

Analyse af 22 projekter / artikler med lavdosis Beholder forsuring fra 2012 til 2024

Forberedt til Arla Foods for inkludering af lav dosis beholderforsuring i Arla Foods klimakontrolmodel



SyreN-Changes: Brug af sulfat som hæmmer for metan emission i gylle lagertanke.



Af Morten Toft, BioCover 06.12.2025 – Version 3

Dokumentation tilgængelig: <https://www.biocover.dk/uk/articles/articles-from-research.aspx>

Ledelsesresumé

SyreN-systemet, udviklet af BioCover (Danmark), er en mobil og fleksibel gylle-forsuringsteknologi designet til både *forsuring af gylle i marken* og til *lavdosis forsuring i gylletanke til inhibering af metan*. Oprindeligt bygget til at reducere ammoniaktab (NH_3) under gyllespredning, er systemet nu dokumenteret også at levere betydelige metanreduktioner (CH_4), når det omrøres in gylle lagertanke.

Vigtige miljømæssige fordele:

- Metanreduktion: 70–95% afhængigt af forholdene, svarende til ~23–30 kg CO_2eq sparet pr. m^3 slurry i den varme sæson.
- Ammoniakreduktion: 16-25 %, der bevarer kvælstof i slurry som ammoniumgødning ved lav dosering.
- Kvælstofeffektivitet: Bevarer ~10–15 kg N pr. ha under anvendelse i marken.
- Skalerbart potentiale: Hvis Danmarks årlige slurryvolumen på 35 millioner m^3 behandles, svarer det til 0,8–1,05 millioner tons CO_2eq , der undgås årligt. Forsuring i marken over 1,6 millioner ha bevarer ~16.000 tons N som ammonium.

Økonomisk perspektiv:

- Inputomkostningerne er beskedne: ~€681–€1.242 pr. tank (2.000–6.000 m^3) for lavdosisforsuring.
- Arla Climate Check-tilskuddet giver et lille incitament (~€65–€194 pr. tank).
- CO_2 -kreditter på €17,5 pr. ton CO_2eq skaber stærk rentabilitet (€805–€2.415 pr. tank).
- Forsuring i marken giver væsentlig indtægt (udbyttetigninger på €9.768–€29.600 pr. tank).
- Samlet giver systemet et robust positivt nettoafkast.

Teknologi og sikkerhed:

- Svovlsyre undertrykker metanogen archaea gennem sulfatkonkurrence, sulfidtoksicitet og lav pH.
- Forsuring skal håndteres omhyggeligt på grund af risikoen for H_2S -gasudslip og potentiel betonkorrosion i tanke ved høje doser. Lav dosis (1,2 L/ m^3) undgår disse risici, samtidig med at den opretholder en stærk metan reduktion.
- Det mobile system integreres med eksisterende slurrytank- og mixer-opsætninger og kan anvendes med minimal ekstra investering.

Marked og Adoption:

- Allerede taget i brug i 7 lande med VERA-, ETV- og EU-BAT-certificering.
- I overensstemmelse med EU's NEC– Habitat- og Vand-rammedirektiver samt klima- CO_2eq -reduktioner
- Støttet af købsincitamenter i - 80% i Sverige, 40% i Tjekkiet).
- Forsuring eller injektion Obligatorisk ved brug af slurry på sommergræs i Danmark
- Vedtaget i Tyskland ren luft-lovgivning
- Anerkendt med Solar Impulse Efficient Solution Label.

Konklusion:

SyreN Changes-systemet kombinerer *lavdosis-beholderforsuring* og *forsuring i marken* til en dobbeltfunktion, meget omkostningseffektiv løsning. Det reducerer konsekvent metan- og ammoniakudledningen samtidig med at det forbedrer kvælstofudnyttelsen. Med CO_2 -kreditter og øgede udbytte i marken som indkomst bliver det en profitabel praksis for landmænd, samtidig med at klima- og luftkvalitetsmål adresseres.

Afsnitstitel	Side
Ledelsesresumé	2
Indholdsfortegnelse	3
Teknologibeskrivelse	5
Videnskabelig dokumentation	15
Klima- og luftkvalitetspåvirkning	16
Økonomisk analyse	17
Miljøpotentiale fra SyreN-systemet + Ændringer	24
SyreN-systemets genkendelse og udbredelse	24
Dokumentation – e-missioN System	27
Fremtidsudsigter	28
Resumé af artikler	29 - 63

Effekter af forsuring under opbevaring på emissioner af metan, ammoniak og hydrogensulfid fra fordøjet svineslurry (Wang et al., 2014)

Svovlomsætning og emissioner under opbevaring af kvægslurry: virkninger af forsuring og tilsætning af svovl (Petersen et al., 2012)

Ændringer i metanogene samfund og emissioner af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet svineslurry (Petersen et al., 2014)

Effekt af slurryforsuring på udledninger af ammoniak, lattergas og metan (Petersen et al., 2012, præsentation)

Forsuring af dyreslurry – en anmeldelse (Fangueiro et al., 2015)

Tilsætningsstoffer og metoder til at mindske metanudledning fra lagret flydende gødning (Ambrose et al., 2023)

Ammoniak- og drivhusgasemissioner fra slurry-lagring – En gennemgang (Kupper et al., 2020)

Ændringer i metanogen samfund og emissioner af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet svineslurry (Petersen et al., 2014)

Effekt af lavdosisforsuring af slurry-digestate på ammoniakemissioner efter feltanvendelse (Pedersen & Nyord, 2023)

Effekter af forsuring af kvægslurry på ammoniak- og metanudvikling under opbevaring (Petersen et al., 2012)

Fuldskala undersøgelse af methan- og ammoniakreduktion ved tidlig enkeltdosis forsuring af slurryopbevaring (Lemes et al., 2022)

Drivhusgasudledninger fra flydende mælkegødning: Forudsigelse og afbødning (Petersen, 2018)

Drivhusgas- og ammoniakemissioner fra slurrylagring (Misselbrook et al., 2016)

Forsuring af lavdosis gyllelagring: Reduktion af emissioner og klimapåvirkning

Lavdosisforsuring som metanafbødningsstrategi til håndtering af gødning (Ma et al., 2022)

Forvaltning af laguner og opbevaringsstrukturer for mælkegødning (Chastain & Henry)

Metanudledninger fra opbevaring af flydende mælkegødning (Cárdenas et al., 2021)

Afbødning af NH_3 - og drivhusgasudledninger fra lagret kvægslurry (Kavanagh et al., 2021)

Afbødning af metan- og lattergasudledninger fra dyreproduktion: II. Gødningshåndtering (Montes et al., 2013)

SyreN Changes – Verdensalliance-løsning (ID10488 - 2019)

CENURGI-projektet (2024)

Poster: SyreN Changes – AgriFoodture (M Toft – 2024)

Teknologibeskrivelse

SyreN-systemet, udviklet af BioCover (Danmark), er en mobil, pH-kontrolleret forsuringsteknologi designet til gylleforsuring som Mark forsuring. Systemet doserer svovlsyre (H_2SO_4) i præcise mængder for at sænke gylle pH og tilsætte sulfat som gødning. I sin oprindelige funktion er der en drivhusgaseffekt (drivhusgas) ved substitution af mineralsk kvælstof, mindre brændstofforbrug (ingen injektion) og en reduktion i N_2O ved brug af ammoniumgødning i stedet for mineralsk nitrat (denitrificering). Specifikation og detaljer i en separat dossier.

SyreN-systemet muliggør dosering og overvågning i realtid, hvilket gør det muligt for landmænd at matche syreinput til den faktiske bufferkapacitet i slurryen og behovet for svovl. Systemet kan monteres på slurrytankvogne og giver en fleksibel og skalerbar løsning på tværs af forskellige landbrugsforhold.

Derudover, og meget vigtigt, er den fleksibel brug efter klimaforhold og afgrødernes behov for svovlgødning. Ikke alle gylle anvendelsesscenarier har høj emission. På dage med høj luftfugtighed, lav temperatur og ingen vind er der ingen grund til bekymring for ammoniakudledninger, og behovet for at sænke pH for at undgå emissioner kan tilpasses behovet for svovl til afgrøder. På dage med lav luftfugtighed, høje temperaturer og blæsende forhold er der god grund til at forvente +30 % tab af gylle ammonium kvælstof i forbindelse med udbringning. På sådanne dage skal syredoseringen justeres efter en pH på min. 6,4

SyreN-systemet får nu en ny anvendelse ved tilsætning af svovlsyre til gyllebeholdere ved anvendelse af svovl til inhibering af metan for reduktion af drivhusgasser. Metanudledninger fra gyllebeholdere bidrager enormt til drivhusgasser, og de skal reduceres for at bekæmpe klimaforandringer.

1. Hvordan svovl/sulfat hæmmer metanogene archaea i gylle

Metan i gylle produceres hovedsageligt af bakteriegruppen archaea, en gruppe mikroorganismer, der trives under anaerobe (iltfri) forhold. Disse arkæer bruger simple substrater som brint (H_2), kuldioxid (CO_2) og acetat til at producere metan (CH_4).

Svovl/sulfats rolle:

Når svovl tilsættes gylle (for eksempel via svovlsyre ved forsuring), kommer det primært ind i systemet som sulfat (SO_4^{2-}). Dette ændrer den mikrobielle konkurrence:

1. Sulfatreducerende bakterier (SRB) udkonkurrerer metanogener

- Både SRB og metanogener kræver hydrogen (H_2) og acetat som elektrondonorer.
- SRB har en termodynamisk fordel: reduktion af sulfat til sulfid (H_2S) giver mere energi pr. mol substrat end methanogenese.
- Som følge heraf forbruger SRB det tilgængelige H_2 og acetat, hvilket efterlader lidt substrat til metanogener, → metanproduktionen undertrykkes.

2. Direkte toksicitet af sulfid (H_2S)

- Sulfatreduktion danner hydrogensulfid (H_2S), en giftig forbindelse.

- H_2S kan diffundere ind i metanogene celler og hæmme nøgleenzymer i metanogenese vejen.
- Ved højere koncentrationer destabiliserer H_2S cellemembranerne og forstyrrer den metaboliske aktivitet.

3. pH-effekter forstærker hæmning

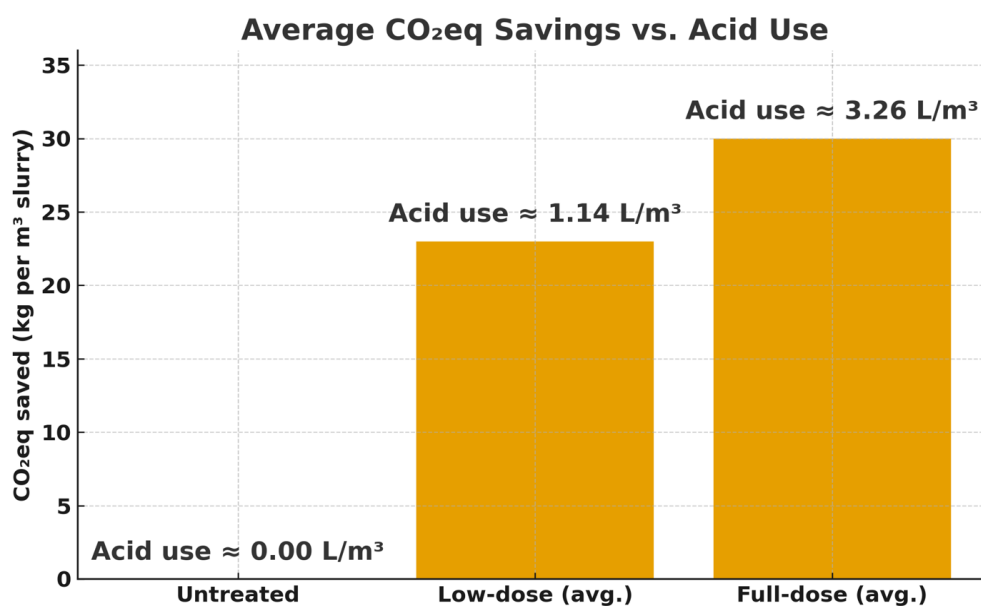
- Forsuring med H_2SO_4 sænker gyllens pH.
- Metanogener foretrækker generelt neutral pH (6,5–7,5); under mere sure forhold falder deres aktivitet.
- Den samlede stress med lav pH + sulfidtoksicitet + konkurrence med SRB undertrykker kraftigt metan dannelsen.

Nettoresultat:

- Sulfatberigelse flytter det mikrobielle samfund væk fra metanproducerende archaea mod sulfatreducerende bakterier.
- Derfor fastholder forsuring med svovlsyre ikke kun kvælstof, men reducerer også metan udledningen betydeligt fra gylle lagring.

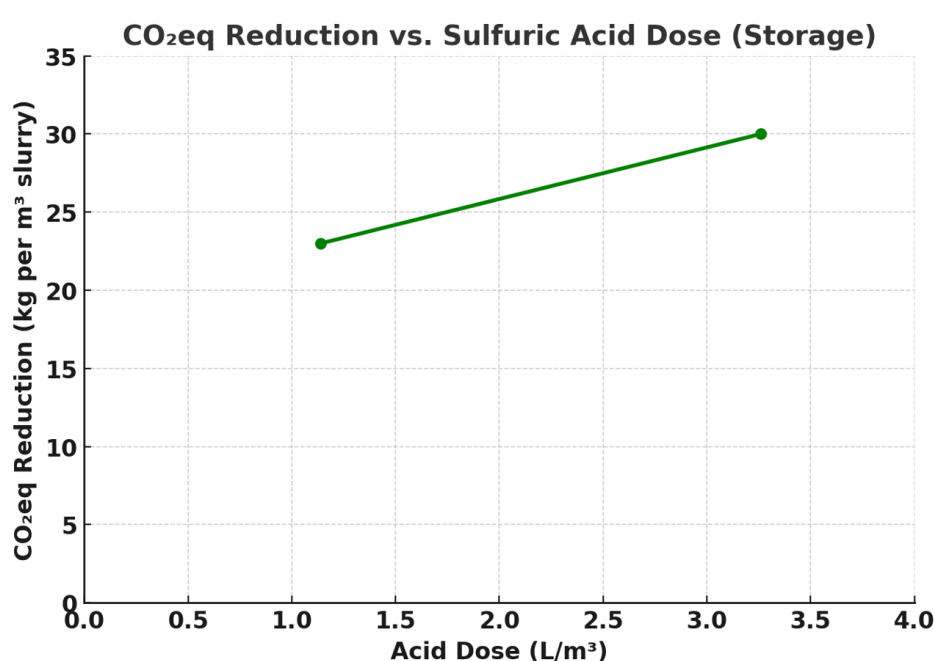
Svovlsyre leverer sulfat, der driver sulfatreducerende bakterier, som både udkonkurrerer metanogener om substrater og danner sulfid, der er direkte giftigt for metanogene arkæer, og dermed stærkt undertrykker metan dannelsen i slurry.

Svovlsyre sænker også pH-værdien, men dette afhænger af volumen af svovlsyre. Normalt kræves en dosis på +4 kg syre pr. m^3 (2,5 l) for at sænke pH-værdien nok til en betydelig effekt på ammoniakudledningen. Et sådant volumen er ikke nødvendigt for at reducere archaea. Dette ses i grafen nedenfor, syredoseringen i liter sammenlignes med præstationen i reduktion af CO_2eq kg



Da mængden af syre er et problem for gyllebeholderen, handler doseringen ikke om at maksimere CO₂eq-effekten, men om den korrekte dosis, hvor effekten optimeres og samtidig minimere risikoen ved at bruge sulfat i en beton beholder. Da en høj mængde sulfat har en begrænset effekt effekten, anbefales minimumsdosis på 1,14 l/m³. Man kunne argumentere for, at mængden af syre ved beholderforsuring bør være højere end 1,2 liter, men det skal huskes, at syren til lavdosis beholderforsuring tilsættes til gyllebeholderen når gylle-volumen endnu ikke er ankommet til tanken, og derfor er meget højere pr. m³.

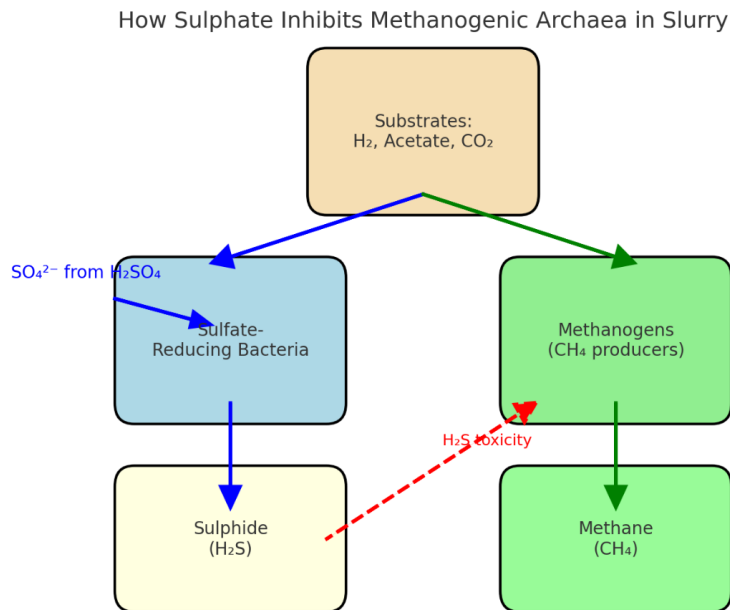
Med 17,5 € pr. ton i skattefradrag pr ton CO₂eq reduktion, er det både en økonomisk og bæredygtig vurdering af, hvor meget syre der bør bruges. Dog er volumen af sulfat også kritisk, hvor 2,1 kg (1,2 liter svovlsyre) er det niveau, der forbliver sikkert.



Der findes lagringsfaciliteter i jorden (laguner) og jernbelagte opbevaringstanke, hvor bekymringer for beton ikke er relevante. Under sådanne forhold kan en højere dosis vælges for større effekt:

Skematisk diagram, der viser, hvordan sulfat påvirker slurry-mikrobiologi:

- Substrater (H₂, acetat, CO₂) deles mellem sulfatreducerende bakterier (SRB) og metanogener.
- SO₄²⁻ fra H₂SO₄ forsyner SRB, som producerer H₂S (sulfid).
- SRB udkonkurrerer metanogener om substrater, og det producerede H₂S er direkte giftigt for metanogener og blokerer dannelsen af metan (CH₄).



Figur: *Mekanisme for sulfatinhemning af metanogener i slurry.*

Sulfat (SO_4^{2-}), der leveres af svovlsyre, stimulerer sulfatreducerende bakterier (SRB), som konkurrerer med metanogener om brint og acetat. SRB reducerer sulfat til hydrogensulfid (H_2S), en forbindelse der er direkte giftig for metanogener og forstyrrer vigtige enzymer i metanproduktionen. Den kombinerede effekt af substratkonkurrence og sulfidtoksicitet undertrykker kraftigt dannelsen af metan (CH_4) under opbevaring af slurry.

Forskel i hæmning af metan- og ammoniakemissioner

Selvom både reduktion af metan udledning og reduktion af ammoniakudledning bruger samme applikationsteknologi og svovlsyre, er det ikke den samme kemiske reaktion.

Som set ovenfor er svovl det aktive stof mod metanudledning, og sænkning af pH aktiverer den kemiske ligevægt, der omdanner ammoniakgas til ammoniumsalt.

At bruge nok svovlsyre vil have den nødvendige effekt på begge emissioner, så hvorfor er det ikke en god idé?

Betonkorrosion fra sulfatreaktioner

Sulfat fra forsuret slurry kan trænge ind i beton, hvor det reagerer og danner ekspansiv ettringit og blød gips, hvilket fører til revner, tab af styrke og langvarig nedbrydning, medmindre der anvendes beskyttelsesforanstaltninger. Når gylle forsuret med svovlsyre, tilfører den store mængder

sulfationer (SO_4^{2-}). I gyllelagre eller tanke lavet af beton kan disse sulfater reagere med komponenter i den hærdede cementpasta, hvilket fører til sulfatangreb og langvarige skader.

Hovedmekanismer:

1. Dannelse af ettringit (ekspansivt mineral):

- Sulfationer trænger ind i betonen og reagerer med calciumaluminatfaser i cementen.
- Dette producerer ettringit (calciumsulfoaluminathydrat), som har et meget større volumen end de oprindelige forbindelser.
- Udvidelsen skaber indre spændinger, som forårsager revner og tab af styrke.

2. Dannelse af gips:

- Sulfationer reagerer også med calciumhydroxid (portlandit) i betonen.
- Dette danner gips ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), et blødt og svagt mineral.
- Gips reducerer cementpastaens bindingskapacitet, hvilket gør betonen mere porøs og mindre holdbar.

3. Sure forhold fremskynder korrosion:

- Forsuring sænker slurryens pH.
- Lav pH opløser beskyttende calciumforbindelser i beton, hvilket øger dens permeabilitet og sårbarhed over for sulfatindtrængning.

Nettoresultat:

- Udvidelse, revner og blødgørelse af betonkonstruktionen.
- Reduceret levetid for slurry-tanke eller kanaler, hvis de ikke er beskyttet.

Afbødning:

- Brug af sulfatresistent cement eller beskyttende belægninger/foringer på betonoverflader i kontakt med slurry.
- Regelmæssig vedligeholdelse og inspektion af opbevaringsfaciliteter.

En lav dosis svovlsyre, såsom 1,2 liter pr m^3 i 122 dage (sommer), og derefter faldende, betragtes ikke som risikabelt for betonrød. Dog er en dosis på + 4 liter pr. m^3 ikke godkendt af industrien.

Det betyder, at svovlsyren skal påføres i lavere doser og ikke må overstige 1,2 liter pr. m^3

Blanding af svovlsyre og vand

Når svovlsyre (H_2SO_4) tilsættes til slurry, reagerer det meget kraftigt med vand. Denne reaktion er meget eksoterm (frigiver varme) og kan være farlig, hvis den ikke håndteres korrekt.

I slurry-opbevaringstanke er det afgørende, at syren straks og grundigt blandes i slurryen. Da svovlsyre har en meget høj densitet (specifik vægt 1,84), har den en tendens til at synke og forblive koncentreret, hvis den ikke bliver ordentligt omrørt.

Hvis koncentreret syre kommer i kontakt med vand uden at blande sig, kan den kemiske reaktion opvarme det omgivende vand til kogepunktet og danne damp blandet med syredråber. Denne sure damp stiger op til overfladen og udgør en ekstrem risiko for alle i nærheden, hvilket forårsager alvorlige forbrændinger og åndedrætsskader.

Vigtigt sikkerhedspunkt: Svovlsyre skal altid tilsættes under forhold, der sikrer hurtig og fuldstændig blanding i gylle for at forhindre lokal overophedning og farlige syredampe.

Risiko for dannelse af hydrogensulfid (H_2S) ved gylle forsuring

Tilsætning af svovlsyre til gylle introducerer sulfat, som kan reduceres af bakterier til hydrogensulfid (H_2S) — en meget giftig, tungere end luft-gas, der udgør alvorlige sundheds- og eksplosionsrisici, hvis den ikke håndteres korrekt. Under anaerobe forhold i gylle opbevaring kan sulfatreducerende bakterier (SRB) omdanne dette sulfat til hydrogensulfid (H_2S).

Hvorfor det er farligt

1. **Giftig gas:**
 - H_2S er ekstremt giftigt for mennesker og dyr.
 - Det kan forårsage irritation ved meget lave niveauer (ppm-området), og koncentrationer over 500–1000 ppm kan føre til hurtig bevidstløshed og død.
2. **Tungere end luft:**
 - H_2S har tendens til at ophobe sig i lavtliggende områder som gruber, tanke eller kanaler, hvilket skaber lokale højrisikozoner.
3. **Lugtmasking:**
 - Ved lave niveauer lugter H_2S som rådne æg, men ved højere koncentrationer lammes lugtesansen hurtigt.
 - Dette gør gassen særligt snigende, fordi arbejderne måske ikke opdager stigende koncentrationer.
4. **Eksplosiv risiko:**
 - Ved koncentrationer på 4,3–45 % i luft er H_2S brandfarligt og kan danne eksplosive blandinger.

Forhold, der øger dannelsen af H_2S

- Høj sulfattilgængelighed (f.eks. efter forsuring med H_2SO_4).
- Varme temperaturer og stillestående gylle, som fremmer mikrobiel aktivitet.
- Dårlig ventilation i lukkede rum (f.eks. under omrøring eller pumpning).

Sikkerhedsmæssige implikationer

- Gå aldrig ned i gylle kanaler / gylle tanke eller -gruber uden tvungen ventilation og gasovervågning.

- Forsuring bør udføres med tilstrækkelig blanding og udendørs behandling for at forhindre lokal H_2S -ophobning.
- Gasdetekteringsudstyr bør anvendes under gylle-omrøring eller pumpning.

Hvorfor sænkning af pH tvinger H_2S ud af slurry

Ved sænkning af gylle-pH, ændres opløste sulfid (HS^-) til flygtig hydrogensulfid (H_2S), som slipper ud som gas — hvilket skaber en alvorlig risiko for giftig eksponering under håndtering af gylle.

1. H_2S i gylle findes i to former

- I gylle findes sulfid hovedsageligt som opløst hydrogensulfidgas (H_2S) og ioniseret sulfid (HS^- , S^{2-}).
- Balancen mellem disse former afhænger af pH:
 - Ved høj pH (>7) → er det meste svovl i ioniseret (HS^-) form, opløst i gylle væsken.
 - Ved lav pH (<6) → balancen mod dissocieret H_2S -gas.

2. Effekt af sænkning af pH

- Når svovlsyre tilsættes, falder gylle-pH.
- Denne kemiske forskydning omdanner HS^- til H_2S -gas.
- H_2S er flygtigt, så det slipper ud af væskefasen og ned i luften over gyllen.

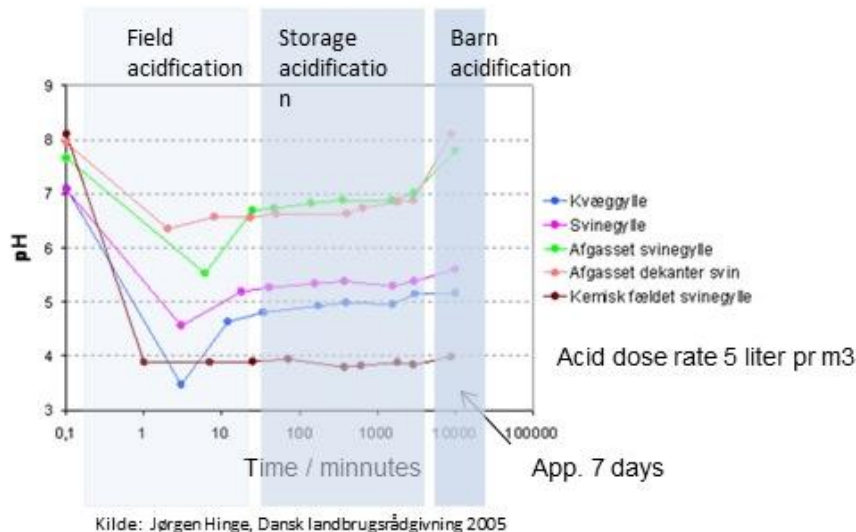
3. Implikation

- Ved lav pH findes der meget mere svovl som H_2S -gas, som derefter frigives under blanding, omrøring eller pumpning.
- Dette er farligt, fordi H_2S er giftigt, tungere end luft og lugtfrit ved høje niveauer.

Buffereffekt af gylle – tab af pH-effekt

Syreforbrug og pH-respons i forskellige typer slurry varierer meget. Med konventionel gylle er der normalt en stærk effekt på at sænke pH-værdien i de første 10 minutter. Derefter begynder gylle-bufferen og eventuelt også jordens pH at reagere. PH i gyllen vil stige igen, især hvis jordens pH er over gyllens pH-værdi. Når man påfører gylle på marker, er det når gyllevæsken udlægges på jordoverfladen, at flygtigheden er meget høj. En lav pH i denne fase har vist sig at reducere emissionen fra 50 til 70 %. Når gyllevæske synker ned i jorden, binder den sig til jordens kolloider, og fordampningsfasen er ovre. Den kritiske tid er normalt ca. 4 timer, hvor ca. 50 % af emissionerne forekommer.

Acid consumption variable in relation to pH value, slurry type and time.



Effekten af forsuring afhænger i høj grad af gylletype, pH-værdi og tid.

- Markforsuring opnår et hurtigt fald inden for få minutter efter udlægning.
- Beholderforsuring viser en mere gradvis ændring, efterhånden som bufferreaktionerne i gyllen stabiliseres.
- Staldforsuring kræver en længere tidsramme på grund af kontinuerlig tilførsel af gylle og mikrobiel aktivitet.
- Ved en syredosis på 5 L/m³ reagerer forskellige slurry typer (kvæg- svin- og biogas gylle) forskelligt afhængigt af deres oprindelige bufferkapacitet.

En lav dosis svovlsyre har en høj, men kortvarig pH-reduktion. Dette skaber en fordel ved mark forsuring, hvor effekten er maksimal i perioden øjeblikkelig efter udlægningen hvor emissionen er højest. Herefter aftager pH effekten, men det gør emissionen også så der samledes opnås en høj emissions reduktion med en lille volumen svovlsyre.

Kort sagt kræves en meget stor volumen syre, hvis forsuring i en gyllebeholder skal være effektiv til reduktion af ammoniakemissioner under udbringning. Gylletyper- og behandling bestemmer, hvor meget syre der kræves for at opnå en stabil lav pH. Fra Staldforsuring kendes denne volumen at variere fra 4 til 8 liter pr. m³. (7 – 14 kg pr. m³)

Ovenstående fører tilbage til brugen af kun sulfateffekten fra svovlsyren og en "lav doseringsforsuring" til brug mod metan i gyllebeholderen. Når gyllen er afgasset, er pH-værdien typisk steget fra cirka 7,2 til 8,0. Denne stigning har en dramatisk effekt på syrevolumen til pH-reduktion, hvor effekten af svovl er uændret og meget økonomisk. Den lave dosis syre eliminerer også risiko for betonkorrosion. Risiko for udledning af H₂S afhænger ikke kun af syrevolumen,

men den kan altid håndteres med ordentlige sikkerhedsforhold, når syren tilsættes under åben himmel.

Kombination af lavdosis-opbevaringsforsuring og mark-forsuring

SyreN In Field Acidification System kan tilføre fra 0,5 til 5 l syre pr. m³, mens der pumpes 10 m³ gylle pr. minut (70 l pr. minut). At tilsætte fra 200 til 1000 l pr. gylletank vil tage 3 til 10 minutter pr. tank, mens gyllen omrøres samtidig. Derfor er systemlayoutet velegnet til lavdosislagringsforsuring:

- Mobilt system – bruges til mange gylle beholdere
- Overhold alle sikkerhedsregler
- 1000 l syrekapacitet, hvilket muliggør 1 til 10 lagertanke med 1 IBC-tank til påfyldning
- Dobbelt formål – Beholderforsuring og forsuring i marken
- Meget omkostningseffektivt - profitabelt

Landespecifikke krav:

Skandinavien: Skandinavien har næsten 100 % separate udendørs opbevaringstanke med en kapacitet på mellem 500 m³ og 6000 m³. I Danmark opbevares 35 mio m³ slurry i 24.000 tanke med et gennemsnit på 1500 m³. gylletankene er alle nedsænket med en væg på ca. 2 m høj. Dette har fået producenterne af slurrytankvogne til at tilbyde en kranarm til gyllevognene med påfyldning af gylle direkte fra tanken. Dette er blevet en standard.



Lav dosis Opbevaring af syrening via kranarm på en slurrytanker er meget hurtig og kan udføres med minimale transportomkostninger, da slurrytankeren allerede er på gården

Markedsleder for gyllevogne - Samson – har et standardtilbud om "omrøring af gylle via kranarm". Der skal således kun en syreslange med en kobling til SyreN Systemet bag på traktoren, der er forbundet til pumpen ved kranarmen. Denne konfiguration vil gøre det muligt for gyllevognene at

udføre lavdosis-beholderforsuring. Da tidspunktet for lavdosis forsuring overlapper med forsuring i marken mellem svinegårde og kvæggårde, er der stor sandsynlighed for, at gyllevognen er på gården eller i nærheden af gården, hvilket reducerer trafikomkostningerne og øger kapaciteten for forsuring.

Det er også muligt at bruge en kombination af eksisterende mixersystemer til gyllebeholdere og en traktor med SyreN-system. Dette muliggør mobilitet for syren uden brug af lastbiltankvogn, hvilket vil være meget omkostningskrævende ved levering 2 x 200 l op til 1000 l syre. Det skaber også logistiske problemer for omrører / lastvogn og tilstedeværelsen af to personer.

Den vigtige funktion er omrøring af gyllen sammen med doseringen af syre og dokumentation til anvendelse til skattefradrag.



Øverum slurryblander, hvor doseringen af syre er delt op i 4 individuelle rør og med en pH-sensor monteret ovenpå for at overvåge slurry-pH



Forsuring af lageret ved hjælp af en pumperører



Stor pumpeblander/omrører fra Harresø til store lagerfaciliteter

Kontinent: Resten af Nordeuropa er delt mellem udendørs opbevaringstanke med 4 m væg og gylle-opbevaring under bygninger.

Forsuring under bygninger er kun mulig med specialiseret staldforsuringssystem på grund af faren fra H₂O.

Den 4 m lange slurrytankvæg gør brugen af en gylle kranarm umulig. I stedet anvendes et sugesystem til at fylde gyllevognen. Hvis gyllevognen skal bruges, skal vognen først fyldes. Derefter bruges SyreN-systemet som det er, men i stedet for at føre gyllen til en bom / mark, skal et rør eller en slange føre den forsurede gylle tilbage over væggen til gyllebeholderen. Blandingen/omrøringen af gyllen foregår i SyreN mixeren. Doseringen af gyllen pr. m³ skal være lav for at sikre, at en stor mængde slurry passerer gennem tankvognen for at opnå en korrekt dosering i gyllebeholderen uden omrøring i tanken. Dette er også en omkostnings effektiv metode, selvom den ikke er så bekvem, som at blande syren direkte i beholderen mens man omrører gyllen.

Eksisterende mixere til 4 m vægbeholdere kan nemt eftermonteres med syreslange og blander før propellen og dermed kombineres med brugen af SyreN-systemet

Sydeuropa: I Sydeuropa er brugen af gylle-laguner meget almindelig. De har ofte +10.000 m³ kapacitet og er 5 m dybe. Det er meget ofte ikke muligt at røre sådanne laguner, og enten skal syren tilsættes hyppigt i små doser ved gylle-indløbet, eller også skal dosering under omrøring håndteres på flere steder omkring lagunen. Der skal også foretages en anden beregning af CO₂eq, som er meget højere i de sydlige klimazoner. Dette skyldes meget højere gennemsnitstemperaturer og helårsproduktion af metan.

Kapacitet af eksisterende SyreN Changes-systemer

Kapaciteten på en SyreN Changes-enhed er meget høj. Det er almindeligt, at ét system servicerer 20-30 gyllebeholdere med mark forsyning, når det bruges sammen med en maskinstation. I privat ejerskab er tallet omkring halvdelen.

Antagelser:

- Arbejdsperiode = 50 dage – juni / juli og august / september
- Tidsforbrug = 1 time pr. tank inkl. transport (8 timers arbejdsdag)
- Kapacitet = 8 lagertanke pr. dag

Teoretisk kapacitet pr. system:

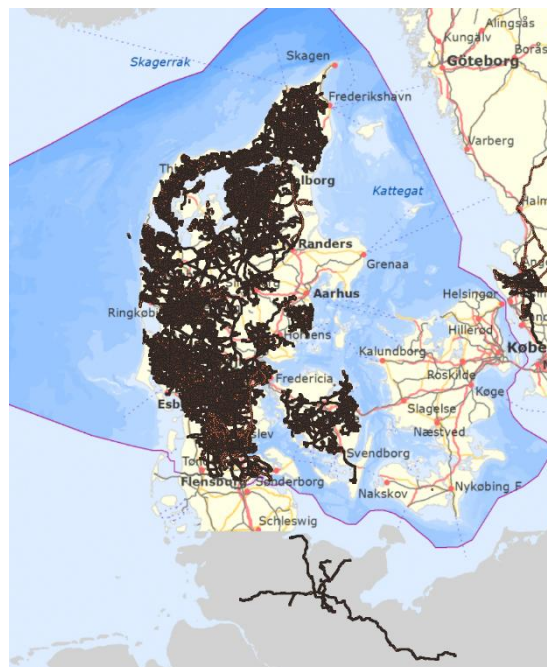
50 dage x 24.000 tanke x 8 timer = 480 lagertanke pr. enhed.

Eksempel Danmark:

Danmark har i alt 24.000 slurry-lagringstanke med et gennemsnit på 1500 m³. Der er 120 aktive SyreN-systemer. $24.000 : 120 = 200$ lagertanke pr. system. Det efterlader meget plads til det teoretiske grænse-pr. system. Da systemerne er velfordelte, er der ikke behov for yderligere nationale investeringer i SyreN Changes-kapacitet, men der kan være behov for regional kapacitetsforøgelse. Der findes i øjeblikket 42 Øverum-mixere med syre-kapacitet og ca. 30 Harsøe-mixere.



Placering af SyreN Changes 2019



Område dækket af In field Acidification 2019

Videnskabelig dokumentation

Den videnskabelige vurdering af lavdosis opbevaringsforsuring er baseret på 22 projekter/artikler, hvor der er et resumé fra hvert af dem inkluderet i denne rapport. Nogle af artiklerne er mere relevante end andre, men alle data brugt i denne rapport er samlet som et gennemsnit af alle artikler. Den fulde version af artiklerne er tilgængelig på <https://www.biocover.dk/uk/articles/articles-from-research.aspx>

Fuldskala forsuring

- Lemes et al. (2022): Fuldskala danske kvæg- og svineslurrytanke viste 95% reduktion af CH₄ og NH₃-udledninger, der er sammenlignelige med eller lavere end naturlige skorper. Den afbødende effekt fortsatte selv efter tilsætning af frisk slurry.
- Petersen et al. (2012, 2014): Laboratorie- og pilotstudier bekræftede >90% CH₄-suppression og >80% NH₃-reduktion i slurry fra svine og kvæg. Forsuring ændrede også det metanogene mikrobielle samfund, især ved at undertrykke *Thermoplasma*.

Lavdosis forsuring

- Ma et al. (2022): Ved ~2,1 kg H₂SO₄/m³ blev CH₄-udledningen reduceret med ~70%, NH₃ med 30–50%, og lugtstoffer med >60%. Højere doser (4–6 kg/m³) eliminerede næsten CH₄, men risikerede overdreven svovlbelastning.
- Teknisk lavdosisrapport (2021): Påviste, at en dosis på ~2,1 kg/m³ kunne spare 21–23 kg CO₂eq pr. m³ slurry i sommeropbevaring, svarende til ~90 t CO₂eq undgået i en 3.000 m³ tank.

Sæson- og temperatureffekter

- Misselbrook et al. (2016): Forsuring reducerede CH₄ med 60–91 % og NH₃ med 56–99 %, selvom effektiviteten var lavere ved højere lagringstemperaturer.
- Cárdenas et al. (2021): Viste CH₄-produktionen er ubetydelig under ~14 °C, men sommerlagring forårsager stærke emissioner. Forsuring giver derfor den største fordel ved opbevaring i den varme årstid.

I en subtempereret eller tropisk klimazone, der er "varm" hele året, er metan-relateret udledning omkring 70–90 kg CO₂eq pr. m³ om året.

I tidligere beregninger brugte vi en dokumenteret reduktion i den varme periode (juni–1. oktober, 122 dage) på 23–30 kg CO₂eq pr. m³. Hvis vi antager, at de samme varme forhold gælder hele året (365 dage), kan vi skalere lineært:

- Scaling factor: $365/122 \approx 2.99$
- Lower bound: $23 \times 2.99 \approx 69 \Rightarrow \approx 69 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3\text{/year}$
- Upper bound: $30 \times 2.99 \approx 90 \Rightarrow \approx 90 \text{ kg CO}_2\text{e/m}^3\text{/year}$

Praktisk tommelfingerregel: brug ≈ 80 kg CO₂eq pr. m³ pr. år som et midtpunktestimat for et helårsvarmt klima, baseret på de samme antagelser som vores tidligere varme årstidstal.

Bemærk: Den faktiske værdi vil afhænge af indholdet af flygtige stoffer, overfladedække, blanding, temperaturprofil, substrater og den globale opvarmningspotentiale (GWP)-faktor, der anvendes for CH₄.

3. Klima- og luftkvalitetspåvirkning

- Metan: Konsekvente reduktioner på 70–95 % på tværs af laboratorie-, pilot- og fuldskalaforsøg.
- Ammoniak: Reduktionerne ligger typisk på 50–90 %, hvilket bevarer kvælstof til afgrødeoptagelse.
- Lattergas (N₂O): Generelt upåvirket eller let forhøjet, men langt mindre signifikant end CH₄-reduktioner.
- Kuldioxid (CO₂): Små stigninger observeres på grund af karbonatudslip, men nettodrivhusgasbalancen er stærkt positiv.

Det er værd at bemærke, at cirka 40 % af al luftforurening ved P.M. 2,5 stammer fra ammoniakudledning. Dette anslås at forårsage cirka 50.000 for tidlig dødsfald i EU pr. år.

Eksempel på CO₂-aftryk:

- Grundlæggende CH₄-emissioner: ~ 32 kg CO₂eq/m³ over sommeropbevaring.
- Lavdosisforsuring (2,1 kg H₂SO₄/m³): ~ 23 kg CO₂eq spares pr. m³ slurry.
- For et 3.000 m³ akvarium: ~ 90 t CO₂eq besparelse pr. sæson.

4. Økonomisk analyse

Inputomkostninger:

Antagelser for det økonomiske eksempel

- Syredosis: 1,2 L H₂SO₄ pr. m³ slurry.
- Syrepris: €0,35 pr. liter.
- Ansøgningsskema: To ansøgninger (juni og august).
- Påføringstid: 1 time pr. dosering (inkl. trafik)
- Driftsomkostninger (slurrytanker + forsuringssystem): €200 pr. time → €400 i alt for to anvendelser.
- Tankfyldning: Tankene fyldes jævnt hele året rundt, startende fra 1. juni.
- Varm periode: 1. juni – 1. oktober (122 dage).
- Efter 1. oktober er der ikke behov for yderligere forsuring på grund af lave temperaturer.

Omkostningerne ved lagerforsuring domineres af den faste blandingsomkostning (€400 pr. tank), hvilket betyder, at større tanke giver lavere omkostninger pr. m³. Syreomkostningerne stiger med volumen, men de samlede omkostninger pr. m³ falder markant med tankstørrelsen.

Metric	2000 m ³	4000 m ³	6000 m ³
Warm-period volume (m ³)	668.5	1337.0	2005.5
Acid needed (L)	802.0	1604.0	2407.0
Acid cost (€ @ 0.35/L)	281.0	562.0	842.0
Mixing cost (€) [2 × 1h @ 200/	400.0	400.0	400.0
Cost per warm m ³ (€)	1.02	0.72	0.62
Cost per tank m ³ capacity (€)	0.34	0.24	0.21
Total input cost (€)	681.0	962.0	1242.0

Inputomkostninger - Forsuring af lageret (juni-okt)

Lavdosis-beholderforsuring er unik, idet indsatsen i øjeblikket ikke belønnes med økonomiske incitament. Dette vil ændre sig med Arla Klimatjek, dansk CO₂-kredit eller når fordelene fra Forsuring i marken lægges til beregningen.

Virkningen af Arla Climate Check-tilskuddet

En ko antages at producere 10.000 kg mælk og 30 m³ slurry om året = 333,3 kg mælk pr. m³ slurry. Omregnet til liter (1 liter mælk ≈ 1,03 kg) = ≈324 liter mælk pr. m³ slurry.

Arla Climate Check-tilskud:

324 liter mælk × €0,0001 = €0,0324 pr. m³ slurry.

Tank capacity	Subsidy (€)
2,000 m ³ tank	€64
4,000 m ³ tank	€130
6,000 m ³ tank	€194

Tilskud pr. slurrytank (Arla Climate Check)

Incitament til CO₂-kredit (Danmark):

Danmark er unikt ved at tilbyde en CO₂-kredit pr. ton reduceret CO₂-udgift i landbruget fra 2027. Ved 130 DKK (~€17,50) pr. ton CO₂eq reduktionsskattefradrag får landmanden yderligere kompensation. Ved lavt niveau CO₂eq reduktion på mindst 23 kg CO₂eq pr. m³ slurry:

Tank capacity	CO ₂ credit (€)
2,000 m ³ tank	€805
4,000 m ³ tank	€1,610
6,000 m ³ tank	€2,415

CO₂-kredit pr. slurrytank (23 kg CO₂eq / m³ @ € 17,5/t)

Beregningen viser, at lagerforsuring bliver økonomisk positiv, når både Arla Climate Check-tilskuddet og CO₂-kreditte inkluderes.

- Indgangsomkostningerne er relativt beskedne (€681–€1.242 afhængigt af tankstørrelse).
- Arla-tilskuddet giver kun et lille bidrag (€65–€194 pr. tank), mens CO₂-kreditte er den største drivkraft for rentabiliteten (€805–€2.415 pr. tank).
- Som følge heraf går alle tankstørrelser fra en omkostning til en nettogevinst, hvor større tanke får størst gevinst af lavere pris pr. m³.

Tank size	Input cost (€)	Arla subsidy (€)	CO ₂ credit (€)	Net income (€)
2,000 m ³	€681	€65	€805	€189
4,000 m ³	€962	€130	€1,610	€778
6,000 m ³	€1,242	€194	€2,415	€1,367

Nettoindkomst fra lagerforsuring – med Arla-subsidier og kulstofskattecredit

Konklusion:

Lav dosis beholderforsuring er ikke kun miljømæssigt effektiv, men også økonomisk attraktiv, når eksisterende subsidier og CO₂-kreditter tages i betragtning.

Brug af kombination af lavdosis beholderforsuring i kombination med mark forsuring

Da Danmark er det eneste EU-land, der tilbyder en CO₂-afgiftskredit for lavdosis beholderforsuring, skal der tilbydes en ekstra indkomst (tilskud) uden for Danmark for at gøre det attraktivt for Arla-kunder at engagere sig i teknologien.

Da SyreN-systemet har et dobbelt anvendelse med lavdosis-beholderforsuring og mark forsuring, er det muligt at inkludere begge muligheder i samme incitament uden yderligere investering.

Ved at tilføje 2 point til Arla-klimatjekket ville dette fordoble Arla-incitamentet:

Tank capacity	Subsidy (€)
2,000 m ³ tank	€128
4,000 m ³ tank	€260
6,000 m ³ tank	€388

Tilskud pr. slurrytank (Arla Climate Check - 2 point)

I Danmark anvendes mark forsuring bredt på grund af obligatorisk lovgivningsmæssig anvendelse på græs, og mange flere EU-lande er ved at følge denne tendens på grund af problemer med EU's NEC-direktiv. I alt modtog 10 EU-medlemmer et åbningsbrev fra EU-Kommissionen for overtrædelse af NEC-direktivet i juli 2025:

Lande med EU-overtrædelsesbreve vedrørende overtrædelser af NEC-direktivets traktat

Prioriteret liste – kombineret vurdering af:

- NEC-overtrædelser (især ammoniak)
- Prioritet inden for miljøpolitik og åbenhed over for grøn teknologi
- Kulturelle forskelle i forhold til samarbejde, beslutningstagning og bæredygtighed Lethed ved markedsadgang (herunder tillid, regulering, kommunikation)

Forklaring af kriterier:

- NEC-spørgsmål (NH₃): Grad af national ammoniakoverskridelse sammenlignet med EU-grænser.
- Miljømæssig prioritet: Hvor ambitiøst landet er politisk og teknologisk i bestræbelserne på at forfølge en grøn omstilling.
- Kulturelt match (DK): Hvor kulturelt let samarbejde er (baseret på Hofstedes dimensioner, f.eks. lav magtafstand, direkte kommunikation, lav kontekst, tillidsniveau).
- Overordnet vurdering: BioCovers chance for succes og lav friktion i salg og samarbejde.

Rang	Land	NEC-udgave (NH ₃)	Miljømæssig prioritet	Kulturelt match (DK)	Samlet vurdering
1	Holland	Ja	★★★★★	★★★★	↑ TOP Meget højt
2	Tyskland	Ja	★★★★	★★★★	↑ TOP Meget højt
3	Belgien	Ja (Flandern)	★★★★	★★★★	↑ TOP Meget højt
4	Frankrig	Delvist	★★★★	★★	▲ Høj
5	Irland	Ja/delvist	★★★★	★★★	▲ Høj
6	Spanien	Ja	★★★	★★	⚖ Medium
7	Italien	Ja	★★	★★	⚖ Medium
8	Polen	Ja	★★	★★	⚖ Medium
9	Ungarn	Ja	★	★	↓ Lavt
10	Rumænien	Ja	★	★	↓ Lavt

I en separat analyse af 27 internationale studier om brugen af mark forsuring er det dokumenteret, at SyreN-systemet er meget profitabelt – især i brug på græs, der er en hovedafgrøde hos Arla-leverandører.

Nettogevinsten pr. ha på græs er 235 € pr. ha, og med små korn er det 61 € pr. ha. Med 50 / 50 % småkorn/græs $61 + 235 = 148$ € gennemsnitligt netto pr. ha

Når forsuringen i marken medregnes i beregningen:

Tank size	Hectares (30 m ³ /ha)	€/ha	Total income (€)
2,000 m ³ tank	66 ha	€148	€9,768
4,000 m ³ tank	133 ha	€148	€19,684
6,000 m ³ tank	200 ha	€148	€29,600

1 Indtægter fra forsuring i marken (30 m³/ha @ €148/ha)

Tank size	Input cost (€)	Arla subsidy (€)	In-field income (€)	Net result (€)
2,000 m ³	€681	€65	€9,768	€9,152
4,000 m ³	€962	€130	€19,684	€18,852
6,000 m ³	€1,242	€194	€29,600	€28,552

Kombineret lav dosis - og forsuring i marken med Arla 2-punkts tilskud

Dette er en gamechanger for lavdosis beholderforsuring, hvor der er en meget robust og profitabel økonomi for Arla-leverandører. Det kan argumenteres, at Arlas bidrag skaber bevidsthed om systemet som et integreret bæredygtigt system for mælkeproduktion. Potentielt kunne Arla argumentere for, at de 2 punkter kun gælder for x2 beholder forsuring + mark forsuring (som det danske lovkrav). Dette giver potentiale for yderligere optimering, men med 70-80 % af den miljø- og økonomiske potentionelfordel, som landmanden høster.

Budgettal for vedlagte 27 studier af forsuring i marken: Andre afgrøder øger udbyttet med 4,9 %.

Eksempel hvede med 9 t/ha

Item	4.9% Yield Increase	Notes
Extra yield	4.33 dt/ha	1 dt = 100 kg
Extra revenue	€45,465	4.33 dt/ha × €21 × 500 ha
Acid use	€9,900	60 L/ha → €9,900 total (≈ €19.80/ha)
Acid logistics	€2,000	€4/ha × 500 ha
Depreciation	€16,000/year	€80,000 over 5 years
Interest	€1,200/year	3% on avg. tied capital (~€40,000)
Total costs	€29,100/year	Sum of above costs
Net benefit	€16,365/year	Extra revenue – Total costs
Net benefit/ha	≈ €32.73/ha	€16,365 ÷ 500 ha
Payback period	~4.9 years	€80,000 ÷ €16,365 (based on net benefit)

Budgettal for vedlagte 27 studier: Græs med 17,1 % udbytteforøgelse

Eksempel græs med 130 dt/ha ensilage pr. ha

Item	17.1% Yield Increase	Notes
Extra yield	2.36 dt/ha	1 dt = 100 kg
Extra revenue	€153,400	2.36 dt/ha × €130 × 500 ha
Acid use	80 L/ha → €13,200 total	€26.40/ha
Acid logistics	€2,000	€4/ha × 500 ha
Depreciation	€18,000/year	€90,000 over 5 years
Interest	€2,250/year	5% on average tied capital
Total costs	€35,450/year	Sum of above costs
Net benefit	€117,950/year	≈ €235.90/ha
Payback period	~0.76 years	Based on net benefit

Konklusion om indkomstscenarier

Analysen viser, at lavdosis-beholderforsuring kombineret med forsuring i marken giver en klar økonomisk fordel for landmændene, ud over de miljømæssige fordele:

- Omkostningerne ved forsuring er relativt små (€681–€1.242 pr. tank afhængigt af størrelse).
- Arla Climate Check-tilskuddet alene har kun en effekt på (€65–€194 pr. tank).
- CO₂-kreditten giver en betydelig ekstra indtægtskilde, der omdanner alle beholderstørrelser til en nettogevinst, selv uden mark forsuring.
- Indtægterne fra forsuring i marken (fra udbyttegevinster og incitamentsbetalinger) er den stærkeste drivkraft for rentabilitet og genererer €9.768–€29.600 pr. tank, afhængigt af størrelsen.
- Når man kombinerer Arla-subsidier + CO₂-kreditter + in-field-indkomst, er nettoresultatet stærkt positivt:
 - +€ 9.152 for 2.000 m³
 - +€ 18.852 for 4.000 m³
 - +€ 28.552 for 6.000 m³

Samlet set: Scenarierne bekræfter, at forsuringsteknologier ikke kun er effektive til at reducere emissioner, men også økonomisk attraktive, når man tager hensyn til subsidier, CO₂-kreditter og indtægter fra felten. Større tanke og integrerede marksystemer opnår den højeste økonomiske effektivitet pr. m³ slurry.

CO₂eq-reduktionen fra mark-forsuring er også signifikant med 200 kg pr. ha. Da det er CO₂eq, der er i fokus med Arla Climate Check-systemet, er det velegnet til at blive taget i brug i Arla Climate Check. Dog er noget af reduktionen af CO₂eq ved forsuring i marken indirekte – mindre dieselbrug, reduceret N₂O, hvilket gør det vanskeligt at kvantificere i forhold til systemet.

CINURGI-projektet har rapporteret, at CO₂eq-effekten fra forsuring i marken er:

Klimapåvirkning: Den direkte emissionsreduktionseffekt* er 0,3 tons CO₂eq for hver 1.000 kg N og P i den forarbejdede slurry.

**Disse vurderinger er relateret til den normale og alternative baseline, baseret på leveret information kombineret med veldokumenteret videnskabelig evidens samt brugen af en standardiseret og skræddersyet metode, alene med hensyntagen til specifikke, direkte effekter.*

Beregning:

1) Data

- Behandlet gyllevolumen pr. år = **50.000 m³**
- Påføringsmængde = **30 m³/ha**
- Gennemsnitligt N = **3,5 kg/m³ slurry**
- Gennemsnitlig P = **1,0 kg/m³ slurry**
- Klimafaktor = **0,3 tons CO₂eq pr. 1.000 kg N+P**

2) Samlede næringsstoffer i behandlet gylle – 50.000 m³, 3,5 kg N og 1 kg P

- N: $50.000 \times 3,5 = 175.000 \text{ kg N}$
 - P: $50.000 \times 1,0 = 50.000 \text{ kg P}$
 - Samlet N+P = **225.000 kg**
-

3) CO₂eq reduction (total)

$$225,000 \text{ kg} \div 1,000 \times 0.3 \text{ t CO}_2\text{eq} = 67.5 \text{ t CO}_2\text{eq}$$

4) CO₂eq effect per m³ slurry

$$67.5 \text{ t} = 67,500 \text{ kg CO}_2\text{eq}$$

$$67,500 \div 50,000 = 1.35 \text{ kg CO}_2\text{eq per m}^3 \text{ slurry}$$

Resultater:

- **1,35 kg CO₂eq spares pr. m³ slurry**
- **~40,5 kg CO₂eq spares pr. ha**

Ovenstående tal kan nemt anvendes i Arla Climate check-spørgeskemaet. Volumen m³ registreres automatisk i PDF-jobrapporten pr job, som modtages af maskinejeren efter hvert job. Dette vil også muliggøre dokumentation for beregningen af den danske CO₂-kredit.

4. Miljøpotentiale fra kombineret beholder- og mark forsuring

Dansk national CO₂eq- reduktionspotentiale for beholderforsuring (35 millioner m³)

Ved at bruge den målte CH₄-reduktion i lagringsfasen, som vi har arbejdet med (23–30 kg CO₂eq sparet pr. m³ slurry behandlet i den varme periode), er det teoretiske nationale potentiale:

- Nedre estimat (23 kg CO₂eq/m³): $35.000.000 \text{ m}^3 \times 23 \text{ kg/m}^3 = 805.000.000 \text{ kg CO}_2\text{eq} \approx 805.000 \text{ t CO}_2\text{eq}$
- Øvre estimat (30 kg CO₂eq/m³): $35.000.000 \text{ m}^3 \times 30 \text{ kg/m}^3 = 1.050.000.000 \text{ kg CO}_2\text{eq} \approx 1.050.000 \text{ t CO}_2\text{eq}$

Ammoniak bevares som ammonium via forsuring i marken (35 mio m³, dækning, 1,6 millioner ha)

Forsuring i marken reducerer typisk NH₃-udledningen med ~50% og sparer ~15 kg N pr. ha

For dette scenarie beregner vi med 10 kg N pr. ha ved at flytte NH₃/NH₄⁺-ligevægten mod ammonium (applikation pH ≈ 6,4). (konservativ vs. de 15 kg N/ha, der nævnes):

Konklusioner for Danmark

- **Lav dosis Opbevaringsforsuring** på 35 mio m³ giver et nationalt reduktionspotentiale på omkring **0,8–1,05 millioner tons CO₂eq om året** (til behandling i den varme periode).
- **Forsuring i marken** ved 1,6 millioner ha holder konservativt ~ **16.000 t N** i ammoniumform (i stedet for at gå tabt som NH₃)
- **Forsuring i marken** ved 35 mio m³ og 1,35 CO₂eq sparet pr m³ = **47,000 ton CO₂eq**

5. SyreN-systemets genkendelse og adoption

- Solar Impulse Efficient Solution Label (2019): Uafhængig ekspertvurdering bekræftede SyreN som både miljømæssigt effektiv og økonomisk profitabel, med potentiale til at bidrage til 1 % af de globale CO₂-reduktioner, hvis den skaleres.
- Adoption: I 2025 var teknologien operationel på 179 steder i 7 lande med løbende udvidelse til Nord- og Centraleuropa.
- Politisk tilpasning: Støtter direkte EU's NEC-direktivmål, EU's habitatdirektiv og EU's vandrammedirektiv. Potentiale for 1 % global CO₂eq-reduktion og +10 % reduktion i brugen af mineralsk gødning.
- Systemet har VERA- og ETV-certificering samt EU BAT. Den har ARD-certificering
- Tyskland har en adoptionsstrategi med et igangværende MuD-projekt med 8 demonstrationssystemer, der opererer i 8 Bundesländer. Fuld udskiftning af injektion i Holland og Belgien forventes. Sverige tilbyder et købsincitament på 80 %. Tjekkiet tilbyder 40 % købsincitament.

6. Dokumentation

SyreN System tilbyder et omfattende online system til dokumentation af brug af syre pr. job. Når et job åbnes, identificeres gylle beholderen / mark med et navn, tilføjer e-mission-systemet automatisk volumen af syre og placering af slurry-lagertank/felt samt dato/tidspunkt til den digitale fil. Data pr.-opgaven sendes automatisk til maskinens ejers e-mailadresse som en PDF, der kan videresendes til kunden, og den kan downloades i Excel-format fra serveren.

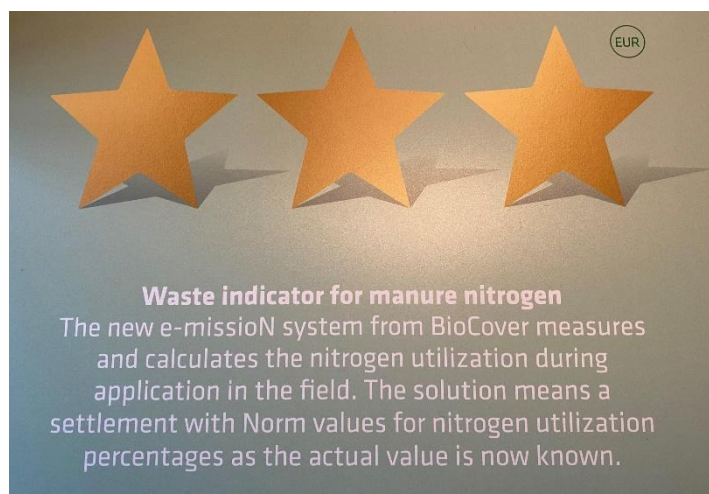
Landmænd, der bruger en maskinstation til forsuringsydelser, kan altid dokumentere syrevolumen fra fakturaen fra entreprenøren. For at kontrollere, at den rette mængde syre er brugt, bør

tankstørrelser i volumen af m³ indtastes i datafilen sammen med navnet på gården/fakturaen på marken.

Syrebrug til lav dosering af forsuring: 1,2 liter pr. m³ i den varme periode – 1. juni til 1. oktober. Volumen skal være 1/4 af lagertankens kapacitet, dvs. 2000 m³: 4 x 1,2 l = 600 l med 200 l tilført i juni/juli og 400 l tilført i august. Der kan findes variationer af dette, men så længe ovenstående princip følges, er det usandsynligt, at det skaber den store forskel i effekt.

Syreanvendelse til forsuring i marken: Min 1,5 l m³ – eller indtil pH er under 6,4. Den tilsatte syre som lav dosis Opbevaringssyreificering vil have en positiv effekt på forsuring i marken, hvor der skal bruges mindre syre under forsuringsoperationen i marken.

e-mission System er et præcisionslandbrugs-momssystem (Variable Rate Technology). Den kan identificere NPA (Nitrogen Plant Availability) fra slurry, ved at måle ammoniakudslippet i realtid under påføringen. Dette er et nyt begreb inden for landbruget. At kunne overvåge ammoniakudledningen under påføring af slurry muliggør beregning af, hvor meget af TAN (Total Available Nitrogen) i slurrien der er gjort tilgængeligt for anlægget. Uden at kende slurry-NPA'en er alle følgende doser af mineralnitrogen til markerne normative tal – og garanteret forkerte.



Agromek Jurypris til e-mission for erstatning af normativ figur

Ved at skifte til at bruge NPA-værdien i stedet for normative tal har landmanden taget et stort skridt inden for præcisionslandbrug. Potentialet er en reduktion på +10 % i det samlede nitrogenforbrug blot ved at erstatte den normative slurry-nitrogenværdi. Landmænd, der ikke kender slurry-NPA, vil altid overdosisere – fordi det er indbygget i de normative tal som en sikkerhedsforanstaltning for at opnå optimal planteudbytte. Uden NPA er det ikke muligt at vide, om der sker en over- eller underdosis med nitrogen.

Brug af gylle management er allerede i Arla klimakontrolsystemet, og e-mission skal anerkendes som gyldig for at opnå et point, hvilket efterlader det samlede system med potentiale på 3 point

Tank capacity	Subsidy (€) (×3)
2,000 m ³ tank	€192
4,000 m ³ tank	€390
6,000 m ³ tank	€582

Tilskud pr. slurrytank - 3 point

Efterhånden som pointene tæller op, bliver de et reelt incitament til at bruge SyreN-systemet som tiltænkt og for at have en betydelig bæredygtighedseffekt

7. Fremtidsudsigter

- Digital integration: SyreNs overvågningssystem vil blive koblet til AI-baseret beslutningsstøtte og landbrugsstyringsværktøjer for optimeret brug af mineralnitrogen. Ved at kombinere gødningsplanen med e-mission-data genereres en korrektion af gødningsplanen automatisk.
- Kulstofmarkeder: Systemet muliggør verificerbare emissionsreduktioner, hvilket skaber muligheder for handel med kulstofkreditter – på frivillig basis eller som et skattefradrag.
- Kombineret reduktioner: SyreN kan kombineres med biogasanlæg, gylle separation eller overdækninger for synergistiske effekter.
- Skaleringspotentiale: Teknologien er allerede industrialiseret gennem partnerskaber med producenter af gyllevogne og klar til bred implementering, hvor end gylle-baserede systemer dominerer.

Konklusion

SyreN-systemet repræsenterer en moden, feltgennemprøvet teknologi til lavdosis beholder foruring og mark forsuring. Det bør tilbydes som et system, hvor brug af begge muligheder er obligatorisk for at aktivere Arla Climate Checkpoints. Dette anbefales som en måde at tilføje drivhusgaseffekt til brugen af forsuring i marken og for at øge økonomien i beholderforsuring.

e-mission gylle management system har potentiale til at eliminere normative kvælstofsystem, som er ansvarlig for +10 % af kvælstofudvaskningen. e-mission gylle management system blev tildelt Agromek-prisen i 2022 – nu er det tid til at belønne landmænd for at bruge det.

Artikler til dokumentation af virkningen af brugen af SyreN-ændringer:

Resumé af effekter af forsuring under opbevaring på emissioner af metan, ammoniak og hydrogensulfid fra fordøjet svineslurry (Wang et al., 2014)

Formål

Studiet undersøgte, hvordan **forsuring af fordøjet svineslurry** (biogasfordøjelse) påvirker udledninger af **metan (CH₄)**, **ammoniak (NH₃)** og **hydrogensulfid (H₂S)** under opbevaring. Den løste udfordringen med, at digestate stadig udleder betydelige gasser efter anaerob nedbrydning, især når hydrauliske tilbageholdelsestider (HRT) i kinesiske biogasanlæg er korte (2–5 dage).

Metoder

- **Eksperimentelt setup:** Ni ventilerede laboratoriereaktorer (75 L slurry hver) over 95 dage.
- **Behandlinger:**

- **Kontrol (Gn):** ingen forsuring (pH ~7,5).
- **G6.5:** forsuret til pH 6,5 med H₂SO₄.
- **G5.5:** syret til pH 5,5 med H₂SO₄.
- Kontinuerlig overvågning af CH₄ og H₂S; almindelig NH₃-prøvetagning.
- Slurry hentet fra en kommerciel svinefarm i Zhejiang, Kina.

Nøgleresultater

1. Metan (CH₄):

- Kontrolmængden (Gn) udsendte det meste CH₄ i de **første 20 dage** (topper 15–21 mg m⁻² min⁻¹).
- Forsuring til **pH 6,5** reducerede CH₄ med **31,2%** (gennemsnitligt i de første 20 dage).
- Forsuring til **pH 5,5** reducerede CH₄ med **80,8 %** med maksimale reduktioner op til **96,3 %**.
- CH₄-emissioner var stærkt korrelerede med **pH (r = 0,931)** og moderat med temperatur (negativ korrelation).

2. Ammoniak (NH₃):

- Forsuring til **pH 5,5** reducerede NH₃-udledningerne med **gennemsnitligt 40,2 %**, med maksimale daglige reduktioner på op til **82,4 %**.
- Forsuring til **pH 6,5** sænkede ikke konsekvent NH₃; efter et indledende fald steg NH₃-udledningerne og oversteg nogle gange kontrolværdierne.
- NH₃ var positivt korreleret med temperatur og negativt med pH.

3. Hydrogensulfid (H₂S):

- Kontrollen viste H₂S hovedsageligt i de **første 12 dage** ved lave fluxer (<1,2 mg m⁻² min⁻¹ efter dag 12).
- **pH 6,5** havde ingen signifikant effekt sammenlignet med kontrol.
- **pH 5,5** forårsagede en meget stor relativ stigning (**+11.324 %**, gennemsnit 4,1 mg m⁻² min⁻¹).
- Dog forblev de absolutte H₂S-koncentrationer lave (toppe ~15 mg m⁻² min⁻¹), så forfatterne vurderede miljøpåvirkningen som begrænset sammenlignet med CH₄- og NH₃-afbødningsfordele.

Konklusioner

- At forsure fordøjet grise-slurry til **pH 5,5** var meget effektivt, idet det reducerede CH₄ med ~81 % og NH₃ med ~40 %, men det øgede H₂S-udledningen.
- Forsuring til **pH 6,5** reducerede kun CH₄ beskedent og forbedrede ikke NH₃.
- Den **kritiske kontrolperiode for CH₄** er de **første 20 dage af opbevaringen**.
- Feltstudier er nødvendige for at vurdere praktikalitet, omkostninger og langsigtede miljømæssige fordele.

Reference

Wang, K., Huang, D., Ying, H., & Luo, H. (2014). Effekter af forsuring under opbevaring på udledninger af metan, ammoniak og hydrogensulfid fra fordøjet svineslurry. *Biosystemteknik*, 122, 23–30.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2014.03.002>

Oversigt over svovlomsætning og emissioner under opbevaring af kvægslurry: effekter af forsuring og tilsætning af svovl (Petersen et al., 2012)

Formål

Denne undersøgelse undersøgte, hvordan **forsuring** og **tilsætning af elementært svovl** påvirker udledninger af **metan (CH₄)**, **ammoniak (NH₃)**, **lattergas (N₂O)** og **hydrogensulfid (H₂S)** fra lagret kvægslurry. Selvom slurryforsuring er kendt for at reducere NH₃, var dens virkninger på CH₄- og svovlcyklussen mindre forstået.

Metoder

- **Slurry-kilde:** Kvægslurry fra malkekøer.
- **Eksperimentelt setup:** Pilotskala opbevaring (4 tanke, ~1 m³ hver), overvåget i 94 dage under udendørs forhold.
- **Behandlinger:**
 1. Kontrol (ingen behandling)
 2. Forsuring med H₂SO₄ til **pH 5,5**
 3. Tilsætning af elementært svovl (S⁰, 4 g/kg slurry DM)
 4. Kombination: forsuring + tilsætning af svovl
- **Målinger:** CH₄, NH₃, N₂O, H₂S målt kontinuerligt eller regelmæssigt. Total N, NH₄⁺-N, sulfat og flygtige fedtsyrer (VFA'er) analyseres.

Nøgleresultater

1. Metan (CH₄):

- Kontrolslurry udledte **7,7 L CH₄ kg⁻¹ VS** (flygtige faste stoffer) i lagringsperioden.
- Forsuring (pH 5,5) reducerede CH₄-udledningerne med **61%**.
- Elementær S-addition reducerede CH₄ med **63 %**, sandsynligvis på grund af konkurrence fra sulfatreducerende bakterier.
- Kombineret behandling viste **ingen yderligere reduktion** ud over enkeltbehandlinger.

2. Ammoniak (NH₃):

- Kontrolemissionerne var betydelige.
- Forsuring reducerede NH₃-udledningen med **75 %** (i overensstemmelse med dansk praksis).
- Elementært svovl havde **ingen effekt** på NH₃.

3. Lattergas (N₂O):

- Emissionerne var **meget lave og ubetydelige** i alle behandlinger (<0,1 % af det samlede N).

4. Hydrogensulfid (H₂S):

- Forsuring alene øgede **ikke** signifikant H₂S.
- Elementær svovltilsætning (med eller uden forsuring) forårsagede **store H₂S-emissioner**, hvilket viste stærk reduktion af mikrobielt sulfat.
- Dette rejste potentielle bekymringer om lugt og sikkerhed.

5. Svovlomsætning:

- Forsuring øgede niveauet af slurrysulfat på grund af tilsat H₂SO₄.
- Elementær S-addition blev mikrobielt reduceret til sulfid, hvilket forklarer højt H₂S.

Konklusioner

- **Forsuring (pH 5,5)** er meget effektiv til at reducere både **CH₄ (-61%)** og **NH₃ (-75%)** under opbevaring.
- **Elementær svovltilførsel** undertrykker også CH₄, men medfører en betydelig risiko for **H₂S-udledninger**.

- Kombinationen af forsuring og svovl forbedrer ikke CH₄-afbødningen sammenlignet med nogen af målene alene.
- Overordnet set **er slurryforsuring med svovlsyre** at foretrække, da den balancerer stærke CH₄/NH₃-reduktioner uden større H₂S-frigivelse.

Reference

Petersen, S. O., Andersen, A. J., & Eriksen, J. (2012). Svovludskiftning og emissioner under opbevaring af kvægslurry: virkninger af forsuring og tilsætning af svovl. *Journal of Environmental Quality*, 41(1), 88–94.
<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0184>

Resumé af ændringer i metaniske samfund og emissioner af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet svineslurry (Petersen et al., 2014)

Formål

Dette studie undersøgte, hvordan **slurryforsuring med svovlsyre** påvirker:

1. **Metan (CH₄) og ammoniak (NH₃) emissioner** under lagring,
2. Den **metanogene mikrobielle** samfundsstruktur, især rollen af **Thermoplasmata-relaterede metanogener**.

Nyskabelsen ligger i at forbinde **reduktioner af gasemissioner** med **mikrobiel dynamik** i pilotskala lagring af svineslurry.

Metoder

- **Kilde:** Slurry fra danske svinefarme:
 - **Gård A:** intern forsuring (~10–11 kg H₂SO₄ t⁻¹ slurry, pH 5,5).
 - **Gård B:** forsuring i lagertank (~6 kg H₂SO₄ t⁻¹ slurry, pH 6,5).
- **Eksperiment:** 83 dages opbevaring i 6,5 m³ dækkede pilottanke, ventileret ved 138 m³ h⁻¹.
- **Analyser:**
 - Gasemissioner: CH₄, NH₃, N₂O (ugentlig prøvetagning).
 - Metanogene samfund: T-RFLP og qPCR målrettet **mcrA** (universelt og Thermoplasmata-specifikt).

Nøgleresultater

1. Gasudledninger

- **Metan (CH₄):**
 - Begge forsuringsmetoder reducerede CH₄-udledningerne med **>90 %** sammenlignet med ubehandlet slurry.
 - CH₄-undertrykkelsen forblev stabil gennem hele lagringsperioden.
- **Ammoniak (NH₃):**
 - Forsuring til **pH 5,5** reducerede NH₃ med **84%**.
 - Forsuring til **pH 6,5** reducerede NH₃ med **49%**.
 - Reduktionerne var ensartede på tværs af opbevaringstiden.
- **Lattergas (N₂O):**
 - Emissionerne var ubetydelige og ikke væsentligt påvirket af behandlinger.

2. Metanogenfællesskab

- T-RFLP-fingeraftryk viste **kun få ændringer i den overordnede samfundsstruktur** fra opbevaring eller forsuring.
- Et dominerende fragment (~105 bp) repræsenterede sandsynligvis **Thermoplasmata-relaterede metanogener**, som anses for at være nøgleproducenter af CH₄ i svineslurry.
- qPCR med universelle primere viste ingen stærke behandlingseffekter.
- Med **Thermoplasmata-specifikke primere** faldt forekomsten i forsuret slurry, hvilket tyder på, at de er særligt følsomme over for lav pH.

Konklusioner

- **Forsuring er et meget effektivt CH₄-afbødningsværktøj** med en stabil **reduktion på >90%** under opbevaring.
- NH₃-udledninger blev kraftigt reduceret afhængigt af mål-pH (bedst ved 5,5).
- Det **metanogene samfund forblev overordnet set stabilt**, men **Thermoplasmata-metanogener** kan være uforholdsmæssigt undertrykte af forsuring, hvilket forklarer de store CH₄-reduktioner.
- Resultaterne bekræfter forsuring som en lovende **strategi til at afbøde drivhusgasser** i håndteringen af svineslurry.

Reference

Petersen, S. O., Højberg, O., Poulsen, M., Schwab, C., & Eriksen, J. (2014). Metanogene samfund ændrer sig og udledninger af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet griseslød. *Journal of Applied Microbiology*, 117(1), 160–172. <https://doi.org/10.1111/jam.12498>

Vigtige kvantitative resultater (Petersen et al., 2014)

Behandling (griseslyng)	Mål-pH	CH ₄ -reduktion	NH ₃ -reduktion	N ₂ O-effekt
Intern forsuring	5.5	>90%	84%	ubetydelige
Forsuring af lageret	6.5	>90%	49%	ubetydelige
Kontrol (ubehandlet)	~7,2	–	–	–

Resumé af effekten af slurryforsuring på emissioner af ammoniak, lattergas og metan (Petersen et al., 2012, præsentation)

Formål

Denne præsentation opsummerer dansk forskning om effekterne af **slurryforsuring** i forskellige faser (opbevaring, opbevaring, anvendelse) på udledninger af **ammoniak (NH₃)**, **metan (CH₄)** og **lattergas (N₂O)**. Den diskuterer også økonomiske perspektiver og integration med andre afbødningsteknologier.

Metoder & Cases

- **Boligforsøg:** Svineafslutningsstalde (Grønhøj, Danmark), 3 produktionscyklusser (2012).
- **Opbevaringsforsøg:** Sur slurry opbevaret maj–august (grise-slurry).
- **Feltforsøg:** Slurry-anvendelse med forskellige metoder, herunder forsuring ved spredning.

Nøgleresultater

1. Boliger (forsuring i laden)

- NH_3 reduceret med **39%**.
- CH_4 reduceret med **50%**.
- N_2O faldt med **22%** (i én cyklus).

2. Forsuring af lageret

- NH_3 -reduktion:
 - Slurry allerede syret i boliger: **84%**.
 - Slurry forsuret direkte i lagertank: **49%**.
- CH_4 stærkt reduceret (præcis procentdel ikke angivet på præparater, men "betydelig klimafordel" over fuld opbevaringsperiode).

3. Feltanvendelse (Nyord et al., 2013)

- NH_3 -tab (% af anvendt N):
 - Bagslange: **20,1%**
 - Injektion: **8,6%**
 - In-lade forsuret slurry: **6,1%**
 - Feltforsuret slurry: **6,9 %**
- N_2O : Ingen signifikante forskelle påvist.

4. Økonomi

- Værdi af reduceret NH_3 -tab (500 dyreenheder, inkl. N og S-værdi):
 - Internt, svin: **26 DKK pr. kg N sparet**
 - Internt kvæg: **34 DKK pr. kg N sparet**
 - Forsuring af lageret: **26 DKK pr. kg N sparet**
 - Forsuring i marken: **10 DKK pr. kg N sparet**
- GHG-reduktion "skyggepris" (efter co-benefits overvejet):
 - Husdyr, kvæg: **-350 til 1469 DKK pr. ton CO_2e**
 - In-house, svin: **-483 til 1134 DKK pr. ton CO_2e**

Konklusioner

- Forsuring giver **betydelige reduktioner i NH_3 og CH_4** , når det anvendes i boliger.
- Forsuring af opbevaringen er også effektiv, men den bedste klimaeffekt opstår, når slurry allerede er forsuret i staldene og forbliver ved lav pH under hele opbevaringen.
- Forsuring af marken reducerer NH_3 -tab, men har mindre effekt på drivhusgasser.
- Der er et stort potentiale for at **integrere forsuring med andre gødningsteknologier** (biogas, dæk, separation).
- Omkostningseffektiviteten varierer, men i flere scenarier giver forsuring en **netto økonomisk fordel**, når N-besparelser og drivhusgasrabatter inkluderes.

Vigtige kvantitative resultater

Behandling	NH_3 -reduktion	CH_4 -reduktion	N_2O -reduktion
Forsuring i laden	39%	50%	22%
Opbevaring (forsyreret)	84%	Høj	N.S.
Opbevaring (kun forsureret)	49%	Høj	N.S.

Behandling	NH ₃ -reduktion	CH ₄ -reduktion	N ₂ O-reduktion
Forsuring af marken	Tab reduceres til ~7% af påført N (mod 20% med slanger)	–	Ingen effekt

Reference

Petersen, S. O., Hutchings, N., Hjort, M., & Jonassen, K. (2012). *Effekt af gylleforsuring på udledning af ammoniak, lattergas og metan*. Presentation, Grønhøj trials, Aarhus University / SEGES.

Resumé af syreificering af dyreslurry – en gennemgang (Fangueiro et al., 2015)

Formål

Denne gennemgang samler beviser om effekterne af **slurryforsuring** på emissioner (NH₃, CH₄, N₂O, H₂S, CO₂), næringsdynamik, gødningsværdi og interaktioner med andre slurrybehandlinger. Den vurderer **interne, opbevarings- og feltforsuringsteknologier** og diskuterer begrænsninger og muligheder.

Forsuringsteknologier

1. **In-house forsuring:** kontinuerlig dosering for at nå ~pH 5,5.
2. **Forsuring af lagertanken:** påføres én eller flere gange med blanding.
3. **Feltforsuring:** anvendt lige før spredning via tankskibssystemer.

I 2012 var ~10% af dansk slurry forsuret (100 felter, 60 lager, 110 interne enheder).

Nøgleresultater

1. Ammoniak (NH₃) emissioner:

- Reduktioner på **50–70 % med H₂SO₄, 37 % med HNO₃** og op til **98 % med alum**.
- In-house: 50–70% (svovlsyre).
- Opbevaring: 50–88 % (svovlsyre), 27–71 % (salpetersyre).
- Mark: 40–80% (grisemød), 15–80% (kvæggjødssel).

2. Metan (CH₄):

- Langvarig forsuring undertrykker methanogenesen.
- Reduktioner: **>90% med mælkesyre, 67–87% med H₂SO₄, 40–65% med HCl, 17–75% med HNO₃**.
- CH₄-afbødning stærkest ved pH ≤5,5.

3. Lattergas (N₂O):

- Udledt hovedsageligt efter jordpåføring.
- Effekten varierer: nogle gange reduceret (f.eks. H₂SO₄ ved pH 5,5 → 23% reduktion), andre gange øget (HNO₃).
- Timing kritisk: forsuring lige før påføring sænker N₂O, mens tidligere forsuring kan øge det.

4. Hydrogensulfid (H₂S):

- Kan stige midlertidigt lige efter forsuring (på grund af protonation af sulfider).
- Langsigtede effekter varierer: nogle gange uændrede, andre gange reducerede, afhængigt af mikrobiel dynamik.

5. Kuldioxid (CO₂):

- Først sprængt under forsuring, derefter generelt lavere over lagring sammenlignet med ubehandlet slurry.

6. Gødningsværdi og afgrødeeffekter:

- Sur slurry forbedrer **mineralsk gødningsækvivalent (MFE)**:
 - Grise-slurry: +74–100%.
 - Kvægslurry: +39–63%.
- Øgede afgrødeudbytter (hvede, byg, majs, græsarealer) blev konsekvent rapporteret.
- P tilgængelighed forbedredes; Forsuring opløser uorganiske fosfater.

7. Næringsudvaskning:

- Nitratudvaskning blev ofte forsinket/reduceret de første 20–30 dage efter påføring.
- En vis risiko for øget udvaskning senere; Data er stadig begrænsede.

8. Kombineret med andre teknologier:

- **Separation:** forbedrer væskefraktionsseparationen.
- **Biogas:** samfordøjelse med forsuret slurry kan øge gasudbyttet (10–20%), men for meget forsuret slurry reducerer udbyttet på grund af sulfathæmning.
- **Kompostering:** tilsætning af syrer eller svovl kan reducere NH₃-tabene med 10–74%.

Konklusioner

- Forsuring er en af de **mest effektive NH₃- og CH₄-afbødningsforanstaltninger** i slurry-håndtering.
- Det **forbedrer gødningsværdien** og afgrødeudbyttet.
- Risici omfatter **H₂S-udledninger**, håndteringsfarer ved stærke syrer og potentielle langsigtede effekter på næringsudvaskning.
- Danmark har demonstreret fuld udbredelse; Bredere udbredelse afhænger af lovgivning og sikre håndteringsløsninger.
- Forskningshuller: langsigtede jordpåvirkninger, mikrobiel økologi, risici ved udveksling af forurening.

Vigtige kvantitative resultater

Gas / Effekt	Reduktion ved forsuring
NH ₃	50–98% (afhængigt af syre/type)
CH ₄	67–>90% (afhængigt af syre)
N ₂ O	–23% (H ₂ SO ₄) til +100% (HNO ₃)
H ₂ S	Ofte ↑ i starten; Variable senere
Gødningsværdi (MFE)	+39–100% (kvæg-/grise-slurry)

Reference

Fangueiro, D., Hjorth, M., & Gioelli, F. (2015). Forsuring af dyreslurry – en anmeldelse. *Journal for Miljøforvaltning*, 149, 46–56. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2014.10.001>

Resumé af tilsætningsstoffer og metoder til at mindske metanudledning fra lagret flydende gødning (Ambrose et al., 2023)

Formål

Denne gennemgang syntetiserer forskning i **metan (CH₄) afbødningsmuligheder** for lagret slurry og kategoriserer metoder i **fysiske, kemiske og biologiske** tilgange. Den lægger vægt på **forsuring** som en benchmark-strategi og sammenligner den med dæk, fast-væske-adskillelse, betændelse, antimikrobielle midler og kombinerede tilgange.

Metoder

- Litteraturgennemgang af **87 fagfællebedømte studier** frem til 2022.
- Fokuser på afbødning i **interne gruber og udendørs tanke** (eksklusive AD, kompostering, jordanvendelse).
- Afbødningseffektivitet (%) beregnet i forhold til ubehandlet slurry.

Nøgleresultater

1. Forsuring (benchmarkmetode):

- **pH 5,5** reducerer CH₄ med **95–99% (svineslurry)** og **65–99% (kvægslurry)**.
- Reducerer også NH₃, men kan forårsage midlertidig H₂S-frigivelse.
- Effektiv på tværs af laboratorie-, pilot- og landbrugsskalaer.

2. Fysiske metoder:

- **Dæk:** Naturlige skorper (38–92% CH₄-reduktion); halm ≥15 cm (24–28%); syntetiske plastark (op til 90%). Nogle tynde eller organiske dæk øgede CH₄.
- **Fast-væske adskillelse:** 18–81% CH₄-reduktion afhængigt af metode; centrifuger er mest effektive, men dyre. Skruepresser kan hæve NH₃/N₂O.
- **Hyppig fjernelse af slurry:** I svinestalde 51–90% CH₄-reduktion (dagligt til ugentligt). Effekten er mindre klar i kvægslurry.
- **Beluftning:** 40–100% CH₄-afbødning, men øger NH₃ og N₂O; omkostningstungt i energi.
- **Pasteurisering:** 95–100% reduktion ved 70–90 °C; upraktisk på gårdsniveau på grund af omkostninger.

3. Kemiske tilsætningsstoffer (andet end syre):

- **Alum (Al₂(SO₄)₃):** 60–90% CH₄-reduktion, men høj pris.
- **Jernsalte (FeCl₃, Fe₂(SO₄)₃):** Hæmmer metanogenese (variabel 30–80% reduktion).
- **Oxidanter (H₂O₂, KMnO₄, NaOCl):** Stærk undertrykkelse af CH₄, men risiko for sekundære emissioner og omkostninger.

4. Biologiske metoder:

- **Bio-syre (mælkesyrebakterier):** >90% reduktion af CH₄, men stabilitet og skalerbarhed er bekymringer.
- **Enzymer og mikrobielle hæmmere:** Stadig eksperimentelt; blandede resultater.

5. Sæsonmæssige effekter:

- CH₄-emissionen stiger markant ved højere slurry-temperaturer (>20 °C).

- Opbevaring under køligere forhold eller skygge kan reducere emissionerne med 50–80%.

6. Kombinerede metoder:

- Forsuring + dækning eller adskillelse kan give **synergistiske effekter**.
- Kombinationer med iltning eller oxidanter er mindre praktiske på grund af omkostninger og N₂O-afvejninger.

Konklusioner

- **Forsuring (H₂SO₄, pH 5,5)** er den **mest pålidelige og effektive CH₄-afbødningsmetode**, idet den reducerer emissionerne med op til **99 %** i svineslurry og næsten lige så meget i kvægslurry.
- Andre metoder (dækning, adskillelse, luftning) tilbyder delvise eller betingede fordele, men er mindre konsistente.
- Sæsonmæssige og styringsmæssige faktorer (temperatur, fjernelsesfrekvens, opbevaringstype) har stor indflydelse på emissionerne.
- Fremtidig forskning bør fokusere på sikre, skalerbare kombinationer og **lavdosis-syreningsstrategier** for at minimere syreforbruget samtidig med høj afbødningseffektivitet.

Vigtige kvantitative resultater

Metode	CH ₄ -reduktion (%)	Noter
Forsuring (pH 5,5)	95–99 (gris), 65–99 (kvæg)	Benchmark-metoden
Naturlig skorpe	38–92	Kun i fibrøs slurry
Halmdæksel (≥15 cm)	24–28	Tynde lag kan ↑ CH ₄
Syntetisk dæksel (plastik)	Op til 90	Har brug for gasudluftning
Opløsning mellem fast og flydende stof	18–81	Centrifuger er de bedste, dyre
Hyppig fjernelse (svin)	51–90	Daglig fjernelse er mest effektiv
Beluftning	40–100	Løfter NH ₃ , N ₂ O
Pasteurisering	95–100	Upraktisk på gårdsniveau

Reference

Ambrose, H. W., Dalby, F. R., Feilberg, A., & Kofoed, M. V. W. (2023). Tilsætningsstoffer og metoder til at mindske metanudledning fra lagret flydende gødning. *Biosystemteknik*, 229, 209–245.
<https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2023.03.015>

Oversigt over ammoniak- og drivhusgasemissioner fra slurryopbevaring – En gennemgang (Kupper et al., 2020)

Formål

Denne gennemgang samler **711 poster fra 120 studier** for at fastslå **baseline-emissioner** af NH₃, CH₄, N₂O, CO₂ og H₂S fra lagring af **kvæg- og svineslurry**, samt for at kvantificere effekten af forskellige **afbødningsteknologier** (forsuring, anaerob nedbrydning, fast-væske adskillelse, fortynding og dæksler).

Metoder

- Standardisering af emissionsdata på tværs af enheder (areal- og volumenbaseret).
- Vægtning for **sæson** og **måletid** for at beregne årlige baseline-emissioner.
- Skellen mellem **akvarier** (ubehandlet slurry) og **laguner** (involverer delvis biologisk behandling og adskillelse).

Nøgleresultater

Baseline-emissioner (ubehandlede, udækkede):

- **NH₃:**
 - Tanke: 0,08 g m⁻² h⁻¹ (kvæg), 0,24 g m⁻² h⁻¹ (gris).
 - Laguner: 0,12 g m⁻² h⁻¹ (kvæg), 0,15 g m⁻² h⁻¹ (gris).
 - Svarende til 15–16% af TAN tabt.
- **CH₄:**
 - Tanke: 0,58 g m⁻³ h⁻¹ (kvæg, 2,9% VS), 0,68 g m⁻³ h⁻¹ (gris, 4,7% VS).
 - Laguner: 0,95 g m⁻³ h⁻¹ (kvæg), 3,5 g m⁻³ h⁻¹ (gris).
 - CH₄ er den **dominerende GHG fra lagring**.
- **N₂O:** Meget lavt (~0,002 g m⁻² t⁻¹ tanke; 0,0003 g m⁻² h⁻¹ laguner).
- **CO₂:** Akvarier: ~8,0 g m⁻² h⁻¹ (begge arter). Laguner: 6,6 g m⁻² h⁻¹ (kvæg), 0,30 g m⁻² h⁻¹ (gris).
- **H₂S:** Sparsomme data, laguner: 0,04 g m⁻² h⁻¹ (kvæg), 0,01 g m⁻² h⁻¹ (gris).

Afbødningseffekter:

- **Forsuring:**
 - NH₃ ↓ ~70% (statistisk signifikant).
 - CH₄ ↓ 61–96% (statistisk signifikant).
 - N₂O ↑ (–4 til –39%, men ofte positiv stigning).
 - CO₂: lille ↑.
 - H₂S: inkonsekvent; kortsigtede toppe mulige.
- **Anaerob fordøjelse:**
 - NH₃ ↑; CH₄ ↓; N₂O og CO₂ blandede resultater.
- **Fast-væske adskillelse:**
 - NH₃ ↑ (især kvægslurry).
 - CH₄ ↓ (32–39%).
 - N₂O ↓ for kvæg; ↑ For Pigs.
 - CO₂ ↓ en smule.
- **Fortynding:**
 - NH₃, CH₄, N₂O ↓ i gennemsnit 30–50%.
 - Maksimal effekt op til 86% CH₄ og 88% N₂O-reduktion.
- **Covers:**
 - NH₃ ↓ 50–90%.
 - CH₄ ↓ med uigennemtrængelige dæksler; ↑ med gennemtrængelige dæk.
 - N₂O ofte ↑ under dynen.
 - CO₂ og H₂S: begrænsede, inkonsistente data.

Konklusioner

- CH₄ er den **største bidrager** til drivhusgasser fra slurry-lagring, hvor svineslurry udleder højere emissioner end kvægslurry.
- **Forsuring** er det mest effektive mål for samtidig reduktion af NH₃ og CH₄, men **kan øge N₂O**.
- Dækning og adskillelse er delvise løsninger med afvejninger.
- Betydelige **datahuller** er tilbage, især inden for H₂S, CO₂ og langtidsvalidering på landbrugsskala.

Vigtige kvantitative resultater

Gas / Effekt	Baseline (kampvogne)	Forsuringseffekt
NH ₃	0,08–0,24 g m ⁻² h ⁻¹ (15–16% TAN)	–70%
CH ₄	0,58–0,68 g m ⁻³ h ⁻¹ (2,9–4,7% VS)	–61–96%
N ₂ O	~0,002 g m ⁻² h ⁻¹	↑ (usikker)
CO ₂	~8,0 g m ⁻² h ⁻¹	let ↑
H ₂ S	0,01–0,04 g m ⁻² h ⁻¹	blandet

Reference

Kupper, T., Hänni, C., Neftel, A., Kincaid, C., Bühler, M., Amon, B., & VanderZaag, A. (2020). Ammoniak- og drivhusgasemissioner fra slurry-lagring – En gennemgang. *Landbrug, økosystemer og miljø*, 300, 106963. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.106963>

Resumé af ændringer i metanogene samfund og emissioner af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet svineslurry (Petersen et al., 2014)

Formål

Studiet undersøger, hvordan **slurryforsuring med koncentreret H₂SO₄** påvirker **metan (CH₄) og ammoniak (NH₃) emissioner** under opbevaring, og om disse ændringer er forbundet med **skift i det metanogene mikrobielle samfund**. Den leverer den første kombinerede emissions- og molekylärmikrobiologivurdering af forsuret svineslurry.

Metoder

- Svineslurry indsamlet fra **to danske gårde** (Gård A: intern forsurening, 10–11 kg H₂SO₄ t⁻¹; Gård B: opbevaringsforsuring, ~6 kg H₂SO₄ t⁻¹).
- Opbevaret i **83 dage** i et **pilotprojekt** (6,5 m³ tanke, overdækket, ventileret).
- Målinger: NH₃, CH₄, H₂S, N₂O-emissioner; slurrykemi; metanogent fællesskab via **T-RFLP** og **qPCR** af *mcrA*-genet (universelle og Thermoplasmata-specifikke primere).

Nøgleresultater

1. Udsendelser:

- **CH₄-udledningen reduceret med 94–99 %** i begge gårdes forsurede slurry.
- **NH₃ faldt med 84 % (pH 5,5, Gård A)** og 49 % (pH 6,5, Gård B).
- **N₂O:** ikke opdaget (dækket opbevaring, skorpe forstyrret).
- **H₂S:** Lavere i forsuret slurry på Farm A; oprindeligt højere på Farm B, men senere lignende.
- **Samlet drivhusgasbalance (CO₂eq):** Forsuring reducerede udledningerne med **94–98,5%**.

2. Mikrobielt fællesskab:

- Domineret af nogle få taksa (især en **105 bp T-RF**, sandsynligvis forbundet med Thermoplasmata-relaterede metanogener).

- Universel metanogen-overflod (qPCR) ændrede sig ikke væsentligt.
- **Thermoplasmata-relaterede genkopier blev stærkt undertrykt** i slurry forsuret til pH 5,5 (Farm A), men ikke ved pH 6,5 (Farm B).
- Antyder, at CH₄-hæmning kan involvere både **direkte undertrykkelse af Thermoplasmata-metanogener og konkurrence fra sulfatreducerende bakterier**.

3. Stabilitet af effekter:

- Forsuringseffekterne fortsatte gennem hele **83-dages opbevaring** uden genopretning af CH₄-udledninger.
- Indikerer, at **langvarig CH₄-afbødning er opnåelig** både med intern og lagerforsuring.

Konklusioner

- Forsuring af svineslurry med H₂SO₄ er **meget effektiv (>90%) til at reducere CH₄-emissioner** og reducerer NH₃-tab betydeligt.
- **Mikrobielle skift** tyder på undertrykkelse af specifikke metanogener (Thermoplasmata-lignende) ved lav pH.
- Flere hæmningsmekanismer virker sandsynligvis sammen (pH-stress, sulfatkonkurrence, flygtige fedtsyreeffekter).
- Forsuring repræsenterer således en **robust strategi for at afbøde drivhusgasser**, der forbedrer kvælstofretentionen samtidig med, at metan i høj grad begrænses.

Vigtige kvantitative resultater

Behandling	pH	CH ₄ -reduktion	NH ₃ -reduktion	Reduktion af drivhusgasser (CO ₂ eq)
Intern forsuring (Gård A)	5.5	99%	84%	98.5%
Forsuring af lageret (Gård B)	6.5	94%	49%	94%
Ubehandlet slurry	7.8	–	–	–

Reference

Petersen, S. O., Højberg, O., Poulsen, M., Schwab, C., & Eriksen, J. (2014). Metanogensamfundets ændringer og udledninger af metan og andre gasser under opbevaring af forsuret og ubehandlet svineslurry. *Journal of Applied Microbiology*, 117(1), 160–172. <https://doi.org/10.1111/jam.12498>

Resumé af effekten af lavdosisforsuring af slurry-digestate på ammoniakemissioner efter feltanvendelse (Pedersen & Nyord, 2023)

Formål

Denne undersøgelse testede, om **lavdosis forsuring af fordøjet slurry**, baseret udelukkende på **afgrødernes svovlbehov**, kunne reducere **ammoniakudledning (NH₃)** efter feltanvendelse. Konventionel slurryforsuring kræver

store syredoser (for at nå pH 6,0–6,4), hvilket er dyrt, øger svovlbelastningen og skaber håndteringsproblemer (f.eks. skumdannelse). Målet var at vurdere, om "**lavdosis**" **forsuring** er et praktisk og effektivt alternativ.

Metoder

- **Design:** Tre feltforsøg i Danmark (2020–2021).
- **Slurry:** Anaerobt fordøjet, skruepresse-adskilt kvægslurry.
- **Behandlinger:**
 1. **Trailing shoe (TS)** uden forsuring.
 2. **Bagsko + lavdosis forsuring** (SyreN-system, 1,84 kg H₂SO₄ t⁻¹ slurry = ~35–43 kg S ha⁻¹ med 3 anvendelser).
 3. **Diskinjektion (DI)** uden forsuring.
- **Målinger:** NH₃-flux over 110 timer med dynamiske kamre (vindtunneler) og online CRDS-analysator.

Nøgleresultater

- **NH₃-emissionsreduktioner (kumulativt over 110 timer):**
 - **Diskinjektion:** –38% i gennemsnit vs. bagende sko (interval 17–58%).
 - **Lavdosisforsuring:** –13% i gennemsnit vs. trailing shoe (interval 7–17%).
- Forsuring reducerede slurry-pH med **0,3–0,4 enheder** (fra 7,6–7,8 til ~7,3–7,5).
- Variation mellem eksperimenterne var knyttet til **temperatur (7–21 °C)**, **slurry-tørstof (3,4–5,9 %)** og **påføringshastighed (19–25 t ha⁻¹)**.
- Den relative afbødning pr. kg tilsat syre var sammenlignelig med tidligere svineslurry-studier og bedre end tidligere resultater for kvægslurry-forsuring, delvist på grund af højere initial slurry-pH i denne undersøgelse.

Konklusioner

- **Diskinjektion er stadig mere effektiv (–38%)** end lavdosis-syrereduktion (–13%) til reduktion af NH₃.
- **Lavdosisforsuring** er dog attraktiv:
 - Undgår overdreven svovlinput.
 - Billigere og nemmere at håndtere (mindre skum).
 - Giver en besked, men betydelig NH₃-afbødningseffekt.
- Praktisk konsekvens: Lavdosisforsuring kan være et **levedygtigt kompromis** for digestate-håndtering, hvor fuld forsuring er upraktisk, især når det kombineres med regulatoriske tilladelser (f.eks. båndanvendelse tilladt med syret slurry).

Vigtige kvantitative resultater

Behandling	Syredosis (kg H ₂ SO ₄ t ⁻¹)	pH-fald	NH ₃ -reduktion vs. TS
Trailing sko (TS)	0	–	–
TS + lavdosis syreificering	1.84	–0,3–0,4	–13% (7–17%)
Diskinjektion (DI)	0	–	–38% (17–58%)

Reference

Pedersen, J., & Nyord, T. (2023). Effekt af lavdosis forsuring af slurry-digestate på ammoniakemissioner efter feltanvendelse. *Atmosfærisk miljø: X*, 17, 100205. <https://doi.org/10.1016/j.aeaoa.2023.100205>

Resumé af effekterne af forsuring af kvæg på ammoniak- og metanudvikling under opbevaring (Petersen et al., 2012)

Formål

Undersøgelsen undersøgte, hvordan **slurryforsuring med svovlsyre (H_2SO_4 , pH 5,5)** påvirker **metan- (CH_4)** og **ammoniakudledning (NH_3)** fra **frisk og lagret kvægslurry** under opbevaring. Den testede også, om effekterne stammer fra **pH-reduktion** eller fra **svovlombdannelser** (sulfattilsætning, methionin).

Metoder

- **Tre eksperimenter:**
 1. Frisk kvæggjødelse (FS, ~10% DM).
 2. Lagret slurry (AS, 4+ måneders opbevaring).
 3. Slurries fra to danske gårde med kommercielt forsøringsudstyr.
- **Behandlinger:** Forsuring med HCl (pH 5,5), tilsætning af sulfat (K_2SO_4 , 1,6 g S/kg), tilsætning af methionin, kombinationer.
- **Opbevaring:** 20 kg i beholdere ved 20 °C i 95 dage.
- **Målinger:** CH_4 - og NH_3 -fluxer via flow-through-system; slurrykemi (N, S-fraktioner).

Nøgleresultater

1. Frisk slurry (FS):

- Forsuring reducerede NH_3 -udledningerne med **95 %** over 95 dage.
- CH_4 -udledningerne reduceret med **62–67%** (både syre- og sulfatbehandlinger).
- CH_4 -undertrykkelsen var stærkest tidligt (næsten nul emissioner på dag 7), men genvandt gradvist, da pH steg fra ~5,0 til ~6,5.

2. Lagret slurry (AS):

- Forsuring reducerede NH_3 med **96–99%**.
- CH_4 -reduktion:
 - Kun syre: **78%**.
 - Kun sulfat: **48%**.
 - Methionin: **69%**.
 - Syre + sulfat: **87%**.
 - Syre + methionin: **82%**.
- Lagret slurry havde **meget højere CH_4 -potentiale** end frisk slurry.

3. Kommerciel landbrugsslurry:

- Syreslurry (pH 5,5) viste lignende mønstre: NH_3 stærkt undertrykt; CH_4 faldt med 67–87%.
- pH steg under opbevaringen, men afbødningen fortsatte.

4. Mekanismer:

- Hæmning af metanogenese på grund af **lav pH, sulfatkonkurrence** og/eller **H_2S -toksicitet**.
- Forsuring + S-tillæg viste additive/synergistiske effekter.

Konklusioner

- **Forsuring til pH 5,5 reducerede NH₃-udledningen med >95% og CH₄ med 67–87% i løbet af 3 måneders opbevaring.**
- Effekterne fortsatte trods en gradvis pH-rebound til ~6,5–7.
- Både **pH-stress-** og **svovltransformationer** (sulfat, methionin) bidrog til CH₄-hæmning.
- Resultaterne viser, at forsuring er en **omkostningseffektiv dobbelt afbødningsforanstaltning** for NH₃ og CH₄.

Vigtige kvantitative resultater

Behandling (95 d)	NH ₃ -reduktion	CH ₄ -reduktion
Frisk slurry + syre	95%	62–67%
Lagret slurry + syre	96–99%	78%
Lagret slurry + sulfat	–	48%
Lagret slurry + methionin	–	69%
Syre + sulfat	–	87%
Syre + methionin	–	82%
Landbrugsslurry (forsuret)	~95%	67–87%

Reference

Petersen, S. O., Andersen, A. J., & Eriksen, J. (2012). Effekter af forsuring af kvægslurry på ammoniak- og metanudvikling under opbevaring. *Journal of Environmental Quality*, 41(1), 88–94.

<https://doi.org/10.2134/jeq2011.0184>

Resumé af fuldskalaundersøgelse af metan- og ammoniakreduktion ved tidlig enkelt dosis forsuring af slurryopbevaring (Lemes et al., 2022)

Formål

Denne undersøgelse giver den **første fuldskala dokumentation** af, hvordan en **enkelt tidlig forsuring** af slurry-lagringsstanke med svovlsyre (H₂SO₄) påvirker **metan (CH₄)** og **ammoniak (NH₃)** emissioner under reelle landbrugsforhold.

Metoder

- **Steder:** To kvægsludme og to svineslurrytanke (beton, Danmark).
- **Behandling:** Enkeltdosis forsuring til **pH 5,0** i begyndelsen af sommeren.
- **Målinger:**
 - CH₄- og NH₃-koncentrationer målt op og ned i vinden med **kavitetsring-ned-spektroskopi (CRDS)**.
 - Emissionsrater beregnet ved hjælp af **invers-dispersionsmetoden (IDM)** og en **bagudrettet Lagrange-stokastisk model (bLS)**.
- **Yderligere eksperiment:** Små beholdere til at studere pH-udvikling efter tilsætning af frisk slurry til den syrede opbevaring.

Nøgleresultater

1. Metan (CH₄):

- Forsuring reducerede CH₄-udledninger med:
 - **95 ± 14% (kvægslurrytanke)**
 - **95 ± 6% (svineslurry-tanke)**
- Afbødende effekt fortsatte, selvom slurryens pH gradvist steg under opbevaring og når frisk slurry blev tilsat.
- Demonstrerer stærk og varig hæmning af methanogenese.

2. Ammoniak (NH₃):

- Efter forsuring var NH₃-emissionerne **sammenlignelige med eller lavere end med en naturlig overfladeskorpe**.
- Foreslår dobbelt fordel: effektiv afbødning af drivhusgasser uden at øge NH₃-tab.

3. pH-dynamik:

- Små forsøg viste, at **tilsætning af frisk slurry hævede pH**, men den hæmmende effekt på CH₄ forblev signifikant.
- Indikerer, at enkeltdosisforsuring i den tidlige sommer er tilstrækkelig til **langvarig CH₄-reduktion** trods pH-drift.

Konklusioner

- Tidlig enkeltdosis-forsuring til pH 5,0 giver **robuste CH₄-reduktioner (~95%)** i både svine- og kvægslurrytanke i fuld skala.
- NH₃-emissioner forbliver på eller under niveauer, der observeres med naturlige skorper, uden nogen afvejning.
- Metoden er **praktisk, skalerbar og effektiv** under landbrugsforhold.
- Bekræfter forsuring som en lovende **klimaafbødningsteknologi** til opbevaring af slurry.

Vigtige kvantitative resultater

Slurry-type	Behandling (pH 5)	CH ₄ -reduktion	NH ₃ -effekten
Kvægslurry (fuldskala)	Enkeltdosisforsuring	95 ± 14%	Sammenlignelig med eller < naturlig skorpe
Griselød (fuldskala)	Enkeltdosisforsuring	95 ± 6%	Sammenlignelig med eller < naturlig skorpe

Reference

Lemes, Y. M., Garcia, P., Nyord, T., Feilberg, A., & Kamp, J. N. (2022). Fuldskala undersøgelse af metan- og ammoniakreduktion ved tidlig enkeltdosis forsuring af slurryopbevaring. *ACS Landbrugsvidenskab og Teknologi*.
<https://doi.org/10.1021/acsgscitech.2c00172>

Resumé af drivhusgasudledninger fra flydende mælkegødning: Forudsigelse og afbødning (Petersen, 2018)

Formål

Denne artikel gennemgår **drivhusgasudledninger (GHG) fra flydende mælkegødning** med fokus på **metan (CH₄) og lattergas (N₂O)**. Den fremhæver udfordringer inden for forudsigelse, nøgledrivere for emissioner og potentielle afbødningsteknologier. Fokus er på **amerikanske mejerisystemer**, især Californien (flydende gødning, høj CH₄-risiko) og Wisconsin (fast gødning, højere N₂O-risiko).

Nøglefund

1. Vigtigheden af flydende gødningssystemer

- Amerikanske mejeriprodukter bidrager med ~1,9 % af de nationale drivhusgasudledninger.
- Overgang til opbevaring af **flydende gødning** (laguner, tanke) øger CH₄-risikoen med 4–20× sammenlignet med faste systemer.
- I varme klimaer (f.eks. Californien) kommer op til **54% af landbrugsens CH₄** fra gødningshåndtering.

2. Kontrol af CH₄-emissioner

- Drejet af **indhold af flygtige stoffer (VS), opbevaringstid, temperatur og methologen-inokulation**.
- IPCC's standardemissionsfaktorer (MCF-værdier) er for simple; der er behov for **dynamiske daglige modeller**, herunder VS-nedbrydning og mikrobiel aktivitet.
- Aerobe vs. anaerobe zoner (overfladeskorper, O₂-diffusion) påvirker i høj grad CH₄/CO₂-balancen.

3. Kontrol af N₂O-emissioner

- Primært fra **nitrificering – denitrificering i skorper eller jord** efter jordpåføring.
- Emissioner afhænger af jordvand, nitrogentilgængelighed og heterogenitet (gødnings"hotspots").
- Skorper kan både **reducere NH₃**, men også fungere som **N₂O-kilder**.

4. Afbødningsmuligheder

- **Forsuring: Opbevaring** og intern forsuring med H₂SO₄ kan reducere **CH₄ med 60–87%** og **NH₃ med >90%**, selvom svovlinput skal håndteres.
- **Anaerob nedbrydning**: Kan reducere CH₄ med 41% (DK-eksempel), hvis retentionstiderne reduceres; medvirkninger inkluderer lugt og VS-reduktion.
- **Dækninger (naturlige skorper, membraner)**: Reducer NH₃ (~80%), men N₂O kan stige i skorpezoner; potentiale til at stimulere methanotrofer, hvis CH₄- og O₂-forsyningen optimeres.
- **Koststrategier**: Lipider (–9–12 % enterisk CH₄), nitrater og 3-NOP (op til –60 % CH₄) kan påvirke gødningssammensætning og efterfølgende emissioner.
- **Nitrifikationshæmmere**: Kan reducere N₂O med 40–50%, men bivirkninger kræver overvejelse.

Konklusioner

- **Opbevaring af flydende gødning er et kritisk drivhusgashotspot** i mejerisystemer, især i varmere klimaer.
- Eksisterende IPCC Tier 1/2-metoder undervurderer variationen; **dynamiske Tier 3-modeller** er nødvendige for nøjagtige lageropgørelser og afbødningsregnskab.
- Forsuring og anaerob nedbrydning er de **mest effektive gødningsbaserede teknologier** til at reducere CH₄-udledninger, med dokumenteret evidens i landbrugsskala.
- Integreret afbødning (kost + gødningshåndtering + dæksel + hæmmere) er nødvendig for at balancere CH₄, N₂O, NH₃ og næringsstofgenanvendelse.

Vigtige kvantitative resultater

Teknologi	CH ₄ -reduktion	NH ₃ -reduktion	N ₂ O-effekt
Forsuring (pH 5,5)	60–87%	>90%	Neutral
Anaerob nedbrydning	~41% (DK ex.)	–	variabel
Dæksler (membran/skorpe) –	–	~80%	maj ↑
Nitrifikationshæmmere	–	–	–40–50%
Kostlipider	–9–12% enterisk	–	maj ↑ CH ₄ i gødning

Reference

Petersen, S. O. (2018). Drivhusgasudledninger fra flydende mælkegødning: Forudsigelse og afbødning. *Journal of Dairy Science*, 101(7), 6642–6654. <https://doi.org/10.3168/jds.2017-13301>

Oversigt over drivhusgas- og ammoniakemissioner fra slurrylagring (Misselbrook et al., 2016)

Formål

Dette studie kvantificerede, hvordan **temperaturen** påvirker metan (CH_4) og ammoniak (NH_3) emissioner fra kvæglurri (CS) og svineslurri (PS) under opbevaring, og testede afbødningsmetoder: **forsuring** (CS) og **flydende lergranulat** (PS).

Metoder

- **Eksperimentelt design:** Pilot-scale tanks (1,1 m³) hos Rothamsted Research, Storbritannien.
- **Slurri-typer:** Frisk malkekqvæglurri og afsluttende svineslurri.
- **Forhold:** Tre 2-måneders opbevaringsperioder ved **kold** (~8°C), **tempereret** (~11°C) og **varmt** (~17°C).
- **Behandlinger:**
 - PS: lergranulat flydende dæksel (7 cm).
 - CS: forsuring med H_2SO_4 til ~pH 5,5.
- **Målinger:** CH_4 , NH_3 , CO_2 , N_2O fluxer med dynamiske kamre.

Nøgleresultater

Metan (CH_4):

- Kraftigt øget med opbevaringstemperaturen.
- Kontrol-CS-emissioner: **0,3, 0,1, 34,3 g CH_4 kg⁻¹ VS** (kold, tempereret, varm).
- Kontrol-PS-emissioner: **4,4, 20,1, 27,7 g CH_4 kg⁻¹ VS**.
- Forsuring af CS reducerede CH_4 med **61% (gennemsnit)**:
 - **82–91%** under køligt/tempereret,
 - **60%** under varm.
- Lerdækket havde **ingen effekt** på CH_4 fra PS.

Ammoniak (NH_3):

- Emissionerne steg med temperaturen (CS: 4–12 %, PS: 12–28 % af den oprindelige N).
- Forsuring af CS reducerede NH_3 med **75% (gennemsnit)**:
 - **56–99%** afhængigt af temperaturen.
- Lerdækket reducerede NH_3 fra PS med **77% (gennemsnit)**.

Lattergas (N_2O): ubetydeligt i alle behandlinger.

Kuldioxid (CO_2): reduceret med 26–31% (CS-forsuring) og ~30% (PS-dækning).

Metanudannelsesfaktor (MCF):

- Den afledte MCF for CS var ~2 % (kølitidslagring), meget lavere end IPCC's standard (17 %).
- For PS, MCF ~21% over 6 måneder, tættere på IPCC's standard.
- Fremhæver behovet for **temperatur- og varighedsjusterede lagerfaktorer**.

Konklusioner

- **Temperatur er en vigtig drivkraft:** varm lagring accelererer CH₄- og NH₃-tab betydeligt.
- **Forsuring af CS:** meget effektiv mod både CH₄ (61%) og NH₃ (75%), selvom det er en udfordring at opretholde lav pH over lang opbevaring.
- **Lergranulat til PS:** stærk NH₃-afbødning (77%), men ingen CH₄-effekt.
- Nationale drivhusgasbeholdninger bør **justere MCF-værdier** til opbevaringstidspunkt og temperatur frem for årlige gennemsnit.

Vigtige kvantitative resultater

Slurry-type Behandling	CH ₄ -reduktion	NH ₃ -reduktion
Kvægslurry Forsuring	61% gennemsnit (82–91% kølig/tempereret; 60% varm)	75% gennemsnit (56–99%)
Griselød Lerdække Ingen		77% gennemsnit (61–84%)

Reference

Misselbrook, T. H., Hunt, J., Perazzolo, F., & Provololo, G. (2016). Drivhusgas- og ammoniakemissioner fra slurry-lagring: Temperaturpåvirkninger og potentiel afbødning gennem dækning (grise-slurry) eller forsuring (kvæg-slurry). *Tidsskrift for Miljøkvalitet*, 45(5), 1520–1530. <https://doi.org/10.2134/jeq2015.12.0618>

Resumé af lavdosis slurryopbevaringsforsuring: Emissionsreduktioner og klimapåvirkning

Formål

Denne rapport undersøger potentialet for **lavadosisforsuring** af slurrylagring til at reducere **metan (CH₄)** og **ammoniak (NH₃)** emissioner, samtidig med at svovlanvendelsen holdes inden for afgrødernes næringsstofbehov. Den sammenligner emissionsreduktioner med dem, der opnås under konventionel **fuld forsuring**.

Syredoser

- **Fuld forsuring (pH 5,0):** 6–17 kg H₂SO₄/m³ slurry.
- **Lavdosis forsuring:** ~1,8–2,1 kg H₂SO₄/m³ (~1,0–1,1 L/m³), hvilket sænker pH med ~0,4 enheder.
- Denne dosis matcher **afgrødernes svovlbehov** og undgår overbelastning af jorden.

Emissionsreduktioner

- **Metan (CH₄):**
 - Lav dosis: **46–72% reduktion**.
 - Fuld forsuring: **95–96% reduktion**.
- **Ammoniak (NH₃):**
 - Lav dosis: **10–17% reduktion**.
 - Fuld forsuring: **80–84% reduktion**.
- **Mekanismer:**
 - CH₄-undertrykkelse via hæmning af **metanogene arkæer (Thermoplasmata)** og konkurrence fra sulfatreducerende bakterier.
 - NH₃-undertrykkelse via skift i ammonium–ammoniak-ligevægt.

Sæsonmæssige effekter

- Sommerens CH₄-udledning er op til **8× højere** end om vinteren.
- NH₃-tab stiger også med temperatur og vind.
- Derfor er forsuring **mest effektiv i de varme måneder**.

CO₂-ækvivalent (CO₂eq) afbødning

- Baseline CH₄-udledning: 12 g/m³/dag. Over 90 dage = **1,08 kg CH₄/m³ = 29–32 kg CO₂eq/m³**.
- Ved 72% reduktion (2,1 kg H₂SO₄/m³): **21–23 kg CO₂eq sparet pr. m³**.
- Sæsonmæssig afbødning (juni–okt, 150 dage):

Syredosis (L/m³) CH₄-reduktion (%) CO₂eq sparet (kg/m³)

0.00	0	0.00
0.65	46	22.36
0.98	60	29.16
1.14	72	34.99
1.74	80	38.88

- Eksempel: En **3.000 m³ slurrytank** behandlet ved lav dosis kan spare **~90 t CO₂eq** over sommeren.
- Nationalt potentiale (Danmark, 35 millioner m³ lager): **~1,05 Mt CO₂eq** spares årligt.

Konklusioner

- **Lavdosis-forsuring er effektiv**, idet CH₄ reduceres med ~50–70% og NH₃ reduceres moderat, samtidig med at den tilpasses svovlbestøvningsgrænserne.
- Selvom det ikke er lige så kraftfuldt som fuld forsuring, er det en **praktisk og omkostningseffektiv klimastrategi** på landbrugs- og nationalt niveau.

Reference

Forsuring af lavdosis slurryopbevaring: Reduktion af emissioner og klimapåvirkning. Teknisk rapport.

Resumé af lavdosisforsuring som metanbekæmpelsesstrategi til gødningshåndtering (Ma et al., 2022)

Formål

Denne undersøgelse undersøgte, om **reducerede doser af svovlsyre (H₂SO₄)** effektivt kan afbøde **metan (CH₄)**, **ammoniak (NH₃)** og **lugtemissioner** fra svineslurry under opbevaring. Målet var at forbedre **omkostningseffektiviteten** og reducere risikoen for overdreven svovltilførsel.

Metoder

- **Pilotfacilitet, Danmark** (6 kampvogne, 3,2–3,9 m³ hver).
- **Opbevaringsvarighed:** 63 dage (sensommer–efterår, 17 → 11 °C).
- **Forsuringsbehandlinger:** 0, 1,2, 2,1, 3,2, 4,5 og 6,0 kg H₂SO₄/m³ slurry.
- **Målinger:** **Kontinuerligt** ventilationssystem med gasprøvetagning; CH₄, NH₃, lugtstoffer målt via gaskromatografi og PTR-MS; Slurry-kemi sporet.
- **Økonomisk analyse:** Omkostninger pr. ton CO₂eq sparet, forudsat 1, 3 eller 10 årlige anvendelser.

Nøgleresultater

1. Metan (CH₄):

- Ubehandlet slurry: 0,065–0,12 g CH₄-C/kg VS/dag.
- CH₄-reduktioner:
 - 46% på 1,2 kg/m³.
 - ~72% ved 2,1 kg/m³.
 - Op til 96% ved 6,0 kg/m³ (næsten fuldstændig hæmning).

2. Ammoniak (NH₃):

- Ubehandlet slurry: en jævn stigning med opbevaringstid.
- Reduktioner:
 - Ingen effekt ved 1,2 kg/m³.
 - 33–78% reduktion ved ≥2,1 kg/m³, stigende med syredosis.

3. Lugtstoffer:

- Domineret af **4-methylphenol** og **H₂S** i ubehandlet slurry.
- Lav dosis (1,2 kg/m³) reducerede den samlede lugt med 67%, men H₂S kun med 18%.
- Højere doser (>4,5 kg/m³): >95% lugteundertrykkelse.
- Den overordnede lugtprofil ændrede sig, med stærk undertrykkelse af phenoliske forbindelser.

4. Mekanismer:

- Under pH 6: hæmning hovedsageligt fra **frie flygtige fedtsyrer (VFA'er)**.
- Over pH 6: sandsynligvis spiller **sulfatreducerende midler** i konkurrence med metanogener, og hæmning ved **udissocieret H₂S**.
- Flere hæmmende mekanismer tyder på robusthed af metoden.

5. Omkostningseffektivitet:

- Afbødningsomkostninger (€/t CO₂eq sparet):
 - **28–47** (1 årlig behandling).
 - **44–57** (3 behandlinger).
 - **93–134** (10 behandlinger).
- **Mest omkostningseffektive dosis:** 2,1 kg/m³ for 1–3 behandlinger/år.
- Den nuværende EU-ETS-kulstofpris (50–80 €/t CO₂eq) gør lavdosisforsuring konkurrencedygtig.

Konklusioner

- **Lavdosisforsuring (≈2,1 kg/m³)** er en **omkostningseffektiv** strategi til at reducere drivhusgasser, der reducerer CH₄ med ~70% og NH₃ med ~50%.
- Højere doser opnår næsten fuldstændig undertrykkelse, men risikerer overanvendelse af svovl.
- Kraftig lugtreduktion er en bifordel.
- Anbefalet som et **praktisk kompromis** mellem klimapåvirkning, agronomisk S-balance og økonomisk gennemførlighed.

Vigtige kvantitative resultater

Syredosis (kg H₂SO₄/m³) CH₄-reduktion NH₃-reduktion Lugtreduktion

1.2	46%	Ingen	67%
-----	-----	-------	-----

Syredosis (kg H₂SO₄/m³) CH₄-reduktion NH₃-reduktion Lugtreduktion

2.1	~72%	33–50%	Stærk
3.2	~85%	~60%	>90%
4.5–6.0	90–96%	70–78%	>95%

Reference

Ma, C., Dalby, F. R., Feilberg, A., Jacobsen, B. H., & Petersen, S. O. (2022). Lavdosisforsuring som en metanbekæmpelsesstrategi til håndtering af gødning. *ACS Landbrugsvidenskab og Teknologi*.

<https://doi.org/10.1021/acsagstech.2c00034>

Oversigt over *forvaltning af laguner og opbevaringsstrukturer for mælkegødning* (Chastain & Henry)

Formål

Dette udvidelseskapitel giver vejledning i design og forvaltning af **anaerobe laguner** og **lagringsstrukturer**, der anvendes på malkegårde, med fokus på **lugtkontrol, opbevaringsstørrelse, bakterieprocesser, håndtering af faste stoffer og miljøbeskyttelse**.

Nøglebegreber

1. Mikrobiologi af gødningsopbevaring

- Mejerigødning indeholder **anaerobe, aerobe og fakultative bakterier**.
- Anaerobe laguner er hovedsageligt afhængige af **anaerob nedbrydning af flygtige faste stoffer (83 % af mejerigødningsstoffer)**.
- Fakultative/aerobe bakterier nær lagunens overflade hjælper med at reducere lugten.
- Slurry-lagre (5–10% faste stoffer) fremmer stærkere lugt, da de aerobe lag er begrænsede.

2. Lagune- og opbevaringsdesign

- De fleste er **jordbassiner** med ler-, geosyntetiske eller betonforinger.
- Komponenter af anaerobe laguner:
 - **Behandlingsvolumen** (baseret på belastning af flygtige stoffer).
 - **Opbevaringsvolumen** (180 dages gødning + vaskevand).
 - **Slamopbevaring** (10 år).
 - **Nedbør, stormbegivenhed, fribord** (~2–3 fod).
- **Lastehastigheder**: 3,5–5 lb VS/1.000 ft³/dag afhængigt af klimaet (lavere i kolde områder).
- Høje belastningsrater ↑ lugtfrekvens; f.eks. ved 5,0 lb VS/1.000 ft³/dag, lugt kan påvises ~33% af tiden.

3. Opstart og drift

- Det er bedst at starte om **foråret/sommeren**, når bakterieaktiviteten er høj.
- Såning med slam fra en moden lagune fremskynder stabiliseringen.
- pH bør stabilisere sig ved **7,5–8,0**; hvis <6,7, anbefales kalktilsætning.
- Indikatorer på korrekt funktion: **brun/pink farve, lav lugt, bobler** (aktiv methanogenese).

4. Ledelsespraksis

- Hold væske mellem **behandling og maksimale driftsniveauer**; pump ned i sensommer/efterår for at forberede regn.

- Hyppige tilsætninger af gødning (flush/scraping 2–3× dagligt) foretrækkes frem for slug-lastning.
- Regelmæssig slamfjernelse hvert 3.–5. år (ikke ventetid i 10 år).

5. Udstyr

- Omrøring: propel-type eller centrifugale chopper-omrørerpumper (90–140 hk traktorer).
- Omrøring bør forekomme ved flere lagunepunkter, især nær indløbsrør.
- Omrørte faste stoffer (1–10 % TS) kan have behov for fortynding til vandingssystemer (<4 % TS).

6. Opbevaringsalternativer

- **Opbevaringsdamme:** mindre end laguner, ingen behandlingsvolumen, større lugtrisiko, men naturlige skorper kan reducere den.
- **Overjordiske eller underjordiske tanke:** dyrere, men egnede til pladsbegrænsede eller følsomme steder.
- Sandfyldt gødning kræver **særlige designs** (betonbunde, omrøringsramper, separation før lagunedannelse).

7. Adskillelse af faste stoffer og væske

- Mekaniske separatorer (skruepresse, sigter) kan fjerne 15–60 % af TS, hvilket reducerer lagunelast og slamopbygning.
- Tyngdekraftsbundfældningsbassiner (med eller uden flockulanter) er også effektive (31–57 % mod fjernelse; op til 76 % med polymer).

Konklusioner

- Laguner og lagre er essentielle, men kræver **omhyggelig størrelse, pH-styring og fjernelse af faste stoffer** for at fungere uden lugt eller overløb.
- Forkert design/drift risikerer lugt, grundvandsforurening eller strukturel svigt.
- **Regelmæssig inspektion, omrøring og fjernelse af slam** er afgørende for langsigtet bæredygtighed.
- Opløsning af fast og flydende opløsning og diversificeret jordanvendelse forbedrer næringsstofstyring og lugtkontrol.

Reference

Chastain, J. P., & Henry, S. (2000'erne). *Forvaltning af laguner og opbevaringsstrukturer til mælkegødning*. Udvidelsesmanual, South Carolina/NRCS.

Oversigt over metanudledninger fra opbevaring af flydende mælkegødning (Cárdenas et al., 2021)

Formål

At kvantificere, hvordan **sæson, temperatur og opbevaringsvarighed** påvirker **metanudledninger (CH₄)** fra lagret flydende mejerigødning, og at vurdere, om gødning udsat for kolde vinterlagringer genoptager CH₄-produktionen, når den senere udsættes for varmere forhold.

Metoder

- **Prøvetagning:** Mejerigødning indsamlet om sommeren (maj) og vinteren (oktober) fra en tysk forskningsgård.
- **Opbevaringstests:** 120 L tønder opbevaret under **omgivende forhold** i op til 40 uger (sommer) eller 20 uger (vinter).
- **Målinger:** Kontinuerlige gasvolumener, CH₄-koncentrationer, temperaturlogning.
- **Restpotentiale:** Efter opbevaring inkuberede prøverne ved 20 °C i 60 dage i eudiometertests for at vurdere det resterende CH₄-potentiale.
- **Modellering:** Modificeret Gompertz-funktion til at estimere CH₄-dynamik.

Nøgleresultater

1. Temperatur og sæsonmæssig effekt:

- **Sommeropbevaring:** CH₄-produktionen begyndte efter ~1 måned, med en topp på **0,061 kg CH₄/kg VS (10 uger)** og en samlet **kapacitet på 0,148 kg CH₄/kg VS (40 uger)**.
- **Vinteropbevaring:** Maks **0,0011 kg CH₄/kg VS (20 uger)**, stort set ubetydeligt.
- **Tærskel:** Identificeret ved ~13,9 °C – under dette forblev CH₄-produktionen lav, selvom gødningen senere blev varmere.

2. Opbevaringsvarighed:

- Sommergødning viste en indledende forsinkelse, derefter høj CH₄-frigivelse mellem uge 10–30, og faldt bagefter.
- Længere opbevaring øgede de kumulative CH₄-udledninger trods lavere daglige flux over tid.
- Vinteropbevaring bevarede flygtige faste stoffer (VS), men metanogenesen genoptogs ikke senere.

3. Aldringseffekter (restpotentiale ved 20 °C):

- Sommergødning bevarede CH₄-potentialet efter 10 uger (0,116 g/g VS), faldt til ~0,009 g/g VS efter 40 uger.
- Vintergødning genstartede ikke CH₄-produktionen, selv efter opvarmning til 20 °C, → **koldlagring permanent undertrykte methanogenesen**.

Konklusioner

- **Temperaturen er den dominerende drivkraft:** varm sommerlagring fører til høje CH₄-tab; kold vinterlagring undertrykker methanogenesen.
- **Tærskelen på ~14 °C** er kritisk: gødning, der opbevares under dette, genstarter ikke CH₄-produktionen ved genopvarmning.
- **Afbødningsmæssige konsekvenser:**
 - Foretræk lang opbevaring i kolde vinter → reduceret CH₄-risiko.
 - Minimer sommeropbevaring eller påfør behandlinger (forsuring, dækning, anaerob nedbrydning).
 - Nationale inventarer bør differentiere udledninger efter årstid og temperaturhistorik.

Vigtige kvantitative resultater

Sæson	Maksimal CH ₄ -emission (kg/kg VS)	Kumulativ CH ₄ (kg/kg VS)	Noter
Sommer	0,061 (10 uger)	0,148 (40 uger)	Stærke emissioner efter forsinkelse
Vinter	0,0011 (20 uger)	ubetydelig	ingen genstart ved 20 °C

Reference

Cárdenas, A., Ammon, C., Schumacher, B., Stinner, W., Herrmann, C., Schneider, M., Weinrich, S., Fischer, P., Amon, T., & Amon, B. (2021). Metanudledninger fra opbevaring af flydende mælkegødning: Indflydelse på årstid, temperatur og opbevaringsvarighed. *Affaldshåndtering*, 121, 393–402. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.12.026>

Resumé af afbødning af NH_3 - og drivhusgasudledninger fra lagret kvægslurry (Kavanagh et al., 2021)

Formål

Denne undersøgelse testede, om **landbrugsaffaldsprodukter**, **kommercielle tilsætningsstoffer** og det kemiske syrefremkaldende **jernchlorid (FeCl_3)** kan reducere **ammoniak (NH_3)** og **drivhusgasser (GHG)** fra kvægslurry under opbevaring, og vurderede **omkostningseffektiviteten** af disse muligheder.

Metoder

- **Design:** Laboratorieinkubationer, 70 dage (affaldsprodukter) og 116 dage (kommercielle/kemiske).
- **Ændringer, der blev testet:**
 - Affald: sukkerroemelasse, æblepulp, bryggerkorn, mejerivaske, mejeriaffald, græsensilage spildevluent, majsensilage.
 - Kommercielle tilsætningsstoffer: fire markedsførte slurry-forbedrere (A1–A4).
 - Kemisk: jernchlorid (FeCl_3 , 0,38–1,1% inklusion).
- **Målinger:** NH_3 , CH_4 og CO_2 -fluxer; slurry-pH; skorpedannelse.
- **Omkostningsanalyse:** Marginale reduktionsomkostninger (€/kg NH_3 eller €/t CO_2eq sparet) inklusive ændring, transport og omrøring.

Nøgleresultater

1. Ammoniak (NH_3):

- Bedste affaldsprodukter:
 - 5% sukkerroemelasse → **67% reduktion**.
 - 7% æblepulp → **49% reduktion**.
 - 7% græsensilage → **38% reduktion**.
- FeCl_3 (1,1% inklusion) → **op til 70% reduktion af NH_3** .
- Kommercielle tilsætningsstoffer → lille/ingen effekt.

2. Metan (CH_4):

- De fleste affaldstilsætninger **øgede enten CH_4** (på grund af ekstra kulstof) eller havde ingen effekt.
- Kun **græsensilagespildevud (15 %)** reducerede signifikant CH_4 .
- FeCl_3 (1,1% inklusion) → **~65% CH_4 -reduktion**; lavere inklusioner ineffektive eller øgede CH_4 .
- Kommercielt tilsætningsstof A1 reducerede CH_4 med ~25%; andre ineffektive.

3. Kuldioxid (CO_2):

- Affaldsændringer **øgede generelt CO_2** (forureningsudveksling).
- FeCl_3 reducerede CO_2 med **6–38 %**, afhængigt af inklusion.

4. Skorpedannelse:

- Bryggerkorn og æblepulp fremførte skorper (hvilket potentielt reducerede NH₃).
- FeCl₃ inducerede også en øjeblikkelig **flokkuleret skorpe** (2–4 cm).

5. Omkostningseffektivitet:

- Affaldsprodukter: meget lav eller negativ marginalreduktionsomkostning (f.eks. -€0,46/kg NH₃ for mælkevask).
- FeCl₃: €1,80–4,46/kg NH₃ (højere, men effektive).
- Kommercielle tilsætningsstoffer: dårlig ydeevne, meget høje omkostninger (€1,80–231/kg NH₃).
- Drivhusgasreduktionsomkostninger for FeCl₃, A1 og græsensilage spildevand: lav (<€14/t CO₂eq).

Konklusioner

- **Sukkerroemelasse (5 %) og FeCl₃ (1,1 %)** er de mest lovende tillægsmidler til storskala testning.
- Affaldsprodukter kan være billige og effektive til NH₃-afbødning, men kan **øge CH₄/CO₂**, hvilket skaber afvejninger mellem forurening.
- Kommercielle tilsætningsstoffer er stort set ineffektive, hvilket understreger behovet for uafhængig validering.
- **FeCl₃ skiller sig ud** som en pålidelig dobbelt reduktionsforanstaltning (NH₃ og CH₄), selvom omkostningerne er højere end spild.

Vigtige kvantitative resultater

Ændring	NH ₃ -effekten	CH ₄ -effekten	CO ₂ -effekten	Omkostningseffektivitet
5% sukkerroemelasse	-67%	blandet	↑	Meget lav pris
7% æblepulp	-49%	blandet	↑	lav pris
7% græsensilage	-38%	blandet	↑	lav pris
FeCl ₃ (1,1%)	-70%	-65%	-6–38%	€1,8–4,5/kg NH ₃
Kommercielle tilsætningsstoffer Marginal	~0 (A1: -25%)	~0		Meget høje omkostninger

Reference

Kavanagh, I., Fenton, O., Healy, M. G., Burchill, W., Lanigan, G. J., & Krol, D. J. (2021). Afbødning af ammoniak og drivhusgasser fra lagret kvægslurry ved brug af landbrugsaffald, kommercielt tilgængelige produkter og en kemisk syreforstærker. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126251. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126251>

Resumé af afbødning af metan- og lattergasudledninger fra dyrehold: II. Gødningshåndtering (Montes et al., 2013)

Formål

Denne gennemgang samler eksperimentelle beviser om **strategier for håndtering af gødning** til at mindske **metan (CH₄)** og **lattergas (N₂O)** emissioner fra husdyrsystemer. Den vurderer praksisser fra bolig til jordanvendelse og fremhæver afvejninger og konsekvenser for hele landbruget.

Nøglefund

1. Hovedkilder til udsendelser

- CH₄ hovedsageligt fra **anaerob gødningslagring** (slurry, laguner).
- N₂O primært fra **gødningspåføring på jorden** (nitrifikation/denitrifikation).
- NH₃-volatilisering er en vigtig N-tabsvej, der interagerer med både CH₄- og N₂O-cykluser.

2. Effektive CH₄-afbødningsstrategier

- **Anaerob nedbrydning** (med gasopsamling og forbrænding): høj CH₄-reduktion, vedvarende energi har medfordele.
- **Kortere opbevaringstid og lavere lagringstemperatur (<10 °C)**: stort reduktionspotential.
- **Forseglede opbevaringsrum med blus**: næsten fuldstændig CH₄-ødelæggelse.
- **Fast-væske adskillelse**: reducerer nedbrydelig C-belastning og reducerer CH₄-potential.
- **Gødningsforsuring**: vist som *meget effektiv* til reduktioner af CH₄ og NH₃ (især i slurrsystemer).

3. Effektive strategier for afbødning af N₂O

- **Reduktion af protein i kosten og fasefodring**: mindre urinvejs N → nederste jord N₂O.
- **Nitrifikations- og ureasehæmmere**: reducerer N₂O fra græsningssystemer.
- **Tidspunkt for anvendelse og dækafgrøder**: øg optagelsen af planters N, reducer udledningen.
- **Anaerob nedbrydning + injektion**: mindre CH₄/NH₃, men risiko for højere N₂O afhængigt af jorden.

4. Afvejninger og interaktioner

- **Beluftning** reducerer CH₄, men kan øge N₂O.
- **Dæksler (halm, porøst)** reducerer CH₄/NH₃, men kan stimulere N₂O.
- **NH₃-kontrol (forsuring, hæmmere)** bevarer N, men kan skifte emissioner til N₂O efter feltanvendelse.
- **Systemniveau-perspektiv er essentielt**: praksisser, der reducerer én gas, kan øge en anden.

5. Anbefalede praksisser (oversigt over tabel 1):

- **Højt afbødningspotential (≥30%)**: anaerob nedbrydning, opbevaringsdæksler (uigennemtrængelige), forsuring, reduceret opbevaringstid, lav lagringstemperatur.
- **Medium (10–30%)**: kostjusteringer, luftning, nogle tilsætningsstoffer.
- **Lav (<10%)**: mindre husmodifikationer, biofiltre (for CH₄).

Konklusioner

- **Det meste CH₄-reduktion kommer fra lagringsbaserede strategier** (forsuring, dækning, fordøjelse).
- **Det meste N₂O-reduktion kommer fra kost og jordtilførsel.**
- Forsuring identificeres som en **dobbelt reduktionsmulighed** (NH₃ + CH₄), selvom N₂O-afvejninger efter jordansøgning skal overvejes.
- Integreret, helgårdsafhjælpning, der kombinerer kost-, opbevarings- og anvendelsesstrategier, er nødvendig for at undgå forureningsudveksling.

Vigtige kvantitative indsigter

Strategi	CH ₄ - afbødning	N ₂ O- afbødning	NH ₃ - afbødning	Noter
Forsuring	Høj	Usikkert ↑	Høj	Bevist i slurry, kræver feltvalidering
Anaerob nedbrydning	Høj	Høj	maj ↑	Energigenvinding
Forseglet opbevaring + flares	Høj	Høj	?	Næsten total CH ₄ -eliminering

Strategi	CH ₄ - afbødning	N ₂ O- afbødning	NH ₃ - afbødning	Noter
Reduceret opbevaringstid/temperatur	Høj	Høj	Høj	Meget effektivt, klimaafhængigt
Kost (lavt CP, fasefodring)	Medium	Høj	Høj	Maj ↑ enterisk CH ₄

Reference: Montes, F., Meinen, R., Dell, C., Rotz, A., Hristov, A. N., Oh, J., Waghorn, G., Gerber, P. J., Henderson, B., Makkar, H. P. S., & Dijkstra, J. (2013). Afbødning af metan- og lattergasudledninger fra dyrehold: II. Gødningshåndtering. *Journal of Animal Science*, 91, 5070–5094. <https://doi.org/10.2527/jas2013-6584>

Efficiency Assessment Report

SyreN Changes

Stabilization of slurry for improvement of nutrient values and reduction of greenhouse gasses

Solution ID: 10488

Company:
BioCover

Country: Denmark

Export Date: 16.12.2019

Assessment Results



Approved

FEASIBILITY

- Credibility of concept ☒ YES
- Scalability ☒ YES

ENVIRONMENT

- Environmental benefits ☒ YES

PROFITABILITY

- Client's economic incentive ☒ YES
- Seller's profitability ☒ YES

General Comments
from the Solar Impulse
Foundation
committee can be
found in the last
section of this report.

The solution ID10488 is declared by the Solar Impulse Foundation as labelled Solar Impulse Efficient Solution after going through the following selection steps:

- It is falling into the eligibility scope in terms of (1) Minimum Maturity and (2) Type of solution.
Moreover, the solution is owned and developed by an entity Member of the World Alliance that is operating in accordance with the Solar Impulse Foundation's ethical position.
- The Solution Submission Form was assessed by 3 independent Experts with at least 5 years of Experience in one of the sectors of application of the Solution and valid and coherent answers with justifications were collected enabling the deliberation of a majority opinion on each of the 5 criteria.
- Based on Experts deliverables, both the Solutions and Experts Team concluded that the solution's assessments were satisfactory and that the solution obtained a majority of YES on all criteria. For the Client's Economic Incentive criterion, Expert 2 chose Statement 4 – i.e A foreseeable change in certain regulations in a 5 years' timeframe could make the solution cheaper than the reference/ or make the reference disappear in the targeted regions of implementation.
- During the session, the Internal Deliberation Committee unanimously stated that there is a foreseeable ROI making the solution economically attractive, which resulted in the awarding of the Solar Impulse Efficient Solution Label. Further comments made by the Internal Deliberation

Feasibility

This section captures the ability of the solution to be credible (based on a resilient technology or concept) and captures if the solution is already or has the potential to be scaled up and deployed concretely in the real world (vs. in lab). The Experts were required to answer two questions on (1) credibility of design and (2) scalability of the solution.

Experts Reviews

CREDIBILITY OF DESIGN

Can the technology behind the solution be constructed and operated as designed?

✓ YES

Expert justification - The effects of acidification on : - Methanogenesis bacteria producing methane gas lowering - Nitrogen transformation in solid ammonium salt instead of ammoniac gas is well documented in academic papers. The latter effect explains the Nitrogen Utilization Rate increase that matters for fertilization. The solution can be operated with the devices mentioned as it is, in summary, a pH-controlled acid delivery system.

✓ YES

Expert justification - SyreN Changes measures the emission of methane- and ammonia gases from slurry storage facilities through monitoring of the pH value. The business model includes transforming the data on emission reductions into profit by issuing and selling carbon emission certificates. There is a scientific basis that acidification allows a change on the chemical reaction regime. (one paper also provided in the application on the inhibition of methanogenic bacteria by acidification) The innovators have experimental data that show emission reductions of NH₃ and CH₄ and a test report by VERA and ETV additionally confirms efficiency of ammonia emission reduction. The SyreN System is operational at 128 sites in 7 countries - proof that the pH-monitoring system works in practice. Comment: The solution competes with but can also complement Biogas digesters. In some countries (e.g. Switzerland, Germany) biogas from slurries is used for gas, heat and electricity production. There is a danger that the solution competes with a favorable technology for renewable energy production (SyreN avoiding emissions and biogas digesters using emissions for production). As the innovators state, the solution is also complementary, because digested slurry must be acidified post digestion.

SCALABILITY

Is the manufacturing (if a product) or distribution (if a service) of the solution at scale technically feasible?

✓ YES

Expert justification - The market addressed by the system is huge since it will be useful each time there is slurry. The system can be either built for dedicated use as described, or adapted on existing biogas digester

(with less efficiently however). The system itself can be industrialized for its production.

✓ YES

Expert justification - Manufacturing has been outsourced. Installation and service is done by the machinery dealer network (slurry tanker manufacturers). The innovators have partners that make scale-up feasible in terms of personnel and access to customers. Three types of the acidification exist: at barn, storage and in-field. This means innovation is flexible. For the next five years, industrialized countries with intensive animal farming are targeted. The innovators are aware of challenges: For scaling world-wide, the solution requires local adaptation due to local differences of farms (e.g. size, type of equipment, common slurry practices), climate (emissions are specific per climate region) and regulations.

Environment

This section captures the ability of the solution to have a direct positive impact on the environment over its entire lifecycle compared to a reference without any significant negative impact transferred. The Experts were required to answer one question on the environmental benefit of the solution.

Experts Reviews

ENVIRONMENTAL BENEFITS

Can the solution deliver an incremental environmental benefit versus a reference case, considering the lifecycle (production, use and disposal stages) of its value chain?

✓ YES

Expert justification - The solution delivers a disruptive environmental benefit compared to the usual/reference case (biogas digester and methane burning) : - 90% less of methane gas (Greenhouse gas with Global Warming Potential of 28 @100 years compared to CO₂) - less ammoniac gas which is a precursor of laughing gas (N₂O) (Greenhouse gas with Global Warming Potential of 298 @100 years compared to CO₂) - less ammoniac gas which is a precursor of secondary unorganic Particulate Matter - lower the need for mineral fertilizer produced with natural resources and fossil energy thanks to the increased Nitrogen Used Rate of the organic fertilizer produced (defines the quality of the organic fertilizer)

✓ YES

Expert justification - An LCA is available for the in field application and does not take into account the methane emission reduction. The environmental benefit is evident, as the solution directly enables significant emission reductions of several greenhouse gases (numbers provided in the application). The innovator calculated that the technology may offer up to 1 % of world CO₂ reduction. The solution also contributes to reducing eutrophication of inland waters and oceans (reduce emissions of excess nutrients). Ammonia emission reduction translates into PM reduction (particulate matter) and consequently helps to avoid significant health costs.

Additional feedback / advice for the member

Comment to Innovator: If you have not yet done, I recommend that you assess the impact of H₂SO₄ on soil and whether emissions of SO₂ occur into air.

Profitability

This section captures the capacity of a solution to deliver an economic incentive for the client and to generate profits for the seller in a 5-year timeframe, regardless of its marketing strategy, its positioning towards competitors, the novelty of the idea and the resources and experience of the team. The Experts were required to answer 2 questions on (1) Client's economic incentives and (2) Seller's profitability of the solution.

Experts Reviews

CLIENT'S ECONOMIC INCENTIVE

Can the solution: 1) have the same or lower purchasing price than a reference case? OR 2) create return on investment over the lifetime of the solution despite a higher purchasing price? OR 3) create an economic incentive (value for money) for the client which is not directly related to savings? OR 4) become cheaper than the reference after a change in regulation that is reasonably foreseeable in the next five years in the targeted region(s) and sector(s) of implementation?

✓ YES

Selected option - 2 - Yes, The Solution creates **indirect savings** for the client (e.g. return on investment).

Expert justification - The solution needs a modest additional investment to the reference case (biogas digester) but can also be implemented in dedicated premises. The solution provides a direct ROI: 1/ Reference use case advantage: Energy from methane burning 2/ SyreN changes advantage: Less mineral fertilizer to buy 3/ SyreN changes advantage: Carbon credit income The solution also provides an indirect ROI with less Particle matter (better air quality).

✓ YES

Selected option - 4 - Yes, The Solution has the potential to create savings for the clients **if regulations were to change** within the next 5 years.

Expert justification - Reference: doing nothing the existence of a client's incentive depends on political decisions. The slurry acidification is already one of the measures included in Germany's action plan against air pollution. In Denmark there seem to be similar approaches. The innovator presupposes quota for emissions in agriculture as part of the business model. And here is where the challenge is. If these quotas are set up (depends on national policies to define quota), a protocol could be set up to transfer monitoring data into saved emissions (requires the consent of national administration for environment). The trading of saved emissions would cover the farmers' costs to use the SyreN system or even generate an additional income.

Considering worldwide political pressure to reduce greenhouse gas emissions and foreseeable rising prices GHG emitters need to pay, chances are good that national cap n trade systems for emissions in the agricultural sector will be implemented.

However, as this remains uncertain, it is also uncertain whether there will be a client's profitability.

SELLERS' PROFITABILITY

Could the solution itself be profitable for the seller within 5 years, with a sale price at which clients would buy it? Please evaluate this regardless of the marketing strategy, the people behind it, the competitors and the novelty of the product.

✓ YES

Expert justification - The solution is free for the client (farmer) as they will share revenue from Carbon credit sold. The solution is currently cost neutral but is expected to become profitable with the expected price increase in the coming years. There are already 178 farms equipped with the solution. From a regulatory perspective: "The SyreN System is now mandatory for use in Denmark and Germany. By 2022, ½ the Danish slurry must be treated and by 2025, 16.000 ton of ammonia emission must be eliminated in Germany by use of acidification. This automatically introduces SyreN System to 40 % of all slurry in Europe without marketing cost."

✗ No

Expert justification - An essential statement the innovators make: "Conditions for breakeven, is the political process for issue of carbon credits based on reducing pH and measuring this in a slurry storage tank." It is planned to transform emission reductions calculated from pH-measurement data into CO2 quota. This will allow us to issue emission reduction certificates.

The innovator is developing a protocol for the mentioned transformation with the Danish EPA. They calculated with a CO2 quota price of 17 Euro/ton CO2 eq. There is a high level of uncertainty in profitability because the company is dependent on the implementation of the quota and the market price of certificates. See also assessment box before. It is questionable if the innovators themselves will receive an income in the business model described (see SyreN Changes business model) if the coordination work between all the actors is conducted by a consortium of the chemical industry, as the innovators foresee it.

✓ YES

Expert justification - Forecast profitability is demonstrated and with realistic value. Breakeven is reached and the payback period is acceptable. Financial plan is well outlined and expected revenues are demonstrated. Breakeven of the actual solution is demonstrated. Financial impact of the solution to the client is also well outlined.

Report from the Internal Deliberation Committee meeting

The Committee had to answer the following questions: do we consider that the regulatory changes expected by the expert that would make the solution cheaper in the coming 5 years are realistic and do we feel confident enough that they could happen to put the solution in the portfolio?

Reason for presenting the solution before the Internal Deliberation Committee

Expert 1 chose statement 4: A foreseeable change in certain regulations in a 5 years' timeframe could make the solution cheaper than the reference/ or make the reference disappear in the targeted regions of implementation.

Outcome of the discussion

The Internal Deliberation Committee discussed the client's economic incentive criterion of the solution wondering if it is profitable for farmers to seek for this technic. It was raised that in addition to the positive impact of monitoring ammoniac for the environment, the payback time is reached in 1 year in countries with established regulations on methane/ammoniac emissions like Germany and Denmark. So, the Committee highlighted, as the experts did, that it is an economically profitable solution and will be supported with future regulations. Therefore, these arguments convinced the group to deliberate in favor of the label attribution to SyreN Changes.

The information set out above is solely for the purposes of information and the Solar Impulse Foundation does not provide any guarantee as to its authenticity, completeness or accuracy. This information is the direct outcome of the assessment performed by external non-remunerated experts that volunteered to review your solution submission form following the application of the Efficiency Assessment Process of the Solar Impulse Efficient Solution Label Standards. This information is shared to you as it might be of value for you to get the feedback provided on your application – regardless of the outcome of the general selection process.

Copyright © 2019 **Solar Impulse**. All rights reserved.

TRL 9

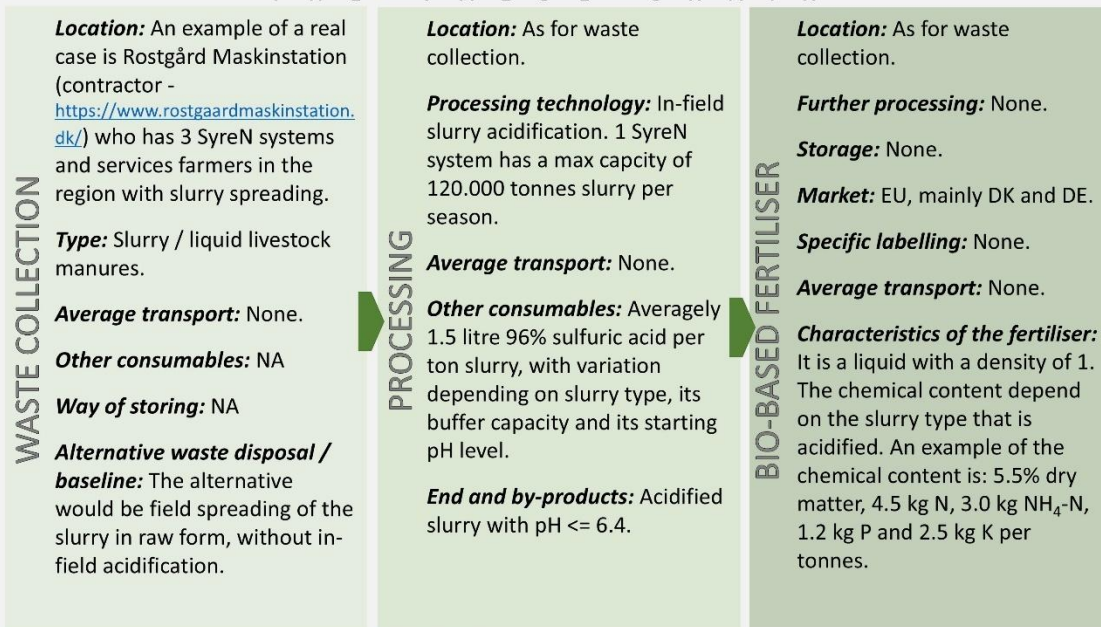


From raw to acidified slurry via in-field acidification

BioCover's SyreN system adjust the pH of slurry during field spreading to a level that moves the ammonia-ammonium equilibrium to ammonium, around pH 6.4 by use of sulfuric acid. This reduces the emission of ammonia with typically 50% and saves the loss of typically 15 kg N per ha. Also, the plant availability of phosphorus is typically doubled, so all-in-all, NP recycling is increased and pollution reduced. The sulfur in the acid reduces the need for sulfur fertilising.



T H E V A L U E C H A I N



Environmental impact: The Nutrient Recycling Potential is 107%*, since it means that more N is available to the crop.

Climate impact: All-in-all, the Emission Reduction Potential is 0.3* tonnes of CO_{2eq} for every 1,000 kg N and P in the processed slurry.

*These assessments are related to the normal baseline, based on provided information combined with well documented scientific evidence, and the use of a standardised and custom-made methodology.

[Provide your own preliminary comments to the following issues – should be updated after deeper analysis – the sub-group work ahead of us]

Market potential: Substantial as there is app. 1.2 bn m³ slurry in EU and 4.3 bn m³ global. Technology is adaptable to general agricultural machinery.

End user acceptance: Depends on costs, farm size, availability of contractors to conduct this in fields within the specific timeframe. Sulphur fertilisation is obtained simultaneously

Policy implications: Legislation is the main driver

SyreN Changes



A new business model for SyreN System

Reduction of methane emission from slurry storage creates a new business model for SyreN acidification system. The SyreN system is easily modified to be able to mix sulphuric acid into slurry through the slurry tanker crane arm and pump. The existing 120 systems offer enough capacity to cover the app. 19.000 Danish slurry storage tanks. It has a huge advantage is being one man operated while carrying enough acid for multiple acidification task

Very importantly, it has a build in pH sensor for documentation of the potential carbon credit from reduction of methane gas emission as well as for ammonia emission.



Storage acidification – Slurry acidified in the storage facility during filling of slurry. The final adjustment of the pH may be performed during application to agricultural fields



Acidification start in May / June with follow-up in August / september and november/December

Potential:

Reduction in pH and Sulphur has proven to be equally effective against methane emission as ammonia emission.

Denmark's CH₄ emissions in 2021 was 306.000-ton CH₄ ex. LULUCF. (ENVS. AU). With a distribution of 48% from enteric fermentation and 36% from manure management. Manure management contributes with 110.000-ton CH₄ of which can be reduced with 49 – 96% with acidification during storage. This will contribute with a CO₂ reduction of 1.5 – 2.9 Mio. ton CO₂.

Future business model:

The goal is to establish a new business model for SyreN system that reduces methane (CH₄) emissions through acidification and the issue of Carbon removal Credit certificates. The European industry is familiar with carbon credits and regulates how much it costs to emit more CO_{2e} than allowed for. To verify a credit, it must be verified by an independent observer, and it must be obtained using an officially approved methodology – preferably on the EU's "best available technology". The observer must have enough data available (specified in LCA) to be able to certify that the reduction has taken place and approve that the credit can be issued.

Economically profitable measures are a welcome contribution to agriculture. If the acidification is used in the manure storage or in the barn, it can inhibit the development of methane gas bacteria and thus reduce CH₄ by 80-90% and NH₃ by 50% (Petersen, S.O et al., 2013; Wang, K. et al. 2014; Ma, C. et al 2022).

Conclusion:

The SyreN Changes acidification technology with an added methodology is a method of reducing GHG emissions from slurry storages in agriculture with a potential to reduce +10 % of all CO₂ emissions from agriculture.

Using the existing fleet of SyreN Systems with a modification for storage acidification, Danish agriculture may reduce +1 Mio ton of CO_{2e} emissions from methane in a safe and proven manner.

In addition, it will create a new potential source of income that potentially offers to cover the added expense for use of acid and acidification technology.



Contractors with one or more SyreN Acidification systems + 120 systems in the field

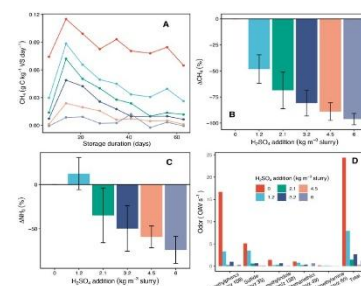
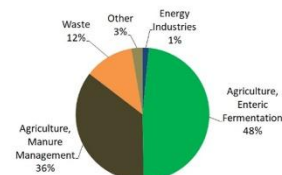


Figure 1. (A) Daily CH₄ emission rate. Percentage reduction in cumulative (B) CH₄ emissions and (C) NH₃ emissions. (D) Reduction of selected substrates at all levels of pig slurry acidification prior to storage as indicated. The color code shown in panel D applies to all subplots.

Ma, C., Dalby, F. R., Feilberg, A., Jacobsen, B. H., & Petersen, S. O. (2022). Low-dose acidification as a methane mitigation strategy for Manure Management. *ACS Agricultural Science & Technology*, 2(3), 437–442. <https://doi.org/10.1021/acscagritech.2c00034>

CH₄ emission, 2021



<https://envs.au.dk/en/research-areas/air-pollution-emissions-and-effects/air-emissions/greenhouse-gases/methane-ch4>



SyreN System: 12 Acidification Awards

- Agromek prisen 2008
- Agromek prisen 2010
- Miljøministeriets CSR Award 2012
- Baltic Manure Award 2012
- EU CSR Award environment 2013
- EU Award program Scale-up finalist 2018
- Solar Impulse Efficient solution SyreN 2019
- Solar Impulse Efficient solution Changes 2020
- Energy Globe Award 2020
- Energy Globe International Award 2021
- Solar Impulse Efficient solution e-mission 2021
- Agromek prisen 2022

