



Miljø- og
Fødevareministeriet
Naturstyrelsen

Nyt off-gas- målesystem til optimering af bundbeluftning

2015

Titel: Nyt off-gas-målesystem til optimering af bundbeluftning

Redaktion: Peter Andreasen (DHI)

Udgiver: Naturstyrelsen

Foto: Peter Andreasen

År: 2015

ISBN: 978-87-7175-569-5

Naturstyrelsen vil, når lejligheden gives, offentliggøre rapporter og indlæg vedrørende forsknings- og udviklingsprojekter inden for miljøsektoren, finansieret af Naturstyrelsens undersøgelsesbevilling. Det skal bemærkes, at en sådan offentliggørelse ikke nødvendigvis betyder, at det pågældende indlæg giver udtryk for Naturstyrelsens synspunkter. Offentliggørelsen betyder imidlertid, at Naturstyrelsen finder, at indholdet udgør et væsentligt indlæg i debatten omkring den danske miljøpolitik.

Må citeres med kildeangivelse.

Indhold

Forord	4
Sammenfatning	5
Optimering og energibesparelser ved brug af off-gas målinger	6
Summary	7
Optimization and energy saving using off-gas measurements	8
1. Indledning og baggrund	9
2. Behov for data om beluftningssystemer	10
2.1 Måling på beluftning er vigtig	11
3. Off-gasmålinger	12
3.1 Anvendte forkortelser og deres betydning	14
4. Optimeret drift af beluftningsudstyret	15
4.1 Sønderborg Renseanlæg - Udsiftning af beluftningssystem	15
4.2 Juelsminde Renseanlæg - Rengøring af diffusorer	17
4.3 Boeslum Renseanlæg - Årlig rensning af diffusorer	18
4.4 Holstebro Renseanlæg - Rengøring med syredosering til diffusorer	19
4.5 Herning Centralrenseanlæg - Revurdering af blæserstyring og døgnvariation i α SOTE	20
4.6 Egå Renseanlæg med variation i iltudnyttelsen og optimeret beluftning efter NO_3^-	24
5. Optimering ved brug af off-gasmålere	27
5.1 Kriterier for at forbedre beluftningssystem	29
5.2 Ændringer af iltningseffektiviteten	31
5.3 Energiforbrug til beluftning	32
6. Konklusion	33
7. Litteraturliste	34

Forord

Der bliver i dag stillet store krav til effektivitet i forsyningselskaberne. Energiforbruget er en væsentlig parameter, og ingen anlæg kan i dag forvente at blive energineutrale eller få lave nøgletal for energiforbruget per PE med mindre, at beluftningen er effektiv.

Det er ikke enkelt at få viden om beluftningens effektivitet, der er behov for nye målinger for at få tal for funktionen herunder energiforbruget per kWh, som forsyner renseprocesserne med ilt.

Sønderborg Forsyning, Hedensted Spildevand, Herning Forsyning, Stjernholm og DHI har fået støtte fra MUDP til at vurdere anvendelsen af off-gasmålinger til at tilvejebringe konkrete data for effektiviteten af bundbeluftning, som er det mest udbredte beluftningssystem i Danmark og i udlandet.

Sammenfatning

Beluftningens energiforbrug udgør 40-70% af et renseanlægs samlede energiforbrug, hvilket bør gøre processen til en af de vigtigste for ejerne at have viden om og være sikker på rent faktisk er effektiv. Tendensen i 2015 er, at forsyningsselskaberne arbejder mod at have et lavt energiforbrug og dermed, at større renseanlæg fremover vil være bundbelufteede anlæg.

Driftspersonalet har sædvanligvis begrænsede data om deres systems effektivitet. De har indikationer i form af lave nøgletal såsom energiforbrug per person, kWh/PE/år, og lavt procentvis forbrug til blæserne (% el til blæser af samlet effekt forbrug).

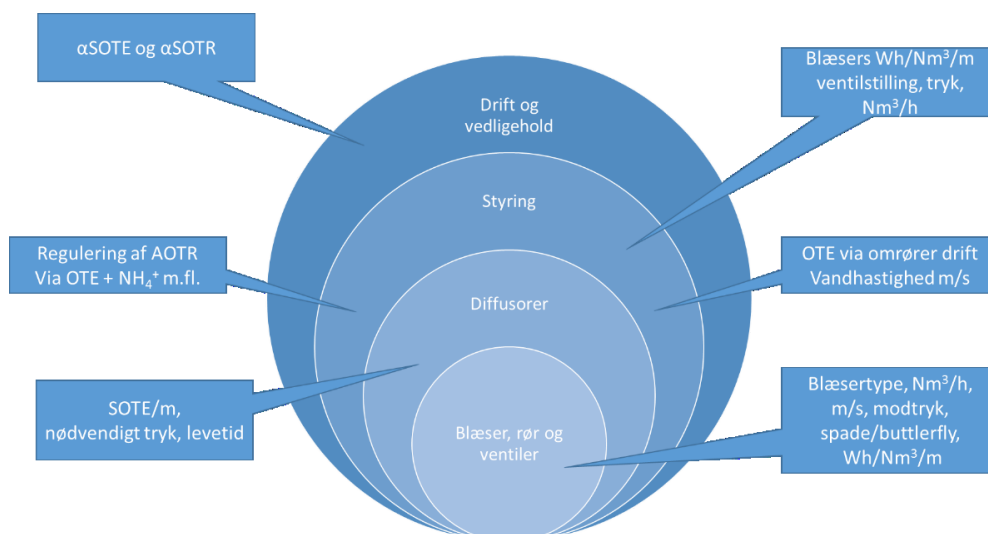
Den eneste måde at få viden om effektiviteten på er, at opsamle og måle på den luft, som har leveret ilt til processen ved opstigning fra diffusorerne. Det kaldes en off-gasmåling, som giver driftspersonalet information om udnyttelsen af den ilt, som er tilført diffusorerne under procesforhold (benævnt OTE), og α SOTE, som er OTE omregnet til standard iltkoncentration 0 mg ilt/l. Flowmålinger af luftmængden og effektmålinger på blæserne sammen med iltudnyttelsen indgår i beregninger af energieffektiviteten - kg ilt/kWh under procesforhold.

Iltudnyttelsen skal vurderes i forhold til boblernes stighøjde. Beluftning i en dybere tank kan levere en højere iltudnyttelse end i en mindre dyb tank. Off-gasmålere kan ligeledes levere oplysninger om tilført ilt per m³ luft (OTR og α SOTR).

Det er nu muligt at købe en sensor, som leverer data om effektiviteten af beluftningen ud fra off-gasmåling.

Projektet bygger på målinger, som stammer fra off-gasmålere udført hos projektets partnere. Alle har afprøvet off-gasmåling som metode til at opnå viden om bundbeluftning.

Nedenstående figur opsamler anvendelsen af off-gasmålinger til optimering af vedligehold, maskiner og styring af bundbeluftningssystemer og deres effektivitet.



Figur 1 Områder med et potentiale for optimering er vist i cirklerne. I firkanterne er angivet parametre, der kan opstilles kriterier for ved en optimering.

Optimering og energibesparelser ved brug af off-gas målinger

Hvilke forventninger kan man have til energibesparelser ved brug af off-gasmålinger enten i form af spotmålinger eller on-line målinger? Der vil så godt som altid kunne findes mindre forbedringspotentialer for energiforbruget til beluftning på 10%, og i dette projekt er der målt forbedringer over 50%. Potentialerne er altid anlægsspecifikke men baseret på de resultater der er fremkommet i forbindelse med nærværende projekt forventes, at det ligger mellem 10 og 50%.

Generelt er beluftningssystemer ikke drevet, styret eller konstrueret energioptimalt. I det følgende har vi baseret på erfaringer fra projektet opstillet besparelspotentialerne for fysisk rengøring, syretilsætning, udskiftning af udstyr og forbedret styring. Der er kun tale om få anlægsspecifikke eksempler, men DHI har i kampagnemålinger målt på andre anlæg med tilsvarende talstørrelser og effekter. Derfor er der ikke tale om usædvanligt positive eksempler.

Tiltag	Effekt	Energibesparelse via reduceret luftflow, ca	Bemærkninger
Udskiftning af ikke effektivt beluftningssystem	Øget α SOTE Lavere Wh/Nm ³ /m Øget α SOTR	40%	Anlægsspecifikt
Rengøring	Øget α SOTE Øget α SOTR	10-70%	Anlægsspecifikt og variation med luftflow
Syredosering	Øget α SOTE Øget α SOTR (reduceret modtryk forventet men ikke registreret)	20%	Anlægsspecifikt OTR øget med op til 90%, da luftflowet øges sammen med OTE
Ændret beluftningsstyring	Øget OTE Øget AOTR per døgn	20%	Anlægsspecifikt

Såfremt der på renseanlæggene opstilles mål for effektiviteten af iltningsprocessen, vil det med stor sandsynlighed resultere i energibesparelser. Såfremt der opstilles et mål om α SOTE > 4-5 %/m, og et energiforbrug på blæseren lavere end 4,5 Wh/Nm³/m stighøjde, er omtrent det højeste der vil kunne opnås med de teknologiske løsninger der findes på markedet i dag.

Kriterier for et forbedret beluftningssystem

Et effektivt beluftningssystem til et aktiv slam anlæg med α SOTE/m på 5%/m kan have et energiforbrug omkring 12 kWh/PE/år til beluftning, mens et mindre effektivt system med lavere α SOTE/m på 2,5% og mindre effektiv blæser kan have et forbrug på omkring 30 kWh/PE/år. Sidstnævnte specifikke energiforbrug er i samme størrelsesorden som ved anvendelse af overfladebløfere.

Energiforbruget stiger således kraftigt såfremt, at systemet ikke er effektivt. Når α SOTE bliver mindre end 2% bør man overveje at udskifte diffusorerne, Dersom blæsernes energiforbrug (tilført effekt) er større end 5-5,5 Wh/Nm³/m bør blæserinstallationen tilsvarende genovervejes.

Falder iltudnyttelsen over tid mere end 10-20% bør årsagen undersøges, da energiforbruget stiger tilsvarende.

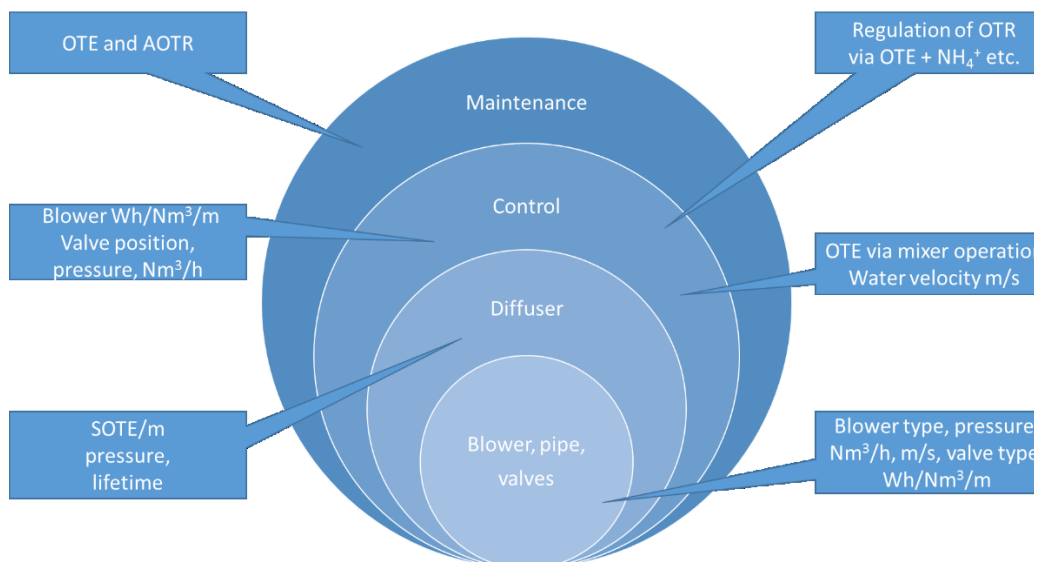
Summary

Aeration of activated sludge accounts for 40-70% of the total energy consumption at wastewater treatment plants. With this consumption, it is important for the operator to know the efficiency of this process. The tendency in Denmark in 2015 is that utilities aim at having a low energy consumption, and this results in choosing technology of fine bubble aeration which has the lowest energy consumption.

Operators have limited data of the efficiency of their aeration system. Usually they have indications only of performance key figures such as kWh/PE/year (PE person equivalent) and a low percentage of aeration consumption relative to total consumption.

Collection of air at the water surface and measuring the amount and oxygen content is the only way to get information about the efficiency of the aeration system. The method is named off-gas measurement and it delivers data of oxygen transfer efficiency (OTE), which is the percentage of the oxygen supplied to the diffusers that is delivered to the process during the travel of bubbles from the diffusers to the surface. Oxygen transfer rate (OTR) is calculated from OTE and airflow, which gives an important key figure, kg O₂/kWh under process condition. Both OTE and OTR can be calculated to process standard condition with no oxygen in the water and α SOTE and α SOTR are obtained.

OTE depends on the distance from the diffuser to the surface. Aeration in a deep tank delivers more oxygen than in a shallow tank. OTE/m and α SOTE/m are important to know and follow over time. Physical and chemical cleaning of diffusers can be implemented if OTE becomes too low. Other optimization factors are shown below.



Items that can be optimized are shown in circles. The data to be used for evaluation of optimization potential is shown in boxes

It is now possible to implement a sensor that delivers these important data, and measures the efficiency of the aeration.

Optimization and energy saving using off-gas measurements

What are the expectations to energy savings using off-gas measurements, either as spot-monitoring or as online measurements? In most cases you will be able to identify minor improvement potentials for energy consumption of aeration of 10%, and in this project improvements exceeding 50% have been identified. Potentials are always plant specific, but you may expect between 10 and 50%.

Generally, aeration systems are not operated, controlled or constructed with a view to energy optimization. It is not possible without measuring to state efficiency figures. In the following – based on experiences from the project – we have listed saving potentials for physical cleaning, acid dosing, replacement of equipment and improved control. It is based on a few plant specific examples, however, result from measuring at other locations shows corresponding figures and effects.

Initiative	Effect	Energy saving by reduced air flow ca	Remarks
Replacement of non-efficient aeration system	Increased α SOTE Lower Wh/Nm ³ /m Increased α SOTR	40%	Plant specific
Cleaning	Increased α SOTE Increased α SOTR	10-70%	Plant specific and variation with air flow
Acid dosing	Increased α SOTE Increased α SOTR (lowe back pressure expected but not registered)	20%	Plant specific OTR increased by up to 90% since air flow increases with OTE
Modified aeration control	Increased OTE Increased AOTR per døgn	20%	Plant specific

Setting up goals for aeration efficiency and starting to measure efficiency by off-gas measurements will most likely result in energy savings. Setting up a target of α SOTE > 4-5 %/m and energy consumption of less than 4.5 W/Nm³/m will be hard to comply with for most current aeration systems.

Criteria for an improved aeration system

An effective aeration system of blower and diffusers having an α SOTE/m of 5%/m can obtain a specific energy consumption of 12 kWh/PE/y, whereas a less effective system having α SOTE/m of 2,5% and a less effective blower might have a specific consumption of 30 kWh/PE/y.

The energy consumption increases significantly if the system is inefficient. There is a need for evaluating an exchange of diffusers when α SOTE is less than 2%/m. In case the electricity consumption for aeration is more than 5-5,5 Wh/Nm³/m the aeration system ought to be reevaluated.

If the aeration efficiency is reduced more than 10-20% over time the cause for this should be evaluated as the energy consumption will increase correspondingly.

1. Indledning og baggrund

Nærværende rapport indeholder en fremstilling af resultaterne opnået i forbindelse med projektet "Nyt off-gasmålesystem til optimering af bundbeluftning". Projektet er støttet af Naturstyrelsen, og de enkelte forsyninger har indkøbt og installeret off-gasmålere med tilhørende dataopsamling i deres SRO systemer.

Projektdeltagerne er:

- Herning Vand A/S
- Hedensted Spildevand A/S
- Sønderborg Forsyning A/S
- Aarhus Vand A/S
- Stjernholm A/S
- DHI

Hovedformålet med projektet er at undersøge optimeringspotentialet ved at anvende off-gasmåler i driften af aktiv slam anlægs bundbeluftningssystem.

Projektets mål kan opdeles i følgende delspørgsmål.

Tabel 1 Delmålene kan samles i to hovedgrupper: Vedligehold og styring

Optimeret drift og vedligehold af beluftningsudstyret	Optimeret styring af beluftningsudstyret
Hvornår skal diffusorer udskiftes	Hvordan måler man, at iltudnyttelsen og dermed energiudnyttelse kan optimeres
Hvornår bør diffusorerne rengøres og herunder syredosering til luften	Tyder et uændret tryk fra kompressoren over tid på god virkningsgrad
I hvilken grad påvirker slamkoncentrationen iltoverførslen fra bobler til vandfasen	Skyldes driftsproblemer i form af høj ammoniumkoncentration eller lav iltkoncentration en dårlig iltoverførsel (overfladeaktive stoffer) eller høj belastning
Kan omrører og den hastighed de forårsager optimere iltoverførslen	Hvorledes kan off-gasmålinger indgå som parametre i en optimeret styring af kompressorer og ventiler, samt i en styring af de biologiske processer

Det er væsentligt at skelne imellem en optimeret iltudnyttelse med baggrund i processer og deres styring, og iltudnyttelsen i forbindelse med vedligehold.

- Optimeret drift af beluftningsudstyret har fokus på vedligehold af diffusorer, herunder opstilling af kriterier for rengøring og udskiftning.
- Optimeret styring af beluftningsudstyret har fokus på at forøge iltudnyttelsen samtidig med et lavt energiforbrug per tilført Nm³ luft.

2. Behov for data om beluftningssystemer

Har driftspersonalet data for deres beluftningssystemets effektivitet? Her er svaret nej. Driftspersonalet har alene indikationer i form af lave nøgletal såsom kWh/PE/år og lavt procentvis forbrug til blæserne (% el til blæser af samlet effektforsøg). Eksempelvis kan energiforbruget under normal drift stige med 30%, uden at det er muligt at give forklaring. Den iltkoncentration der anvendes til at styre efter er fastholdt, men blæserne bruger 30% mere effekt uden årsagen umiddelbart kan afklares. Det kan skyldes øget belastning, tilstopning eller tilledning af stoffer som mindsker iltoverførslen.



Figur 2 Systemet har med samme styring og iltsetpunkt øget energiforbruget med 30%. Hvad er årsagen? Belastningen steget? Tilstoppede diffusorer? Overfladeaktive stoffer?

De fleste forsyningsselskaber har købt et iltningssystem bestående af blæser og bundbeluftning, som har funktionskrav til iltningsskapacitet og iltoverførsel i rent vand. Leverandøren har ofte stillet garanti for iltningseffektiviteten i form af kg ilt/kWh i rent vand i et eller to forudbestemte driftspunkter f.eks. 3.000 og 5.000 Nm³ luft/time. Det er en god garanti at få og der kan laves eftervisning med en rentvandstest. Testen er ret krævende at udføre og bliver ofte købt som en éngangsydelse hos et specialistfirma. Efter en test har man data for, om leverandøren har levet op til garantistillelsen.

Måling af iltningseffektivitet (kg ilt/kWh) kan sammenlignes med afstanden, som en bil kan køre per liter brændstof. Er målingen foretaget under standardbetingelser svarer det til den afstand bilen kører på en standard rute og med ens betingelser for alle producenter.

Spildevandsrensning er ikke en rentvandsproces. Tværtimod er der slam og spildevandsstoffer i vandet, som reducerer iltoverførslen ganske meget sammenlignet med iltning i rent vand. Iltningseffektiviteten under procesforhold vil generelt være halveret sammenlignet med effektiviteten i rent vand, og energibehovet i kg ilt er tilsvarende mindst fordoblet.

Uden vedligeholdelse vil iltoverførslen blive reduceret væsentligt med alderen af diffusorerne, idet membraner i beluftningssystemet stopper til og bliver stive med tiden. Nogle diffusorer kan næsten opnå fuld iltningseffektivitet efter vedligehold, mens andre skal skiftes efter nogle års drift. Derfor er det stort set umuligt at vedligeholde systemet optimalt, hvis ikke der udføres målinger.

2.1 Måling på beluftning er vigtig

Der er adskillige grunde til, at måling på et beluftningssystem er vigtig:

1. Det er målinger på en af de vigtigste processer i renseanlæg, da beluftning tilfører den helt nødvendige ilt til renseprocesserne.
2. Beluftningens energiforbrug udgør 40-70% af et renseanlægs samlede energiforbrug med tilhørende høje omkostninger.
3. Lovgivningens krav om effektiv drift med lave omkostninger gør beluftning til en af de vigtigste processer at have effektivitetsdata for.
4. Beluftningens effektivitet skal kunne dokumenteres og kontrolleres for at undgå at energiforbruget hertil stiger.
5. Luftforsyningens energiforbrug bestemmes af luftmængden. En ineffektiv processtyring, herunder blæserstyring, kan ødelægge et anlægs nøgletal på trods af effektive diffusorer.

Aktiv slamanlæg styres i dag hovedsageligt ved hjælp af ammonium- og nitratsensorer i kombination med iltmålinger. Det giver gode muligheder for at styre kvælstoffjernelsen; men sensorerne giver ikke information om, hvorvidt beluftningsudstyret er effektivt.

3. Off-gasmålinger

Den eneste måde at få tal for bundbeluftningens effektivitet på er ved at opsamle den luft, som har passeret vandfasen og analysere på den. Ved at placere en måleenhed direkte på vandoverflade, kan man opsamle den luft er til overs fra de luftbobler, som har leveret ilt til det aktive slam ved opstigning fra diffusorerne til overfladen. Målinger på denne luft kaldes off-gasmålinger. Den kan give driftspersonalet information om udnyttelsen af den ilt, som er tilført diffusorerne under procesforhold.

Off-gasmåling er en kendt teknik til måling på beluftningsudstyr. Teknikken er ikke udbredt, heller ikke i Danmark. Det kan skyldes, at der er få aktører på markedet, som anvender eller leverer off-gasmåleudstyr. Måleudstyret har specielt tidligere krævet hyppig kalibrering, og derfor alene været anvendt i forbindelse med målekampagner, hvor man i en kort periode foretager målinger. Iltmålere og flowmålere er blevet langt mere stabile, og derfor kan producenter i dag sælge stabile off-gasmålere til kontinuerlig drift, der kræver forholdsvis begrænset vedligeholdelse for at måle.

En anden væsentlig årsag til den begrænsede anvendelse er begrænset baggrundsviden om beluftningssystemer. Tidligere har iltning ofte været styret som simpel tænd og sluk styring for en mekanisk rotor eventuelt med to hastigheder. Dermed er viden om fintboblet bundbeluftning ikke så udbredt.

Off-gasmålinger bliver anvendt til måling af iltning under procesforhold, som er de faktiske driftsforhold iltningprocessen foregår ved, se figur 3. Dermed adskiller den sig fra rentvands-test, som udstyrets specifikation er leveret med. Der er ganske stor forskel mellem de to målinger, og omregning mellem de to metoder er vanskelig.

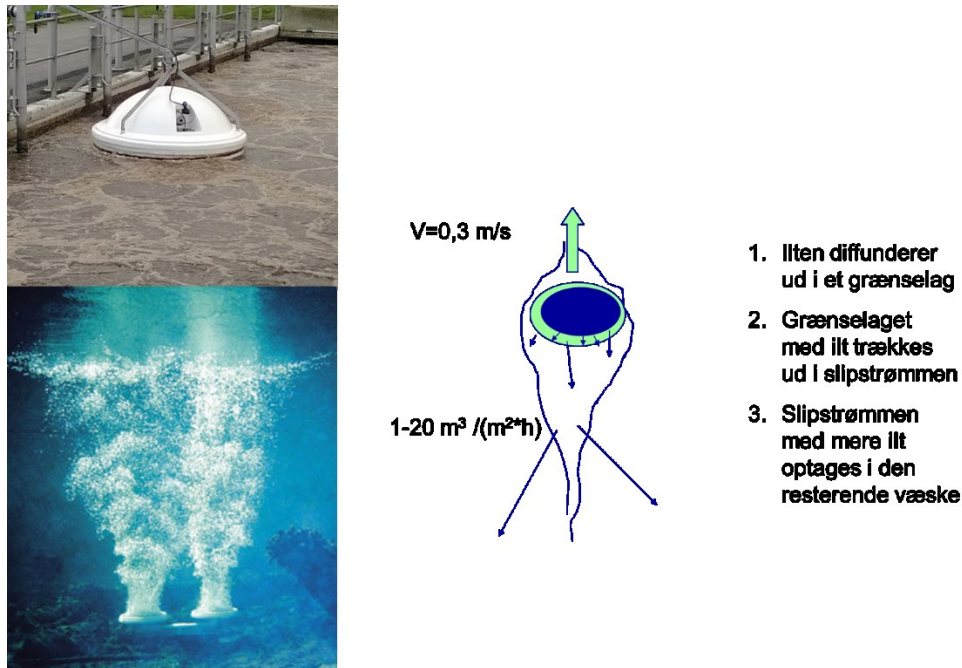


Figur 3 Kampagnemåling med off-gasmåler på Skagen Renseanlæg.

Producenterne får enten oplyst eller må antage en såkaldt alfafaktor, som korrigerer for iltning i rent vand til iltning i spildevand med aktiv slam.

Figur 4 illustrerer, hvorledes iltoverførslen fra bobler foregår, og hvordan den delvis forbrugte luft opsamles på overfladen, hvorefter den kan blive analyseret. Ilt (gas) fra en luftboble diffunderer ud og opløses i et vandlag omkring boblen. Det iltede vandlag (vandopløst ilt) rives af ved boblens opstigning, og vandlaget blandes med det øvrige vand og forsyner bakterier med

vandopløst ilt.



Figur 4 Bobler stiger op fra fint boblet diffuserer (nederst venstre) og den resterende luft bliver opsamlet på overfladen og analyseret (øverst venstre). Boblerne har leveret 5-30% af den tilførte lufts iltindhold (højre). Stigehastigheden er for en isoleret boble omkring 0,3 m/s. Stor lufttilførsel kan give en ekstra opadgående hastighed, som mindsker opholdstiden og iltudnyttelsen.

Man kan naturligvis ikke se boblerne under vandet i en aktiv slamtank, og derfor er Figur 4 en illustration med bobler i rent vand under vandoverfladen, mens off-gasmåleren er på overfladen.

Hvis man måler på iltoverførslen i rent vand og under procesforhold, kan man beregne en såkaldt alfafaktor (α) som kan variere fra 0,1-1. Faktoren angiver den reducerede iltoverførsel under procesforhold.

$$\alpha = \frac{\text{Iltoverførsel procesvand, } 0 \frac{\text{mg ilt}}{\text{l}}}{\text{Iltoverførsel rent vand, } 0 \frac{\text{mg ilt}}{\text{l}}}$$

α -faktoren er alene forårsaget af forskellen mellem iltning af spildevand/aktiv slam sammenlignet med iltning af rent vand, men ellers under samme betingelser. Beregning af α -faktoren kræver målinger for både rent vand og under forhold.

Off-gasmålinger er beskrevet i mange kilder (se f.eks. /1/, /2/). Det er derfor ikke formålet med denne rapport at beskrive, hvordan beregningerne udføres, eller hvordan det anvendte måleudstyr måler og beregner iltudnyttelse, luftflow og iltoverførsel.

Formlen for iltoverførslen er vigtig for vurdering af energibesparelser: $\text{AOTR} \approx \text{OTE} \cdot \text{Q} \cdot 296 \text{ g ilt/Nm}^3$, hvor Q er luftflowet. OTE kan ændres med tiden som følge af ælde eller belægninger på diffusormembraner.

Dette udtrykkes ved en fouling faktor F, som kan have værdien 0,1- 1. Efter rengøring eller syrebehandling af diffusorerne kan fouling faktoren bliver øget, hvormed iltoverførslen tilnærmer sig start situationen uden belægning.

Antager vi, at energiforbruget per Nm³ luft er konstant vil energiforbruget være $E=Q_{\text{luft}} \cdot Wh/Nm^3$. Det er vigtigt at vide, at falder OTE2 skal luftflowet øges: $Q_2=Q_1 \cdot OTE_1/OTE_2$, hvormed energiforbruget øges til med OTE_1/OTE_2 . Eksempelvis falder OTE med tiden 20% stiger energiforbruget mindst til: $20\%/16\% \cdot Q_1=125\%$ af det oprindelige flow, da luftflowet skal ændres med denne faktor. Hvis omvendt OTE stiger f.eks. 20% falder energiforbruget til: $Q_2=20\%/24\% \cdot Q_1=5/6 \cdot Q_1$, ca. 83% af det oprindelige

Overordnet måles iltudnyttelse og iltoverførsel ved forskellen mellem ilt tilført til diffusorerne og den ilt, som forlader overfladen. Luftflowet bliver målt og procesbetingelserne omregnet til standard forhold, herunder iltkoncentration 0 mg ilt/l, en atmosfæres lufttryk og en vandtemperatur på 10 eller 20°C.

Der er i dette projekt anvendt off-gasmålere fra firmaet Stjernholm A/S, som leverer en off-gasmåler til permanent installation. Der er anvendt forskellige tilnærmelser, som bevirker at udstyret kan anvendes kontinuert. Lufttrykket beregnes f.eks. altid som 1 atmosfære, blæserens ind sugningsluft har en relativ luftfugtighed på 60%, og off-gassens vandindhold er ca. 100% relativ luftfugtighed. Udstyret omregner ikke til standardbetingelser, blandt andet fordi alfa-faktoren ikke er kendt.

DHI har anvendt en modificeret udgave af Stjernholms måler, som er lettere flytbar og beregnet til kampagnemålinger. Derudover har den sin egen database, der kan anvendes til målt relativ luftfugtighed og aktuelt lufttryk. Derudover kan der tilkoble flere iltmålere og andet måleudstyr.

Som det fremgår ovenfor er det således i dag muligt at købe/leje udstyr – en sensor – som giver information om bundbeluftningens ydelse og funktion således, at effektiviteten kan blive vurderet.

3.1 Anvendte forkortelser og deres betydning

Det er enklere at skrive forkortelser til de relativt lange navne på faktorer, som indgår i måling på off-gas:

- OTE: Oxygen transfer efficiency, % ilt, iltudnyttelse. OTE viser den procentvise udnyttelse af den tilførte ilt til diffusorer
- α SOTE: Standard Oxygen transfer efficiency. Iltudnyttelse under procesforhold ved 0 mg ilt/l. OTE omregnes til 0 mg ilt/l, % ilt. OTE aftager med stigende iltkoncentration og en omregning til standard iltkoncentration gør sammenligninger enklere.
- AOTR (OTR): Actual oxygen transfer rate, kg O₂/h/m² (kan ved division med stighøjden give overførslen per m³)- AOTR måler aktuel iltoverførsel hastighed til aktiv slam per beluftet areal. AOTR bliver ofte kaldt OTR.
- α SOTR: Standard Oxygen transfer rate, kg O₂/h/m², måler iltoverførselen omregnet til 0 mg ilt/l. Iltoverførsel aftager med iltkoncentrationen i vandfasen og en omregning til standard iltkoncentration gør sammenligninger enklere.
- AE: Aeration efficiency, kg O₂/kWh, måler iltningseffektivitet under aktuelle forhold.
- α SAE: AE omregnet til 0 mg ilt/l, kg O₂/kWh. AE aftager med iltkoncentrationen og en omregning til standard iltkoncentration gør sammenligninger enklere.
- SAE: Standard aeration efficiency, kg O₂/kWh (standard iltningseffektivitet i rent vand, og standard betingelser).

4. Optimeret drift af beluftningsudstyret

4.1 Sønderborg Renseanlæg - Udskiftning af beluftningssystem

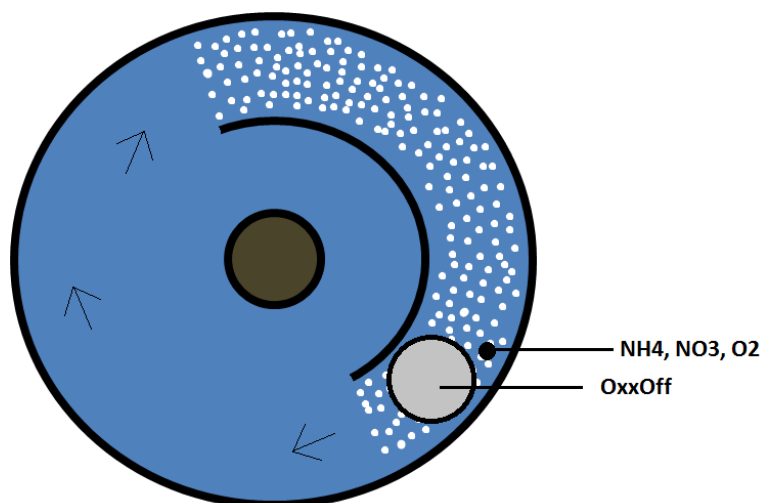
Arbejdsmetoden på Sønderborg Renseanlæg har indledningsvis været en kampagnemåling. Efterfølgende er der i forbindelse med dette projekt opstillet en off-gasmåler med tilhørende databasesystem, som har monitoreret over en længere periode.

Sønderborg Renseanlæg er belastet med omkring 50.000 PE. Anlægget har tre ens aktiv slamtanke (af typen OCO).

Som følge af et højt energiforbrug per PE blev DHI bedt om at foretage en off-gasmåling på bundbeluftningssystemet. Målinger på anlægget viste en iltudnyttelse i form af α SOTE på under 2% per meter stighøjde for luften. Den samlede iltudnyttelse var under 10% ved en dybde på 5,5 meter.

Ilttilførslen var derudover ikke tilstrækkelig, og der var brug for større kapacitet for at opnå en iltkoncentration på mindst 2 mg/l. Elforbruget var op til 50% højere end, hvad man kan forvente af et nyt effektivt beluftningssystem.

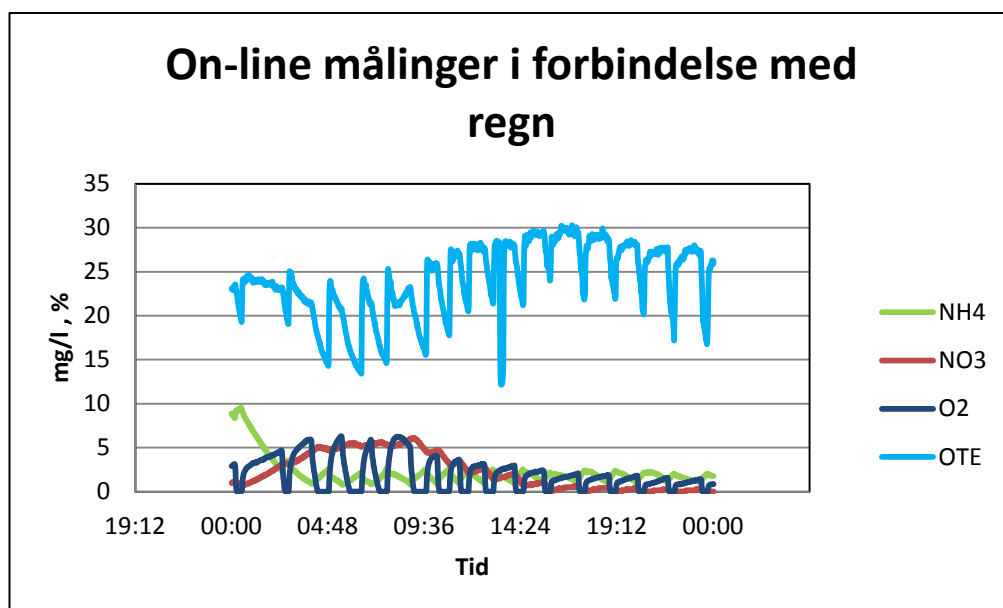
Et nyt beluftningssystem blev installeret med optagelige pladediffusorer og med en kapselblæser per aktiv slamtanke, hvilket gav en forbedring af rensesultater for ammonium samt ca. 40% energibesparelse til beluftningen og en mere regulerbar luftforsyning.



Figur 5 Beluftning i OCO anlæg sker i en ydre halvcirkel og vises med hvide bobler. Anlægget er desuden styret via målinger af ammonium og ilt, som indgår i beluftningsstyringen. Off-gasmåleren, OxxOFF er placeret i udgangen af iltningssonen. En omrører skubber vandet igennem beluftningszonen.

Beluftningstanken er usædvanlig, idet iltbehovet, som er størst uden for beluftningszonen, tilføres ved pumpning af aktiv slam igennem beluftningszonen og til resten af aktiv slamtanken, Figur 5.

Pumpningen foregår med en omrører. Et stort iltbehov i den øvrige del af tanken kan gøre det nødvendigt at øge iltindholdet op til 6 mg/l i udgangen af beluftningszonen.



Figur 6 Udvikling i online målinger ved højt tilløbsflow i forbindelse med regnhændelse. Data er fra on-line off-gasmåler og ammonium og nitrat i en af tre procestanke. Off-gasmålerens resultater opsamles sammen med SRO anlæggets målinger i en ekstern database til præsentation og beregninger.

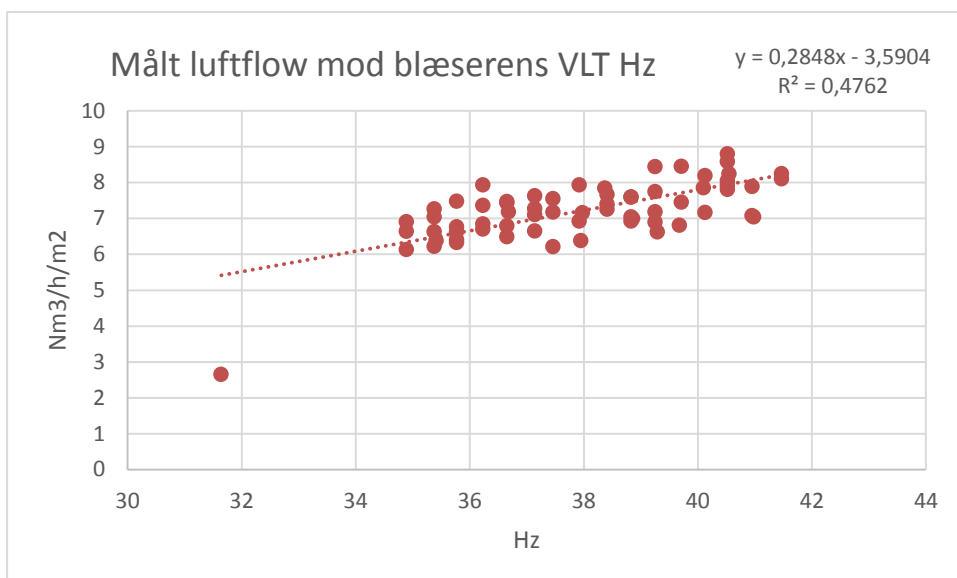
Figur 6 viser et eksempel, hvor en stigning i belastningen under regn giver en stor stigning i ammoniumkoncentrationen og dermed iltbehovet. Processtyringen mindsker beluftningspauser og øger iltindholdet, som her er målt under off-gasmåleren. OTE, iltudnyttelsen starter ved 24%, som ved øget luftflow i en beluftningsfase falder til 22%. Dette er væsentligt højere end det udstyr, som blev udskiftet, hvor OTE var under 10%. Samling af data, som ses i figur 6, giver et godt grundlag for procesvurderinger.

α SOTE (altså under driftsforhold men ved 0 mg ilt/l) er i størelsesordenen 5-6 %/m stighøjde, hvilket er en høj udnyttelse, som giver mulighed for et lavt energiforbrug til beluftningen. Nøgletallet for det samlede energiforbrug på anlægget udtrykt som kWh/PE/år var lavt omkring 28.

Data er for SRO anlægget, og man skal gøre sig klart, at OTE målinger alene giver mening under beluftning. I de perioder, hvor iltindholdet er 0 mg/l, er der ingen iltning, og OTE tallene skal derfor ikke anvendes i disse perioder. OTE målingen fremkommer ved, at det fortsat er muligt at måle på iltindholdet af den luft, som er opsamlet under off-gasmåler.

OTE stiger til knap 30% kl. 15 som følge af, at iltindholdet falder og iltgradienten er mere favorabel for iltningen. Samtidig falder slamkoncentrationen, som dog ikke er vist, da en del af slammet i reaktoren flyttes til efterklaringsstanken, hvorved slamkoncentrationen falder i aktiv slam anlægget. Viskositeten bliver mindre, og iltningen forbedres, når slamkoncentrationen falder.

Slamkoncentrationen stiger gradvis mod kl. 00, hvilket kan være årsagen til at OTE falder. Off-gasmåleren måler desuden luftflowet af den opsamlede luft, se Figur 7.



Figur 7 Eksempel på måling i en iltningsperiode opsamlet luftflow mod blæserens regulering i Hz.

Off-gasmålingen måler ændringer i luftflowet, som er forårsaget af blæserens ydelse, og regulerer omdrejninger via VLT. Luftflowet udviser relativ stor spredning. En forklaring på variationen for en given frekvens er selve måleprincippet (differenstryk omsat i pitot-rørsberegning til luftflow) og, at boblerne kommer op i større antal i områder, og disse flytter sig rundt i tanken. Denne variation i bobletæthed kan man ofte se på overfladen, hvor boblerne ”bølger” og flytter sig rundt i tanken. I præsentationer kan der med fordel foretages en filtrering af flowsignalet, f.eks. som glidende middel.

Der er ikke i projektet gjort yderligere med hensyn til opfølgning af fald i iltudnyttelsen med øget alder. Effektforbruget er ikke øget.

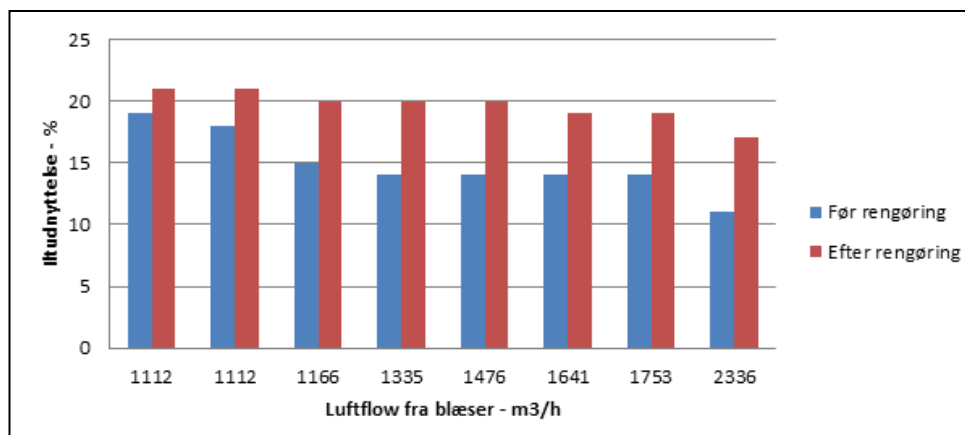
Iltningseffektiviteten og effektforbruget vil øges i højt belastede situationer, hvor OTE falder, som følge af højt iltindhold i beluftningszonen.

Såfremt vandflowet igennem beluftningszonen øges, vil OTE i beluftningszonen stige på grund af iltkoncentrationen blive lavere end ved lang opholdstid. Et større vandflow vil kræve en større omrører med større effektforbrug. Denne mulighed er sandsynligvis alene relevant, hvis gennemsnitsbelastningen stiger væsentligt.

4.2 Juelsminde Renseanlæg - Rengøring af diffusorer

Arbejdsmetoden på Juelsminde Renseanlæg har indledningsvis været kampagnemålinger selvom udstyret har været permanent opstillet. Spildevandet er meget belastet fra en industri, som bevirker at diffusorerne påvirkes, hvilket ændrer iltudnyttelse og dermed falder effektiviteten.

Hedensted Spildevand har testet effekten af fysisk rengøring af diffusorer. Iltudnyttelsen er målt med off-gasmåler før og efter rengøring med højtryksspuler. Stigehøjden er 4 meter.



Figur 8 Vedligeholdelse af diffusorer, hvor iltudnyttelsen forøges væsentligt ved rengøring med højtryksspuling. Iltudnyttelsen stiger fra 9% til 35% ved højeste luftflow.

Årsagen til den gradvise tilstopning (iltoverførslen reduceres med en fouling faktor F) er en industritilledning, hvor stoffer i spildevandet giver udfældninger og biologiske aflejringer på diffusorerne. Et fald i OTE på 5% øger energiforbruget med ca. 30%, da modtrykket stiger i diffusorer og luftrør.

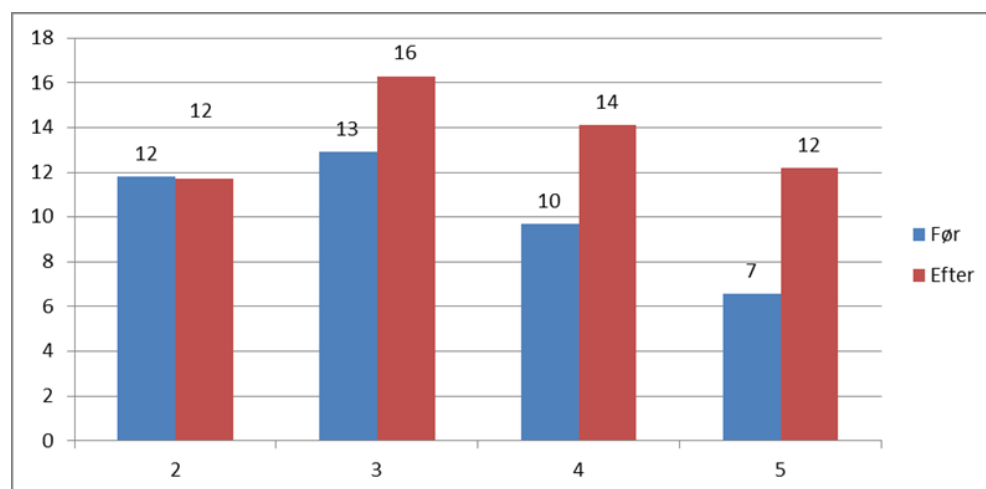
α SOTE er i størrelsesordenen 4,5-5,5%/m stighøjde ved rengjorte diffusorer og falder til 3-4,5%/m stighøjde.

Tilstopningerne har efterfølgende forårsaget, at typen af diffusorer er udskiftet, og den nye type pladebluffer har mindre tendens til tilstopning, og dermed er behovet for vedligehold mindre. In-line dosering af myresyre er efterfølgende etableret.

4.3 Boeslum Renseanlæg - Årlig rensning af diffusorer

Arbejdsmetoden på Boeslum Renseanlæg har været kampagnemålinger. Syddjurs Forsyning har ligeledes testet effekten af rengøringen af rørdiffusorer. Målingerne er udført af DHI.

En gang årligt optages diffusorrammerne, ristegods fjernes og diffusorerne rengøres med kost. Stighøjden er ca. 4 meter.



Figur 9 Boeslum Renseanlæg. Effekten af årlig rengøring af diffusorer på α SOTE. Luftmængden er ikke kendt, men beluftningen øges i trin. 2 er laveste flow og 5 højeste flow.

Årsagen til den gradvise tilstopning (ilt overførslen reduceres med en fouling faktor F) er især ristestof.

Iltudnyttelsen øges ikke ved rengøringen ved det laveste beluftningstrin, men øges op til 70% ved det højeste trin, figur 9. Trin 3 og 4 er mest anvendt og rengøringen vil give en forbedring på 23-40% i iltudnyttelsen og mindske effektforbruget ca. 20 og 30%. Rengøringen har således en stor og væsentlig effekt.

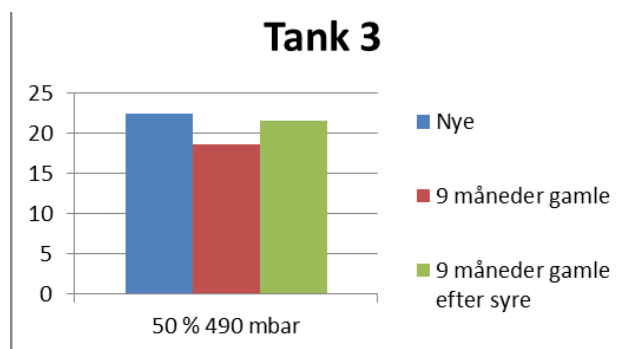
α SOTE er 3-4%/m stighøjde og falder til 2-3%/m.

4.4 Holstebro Renseanlæg - Rengøring med syredosering til diffusorer

Arbejdsmetoden på Holstebro Renseanlæg har været kampagnemålinger. Målingerne er udført af DHI.

Renseanlægget modtager en betydelig mængde industrispildevand. Gradvist bliver iltningen mindre effektiv og der er behov for en rengøring, som foretages in-line med myresyre. Årsagen til den gradvise tilstopning (ilt overførslen reduceres med en fouling faktor F) er sandsynligvis industritilledning, hvor stoffer i spildevandet giver udfældninger på diffusorerne.

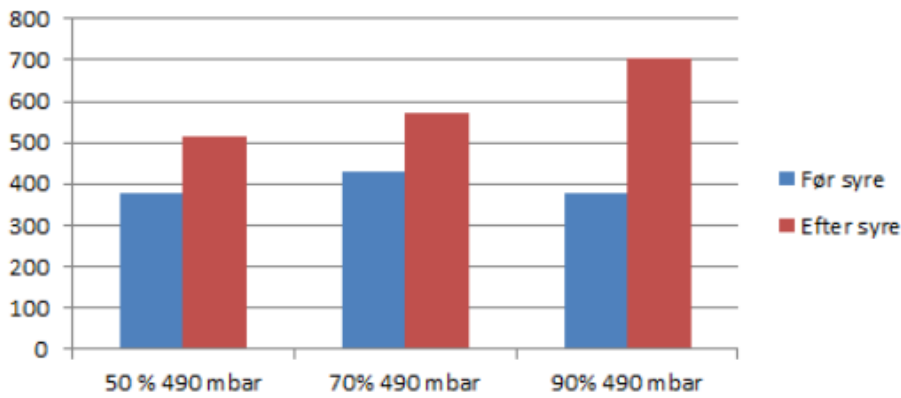
Effekten af dosering af myresyre til luftstrømmen til diffusorerne har en væsentlig effekt.



Figur 10 α SOTE for nye diffusorer, 9 måneder gamle og 9 måneder gamle efter syredosering til tank 3. Driftstryk og ventilstilling er angivet.

Iltudnyttelsen falder knapt 20% efter 9 måneders drift, som næsten stiger til udgangspunktet efter dosering. Stighøjden er knapt 5 meter, hvorved α SOTE er i størrelsesorden 4%/m.

Før syredoseringen stiger iltoverførslen kun mindre ved øget åbning af luftventilen i manifolden. Ilttilførslen er mindre end behovet. Der tilføres myresyre til luftforsyningen til tanken, hvorefter iltoverførslen α SOTR øges ved syredoseringen. Både iltudnyttelsen og luftmængde stiger, og dermed stiger iltoverførslen betydeligt – omkring 90%, se Figur 11.

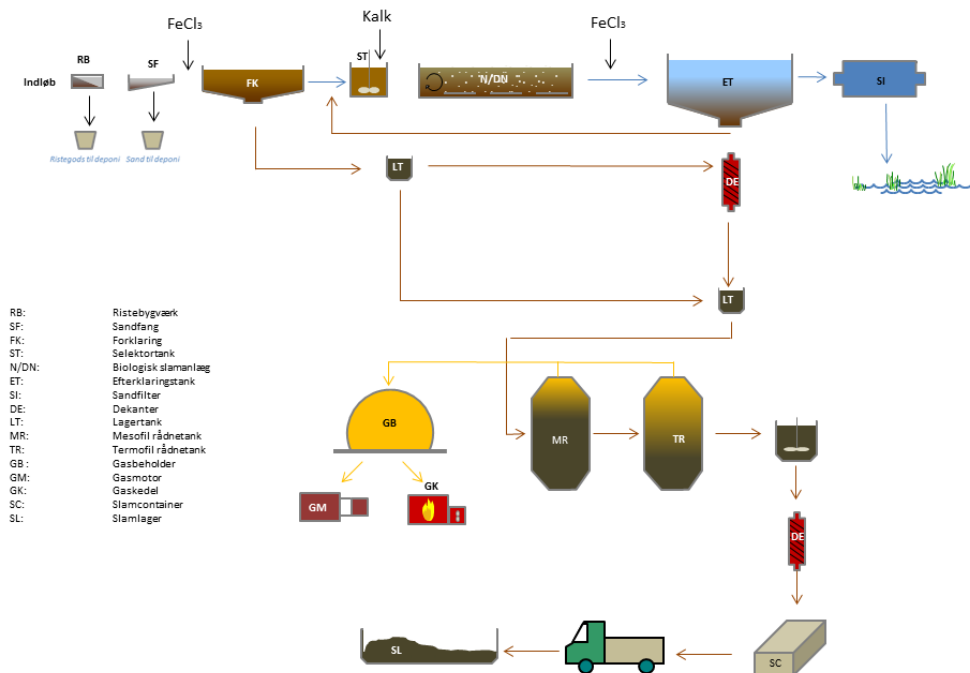


Figur 11 Udviklingen i iltoverførslen $\alpha SOTR$, $g/m^2/h$ efter dosering af myresyre, ventilstilling for manifold og driftstryk er angivet for målingerne.

Det er en fælles manifold med et driftstryk, som forsyner fire luftningstanke med luft fra en blæserinstallation. Det er en flowmåling på forsyningsrørene til de fire tanke, som måler, om lufttilførslen er tilstrækkelig; såfremt dette ikke er tilfældet bliver blæsertrykket øget. Flowmålerne lukker ventilen, såfremt luftflowet overstiger det tilladte flow til diffusorerne.

4.5 Herning Centralrenseanlæg - Revurdering af blæserstyring og døgnvariation i $\alpha SOTE$

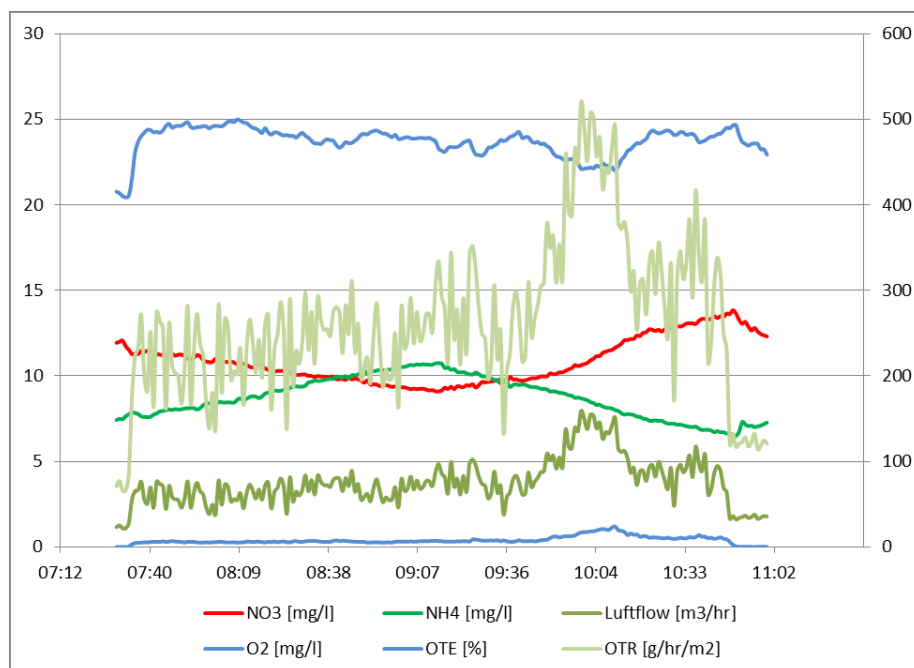
Arbejdsmetoden på Herning Centralrenseanlæg har været fast installation af off-gasmåler i en tank, som har været monitoreret i en længere periode, og der er udført test for ændret blæserstyring.



Figur 12 Herning Centralrenseanlæg er et to-trins anlæg med en forrensning af spildevandet inden biologisk rensning i et aktiv slam anlæg.

Off-gasmåleren er placeret i en tank i et tanksæt, som driftsmæssigt skifter mellem nitrifikation og denitrifikation. Anlægget har to aktivslam-linjer.

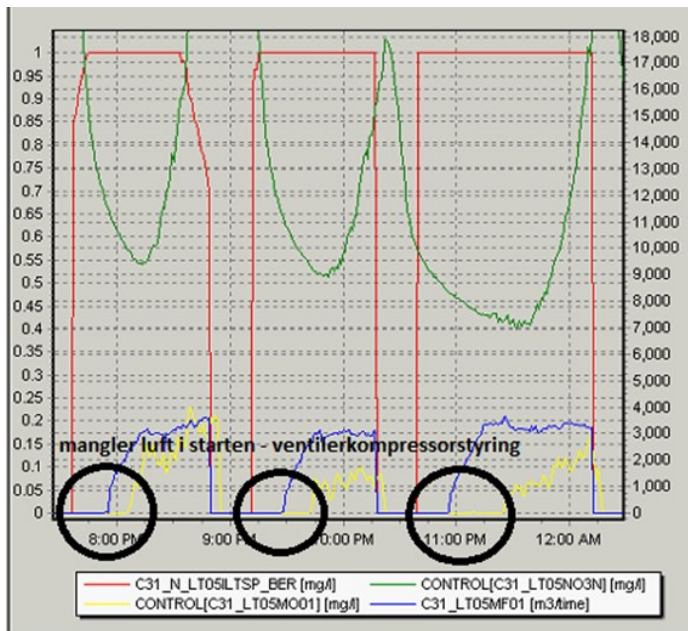
Gennemgang af off-gas data og data for ammonium og nitrat antydende, at beluftningen med fordel kunne optimeres. Der er målt perioder, hvor luftforsyningen ikke kunne følge med iltbehovet, hvilket viser sig i form af stigende koncentrationer af ammonium i tanken.



Figur 13 Grafen viser et eksempel på en periode, hvor iltkoncentrationen er lav. OTR er på højre Y-akse, og de øvrige værdier på den første y-akse.

Figur viser en periode med høj belastning, hvor beluftningen med fordel kunne reguleres anderledes. Der er en høj OTE, lavt luftflow, men iltoverførslen burde måske kunne være øget ved at øge luftflowet. Iltudnyttelsen er høj, knap 25% til 23%. Mellem kl. 9.30 og 10 øges iltoverførslen væsentligt, idet luftflowet bliver knapt fordoblet. Ammonium er høj i hele perioden, og kunne være reduceret, hvis lufttilførslen var øget tidligere.

Data for blæserstyringen viste, at der eksempelvis ved opstart efter beluftningspauser kan optimeres på beluftningen, idet lufttilførslen de første ca. 20 minutter er lav for herefter at blive øget, se Figur .

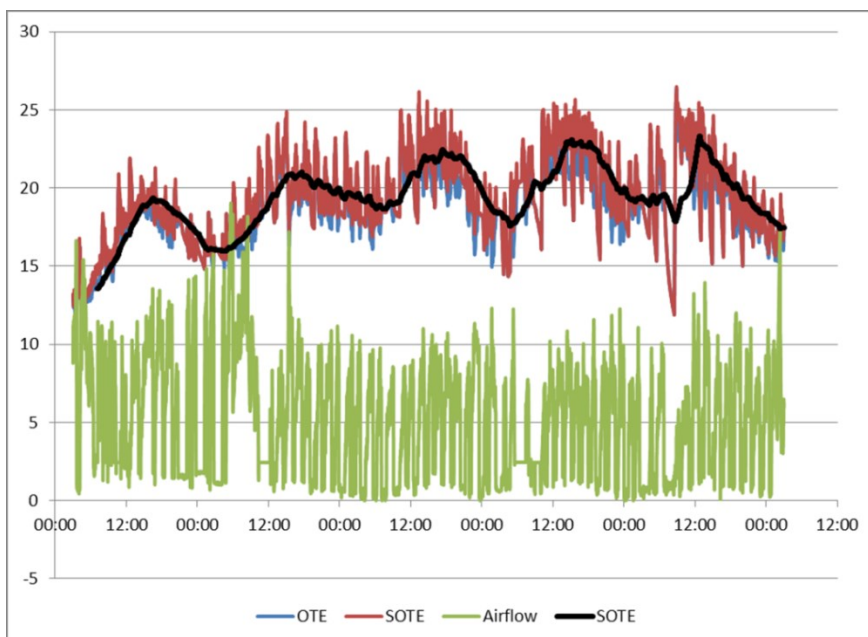


Figur 14 Screenshot af on-line styringen, som viser, at luftforsyningen (blå) først stige til 3500 m³/time efter ca. 20 minutter inde i en belvningsfase. Iltkoncentrationen (gul) er lav indtil ca. 20 minutter ind i fasen.

En hurtigere opstart af fuld kapacitet i blæserstyringen øgede iltningens kapaciteten. Dette mindskede samtidig en stigning i ammonium, som der generel optrådte med den oprindelige styring og som var vanskelig at få reduceret.

Iltoverførslen aftager med tilførslen af overflade aktive stoffer. I spildevandet er der overfladeaktive stoffer i form af f.eks. detergenter, og disse bliver sammenmed den øvrige belastningen ikke udledt jævnt men følger den udledning til kloaksystemet.

Off-gasdata viser, at der er vis cyklus i målingerne af OTE og α SOTE, se Figur .



Figur 15 Off-gasmålinger af iltudnyttelsen mod luftflow. Glidende middel af α SOTE er vist i sort.

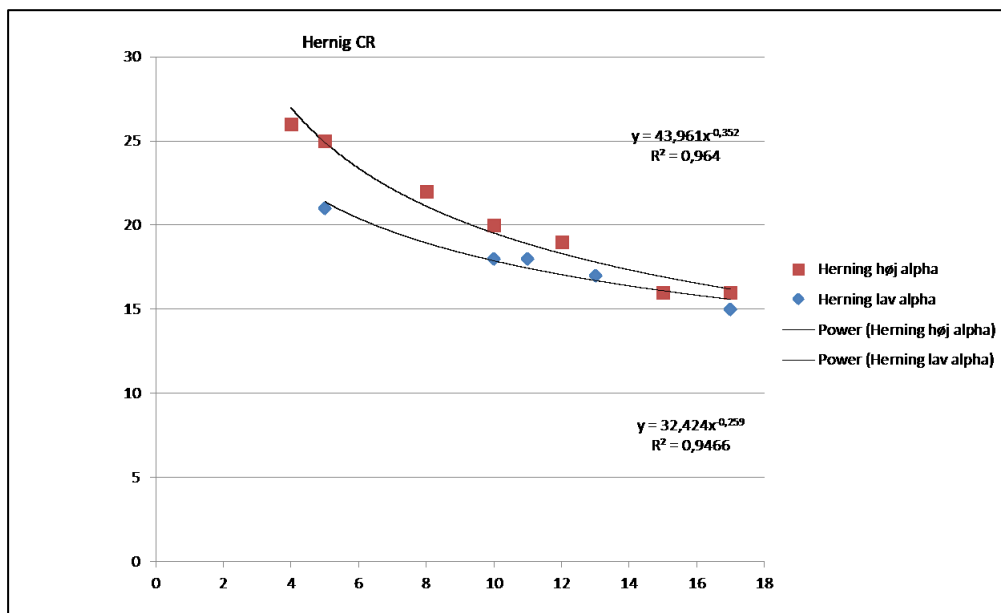
Fem dages målinger, Figur , viser, at der er en cyklisk tendens i iltudnyttelsen. I store træk er der tale om nogenlunde ens driftsforhold, selvom der er dage, hvor ilttilførslen er højere, hvilket tilskrives en lidt højere belastning. Både OTE og α SOTE svinger i en døgnncyklus, hvor iltudnyttelsen er størst omkring middag kl. 12.

Årsagen til de målte døgnvariationer kendes ikke, men vi antager, at når luftflow tilnærmelsesvis er ens, kan tilledningen af overfladeaktive stoffer, som bremser iltoverførslen fra bobler til vandfasen, være en årsag. Rengøring i industrien sker ofte efter kl. 16, og måske derfor kommer en større tilledning af sådanne overfladeaktive stoffer senere på dagen. Opholdstiden af spildevandet er lang, omkring et døgn, hvorfor effekten varer længe. Stofferne bindes til slammet eller nedbrydes, og effekten er tilsyneladende mindst og α SOTE højest hen på formiddagen.

Det er forventet, at iltudnyttelsen aftager med øget luftmængde per diffusor, hvilket leverandører af diffusorer beskriver i deres produktblade, hvor målingerne er udført i rent vand.

Under procesforhold for hårdt belastede anlæg vil kurver for α SOTE mod flowet, figur 16, afhænge af, hvornår på dagen målingerne er taget.

Det er således vigtigt, at være opmærksom på, at Alfa-faktoren, som viser ændringen i iltoverførslen ved beluftning i spildevand i forhold til rent vand, ikke er konstant! Svingninger i faktoren kan tolkes som en øget belastning, da der kræves mere luft for at overføre tilstrækkeligt ilt til at holde ilt- eller ammonium-set-punkt.



Figur 16 α SOTE afbildet mod luftflow. Der er to kurver: En for høj iltoverførsel (høj alfa), og en ved lavere iltoverførsel (lav alfa).

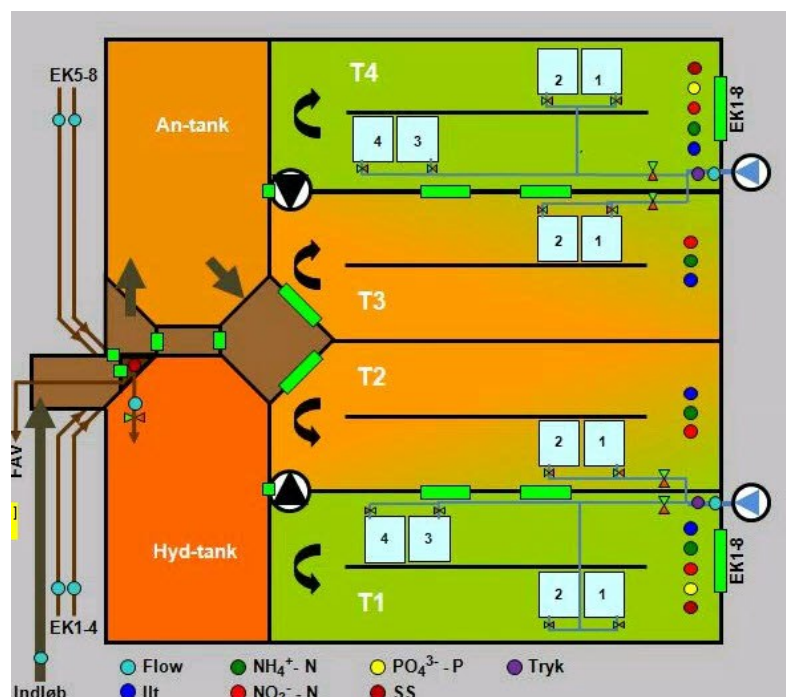
Figur viser at α SOTE aftager med øget luftflow, som det er forventet. Der er to kurver, som afspejler effekten om der aktuelt er lav eller høj alfaværdi (overfladeaktive stoffer).

α SOTE varierer relativt meget på Herning Centralrenseanlæg - fra 13-25%. Stigehøjden er 4 meter, hvormed α SOTE per meter ligger mellem 3 og 6%.

4.6 Egå Renseanlæg med variation i iltudnyttelsen og optimeret beluftning efter NO_3^-

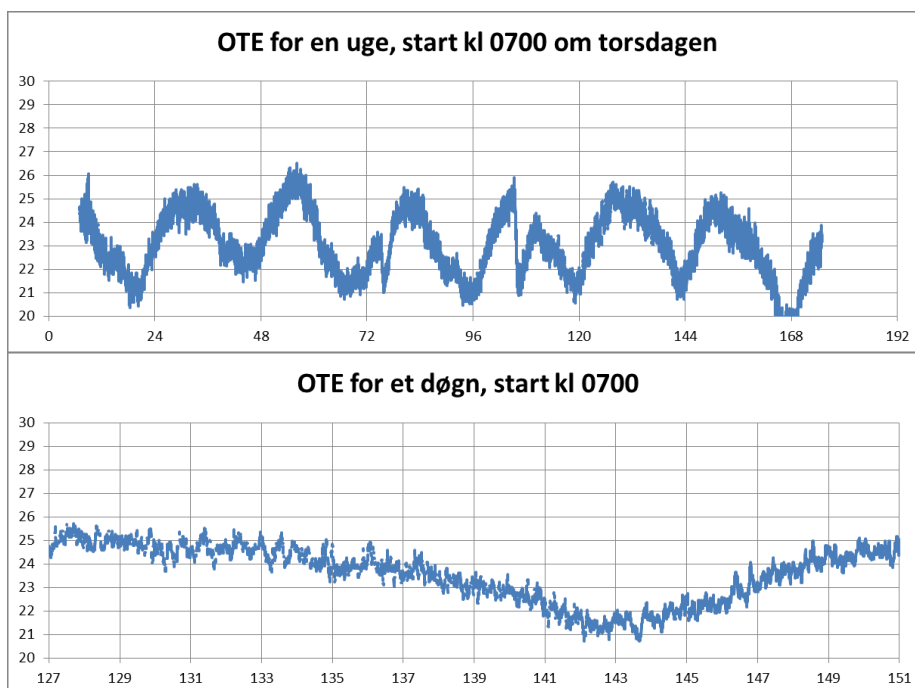
Arbejdsmetoden på Egå Renseanlæg har været en fast installation af off-gasmåler, som er monitoreret over længere tid. Off-gasmåleren er flyttet således, at det har været muligt at måle i alle fire tanke. Off-gasmålinger er sammenkoblet med SRO anlæggets øvrige monitoring. Der er udført flere test over en længere driftsperiode.

Egå Renseanlæg er et aktiv slam anlæg med en kapacitet på 120.000 PE. Anlægget har bundbeluftning i fire beluftede tanke. Vandet løber fra tank 4 til tank 1, hvor der er udløb.



Figur 127 Screen dump fra SRO anlægget på Egå Renseanlæg. Der er tilløb i tank 4 og udløb i tank 1. Anlægget har både en anaerob tank og en hydrolysetank til sikring af biologisk fosforjernelse.

Anlæggets tank 4 er betydeligt hårdere belastet end tank 1. Tank 4 er altid beluftet og ammoniumkoncentrationen er sædvanligvis højere end $10 \text{ mg NH}_4^+/\text{l}$. Styring efter nitratindholdet i de øvrige tanke sikrer kvælstoffjernelsen. Antallet af diffusorer er dobbelt så højt i tank 1 og tank 4. Lufforsyningen består af en kombination af blæsere, som giver et stort reguleringsområde fra lavt og til højt flow.

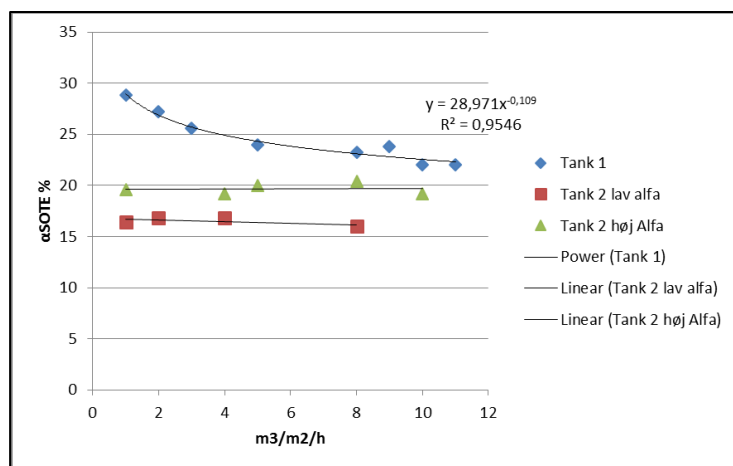


Figur 13 Fem døgns måling af OTE i tank 1 med fastlåst luftflow viser en klar cyklus i data, øverst. En døgnkurve er vist nederst.

Iltudnyttelsen er højest mellem kl. 07 og 09 og lavest lidt før midnat. Iltindholdet er lavt, hvorfor OTE og α SOTE er næsten ens.

Iltudnyttelsen α SOTE varierer fra 14-17% i tank 4 og stiger til 22-34% i tank 1. Forskellen kan tilskrives en forventet større koncentration af overfladeaktive stoffer i tank 4.

α SOTE per m stighøjde (5,3 m) varierer fra 2,6 til 6,4%/m. Tank 1 har en mere karakteristisk form med aftagende iltudnyttelse med øget flow. I tank 2 er kurveforløbet vandret, hvilket måske skyldes, at antallet af diffusorer er færre, hvormed belastningen per diffusor er højere. Der er ligeledes forskel på, hvor i døgncyklussen målingerne er taget (høj eller lav alfa).

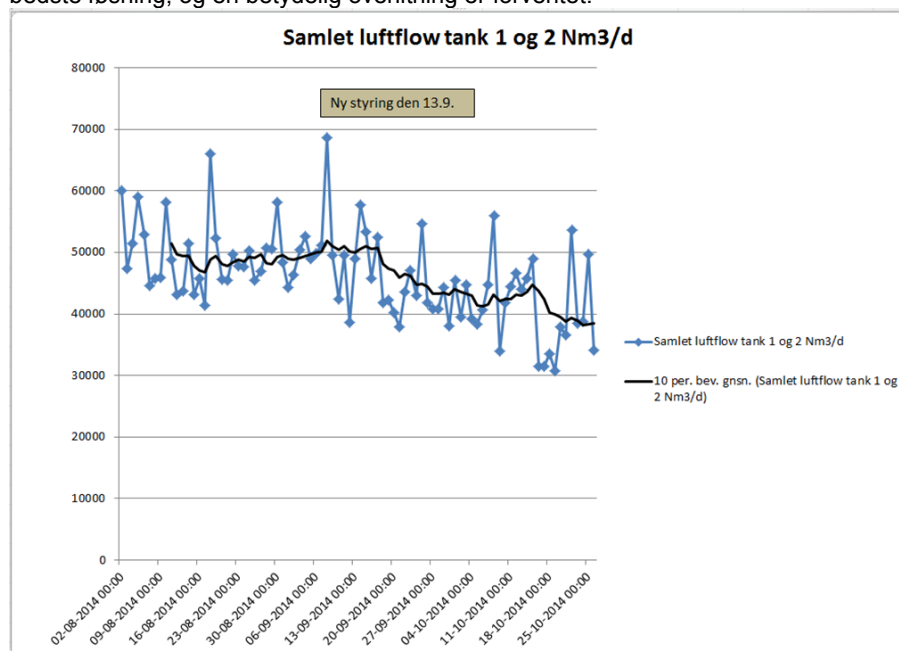


Figur 14 Eksempel på variation af SOTE mod luftflow for tank 1 og tank 2.

Aarhus Vand har evalueret mulighederne for en optimering af energiforbruget ved at kunne øge iltforbruget i de tanke med de højeste iltudnyttelser, dvs. i tank 2-4. Vurderingerne er, at der kan opnås en højere OTR, men der er ikke taget højde for de procesmæssige parametre

som ammonium og nitrat, hvorfor f.eks. fuzzy- regulering af OTE alene uden hensyntagen til processerne ikke er realistisk.

Indstilling af reguleringen af ammoniumstyringen giver derimod en optimeringsmulighed, idet reguleringen bliver blødere og en stigning i ammonium resulterer ikke i en tilsvarende hurtig opregulering af luftmængden. Der er for tank 1 og 2 vurderet en reduktion op til 20%, figur 20. En hurtige regulering f.eks. i form af øget iltsetpunkt ved en stigning i ammonium er ikke den bedste løsning, og en betydelig overiltning er forventet.



Figur 20 Reduktion af luftforbrug i tank 1 og 2 efter ændret styring mod mere blød regulering af iltningen.

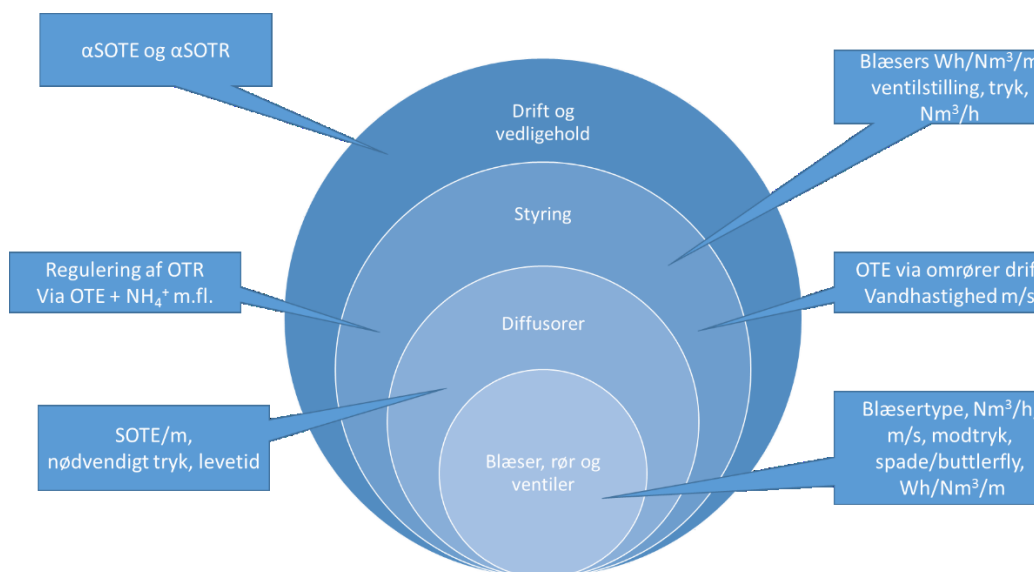
Det er ikke lykkedes at opstille en on-line styring, som inkluderer OTE, hvilket måske ikke er så overraskende, når man tager i betragtning at on-line styringer baseret på ammonium, nitrat og ilt er meget enkle. Der er behov med mere erfaring og test med en kombination af OTE-, og ammonium- og nitratmålinger.

Modtrykket, som er nødvendigt for at levere den luft, som styringen åbner for, stiger kun lidt med tiden. Ændringer i anlæggets konfiguration har gjort, at der ikke er vurderet en større stigning i form af nødvendigt driftstryk, mbar/år.

Diffusorerne viser ikke tegn på behov for rengøring eller syrebehandling.

5. Optimering ved brug af off-gasmålere

Indledningsvis skal det nævnes, at der ikke findes publicerede artikler, som systematiserer off-gasmålings anvendelse til optimering. De erfaringer og data, som kommer fra partnerne, har DHI i det følgende samlet i nogle områder med forslag til anvendelse af off-gasmålinger, se 1.



Figur 21 Områder (cirkler) og registreringer for optimering af driften af bundbeluftning (kasser) via off-gasmålinger.

Drift og vedligehold

Behovet for rengøring kan måles som fald i iltudnyttelse og iltoverførsel. Partnerne har set, at effekten af både fysisk rengøring og kemisk rengøring i form af syredosering øger effektiviteten.

Det er individuelt om der er behov for rengøring, og både Egå og Sønderborg renseanlæg har drevet deres beluftning i mange år uden rengøring, og uden at der tilsyneladende har været nedsat funktion eller stigning i effektforbrug. Andre anlæg har brug for rengøring med syre ganske hyppigt, f.eks. en gang om måneden. Data fra off-gasmålingerne kan vise, om der er et behov, idet α SOTE og α SOTR falder.

Behovet for rengøring er ikke generelt fremhævet af alle leverandører, og tiltag for syredosering kan med fordel medtages i en leverance af et iltningssystem.

Vedligehold af beluftningssystemet i form af udskiftning af diffusorer kan vise sig nødvendigt, hvis det ikke er muligt at opnå tilfredsstillende forbedring ved rengøring. Etablering af bedre riste i indløbet kan i nogle tilfælde erstatte en fysisk rengøring, hvis ophobning af ristegods er et problem.

Styring

Regulering af iltoverførslen, OTR, kan optimere og nedsætte effektforbruget ved at øge iltudnyttelsen OTE, således at der skal tilføres mindre luft til diffusorerne. Regulering af OTE vil nedsætte iltkoncentrationen i vandet. En stor forskel mellem SOTE og OTE antyder, at der er et potentiale for optimering. De optimale reguleringer, hvor der sker en sammenkobling af f.eks. OTE og ammonium, er endnu ikke afprøvet, men ud fra erfaringerne fra nærværende projekt kan man forvente, at egentlige on-line styringer med brug af OTE målingen vil indgå i mere avancerede on-line styringer.

Styring af omrøring, som pumper vandet hen over beluftningsfelter, vil i nogle tilfælde kunne optimere og øge OTE ved at indkoble større omrøringseffekt eller flere omrørere. For anlæg med alternerende beluftning bør omrøringseffekten nedsættes under denitrifikation.

En kortere opholdstid over beluftningsfeltet vil mindske iltindholdet over beluftningsfeltet og øge OTE. Det skal fremhæves, at iltkoncentrationen over beluftningsfeltet er noget ganske andet end iltkoncentrationen uden for beluftningsfeltet. DHI har på flere anlæg lavet målinger, der dokumenterer, at vandet ikke pumpes rundt med tilstrækkelig hastighed i en tank, og i visse tilfælde at vandet nærmest står stille. Dermed vil en iltensor placeret før beluftningsfeltet fortsat registrere en lav iltkoncentration på trods af, at iltkoncentrationen er høj i selve beluftningsfeltet. Omrøring og placering af sensorer kan således være afgørende for at opnå en høj iltningseffektivitet og dermed et reduceret energiforbrug til beluftning.

Styring af lufttilførslen er meget vigtig at medtage i optimeringerne. Det anbefales at omregne nøgletallet for tilførsel af luft ($\text{Wh}/\text{Nm}^3/\text{m}$ stighøjde). Såfremt dette tal ikke holdes lavt og gerne omkring $4-4,5 \text{ Wh}/\text{Nm}^3/\text{m}$, er der mulighed for optimering af energiforbruget til beluftning. Beluftningen bør om muligt være med fuldt åben ventil, således at der ikke skabes et trykfald alene for at regulere luftflowet. Dermed vil trykket være en variabel i styringen.

Der har ikke været tilfælde, hvor kontrollen af en mindre stigning af blæserens afgangstryk har været anvendt til at indikere behov for rengøring eller syredosering til diffusorerne. Iværksættelse af syredosering er typisk først sket, når trykfaldet er øget med 0,5 meter vandsøjle.

Anvendelse af et målesystem for tryk i luftsyste­met og luftflowmålinger vil supplere off-gasmålinger i udpegning af behovet for tiltag. Nye turboblæsere har eksempelvis en god beregning af luftflow, som ofte kan aflæses direkte via SRO anlægget.

Iltudnyttelsen falder med øget slamindhold. DHI har i laboratoriet målt et fald til ned til 15% ved $15 \text{ kg SS}/\text{m}^3$ sammenlignet med $3 \text{ kg SS}/\text{m}^3$, hvilket skyldes slammet øger viskositeten ved et højere indhold. Slamkoncentration over $5 \text{ kg SS}/\text{m}^3$ bør undgås, da der er brug for et større luftflow for at levere den samme iltmængde.

I nogle tilfælde kan der muligvis være en positiv effekt af et højt iltforbrug i slammet (ved samme slamkoncentration), da slam omkring boblerne forbruger iltindholdet, og dermed øger koncentrationsforskellen mellem vandfasen og boblen, hvilket øger iltoverførslen.

Teknologi – nyt udstyr

Såfremt ovenstående optimeringsmuligheder ikke er tilstrækkelige til at give et lavt og regulerbart energiforbrug, vil der være behov for teknologiskift i form af nye diffusorer, luftflowmåler, ventiler, rør og effektiv blæsere. Iltudnyttelse målt som SOTE/m skal være høj ved det forventede driftspunkt, og det kræver lavt luftflow per diffusor. Effektforbruget Wh/Nm³ luft/m luft skal være lavt 3,7-4,5 Wh/Nm³/m. Blæsersystemet skal bestå af den rigtige sammensætning af blæsere med forskellig størrelse, således at systemet er specielt effektivt i driftspunktet (50-70% af driftstiden) og ilttilførslen kan reguleres effektivt ved lav og høj belastning.

Optimering og energibesparelser ved brug af off-gas målinger

Generelt er beluftningssystemer ikke drevet, styret eller konstrueret energioptimalt. Det er ikke muligt uden målinger at oplyse tal for effektiviteten.

I det følgende har vi baseret på erfaringer fra projektet opstillet besparelspotentialerne for fysisk rengøring, syretilsætning, udskiftning af udstyr og forbedret styring. Der er kun tale om få anlægsspecifikke eksempler, men DHI har i kampagnemålinger målt på flere anlæg med tilsvarende talstørrelser og effekter. Derfor er der ikke tale om usædvanligt positive eksempler.

Tabel 2 Optimeringer og besparelser som er diagnosticeret og vurderet via off-gasmålinger hos projektpartnerne.

Tiltag	Effekt	Energibesparelse via reduceret luftflow, ca	Bemærkninger
Udskiftning af ikke effektivt beluftningssystem	Øget α SOTE Lavere Wh/Nm ³ /m Øget α SOTR	40%	Anlægsspecifikt
Rengøring	Øget α SOTE Øget α SOTR	10-60%	Anlægsspecifikt og variation med luftflow
Syredosering	Øget α SOTE Øget α SOTR (laver modtryk forventet men ikke registreret)	20%	Anlægsspecifikt OTR øget med op til 90%, da luftflowet øges sammen med OTE
Ændret beluftningsstyring	Øget OTE Øget OTR per døgn	20%	Anlægsspecifikt

5.1 Kriterier for at forbedre beluftningssystem

Diffusorsystemer vil næppe være relevante for dybder under 3 meter. En beluftningstank med en dybde på 3 meter vil skulle bruge dobbelt så mange diffusorer som en tank med 6 meters dybde. Iltudnyttelsen α SOTE/m stighøjde vil variere med fabrikat og type, og den samlede α SOTE stiger naturligvis med dybden, se tabel 3.

Tabel 3 Niveauer af α SOTE/m mod dybde fra 3til 6 meter vanddybde giver stor forskel i den samlede iltudnyttelse α SOTE for boblernes samlede stighøjde. Både dybde og α SOTE/m er afgørende for mængden af luft. Niveau 4 vil være for den maksimalt effektive diffusor med endog meget høj alfa-faktor (tæt på 1) for iltning i spildevand.

	niveau 1		niveau 2		niveau 3		niveau 4	
Dybde	% α SOTE/m	% α SOTE	% α SOTE/m	% α SOTE	% α SOTE/m	% α SOTE	% α SOTE/m	% α SOTE
	2-3		4-5		6-7		8-9	
3		6-9		12-15		18-21		24-27
4		8-12		16-20		24-28		32-36
5		10-15		20-25		30-35		40-45
6		12-18		24-30		36-42		48-54

Som det fremgår af tabel 3 kræver den samme iltoverførsel ved 3 meters stighøjde og 2% α SOTE et 6 gange så stort luftflow som ved 6 meters stighøjde og 6% α SOTE (α SOTR = α SOTE * Luftflow * 300 g ilt/Nm³). Energiforbruget stiger dog kun med en faktor 3 på grund af det mindre vandtryk.

Antallet af diffusorer og deres areal er meget afgørende for iltudnyttelsen, og et stort antal eller areal giver en høj iltudnyttelse. Et iltningssystem med blæsere og diffusorer kan med fordel udlægges for en normal driftssituation, hvor iltudnyttelsen i 50-70% af tiden er høj (niveau 3) og energiforbruget per Nm³ er lavt (4-4,6 Wh/Nm³/m).

I driftspunktet er det realistisk at få nyt udstyr med effektive design α SOTE i niveau 3. Niveau 4 kan i særlige tilfælde opnås, men antallet af diffusorer vil blive meget højt og sandsynligvis økonomisk urealistisk.

Ud over disse parametre er det samtidigt vigtigt, at blæserne kan reguleres i det normale driftsområde. Det er ikke usædvanligt at blæserydelsen er udlagt for højt, og derfor ikke kan regulere tilstrækkeligt langt ned. Dermed bliver luftflowet per diffusor unødigt højt med lavere OTE til følge, og samtidigt bliver iltoverførslen væsentligt højere end der er behov for. Dermed er det nødvendigt at køre med tænd sluk drift af blæserne for at undgå at iltkoncentrationen stiger over et ønsket setpunkt. På langt de fleste anlæg vil det være fordelagtigt eller ligefrem nødvendigt at have mindst to forskellige størrelse blæsere i et beluftningssystem for at kunne regulere luftflowet optimalt i forhold til blæsernes driftspunkt.

I de fleste beluftningssystemer er der en manifold til forsyning af flere tanke eller sektioner. Fordelingen styres via ventiler. Valget af ventiler til systemet er en afgørende for muligheden for at kunne regulere lufttilførslen uden for stort tryktab. Spadeventiler vil umiddelbart være bedre i en regulering af luftflowet.

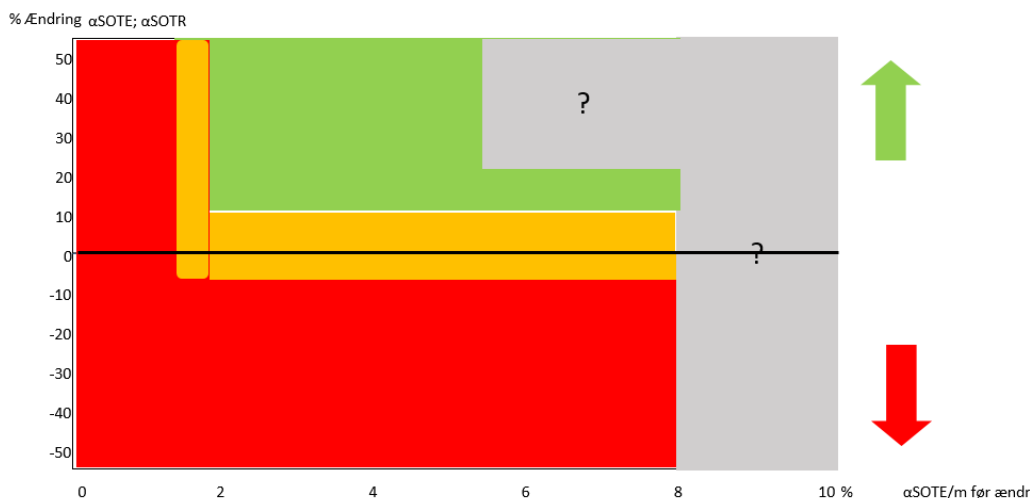
En sammenligning af iltudnyttelser mellem renseanlæg skal enten være for samme dybde, eller man skal sammenligne iltudnyttelsen per meter stighøjde, α SOTE/m. Opnåelse af lave energinøgletal forudsætter at iltudnyttelsen ved design og drift er høj, og man bør ligge omkring niveau 3 (jf. tabel 3) med α SOTE 6-7%. Hvorvidt dette kan opnås kan ikke vurderes ud fra leverandøroplysninger, da det afhænger af α -faktoren for iltningen. Denne bør derfor enten måles ellers må man gå efter den højeste mulige SOTE, og få designet og placeret diffusorarrangementet for mindst mulig turbulens.

5.2 Ændringer af iltningseffektiviteten

I den følgende figur er der et forslag for vurdering af ændringer i iltudnyttelse og iltoverførsel efter enten driftstid, hvor tilstopning og aflejringer nedsætter iltoverførslen eller efter styringsændring. Man starter med at registrere driftsforholdene og måle iltudnyttelsen og iltoverførslen for udgangspunktet, hvorefter man gentager dette efter det udførte tiltag, og beregner de procentvise ændringer. Man skal se på det samlede billede og her bør andre on-line målinger som ammonium- og nitratkoncentrationer indgå.

Et fald i iltudnyttelsen på 20% øger effektforbruget med mindst 20%, da luftmængden skal øges tilsvarende. Effektforbruget vil sandsynligvis stige yderligere, da modtrykket ved det højere luftflow stiger (hvis beluftningskapaciteten er til stede).

Omvendt falder energiforbruget f.eks. 20%, hvis iltningseffektiviteten stiger med 20%.



Figur 22 Figur for % ændring af αSOTE ($100\% \cdot (\alpha\text{SOTE}_{\text{før}} - \alpha\text{SOTE}_{\text{efter}}) / \alpha\text{SOTE}_{\text{før}}$) og αSOTR ($100\% \cdot (\alpha\text{SOTR}_{\text{før}} - \alpha\text{SOTR}_{\text{efter}}) / \alpha\text{SOTR}_{\text{før}}$). X-aksen er start situationen før ændringen, og Y-aksen er den procentvise ændring i iltudnyttelse eller iltoverførsel. Positiv effekt er såfremt forholdet stiger, da funktionen er bedre efter end før. Negativ effekt er, hvis efter målingen er lavere end før.

Figur 22 er et forsøg på at opstille vurderingskriterier for off-gasmålinger. Grønne områder er positivt for effektiviteten, uden det dog her er vurderet, om den kan være endnu bedre. Røde områder er driftssituationer, som næppe skal accepteres; mens gule områder bør vurderes nærmere inden der tages endelig beslutning. Områder markeret med gråt indikerer, at resultatet er usikkert, idet resultatet ligger udenfor det normale område.

I dette projekt har der været tilfælde, hvor ændringerne har resulteret i positive som negative ændringer over 50%, hvormed energiforbruget kan reduceres eller stige med ca. samme procenter!

Eksempelvis bør start iltudnyttelsen før ændringer ikke være for lav, da teknologien som udgangspunkt ikke er tilstrækkelig effektiv. Såfremt udgangspunktet er væsentligt under 2%/m bør man overveje et teknologiskift mod højere iltudnyttelse.

Dernæst kan effekten være så negativ over en driftstid, at diffusorerne ikke længere er tilstrækkeligt effektive, og der er behov for tiltag som rengøring eller udskiftning. Indregulering af et for højt luftflow om natten kan resultere i at det er nødvendigt helt at standse blæserne.

Fysisk eller kemisk rengøring bør foretages, når effektiviteten af iltudnyttelsen eller iltoverførslen over tid falder mere end 10%.

5.3 Energiforbrug til beluftning

Udskiftning af diffusorer kræver en cost-benefit beregning samt en vurdering i forhold til forsyningens målsætning for energiforbrug og CO₂-emission. Hvorvidt teknologien er tilstrækkelig effektiv både i en status situation og efter en driftsperiode afhænger af de mål, som forsyningen opstiller herunder, hvor man ønsker at befinde sig i en benchmarking sammenligning. Stiller man krav til nøgletal for et samlet energiforbrug per PE f.eks. 20 kWh/PE/år, vil den nødvendige teknologi kunne vurderes. Et effektivt beluftningssystem til et aktiv slamanlæg med α SOTE/m på 5%/m kan have et energiforbrug omkring 12 kWh/år til beluftning, mens et mindre effektivt system med lavere α SOTE/m på 2,5% og mindre effektiv blæser kan have et forbrug på omkring 30 kWh/PE/år.

Såfremt α SOTE bliver mindre end 2% bør man overveje at udskifte diffusorerne, Såfremt blæsernes energiforbrug (tilført effekt) er større end 5-5,5 Wh/Nm³/m bør blæserinstallationen genovervejes. Her spiller modtrykket i systemet en rolle, og det er fordelagtigt at kunne følge trykket helt ud til diffusorerne. Med tid bør trykket stige mindre end 0,5 m vandsøjle før der sker en korrektion. Da energiforbruget stiger.

Såfremt vandhastigheden i tankene er meget lav under maksimal beluftning, kan der være behov for at revurdere behovet for omrøring. Der er set tilfælde, hvor vandhastigheden falder, og iltkoncentrationen bliver lav ved sensorernes placering i tankene eller, at ammonium og nitrat ikke er repræsentative for processerne i tanken, hvorfor der bliver skruet fuldt op for luften. Andre steder i tankene er der høj iltkoncentration. Off-gasmålingeren har påvist behov for ændringer af sensor- og iltningssystemet. Vi har kendskab til tilfælde, hvor energiforbruget blev reduceret (op til 50%) ved ændret placering af de sensorer, som indgår i anlæggets processtyring og regulerer luftmængden til diffusorerne.

Et visuelt tegn på overbeluftning er væsentligt løft af vandet i "paddehatte". I stedet for en rolig overflade med en jævn fordeling af mindre bobler, som brydes i overfladen, vil man kunne observere store bobler som løfter overfladen. I disse tilfælde er det vigtigt at undersøge beluftningssystemet nærmere, da der sandsynligvis vil blive brugt for meget energi.



Figur 23. Billede af offgas-måler placeret i en kraftig beluftet tank, hvilket ses af større bobler og urolig overflade med mindre tendens til "paddehatte" og turbulente områder, hvor vandet løftes.

6. Konklusion

Projektet har bidraget med en betydelig udbygning af viden i forhold til de opstillede mål for projektet. Off-gas måling leverer data for iltningssystemets effektivitet og funktion, og det er muligt at diagnosticere, hvorvidt der er behov for optimering af systemet. Andre målinger kan ikke levere denne viden. Det er nu muligt at erhverve en ny off-gassensor, som kan anvendes som on-line måling og anvendes i enten direkte i styringen af anlægget eller bruges til kampagnemålinger.

Der er behov for, at driftspersonalet får mulighed for forstå beluftningssystemer bedre, da det dels er det mest energiforbrugende udstyr på renseanlæg og samtidig helt essentielt i forhold til overholdelse af udlederkrav.

Hvilke forventninger kan man have til energibesparelser ved brug af off-gasmålinger enten i form af kampagne eller on-line målinger? Der vil så godt som altid kunne findes forbedringspotentialer for energiforbruget til beluftning på 10%, og i dette projekt er der målt forbedringer over 50%. Potentialerne er altid anlægsspecifikke.

Et bud på energibesparelspotentialet er derfor mellem 10 og 50%, men uanset vil målingerne give en forståelse for renseanlæggets iltningssystem, som er en forudsætning for, om der fremadrettet skal gøres en indsats og foretages investeringer.

Hvordan skal off-gasmålinger anvendes? Større anlæg (f.eks. +40.000 PE) kan have gavn af at kunne følge iltoverførsel og iltningseffektivitet tæt, og der vil kunne opnås en besparelse, som med rimelig sandsynlighed kan give en fornuftig tilbagebetalingstid.

Investeringen i en on-line sensor vil ikke kunne svare sig for små anlæg, men kampagnemålinger kan da være en god mulighed. Små anlæg har ofte det dårligste beluftningsudstyr, og derfor kan der være store besparelser ved at få målt og effektiviseret selv mindre anlæg med bundbeluftning.

Såfremt man på det enkelte renseanlæg stiller mål og følger op på effektiviteten af iltningssystemet, vil det i de fleste tilfælde resultere i energibesparelser. Kravene kan være: $\alpha_{SOTE} > 4-5 \text{ %/m}$, og energiforbruget til blæseren lavere $4,7 \text{ Wh/Nm}^3/\text{m}$ stighøjde. Parametrene skal efter installation og indkøring måles over tid. Såfremt ændringerne som følge af tilstopning eller ælde af diffusorerne er for store, og effektiviteten bliver for lav bør konsekvensen vurderes og udbedring iværksættes, hvis det kan betale sig.

Behovet for ændringer i styringer af beluftningen vil kunne diagnosticeres, og der kan blive gjort en indsats for at overholde de opstillede måltal for iltningen. Enkelte steder skifter man diffusorerne efter et fast antal år f.eks. 3 eller 4 år, uden at vide om andre tiltag kunne have udsat investeringen i 1 eller flere år. Målingerne fra Sønderborg og Egå renseanlæg indikerer, at der ikke generelt er behov for at udskifte diffusorerne efter få års drift. Omvendt er der også målt på diffusorer, som efter knapt 10 års drift på grund af delvis tilstopning burde have været udskiftet eller på anden vis forbedret langt tidligere. Der er altid tale om anlægsspecifikke driftsbetingelser og optimeringsmuligheder.

7. Litteraturliste

/1/. Udo Wiesmann, In Su Choi and Eva-Maria Dombrowski. (2007). Fundamentals of biological wastewater treatment. Chapter 5. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, Weinheim. ISBN: 978-3-527-31219-1.

/2/. ATV M 209E (1996). Measurement of oxygen transfer in Activated Sludge Aeration Tanks with Clean Water and in Mixed Liquor”.



Naturstyrelsen
Haraldsgade 53
2100 København Ø

www.nst.dk