



Lattergas fra renseanlæg

- Foranalyse vedrørende regulering

Miljøministeriet

Dato: 9. december 2022

Indhold

1.	Indledning.....	5
2.	Resumé.....	5
3.	Interviews.....	6
3.1	Måleteknologier.....	6
3.1.1	Væskefasemålere:	7
3.1.1.1	Unisense	7
3.1.1.2	Variolytic.....	7
3.1.2	Gasfasemålere:	7
3.1.2.1	Flydekamre/hat.....	7
3.1.2.2	Tracer gas dispersion.....	8
3.1.2.3	Drone baserede målinger – herunder DFM.....	8
3.1.2.4	Eddy Covariance	8
3.1.3	Overdækkede anlæg.....	8
3.1.4	Avanceret modellering.....	8
3.1.5	Fremtidsscenarie – Alternative rensemetoder.....	9
3.2	Teknologi på forskellige typer anlæg.....	9
3.2.1	Hvor produceres lattergas og frigives	9
3.2.2	Antal og placering af målepunkter, frekvens af målinger, driftssikkerhed, datavaliditet og usikkerhed.....	10
3.2.3	Barrierer for pålidelig dokumentation.....	10
3.3	Reduktion af udledning	10
3.3.1	Styringssystemer til begrænsning af lattergasemission	10
3.3.2	Andre metoder til begrænsning af lattergasemission.....	11
3.3.2.1	Kulstofdosering.....	11
3.3.2.2	Fangst	11
3.3.2.3	MABR.....	11
3.3.2.4	Belastningsudjævning	11
3.4	Økonomi	12

3.4.1	Erfaringer med økonomi for måling	12
3.5	Internationale erfaringer.....	12
3.6	Deltagernes afsluttende bemærkninger	12
3.7	Vurdering interviews	13
4.	Desk-research / tilgængelig viden.....	14
4.1	Baggrund for lattergas produktion og emission.	14
4.1.1	N ₂ O Produktion under anoxiske forhold	15
4.1.2	Opsummering, lattergasdannelse	16
4.2	Biologisk spildevandsrensning, hovedprincipper	17
4.3	Måleteknologier.....	18
4.3.1	Omtalte kommercielle produkter	18
4.3.1.1	Unisense	18
4.3.1.2	Variolytic.....	18
4.3.1.3	Explicit	18
4.3.2	Generel måleteknologi.....	18
4.3.2.1	Prøvetagningsmetoder	18
4.3.2.2	Analysemetoder.....	19
4.3.2.3	Amperometrisk metode	20
4.3.2.4	Sammenfatning måleteknologi.....	20
4.4	Teknologi på forskellige typer anlæg.....	22
4.4.1	Lattergasproduktion og frigivelse	22
4.4.1.1	Stripning grundet beluftning	22
4.4.1.2	Skift mellem anoxiske og aerobe betingelser	22
4.4.1.3	Tilgængelighed af kulstofkilde	22
4.4.2	Antal og placering af målepunkter, frekvens af målinger, driftssikkerhed, datavaliditet og usikkerhed.....	23
4.4.3	Barrierer for pålidelig dokumentation.	24
4.5	Reduktion af udledning	24
4.5.1	Styring til begrænsning af lattergasemission	24
4.5.1.1	DTU – N ₂ O kontrolstrategi	24
4.5.2	Andre metoder til begrænsning af lattergasemission.....	25
4.5.2.1	Fangst	25
4.5.2.2	MABR.....	25
4.6	Økonomi	25
4.6.1	Erfaringer med økonomi for reduktion og måling	25
4.6.2	Unisense skyggepris.....	26
5.	Anvendelige enheder	26

5.1.1	Kg N ₂ O-N _{udledt} /år	26
5.1.2	Kg N ₂ O _{udledt} /år	26
5.1.3	Ton CO ₂ ækv.udledt/år	26
5.1.4	% N ₂ O-N/T-N _{fjernet}	26
5.1.5	% N ₂ O-N/T-N _{indløb}	27
5.1.6	mg N ₂ O-N/PE/d	27
6.	Vurdering	28
7.	Videre arbejde	29
7.1	Måling/kontrol	29
7.1.1	Barrierer	29
7.2	Alternative modeller	30
7.2.1	Model 1	30
7.2.2	Model 2	30
7.2.3	Model 3	31
7.2.4	Model 4	31
7.3	Opmærksomhedspunkter og anbefalinger, udbuds krav	32
7.3.1	Måleteknologi	32
7.3.2	Antal målepunkter	33
8.	Projekter at holde øje med	35
9.	Bibliografi	37

1. Indledning

NIRAS har til brug for Miljøstyrelsens videre arbejde med regulering af lattergas fra renseanlæg udført nærværende foranalyse. Analysen er udført ved research af åbne kilder og ved interviews af nøglepersoner inden for feltet repræsenteret ved både forsyningsselskaber, rådgivende ingeniører, uddannelsesinstitutioner og kommercielle produktleverandører.

Rapporten forsøger at belyse de i opgaven stillede spørgsmål og gør status over nuværende viden, teknologiske udviklingsstadiet, men belyser også hvilke udfordringer, der er på området.

2. Resumé

Dannelsen af lattergas på renseanlæg er kompleks og man kan ikke i fuld grad forudse eller beregne emissionen. Man kan pege på nøgleparametre for dannelsen og dermed også pege på driftsforbedringer for renseanlæggene. Man kan designe fremtidige renseanlæg, så udledninger begrænses og ændre driftsparametre på nuværende. Det vil variere, hvor meget styringstiltag kan optimere driften i forhold til lattergasemission.

Når man optimerer driften af renseanlæg i forhold til lattergasemission, kan det påvirke renseanlægget i en negativ retning på andre parametre, som energiforbrug, kemikalieforbrug, renseevne og evt. andre. Skal man ved nybyg bygge f.eks. større biologiske procestanke for at modvirke lattergasdannelse, vil dette også påvirke en evt. øget klimabelastning.

Der er flere forskellige måleprincipper for måling af lattergas. Der findes overordnet to metoder: Måling i væskefasen og måling i luftfasen.

Ved måling i væskefasen kræves der, for at kunne sige noget om emissionen, en omregning, som indebærer flere parametre, der har en usikkerhed. Derved kan man selv med meget præcist måleudstyr opleve, at det målte ikke stemmer overens med emissionen.

Gasfaseudstyr kan bestå af forskellige typer af analysatorer og måleenheder. Afhængigt af, hvor prøven udtages, er der forskellige usikkerheder forbundne hermed. Tages prøven fra en drone kan der dannes et øjebliksbillede af renseanlæggets samlede udledning, men der vil være usikkerhed på hvad udledningen er uden for måleperioden. Tages der en prøve fra en "hat" over et bassin er kun en del af renseanlægget repræsenteret, men derimod kan der måles kontinuert.

Der er store udsving i dannelsen af lattergas fra renseanlæg. Derfor er der behov for mere end øjebliksmålinger for at kende renseanlæggets samlede emission over tid.

Der findes ikke en valideret metode eller protokol for måling og kortlægning af renseanlægs lattergasemissioner. Men renseanlæggene kan med den nuværende teknologi og viden installere måleudstyr og uddanne sig til at optimere renseanlæggene mod at begrænse lattergasudledningen.

3. Interviews

Nedenstående er et sammendrag med hovedkonklusioner- og budskaber fra interviews gennemført ved 3 interviewrunder med 4 deltagere i hvert interview. En del af konklusionerne var der bred enighed om, og her angives der ikke personkilde. Hvor der er angivet begyndelsesbogstaver kan udsagnet føres tilbage til en deltager i en af interviewrunderne. Følgende afsnit er udtryk for interviewdeltagernes erfaringer og meninger.

Der er gennemført tre interviewrunder er udført med deltagelse af:

Interview 1: Dines Thornberg (DT), Biofos; Charlotte Scheutz (CS), DTU; Marianne Thomsen (MT), KU; Anna Katrine Vangsgaard (AK), Envidan.

Interview 2: Per Henrik Nilesen (PH), Vandcenter Syd; Mikkel Holmen Andersen (MH), Unisense; Trine Dalkvist (TD), DHI; Morten Rebsdorf (MR), Aarhus Vand.

Interview 3: Ditte Viereck Vestergaard, (DV) Blue Kolding Spildevand; Jonas Lembcke Andersen (JL), Teknologisk Institut; Bettina Knudsen (BK), Explicit; Klaus Bäckström Nielsen (KB), Tårnby Forsyning.

Tak til alle deltagerne for deres medvirken.

Interview er vedlagt som bilag:

- Bilag 1: Referat interview 1
- Bilag 2: Referat interview 2
- Bilag 3: Referat interview 3

3.1 Måleteknologier

Anvendelsesmodenhed, pålidelighed, inkorporering.

Generelt var der enighed blandt deltagerne om, at der findes måleudstyr tilgængeligt på markedet, som kan anvendes til monitorering og dermed danne grundlag for analyse til minimering af lattergas fra renseanlæg. Spørgsmålet ligger i, hvordan forskelligt udstyr skal anvendes, til hvad og validiteten heraf. Der var ligeledes enighed om, at der mangler en protokol for validering af udstyr samt en protokol for måling af lattergasemissioner før man kan regulere området.

Udfordringen ligger i, at variationen i dannelsen af lattergas og dermed også emissionen varierer i meget høj grad over tid. Dermed er målemetoder, som ikke måler kontinuert udfordrede ved, at et øjebliksbillede ikke giver et mål for den samlede

udledning. Ligesom en måling konstant i ét eller flere punkter ikke nødvendigvis giver et korrekt billede af renseanlæggets samlede udledning.

3.1.1 Væskefasemålere:

Når der måles i væskefasen skal der omregnes til en emission til luften. Der er flere usikkerheder forbundet hermed udover måleapparatets unøjagtighed. Der skal i omregningen bl.a. anvendes en flowmængde for beluftningen i procestanken i omregningen. Størrelsen af denne flowmængde er et usikkerhedsparameter, som der ved denne metode skal tages højde for.

Unisense arbejder med forskellige formler for omregning fra måling i væskefasen til emission til atmosfæren. Der anvendes forskellige formler til omregningen afhængigt af, om det er overfladebeluftede anlæg eller bundbeluftede. Omregningen er forbundet med større usikkerhed på overfladebeluftede anlæg.

3.1.1.1 Unisense

Unisense er et dansk udviklet måleinstrument, som firmaet Unisense har udviklet og som er i anvendelse på omkring 400 anlæg rundt om i verden. Den måler produceret og fjernet lattergas i væskefasen

"Unisense har en mindre usikkerhed på koncentrationsmåling i væskefasen, og nulpunktsforskydning kræver at måleren kalibreres. Derudover er der input til omregningen fra væskefase til afgang, som er behæftet med usikkerhed. Usikkerhederne skal lægges sammen. Alene på luftflowmålingen er der ca. 20% usikkerhed." (AK)

"Uden præcis luftflowmåling kan man ikke lave emissionsberegningen præcist, fordi man har to usikkerheder. Luftflowmålingen har måske en usikkerhed på +/- 10 og Unisense +/- 5 % på en kalibreret sensor. Dermed er summen af usikkerheder ikke højere end 20 % på bundbeluftede anlæg." (MH)

En anden "mener derimod, at der ikke er set ordentligt valideringsarbejde for Unisense måleren. Der foreligger internationale guidelines for validering, som der ikke er erfaret, at Unisense måleren har gennemgået." (CS)

3.1.1.2 Variolytic

Her skal der ligeledes via en lattergasmåling i væskefasen omregnes til lattergas-emission til atmosfæren. Deltagerne havde ikke stort kendskab til denne måler, men ville nævne den som et alternativ til Unisense måleren.

3.1.2 Gasfasemålere:

Gasfasemålere anvender kendt teknologi til gasanalyse, men det varierer hvordan gassen opsamles og hvilken analysemetode, der anvendes.

3.1.2.1 Flydekammer/hat

Et flydekammer, som dækker ca. 1 m², der udtages gasprøve til analyse. Usikkerheden er stor, men ikke nærmere specificeret af interviewdeltagerne.

I samarbejde med Duotec udfører Teknologisk Institut og Blue Kolding Spildevand forsøg med en hat over bassiner hvorfra man kan måle luftflow og lattergas i gasfasen. Metoden kan give præcise resultater og kontinuerte målinger, men svagheden er det begrænsede areal, der måles fra.

3.1.2.2 *Tracer gas dispersion*

Der udledes en sporingsgas, en kendt koncentration, ved kilden. Der måles derefter nedvinds renseanlægget og ud fra fortyndingen af sporingsgassen, kan man omregne fortyndingen af den målte lattergaskoncentration. "DTU har haft projekt med sporgasmetode. Her er udfordringen, at deres Picarro-instrument ikke kan måle ned i de lave niveauer." (BK)

3.1.2.3 *Drone baserede målinger – herunder DFM*

Drone Flux Measurement, udføres af firmaet Explicit. Målingen kan give en øjebliksmåling fra hele anlægget. En interviewdeltager siger, at "validering er på vej og er fortrøstningsfuld omkring processen". (CS) Metoden er en "fuld måling med mange datapunkter nedvinds anlægget, der måles på én gang gaskoncentration (Luftprøver), vind og arealudbredelse, og det er unikt, at alt dette samles i en måling." (BK)

3.1.2.4 *Eddy Covariance*

"På en mast installeres en højfrekvent gassensor, målingen skal omsættes til udledning ved beregning. Der omsættes med input fra målt vertikal vindhastighed. Metoden giver en kontinuert måling fra hele anlægget. Usikkerheden ikke valideret og metoden er muligvis omkostningstung. Bortset fra dette er, det en meget velkendt metode fra andre formål. DTU arbejder med test af metoden." (CS)

3.1.3 **Overdækkede anlæg**

"Der findes kun to overdækkede anlæg i Danmark. På rejektivandsbehandling ses overdækning oftere. Ved overdækkede anlæg kan man analysere direkte på afkastluften, hvilket man allerede gør på Tårnby Renseanlæg." (AK) "Overdækkede anlæg med måling på afkastluft vil give en meget sikker målemetode." (MR)

3.1.4 **Avanceret modellering**

Modellering af lattergasdannelse kan ske ved hjælp af dynamiske modeller, hvor en model fødes med forskellige input-parametre:

"Avancerede modelleringer kan påvise, at man har opnået mindre emission. En kompliceret metode, som kræver avanceret modellering og validering heraf." (PH)

"DHI arbejder i et MUDP-projekt, hvor man skal inkorporere en lattergas-model. Modellen er et understøttende værktøj til arbejdet med reduktion af lattergas." (TD)

"Modeller i SUMO og BioWin kan simulere lattergasdannelse, men der er diskussioner om præcisionen heraf." (PH)

3.1.5 Fremtidsscenarie – Alternative rensemetoder

"Ved byggeri af nye renselanlæg kan man rense vandet uden brug af den biologiske proces." (MR) Hermed menes, at teknologi til separering af vand og slam med andre metoder end biologisk kvælstoffjernelse begynder at blive udviklet. Her kan være tale om f.eks. mekaniske processer.

3.2 Teknologi på forskellige typer anlæg

3.2.1 Hvor produceres lattergas og frigives

"Produktionen af lattergas varierer med stor forskel i tid og sted, hvilket man skal tage højde for, når man måler. Man kan dog begrænse sig til steder hvor ammonium reduceres ved biologiske processer. Når ammonium omdannes ved AOB'er til nitrit, kan der dannes lattergas." (AK)

Variationen over tid er eksemplificeret ved, at man "på samme anlæg har målt ned til 200 gram N_2O /h. og har målt helt op til 100 kg N_2O /h." (BK) Dette viser også, at spændet for udledning kan være meget stort og særligt under specielle driftsforhold.

En anden beskriver, hvordan man tidligt i en forsøgsopstilling "kan se, at når man tænder beluftningen "vælter det vitterligt ud" med lattergas." (JL)

Et andet sted er det set, at man "I forbindelse med et projekt og arbejde på indløbspumper så drastiske ændringer i emissionerne fra proceskankene, som efter en uge faldt til ro. Når der kom pludselige ændringer, eller eksternt slam så man høje koncentrationer af lattergas." (TD)

I modsætning til driftsforstyrrelser og stødbelastninger "Har man set, at stabilitet er nøglen." (MR) Yderligere "viser det også, at man skal tænke over de højintensive anlæg. En stor slamproces med overskuds kræfter har stort set ingen emission. Hvis man vil have mindre renselanlæg, i hensyn til scope 3¹, så vil man risikere større udledninger af lattergas." (PH)

Videre siges det, at: "På større renselanlæg, er der generelt større emissioner af lattergas, hvilket hænger sammen med, at de største anlæg også er de mest effektive i udnyttelsen af ressourcer." (MH)

Også i sidestrømsprocesser dannes der lattergas, en siger at: "Hvis man på deres renselanlæg på forhånd havde kendt lattergasaftrykket fra ANNAMOX-procesen, som er betydeligt, er det et spørgsmål, om teknologien var blevet valgt." (PH)

"Desuden er der set lattergas fra skævefilteret på et anlæg. Her kan man i sagens natur ikke måle med væskefasesensorer." (PH)

¹ I dette tilfælde: Udledninger ved produktion af byggematerialer.

3.2.2 **Antal og placering af målepunkter, frekvens af målinger, driftssikkerhed, datavaliditet og usikkerhed.**

Overordnet set er måling så komplekst, at man: "Ikke tror på helt nøjagtige målinger. Man har målt på samme anlæg, på 4 forskellige måder, og der er ikke enighed om, hvad der er den "rigtige" måling." (DT) "Forskellene i målingerne har været mere end 20 – 30 – 40 %." (CS) En praktisk mulig fremgangsmåde er at anvende: "Unisense, som giver kontinuerte målinger, og derefter verificeres imod andre målinger." (DT)

Angående antal af målepunkter siger en: "Desto flere installerede sensorer i vandfasen desto bedre er det, men hvor mange der er nok, er spørgsmålet." (PH) "Et nytligt paper fra Schweitz svarer på dette med en template, som kan benyttes til valg af antal sensorer. Templaten foreskriver, at der ofte kun vil være behov for én sensor." (MH)

"Derfor skal man ved måling tage højde for indretningen af anlægget. Et plug-flow anlæg kræver f.eks. flere målere, da koncentrationen af lattergas varierer i løbet af anlægget, hvorimod man ved en stor opblandet tank kan have nok i én vandfase-måler." (AK)

Ligeledes skal man tage højde for: "At der ved fæststyring af tanke, kan være forskel i lattergaskoncentrationer i tankene alt efter belastning" (TD).

"Et renseanlæg kan have flere proceslinjer. Her ved man ikke, om belastningen er ligeligt fordelt, her vil der ved ulige belastning være behov for flere målepunkter." (AK)

3.2.3 **Barrierer for pålidelig dokumentation.**

Det kan være en barriere for pålidelig dokumentation, at der i dag ikke er en protokol for måling. "Der burde være et projekt, hvor man målte samme tid og sted med de forskellige kendte metoder, det er en barriere, at der er usikkerhed forbundet med, at man ikke kender forskellene mellem de forskellige målemetoder." (MT) "Grunden til, at dette ikke er gjort er, at: "Der er ikke sat penge af til forsøgene, som er dyre og der mangler i dag incitamentet til at gennemføre dem." (CS)

Videre siges det: "Hvis det skal gøres ordentligt (måling af emission), vil der være betydelige omkostninger, en omkostning som i dag ikke er dækket. Forsyningerne vil "hyle" hvis de ikke bliver dækket." (PH)

3.3 **Reduktion af udledning**

3.3.1 **Styringssystemer til begrænsning af lattergasemission**

"Ved optimeret styring kan man begrænse latteremission, selv uden on-line målinger. Ved erfaringer gjort på forsøgsbasis kan man på det enkelte anlæg f.eks. ved at se på ammonium/nitrat i forhold til lattergasemission reducere lattergasemission." (AK) En anden: "Har på eget anlæg set reduktion ved hjælp af Unisense sensorer, hvor man styringsmæssigt har ændret på slammængden i procestankene, ændret på iltsetpunkt og arbejdet med kulstofdosering. På den måde har man vist et

tydeligt fald i emission over tre år. Væskemålerne er benyttet til at kvantificere effekten af tiltagene." (DT)

Arbejdet med styring og lattergasreduktion er af en anden "udført på godt 20 anlæg, hvor kunder er hjulpet og der er generelt fjernet 30-80 procent af lattergassen." Yderligere beskrives det, "at den biologiske proces er det bedste filter at fjerne lattergas med. Men at der er en balance mellem energiforbrug og lattergasproduktion." MH

For at tage højde for denne problemstilling er der udviklet "styresystemer, som kan tage hensyn til god rensning af spildevandet, minimerer energiforbrug og lattergasdannelse. De væsentligste parametre styringssystemerne skal indrettes efter er den specifikke ammonium-belastning, altså hvor meget ammonium "ser" bakterierne, beluftningsstrategi, COD/N-forholdet og PH." (AK)

I den anden ende af skalaen har en interviewdeltager "arbejdet på et anlæg, hvor reduktion ikke er lykkedes endnu, det koster tid og hårdt arbejde, andre steder er det lettere." Hvilket viser, at der er forskel på renseanlæggene, og fysiske forhold, ligesom ikke alle har samme videnskæssige ressourcer til rådighed." (MR)

3.3.2 Andre metoder til begrænsning af lattergasemission

3.3.2.1 Kulstofdosering

"Kulstofdosering kan anvendes ved akutte spidser af lattergas. Man har lavet uvidenskabelige forsøg, hvor man med begrænsede kulstofmængder med Unisense har kunnet se, at doseringen virker." (DT)

3.3.2.2 Fangst

"I stedet for at måle og måle, kunne man strippe gassen og recirkulere ressourcen. Ved at recirkulere lattergassen vil man kunne erstatte et høj-emissions intensivt fossilbaseret produkt – kunstgødning." (MT)

Ulempen ved fangst af lattergas er at: "Der er store omkostninger ved fangst af lattergas, overdækning og stripping af store luftmængder, som skal varmes op." (AK)

En anden er enig: "Med katalytiske processer kan man fjerne lattergas fra ventilationsluft. Nacat-projektet undersøger dette. Dette er måske ikke bæredygtigt grundet energiforbruget. Luften skal varmes op til 400 grader, og det er voldsomt for hele luftmængden fra et Renseanlæg. Det er måske overkommeligt ved mere koncentreret luftstrømme, så kan det måske give mening." (PH)

3.3.2.3 MABR

Membrane Aerated Biofilm Reactor – En deltager "Har selv eftervist MABR, og det ser lovende ud." (PH) hermed menes, at teknologien er velegnet til den biologiske spildevandsrensning med samtidigt lav emission af lattergas.

3.3.2.4 Belastningsudjævning

Ved belastningsudjævning kan man modvirke spidsbelastninger på renseanlægget: "Det er set, at selvom der er kulstof nok til stede, så sker der lattergasemission ved

peak-belastninger, så belastningsudjævning er dermed også en metode for reduktion." (MR)

3.4 Økonomi

Overordnet set, er vandfasemålere det billigste alternativ med engangsomkostninger under 100.000 kr., dertil kommer drift og her hænger kvaliteten sammen med viden og ressourcer til drift.

Gasanalysatorer er i en anden størrelsesorden og koster nærmere 300.000 – 400.000 kr. i indkøb. Hertil kommer, at driften er mere kompliceret og ikke nødvendigvis kan klares af driftspersonalet på renseanlægget.

Dronemåling koster pr. dag 40.000 – 45.000 kr.

Måling af afkastluft på Tårnby Renseanlæg har kostet ca. 500.000 kr.

3.4.1 Erfaringer med økonomi for måling

"Drift af Unisense måleren indebærer service, der svarer til en formiddags arbejde en gang om måneden. Der til kommer skift af målerhoved på sensorerne." (DT)

3.5 Internationale erfaringer

"I Schweiz arbejder man med individuelle emissionsfaktorer pr. anlæg. Dette kræver større bredde-studier på højde med hvad man gjorde for biogassektoren. Der mangler viden om dette på baggrund af luftmålinger. Teknologien er der til det nu." (BK)

"Jose Porro arbejder med simulering, AI og generelt procesoptimering". PH

3.6 Deltagernes afsluttende bemærkninger

Afslutningsvis var der følgende kommentarer til vurderingen af regulering af lattergas fra renseanlæg:

"Det ville være optimalt med en målemetode, som kan danne baseline for nye teknologier, så der fremadrettet er noget at støtte sig til, når der skal udvikles teknologier. Der må gerne være metodefrihed, men det kræver at metoderne er validerede. Efter et års målinger på et renseanlæg, vil målingerne kunne danne baseline for den fremtidige regulering." (MT)

To andre mener: "Sats på styring til reduktion, udfør en årlig kontrolmåling som sammenholdes med onlinemålere." (DT, AK)

"Det er nødvendigt at finde et optimum mellem forskellige hensyn på renseanlægget, når styringen skal tilpasses." (AK). Dette bakkes op med følgende udsagn: "Der er den ulempe at biologisk proces med energieffektivitet, ressource-genanvendelse og centralisering af renseanlæg gør lattergasudledning større. Om 10 år kan man lave tiltag om, som bliver gjort i dag. Der er nogle, der vender det blinde øje til. Der bliver implementeret teknologi, hvor man ikke kigger på klimaaftryk i dag." (MH)

"CO₂-afgift og en guideline på opgørelse vil være optimal. Dem der virkelig kan flytte noget vil dermed gøre det. Det giver bedste balance mellem energiforbrug og emission." (MH)

3.7 Vurdering interviews

Fra arbejdet med interview med de 12 fag-eksperter kan der gøres følgende konklusioner:

- Måleudstyr kan anvendes til monitorering og danne grundlag for analyse til tiltag for reduktion af lattergas.
- Der mangler en protokol for validering af måleudstyr, samt en protokol for måling af lattergasemissioner før man kan regulere området.
- Der er så stor variation i dannelsen af lattergas, at der skal anvendes kontinuerte målinger for kontrol.
- Måling i væskefasen kræver en korrekt luftflowmåling, som sjældent er tilgængelig.
- Der er ikke gode muligheder for at måle på overfladebeluftede anlæg og skærfefiltre (Sjældent anvendt).
- Der er uenighed om måleusikkerheden på Unisense-måleren.
- Flydekammermetoden med en gasmåling er et alternativ til væskefasemåleren, men denne er også begrænset af at dække et mindre areal på renseanlægget, som igen kræver omregning til en samlet emission.
- Man har en drone som anvender valideret måleteknologi, men der er ikke en valideret protokol for hvordan der skal måles.
- Ved avanceret modellering kan man med rette input lave en digital tvilling og simulere lattergasdannelse. Dette er omkostningstungt og kan ikke bruges til direkte styring. Værktøjet skal ses som et understøttende værktøj til arbejdet med reduktion af lattergas.
- Lattergasmåling kan begrænse sig til de ammoniumreducerende processer.
- Måling af lattergas er så komplekst, at man aldrig vil opnå helt præcise målinger.
- Antal målepunkter skal bestemmes ud fra et anlægs specifikke indretning.

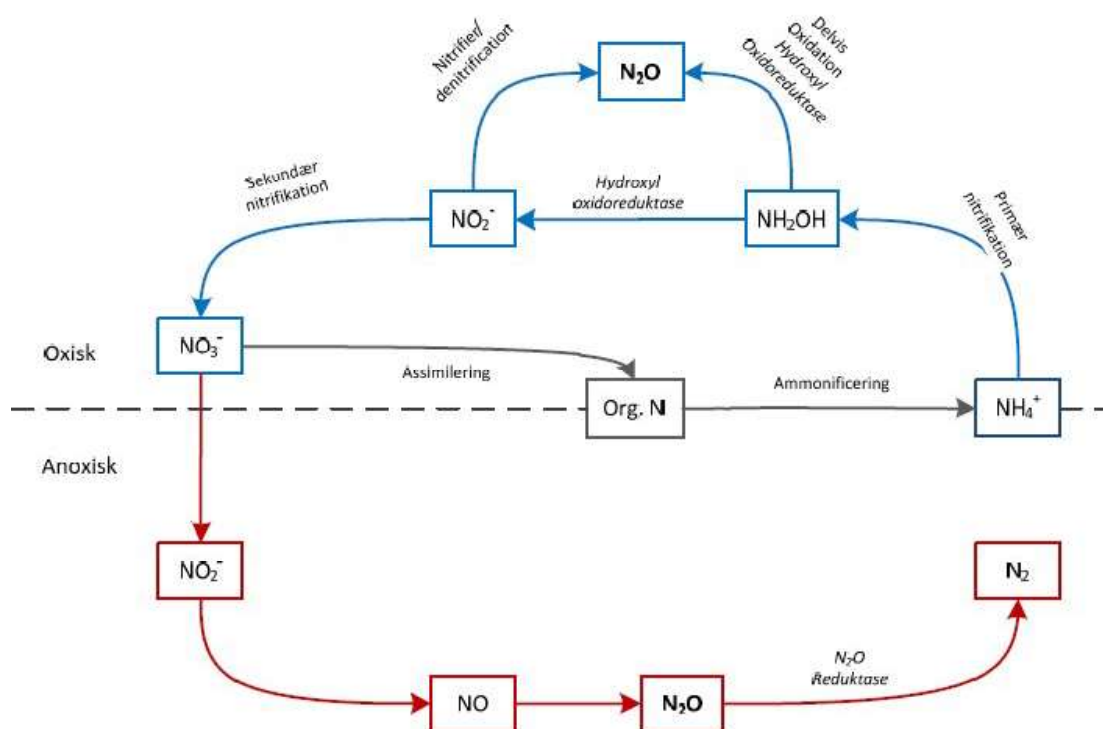
- Der er i dag ikke økonomi i lattergasmåling, hvorfor der ikke har været incitamenter til at holde målemetoder op i mod hinanden og udarbejde standarder for måling og validering af udstyr.
- Det er generelt set muligt at nedbringe lattergasemissioner op mod 80 % med styringstiltag, på nogle anlæg er det dog oplevet svært at nedbringe lattergasproduktionen.

4. Desk-research / tilgængelig viden

4.1 Baggrund for lattergas produktion og emission.

Nitrifikation og denitrifikation

Lattergasproduktionen i rensningsanlæg er et biprodukt af den mikrobielle kvælstofmetabolisme. De to primære metabolismer, der varetager kvælstofomdannelsen er nitrifikation og denitrifikation. På 4.1 ses en principskitse for kvælstofomsætningen under denitrifikation og nitrifikation samt assimilering og ammonificering. Desuden er der også Anammox (*anaerob ammonium oxidation*) organismer, der oxiderer ammonium med nitrit til frit kvælstof under iltfrie forhold. Denne proces varetages af *Planctomycetes*



Figur 4.1 principskitse for kvælstofomsætningen under denitrifikation og nitrifikation samt assimilering og ammonificering.

For at nitrifikationen kan forløbe, kræves der ammonium. Ammonificeringen foregår både aerobt og anaerobt, men oftest findes størstedelen af kvælstofindholdet allerede på ammoniumform uden nedbrydelse af organisk materiale. Under katabolismen ekskretes ammonium, der ses på figur 4.1 som ammonificering.

Det frigivne ammonium anvendes af de primære nitrifikanter, som *nitrosomonas*, der oxiderer ammonium til nitrit. De sekundære nitrifikanter som *nitrobacter*, oxiderer nitrit til nitrat, jf. figur 4.1 (blå pile). Den producerede nitrat fra nitrifikationen anvendes som elektronaccepter af denitrifikanter, der omsætter organisk materiale via nitrat.

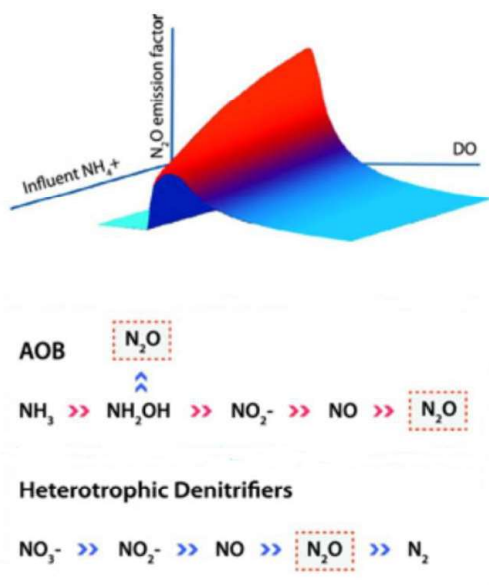
Reduktionen af nitrat er den proces, hvormed kvælstof forsvinder fra anlægget i form af frit kvælstof (Shaw L, 2006;8) (Wrage N, 2001;33). I litteraturen findes der primært to "pathways", eller stier; nitrifier denitrifikation og koblet nitrifikation denitrifikation, der er signifikant for lattergasproduktionen under oxiske forhold. Nitrifier denitrifikation, en pathway der foregår indeni cellerne hos ammonium oxiderende organismer ved reduktion af nitrit til lattergas, jf. figur 4.1. Denne pathway er ikke klart beskrevet i litteraturen og er kun entydigt blevet bevist i *Nitrosomonas* af (Colliver B, 2000;18). Processen tildeles af Shaw *et al.* 2006 op mod 80 % af den lattergas, der frigives fra jorden under nitrifikation og under dette arbejde blev det konkluderet, at *Nitrosomonas europae* havde den største lattergasemission. *Nitrosomonas europae* er en nitrifikant, der typisk findes i store koncentrationer i renseanlæg, og kan derfor være en væsentlig kilde til lattergasemissionen. Koblet nitrifikation denitrifikation er en kobling, der opstår mellem nitrifikanter og denitrifikanter i grænselaget mellem oxiske og anoxiske mikrohabitater. Under spildevandsrensning vil disse mikrohabitater kunne opstå på yder-og inderside i flokkene af organisk materiale. Det er på den måde muligt for denitrifikanter direkte at anvende den nitrat, der er blevet dannet af nitrifikanterne. Den oxygengradient, der skabes i disse flokke, gør det derfor muligt, at der lokalt kan foregå nitrifikation og denitrifikation simultant. Hooper og Terry 1979 beskriver en tredje mulighed, hvor hydroxylamin oxidoreduktase kan oxidere hydroxylamin (NH_2OH) til lattergas grundet ustabile mellemprodukter. Enzymet katalyserer trinnet fra hydroxylamin til nitrit, jf. figur 4.1.

4.1.1 **N₂O Produktion under anoxiske forhold**

Under denitrifikation finder lattergasproduktionen sted ved en reduktion af nitrogen monooxid (NO). Dermed er dette en primær stofskifteproces modsat lattergasproduktionen under nitrifikation, jf. figur 4.1. Ved lav pH kan der frigives mere lattergas end ved høje pH, hvilket er forbundet med at N₂O-reduktase inhiberes ved lave pH. N₂O-reduktasen favoriserer desuden nitrat fremfor lattergas som substrat og en lav N₂O/NO₃ - ratio vil derfor betyde, at en større mængde lattergas frigives til miljøet (Wrage N, 2001;33). Ligeledes øges lattergasudslippet også, hvis der er ilt tilstede, idet at N₂O-reduktase i højere grad inhiberes af ilt end de resterende enzymer i denitrifikationen. Derved opstår der en flaskehals, idet lattergasen ikke kan blive reduceret med samme hastighed som den dannes. Dette betyder altså, at denitrifikation kan være skyld i store N₂O-emissioner under omstændigheder med højt kulstof niveau, lav pH og tilstedeværelsen af ilt (Wrage N, 2001;33)

4.1.2 Opsummering, lattergasdannelse

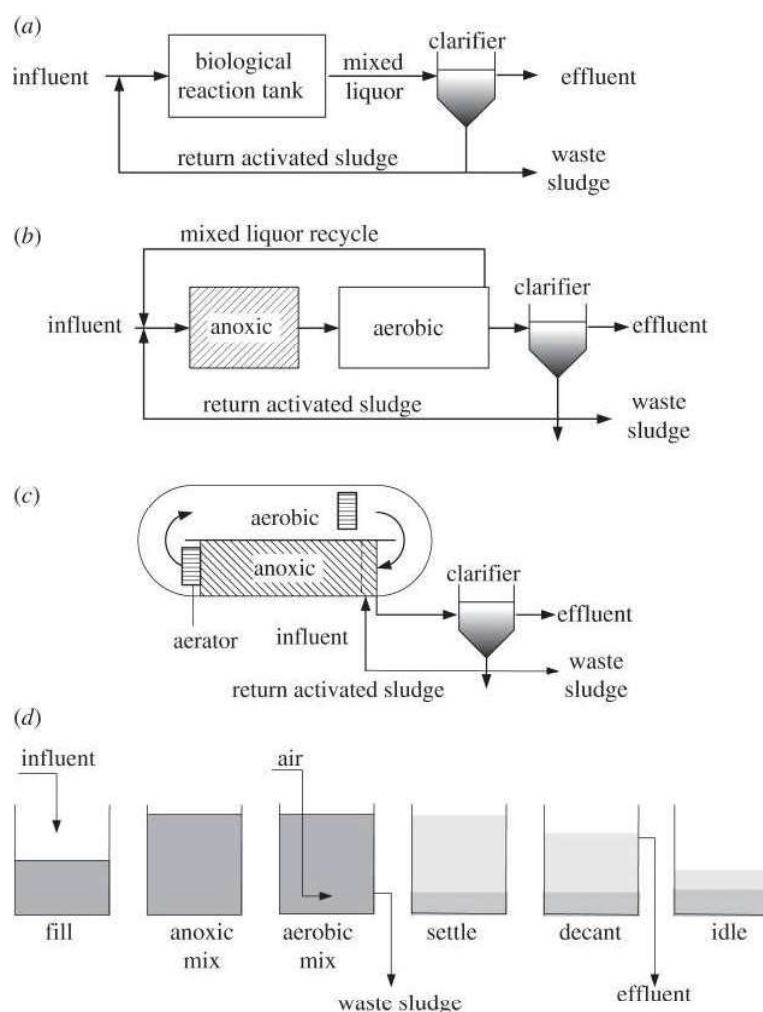
Som det ofte er slået fast er N_2O , herefter lattergas, en potent drivhusgas. Biologisk kvælstoffjernelse (N) sker konventionelt ved nitrifikation/denitrifikation på renseanlæg som forklaret ovenfor, men også ved avancerede processer som som nitrifikation/denitrifikation og fuldstændig autotrofisk N-fjernelse. Der er tre mikrobiologiske stier til lattergasemission: Hydroxylamin-oxidation og nitrificerende denitrifikation, begge dele aktiveret af ammonium-oxiderende bakterier og til sidst er der heterotrofisk denitrifikation. Forskellige faktorer øger lattergasemissionen, enten hver for sig eller kombineret: Lavt opløst ilt (DO), høj nitrit akkumulering, lavt C/N forhold, langsom vækst af denitrificerende bakterier, ukontrolleret pH og temperatur. (Massara, et al., 2017)



Figur 4.2 (Massara, et al., 2017) Ammonium og opløst ilt i relation til lattergas, samt stier til lattergasdannelse i den biologiske kvælstoffjernelse

4.2 Biologisk spildevandsrensning, hovedprincipper

På renseanlæg foregår den biologiske kvælstoffjernelse efter forskellige indretninger og principper med samme formål illustreret på figur 4.3. Ved de 4 forskellige principper varierer det, hvordan returslam føres tilbage til den biologiske proces. Returslam er nødvendigt for at holde slamniveauet i den biologiske proces på et niveau, hvor mikrobiologien fortsat kan omsætte det indkommende spildevand. Det er vigtigt at forstå, at en høj returslamføring kræver øget beluftning og at dette derfor medfører et øget energiforbrug.



Figur 4.3 (a) Konventionelt aktivt slam anlæg, (b) Modificeret Ludzack-Ettinger proces, (c) Ringkanal, (d) SBR - Sequencing Batch Reactor (Law, Ye, Pan, & Yuan, 2012)

4.3 Måleteknologier

Det følgende afsnit behandler kendte kommercielle produkter og gennemgår mere generelle prøvetagnings- og analysemetoder.

4.3.1 Omtalte kommercielle produkter

4.3.1.1 *Unisense*

Under interviewdelen er fordele og ulemper ved Unisense måleren debatteret. Som sammenfatning kan man sige, at der er uenighed om validering af det dansk udviklede instrument, men der er ikke tvivl om, at instrumentet med den rigtige viden kan anvendes til styring og minimering af lattergasemission. Også beskrevet under *amperometrisk metode*.

4.3.1.2 *Variolytic*

Er et tysk udviklet analyseapparat, som er nævnt under interviews. Det har ikke været muligt at skaffe artikler eller andet, som omtaler denne metode til brug for lattergasmåling fra renseanlæg. Analyseapparatet kan måle fra gasfasen og væskefasen. Apparatet kan måle ned til 100 ppb og kan operer automatisk ifølge producentens hjemmeside.

4.3.1.3 *Explicit*

Explicit benytter droner monteret med mikrosensorer til måling af lattergas fra renseanlæg. Ifølge interview her målemetoden gennemgået ISO-certificering, men man arbejder på, at opstille et måleprogram, som kan akkrediteres til officielt brug.

4.3.2 Generel måleteknologi

Målemetoder kan deles op i to overordnede kategorier – prøvetagningsmetode og analysemetode. Disse kan kombineres på kryds og tværs. Udvalgte metoder beskrives i det nedenstående af (Rapson & Dacres, 2014).

4.3.2.1 *Prøvetagningsmetoder*

4.3.2.1.1 Kammermetoder

Kammermetoder bruges også til at måle gasflux fra jordoverflader. Med kammermetoden kan gasser af interesse akkumulere i et kendt volumen. Kammeret lukkes i en periode, hvor prøver tages og analyseres til at bestemme ændringen i koncentration af lattergas. Fordelen ved kammermetoden er, at den forholdsvis let kan opstilles og ikke kræver ekstremt præcist eller hurtigt analyseudstyr.

4.3.2.1.2 Mikrometeorologisk metode

Mikrometeorologiske metoder er blevet brugt til at måle gasflux over store arealer (1-10 km²). Med disse teknikker placeres sensorer på tårne, der måler vind, temperatur og gaskoncentrationer på et eller flere punkter.

4.3.2.1.3 Eddy covariance

Eddy covariance er den mest direkte metode til at måle flux over en overflade. Ved Eddy covariance er målet at lave direkte målinger af den vertikale transport af den målte gas. Den øjeblikkelige vertikale fluxdensitet på et punkt i atmosfæren er

produktet af vindhastigheden og gaskoncentrationen på det samme punkt. Punkt-målingerne danner et gennemsnit over måleperioden.

Eddy covariance er den foretrukne mikrometeorologiske metode, da den giver en direkte måling af vertikal flux, der er baseret på atmosfærisk stabilitet og ikke kræver forsimplende antagelser gjort ved andre mikrometeorologiske metoder.

Eddy covariance kræver hurtigsvarende udstyr, der opererer med en frekvens på 10 Hz eller højere. Behovet for hurtige sensitive gasanalytatorer er en begrænsende faktor for brugen af eddy covariance målinger.

4.3.2.1.4 Eddy accumulation

En betinget målemetode, hvor luft forbundet med opadgående vind og nedadgående vind indsamles i to forskellige beholdere i et forhold relateret til den vertikale vindhastighed. Teknikken benytter en hurtigreagerende magnetventil til at indsamle luft. Med denne teknik elimineres behovet for en hurtigsvarende gasanalysemetode.

4.3.2.1.5 Integrated horizontal flux (IHF)

Denne teknik er brugbar for brug på arealer under 1 ha. Profiler af den horisontale vindhastighed og gaskoncentrationer bliver dannet ved måling i centeret af prøvestedet. Denne metode tillader horisontale gasfluxer at blive målt til toppen af den udsendte fane. IHF teknikker fylder hullet mellem kammermetoder og klassisk mikrometeorologisk metode og kræver ikke gasanalytatorer som er hurtigsvarende.

4.3.2.2 *Analysemetoder*

4.3.2.2.1 Gaskromatograf

Den bredest anvendte analysemetode for måling af lattergas er en gaskromatograf (GC) med en electron-capture detector (ECD). Det lave omkostningsniveau ved GC metoder sammenlignet med andre analysemetoder er en af metodens største fordele. Yderligere data indsamlet med GC kan let sammenlignes med størstedelen af data, som er opsamlet tidligere med denne teknik. Generelt tages gasprøver fra lukkede kamre. Den simpleste metode er manuel indsamling af prøver, som derefter analyseres i laboratoriet. I de senere år er GC-instrumenter blevet mere mobile og automatiserede, så de kan operere ubemandet i længere perioder. GC er også blevet brugt til atmosfæriske målinger fra højre tårne.

Ulempen med GC teknikker er tiden det tager for hver prøve, 4-6 minutter. Dette begrænser prøveantallet og kan være en stor ulempe når man bruger akkumulationsmetoder, som f.eks kammermetode.

4.3.2.2.2 Fourier-transform infrared spectroscopy

FTIR anvender bredspektret infrarød (IR) stråling fra en strålingsabsorberende lyskilde, der dækker hele IR spektret. Mens lav-opløsnings spektrometre (1 cm^{-1}) kan anvendes til at bestemme totale lattergaskoncentrationer præcist, kan højopløsnings FTIR-målinger ($<0,005 \text{ cm}^{-1}$) give mulighed for simultan kvantificering af alle isotopomerer af lattergas.

FTIR instrumenter til analyse er kommercielt tilgængelige og er blevet stadig mere mobile og robuste, og dermed anvendelige. Instrumentet kræver strøm, vejrbeskyttelse og temperaturkontrol.

4.3.2.3 *Amperometrisk metode*

Elektrokemisk amperometriske sensorer bestemmer kvantitativt lattergaskoncentrationer ved at måle strømmen produceret fra reduktionen af lattergas ved en elektrode. Den største fordel ved gasdetektion ved elektrokemisk metode er følsomhed, simplicitet, let anvendelse og en økonomisk enhedspris. Den lave omkostning ved instrumenter, der benytter dette princip er ekstremt attraktiv. Den mest succesfulde elektrokemiske sensor, som er kommercielt tilgængelig (Unisense), er en oxygen-ufølsom mikrosensor. Elektroden er gjort oxygen-ufølsom ved at placere en basisk ascorbat løsning uden for den lattergasmålende transducer for at fjerne oxygen. Elektroden har en nedre detektionsgrænse på 22 ppb og et antal forskellige målehoveder. Sensorerne er blevet brugt til at måle lattergas i jordsedimenter, på renseanlæg og i tøndende permafrost, hvor man traditionelt har brugt GC.

4.3.2.4 *Sammenfatning måleteknologi*

Et antal forskellige metoder kan måle lattergas. Hver metode og teknik har sine egne fordele og ulemper. I sidste ende skal man vælge analysemetode ud fra behov. I de senere år, er det blevet muligt at måle lave koncentrationer af lattergas meget hurtigt, hvilket er en stor fordel i studierne af at forstå lattergas transformation og emission. Hvad der mangler er lattergasmåling som er billig, let at bruge og som kan samle data over hele områder og med høj tidsopløsning. At udvikle sådan en sensor er udfordrende og måske skal en del af præcisionen ofres for at imødekomme de andre krav.

I det nedenstående ses en sammenfatning af kommercielt tilgængelige målemetoder til måling af lattergas.

Sensitivity		Advantages of technique	Disadvantages of technique
Chromatography	Electron Capture Detector	Lower cost Widely used, allowing easy data comparisons If linked to IRMS, isotope analysis can be carried out	Non-continuous Frequent calibration required Drift means reference needs to be run every 3 samples Long run time (~5 min)
	Optical methods		
FTIR	Precision: 0.1 ppb (1 min) 0.03 ppb (10 min)	Continuous measurements Lower calibration requirements	High cost of instruments Low brightness of light source
		Broadband spectrum allowing the measurement of multiple components and spectra can be reanalyzed Direct detection of isotopomers with the same molecular mass Mid IR used at atmospheric pressure Portable	Slower measurements compared to lasers Analysis of data can be more complicated
Laser absorption spectroscopy	Lead Salt Lasers	Allows rapid and highly sensitive measurements Lower interference from other trace gases	Cryogenic cooling required Narrowband, can only measure a single species or pair per laser Low pressure required Expensive
	Quantum Cascade Lasers	No cryogenic cooling required making lasers more portable Higher power than lead salt lasers giving a higher signal to noise ratio and faster measurements Can be linked with high finesse optical cavities such as CRDS and ICOS Carry out isotopic analysis without pre-concentration	Spectral quality not as high as Lead Salt Lasers Narrowband, can only measure a single species or pair per laser Low pressure required Expensive
Amperometric Microsensor	22 ppb LOD	Low cost	Sensor drift, therefore not suitable for long term monitoring Only dissolved N ₂ O can be measured
		Extremely portable	

CRDS, Cavity ring-down spectroscopy; ICOS, Integrated cavity-output spectroscopy; IRMS, Isotope-ratio mass spectrometry, LOD, Limit of detection.

Tabel 4.1 Sammenligning af kommercielt tilgængelige analysemetoder til måling af lattergas (Rapson & Dacres, 2014)s

4.4 Teknologi på forskellige typer anlæg

Med udgangspunkt i den viden, der er tilgængelig om udvikling af lattergas fra renseanlæg, er der alt efter anlægsforholdene forskellige strategier, der skal tages i betragtning ved indretningen af et måleprogram. Afhængigt opbygningen af den biologiske proces, vil der skulle måles forskellige steder for at ramme de lattergasproducerende områder med målingerne.

4.4.1 Lattergasproduktion og frigivelse

Lattergasdannelsen i forbindelse med den biologiske omsætning er kompleks, der kan dog peges på følgende nøgle-procesparametre, opsummeret i de efterfølgende tre punkter, som kan føre til lattergasemissioner (Law, Ye, Pan, & Yuan, 2012).

4.4.1.1 *Stripning grundet beluftning*

I kontrast til marine- eller jordmiljøer bliver lattergasemissioner fra de biologiske renseprocesser på renseanlæg væsentligt øget grundet den stripning der følger beluftningen. Lattergas er en relativ opløselig gas i vand med en Henrys konstant på 24 mM atm^{-1} , til sammenligning med oxygen, som har en Henrys konstant på $1,3 \text{ mM atm}^{-1}$. Dette indebærer, at lattergas kan akkumulere til relativt høje koncentrationer i væskefasen, når der ikke sker aktiv stripning. Der er observeret ubetydelige lattergasemissioner fra en nitrificerende tank i ikke-beluftede perioder til trods for koncentration på $0,5 \text{ mg N l}^{-1}$ i væskefasen. Som kontrast var koncentrationen i væskefasen $0,01\text{-}0,03 \text{ mg N l}^{-1}$ i de beluftede perioder.

Gasfasemålinger på lattergas viser, at lattergas er i størrelsesordenen to til tre gange højere i beluftede zoner, end i ikke-beluftede zoner. Den udledte lattergas kan blive produceret under aerobe forhold, eller akkumuleret under anoxiske forhold inden beluftningen.

4.4.1.2 *Skift mellem anoxiske og aerobe betingelser*

Den biologiske proces i spildevandsrensning er designet med anoxiske og aerobe tanke/perioder for at opnå nitrifikation og denitrifikation. Det ses dog ofte, at en aktiv slamproces er anvendt, hvor denne proces sker inden for samme fysiske volumen. Det aktive slam bliver recirkuleret mellem anoxiske og aerobe zoner eller perioder, hvilket resulterer i, at den blandede bakterielle kultur bliver udsat for konstant ændrede forhold. Ændringer inden for en zone kan også ske, for eksempel kan den opløste iltmængde (DO) falde grundet øget belastning eller begrænsninger i beluftningskapaciteten. Forbigående ændringer i den opløste iltkoncentration har vist sig at bevirke umiddelbar øgning i lattergasproduktionen, specielt fra AOB (Ammonia Oxidizing Bacteria).

4.4.1.3 *Tilgængelighed af kulstofkilde*

Manglen af bionedbrydeligt organisk kulstof er en vigtig faktor for at styre lattergasproduktion ved denitrifikation. Tilgængeligheden af organisk kulstof bliver typisk målt som COD (Chemical Oxygen Demand). Under forhold med begrænsede kulstofkilder konkurrerer de forskellige denitrifikationsenzymmer (NO_3^- reduktase, NO_2^- reduktase, NO^- reduktase) om elektroner, hvilket potentielt fører til ukomplet denitrifikation.

4.4.2 Antal og placering af målepunkter, frekvens af målinger, driftsikkerhed, datavaliditet og usikkerhed.

For at sikre en korrekt monitorering af lattergas, ved måling i vandfasen er der gældende, at tilstrækkelig omrøring er en forudsætning for en retvisende væskefasemåling for hele procestanken, i det der kan være variationer i lattergaskoncentrationen. I tilfælde med store variationer i vandets hastighed, vil være behov for flere sensorer i samme tank.

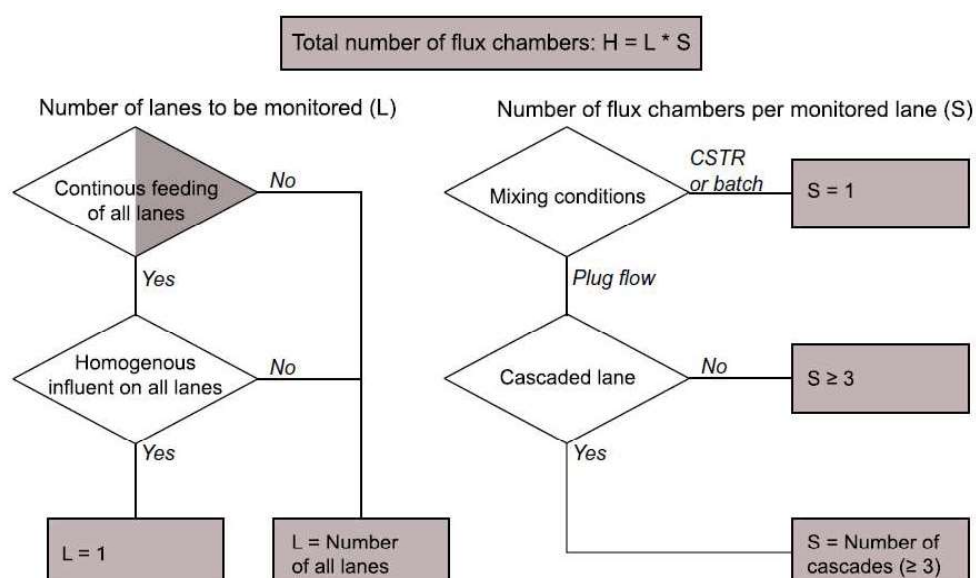
For offgas-målere gælder det ligeledes, at hvis der i områder er mindre beluftning end andre, vil der være variationer i lattergas emissionsmålinger og dermed være svært at give et fornuftigt bud på den samlede emission.

Givet korttidsvariabiliteten er en prøvetagningsfrekvens højere end to gange i timen påkrævet. (Gruber, et al., 2020)

(Gruber, et al., 2020) foreslår, i en artikel baseret på målinger fra tre renseanlæg med tre forskellige proceskonfigurationer og data for mindst et år fra hvert renseanlæg, et beslutningstræ for, hvor mange målepunkter der er nødvendige, når der måles med flux-kamre/flydekamre.

De beskriver videre at, der er behov for flere målepunkter i hver proceslinje for at vurdere emissioner i gennemløbssystemer. Ved SBR-systemer viste sammenlignelige emissioner i en tank, men signifikante variationer mellem parallelle tanke. Resultaterne indikerer at der kan forventes betydelige emissionsforskelle mellem proceslinjer med inhomogen belastning og diskontinuerlig indløb.

I det nedenstående figur foreslås et beslutningstræ til udvælgelse af antal målepunkter med flydekamre for lattergasmåling på renseanlæg.



Figur 4.4 beslutningstræ for udvælgelse af antal fluxkamre og placering på en bestemt linje. H = Totalt antal af fluxkamre, L = antal linjer der skal monitoreres, S = Antal fluxkamre på hver linje (Gruber, et al., 2020).

4.4.3 Barrierer for pålidelig dokumentation.

I dag reguleres renseanlæg vha. akkrediterede målinger af væske. Det vil være svært at fortsætte denne metode ved måling af lattergas emissioner, da variationerne er store og usikkerheden ved at lave døgnprøver - månedlig eller kvartalsvis ikke giver et retvisende billede af emissionen.

Både onlinemålere til lattergas og luftflowmålinger har usikkerheder, hvorfor emissionsberegninger også vil have usikkerheder, det er dog NIRAS vurdering, at måling i væskefasen for nuværende er den bedste anvendelige metode, da den også er anvendelig til at regulere og forbedre procesforhold til reduktion af lattergas-emissioner.

4.5 Reduktion af udledning

4.5.1 Styring til begrænsning af lattergasemission

I de af Miljøstyrelsen støttede projekter, hvor styring af lattergasemissioner har været målsætningen har projekterne vist, at det med nye kontrolhåndtag og forståelse for processen er muligt at reducere lattergasudledningen betragteligt. Jf. (Munk-Poulsen J., 2022) er en reduktion af lattergasemissioner på op mod 50 % effektiviseret, og i Varga-projektet endnu højere reduktion vha. ændringer i styringer. Det menes, at der vha. eksisterende målere er muligt at regulere lattergasemissionerne, bl.a. vha. bedre kontrol af slamalder, og forholdet mellem NH_4/NO_3 ift. lattergasemissionen.

4.5.1.1 DTU – N_2O kontrolstrategi

DTU har udført omfattende forsøg med data fra over et år for relevante procesparametre på Avedøre renseanlæg, samt måling af lattergas med Unisense-sensorer og analyse af relevant styring til lattergasreduktion med følgende konklusioner (Xueming Chen; Gürkan Sin):

- Resultaterne viste, at der var relativt lave lattergasemissioner i perioder med en faldende temperatur i vandet, mens der var relativt høje emissioner i perioder med stigende vandtemperatur.
- Den aerobe fase bidrog til lattergasproduktionen gennem hydroxylamin stien ved AOB, mens heterotrofisk denitrifikation havde en dobbeltrolle i den anoxiske fase og kunne være både lattergas forbrugende og producerende.
- Med det maksimale NH_4^+ niveau og slutniveauet for NO_3^- i den foregående aerobe fase som indikatorer, kan et tiltag være at forlænge varigheden af den anoxiske fase, eller at tilføre eksternt kulstof.
- Styring af den aerobe fase kunne inkludere et lavere DO setpunkt, hvilket i forsøget mindskede lattergas produktionen via hydroxylamin-stien ved AOB. (Mindre beluftning i beluftningsfasen, så der ikke er rest-ilt som forstyrrer det anaerobe procestrin med lattergasdannelse til følge)
- Et signifikant bidrag til lattergasemissionen kom fra denitrifikationen i den anoxiske fase. Dette kunne den udviklede "fuzzy logic controller" ikke modvirke, hvorfor kontrolstrategien må udvides/modificeres.

4.5.2 Andre metoder til begrænsning af lattergasemission

Til begrænsning af lattergasemission peger (Law, Ye, Pan, & Yuan, 2012) på designfaktorer: Indløbsbalancering, høje slamrecirkulationsrater, store bioprocestankvoluminer, og lang slamopholdstid. Store bioprocestankvoluminer og indløbsflowbalancering gør systemet i stand til at tilbageholde stødbelastninger og reducerer risikoen for forbigående iltmangel. Høj slamrecirkulationsrate har en tendens til at udvande koncentrationerne af NH_4^+ og nitrogen mellemprodukter hvilket mindsker effekterne af nitrifikation og denitrifikation, hvilket forhindrer akkumuleringen af NO_2^- og NH_4^+ til niveauer, der kan forøge lattergasproduktionen.

4.5.2.1 Fangst

Som det fremgår af interviews er fangst af lattergas en mulighed ved overdækkede anlæg. Dette er fortsat på forsøgsstadiet og vil i alle nuværende scenarier være kostbart og energitungt og dermed må det overvejes om løsningen er en klimagevinst.

4.5.2.2 MABR

Ved at anvende periodevis beluftning til MABR (Membrane-Aerated Biofilm Reactor) kan man opnå meget konkurrencedygtige rensegrader og ubetydelige lattergasemissioner (Pellicer-Nácher, et al., 2010). MABR er en særligt indrettet proces-tank.

4.6 Økonomi

4.6.1 Erfaringer med økonomi for reduktion og måling

Af interviewdelen fremgår priser på måling i vandfasen på ca. 100.000, målinger i gasfasen mellem 200.000 – 500.000. Priserne herfor skal ses som engangspriser. Hertil skal lægges et større beløb til drift, analyse, implementering, uddannelse og reduktionstiltag. Det anbefales, at når der i fuldskala forsøg er eftervist en reduktion ikke kun kigges på materialepriser, men også på, graden af menneskelige ressourcer og viden der er brugt på at opnå de konkrete resultater, ligesom man ikke nødvendigvis ville kunne opnå samme besparelse på "naboanlægget".

Målemetode	Anvendelse	Antal	kr./stk
Væskefasemåler	Kontinuert måling	Afgøres af anlægsindretning (1-16)	60.000
Flux-kammer (hat)	Kontinuert måling	Afgøres af anlægsindretning (1-16)	200.000 – 300.000
Dronemåling	Periodevis	1-15 dage	40.000 / dag
Tracer Gas Dispersion	Periodevis	Ukendt	Ukendt

4.6.2 Unisense skyggepris

Styrelsen for Vand- og Naturforvaltning har udført et projekt om beregning af energipotentialer og CO₂-skyggepriser for en række spildevandsrensningsteknologier. Af rapporten fremgår det, at producenten (Unisense) oplyser en skyggepris på 100 kr./ton CO₂ ækvivalent. (NIRAS, 2016) MH nævner i interviews, at der på visse anlæg er set skyggepriser ned til 10 kr./ton CO₂ ækvivalent.

5. Anvendelige enheder

For arbejdet med grænseværdier er det relevant at være opmærksom på følgende enheder. Beskrivelser og enheder fra (Vangsgaard & Madsen, 2020)

5.1.1 Kg N₂O-N_{udledt}/år

Nøgletallet beskriver den totale mængde af lattergaskvælstof, der udledes på rense-anlægget i løbet af et år. Tallet er beregnet som gennemsnittet af døgnmiddelværdier af lattergasemissionen, ganget med 365 dage/år. Mængden er absolut og ikke i relation til f.eks. renseanlæggets belastning eller størrelse. Lattergaskvælstof (N₂O-N) bruges tit i den akademiske litteratur, da enheden gør det nemmere at følge kvælstof gennem de biologiske omdannelsesprocesser, der består af en række processer med flere forskellige kvælstofkomponenter.

5.1.2 Kg N₂O_{udledt}/år

Nøgletallet beskriver den totale mængde af lattergas, der udledes på renseanlægget i løbet af et år. Tallet er beregnet som gennemsnittet af døgnmiddelværdier af lattergasemissionen, ganget med 365 dage/år. Mængden er absolut og ikke i relation til f.eks. renseanlæggets belastning eller størrelse. Forhold mellem kg N₂O_{udledt}/år og kg N₂O-N_{udledt}/år er, at kg N₂O_{udledt}/år er en faktor 44/28 større end kg N₂O-N_{udledt}/år, da hele molekylemassen af lattergas tages i betragtning og ikke kun andelen af kvælstof i molekylet.

5.1.3 Ton CO₂ækv._{udledt}/år

Nøgletallet beskriver den totale mængde CO₂-ækvivalenter, der udledes på renseanlægget i løbet af et år. Tallet er beregnet som gennemsnittet af døgnmiddelværdier af lattergasemissionen, ganget med 365 dage/år og drivhusgaspotentialer af lattergas (engelsk: global warming potential; GWP). Der kan anvendes GWP_{100,N₂O} med climate-carbon feedbacks (cc fb) på 298 kg CO₂ækv./kg N₂O (Myhre et al., 2013). Mængden er absolut og ikke i relation til f.eks. renseanlæggets belastning eller størrelse.

5.1.4 % N₂O-N/T-N_{fjernet}

Nøgletallet beskriver procentdelen af kvælstof, der blev udledt som lattergaskvælstof i forhold til den totale mængde kvælstof, der blev fjernet på renseanlægget. Dette gør det muligt at tage højde for renseanlæggets renseeffektivitet. Værdien er dermed relativ og ikke absolut. % N₂O-N/T-N_{fjernet}, renseanlæg er på nogle renseanlæg yderligere opdelt i % N₂O-N/T-N_{fjernet}, procestanke og % N₂O-N/T-N_{fjernet}, sidestrøm, såfremt de indberettede data har gjort det muligt at beregne N₂O emissioner separat på hhv. procestanke eller sidestrømstanke. For to-trinsanlæg, med forklaring, er

indløbskoncentrationen for T-N til luftningstankene benyttet frem for T-N-koncentrationen ind til hele renseanlægget i beregningen af $T-N_{\text{fjernet}}$. Nøgletallet er midelværdien af de dage, hvor der både forelå en måling af lattergas-emissionen og mængden af T-N i ind- og udløbet. Det samme gælder for standardafvigelsen. Dette nøgletal gør det muligt at sammenligne renseanlæg på tværs af anlægsstørrelser

5.1.5 % $N_2O-N/T-N_{\text{indløb}}$

Nøgletallet beskriver procentdelen af kvælstof, der blev udledt som lattergaskvælstof i forhold til den totale mængde kvælstof, der blev tilladt renseanlægget. Værdien er relativ og ikke absolut. % $N_2O-N/T-N_{\text{indløb, renseanlæg}}$ er på nogle renseanlæg yderligere opdelt i % $N_2O-N/T-N_{\text{indløb, procestanke}}$ og % $N_2O-N/T-N_{\text{indløb, sidestrøm}}$, såfremt de indberettede data gør det muligt at beregne N_2O emissioner separat på hhv. procestanke eller sidestrømtanke. For to-trinsanlæg, med forklaring, kan indløbskoncentrationen for T-N til luftningstankene benyttes frem for T-N-koncentrationen ind til hele renseanlægget. Dette nøgletal gør det muligt at sammenligne renseanlæg på tværs af anlægsstørrelser.

5.1.6 mg $N_2O-N/PE/d$

Nøgletallet beskriver mængden af lattergaskvælstof, der udledes per personækvivalent (engelsk: person equivalent; PE). Værdien er beregnet baseret på % $N_2O-N/T-N_{\text{indløb, renseanlæg}}$ under antagelse at 1 PE svarer til 12 g N/PE/dag. Dette nøgletal gør det muligt at sammenligne renseanlæg på tværs af anlægsstørrelser.

6. Vurdering

Som rapporten beskriver er dannelsen af lattergas på renseanlæg en kompliceret proces, hvor man har beskrevet nøgleparametre, der spiller ind, men endnu ikke kan beskrive processen fuldkommen teoretisk. Renseanlæg er forskellige i deres indretning og det indkommende spildevand varierer og dermed kræver det individuel analyse af hvert renseanlæg, hvis man skal beskrive lattergasdannelsen.

Lattergas kan måles i væskefasen og i gasfasen. Der er dog usikkerheder forbundet med begge dele. Placering af væskefasemålere og fluxkamre skal gøres i forhold til det konkrete anlæg. Her peger rapporten på en artikel, der beskriver metode for dette. Begge typer af målinger er afhængige af en pålidelig luftflowmåling, som kan være svær at opnå. Målinger i punkter skal omregnes til en samlet emission, hvorfor der også her er usikkerhed. Dog er disse to målemetoder velegnede til kontinuerte målinger, som kan dokumentere de store udsving i lattergasdannelsen og anvendes til optimeret styring.

For kontrol af lattergasdannelsen er der den udfordring, at lattergasdannelsen har store udsving. Derfor er det slået fast, at der skal måles kontinuert, da punktmålinger ikke vil være repræsentative for den samlede udledning. Dette stiller krav til en ny metode for kontrol med kontinuerte målinger og kvaliteten af målerne. Målere der måler kontinuert kan have udfald og skal kalibreres løbende. Udfordringen med kontrol af lattergasemission er endvidere, at der ikke er enighed om validiteten af måleapparater og målestrategier og omregninger til emissioner. Dette arbejde pågår og vil ved sin afslutning skulle evalueres til brug for regulering på området.

For reduktion af lattergas er det slået fast, at ændret styring er den "lavthængende frugt". På mange anlæg vil man med mindre styringstiltag kunne reducere lattergasudledningen betragteligt. Her peger man på op mod 80 %, men samtidigt oplever nogen, at reduktioner er svære at opnå. Renseanlæg har vidt forskelligt udgangspunkt. Nogle anlæg er højt belastede i forhold til deres kapacitet, mens andre er mindre belastede og evt. har bufferkapacitet til stødbelastninger. Ydermere peges der på ekstern kulstoftilsætning, overdækning med katalytisk luftrensning og alternativ renseteknologi som lattergasreducerende tiltag på renseanlæg.

Når man styrer sig ud af lattergasemission er det vigtigt at have for øje, at den optimerede styring i forhold til lattergas kan have en negativ effekt på andre parametre som højere energiforbrug til beluftning, mindre biogasproduktion, højere kulstofforbrug, højere energiforbrug, dårligere rensning af spildevandet og større emissioner ved brug af byggematerialer.

7. Videre arbejde

På baggrund af informationerne samlet i denne rapport kan NIRAS komme med følgende anbefalinger for det videre udbud og arbejde for regulering af lattergas fra renseanlæg.

7.1 Måling/kontrol

Måling af lattergas fra renseanlæg er en kompliceret proces. Dannelsen af lattergas er kompleks, ligesom frigivelsen fra væskefasen til atmosfæren er det.

Der er derfor behov for at tage stilling til antal påkrævede måleenheder afhængigt af anlæggets udformning, måleenhedens nøjagtighed og præcision og hvordan der omregnes til en samlet emission.

Forundersøgelsen har vist, at der blandt fagfolk er uenighed om nøjagtigheden og præcisionen af forskellige tilgængelige målemetoder.

Her forstås præcision som et udtryk for, i hvilken grad en måling kan reproduceres med omtrent samme resultat. Nøjagtigheden udtrykker resultatets overensstemmelse med den søgte størrelse.

Det er derfor en anbefaling, at der arbejdes mod fastsættelse af en validering for målemetoder, hvor måling og omregning til emission kan holdes op imod en referencemethode i forhold til nøjagtighed og præcision.

En sådan tilpas præcis og nøjagtig målemetode med en guideline for udvælgelse af antal og placering af målepunkter vil muligvis i fremtiden kunne danne grundlag for pålidelige lattergasmålinger.

7.1.1 Barrierer

Det er i interview-delen (BK og CS) rapporteret, at man i AWAIRE-projektet, hvor man har målt med flere forskellige, nøje udvalgte, målemetoder samtidigt ser udsving på op til 40 % mellem målemetoderne og ikke kan få målingerne til at stemme overens.

AWAIRE-projektet mangler sin konklusion, men resultatet heraf er væsentligt i forhold til besvarelse af præcision og nøjagtighed af målinger i forhold til om måling og kontrol heraf er en gangbar metode for regulering.

En anden barriere er behovet for kontinuerte målinger. Der skal tages stilling til, hvorledes man vil forholde sig til at regulere en emission, som fluktuerer kraftigt over tid og derfor anbefales målt mindst 2 gange i timen. Den regulerede del af renseanlæg foregår i dag ved døgnprøver foretaget af akkrediterede laboratorier 12 gange om året. Der er enighed i litteraturen og blandt interviewede fagfolk om, at dette ikke er en gangbar metode for lattergasmåling, som har langt større udsving, der gør, at denne metode ikke giver mening.

Der vil skulle tages stilling til hvordan udfald og defekte målere håndteres og hvordan data håndteres og indberettes og kontrol heraf.

7.2 Alternative modeller

Såfremt arbejdet med en valideret måle- og kontrolmetode vurderes urealistisk at udarbejde eller for omkostningstung, kan NIRAS pege på alternative modeller for fremgangsmåden med regulering.

Arbejdet anbefales delt op i faser, så der løbende kan tilrettes og justeres, som man gør sig erfaringer og vidensniveauet hæves.

Modellerne er på sit meget tidlige idéstadium og er ment som åbning af dialogen omkring, hvordan man kan gå frem og tjener til at vise, at reguleringsstrategi er bestemmende for, hvor kræfterne i det videre arbejde skal fokuseres. Modellerne kan kombineres som det ønskes.

7.2.1 Model 1

Model 1 baserer sig på det ovennævnte måle- og kontrolprogram. Forudsætningen for denne model er den ressourcekrævende og udfordrende opgave, at der udarbejdes et måle- og kontrolprogram, som udpeger referenceprøvemethoder, omregningsmetoder, usikkerheds- og nøjagtighedsintervaller, procedure for kalibrering og protokol for målepunkter.

Det foreslås, at arbejdet tager udgangspunkt i AWAIRE-projektet som første fase og udvides derefter til nogle test-renseanlæg, hvor det valideres, om der kan opnås tilfredsstillende resultater.

Slutteligt har alle relevante renseanlæg ensartede måle, kontrol- og indberetningsmetoder og der kan reguleres herefter.

Fordele:

- Et ensartet og nogenlunde retvisende resultat afhænger af resultater fra igangværende projekt.

Ulemper:

- Omkostningstungt
- Ufleksibelt
- Mindre grobund for innovation
- Usikkerhed, om man kan opnå tilfredsstillende nøjagtighed og præcision

7.2.2 Model 2

En alternativ strategi tager udgangspunkt i nuværende teknologi og vidensniveau og giver mulighed for en løbende udvikling af reguleringen.

Renseanlæggene gives metodefrihed for måling og reduktion af lattergasemission.

Forsyningsselskaberne skal indberette tilgængelige procesparametre (De data som de allerede måler på) til en database. Nøgleparametre er, lattergasmåling, Ammonium, ilt, nitrat, temperatur og pH.

Der foretages kontrolmålinger, evt. med drone eller fra princippet, BAT (Best Available Technology)

Databasen og kontrolmålingerne behandles statistisk, og det vurderes løbende, om data er tilstrækkelige til at benytte til regulering.

Målemetoder, indberetning, tolkning og regulering kan løbende tilpasses og forbedres.

Fordele:

- Løbende dataindsamling bidrager til viden
- Mulighed for innovation på måleudstyr
- Forståelse og data om det enkelte renseanlæg i samlet database

Ulemper

- Dataindberetning og behandling koster ressourcer. Der er tale om ekstremt mange datapunkter, og automatisering er nødvendig.
- Stor usikkerhed på indkommende data, der ikke er valideret
- Usikkerheder på emissioner vil indledningsvis være høje

7.2.3 Model 3

En 3. model, som er en pragmatisk løsning, giver forsyningsselskaberne som ikke kan eller vil dokumentere emissioner mulighed for, at blive beskattet efter den gældende emissionskoefficient.

Ønsker man at blive reguleret for en mindre emission er det op til forsyningsselskabet at dokumentere den mindre udledning ud fra en gældende guideline.

Fordele:

- Mindre omkostningstungt
- Dem som vil løfter
- Lavthængende frugter tages først
- Ikke alle starter samtidigt (Børnesygdomme)

Ulemper:

- Nogle vil ikke komme i gang
- Anlæg med store emissioner kan "gemme sig"

7.2.4 Model 4

En alternativ løsningsmodel, som tager udgangspunkt i, hvad der er praktisk muligt at sætte i værk fra dags dato og som finder inspiration i, hvad kommunerne har gjort på klimatilpasningsområdet, hvor der er stillet krav om udarbejdelse af en klimatilpasningsplan.

Her stilles der minimumskrav op for forsyningsselskabernes dokumentation fra arbejde med reduktion af lattergas fra renseanlæg. Dokumentationskravet kan løbende skærpes, som viden bliver opbygget og teknologi udvikles. Arbejdet skal udmønte sig i en lattergasreduktions-plan.

Der kan eventuelt arbejdes videre med et kompetenceløft af driftsledere, hvor den lovpligtige uddannelse suppleres med viden omkring lattergas og metoder til, at reducere disse.

Fordele:

- Fleksibel model
- Trinvis implementering
- Økonomisk

Ulemper:

- Lavt tempo for implementering
- Manuelt behov for vurdering af planer

7.3 Opmærksomhedspunkter og anbefalinger, udbudskrav

Krav til udbud vil afhænge af, hvilken strategi Miljøstyrelsen vælger.

I de 4 foreslåede modeller ligger der, som vi ser det, tre opgaver, som kunne ligge uden for et udbud.

- Udarbejdelse af protokol/standard for måling og dokumentation. (Model 1 og 3)
- Udarbejdelse database og indberetningsstandard, evt. baseret på PULS (Model 2)
- Udarbejdelse af krav til afrapportering af tiltag for håndtering lattergas for renseanlæg med en kapacitet på >30.000 PE (Model 4)

Derudover kan der alt efter valgt metode stilles krav til udarbejdelse af følgende:

7.3.1 Måleteknologi

I nærværende rapport er det beskrevet, hvorledes måleteknologi til måling af lattergas er udfordret.

Med udgangspunkt i de bedst tilgængelige kommercielt tilgængelige produkter på markedet specificeres krav til opfyldelse af måle- og omregningsmetode med et accepteret usikkerhedsinterval. Dette opstilles for gasfasemålere og væskefasemålere, inklusive krav til dokumentation af luftflowmåling og accepteret usikkerhedsinterval angives ud fra bedst kendte teknologi og procedure. Der opstilles ud fra dette krav til dokumentation for opfyldelse af nøjagtighed og præcision af målere, som må anvendes til brug for dokumentation af lattergasudledning.

Kravene kan begynde på et lavere niveau og skærpes løbende som teknologien udvikler sig.

7.3.2 Antal målepunkter

Med udgangspunkt i artikel præsenteret i denne rapport med beslutningstræ for antal målepunkter, eller anden tilgængelig viden på området oversættes der til danske forhold, hvor mange og hvor målepunkter placeres, så dette kan bestemmes uanset renseanlæggets konfiguration af den biologiske renseproces.

Der ydes en beskrivelse, dækkende alle renseanlæggenes relevante procestrin for, omfanget af målepunkter med udgangspunkt i ovenstående. Dette er gældende for kontinuerte målinger som flydekammermetode og væskefasemåling.

Krav til målefrekvens og frekvens af måleindberetninger fastlægges med udgangspunkt i faglitteraturen og dette dokumenteres.

Der udarbejdes krav til metode for indberetning af kontinuerte målinger fra f.eks flydekammermetode eller væskefasemålinger.

For overfladebeluftede anlæg, skærvelfiltre, og evt. andre lattergasproducerende processer, hvor der ikke er mulighed for kontinuerte og rimeligt pålidelige målinger er mulige, udarbejdes der en gældende faktor evt. udarbejdet på baggrund af konkrete dronemålinger eller på baggrund af nøgletal ud fra belastning. Der opstilles en procedure for screening af lattergasproducerende processer med dronemålinger eller anden relevant målemetode for dette.

I tabel 7.1 herunder opsamles rapportens anbefalinger for det videre arbejde.

Tabel 7.1

Afklaringspunkt	Vurdering	Forslag	Note
Afklaring af måleusikkerhed	Der findes ikke en standard, hverken nationalt eller internationalt for måling af lattergas.	Undersøge muligheden for standard til måling af lattergas på renseanlæg.	Særsomt projekt.
Hvilke måletyper hvor	Kontinuerte målinger anvendes til beregning af emission og styring til reduktion. Andre måletyper anvendes til kontrol og kildeopsporing.	Undersøge muligheden for standard til måling af lattergas på renseanlæg.	Særsomt projekt.
Behov for kontinuerlige målinger	Skal der i fremtiden føres effektiv kontrol er der behov for at føre kontrol med kontinuerlige målinger.	Registrering af kontinuerlige lattergasmålinger og tiltag til kontrol ved udfald og defekter på målere undersøges.	Særsomt projekt
Reduktion af lattergas	Med rette viden om lattergas kan man med styring generelt begrænse udledning.	Opkvalificering gennem uddannelse samt krav til dokumentation for reduktion.	
Forskellige størrelser og typer af anlæg	Afhængigt af anlægsudformning er behovet for målepunkter forskelligt. Overfladebeluftede anlæg og andre særtilfælde kan der ikke måles pålideligt i dag.	Der udarbejdes en vejledning til antal af kontinuerlige målepunkter. Der udarbejdes en protokol for omregning fra lattergasproducerende processer, hvor det ikke er muligt at måle.	

8. Projekter at holde øje med

Tabel 8.1 MUDP-Projekter med relevans for fremtidig regulering

Projekttype	Projektets formål	Hovedansøger	Projekttitel
Udvikling-, test og demonstrationsprojekter	Projektet har til formål at udvikle og teste nye innovative målemetoder, herunder droner, til kvantificering af den faktiske N ₂ O-udledning til luften fra renseanlæg samt at validere de gældende emissionsmodeller. Målet er at fremdrive nye måleløsninger og modeller, der kan hjælpe renseanlæggene til bedre at forstå og styre deres N ₂ O-udledning samt at kunne fremsætte et koncept for et individuelt og nationalt måleprogram for N ₂ O-reduktion på renseanlæg i kølvandet på Klimalovens kommende reduktionskrav.	Explicit ApS	AWAIRE - Udvikling og test af teknikker til måling af N ₂ O-udledning fra renseanlæg, verifikation af emissionsmodeller samt opstilling af måleprogram
Udvikling-, test og demonstrationsprojekter	Der vil blive udviklet en robust sensorløsning til lattergas, der kan måle kontinuerligt med høj tidsopløsning direkte i gasfasen over alle væskeoverflader på et renseanlæg. Målingerne vil give kontinuerlig kortlægning af lattergasudledningen og, i kombination med data fra renseanlægget, give mulighed for at identificere, hvilke driftsbetingelser der forårsager hvilke udledninger. Ud fra denne digitaliseringstilgang kan en styringsstrategi udvikles, og vandforsyningerne kan investere i omkostningseffektive tiltag og reducere deres lattergasudledning kosteffektivt.	Duotec A/S	Ny kosteffektiv teknologi til måling af klimagas-udledninger fra renseanlæg
	Fyrtårnsprojektet har som hovedformål at udvikle essentielle dele af den cirkulære økonomi til energiproduktion og udnyttelse af næringsstofferne i byernes affald og spildevand til produktion af fødevarer, at udvikle et koncept for opgradering af et konventionelt spildevandsrenseanlæg til fremtidens WRRF (Water Ressource	Biofos	VARGA - Vand Resource Genvindings Anlægget

ARES – Aktiv Reduktion af Emissioner fra Spildevandsanlæg

Vandcenter Syd

Recovery Facility), at demonstrere dette på Renseanlæg Avedøre med en kapacitet på 400.000 PE, der vil udgøre en showcase for dansk miljøteknologi i international størrelse samt at demonstrere synergier ved samarbejde om udnyttelse af ressourcer på tværs af vand- og affaldssektorerne.

Projektets formål er at tilvejebringe ny og epokegørende viden om dannelse og emission af CH₄ (Metan) og N₂O (Lattergas) i kloaksystemer og på reneanlæg. De to drivhusgasser er hhv. 25 og 298 gange mere potente end CO₂. Projektet kan deles op i tre konkrete hovedformål: 1) Demonstration af at man kan udnytte metan til produktion af grøn energi og derved samtidig reducere emissionen af metan; 2) Screening, identifikation og kvantificering af emissionskilder på reneanlæg, herunder for første gang nogensinde i kloaksystemer; 3) Udvikling af styringsstrategier og renseteknologier til nedbringelse af lattergasemissioner ved spildevandsbehandling.

Der vil blive udført udviklings-, implementerings- og testaktiviteter på fysiske anlæg med det mål at minimere emissionerne. Den danske vandbranche vil med dette projekt blive bedre rustet til at foretage emissionsreduktioner, herunder rådgive og sælge løsninger, der kan medvirke til dette, også uden for Danmarks grænser.

Nacat

Vandcenter Syd

Katalytisk fjernelse af lattergas på sidestrømsanlæg.

BIOKIN

Biofos

Undersøger sammenhængen mellem procesoptimering og emissioner.

9. Bibliografi

- Colliver B, S. T. (2000;18). Production of nitrogen oxide and dinitrogen oxide by autotrophic nitrifiers. *Biotechn Adv*, 219-232.
- Gruber, W., Villez, K., Kipf, M., Wunderlin, P., Siegrist, H., Vogt, L., & Joss, A. (2020). N₂O emission in full-scale wastewater treatment: Proposing a refined monitoring strategy. *Science of the Total Environment*.
- HOOPER A, T. K. (1979;571). Hydroxylamine Oxidoreductase of Nitrosomonas Production of Nitric-Oxide from Hydroxylamine. *Biochim Biophys Acta*, 12-20.
- Law, Y., Ye, L., Pan, Y., & Yuan, Z. (2012). Nitrous oxide from wastewater treatment processes. *Philosophical Transactions B*, 1265-1277.
- Massara, T. M., Malamis, S., Guisasola, A., Baeza, J. A., Noutsopoulos, C., & Katsou, E. (2017). A review on nitrous oxide emissions during biological nutrient removal from municipal wastewater and sludge reject water. 596-597.
- Munk-Poulsen J., K. C. (2022). *Realtidsstyring af lattergasemissioner fra rensesanlæg*. Miljøministeriet.
- NIRAS. (2016). *Energipotentiale og CO₂-skyggepriser for energibesparende teknologier i spildevandsrensning*. Styrelsen for Vand og Naturforvaltning.
- Pellicer-Nácher, C., Sun, S., Lackner, S., Terada, A., Schreiber, F., Zhou, Q., & Smets, B. F. (2010). Sequential Aeration of Membrane-Aerated Biofilm Reactors for high-Rate Autotrophic Nitrogen Removal Experimental Demonstration. *Environmental Science and technology*, 7628-7634.
- Rapson, T. D., & Dacres, H. (2014). Analytical techniques for measuring nitrous oxide. *Trends in analytical Chemistry*, 65-74.
- Shaw L, N. G. (2006;8). Nitrospira spp. can produce nitrous oxide via a nitrifier denitrification pathway. *Environ Microbiol*, 214-222.
- Vangsgaard, A. K., & Madsen, J. A. (2020). *Dataopsamling på måling og reduktion af lattergasemissioner fra rensesanlæg*. Miljøstyrelsen.
- Wrage N, V. G. (2001;33). Role of nitrifier denitrification in the production of nitrous oxide. *Soil Boil Biochem*, 1723-1732.
- Xueming Chen; Gürkan Sin. (u.d.). *Quantification and Analyses of N₂O Emission and Testing of Relevant N₂O Control Technology at Avedøre Wastewater Treatment Plant*. Kgs. Lyngby: DTU Chemical Engineering.