

Laboratorietest af additiver til reduktion af miljø- og klimaemissioner fra kvæggylle

Mads Skjærbæk, Anne Bruhn Andreassen og Claus Vestergaard

SEGES Innovation P/S, Den rullende Afprøvning

STØTTET AF

STØTTET AF

Mælkeafgiftsfonden **Kvægaftsfonden**

Hovedkonklusion

Otte additiver blev testet i kvæggylle for effekt på ammoniak- og metanemissioner: Eminex, GasAbate, brunalger, svovlsyre, glycerol, calciumsulfat, hørfrøekstrakt og naturlig forsuring. Svovlsyre forsuring var kendt og effektiv behandling, og blev derfor brugt som positiv kontrol. Det primære forsøg foregik over 13 dage, hvor Eminex havde den største relative reduktion på metan, 92,6 % reduktion, efterfulgt af GasAbate, 79,4 % reduktion, i forhold til kontrol. Hverken Eminex eller GasAbate havde markant målbar effekt på ammoniakemissionerne i løbet af forsøgsperioden. Glycerol og brunalger viste potentiale for middel/lav reduktion af ammoniakemissioner, men havde ingen eller stigende effekt på metanemissioner.

Sammendrag

Formålet med forsøget var at undersøge, hvordan forskellige additiver påvirker udledningen af metan og ammoniak fra kvæggylle. Baggrunden var landbrugets betydelige bidrag til udledning af drivhusgasser, især metan og ammoniak, hvor gødningshåndtering i kvægstalde med ringkanal spiller en vigtig rolle.

Til formålet blev der udviklet en forsøgsopstilling, hvor gasemissioner kunne måles kontinuerligt fra gylle behandlet med forskellige additiver. Otte behandlinger (Eminex, GasAbate, brunalger, svovlsyre, glycerol, calciumsulfat, hørfrøekstrakt og naturlig forsuring) med en forventet reducerende effekt, blev testet. Efter en initierende pilotrunde og en opfølgende kontrolrunde, blev det endelige forsøg kørt hen over 13 dage.

Ubehandlet gylle blev anvendt som kontrol, mens forsuring med svovlsyre fungerede som positiv kontrol. Eminex og GasAbate reducerede metanemissioner relativ til kontrollen med henholdsvis 92,6 % og 79,4 %, mens ammoniakudledningen forblev tæt på niveau med kontrol fra disse to additiver.

Brunalger og glycerol reducerede ammoniakemissionen med henholdsvis 28,9 % og 25,8 % i forhold til kontrollen, på trods af pH forblev neutral. De førte samlet set til uændret eller øget metanproduktion, hvilket begrænser deres anvendelighed som klimavirkemidler.

De andre testede additiver havde ingen eller negativ effekt på de målte emissioner, og det lykkedes ikke at finde et additiv, der virkede på både metan og ammoniak.

Baggrund

I lyset af Danmarks ambitiøse klimapolitiske målsætning om at reducere nationale drivhusgasemissioner, er der indført en klimaafgift på landbrugets biologiske processer gældende fra 2030. Landbruget kan reducere denne afgift ved at implementere dokumenterede virkemidler, der mindsker udledningen af CO₂-ækvivalenter (CO₂e) [1]. I kvægproduktion er metan (CH₄) og ammoniak (NH₃) to centrale emissioner fra gødningshåndtering, som begge bidrager væsentligt til landbrugets samlede klima- og miljøbelastning [2]; [3]. Landbruget er den største kilde til begge emissionstyper, og i EU-27 står sektoren i 2020 for 94 % af ammoniakudledningen og 54 % af metan udledningen [4]. Samtidig viser ammoniakudledningen kun et beskedent fald på 8 % siden 2005 [4], hvilket understreger, at NH₃ fortsat er en markant miljøudfordring.

I Danmark stod landbruget for 11 mio. ton CO₂e. i 2023, og gødningshåndtering i stald og lager udgjorde omkring 28 % af sektorens totale udledninger [5]. Heraf stammede en betydelig andel fra metan – særligt fra kvægstalde med spaltegulv og ringkanaler, da gyllen opbevares i staldene, og der derfor findes et aktivt inokulum af metanogene arkæer. Emissionen fra gylle i stalde med spalter og ringkanaler er beregnet til ca. 1,7 kg CH₄ pr. ton gylle [6]. Sammenlignet udleder stalde med fast gulv mindre end 0,1 kg CH₄ pr. ton gylle pr. dyr fra stalden, hvilket tydeliggør den klimamæssige udfordring ved spaltegulve [6]. Ammoniakfordampningen sker primært fra overflader, og spaltegulve med eksponeret gulv- og gylleareal medfører derfor højere ammoniakfordampning end dræned, faste gulve [7].

Både ammoniak og metan skabes som følge af mikrobiel aktivitet, men på forskellige måder. Urease, som nedbryder urea fra urin til ammonium, produceres af mikroorganismer og forekommer naturligt i stalde. Derfor virker det ikke tilstrækkeligt at hæmme mikrobiel aktivitet generelt. I stedet kan man f.eks. anvende ureasehæmmere, eller man kan forsøge at forhindre ammonium i at omdannes til ammoniak. Metanproduktion er en del af metabolismen hos metanogene arkæer, og derfor kan metanproduktionen reduceres ved at hæmme disse mikroorganismer.

Et ideelt virkemiddel reducerer begge emissionstyper. Et eksempel herpå er svovlsyreforsuring, som i dag er den eneste godkendte teknologi til ammoniakreduktion i kvægstalde, der samtidig også kan reducere metanemissioner fra gylle [8]. Det er derfor afgørende, at nye additiver vurderes på begge typer emissioner. Som minimum bør et additiv kunne reducere enten metan- eller ammoniakemissioner – uden at øge den anden.

Formålet med afprøvningen er at undersøge og sammenligne effekten af forskellige gylleadditiver på emissioner fra kvæggylle under kontrollerede laboratorieforhold, med henblik på at identificere den mest lovende kandidat til fremtidige afprøvninger i besætninger med ringkanal.

De testede additiver er valgt på baggrund af et litteraturstudie (Appendix F) og deres mekanismer beskrives herunder:

Svovlsyre (H₂SO₄) blev anvendt som positiv kontrol og repræsenterede den mest veldokumenterede teknologi til kemisk forsuring af gylle. Ved tilsætning sænkes pH typisk til omkring 5,5, hvor metanogene arkæers enzymatiske systemer hæmmes [9]. Den øgede koncentration af protonerede flygtige fedtsyrer (VFA'er) medfører intracellulær forsuring, som forstyrrer elektrontransportkæden og metanogenernes metabolisme [10]. Samtidig fremmes sulfatreduktion via substratkonkurrence, hvilket yderligere begrænser metanproduktionen [11]. Den lavere pH skifter desuden ammoniak–ammonium-ligevægten mod NH₄⁺, hvilket reducerer NH₃-fordampning [12].

Biologisk forsuring blev udført med melasse kombineret med eddikesyre og filtreret kefir for at fremme mikrobiologisk produktion af organiske syrer. Eddikesyren sænker pH, mens mælkesyrebakterier i kefir fermenterer sukkeret i melasse. Resultatet er en lavere pH, hæmning af metanogener, og reduceret ammoniakfordampning [13].

GasAbate indeholder 25 % hydrogenperoxid (H_2O_2), som gennem øget redox potentiale i gyllen og dannelse af reaktive oxygenarter (ROS) skader lipider, proteiner og enzymesystemer i metanogene arkæer. Dette blokerer det sidste trin i metanproduktionen, hvor CO_2 og H_2 omdannes til CH_4 , og forskyder mikrobiomet mod ikke-metanogene populationer [14].

Glycerol kan fungere som substrat for produktionen af reuterin i mikroorganismen: *Limosilactobacillus reuteri*. Reuterin dannes via enzymet glycerol/diol-dehydratase (PduCDE) og nedbrydes spontant til acrolein, som hæmmer metanogene mikroorganismer ved oxidativ skade på proteiner, enzymer og cellemembraner. Biprodukterne 1,3-propandiol og 3-hydroxypropionat forstærker effekten [15] [16] [17].

Eminex indeholder calciumcyanamid ($CaCN_2$), som frigiver cyanamid (NH_2CN) i vandig opløsning. Cyanamid hæmmer aldehyddehydrogenase (ALDH2), et centralt enzym i metanogenernes omsætning af VFA'er. Hæmningen er delvist reversibel, da cyanamid hydrolyseres til urea, og mikroorganismer gradvist genoptager aktiviteten [18] [19].

Hørfrækstrakt indeholder langkædede umættede fedtsyrer (LCAF), som hæmmer metanogener, især de acetoklastiske. Forarbejdningen øger tilgængeligheden af omega-3-fedtsyrer, hvilket forstærker effekten. LCAF påvirker metanogenesens sidste trin, hvor acetat og H_2/CO_2 omdannes til metan og CO_2 , forstyrrer cellemembraners struktur og enzymfunktion, og blandinger kan have synergetiske toksiske effekter [20]. Effekten i gylle er endnu ikke afklaret.

Brunalger (*Fucus serratus*) hæmmer metanproduktion via phenoler og andre polyfenoler, som direkte påvirker metanogenesens enzymatiske processer og ændrer fermenteringsvejene mod propionat produktionen [21]. *F. serratus* findes lokalt langs danske kyster og kan derfor være attraktiv i en nordisk kontekst.

Calciumsulfat ($CaSO_4$) stimulerer sulfatreducerende bakterier (SRB), som konkurrerer med metanogene arkæer om substrater som H_2 og acetat. SRB reducerer sulfat til sulfider, hvilket mindsker substrattilgængeligheden for metanogener og dermed hæmmer metanproduktion [22].

Materialer og metoder

Afprøvningen blev gennemført i 11 forsøgsrunder (målerunde 1+3) og med en kontrolperiode imellem de to målerunder (kontrolperiode/målerunde 2) i et laboratorium på Forsøgsstation Grønhøj. Målerunde 1 fungerede som pilotforsøg til optimering af forsøgsopstillingen og udvælgelse af relevante additiver, baseret på deres effekt på emissionerne sammenlignet med kontrollerne. Kontrolperioden forløb dagene inden tilsætning af udvalgte additiver til gyllen, og ved tilsætning af additiverne til gyllen påbegyndte målerunde 3. Målerunde 3 blev gennemført med de mest relevante additiver.

Forsøgsopstilling

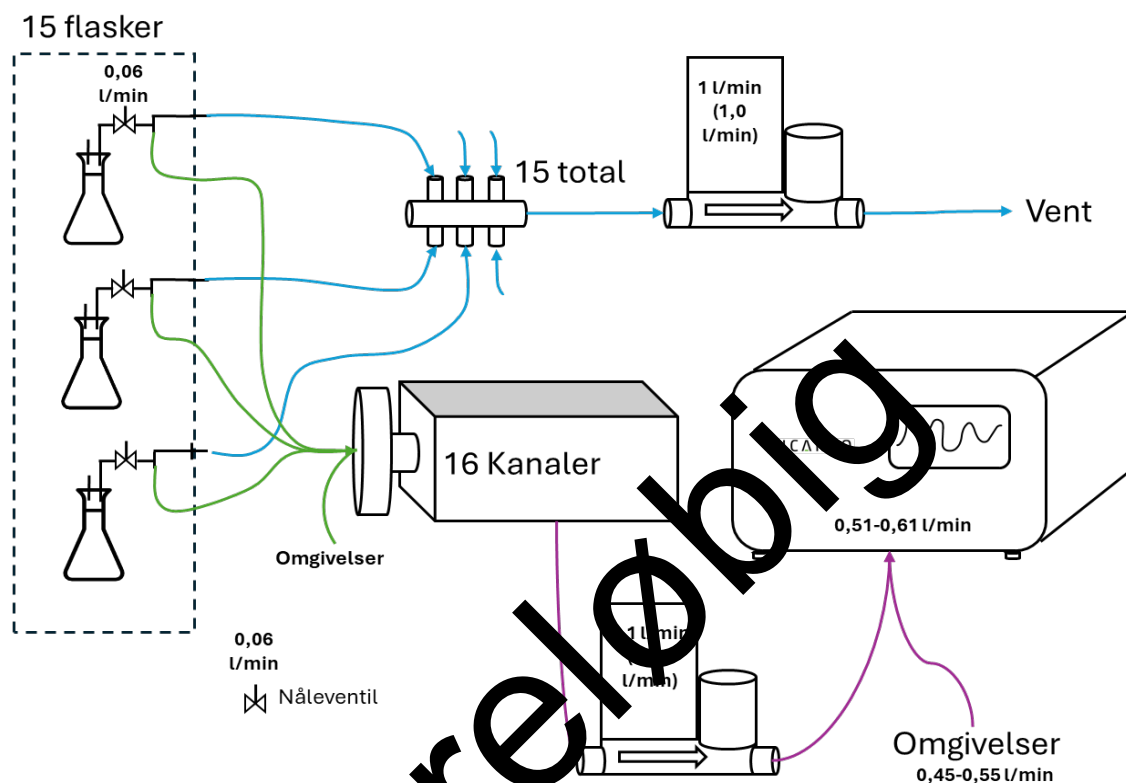
Forsøgsrunderne benyttede en forsøgsopstilling (Figur 1), bestående af 15 forsøgsenheder. Hver enhed var en 2 l. Duran-flaske med tætsluttende låg og to studse. Den ene fungerede som luftindtag, mens den anden var tilkoblet en nåleventil, der styrede luftflowet til et T-stykke. Fra T-stykket blev den ene kanal ført videre til et generelt luftudtag, mens den anden kanal blev koblet til en 16-ports skifteventil. Ud over de 15 flasker, blev én kanal på skifteventilen brugt til måling af baggrundsluft fra laboratoriet.

I det generelle luftudtag blev luftflowet reguleret via en Mass Flow Controller (MFC, EL-FLOW Select F-201CV Bronkhorst) til 1 l./min, fordelt på de 15 flasker. Den samlede luftstrøm fra flaskerne blev ledt ud af laboratoriet via udsugning for at undgå kontaminering.

Fra T-stykkets anden udgang blev luften ført gennem 6 mm slanger til en 16-ports skifteventil, der skiftevis tog luftprøver fra hver flaske med syv minutters intervaller. Luftstrømmen passerede herefter en sekundær MFC (60 ml./min.), før den blev suget ind i en Picarro G2509-analysator (Picarro Inc.). For at

sikre tilstrækkeligt luftflow, blev der samtidig tilført baggrundsluft (målt til 450–550 ml/min), hvilket gav en samlet luftstrøm på 510–610 ml/min. Her blev koncentrationer af metan, ammoniak, kuldioxid og lattergas målt kontinuerligt. Temperaturen i laboratoriet blev stabilt holdt mellem 21–22 °C.

Luftflowet gennem flaskerne blev løbende målt og justeret ved behov med Mass Flow Meter (MFM, TSI 41401) før og efter tilsætning af gylle og additiver, med justering af nåleventiler for at opretholde minimum 60 ml/min pr. flaske. Alle målinger og justeringstidspunkter blev noteret.



Figur 1: Koncept-skitse af forsøgsopstillingen, bestående af 15 Duran-flasker (2 l.) koblet til et lukket luftflowsystem. Luftstrømmen blev reguleret ved hjælp af MFC og udløsningsluften blev pumpet til en Picarro G2509-analysator til kontinuerlig måling af drivhusgaskoncentrationer og ammoniak.

Forsøgsrunder

Der blev gennemført tre forsøgsrunder:

Målerunde 1:

Pilotforsøget omfattede otte additiver og havde til formål at teste forsøgsopstillingen, samt udvælge relevante additiver. Kvæggyllen blev indsamlet den 22. september 2025 kl. 11:00 fra en lokal kvægbesætning med ringkanal. Gyllen blev omrørt både i gyllesystemet inden indsamling og manuelt undervejs for at undgå bundfald, inden den blev fordelt i 1 l. portioner i 15 flasker. Additiverne blev tilsat samme dag inden kl. 13:00 (Tabel 1), og gyllen blev omrørt efter tilsætning i alle flasker. Flaskerne blev herefter tilkoblet forsøgsopstillingen, og data blev indsamlet kontinuerligt frem til 29. september, hvor runde 1 blev afsluttet.

Kontrolrunde:

Runden startede den 29. september 2025 med nyt indsamlet kvæggylle fra samme besætning, behandlet som i runde 1. Hver flaske blev fyldt med 1 l. kvæggylle, så alle flasker var klar kl. 12 på forsøgsopstartsdatoen. pH i gyllen blev målt (ProfiLine, pH 3110) under omrøring. Flaskerne blev herefter tilkoblet Picarro-enheden frem til den 1. oktober, hvor additiverne blev tilsat. Kontrolrunden havde til formål at undersøge variationer mellem de forskellige flasker.

Målerunde 3:

Målerunde 3 dækkede perioden efter additivtilsætningen den 1. oktober 2025 mellem kl. 09:00-12:00 (Tabel 1). Gyllen i hver flaske blev grundigt blandet (også kontrollen), og pH blev målt igen. De fleste behandlinger blev udført i dubletter eller tripletter, inklusive kontrol uden additiver. Målerunde 3 forløb over 13 dage med pH-målinger i gyllens øverste, midterste og nederste lag, samt efter omrøring ved forsøgsafslutningen den 13. oktober 2025.



Figur 2: Forsøgsopstilling, runde 3.

Behandling	Dosis	Replikater runde 1	Replikater runde 3	Producent/ oprindelse	Bemærkninger
Baggrunds- luft	-	1	1	-	Uden gylle
Kontrol	-	2	3	-	Uden additiv
Biologisk forsuring	Melasse (60 ml.) + eddikesyre (80 ml.) + kefir (50 ml.)	2	-	Rapunzel (melasse), Arla (kefir), Borup (eddikesyre, 32%),	
Hørfrø- ekstrakt	10 g./l. gylle	1	-	Easylin	
Calciumsul- fat	10 g./l. gylle	1	-	Playbox	
Svovlsyre	6 ml./l. gylle runde 1 7 ml./l. gylle runde 2	2	2	Sigma-Aldich (svovl- syre, 95,0-98,0%)	Positiv kontrol
GasAbate	2,5 ml./l. gylle *	2	3	GlasPortBio	
Glycerol	5 ml./l. gylle	2	2	Matas (Glycerin, 85%)	
Eminex	2 g./l. gylle *	2	3	Azore	
Eminex + svovlsyre	2 g./l. gylle * + 3 ml./l. gylle	-	1	Eminex (Azore), Svovlsyre (Sigma-Al- dich)	
Brunalger (<i>Fucus ser- ratus</i>)	60 g./l. gylle	1		Indsamlet på Tangkrogen, Århus C den 30/9 2025.	Blendet i blender efter indsamling og opbevaret på køl til brug

Tabel 1: Oversigt over anvendte additiver, doseringer, replikater (antal flasker) og producenter i forsøgsrunde 1 og 3. *Dosis baseret på anbefaling af producenten.

Dataindsamling og beregning

Picarro G2509 leverede kontinuerlige data for CH₄, NH₃, CO₂ og N₂O med et måleinterval på 1 time og 52 minutter (7 minutter pr. kanal). De første tre minutter af hver måling blev udeladt for at sikre, at slangerne var rensede og frækstrøet fra den forrige flaske. Metadata som temperatur, luftflow, flaske nummer og behandlingstype blev registreret. Rådata blev korrigeret for outliers (f.eks. peak ved flaskeskift eller additivtilsætning) og for baggrundsluft. Emissioner i g/time blev beregnet ud fra ppm/ppb. (part per million/part per billion) – koncentrationer ved hjælp af idealgasligningen:

$$Emission (g/time) = \frac{M \cdot C \cdot Q \cdot P}{R \cdot T \cdot 1000}$$

hvor:

M = molmassen af gassen, CH₄: 16,04 g/mol, NH₃: 17,03 og CO₂: 44 g/mol

C = koncentrationen i ppm for CH₄ og ppb for NH₃,

Q = ventilationsflowet m³/time,

P = tryk (1 atm),

R = gaskonstanten 0,0821 L atm mol⁻¹ K⁻¹ og

T = temperaturen i Kelvin.

Luftflowet fra flaskerne og den supplerende baggrundsluft frem mod Picarro'en blev anvendt til lineær regression af emissioner over tid. Kumulative emissioner blev beregnet som summen af emissionerne frem til måletidspunktet og udtrykt pr. m³ gylle:

$$KumEmissions_i = \sum(Emission_{1:i})$$

For hver behandling blev de kumulative emissioner sammenlignet med kontrolgruppen. Den relative kumulerede emission blev beregnet som:

$$Relativ\ emission_{A,i} = \frac{kumEmission_A}{kumEmission_K}$$

hvor K = kontrol og A = behandling.

For målerunde 3 er der foretaget mere dybdegående analyse af dataene. Her er der opdelt dag-for-dag, og data er analyseret ved hjælp af en *mixed effects-model*, hvor dagnummer er inkluderet som en tilfældig effekt. Dette er gjort for at kontrollere for det markant højere emissionsniveau i starten af perioden, hvor gyllen var frisk. Antallet af gentagelser varierede mellem tilsætningerne: enkelte havde tre sideløbende gentagelser, andre to, og nogle kun én. Der blev yderligere analyseret for luftgennemstrømningens effekt på emission, og dataene blev justeret til efter denne parameter. Denne analyse har lagt grund for beregning af standardafvigelse på rå-data, model estimeret emissionsniveau med tilhørende *standard error* (SE), samt kontrasten mellem den enkelte tilsætning og kontrolbehandlingen med tilhørende p-værdi. Det skal bemærkes, at p-værdierne ikke er korrigeret for multipel testning, og derfor bør tolkes med forsigtighed, særligt for resultater tæt på signifikansniveauet.

Resultater og diskussion

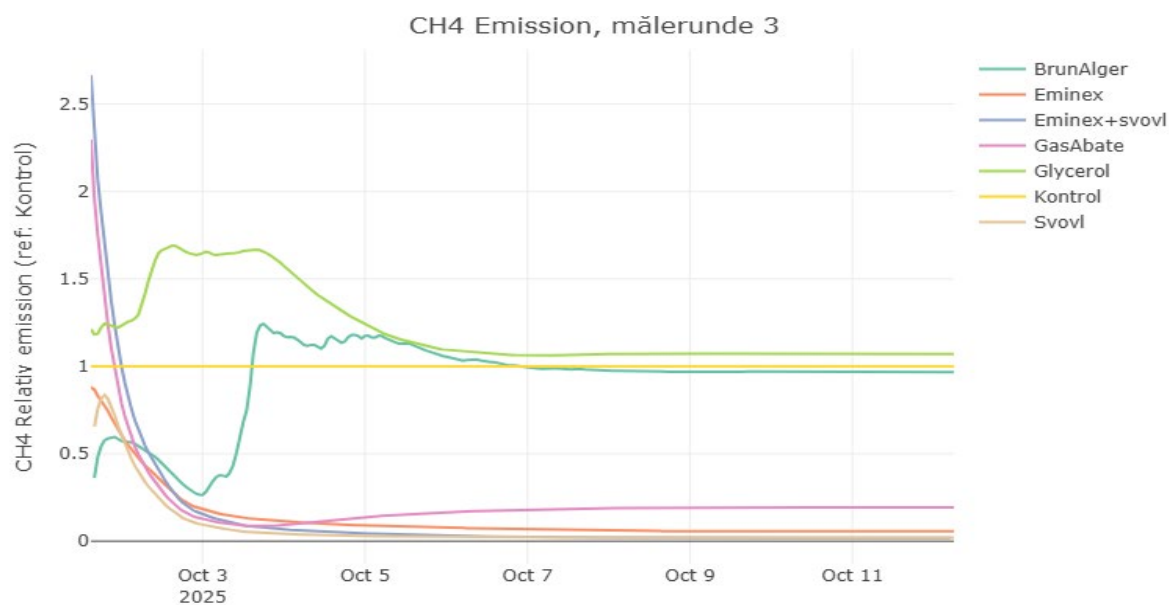
Resultaterne fra målerunde 3 viste markante forskelle mellem behandlingerne både i niveau og i tidsudvikling af emissionerne. De tidsopløste emissionskurver (Figur 3 og 4) giver et overblik over dynamikken efter tilsætning af additiver, mens de statistiske analyser (Tabel 2 og 4) kvantificerer effekterne og vurderer deres signifikans.

Metanemissioner

Den tidsmæssige udvikling i den kumulative metanemission, relativt til kontrol, fremgår af Figur 3. Figuren viser tydeligt, at flere behandlinger havde en hurtig effekt efter tilsætning, men at effekternes varighed og stabilitet varierede betydeligt mellem additiverne.

Forsuring med svovlsyre, som fungerede som positiv kontrol, reducerede metanemissionerne kraftigt og stabilt gennem hele måleperioden til omkring 2 % af kontrolniveauet. Denne effekt var vedvarende og uden tegn på genopretning af metanproduktionen. Tilsvarende viste Eminex og GasAbate en markant reduktion i metanemissionerne kort efter tilsætning. For Eminex forblev emissionerne lave gennem hele perioden, mens GasAbate udviste en aftagende effekt efter de første døgn, hvor emissionerne gradvist steg, men fortsat lå væsentligt under kontrol. Brunalger og glycerol udviste et anderledes forløb. Brunalger gav en kortvarig reduktion i metanemissionen, hvorefter emissionerne steg og endte på eller over kontrolniveau. Glycerol medførte derimod en initial stigning i metanemissionen, efterfulgt af et fald mod kontrolniveau, hvilket indikerer, at glycerol primært fungerede som let omsætteligt substrat under de givne forsøgsbetingelser.

De statistiske resultater fra mixed effects-analysen for metanemissionerne er opsummeret i Tabel 2. Eminex, Eminex + svovlsyre, GasAbate og svovlsyre har alle reduceret metanemissionerne signifikant sammenlignet med kontrol ($p < 0,0005$). Eminex og svovlsyre udviste de laveste gennemsnitlige emissionsniveauer, og samtidig relativt lave standardafvigelser, hvilket indikerer en stabil og reproducerbar effekt. GasAbate viste også en signifikant reduktion, men med en højere gennemsnitlig emission end Eminex og svovlsyre, hvilket stemmer overens med den aftagende effekt observeret i Figur 3. Brunalger og glycerol viste ingen signifikant reduktion i den samlede metanemission, på trods af de midlertidige og modsatrettede effekter observeret i emissionskurverne.



Figur 3: Relativt kumulative metanemissioner over tid for de forskellige behandlinger i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle og reference, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.

METANMISSIONER – MÅLERUNDE 3						
Behandling	N	SD	mean	SE	P-værdi	Reduktion
Kontrol	36	0,085	0,087	0,015		
Brunalger	12	0,114	0,0787	0,019	0,873	3,7%
Eminex	36	0,010	0,0061	0,014	< 0,0005	92,6%
Eminex + svovlsyre	12	0,016	0,0022	0,019	< 0,0005	97,3%
GasAbate	36	0,018	0,0168	0,014	< 0,0005	79,4%
Glycerol	24	0,115	0,0901	0,016	0,561	-10,3%
Svovlsyre	24	0,011	0,0072	0,017	< 0,0005	91,2%

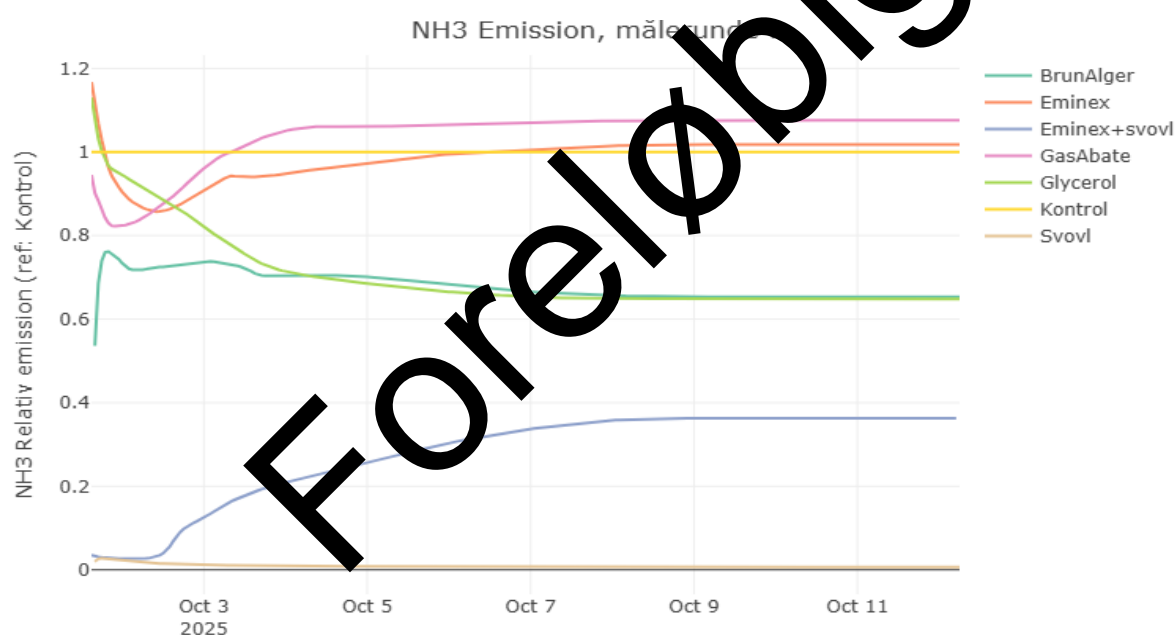
Tabel 2: Metanemissioner fra målerunde 3. Tabellen viser antal observationer (N) og standardafvigelse (SD) beregnet på det samlede datasæt, model estimeret emissionsniveau med tilhørende standard error (SE), samt forskellen mellem den enkelte tilsætning og kontrolbehandlingen med tilhørende p-værdi. Positive tal i reduktion er ensbetydende med en reduktion, hvor negative er en forøgelse.

Ammoniakemissioner

Den tidsmæssige udvikling i den kumulative ammoniakemission relativt til kontrol er vist i Figur 4. Forsuring med svovlsyre reducerede ammoniakemissionen næsten fuldstændigt gennem hele perioden, hvilket er i overensstemmelse med den markante pH-sænkning og forskydningen af ammoniak-ammonium-ligevægten, se Tabel 3. Kombinationen Eminex + svovlsyre reducerede også ammoniakemissionen betydeligt, men effekten aftog over tid i takt med, at pH steg.

Glycerol og brunalger reducerede ammoniakemissionen moderat og stabilt til omkring 65 % af kontrolniveauet, uden at pH blev sænket. Dette indikerer, at reduktionen ikke var pH-drevet, men sandsynligvis relateret til fysiske effekter, såsom øget viskositet, overfladelag eller øget mikrobiel kvælstofinkorporering. Eminex og GasAbate lå gennem hele perioden tæt på kontrolniveauet, hvilket indikerer, at disse additiver ikke påvirkede ammoniakfordampningen direkte.

De statistiske resultater for ammoniakemissionerne er opsummeret i Tabel 4. Svovlsyre og Eminex + svovlsyre reducerede ammoniakemissionerne signifikant ($p < 0,0005$), mens glycerol også viste en signifikant, men mere moderat reduktion ($p = 0,015$). Brunalger viste en tendens til reduktion, men effekten var ikke statistisk signifikant ($p = 0,094$). Eminex og GasAbate viste ingen signifikant forskel fra kontrol, hvilket er i overensstemmelse med emissionskurverne i Figur 4. Det skal bemærkes, at p-værdierne ikke er korigeret for multipel testning, og resultater tæt på signifikansniveauet bør derfor tolkes med forsigtighed.



Figur 4: Relativt kumulative ammoniakemissioner over tid for de forskellige behandlinger i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle og reference, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.

Dato	Behandling	Kontrol	Svovl	Eminex	GasAbate	Glycerol	Eminex + svovl	Brunalger
Før behandling	pH før additiv	6,9	6,9	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0
Efter behandling	pH efter tilsætning af additiv	-	4,8	7,0	7,1	7,1	6,0	7,0

Forsøgs-afslutning	Efter omrøring	7,3	5,1	7,6	7,2	7,0	6,8	7,2
---------------------------	----------------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Tabel 3: Viser gennemsnits pH-udviklingen for alle behandlinger før tilsætning af additiver, efter tilsætning af additiv(er) efter omrøring og ved forsøgsafslutning.

AMMONIAKMISSIONER – MÅLERUNDE 3						
Behandling	N	SD	mean	SE	P-værdi	reduktion
Kontrol	36	0,057	0,0547	0,012		
Brunalger	12	0,040	0,0406	0,014	0,094	25,8 %
Eminex	36	0,052	0,0570	0,012	0,698	-4,1 %
Eminex + svovlsyre	12	0,019	0,0163	0,004	< 0,0005	70,3 %
GasAbate	36	0,055	0,0581	0,012	0,694	-6,2 %
Glycerol	24	0,040	0,0389	0,005	0,0150	28,9 %
Svovlsyre	24	0,001	0,0041	0,013	< 0,0005	92,4 %

Tabel 4: Ammoniakemissioner fra målerunde 3. Tabellen viser antal observationer (N) og standardafvigelse (SD) beregnet på det samlede datasæt, modelstimeret emissionsniveau med tilhørende standard error (SE), samt forskellen mellem den enkelte tilsætning og kontrolbehandlingen med tilhørende p-værdi. Positive tal i reduktion er ensbetydende med en reduktion, hvor negative er en forøgelse.

Ud over ovenfor nævnte resultater blev der observeret varierende effekter fra behandlingerne, som er af interesse, men det ville kræve yderligere undersøgelser for at forstå disse effekter. Dette inkluderer forskelle mellem dannelse af skorpe, varierende mængder bobler, lag dannelse/sedimentering, og variation af pH igennem gyllen. Billeder og målinger af nogle af disse effekter ses i Appendiks A og B.

Resultater for målerunde 1 og kontrolmålerunden, ledende op målerunde 3, samt et indblik i CO₂-emissioner, der generelt kan sige noget om mikrobiel aktivitet, ses i Appendiks C.

Samlet evaluering

Samlet set viser resultaterne, at additivernes effekt på metan- og ammoniakemissioner er tydeligt adskilt og styret af forskellige mekanismer. Svovlsyreforsuring var den eneste behandling, der effektivt reducerede begge emissionstyper markant og stabilt. Eminex og GasAbate reducerede metanemissionerne betydeligt, men uden effekt på ammoniak, mens glycerol og brunalger reducerede ammoniakemissionen moderat, men enten øgede eller ikke reducerede den samlede metanproduktion. De tidsopløste emissionskurver understreger vigtigheden af at skelne mellem kortvarige og vedvarende effekter, som ikke altid afspejles i de samlede middelværdier alene.

Sammenholdt med emissionsreduktionen opnåede Eminex den største metanreduktion pr. behandlet ton gylle blandt de ikke-syrebaserede løsninger, efterfulgt af GasAbate. I sammenhæng med de observerede effekter på emissionerne, er det væsentligt at forholde sig til den praktiske anvendelighed, som i høj grad afhænger af økonomiske forhold. Eminex har en behandlingspris på omtrent 15 kr. pr. ton behandlet gylle, hvor GasAbate koster cirka 28,5 kr. pr. ton behandlet gylle (priser oplyst af forhandler). Dette er altså væsentligt over prisen på omkring 6 kr. pr. ton behandlet gylle med svovlsyre [23]. Dertil kræver behandling med GasAbate og svovlsyreforsuring omkostningstunge anlægsinvesteringer. Disse omkostninger varierer betydeligt mellem bedrifter, og kan derfor være vanskelige at opgøre præcist. De angivne priser må således opfattes som estimerede værdier, og det skal også nævnes, at leverandørerne af Eminex og GasAbate tilbyder hjælp til mere effektiv brug af deres additiv, der kan være med til at nedbringe prisen på brug af additivet.

Konklusion

Laboratorieforsøgene med additiver viste, at effekten af gylleadditiver på metan- og ammoniakemissioner fra kvæggylle er stærkt afhængig af additivernes virkningsmekanismer, og at reduktion af de to emissionstyper sjældent opnås samtidigt. Svovlsyreforsuring var den eneste behandling, der konsekvent og signifikant reducerede både metan- og ammoniakemissioner gennem hele forsøgsperioden.

Blandt de ikke-syrebaserede additiver viste Eminex den mest stabile og markante reduktion i metanemissioner, efterfulgt af GasAbate, som reducerede til henholdsvis 92,3 % og 76,4 % i forhold til kontrollen over de 13 dage forsøget løb over. Dette var dog uden målbar eller vedvarende effekt på ammoniakemissionerne. GasAbate udviste desuden en aftagende effekt over tid, hvilket indikerer, at metanreduktionen ikke er fuldt stabil under de anvendte forsøgsforhold.

Glycerol og brunalger reducerede ammoniakemissionerne moderat og relativt stabilt uden samtidig pH-sænkning, med henholdsvis 28,9 % og 25,8 % i forhold til kontrollen. De førte samlet set til uændret eller øget metanproduktion, hvad der betyder, de ikke kan bruges som klimavirkemiddel. Det er dog stadig interessant i forhold til miljø, og det kan være interessant, hvis det kan kombineres med et additiv der hæmmer den ekstra metandannelse.

Resultaterne understreger, at kortvarige reduktioner i emissioner ikke nødvendigvis fører til en samlet klimamæssig gevinst, og at tidsoptimerede målinger er afgørende for en korrekt vurdering af additivernes effekt. Der blev ikke identificeret et additiv, som, uden forsuring, kunne reducere både metan- og ammoniakemissioner samtidigt uden uønskede sideeffekter.

En bemærkelsesværdig observation var den tydeligt kortvarige reduktion i metan ved tilsætning af brunalger. Dette kan indikere, at brunalger indeholder komponenter med potentiale som fremtidigt metanhæmmende virkemiddel.

Referencer

- [1] Regeringen *m.fl.*, "Aftale om et Grønt Danmark", side. 24 af 43, jun. 2024, [Online]. Tilgængelig hos: <https://regeringen.dk/media/ng3b13va/aftale-om-et-groent-danmark.pdf>
- [2] M. K. Hansen og A. K. Berg, "Modellering af ammoniakudledninger i landbruget", dec. 2023, Set: 15. november 2025. [Online]. Tilgængelig hos: https://dreamgruppen.dk/Media/638387647814477951/modellering_af_ammoniakudledninger_i_landbruget.pdf
- [3] Klima-, Energi og Forsyningsministeriet, "Klimastatus og -fremskrivning 2025, Sektorkapitel 18-32, KF25 Kapitel 18 Landbrugsprocesser", kefm.dk. Set: 14. November 2025. [Online]. Tilgængelig hos: <https://www.kefm.dk/klima/klimastatus-og-fremskrivning/klimastatus-og-fremskrivning-2025>
- [4] European Environment Agency, "Air quality in Europe 2021: Sources and emissions of air pollutants in Europe.", Report no. 15/2021, 2021. Set: 12. oktober 2025. [Online]. Tilgængelig hos: <https://www.eea.europa.eu/en/analysis/publications/air-quality-in-europe-2021>
- [5] Energistyrelsen, "Klimastatus og -fremskrivning 2022, Dataark for resultater, KF22 dataark - Landbrug". Set: 14. november 2025. [Online]. Tilgængelig hos: <https://ens.dk/analyser-og-statistik/klimastatus-og-fremskrivning>
- [6] M. N. Andersen *m.fl.*, "Virkemidler til reduktion af klimagasser i landbruget - 2023", nr. DCA rapport 220, s. side 79 af 307, 2023, [Online]. Tilgængelig hos: <https://dcapub.au.dk/djfpublikation/djfpdf/DCArapport220.pdf>
- [7] Y. Xu og M. B. Friis Nielsen, "Screening af additiver til reduktion af ammoniakfordampning fra gule i kvægstalde", SEGES Innovation, Nr. 1311, feb. 2024. [Online]. Tilgængelig hos: https://www.landbrugsinfo.dk/-/media/landbrugsinfo/public/2/1/1/efekt_additiver_reduktion_ammoniakfordampning_meddelelse_1311.pdf
- [8] C. Ma, F. R. Dalby, A. Feilberg, B. H. Jacobsen, og S. O. Petersen, "Low-Dose Acidification as a Methane Mitigation Strategy for Manure Management", *ACS Agric. Sci. Technol.*, bd. 2, nr. 3, s. 437–442, jun. 2022, doi: 10.1021/acsagst.2c00334.
- [9] W. Berg, R. Brunsch, og I. Pazsiczki, "Greenhouse gas emissions from covered slurry compared with uncovered during storage", *Agric. Ecosyst. Environ.*, bd. 112, nr. 2, s. 129–134, feb. 2006, doi: 10.1016/j.agee.2005.08.031.
- [10] L. D. M. Ottosen, H. V. Poulsen, D. A. Nielsen, J. Finster, L. P. Nielsen, og N. P. Revsbech, "Observations on microbial activity in acidified pig slurry", *Biosyst. Eng.*, bd. 102, nr. 3, s. 291–297, mar. 2009, doi: 10.1016/j.biosysteng.2008.12.003.
- [11] H. W. Ambrose, F. R. Dalby, A. Feilberg, og M. V. W. Kofoed, "Additives and methods for the mitigation of methane emission from stored liquid manure", *Biosyst. Eng.*, bd. 229, s. 209–245, maj 2023, doi: 10.1016/j.biosysteng.2023.03.015.
- [12] S. O. Petersen, A. J. Andersen, og J. Eriksen, "Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Emission during Storage", *J. Environ. Qual.*, bd. 41, nr. 1, s. 88–94, 2012, doi: 10.2134/jeq2011.0184
- [13] I. Kavanagh, O. Feron, M. G. Healy, W. Burchill, G. J. Lanigan, og D. J. Krol, "Mitigating ammonia and greenhouse gas emissions from stored cattle slurry using agricultural waste, commercially available products and a chemical acidifier", *J. Clean. Prod.*, bd. 294, s. 126251, apr. 2021, doi: 10.1016/j.jclepro.2021.126251.
- [14] S. Nolan, D. Hughes, C. E. Thorn, R. Friel, og V. O'Flaherty, "Scale-up of a peroxide-based pig slurry additive for gaseous emission reduction and downstream value retention", *Clean. Environ. Syst.*, bd. 12, s. 100157, mar. 2024, doi: 10.1016/j.cesys.2023.100157.
- [15] T. C. Chung, L. Axelsson, S. E. Lindgren, og W. J. Dobrogosz, "In Vitro Studies on Reuterin Synthesis by *Lactobacillus reuteri*", *Microb. Ecol. Health Dis.*, bd. 2, nr. 2, s. 137–144, jan. 1989, doi: 10.3109/08910608909140211.
- [16] C. Engels, H.-J. Ruscheweyh, N. Beerenwinkel, C. Lacroix, og C. Schwab, "The Common Gut Microbe *Eubacterium hallii* also Contributes to Intestinal Propionate Formation", *Front. Microbiol.*, bd. 7, maj 2016, doi: 10.3389/fmicb.2016.00713.
- [17] H. W. Ambrose *m.fl.*, "Novel Biological Approach to Mitigate Methane Emissions from Livestock Slurry through Microbial Conversion of Glycerol", *Environ. Sci. Technol.*, bd. 59, nr. 38, s. 20512–20525, sep. 2025, doi: 10.1021/acs.est.4c12999.
- [18] F. Holtkamp, J. Clemens, og M. Trimborn, "Calcium cyanamide reduces methane and other trace gases during long-term storage of dairy cattle and fattening pig slurry", *Waste Manag.*, bd. 161, s. 61–71, apr. 2023, doi: 10.1016/j.wasman.2023.02.018.
- [19] D. Reiter, S. Winkler, J. Becher, S. Seilinger, A. G. Nüchter, og B. V. Kappelsberger, "Nutrient Preservation in Cattle Slurry via Emission Reduction during Storage with Calcium Cyanamide",

ACS Agric. Sci. Technol., bd. 4, nr. 9, s. 872–881, sep. 2024, doi: 10.1021/acsag-sci-tech.4c00059.

- [20] I. W. Koster og A. Cramer, "Inhibition of Methanogenesis from Acetate in Granular Sludge by Long-Chain Fatty Acids", 1987. Set: 15. november 2025. [Online]. Tilgængelig hos: <https://journals.asm.org/doi/epdf/10.1128/aem.53.2.403-409.1987>
- [21] S. Dhakal, D. Pandey, M. E. Van Der Heide, J. V. Nørgaard, U. Vrhovsek, og P. Khanal, "Effect of different drying methods on the nutritional composition and phenolic compounds of the brown macroalga, *Fucus vesiculosus* (Fucales, Phaeophyceae)", *J. Appl. Phycol.*, bd. 36, nr. 6, s. 3649–3663, dec. 2024, doi: 10.1007/s10811-024-03343-6.
- [22] M. R. Winfrey og D. M. Ward, "Substrates for Sulfate Reduction and Methane Production in Intertidal Sediments", *Appl. Environ. Microbiol.*, bd. 45, nr. 1, s. 193–199, jan. 1983, doi: 10.1128/aem.45.1.193-199.1983.
- [23] FarmTest Rapport nr. 41 sep 2009. Set: 8. december 2025. [Online]. Tilgængelig hos: https://www.biocover.dk/CustomerData/Files/Folders/1025-pdf-diverse/4297_farmtest-nr-66-gyl-leforsuring-i-kvgstalde.pdf

Deltagere

Tekniker: Thomas Lund Sørensen
Statistikker: Claus Vestergaard

Afprøvning nr. 2030

BC-nr.: 108563

//LATO//

Dyregruppe:
Fagområde:
Nøgleord:

Foreløbig

Appendiks

A: Billeder

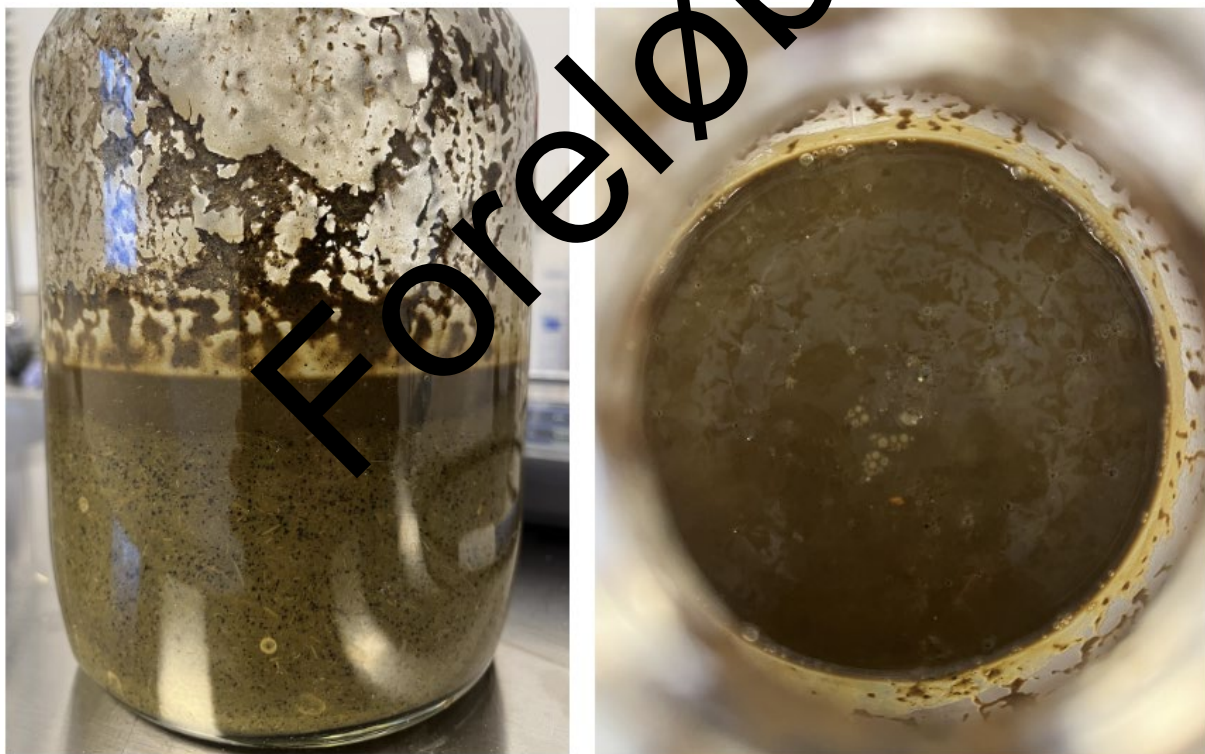
Billeder taget ved forsøgsafslutning på Grønhøj Forskningsstation den 13/10/2025:

Svovl



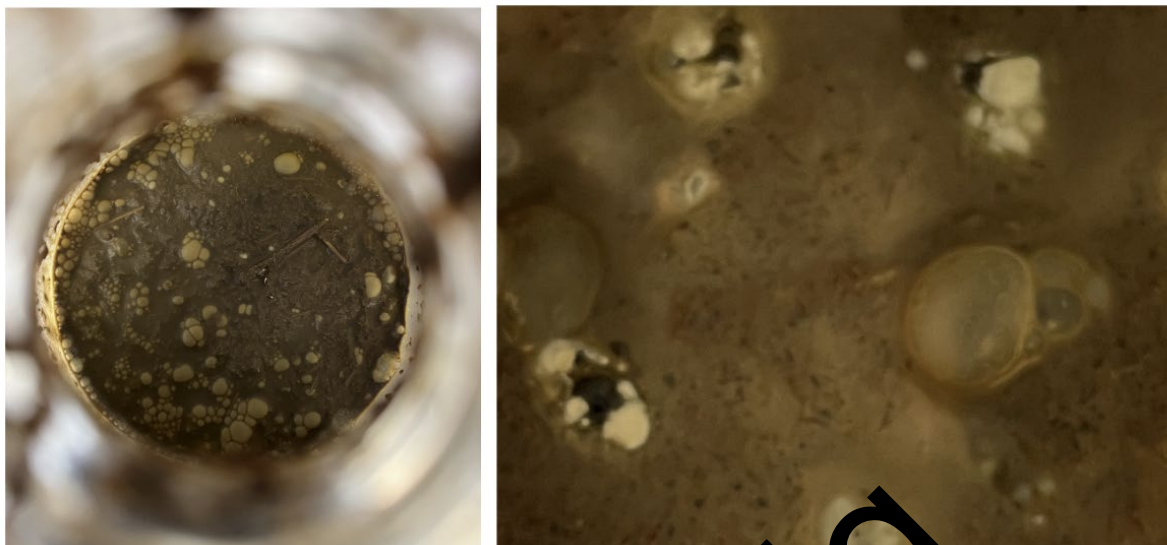
Figur 5: Billede taget af overfladen af gylle i flasken med svovlsyre-behandling ved forsøgsafslutning.

GasAbate



Figur 6: Billede taget af GasAbate-behandling i Duran-flaske ved forsøgsafslutning. Til venstre ses lagdeling og til højre ses overfladen.

Kontrol:



Figur 7: Billede taget af kontrol (ubehandlet gylle) i Duran-flaske ved forsøgsafslutning. Til venstre ses overfladen, hvor til højre ses der et close-up af gyllen i flasken.

B: pH i forskellige lag for behandlingerne

Dato	Behandling	Kontrol 1,2,3	Svovl 1,2	Eminex 1,3	GasAbate 1,2,3	Glycerol 1,2	Eminex + svovl	Brun- alger
13.10 2025 08:00	Øverste 1 cm af fla- sken	1: 7,5 2: 7,6 3: 7,6	1: 4,2 2: 5,6	1: 8,3 2: 8,3 3: 8,3	1: 7,8 2: 7,9 3: 8,2	1: 7,5 2: 7,5	8,4	7,4
13.10 2025 08:00	Midt i fla- sken	1: 7,5 2: 7,4 3: 7,4	1: 4,9 2: 5,4	1: 8,3 2: 8,2 3: 8,1	1: 7,3 2: 7,7 3: 7,1	1: 6,8 2: 6,9	8	7,2
13.10 2025 08:00	Nederst i flasken	1: 7,1 2: 7,2 3: 7,1	1: 4,9 2: 5,2	1: 7,3 2: 7,2 3: 7,3	1: 7 2: 6,8 3: 6,9	1: 6,7 2: 6,7	6,5	6,8

Tabel 5: Viser pH-udviklingen for alle behandlinger ved forsøgsafslutning den 13.10.2025 målt toppen, midten og bunden af flaskerne.

C: Målerunde 1, Kontrolrunde (målerunde 2), CO₂ og neddyk i data fra målerunde 3

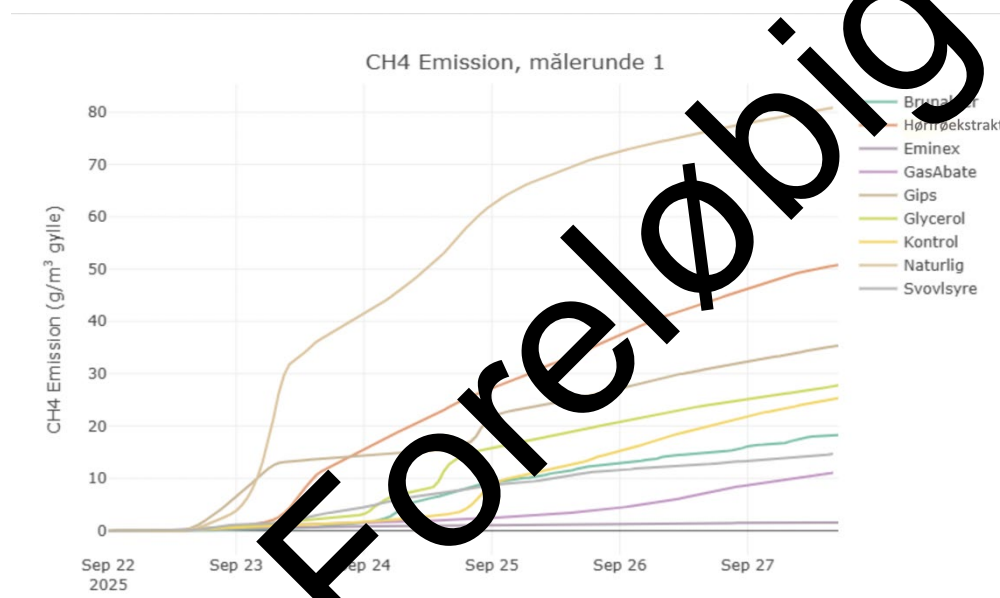
Målerunde 1

Den første målerunde fungerede som pilotforsøg og dannede grundlag for fravalg af additiver, samt justeringer af forsøgsopstillingen. Målerunde 1 omfattede 10 behandlinger, hvor kvæggylle blev indsamlet, fordelt i flasker og tilsat additiver samme dag.

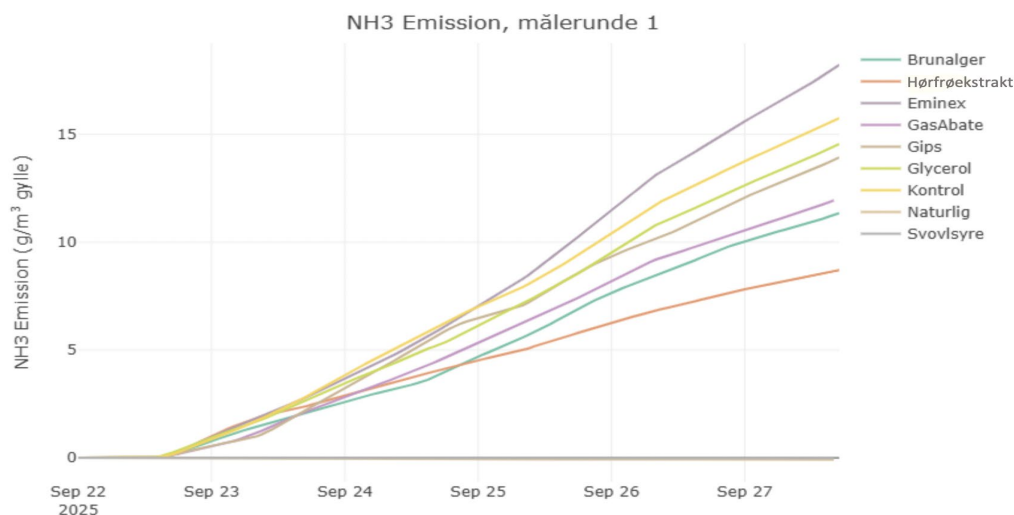
I løbet af målerunde 1 blev flere udfordringer tydelige, som begrænsede datakvaliteten. Håndtering og tilsætning af gylle og additiver viste sig, især for svovlsyre, at være mere komplekst end forventet, da omrøring af flaskerne var vanskelig. Mere kritisk var det ustabile luftflow gennem flaskerne, hvilket krævede omfattende kalibrering af flow – både for det samlede system, for de enkelte flasker, og for den supplerende baggrundsluft mod Picarro'en. Enkelte flasker viste stor drift i flowet fra dag til dag, hvilket kunne give forskelle i de individuelle målinger, samt påvirke det resterende systems flow.

På trods af disse udfordringer kunne tydelige tendenser observeres for flere behandlinger, hvilket gjorde det muligt at kvalificere de mest lovende additiver. På baggrund af metan målingerne blev naturlig forsurening, høfrøekstrakt og calciumsulfat fravalgt, da disse viste højere metanemissioner end kontrol (Figur 8). Glycerol fulgte nogenlunde samme metanemissionsniveau som kontrol, og blev derfor ikke sorteret fra (Figur 8). Ammoniakmålingerne viste, at Eminex havde højere emission end kontrol (Figur 9), sandsynligvis som følge af højere luftflow, da ammoniakfordampning er stærkt afhængig af luftudskiftning over gylleoverfladen, mens de øvrige behandlinger reducerede ammoniakfordampningen (Figur 9).

De resterende additiver, svovlsyre, GasAbate, glycerol, Eminex og brunalger, blev udvalgt til videre undersøgelse med justeringer af forsøgsopstillingen for at opnå mere stabilt luftflow, tilføjelse af pH-målinger og ekstra gentagelser for GasAbate, Eminex og kontrol.



Figur 8: Kumulative metanemissioner over tid for de forskellige behandlinger i målerunde 1. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.



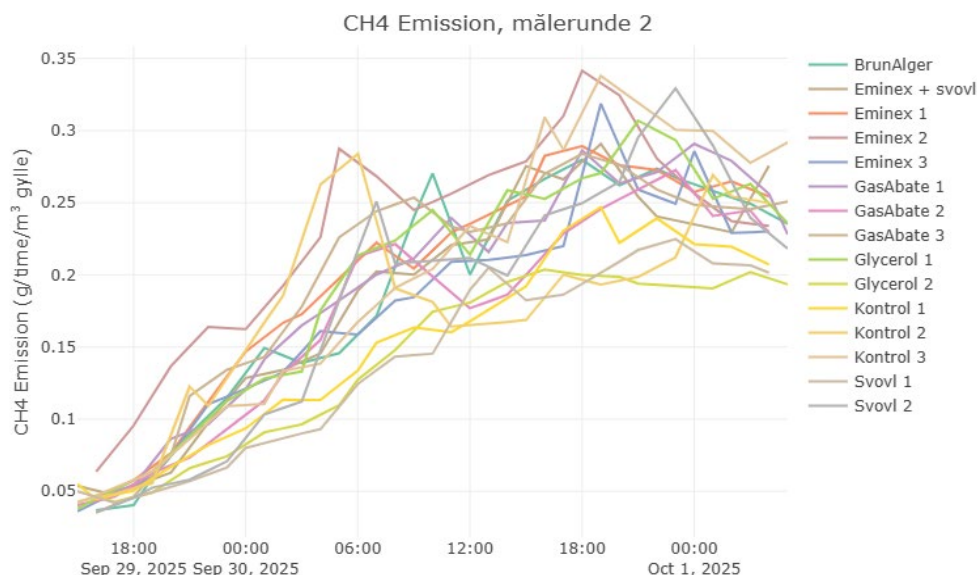
Figur 9. Kumulative ammoniakemissioner over tid for de forskellige behandlinger i målerunde 1. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.

Kontrolrunde

I kontrolrunden blev ventilationssystemet stabiliseret, men der var fortsat variation mellem flaskerne samt drift i luftflowet på enkelte enheder. Formålet med denne rund var at få et bedre overblik over den naturlige variation i emissioner mellem flaskerne, samt effekten af forskelligt luftflow.

Ammoniakfordampning er stærkt afhængig af luftens bevægelse over gyllens overflade, og det var derfor forventet, at flasker med højere flow ville vise højere ammoniakemissioner (Appendix D+E). Den samme sammenhæng gør sig ikke gældende for metanproduktion, som bør være uafhængig af luftflow. Dette blev bekræftet i kontrolrunden (Figur 10 og Appendix E). Data blev herefter anvendt til at fordele behandlinger i målerunde 3, så gennemsnitsflowet for hver behandling tilnærmede sig systemets samlede gennemsnits-flow.

Da den varierende ventilation ikke påvirkede produktionen af metan, anvendtes metanemissionen til at vurdere naturlig variation mellem flaskerne (Figur 10). Den observerede variation var ikke overraskende, da biologiske systemer typisk varierer. En detaljeret vurdering af målepunktet den 30. september 2025 kl. 18 viste en gennemsnitlig emission på 0,262 g metan/time/m³ gylle, med minimum og maksimum på hhv. 0,194 og 0,342 g metan/time/m³ gylle. Standardafvigelsen var 0,041 og variationskoefficienten 15,7 %. Dette understregede behovet for tydelige og konsistente tendenser i data for at kunne konkludere, om et additiv har en signifikant effekt.



Figur 10: Koncentrationer af metan emission pr. flaske for kontrolrunde. I kontrolrunden var der ikke tilsat additiver i flaskerne, og dermed ses den naturligt forekommende variation fra indholdet i flaskerne. Navngivningen af graferne er på baggrund af tildelingen af additiver i målerunde 3.

Kuldioxidemissioner som indikator for mikrobiel aktivitet

Den relative kumulative CO₂-emission fremgår af Figur 11 og anvendes her som indikator for den generelle mikrobielle aktivitet i gyllen. Svovlsyrebehandlingen reducerede CO₂-emissionerne markant, hvilket indikerer en bred hæmning af mikrobielle processer. Eminex og GasAbate reducerede ligeledes CO₂-emissionerne, omend i mindre grad, hvilket understøtter, at disse additiver hæmmer specifikke mikrobielle processer relateret til metanproduktion. BrunAlger og glycerol viste CO₂-emissioner på niveau med eller over kontrol, hvilket er foreneligt med meget mikrobiel omsætning, og forklarer den observerede stigning i metanemissioner for disse behandlinger.



Figur 11: Relativt kumulative kuldioxidemissioner over tid for de forskellige behandlinger i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle og reference, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.

Kuldioxidemissioner som indikator for mikrobiel aktivitet

Nedenfor ses tabeller der viser %-emission i forhold til kontrol på bestemte tidspunkter i forsøget for metan og ammoniak.

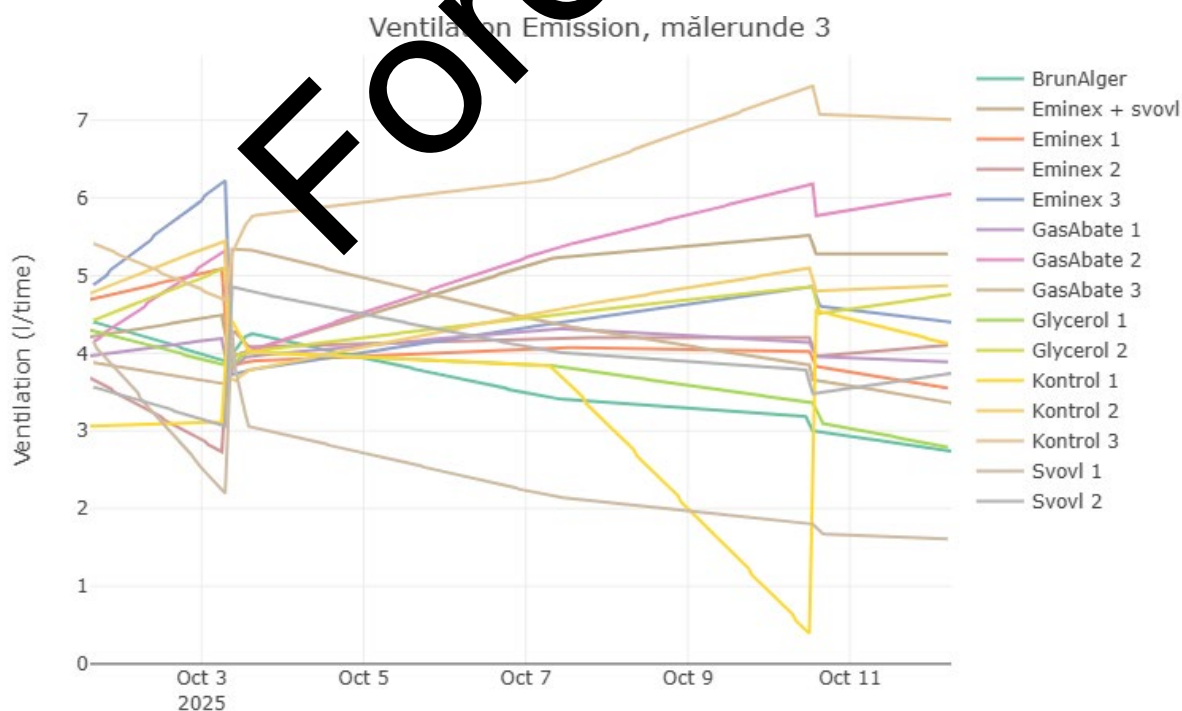
Behandling	Dag 1 (%)	Dag 3 (%)	Dag 7 (%)
Svovlsyre	9,4	2,9	2,2
GasAbate	12,7	13,8	18,2
Glycerol	165,7	123,3	106,3
Eminex	17,8	8,9	6,7
Eminex + svovlsyre	14,8	4,4	2,4
Brunalger	26,5	116	98,8
Kontrol	100	100	100

Tabel 6: Oversigtstabel over relativ kumuleret emission pr. behandling til kontrollen for CH_4 i målerunde 3. Procenterne viser reduktion eller stigning af CH_4 -emission til kontrollen, som er 100 %. Dag 1 er den 3. oktober 2025, dag 3 er 5. oktober og dag 5 er den 7. oktober 2025.

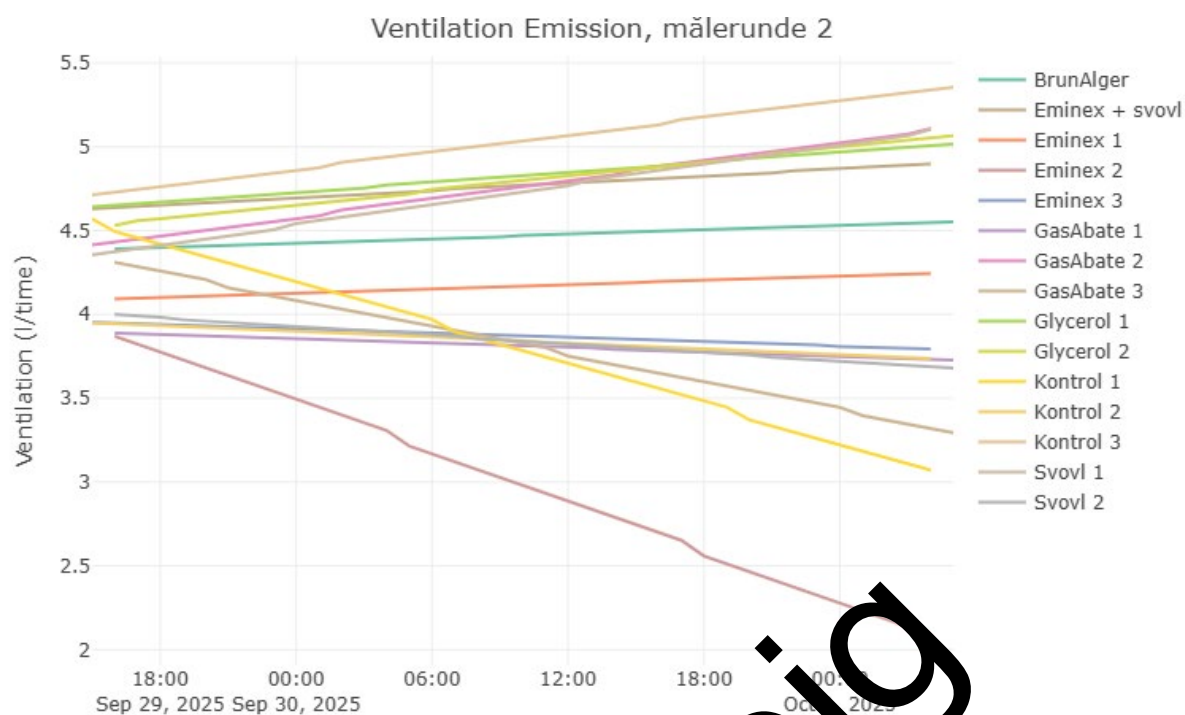
Behandling	Dag 1 (%)	Dag 3 (%)	Dag 7 (%)
Svovlsyre	1,2	0	0
GasAbate	96	106	106,8
Glycerol	82	68,5	65,4
Eminex	90,8	97,3	100
Eminex + svovlsyre	12,5	25,1	33,7
Brunalger	73,8	100	66,5
Kontrol	100	100	100

Tabel 7: Oversigtstabel over relativ kumuleret emission pr. behandling til kontrollen for NH_3 i målerunde 3. Procenterne viser reduktion eller stigning af NH_3 -emission til kontrollen, som er 100 %. Dag 1 er den 3. oktober 2025, dag 3 er 5. oktober og dag 5 er den 7. oktober 2025.

D: Ventilation

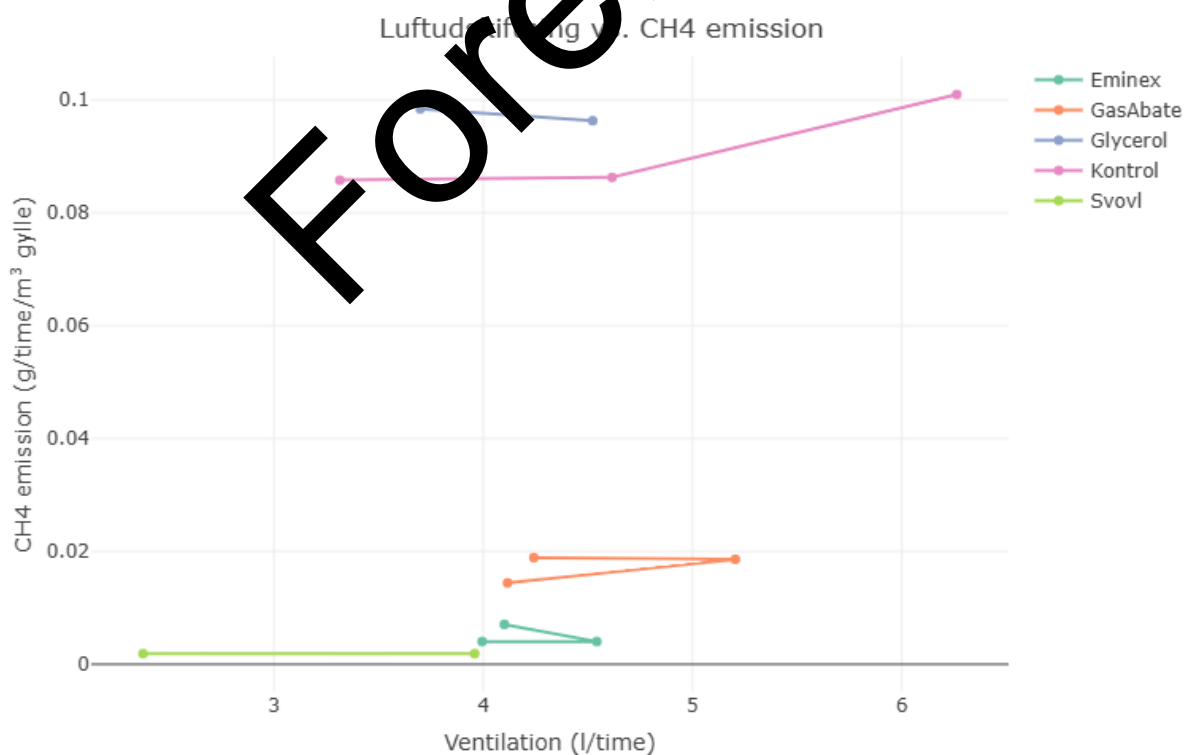


Figur 12: Ventilation for de forskellige behandlinger i l/time i målerunde 3.

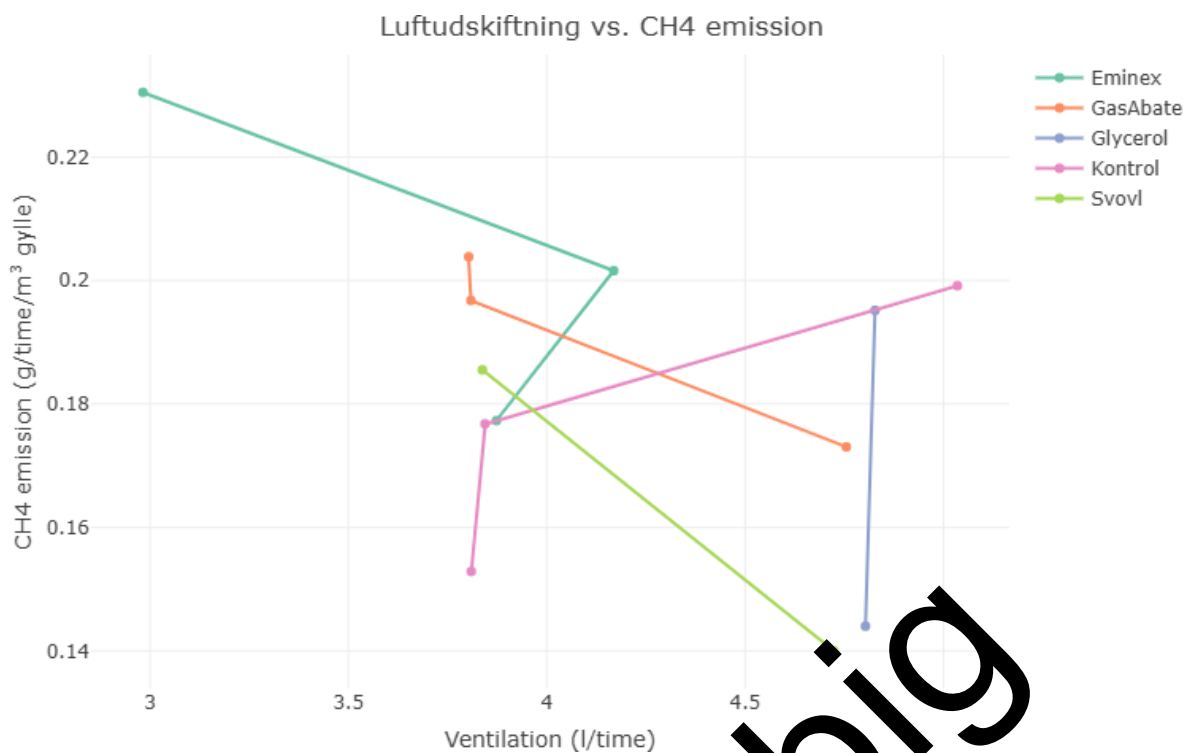


Figur 13: Ventilation for de forskellige behandlinger i l/time i kontrolrunde.

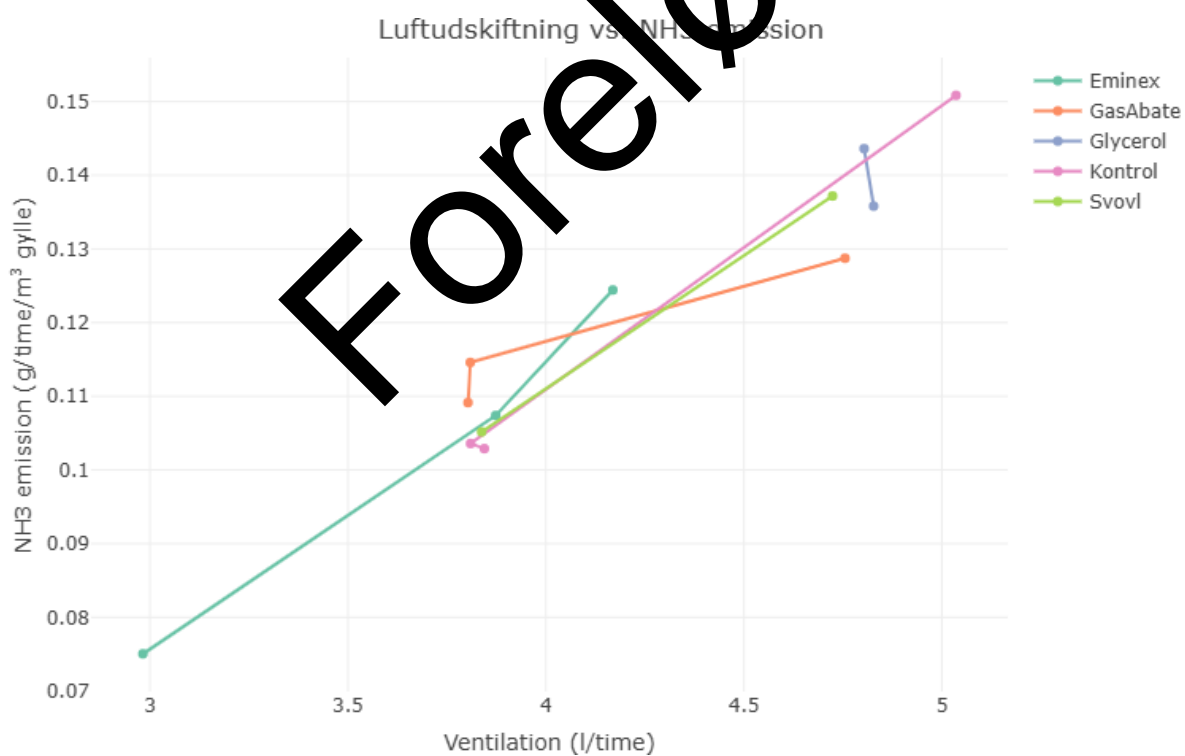
E: Luftudskiftning



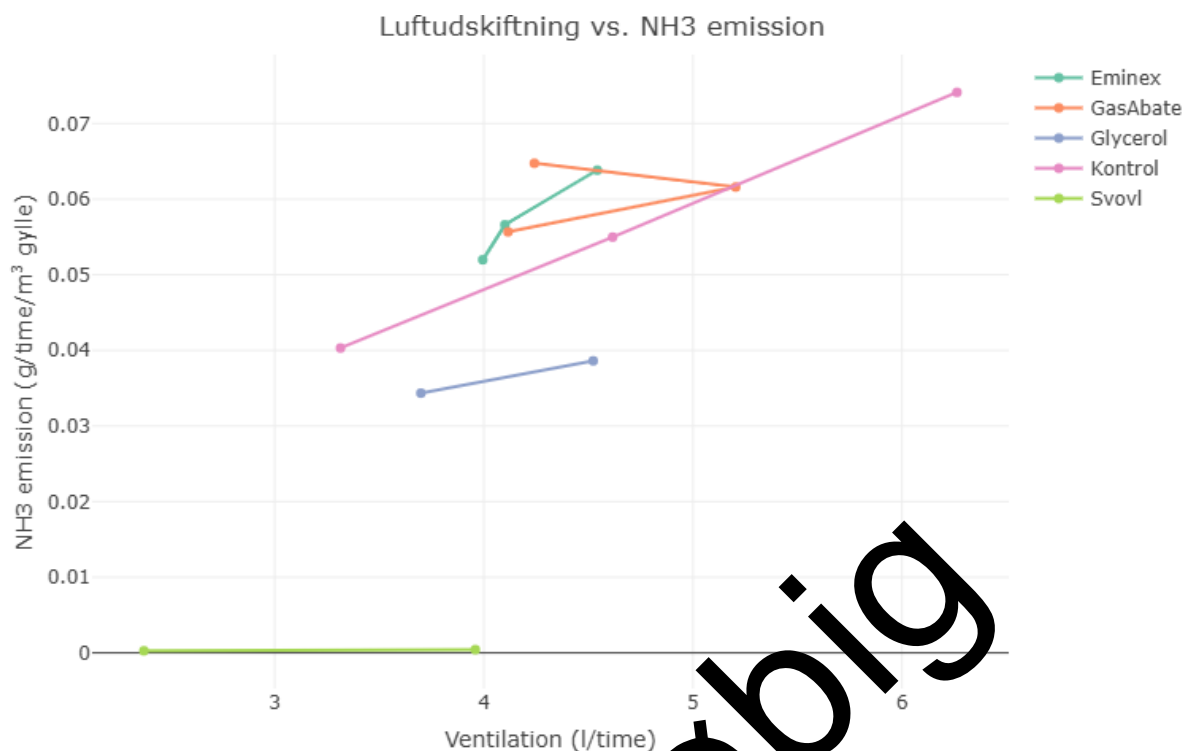
Figur 14: Gennemsnits-metanemission (g/time/m³ gylle) mod gennemsnitsventilation på flaskeniveau igennem målerunde 3.



Figur 15: Gennemsnits-metanemission (g/time/m³ gylle) mod gennemsnitsventilation på flaskeniveau igennem kontrolrunde.

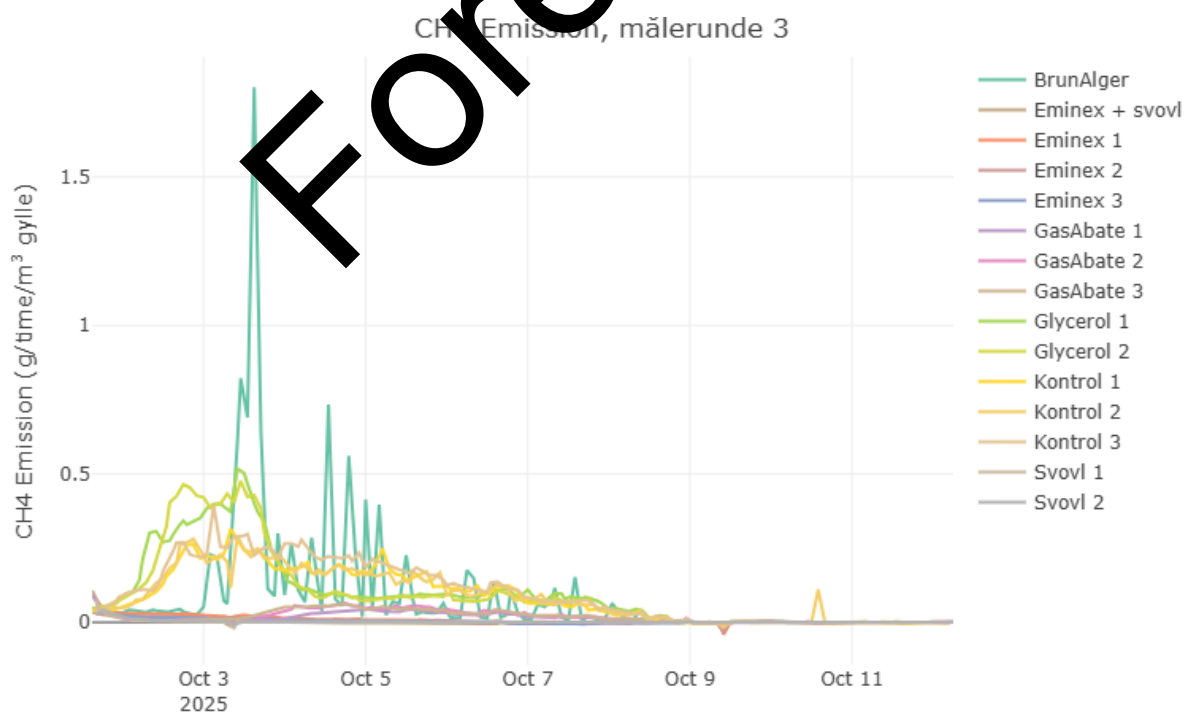


Figur 16: Gennemsnits-ammoniakemission (g/time/m³ gylle) mod gennemsnitsventilation på flaskeniveau igennem kontrolrunde.

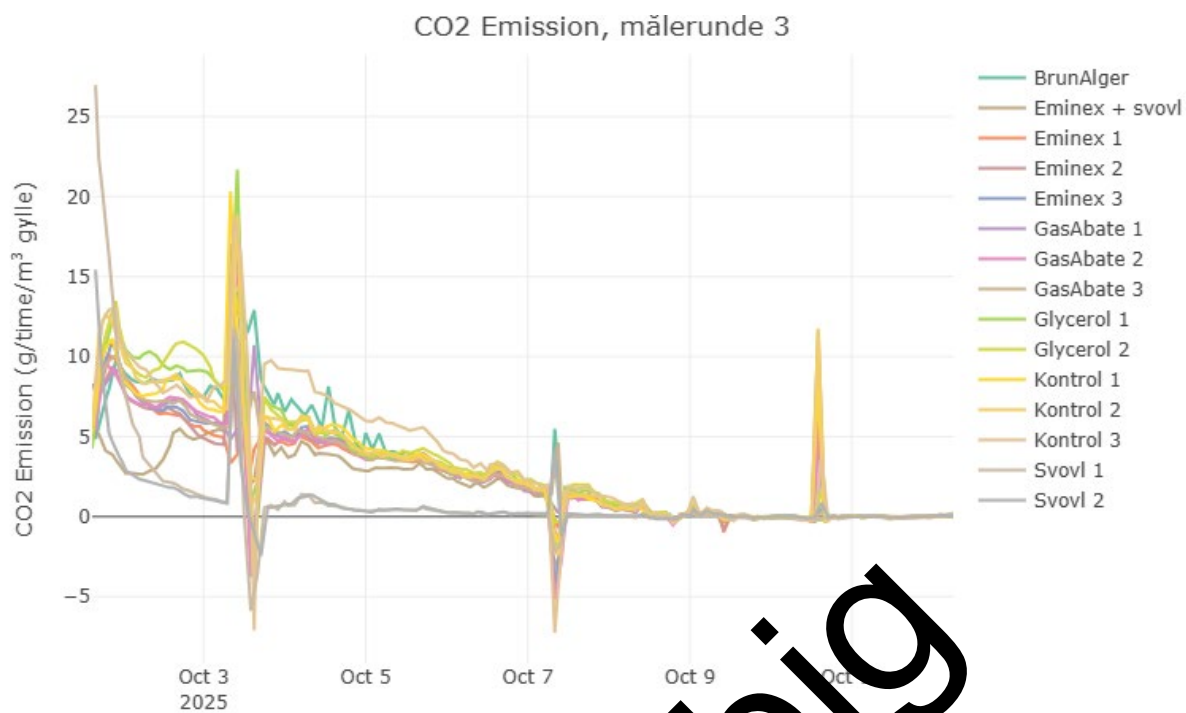


Figur 17: Gennemsnits-ammoniakemission (g/time/m³ gylle) mod gennemsnitsventilation på flaskeniveau igennem målerunde 3.

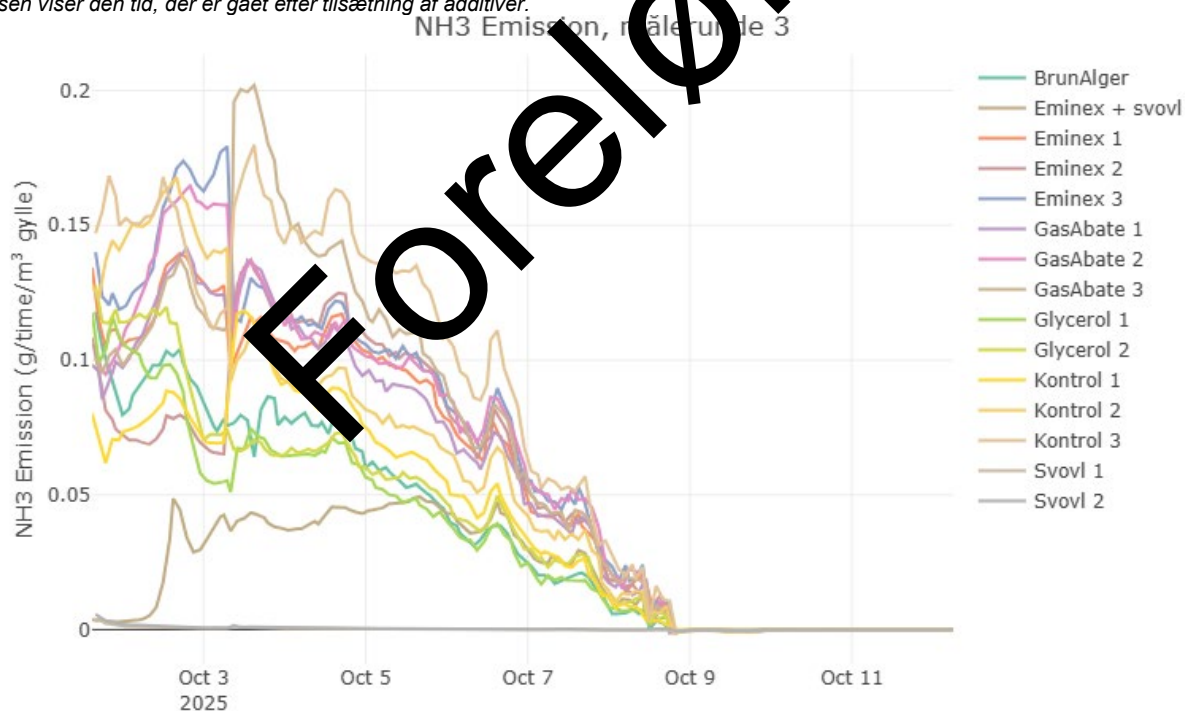
F: Emissioner pr. flaske og gennemsnit for hver behandling i målerunde 3



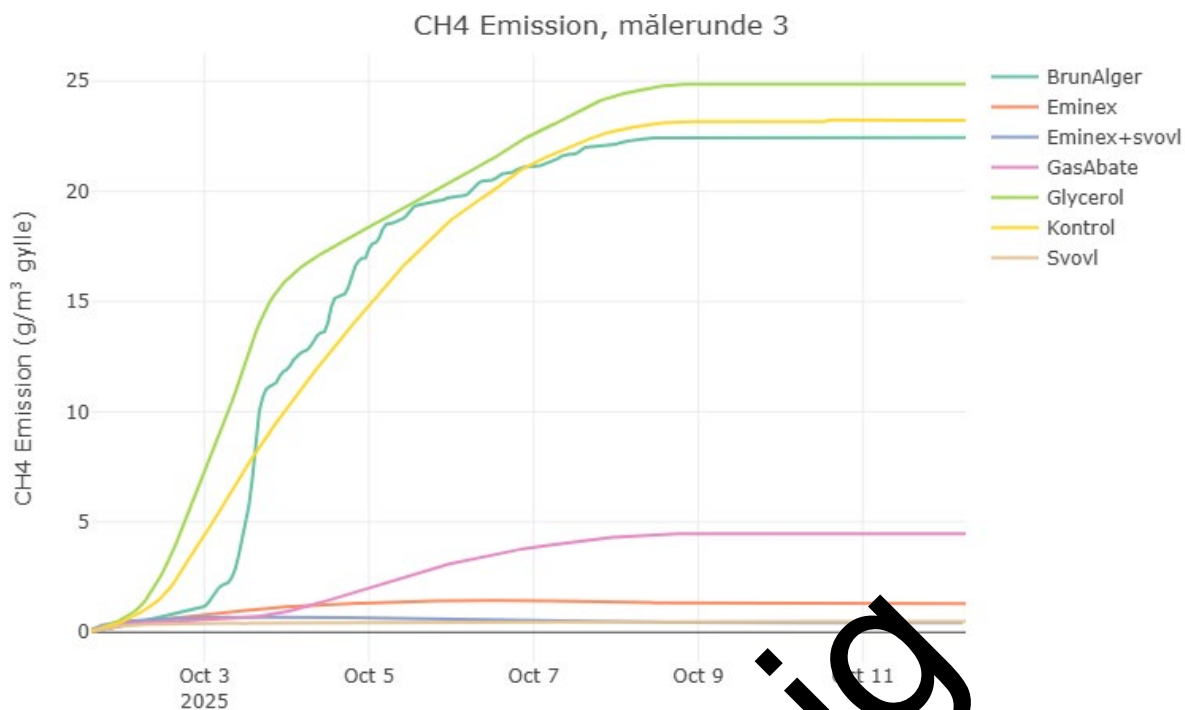
Figur 18: Metanemission pr. flaske i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.



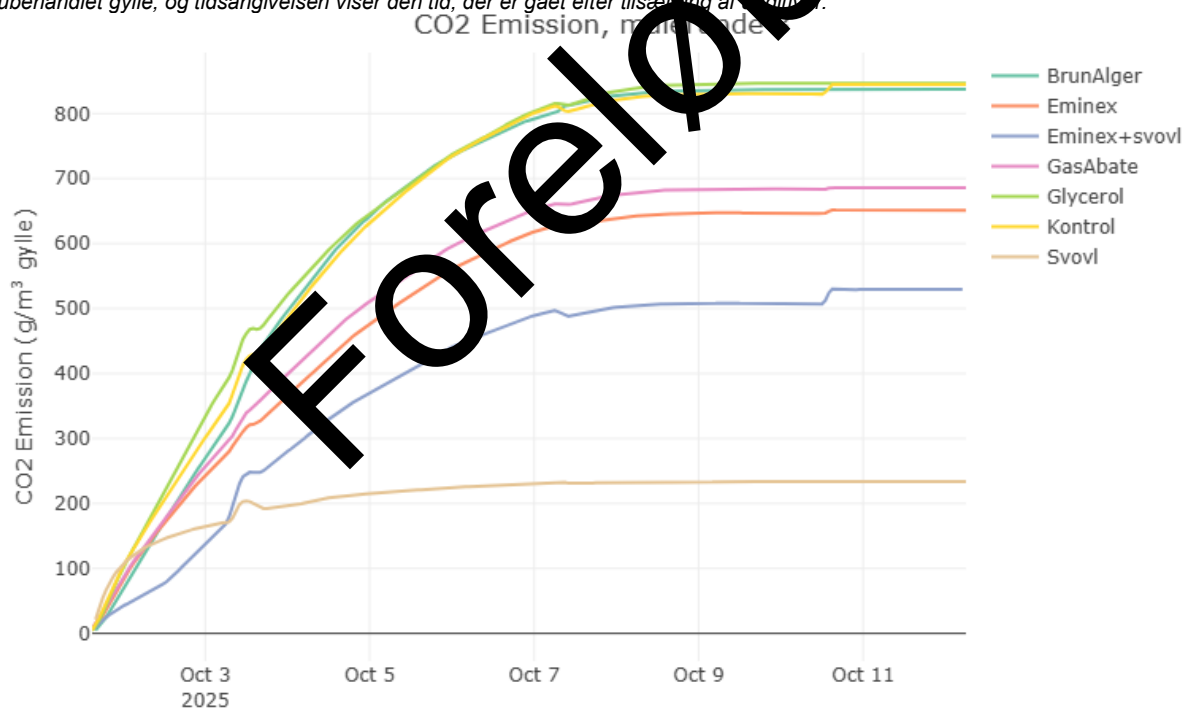
Figur 19: Kuldioxidemission pr. flaske i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.



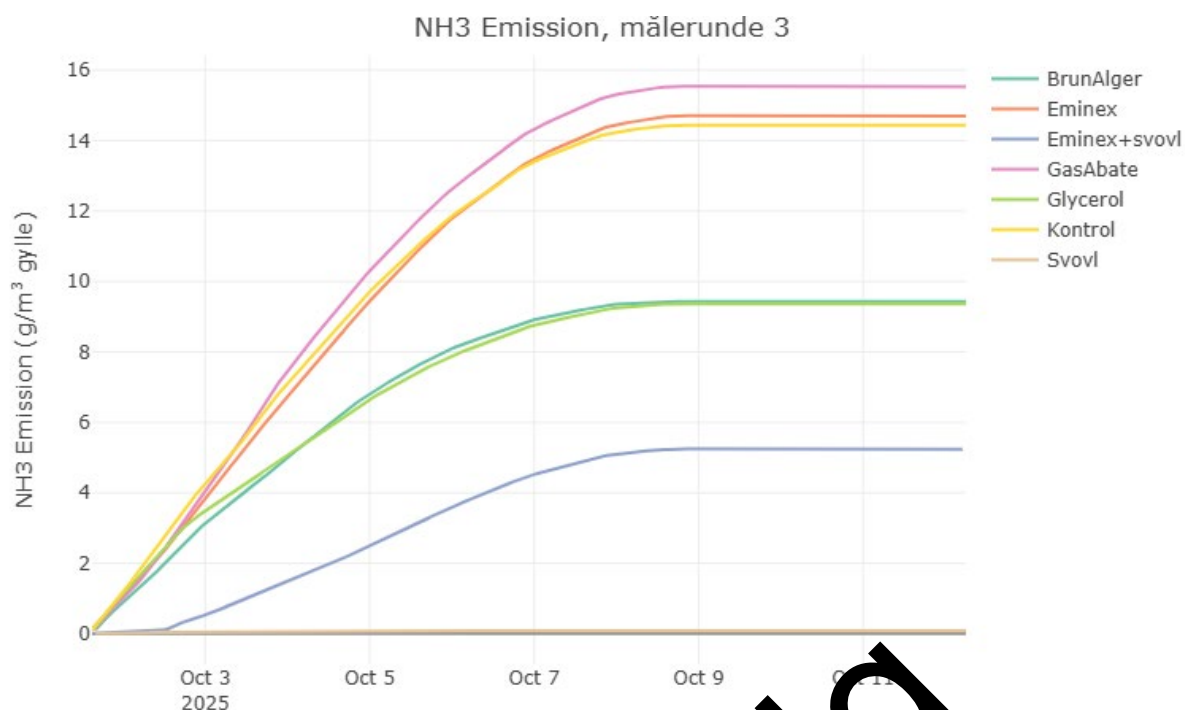
Figur 20: Ammoniakemission pr. flaske i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiver.



Figur 21: Metanemission pr. behandling (gennemsnit af replikationer) i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiv.



Figur 22: Kuldioxidemission pr. behandling (gennemsnit af replikationer) i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilsætning af additiv.



Figur 23: Ammoniakemission pr. behandling (gennemsnit af replikationer) i g/time/m³ gylle i målerunde 3. Kontrollen repræsenterer ubehandlet gylle, og tidsangivelsen viser den tid, der er gået efter tilføjelse af additivet.

F: Tabel fra litteraturstudie

Additiver	Eksperimentelle betingelser	Tilsat mængde	Ammoniak reduktion	Metan reduktion	Reference
Svovlsyre	Svinegylle, forsøg med forsuringsanlæg, 20 dage	Til pH ramte 5,5	>98%	>98%	Ottosen et al., 2009
Svovlsyre	Kvæggylle, pilot 120 L gylle, 120 dage	2,4 L/m ³ pH 5,9	66%	84%	Habtewold et al. 2018
Svovlsyre	Kvæggylle, stor-skala 1,1 m ³ , 12 dage.	Til pH ramte 5,5	75%	61%	Misselbrook et al. 2016
Melasse	Kvæggylle, laboratorium 1,6 L gylle, 70 dage	5%	67 %	Ingen	Kavanagh et al., 2021
GasAbate	Svinegylle, stald 750 L gylle, 30 dage	0,87 g/kg gylle	Først stigning, derefter 40%	75 %	Nolan et al. 2024
Glycerol	Svinegylle, overdækkede tanke, 32 dage	6 g/kg	Ingen effekt	67%	Ambrose et al., 2025
Hørfrø ekstrakt	Foderadditiv, køer, 27 dage	1 kg/ko/dag	Ikke angivet	46 %	Broudiscou et al., 2023
Eminex	Kvæggylle, laboratorie 500 g gylle, 26 uger	1,24 g/kg gylle og 2,07 g/kg gylle	69%	99%	Holtkamp, 2023;
Eminex	Kvæggylle, 8 kg gylle, 126 dage	2,2 g/kg gylle	Stiger med 456%	Maks 95,7%, aftager efter 100 dage og total reduktion på 90%	Reiter et al., 2024
Eminex	Kvæggylle, 180 L gylle, 3 måneder	3 kg/m ³ gylle	Stigning 33%	88,8%	Zentner et al

Savtang (Fucus serratus)	Foderadditiv, vommen	Ikke specificeret eller testet	Ikke specificeret	Op til 50% i vom	Thorsteinson, 2023; Pandey, 2022
Gips	Kvæggylle, laboratorie, 162 dage	Testet med 100, 1000, 5000 og 10000 g/L gylle	Ikke undersøgt	100 g/L: ingen; 1000 g/L: 20%; 5000 g/L: 60%; 10000 g/L: 63%	Sauvé, 2025
Peroxidbaserede additiver (Urea Hydrogen Peroxid, UHP + Potassium Iodide, KI)	Kvæggylle, laboratorie, 12 kg gylle, 28 dage	0–1,27 mg/g	Behandlet gylle viser en kortvarig NH ₃ -stigning ved dosering, men giver samlet en netto reduktion over 23 dage og øger ammonium-N med ca. 12% i gyllen	Lave doser: ingen; 1,12 mg/g: 32%; 1,27 mg/g: 26%	Thorn et al., 2022;
Peroxidbaserede additiver (UHP + KI, SPC+KI og HP+KI)	Kvæggylle, laboratorie, 1,6 kg gylle, 40 dage	Undersøger forskellige peroxider. Tilsætter HP: 3,79 g + KI 0,427 g	UHP+KI: +209%, SPC+KI: +42%, HP+KI: ingen	UHP+KI: 64%, SPC+KI: 39%, HP+KI: 63%	Connolly et al., 2023
Valle	Kvæggylle, laboratorie, 1 L gylle, 10 dage	342,73 g/L, 100% én gang eller 10% ×10	Reducerede metan med 88% når 100% tilsættes og 53% når 10% tilsættes 10 gange.	Reducerede metan med 33% når 100% tilsættes og 53%, når 10% tilsættes 10 gange.	Gioelli et al., 2002;
Sheameal (SME) og kastanje (CT)	Svinegylle, laboratorie, 80 g gylle med daglig tilføjelse, 4 uger	SME doser var 1:11 med og uden NaF, men CT blev testet ved 2,6, 4,25 og 8,5 mg/mL	SME: 45%, SME+NaF: 52%, CT 2,6 mg/mL: 17–29%, 4,25: 40–49%, 8,5: 49%	SME: 72%, SME+NaF: 88% CT 2,6 mg/mL: 48–55%, 4,25: 70–72%, 8,5: 81%	Vazifehkhoran et al., 2024
Tannic acid and sodium fluoride	Svinegylle, lab 200 mL gylle, 4 uger	Laveste dosis var 4,25 g TA/L +0,042 NaF, højeste var 17 g TA /L +0,042 NaF og midterste dosis var 8,5 g TA/L +0,042 NaF	Laveste dosis reducerede med 28%, mellem dosis med 57% og højeste med 97%	Laveste dosis øgede metanproduktion, mellem reducerede med 70% og højeste med 80%	Dalby et al., 2020;