH ₄ -N	% N ₂ O-N pr NH ₄ -N belastning
Kontinuert beluftningsreaktor	0,5	86,4	1,5	1,9
Kontrolreaktor	0,5	87,4	1,7	5,1
		-1%	-11%	-63%

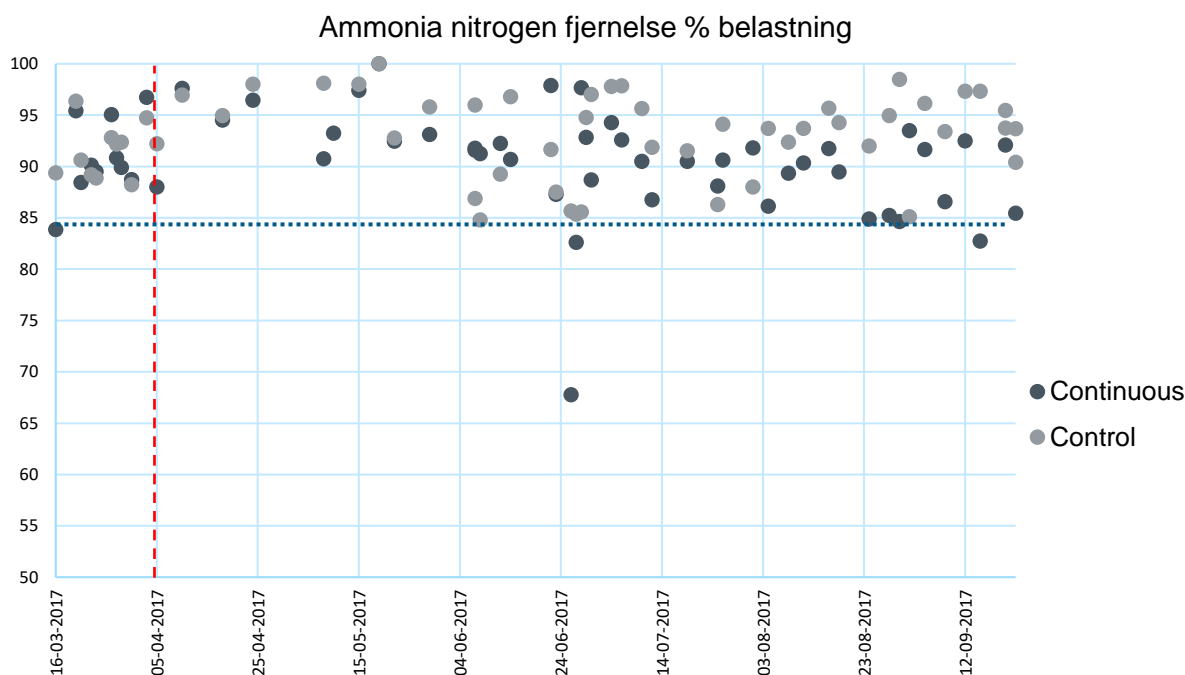


Figure 16 Ammonium fjernelse som % af belastning. Den røde lodrette linje markerer begyndelsen af eksperimentet.

Dog var koncentrationen af nitrat højere end det ideelle 10-13% af NH_4 -fjernelsen i et tilfælde (figur 18, sidst i august, først i september). Dette skyldtes en fejlagtig øgning af ilt, som medførte en øgning af populationen af NOB i reaktoren. Rationen af $\text{NO}_3\text{-N}$ fjernet per NH_4 blev øget til 30%. Det krævede en kraftig indgriben at reducere den flokkulerede slammasse, hvilket betød højere NH_4 koncentrationer og konsekvent lavt ilt måtte bruges til at fjerne NOB'er fra systemet i perioden efter.

I slutningen af juni 2017 var der en hændelse som gav anledning til et højt indhold af suspenderet stof i rejektvandet, det medførte en ubalance i reaktoren, hvorefter der skete et markant fald i ydelsen. Figur 16 viser et fald i NH_4 fjernelsen og figur 17 viser en akkumulering af nitrit. Det er kendt viden, at partikulært stof hæmmer anammox i sidestrøms anammox reaktorer (Welker et al., 2017). I dette tilfælde, førte det til en akkumulering af nitrit og en lav fjernelse af nitrogen, som resulterer i høje N_2O udledninger. Dette uheld skyldtes formentlig en defekt i de centrifuger som står for afvandingen, da der var en stor koncentration af suspenderet materiale i rejektvandet.

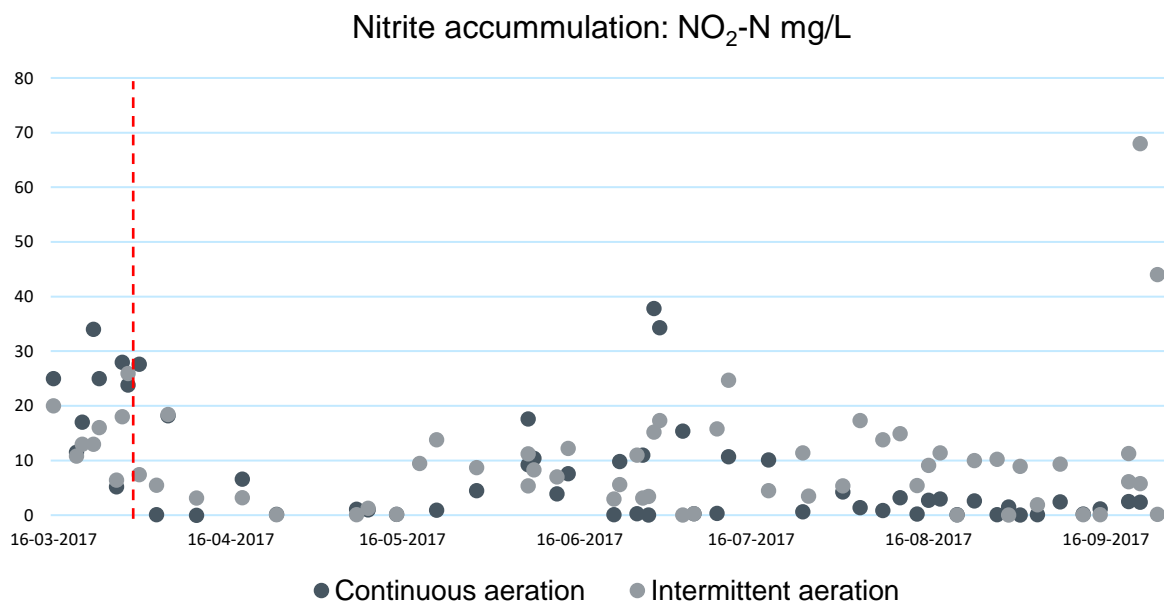


Figure 17 Nitrit koncentration (mg/L). Den røde lodrette linje markerer begyndelsen af eksperimentet.

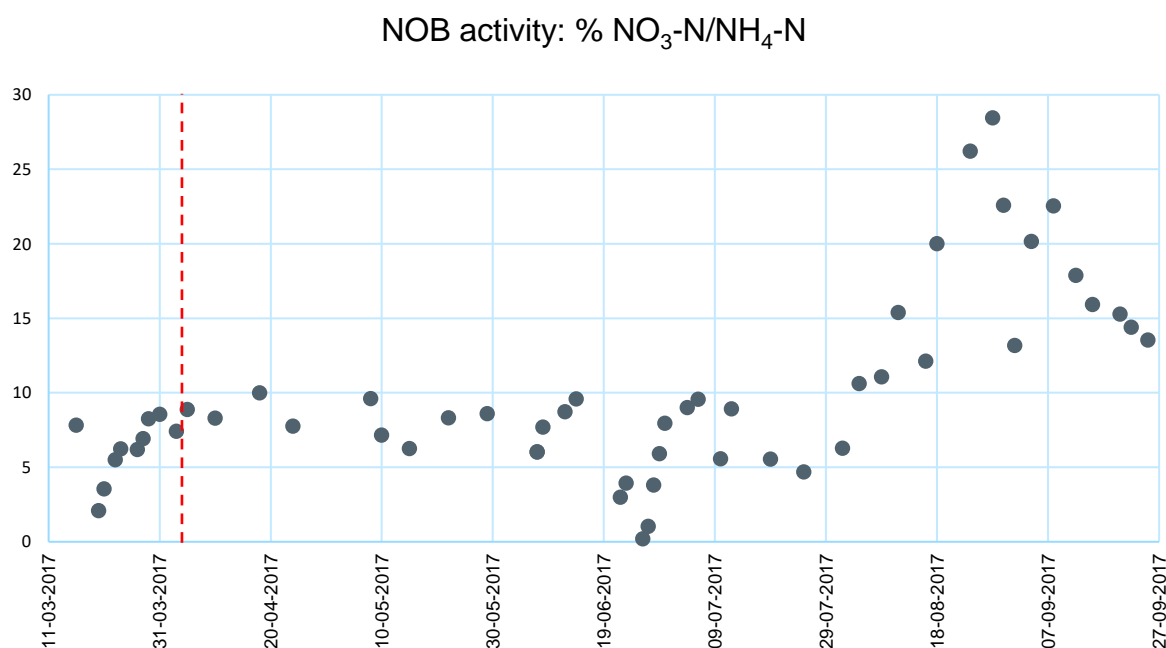


Figure 18 Forholdet mellem nitrat produceret pr. ammoniak forbrugt. Den røde lodrette linje markerer begyndelsen af eksperimentet.

N₂O udledninger

Lattergas koncentrationerne i vandfasen blev konstant online overvåget og udledningerne er udregnet som vist tidligere i denne rapport. Figur 19 viser udledningen af nitrogen udledt som N₂O i forhold til

nitrogen som ammonium, dette er i overensstemmelse med typiske litteratur angivelser. For at eliminere fejlene ved at bruge data fra online sensorer er der kun brugt data fra stikprøve analyser.

I starten af forsøget var der ikke forskel i udledningen af N_2O i de to reaktorer, begge var tæt på 5% af NH_4 der blev fjernet, blev fjernet som N_2O-N , hvilket er almindelige værdier. Efter 7 dage, svarende til 10. april, faldt udledningen af N_2O fra reaktor 1. Under 1% af det fjernede nitrogen blev udledt som N_2O , hvilket giver en forskel på mere end 50%, hvis man sammenligner med kontrolreaktoren.

Der kan være flere årsager til faldet i udledningen af N_2O i reaktor 1. Som nævnt tidligere, kan skiftet mellem oxiske og anoxiske forhold øge N_2O produktionen, hvilket ikke forekommer i reaktoren i dette forsøg. Dog var der en risiko for at udledningerne fra "nitrifier-denitrification pathway" udført af AOB ville øges når man sænker iltniveauet. Dette kunne være tilfældet i forsøget med 2-trins PN/A-reaktoren (partial nitrification-anammox), men i reaktoren i dette forsøg, var der både vækst af AOB og anammox på samme tid. Den lave koncentration af ilt var tilstrækkelig høj, så anammox kunne nedbryde NO_2 , men ikke så høj at "nitrifier denitrification" kunne finde sted.s

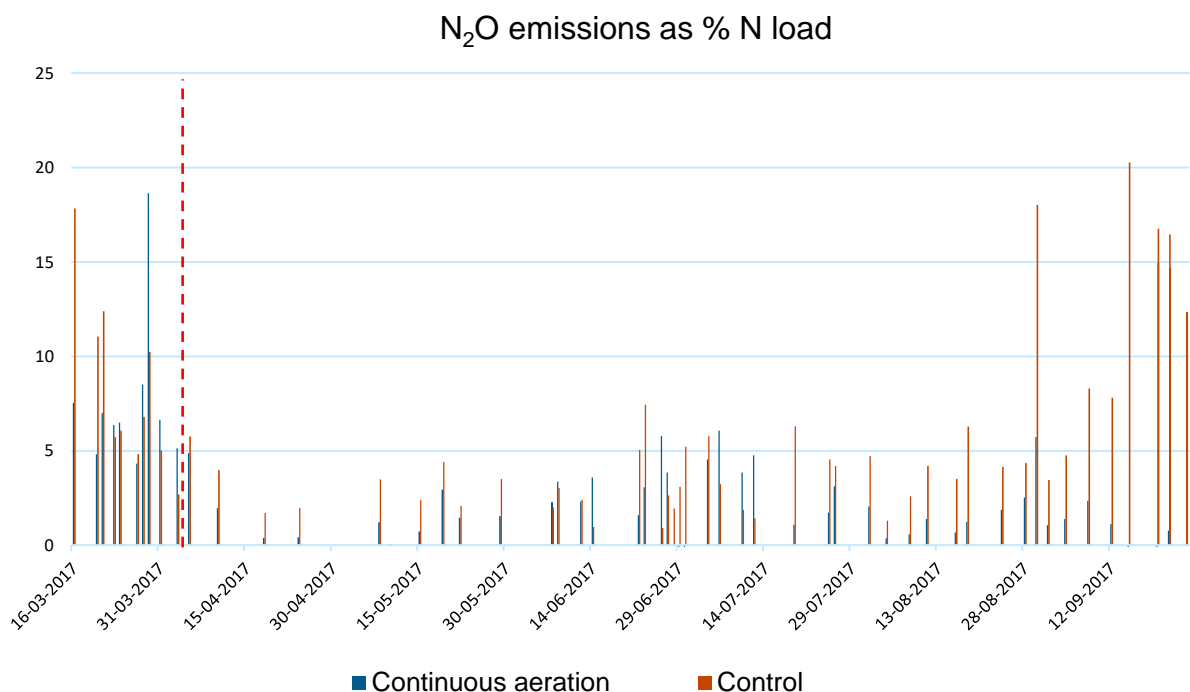


Figure 19 Lattergas emissioner beregnet fra online lattergas målinger og laboratoriet ammonia målinger. Den røde lodrette linje markerer begyndelsen af eksperimentet.

Andet: energi og kornstørrelse



Kartik Chandran et al, (2015), analyserede prøverne fra Demon-reaktorerne på Ejby Mølle ved hjælp af qPCR, og fandt at større korn indeholder flere anammox bakterier. Dette kan ses i figur 20, som viser den relative forekomst af anammox bakterier og NH₄ oxiderende bakterier i slamprøver med forskellig kornstørrelse. Under hele forsøgsperioden, var vaskesprogrammet slået fra på hydrocyklonerne, for at kunne undersøge om der kunne akkumuleres større korn/granuler i reaktoren. Figur 22 viser antallet af timer som reaktoren kørte, hvor flere timer svarer til vaskesprogrammet versus kornstørrelse, målt som slam >250 mikrometer målt i kg/m³ slam.

Figure 20 Billede af anammox granuler fra Ejby Mølle

Den kontinuert beluftede reaktor brugte kun hydrocyklonen til "fjerne overskudsslam og brugte derfor færre timer, omkring halvdelen af den tid kontrolreaktoren brugte. Undtagen den sidste periode af forsøget, efter uheldet med væksten af NOB'er, her blev det nødvendigt at bruge hydrocyklonen flere timer om dagen for at fjerne den store mængde slam i reaktoren. En kendt hypotese i industrien, er at kornstørrelsen vil vokse i den kontinuert beluftede reaktor efter 5 måneder uden vaskesprogram, dog holdt antallet af større korn sig lavere end antallet i kontrolreaktoren, hvilket strider mod hypotesen.

En anden positiv effekt af bruge hydrocyklonerne mindre, var ikke overraskende, at der skete en reduktion af energiforbruget reaktoren brugte for at pumpe slammet igennem hydrocyklonerne. Ved forsøgets slutning, der var sparet omkring 11% el. Det var ikke muligt at afgøre om energiforbruget kommer fra beluftning eller fra pumpen i reaktoren. Fordi blæserne kørte på mindre end halvdelen af deres kapacitet under den kontinuerte beluftning, vil det betyde at behovet for blæserkapacitet ville være mindre, eller en øgning kapaciteten af total beluftning på hele rensningsanlægget, da den ekstra beluftning kan bruges et andet sted.

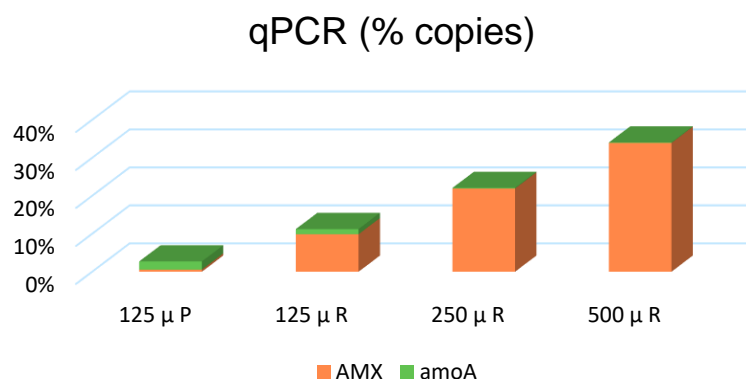


Figure 21 Fra Chandra et al., 2015. mængde anammox og aerob ammoniakoxiderende DNA-kopier pr. granaule størrelse

Hydrocyclone running hours – Kg/m³ of granules > 250 μ

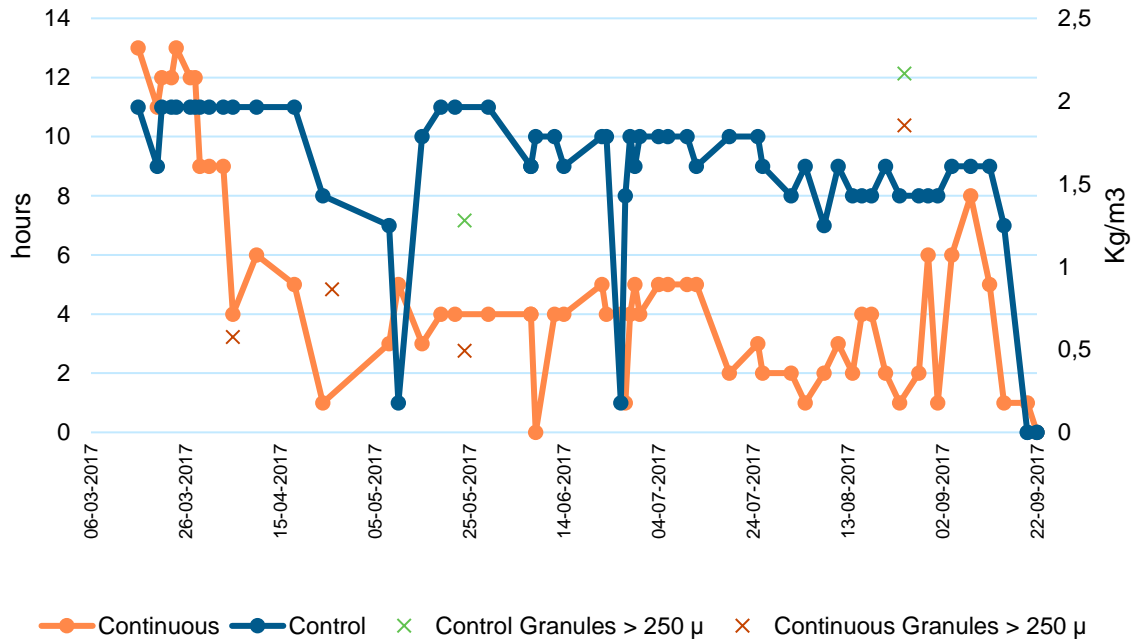


Figure 22 Cykloner driftid og mængde af stør granuler

KWh /day

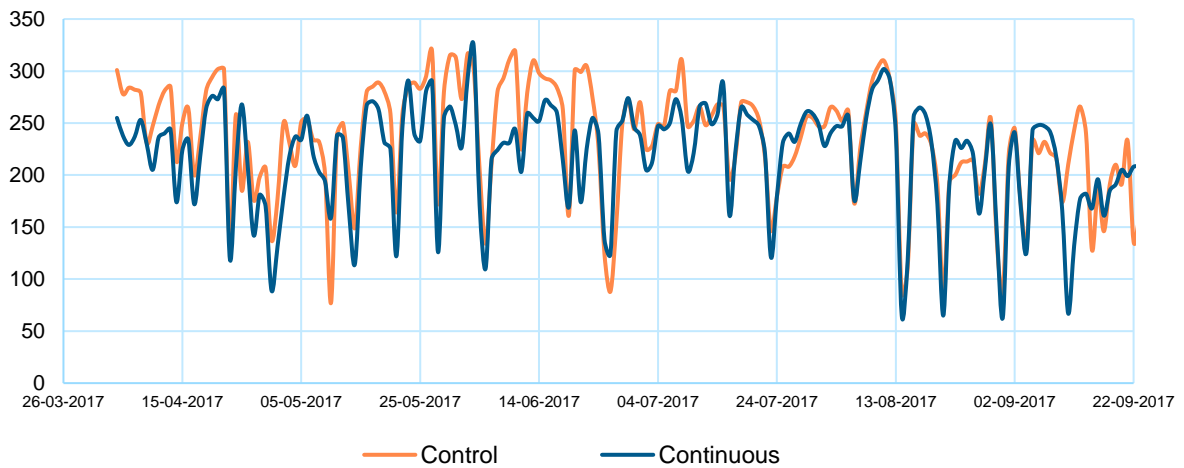


Figure 23 Elforbrug på Demon anlæggets

Summary (English)

- The optimization of control strategies for a sidestream deammonification reactor was the main objective of the study.
- Nitrous oxide from two sidestream deammonification reactors at Ejby Mølle was monitored online using liquid concentration measurements and the emissions calculations were validated using offgas measurements.
- An ASM-G1 model was implemented in WEST to simulate different control strategies.
- The model included four different pathways of nitrous oxide production and it was calibrated using real data from the sidestream deammonification reactors.
- A novel DeSin control that uses nitrous oxide as a control parameter was demonstrated to reduce nitrous oxide emissions compared to conventional alternating aeration using the WEST model.
- A simpler continuous aeration control strategy was tested full-scale during six months in one of the two sidestream deammonification reactors at Ejby Mølle.
- Continuous aeration was shown to reduce significantly nitrous oxide emissions compared to conventional alternating aeration, 63% reduction during the testing period.
- During the six-month trial, the continuous aeration reactor suffered a NOB outbreak and it took more than 3 weeks to bring the NO_3 concentration in the reactor to the normal level.
- The continuously aerated reactor had on average 15% less energy consumption than the control reactor, however, this was mostly due to less use of the hydrocyclone.
- All in all, it was successfully demonstrated via simulation and full-scale demonstration that different control strategies have the potential to significantly reduce nitrous oxide emissions from sidestream deammonification reactors.

Referencer

- A. C. Brotto, H. Li, M. Dumit, J. Gabarró, J. Colprim, S. Murthy, and K. Chandran. Characterization and mitigation of nitrous oxide (N₂O) emissions from partial and full-nitrification BNR processes based on post-anoxic aeration control. *Biotechnology and Bioengineering*, 112(11):2241–2247, 2015.
- 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 nitrification-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. Autotrophe Schlammwasserentstickung (Nitritation/Anammox): Im SBR-Verfahren (Sequencing batch reactor). *GWA Gas, Wasser, Abwasser : Jahresheft*, 87(3):205–209, 2007.
- B. Wett. Key Parameters for Control of DEMON Deammonification Process Key Parameters for Control of DEMON Deammonification. (October), 2007.
- S. Welker, S. Agrawal, M. Weber, H. Horn, S. Lackner. Influence of particulate matter from digested sludge on partial nitrification-anammox. IWA Conference on Sustainable Wastewater Treatment and Resource Recovery: Research, Planning, Design and Operation 2017.