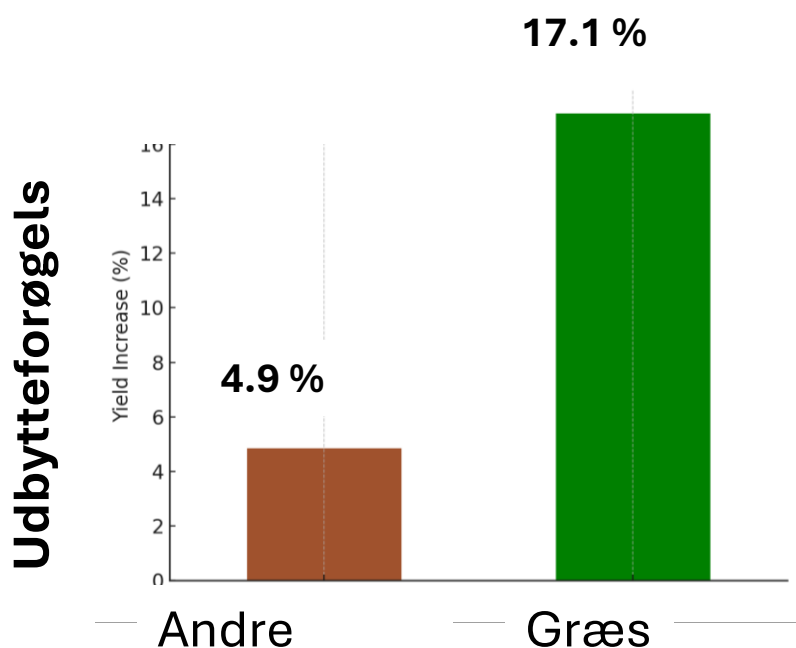


# **Analyse af 27 videnskabelige studier ved brug af Forsuring i marken i +60 markforsøg fra 2010 til 2024**

Forberedt for Arla Foods  
til inkludering af In Field  
Acidification til Arla  
Foods  
klimakontrolmodel



# Ledelsesresumé

Denne rapport giver en omfattende vurdering af forsuring af gylle i marken som en strategi for at reducere ammoniakudledninger ( $\text{NH}_3$ ) i landbruget. Med udgangspunkt i over 60 feltforsøg gennemført i Europa mellem 2010 og 2024 analyserer rapporten effekterne af forsuring i marken med særligt fokus på ammoniakemissioner, afgrødeudbytte, fosforopløselighed og overholdelse af sulfatgrænser.

Nøglefund viser, at forsuring kan reducere  $\text{NH}_3$ -emissioner med 50–95 %, hvor de mest effektive resultater opnås ved svovlsyredoser på 2,6–4,4  $\text{L/m}^3$  og pH-værdier på 6,0–5,5. Mens højere doser fører til stærkere  $\text{NH}_3$ -reduktioner, giver doser på 2,5  $\text{L/m}^3$  eller mindre stadig betydelig emissionskontrol (+/- 50 %) og opfylder agronomiske anbefalinger om svovlanvendelse.

Græsmarksforsøg viste konsekvent udbyttetigninger med et gennemsnit på 17 %, mens resultaterne for korn var mere variable med 5 %. Forsuring viste sig også at være sammenlignelig eller bedre end injektionsteknikker, især under tørre forhold, med mindre fysisk forstyrrelse af jorden, hvilket resulterede i betydeligt mindre  $\text{CO}_2\text{eq}$ -udledning.

Fosformobilisering var en bekymring, når pH var under 6,0, med markant lavere risiko ved pH-niveauer over 6,0. I vådområder, er det vigtigt at opretholde en balance mellem emissionsreduktion og P-retention. På andre områder kan den øgede P-mobilisering være en fordel for landbruget med mindre behov for mineral P-anvendelse.

Rapporten konkluderer, at gylle forsuring er en yderst effektiv og skalerbar teknologi til at reducere landbrugsudledninger fra  $\text{NH}_3$ - under udbringning af gylle. Det giver mange operationelle fordele i forhold til injektioner, men succes afhænger af at opnå passende pH-mål, sikre svovlniveauer og tilpasse sig jord- og afgrødeforhold. Bekymringer om svovlforbruget adresseres også: anvendelse af svovlsyre til forsuring øger sulfattilførslen til jorden. Selvom dette generelt er gavnligt for systemer med svovlmangel, skal kumulative anvendelser håndteres for at undgå overgødning, især i områder med regulatoriske grænser for sulfat ( $\text{SO}_4\text{-S}$ ) påføring – typisk fastsat til 40–50 kg/ha. Moderat dosering på 2,5  $\text{L/m}^3$  muliggør overholdelse inden for disse tærskler, når gylle anvendelsen er begrænset til 49–61  $\text{m}^3/\text{ha}$ .

Rapporten er struktureret over tre hovedemner:

- Ammoniakemissionseffektivitet
- Afgrødeudbytte-respons.
- En sammenlignende vurdering mellem græstørvsinjektion og forsuring i felten.

*Morten Toft 04.12.2025*

## Afsnitstitel

|                                                                                 | Side |
|---------------------------------------------------------------------------------|------|
| Ledelsesresumé                                                                  | 2    |
| Indholdsfortegnelse                                                             | 3    |
| <b>Emissionsreduktionseffekt</b>                                                |      |
| Nøglefund                                                                       | 4    |
| Effektivitet af forsuring på jord med lav pH-værdi                              | 4    |
| Risici for fosformobilisering                                                   | 5    |
| Toppræsterende strategier                                                       | 5    |
| Effektsammenligning af forsurings- og græsspadsinjektionsteknikker              | 6    |
| Anbefalinger                                                                    | 7    |
| <b>Effekter af forsuring i marken på afgrøden</b>                               |      |
| Oversigt over feltforsøg                                                        | 8    |
| Antal forsøg efter afgrødetyper                                                 | 8    |
| Liste over stier med referencer                                                 |      |
| Konklusioner                                                                    | 10   |
| <b>Sammenlignende vurdering af lavvandede injektioner og forsuring i marken</b> |      |
| Oversigt over Teknikker                                                         | 11   |
| Lav pH-jord                                                                     | 12   |
| Oversigt over teknikker                                                         | 13   |
| Agronomiske og praktiske faktorer                                               | 14   |
| Jord- og næringsstofhensyn                                                      | 15   |
| Infrastruktur- og omkostningsovervejelser                                       | 16   |
| Miljøpåvirkninger – CO <sub>2</sub> eq                                          | 23   |
| e-missioN System                                                                | 27   |
| Vedhæftet artikler                                                              |      |

## Indtroduktion:

Denne syntese er baseret på en analyse af 27 internationale rapporter og studier, herunder feltforsøg, laboratoriemålinger og modelbaserede vurderinger udført mellem 2010 og 2024 i otte europæiske lande.

Rapporten opsummerer resultater fra mere end 60 feltforsøg, laboratoriestudier og modelbaserede vurderinger af gylleforsuringsteknikker udført over hele Europa. Målet er at evaluere effektiviteten af mark forsuring til at reducere ammoniak ( $\text{NH}_3$ )-emissioner og dens indvirkning på brugen af sulfat, opløselighed af P og afgrødeudbyttet.

## Nøglefund

### 1. Ammoniakreduktionseffektivitet

- Forsuring reducerer konsekvent  $\text{NH}_3$ -tab med 40–95 %, afhængigt af syredosis, mål-pH, gylletype og applikationsteknik.
- De højeste reduktioner (>90%) blev opnået i finske og tyske studier med mål-pH på 5,5 og syredoser på 2,6–4,4 L/m<sup>3</sup>.
- SyreN-systemer og forsuring i marken klarede sig særligt godt under blæsende eller varme forhold.

### 2. Syredosering og mål-pH

- De fleste forsøg brugte svovlsyre ( $\text{H}_2\text{SO}_4$ ) med dosering fra 1,7 til 9,0 L/m<sup>3</sup>.
- Effektiv  $\text{NH}_3$ -reduktion fandt typisk sted ved pH 6,0 eller lavere.
- Syrebehovet var højere for biogasgylle på grund af dens høje bufferkapacitet.

### 3. Udbytteeffekter

- Udbytteeffekter varierede efter afgrøde og forhold:
  - Græsareal: Konsekvent positiv udbytteeffekt (+400 til +1100 kg DM/ha).
  - Vinterhvide: Blandede resultater; moderat gennemsnitlig gevinst (~+220 kg/ha), med nogle forsøg, der viser neutrale eller negative effekter.
- De bedste udbytteresponser var forbundet med forsuret biogas gylle på græsarealer.

### 4. Miljømæssige og økonomiske overvejelser

- Forsuring reducerer også drivhusgasudledninger og har neutrale til positive effekter på jordbundens biologi.
- Der er nogle bekymringer vedrørende tungmetalmobilitet (Zn, Ni) og P-udvaskning, især på sandjord.
- Økonomisk bæredygtigt under regulerings- eller incitamentsrammer

## Effektiviteten af forsuring på jorde med lav pH-værdi

Mens de fleste forsøringsforsøg udføres på jorde med neutral til let alkalisk pH, er effekten af forsuring på jorde under pH 6,0 mindre undersøgt. Tilgængelige data tyder dog på, at på sure jorde (pH < 6,0) er fordelene ved høje syremængder til at reducere ammoniaktab mindre udtalt. Dette skyldes, at det naturlige jordmiljø allerede begrænser  $\text{NH}_3$ -fordampningen, hvilket reducerer den relative gevinst ved yderligere pH-sænkning. I et toårigt feltstudie påvirkede jordkationudvekslingskapaciteten (CEC)  $\text{NH}_3$ -udledningerne efter påføring af kvægslurry ( $R=0,53$ ). Kilde: Thünen Institute-rapport om forsuring s. 8.

## Risici for fosformobilisering

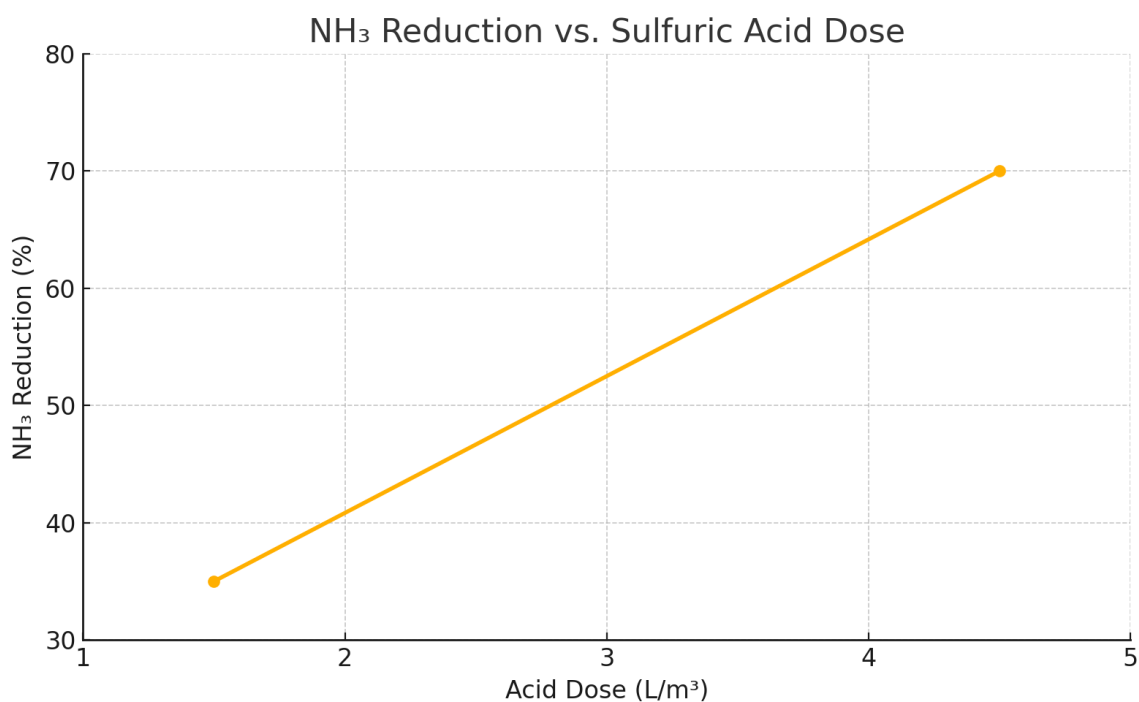
Flere studier viser, at fosfor (P) bliver mere vandopløseligt i slurry efter forsuring. Risikoen for P-udvaskning er særligt relevant for græslandssystemer, hvor slurry ikke indarbejdes i jorden. Forskning tyder på, at betydelige stigninger i opløseligt P opstår, når slurry-pH sænkes under 6,0, med den største mobilisering observeret ved eller under pH 5,5. Selvom dette kan forbedre plantetilgængeligheden af P, øger det også miljørisikoen i sårbare områder, såsom sandjord eller vådområder.

Hvis gyllens pH ikke sænkes under 6,0, er risikoen for fosforudslip betydeligt lavere. De fleste forsøg viser, at opløselige P-niveauer forbliver stort set uændrede eller kun stiger en smule, når pH holdes over 6,0. Derfor synes det at opretholde slurry-pH mellem 6,0 og 6,3 at finde en balance – hvilket giver gode fordele for ammoniakreduktion samtidig med, at risikoen for P-mobilisering minimeres. Det gør det til et sikrere valg for miljøfølsomme områder.

## Top-præsterende strategier

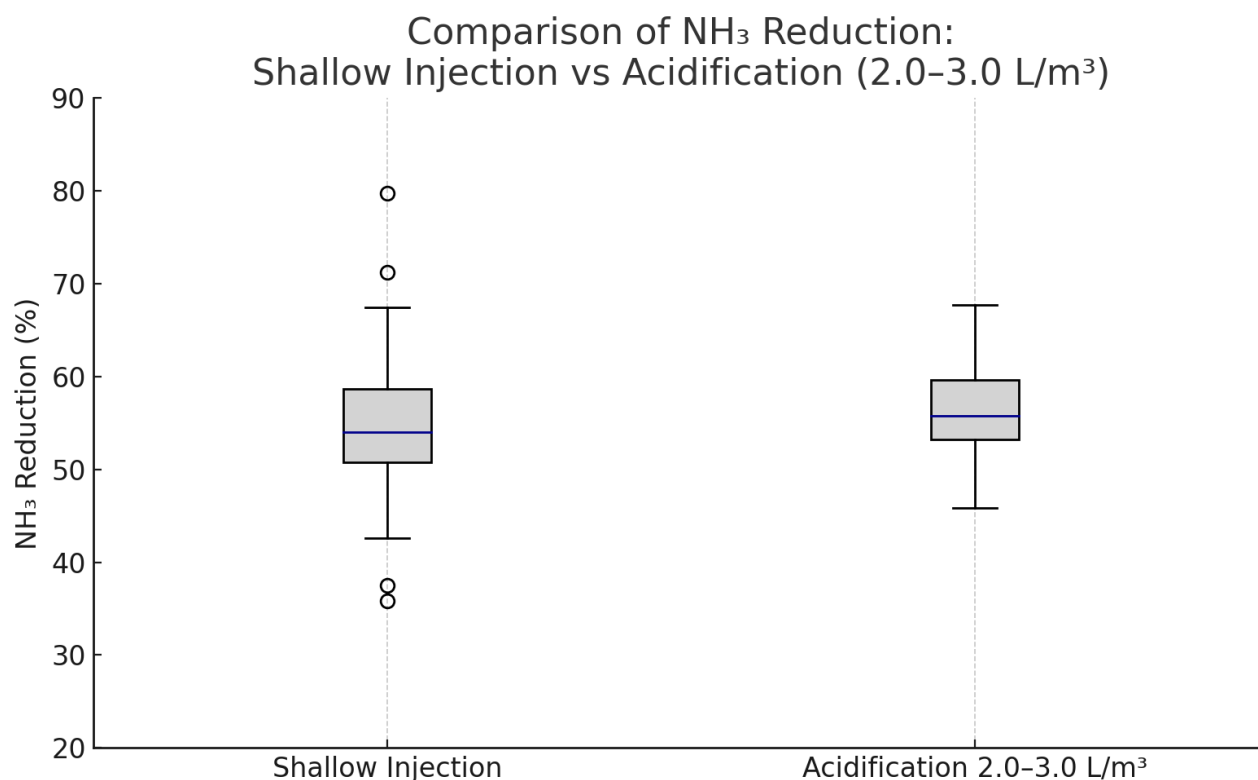
| Studie         | Kvæggylle-type     | Dosis (L/m <sup>3</sup> ) | pH  | NH <sub>3</sub> -reduktion (%) |
|----------------|--------------------|---------------------------|-----|--------------------------------|
| Triesdorf 2023 | Kvæg/digestate     | 4.5                       | 6.5 | 70%                            |
| Pacholski 2015 | Kvæg/svineblanding | 6.5                       | 6.2 | 68%                            |
| VERA 2010      | Kvæg og gris       | 2.4                       | 6.4 | 43%                            |

## Gennemsnit af alle forsøg



## Effektsammenligning med injektionsteknikker

Kvantitative sammenligninger fra flere forsøg viser forskellene i effektivitet mellem de to teknikker. I Seidel et al. (2013)-studiet reducerede forsuring til pH 6,0 ammoniakudledningen med 68,9 %, mens lav injektion med 35 cm mellemrum opnåede 60,6 %. Tilsvarende viste Keskinen et al. (2022) forsøget 95% reduktion af  $\text{NH}_3$  ved forsuring mod 43% ved injektion i et tørt år. Disse resultater viser, at forsuring i gennemsnit resulterer i 5–20 procentpoint større reduktion af  $\text{NH}_3$  sammenlignet med standardinjektionsmetoder—især under tørre og varme markforhold.

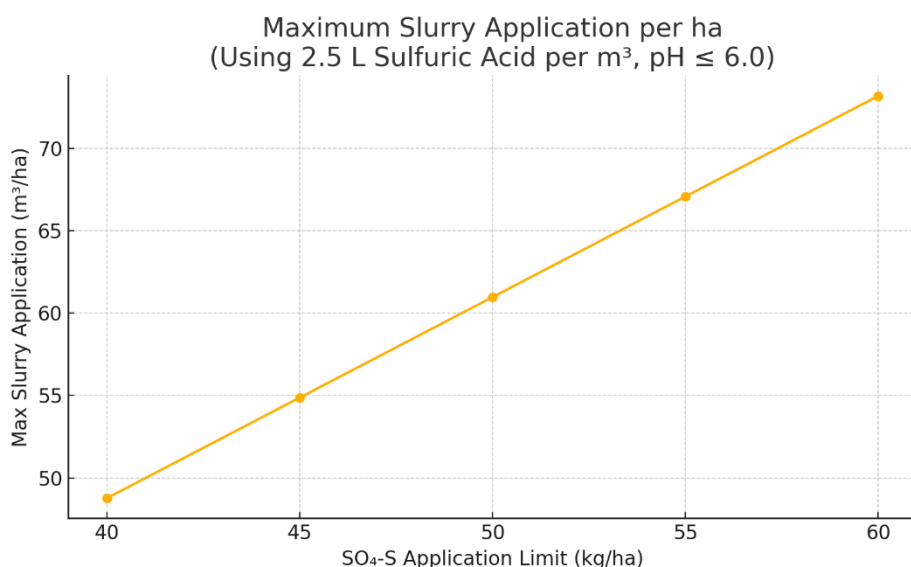


*1 Gennemsnittet af alle kurser med syredosering er 2-3 liter*

Feltforsøg, der sammenligner gylle-forsuring med lav injektion, viser konsekvent, at begge metoder er effektive til at reducere ammoniakemissioner. Dog giver forsuring ofte en sammenlignelig eller overlegen emissionsreduktion, især under varme og tørre forhold, hvor injektionseffektiviteten kan falde. Studier fra Finland (Keskinen et al. 2022) og Tyskland (Seidel et al. 2013) rapporterede  $\text{NH}_3$ -reduktioner på 95–97 % ved forsuring, mens injektion opnåede 43–97 %, afhængigt af jordtype og fugtighed.

Ud over effektiviteten har forsuring den fordel, at den er mindre invasiv for græsarealer, hvilket reducerer risikoen for skader på græsarealet sammenlignet med injektion. Derudover er det generelt lettere at anvende og integrere i eksisterende spredningssystemer som slæbende slanger.

Konklusion om dosis 2,5 L/m<sup>3</sup>: Beviser fra flere forsøg, herunder det VERA-certificerede SyreN-system, viser, at ammoniakreduktioner på op til 40–50 % kan opnås med svovlsyredoser på eller under 2,5 L/m<sup>3</sup>, især når mål-pH holdes nær 6,0–6,3. Selvom dette er lavere end de maksimale reduktioner, der ses ved højere doser, udgør det en betydelig miljømæssig fordel og er ofte tilstrækkeligt til at opfylde regulatoriske mål, når det kombineres med passende påføringsmetoder (f.eks. trailing hose). Derfor er forsuring ved ≤2,5 L/m<sup>3</sup> en bæredygtig reduktionsstrategi, når den balanceres med driftsmæssige og sikkerhedsmæssige hensyn.



**Gylle-volumen grænser baseret på SO<sub>4</sub>-S** Svovlanvendelse via forsuret slurry skal overholde miljøregler. Hvis man antager, at 96% svovlsyre indeholder ~32,6% svovl (S), svarer en dosis på 2,5 L/m<sup>3</sup> til cirka 0,82 kg S/m<sup>3</sup> slurry. Baseret på dette:

- Ved en grænse på 40 kg SO<sub>4</sub>-S/ha er den maksimale slurry-anvendelse ~49 m<sup>3</sup>/ha.
- Ved en grænse på 50 kg SO<sub>4</sub>-S/ha er den maksimale slurry-anvendelse ~61 m<sup>3</sup>/ha.

Disse tal giver en rettesnor for overholdelse af feltpraksisser med moderate syredoser.

### Anbefalinger

- Fremme forsuring – især til græsarealer (rentabilitet)
- Prioriter pH-mål ≤ 6,0 for effektiv reduktion og min. P-udvaskning.
- Prioriter 2,5 l svovlsyre pr. m<sup>3</sup> til balanceret sulfattildeling med ca. 50 % reduktion af ammoniakemission og en anbefalet loftsgrense på 50 m<sup>3</sup> slurry pr. ha

# Effekter af forsuring af slurry i marken på afgrødeudbyttet

## Indtroduktion

Den gennemsnitlige udbyttetigning på tværs af alle forsøg var 13,0%. Når man adskiller resultaterne efter afgrødetype, viste græsarealer en signifikant højere gennemsnitlig udbyttetigning (+17,1%) sammenlignet med andre afgrøder som vinterbyg og vinterhvede (+4,9%). Danske forsøg viste specifikt udbytteresponser som de internationale, med mærkbare positive effekter på græsmarksproduktiviteten.

Gylleforsuring er en teknik, der er bredt anvendt til at reducere ammoniakudledning fra husdyrgødning, og en fremvoksende fordel er dens positive effekt på afgrødeudbyttet. Denne rapport samler data fra feltforsøg i 2010-2024 med fokus på forskellige afgrøder under nordeuropæiske forhold.

## Oversigt over feltforsøg

- Dækkede lande: Danmark, Tyskland, Finland, Sverige, Estland - Afgrødetyper: Græsarealer, vinterhvede, vinterbyg - Teknikker evalueret: Anvendelse af slæbeslanger med og uden forsuring samt græsmarksinjektion.

## Antal forsøg efter afgrødetype

| Afgrødetype    | Antal forsøg |
|----------------|--------------|
| Græsarealer    | 10           |
| Andre afgrøder | 36           |

Græsmarksforsøg er dominerende i regioner, hvor direkte indblanding af slurry er upraktisk. - Andre afgrødeforsøg omfattede vurderinger af vinter hvede, vinterbyg og majs.

## Liste over forsøg med referencer

Danmark: - 30 vinterhvedeudbytteforsøg med SyreN-teknologi (2010-2017) [Danish SyreN Winter Wheat Yield Trials]. - Sammenligning af SyreN, Infarm og injektionssystemer (2010) [SyreN vs. Infarm vs. Injection - Danmark 2010].

- Tyskland: - Forsuring versus injektions forsøg (2012-2013) [Forsuring vs injektion på græsarealer - Tyskland og Danmark]. - Multi-site forsøg med forsurings- og injektionsteknikker (2019-2020) [GülleBest Multi-Site Trials - Tyskland]. - Triesdorf-forsuringsforsøg (2023) [NH<sub>3</sub> emissionsmålinger med forsuret gødning - Triesdorf-forsøg]. - Slesvig-Holsten feltforsøg på organiske gødninger (2018) [Feltforsøg om forsuring af organiske gødninger - Slesvig-Holsten].

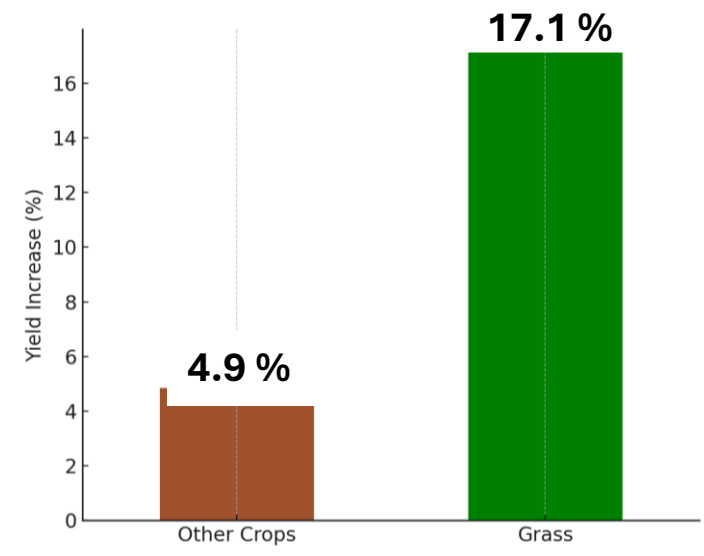
- Finland: - Boreal græslandsforsuring vs injektionsforsøg (2018) [Forsuring VS injektion i boreale græsarealer - Finland].

- Sverige: - Forsuringsforsøg med kvæg og svineslurry på græsarealer og vinterhvede (2013) [Feltforsøg med forsuret kvæg og svineslurry - Sverige].

- Estland: - Forsuringspåvirkning på jordens mikrobiologi og afgrødeudbytte (2017-2020) [Forsuret svineslurry og jordmikrobielle effekter - Estland].

- Forsøg på forsuret slurry i græsland og vinterhvede (2017) [Acidified Slurry in Grassland and Winter Wheat - Estland].

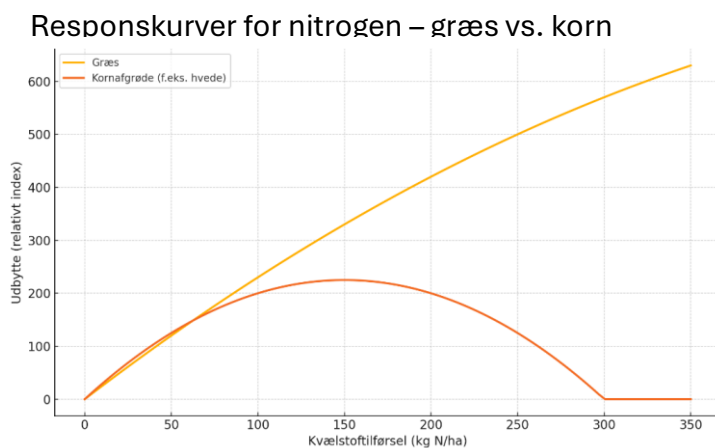
## Nøgleresultater:



Gennemsnitlig udbytteforøgelse efter afgrødetype (græs vs.

| Afgrødetype    | Gennemsnitlig udbytteforøgelse (%) |
|----------------|------------------------------------|
| Græsarealer    | 17.1%                              |
| Andre afgrøder | 4.9%                               |

- Græsarealer reagerede mest positivt på anvendelse af forsuret slurry. - Forsuring var især effektiv under forhold, hvor anvendelse af gylle ikke var mulig (f.eks. etableret græsland). – Vinterafgrøder viste mere moderate gevinster, men havde stadig fordel af forbedret kvælstoftilgængelighed. Den væsentlige forskel mellem græs og kornafgrøder kan forklares ved afgrødernes responskurver på kvælstof, hvor græs næsten altid drager fordel af mere kvælstof og svovl og korn har en mere begrænset respons, når det økonomiske optimum er nået. Tidspunktet for slurry-applikationer er også en væsentlig faktor, hvor gylletilførsel til korn i det tidlige forår udføres ved væsentligt lavere temperaturer end græslands-sommerapplikationer, hvilket fører til et større volumen af kvælstof til græsarealerne.



## Konklusioner

Gylleforsuring reducerer ikke blot miljøpåvirkningen, men forbedrer også afgrødeudbyttet betydeligt, især i græsarealsystemer. De konsekvente positive resultater på tværs af forskellige regioner understøtter bredere anvendelse af forsuringsteknologier, især i mælkeproduktions- og blandede landbrugssystemer, hvor græsudbytte er afgørende.

## Sammenlignende vurdering af græsinjektion og gylle forsuring i marken

### Indtroduktion:

Denne rapport udarbejdes til beslutningstagere, administrative myndigheder og forskere i Holland som en del af revisionen af RAV's teknologiliste. Formålet er at præsentere en struktureret, evidensbaseret sammenligning af gylle-injektion og forsuring i marken som konkurrerende metoder til at reducere ammoniakudledning, samt at forbedre kvælstofeffektiviteten og sikre bæredygtig næringsstofhåndtering.

Selvom begge metoder er blevet anerkendt som reduktionsteknologier, præciserer analysen, at markforsuring ikke kan integreres i injektionssystemer. Årsagen er, at forsuring af gylle markant øger gyllevolumen under udbringning på grund af skum, hvilket får de smalle spor skabt af skiveskærs injektorer til at løbe over. Dette ophæver ikke blot formålet med injektion, men medfører også operationelle risici og ophæver den emissionsreducerende fordel, som injektionen tilsigter. Desuden kan injektioner under disse omstændigheder resultere i uønsket eksponering af gylle til særligt græs og forurenende ensilage og foderafgrøder med gødningstørstof fra stalden. Hvis det ikke er nødvendigt, er injektionsrillerne fra skiveskæret meget negative for udbyttet og medfører alvorlig jordforstyrrelse og markant øget omsætning af organisk materiale i jorden (humus) som medfører alvorlig CO<sub>2</sub>-emission.

Rapporten giver en omfattende sammenligning af skiveskærsinjektion og forsuring i marken til håndtering af gylle, med fokus på både agronomisk ydeevne og bredere miljømæssige og driftsmæssige faktorer. Selvom begge metoder effektivt reducerer ammoniakudledningen, giver forsuring flere fordele:

- Større arbejdsbredde og applikationshastighed – Øget kapacitet til gylle spredning
- Mindre jordforstyrrelse og lavere risiko for skader på græs
- Lavere energi- og brændstofforbrug
- Betydeligt lavere CO<sub>2</sub>eq-udledning
- Øget næringsværdi gennem tilgængelighed af kvælstof, svovl, fosfor og mangan
- Forbedret integration med anvendelse af positionsbestemt gødning og ESG-rapportering
- Potentiel integration af nitrogenhæmmere for forbedret kvælstof udnyttelse.
- Dokumenteret sikkerheds- og regulatorisk godkendelse for syrehåndteringssystemer som SyreN og AutoZap

Især i regioner som Holland, hvor lav jord-pH dominerer over 50 % af landbrugsjorden, viser forsuring øget effektivitet og kan potentielt reducere kvælstofaflejring i Natura 2000-områder med over 30 % sammenlignet med injektion. Givet systemets fleksibilitet, lavere omkostninger og bæredygtighedsfordele udgør forsuring et robust, skalerbart og klimasmart alternativ til traditionel græsjordsinjektion.

Forsuring og skiveskærsinjektion giver begge fordele ved at reducere tab af næringsstoffer og forbedre gødningsværdien, men forsuring giver fra et praktisk og miljømæssigt synspunkt større fleksibilitet, bredere anvendelse og yderligere fordele (f.eks. øget udbytte og bedre NPA, NUE, reduktion af drivhusgasser, reduceret pakning, lugtkontrol, additiv injektion, omfattende ESG-dokumentation).

## **Jord med lav pH**

Mark forsuringsteknologien repræsenterer en meget konkurrencedygtig løsning til at øge reduktionen af ammoniakemissioner på lav-pH-jord sammenlignet med injektionsteknologi. Som eksempel rapporteres dette som de gældende jordforhold i de hollandske Natura 2000-bufferzoner. Cirka 90 % af bufferzonerne er placeret på sure jorde under pH 6,0.

Fra Tyske Thünen-institut – side 38 rapporteres: Den rapporterede korrelation af  $R = 0,53$  indikerer en moderat positiv sammenhæng mellem lav pH og effekten af gylleforsuring. Det betyder, at lavere pH-værdier generelt er forbundet med en stærkere reduktion i ammoniakudledninger, men sammenhængen er ikke stærk nok til at være forudsigende alene.

I praksis svarer et  $R$  på 0,53 til  $R^2 \approx 0,28$ , hvilket betyder, at omkring 28% af variationen i emissionsreduktion kan forklares ved pH eller den specifikke jordegenskab, der undersøges. Den resterende variation skyldes andre faktorer som vejrforhold, slurry-sammensætning, påføringsstidspunkt og måleusikkerhed. Overordnet set er resultatet meningsfuldt, men ikke afgørende. Den bekræfter, at pH og jordkarakteristika påvirker effekten af forsuring, men yderligere faktorer spiller en stor rolle, og korrelationen bør tolkes som støttende beviser snarere end en præcis forudsigelse. Afgørende er at skiveskærsinjektion ikke har denne effekt da gyllen først efter lang tid i jorden ændre pH som følge af påvirkningen fra jorden.

e-missioN-systemet kan dokumentere ammoniakudledninger til Natura 2000-områder, og det kan erstatte modelleringssystemer og levere et værdifuldt værktøj til overholdelse af lovgivningskrav. På grund af lav pH-jord på cirka 50 % af landbrugsarealet i Holland – 90 % af Natura 2000-bufferzonerne – forventes effektiviteten af forsuring at blive væsentligt forbedret under disse forhold. Indtil videre indikeret i ét studie med en signifikant effekt  $R=53\%$ . Med denne effekt bekræftet kan en 30 % øget reduktion af ammoniakudledning i Natura 2000-området forventes med en potentiel omkostningsreduktion på 7 milliarder € i landbrugsopkøbsordninger.

## Oversigt over teknikker



### Forsuring:

Doserer svovlsyre (typisk 2,0–3,0 L/m<sup>3</sup>) direkte i gyllen under spredning og sænker pH til 6,3 – 6,0 og anvender 12 til 36 m arbejdsbredde.



### Skiveskærs injektion:

Indarbejder gylle under jordoverfladen ved brug af smalle åbninger (~30 cm mellemrum) og 8 til 12 m arbejdsbredde.

## 3. Agronomiske og praktiske faktorer

### Begrænsninger for anvendelse af injektion:

Injektion er ofte uegnet til dyrkning af afgrøder uden for græsarealer på grund af mekaniske forstyrrelser og fysiske skader forårsaget af skiveskærene. Dette er særligt problematisk for

korn, majs og bælgrugter, hvor injektion kan skade rodzoner og biomasse over jorden. Den smallere arbejdsbredde og dermed mindre kapacitet for gyllevognen, er også et stort problem.

Forsuring, anvendt med slæbeslanger / sko, undgår sådanne skader og kan anvendes på en bred vifte af afgrødetyper uden at gå på kompromis med plantevækst eller udbytte.

#### **Udbytteeffekter:**

Sammenlignende forsøg viser, at forsuring resulterer i lige store- eller højere udbytter end skiveskærsinjektion på græsarealer. Gennemsnitlige udbyttetigninger varierer fra +400 til +1100 kg tørstof/ha ved forsuring, mens injektion ofte forårsager mekaniske skader der opvejer gevinster ved øget kvælstofeffektivitet. I kornafgrøder, er injektion ofte ikke muligt. Ved anvendelse, er udbytteeffekten mere variabel, men generelt neutral til let positiv for forsuring. Skiveskærs injektion bruges sjældent til andet end græs og der er få sammenlignende udbytte test.

#### **4. Jord- og næringsstofhensyn**

##### **Mikronæringsstoftilgængelighed:**

Forsuring kan øge tilgængeligheden af visse mikronæringsstoffer, især mangan (Mn). I sandede jorde med naturligt lav tilgængelighed af Mn kan faldet i pH forårsaget af forsuring øge Mn-opløseligheden, hvilket fører til forbedret optagelse af afgrøder. Dette kan understøtte bedre vækst, især i følsomme afgrøder som korn og majs. Det kan ikke erstatte dosering af mangan hvor manganmangel er udbredt.

##### **Besparelser på gødningsomkostninger:**

Sulfatet, der tilføres gennem forsuring, bidrager også til plantens tilgængelige svovlnæring. Dette kan helt- eller delvist erstatte behovet for separat sulfatgødning (f.eks. ammoniumsulfat), hvilket fører til besparelser på kommercielle gødningsinput. Der er stor forskel på forskellige afgrøders behov for svovl ligesom der er forskel på hvor meget svovl tilføres ved baggrundsdeposition.

##### **Svovlbidrag:**

Forsuring tilfører sulfat ( $\text{SO}_4\text{-S}$ ), som er plantetilgængeligt S. Svovl er vandopløseligt og skal tilføres hvert år, da der er stor risiko for at det udvaskes fra jorden uden for dyrkningsperioden. Svovl betragtes ikke som et miljøproblem da svovl er det nr. 6 mest almindelige grundstof og det findes i store mængder i vores grundvand og maritime miljø. Der findes agronomiske standarder, men ingen juridiske lofter. Da svovlsyre normalt udgør 2/3 af omkostningerne ved forsuring pr.  $\text{m}^3$ -gylle, er der et naturligt incitament til at begrænse syrevolumen for at reducere omkostningerne ved forsuring. Sulfat bør forvaltes så tæt som muligt til afgrødens behov.

Afgrøderne har et luksusoptag af svovl ud over den anbefalede mængde, der som tommelfingerregel er en faktor x2, men forskellig pr. afgrødetype.

#### Crop need for Sulphur

|                                    | <i>S-need, kg<br/>pr. ha</i> | <i>Typical amount of slurry,<br/>ton pr. ha</i> | <i>Needed<br/>kg S pr.<br/>ton</i> | <i>Liter H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> pr.<br/>ton slurry</i> |
|------------------------------------|------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| Winter wheat, clay soil            | 15                           | 30                                              | 0,5                                | 0.9                                                         |
| Spring barley, sandy soil          | 10                           | 30                                              | 0,3                                | 0.6                                                         |
| Winter rape, clay soil             | 35                           | 30                                              | 1,2                                | 2.1                                                         |
| Silage grass, irrigated sandy soil | 30                           | 40                                              | 0,8                                | 1.3                                                         |

(Source: Torkild Birkemose – Videncenter for landbrug)

#### Fosformobilitet:

Skiveskærs Injektion har ingen indflydelse på P-opløselighed, og ved skiveskærets rilledannelsen er der ikke øgede risiko for P-tab via afstrømning.

Ved forsuring udlægges gyllen på overfladen under afgrødernes plantedække. Dette skaber mulighed for afløb af P ved overflade afløb. Forsuring øger opløseligheden af fosfor i gylle. Dette sker ved at bindingen Calciumfosfat der ikke er plantetilgængelig, reduceres til Calcium og Fosfat når pH er under 6,0. Dette betyder en øgede P-opløselighed der er en stor fordel i almindelig planteproduktion. Denne egenskab skal tages i betragtning ved anvendelse af gylle hvor der er risiko for overflade afstrømning. I vandmættede områder bør man være forsigtig med ikke at sænke pH under 6,0, hvor calcium-fosforbindingen af P i gylle er opløst. Der er målt op til 40 % øget plantetilgængeligt fosfor ved forsuring under 6,0. I processen ved injektion af syren i gyllen, er der i mikseren en stærkt variable pH værdi, der kan skabe øget plantetilgængeligt P, så selv om pH ikke sænkes til under 6,0, vil volumen af plantetilgængeligt P kunne øges ved forsuring.

#### Tungmetaller:

Forsuring kan teoretisk mobilisere Zn og Ni, især på sandjord, men ses ikke som problem

#### Jordens pH-buffering:

Skiveskærs injektion påvirker ikke jordens pH. Forsuring kan sænke pH lokalt, men den bufferes over tid. Der er et teoretisk behov for påføring af op til 200 kg kalk pr. år pr. ha afhængigt af syredoseringen, men dette behov er ikke kunne måles / bekræftet i forsøgsprocesserne.

### 5. Infrastruktur- og omkostningsovervejelser

#### Igangværende tysk MuD-projekt (Sauer+ 2022–2027):

Som en del af en 5-årig national innovationsindsats evaluerer Sauer+-projektet under det tyske "MuD" (Model and Demonstration Projects - <https://saeureplus.de/>)-program i øjeblikket forsuring i marken på tværs af 8 delstater (Bundesländer) med 8 SyreN-systemer. Denne

omfattende forsøgsserie er designet til at dokumentere bæredygtighed, rentabilitet og operationel ydeevne af forsuringsteknologier som SyreN. Projektet understøtter bredere vidensoverførsel, bidrager til politisk dialog og giver videnskabelig validering til yderligere at udbrede forsuring som et pålideligt alternativ til skiveskærsinjektion i hele EU. Projektet er nu i sit tredje driftsår.

Resultaterne fra MuD's første 2 år er positive – men foreløbige – da gødningsforsøg bør ses over en periode på mindst 3 år. De første resultater fra MuD-projektet vil være tilgængelige til vinter 2026

Udbyttmålingerne fra den vedlagte undersøgelse er robust, idet det er indsamlet i perioden 2010–2024 og fra mange lande og underlagt meget varierende forhold. Generelt rapporteres der positive udbytter fra 60 % af alle forsøg og 40 % uden udbytterespons eller en let negativ respons. Da alle forsøg etableres på tilfældigt valgte tidspunkter, repræsenterer de praktiske forhold, hvor emissionerne på grund af klimaforhold er lave i cirka 40 % af tiden hvor der påføres gylle.

Med emissioner under 5 kg N / pr ha kan potentielle fordele ved emissionsreduktion ikke forventes at vise forskel i udbyttet da der er et gennemsnit på 50 % reduktion = 2.5 kg. Hvis der er en forskel, skyldes det ofte, at svovlbidraget gør en forskel eller den ekstra plantetilgængelighed fra fosfor.

Det er muligt at identificere emissionsniveauet ved brug af SyreN e-missioN-systemet. Det anbefales altid at bruge en lav dosis syre for at dække behovet for sulfat i perioder med lav emission og at øge syredoseringen til min. pH 6,4, når emissionen stiger. Hvis forsuring skal påvirke plantens tilgængelighed af fosfor, skal pH være lavere end 6,0.

### **Rentabilitet ved forsuring**

Forsuring i marken anvendes i 9 forskellige EU-medlemslande. Teknologien har en meget loyal brugerprofil, der har set en kontinuerlig solid udbyttestigning hvor emissionstabene er meget høje i sommerperioden, og emissionsreduktionen næsten altid omsættes til solide udbyttestigninger. Men der er mange forskellige situationer, hvor forsuringen er en betydelig fordel. I Danmark er det næsten standard til vinterraps, hvor en +3 l syre sikrer tilstrækkelig sulfattilgængelighed, og kvælstofniveauerne forhøjes. I mange tilfælde erstatter forsuring ammoniumsulfat mineralgødning, som har en +/- 50 % omkostningsstigning i forhold til forsuring. Både græs og kløver sætter pris på det forhøjede sulfatniveau. Forsuring bruges også med injektion af gylle til Mais. Ved at sænkes pH 6,0 til under 6 for at mobilisere ekstra P, får gylle samme virkning som startgødning til majs. Med kornafgrøder, er sulfateffekten mindre udtalt, og der bør lægges vægt på at bruge e-missioN-systemet til at identificere perioder med høj emissions, hvor den ekstra kvælstoftilførsel er en meget stor fordel.

Prisen på syre er en meget afgørende omkostningsfaktor og udgør ofte 2/3 af omkostningen. Afhængigt af land kan prisen på syre variere i intervallet 0,30 € til 0,45 € pr. l, og distributionsomkostningerne for syren kan også variere betydeligt.

## Budgettal for vedlagte 27 studier:

### Andre afgrøder 4,9 % udbytteforøgelse - hvede med 9 t/ha Brug af 100 % anvendelse

| 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)       |
| <b>Total costs</b>    | <b>€29,100/year</b> | Sum of above costs                       |
| <b>Net benefit</b>    | <b>€16,365/year</b> | Extra revenue – Total costs              |
| <b>Net benefit/ha</b> | <b>≈ €32.73/ha</b>  | €16,365 ÷ 500 ha                         |
| Payback period        | ~4.9 years          | €80,000 ÷ €16,365 (based on net benefit) |

## Budgettal for vedlagte 27 studier:

### Andre afgrøder 9 % udbytteforøgelse - Hvede med 9 t/ha – Anvendelse ifølge e-mission

| Item                  | 9.0% Yield Increase | Notes                                    |
|-----------------------|---------------------|------------------------------------------|
| Extra yield           | 7.95 dt/ha          | 1 dt = 100 kg                            |
| <b>Extra revenue</b>  | <b>€83,507</b>      | 7.95 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 average tied capital (~€40,000)    |
| <b>Total costs</b>    | <b>€29,100/year</b> | Sum of above costs                       |
| <b>Net benefit</b>    | <b>€54,407/year</b> | Extra revenue – Total costs              |
| <b>Net benefit/ha</b> | <b>≈ €108.81/ha</b> | €54,407 ÷ 500 ha                         |
| Payback period        | ~1.47 years         | €80,000 ÷ €54,407 (based on net benefit) |

## Budgettal for vedlagte 27 studier:

### Græs med 17,1 % udbytteforøgelse 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       |

## Anerkendelse og EU-integration:

SyreN-systemet har EU-BAT, VERA-verifikation og ETV-certificering. Teknologien har modtaget 15 internationale priser for bæredygtighed, CSR og innovation inden for landbrug. Det er i øjeblikket anerkendt som et af de 12 mest avancerede og accepterede RENURE-systemer i Den Europæiske Union, hvilket yderligere understøtter dets kvalificering under rammerne for næringsstofgenanvendelse og emissionsreduktion.

## Brug af nitrogenhæmmer:

SyreN-systemet inkluderer en additivtank, der muliggør valgfri injektion af urease- og nitrifikationshæmmere under gylle-påføringer. Dette muliggør yderligere stabilisering af kvælstof i jorden og udvider den agronomiske fordel ved anvendelse af gylle ud over pH-kontrol. Når nitrifikationshæmmere bruges i kombination med forsuring, understøtter disse tilsætningsstoffer endnu større kvælstofretention, reducerer drivhusgasudledninger og forbedrer overholdelsen af integrerede næringsstofstyringsstrategier. Dette inkluderer valgfri injektion af urease og nitrificeringshæmmere under gyllespredning. Almindeligt anvendte produkter inkluderer Vizura®, N-Lock™ og Piadin®, som alle har vist sig effektive til at stabilisere kvælstof og reducere emissioner. Dette muliggør yderligere stabilisering af kvælstof i jorden og udvider den agronomiske fordel ved gylle ud over pH-kontrol.

## **Additiv til lugtreduktion – jernsulfat:**

SyreN-systemets additivsystem understøtter også brugen af jernsulfat ( $\text{FeSO}_4$ ) for at muliggøre lugtkontrol under spredning af gylle. Jernsulfat hjælper med at binde hydrogensulfid og andre lugtstoffer, hvilket gør det til et nyttigt supplement i situationer med høj lugtfølsomhed eller nærhed af bysamfund. Systemets additivtank gør det muligt at injicere direkte i gyllevognstanken. Når den injiceres under påfyldning af gylletankvognen, aktiveres den kemiske reaktion under transporten til marken for spredning. Det skal bemærkes, at brugen af jernsulfat også binder dele af det vandopløselige fosfor. Dette kan være en fordel i vandmættede områder som de hollandske poldere.

## **Betydningen af dokumentation af ammoniakemissioner i Holland:**

Især i den hollandske kontekst er dokumentation af ammoniakemissioner værdifuld på grund af vanskeligheden ved nøjagtigt at måle mobil fordampning fra markapplikationer. Teknologier som e-missioN, der tilbyder realtidsdatasporing og gennemsigtig rapportering om ammoniakudledning og kvælstofforbrug, er afgørende værktøjer til at muliggøre overholdelse af lovgivning og tillid til interessenter. Sådanne værktøjer hjælper med at overvinde begrænsningerne ved konventionelle modelbaserede målesystemer i et af Europas mest regulerede og kvælstoffølsomme landbrugslandskaber.

## **ESG-overholdelse og dokumentation:**

For integrerede miljø- og landbrugslandbrug (IEA) og andre, der ønsker at opfylde miljø-, social- og governance-standarder (ESG), er detaljeret dokumentation af næringsstofbrug, emissioner og anvendelsesnøjagtighed essentiel. Præcisionssystemer som e-missioN opfylder ikke kun regulatoriske krav, men understøtter også ESG-rapportering og bæredygtigheds certificering af landbrug.

## **Demonstrations- og uddannelsesressourcer – Hof Vogelsang-videoer:**

Praktiske demonstrationer af forsurende systemer som SyreN, AutoZap og e-missioN-plattformen er tilgængelige via en række videoer optaget på Hof Vogelsang. Disse omfatter:

Etablering af markstier med SyreN-systemet

<https://youtube.com/watch?v=HWnwlPcw5DU&si=FOK8nY0DNNINmr9V>

Kontrol af slurrspredning

<https://www.youtube.com/shorts/SsKe3slRb64>

e-missioN

[https://www.youtube.com/shorts/LoYNR\\_MtXiE](https://www.youtube.com/shorts/LoYNR_MtXiE)

Forsuring – SyreN-systemet

<https://www.youtube.com/shorts/D5EVipz8HXI>

Swefelsauer som stikstofhammerer:

<https://youtube.com/shorts/QS7sez3gJg0?si=SxD1YL6cc6meKmMY>

Forsuring, NIRS og e-missioN

<https://www.youtube.com/shorts/ZxYUVjYPfM>

Resultater fra forsurende 2024

<https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=1NO3o1lvz3U>

## **Præcisionslandbrug og dokumentation – e-missioN System:**

E-missioN-systemet integrerer reeltimeovervågning af ammoniumnitrogeneffektivitet (NPA) under gyllespredning. Den benytter Alfam2 data fra over +600 ammoniakemissionsforsøg med 30.000 målinger og kombinerer NIR-slurryegenskaber, GPS-tracking, vejrdata og pH-målinger for at levere højtopløselige kort over nitrogeneffektivitet, ammoniakudledning og applikationsnøjagtighed. Systemet muliggør dynamisk justering af mineralgødningsmængder efter påføring via VRA (Variable Rate Application) kort og genererer fuld dokumentation for regulatorisk overholdelse og bæredygtig næringsstofstyring. Når det kombineres med forsuring, muliggør systemet optimal timing og kvantificering af syrefordelen. Dette gør e-missioN til et stærkt værktøj til at reducere overlap, forbedre udbyttet, reducere drivhusgasser og muliggøre smart planlægning af kunstgødning i overensstemmelse med klimamål og bæredygtighed.

## **AutoZap-fyldningssystem:**

AutoZap-systemet er en specialiseret, vakuumstyret sikkerhedsventil til håndtering af koncentreret svovlsyre under påfyldning af IBC-tanken. Den inkluderer en automatisk afbrydelsesudløser, et partikelfilter og trykbegrænsende komponenter for at sikre sikker drift mellem 1–2 bar. AutoZap er designet til at reducere risikoen for menneskelig eksponering, øge operatørens effektivitet og minimere syrespild under overførsel. Den fylder altid op til samme niveau fra forskellige restmængder, hvilket gør det lettere at vide, hvornår føreren bør forvente at skifte IBC-tank. Systemet kan monteres på lastbiler og har vist sig kompatibelt med forsuringssoperationer under markforhold.

## **Regulatorisk overholdelse og transportfleksibilitet:**

SyreN-systemet er ADR-kompatibelt (farligt godstransport) til svovlsyretransport i Tyskland og opfylder europæiske sikkerhedsregler. I andre lande som Holland, Sverige, Finland, Polen, Baltikum og Danmark findes undtagelser for landbrugsbrug af syre under visse betingelser, hvilket tillader sikker og forenklet brug uden fuld ADR-regulering. Dette øger den logistiske fleksibilitet til udsættelse af forsuring på gårdniveau. Transport af IBC-tanke uden for SyreN-systemet er underlagt ADR.

## **Logistisk enkelhed:**

En vigtig fordel ved lave injektioner er, at dette system undgår behovet for at håndtere, transportere og opbevare svovlsyre. Dette reducerer logistisk kompleksitet, især for gårde uden dedikeret infrastruktur eller træning i sikker syrehåndtering. Det eliminerer også behovet for koordinering af syrelevering og sikkerhedstilsyn.

## **Materialiets holdbarhed og sikkerhed:**

Moderne forsuringssystemer konstrueres med ikke-korrosive materialer til alle dele i kontakt med svovlsyre. Dette inkluderer syrebestandige plasttyper (Teflon), 316 rustfri stålkomponenter og kemisk behandlede slanger. Disse materialer har vist sig holdbare gennem mere end 15 års operationel brug i landbruget. Det bør fremhæves, at der ikke har været rapporterede sikkerhedshændelser i Danmark eller andre lande, hvilket understreger SyreN Systemets langsigtede pålidelighed og sikkerhed under markforhold.

For yderligere at forbedre operatør- og trafikikkerheden er SyreN-systemet udstyret med kamerabaserede sikkerhedssystemer, der hjælper med trafikoverblik og sikker afhentning og dokning af IBC-syretanke, hvilket minimerer risikoen under genopfyldning og transport.

### **Investeringsomkostninger:**

Mark forsuringssystemer kræver typisk en investering på omkring €90.000, afhængigt af konfiguration og arbejdsbredde (f.eks. bommonterede SyreN-systemer). Til sammenligning koster en skiveskærs injektion til en arbejdsbredde på 12 meter €100.000 eller mere på grund af behovet for tungere konstruktion og jordsøgende komponenter. Denne forskel kan påvirke købsbeslutninger på gårdniveau, især for mindre landbrug med blandede afgrøder.

SyreN Light-versionen er udviklet til markforsøg- forskningsmiljøer eller brug med mindre traktorer og gyllevogne. Denne letvægtskonfiguration med begrænset kapacitet til mængde syrer, tilbyder en lavere start med en lavere investering med priser fra €60.000, afhængigt af specifikke udstyrsbehov.

### **Vægt og jordkomprimering:**

Skiveskærs injektion er betydeligt tungere end forsuringssystemer på grund af forstærkede rammer og komponenter, der kræves for jordsøgende redskaber. Denne ekstra vægt kan øge risikoen for jordpakning, især under fugtige markforhold. Mark forsuringssystemer monteret i traktorens front og med slæbeslange- eller slæbesko systemer og fordeler vægten mere jævnt og med meget større arbejdsbredde, hvilket reducerer påvirkningen på jordstrukturen og muliggør drift under et bredere udvalg af feltforhold.

### **Vedligeholdelse:**

Markforsuring har en 16-årig historik for brug med syre. I alle de år, er der ikke set korrosion af dele i kontakt med syre. pH-sensorhovedet har en maksimal levetid på 2 år og betragtes som en sliddel. Manglende vedligeholdelse af tørkoblinger kan forkorte deres forventede levetid. Et vedligeholdelsesbudget på 2.000 € pr. år over SyreN-systemets levetid anbefales.

Skiveskærs injektion har mange bevægelige dele med dyb jordkontakt. Afhængigt af jordtype og brugsforhold kan der forventes behov for udskiftning af disse dele.

### **Fleksibilitet:**

Mark forsuring er kompatibel med alle afgrøder, inkl. og græsmark systemer, der bruger den samme gyllevogn. Intet andet system tilbyder mulighed for at blive brugt til gyllespredning på alle arealer og under alle forhold.

Anvendt sammen med slæbeslanger / sko, tilbyder mark forsuring et 1-for-alle-afgrøde-system, hvor det kan tændes eller slukkes efter klimaforholdene.

## 5. Miljøpåvirkninger - CO<sub>2</sub>eq

### Skummende effekt af forsuret slurry:

Forsuring af gylle resulterer ofte i naturlig skumdannelse oven på gyllen under spredning, hvilket danner en midlertidig emissionsbarriere på gyllens overflade. Dette skum reducerer gyllens direkte eksponering for vind og turbulens, hvilket begrænser ammoniakfordampningen yderligere. Skummet fungerer som et passivt dække, hvilket øger effektiviteten af forsuringen og gør spredningen mindre følsom over for vejrforhold sammenlignet med konventionel gyllespredning. Skumningseffekten skyldes kemisk frigivelse af bicarbonat ( $\text{HCO}_3^-$ ) fra gyllen når den forsuress. Denne kemiske reaktion er uundgåelig og ikke manuelt kontrolleret. Det bidrager ikke til ekstra drivhusgasser, da frigivelsen sker, når gyllen spredes, men i et meget langsommere tempo end når der tilsættes syre. Dannelsen af skum har også en meget positiv gødningseffekt, da gyllen spredes over et større område under plantedækket – men uden emissioner – og hvor tørstoffet ikke koncentrerer i et bånd med risiko for forurening af ensilage i en senere høstfase.

Opskumning som biprodukt af forsuring, bidrager til positivt til emissionsreduktion og er en unik fordel ved mark forsureningssystemer.

### N<sub>2</sub>O-emissioner og denitrifikationsrisiko:

Skiveskærs injektion kan fremme anaerobe mikrosites i jorden på grund af dens lægning af gylle under overfladen, især under våde forhold. Dette kan stimulere denitrifikationsprocesser og føre til dannelsen af lattergas (N<sub>2</sub>O), en potent drivhusgas. Derimod efterlader forsuring mere tørstof på jordoverfladen og skaber ikke anaerobe forhold. Som følge heraf indebærer forsuring en lavere risiko for N<sub>2</sub>O-udledninger, hvilket understøtter mere bæredygtig anvendelse af gylle der reducerer den samlede drivhusgaspåvirkning.

### Brændstof- og energiforbrug:

Skiveskærs injektion kræver betydeligt mere dieselbrændstof og traktorkraft på grund af modstanden fra skærenes tryk/træk gennem jorden og smallere arbejdsbredde. Forsuringssystemer opererer med lavere motorbelastning og dækker flere hektar i timen. Dette resulterer i reducerede CO<sub>2</sub>-udledninger pr. hektar og lavere brændstofomkostninger. Studier viser, at forsuring kan reducere dieselforbruget med 20–30% sammenlignet med skiveskærs injektion under typiske markforhold.

### Politiske begrænsninger og teknisk bias:

I Holland er skiveskærs injektion obligatorisk, og alternative teknologier som forsuring i marken møder juridiske og politiske barrierer. På trods af dokumenteret effektivitet er forsuring ikke blevet godkendt på grund af fejlbehæftet forsøg.

### Sulfatanvendelse og jordens bæredygtighed:

Bekymringer om sulfatbrug ved forsuring overdrives ofte. Forsuring anvender kun sulfat, når afgrøderne kan optage det, i modsætning til den helårsudskillelse af sulfat forårsaget af

jordforstyrrelser ved injektion. Forsuring udgør derfor en lavere langsigtet risiko for udvaskning og forurening af grundvand, især når det anvendes i bufferzoner med sure jorde.

### **Omkostningseffektivitet og skalerbarhed:**

Overgangen til forsuring med boomsystemer kunne reducere hollandske landbrugsafhjælpningsomkostninger med op til 7 milliarder €, baseret på investering og emissionsreduktion i Natura 2000-områder, hvor lav pH-jord forstærker forsuringseffekten. Omkostningsbesparelsen er baseret på reduceret behov for landbrugsopkøbsordninger. Forsuringssystemer er skalerbare og leverer hurtigere implementering med mindre infrastruktur. Derudover muliggør forsuring op til 25% større gyllevognskapacitet pr. time sammenlignet med injektion, takket være muligheden for at bruge bredere arbejdsbredder og større hastigheder. Denne forbedrede kapacitet fører til færre maskintimer, lavere lønomkostninger og mere effektiv sæsonplanlægning.

### **Metan emissioner:**

Forsuringsteknologier til stald- og gylle beholdere har en betydelig indvirkning på reduktionen af metanudledning. Både sulfat og pH har en stærk hæmmende effekt på metanproduktionen fra archaea bakterier. Reduktion af metan emission med markforsuringssystem er beskrevet udførligt i separat analyse af 22 projekter med anvendelse af sulfat som hæmmer for archaea metan produktion. Det bemærkes at markforsuring ingen indvirkning har på metanemission.

### **Beskyttelse af vandmættede områder:**

Generelt er frigivelse af P fra slurry meget ønskværdig, da det bundne P i gylle ikke er tilgængeligt for planter. En pH under 6,0 bryder calcium-fosfor-bindingen og gør P-værdien vandopløselig og dermed plantetilgængeligt. Denne effekt er identificeret som en ca. 40 % øget effekt af P i gylle. Selvom effekten er tidsbegrænset, da plantetilgængelig P hurtigt adsorberes af mikroorganismer eller planter, er der en risiko for udvaskning af P fra vandmættede områder. Derfor bør pH af slurrien ikke være under pH 6,0 i vandmættede områder for at undgå risiko for P-udvaskning. En pH-reduktion til pH 6,4 med brug af jernsulfat vil eliminere enhver risiko ved P-udvaskning.

### **CO<sub>2</sub>-aftryk:**

#### **CO<sub>2eq</sub> - emissioner og sætninger på polderjord:**

Skiveskær injektoren trænger 5-6 cm ned i jorden for at skabe en åbning, der mindsker gyllens eksponering for emission ved klimaparametre. Afhængigt af jordfugtigheden kan det have en god effekt, men også en meget varieret ydeevne, når jorden er tør, og skiveskærene ikke kan trænge ordentligt ned i jorden. Afhængigt af jordtypen kan det have en meget negativ effekt på drivhusgasudledninger (GHG). De hollandske polderjorde er udsat for store sænkninger på grund af det høje organiske materiale. Sporene skaber et +58 % øget oxidationsareal, og det gentages +/- 5 gange om året. Sætningsretningen på Polder-jord er cirka 1 cm/år. Det betyder et årligt tab pr. hektar på cirka 12,2 tons OM eller cirka 22,6 tons CO<sub>2</sub> eller 6,7 tons C. Vi har ikke fundet nogen forskning, der kan identificere CO<sub>2eq</sub>-effekten af skiveskærs injektorer på Hollandske humusrige Polder jorde, men det er meget betydeligt og kan være op til 3 mio ton CO<sub>2eq</sub> pr. år på det samlede Hollandske polder areal.

En bivirkning af den øgede oxidation er frigivelse af sulfat fra det organiske materiale. Dette menes at være nok til at eliminere dosis af S gennem mineralgødning. Dette er risikabelt for optimale udbytter, da S'et skal adsorberes af planterne, før tilstrækkelige mængder N kan adsorberes. Hvis mineraliseringen derfor er langsom på grund af lave temperaturer eller iltmangel, opstår der en risiko for S-mangel og lav adsorption af N, hvilket fører til lav udbytteydelse.

Det er en langt bedre strategi at undgå øget sætning og tilsætte det korrekte volumen sulfat med svovlsyre, hvilket muliggør overfladepåføring af slurry og undgår sænkning.

### **CO<sub>2</sub>eq - N<sub>2</sub>O-udledninger fra jorden:**

N<sub>2</sub>O-udledning fra landbrugsjord udgør cirka 40 % af alle CO<sub>2</sub>eq-udledninger fra landbruget. Det dannes af bakterielle denitrificeringsprocesser, der reducerer ammonium til nitrat. Kort sagt sikrer aerobe forhold fuld omdannelse af ammonium til nitrat med næsten ingen N<sub>2</sub>O, men anaerobe forhold fører til ufuldstændig denitrificering med høj N<sub>2</sub>O-udledning.

Denne effekt er ofte forbundet med vandmættede områder, hvor regnvand udelukker jorden fra adgang til ilt, selvom det måske kun er midlertidigt. Ved at placere tørstof fra gylle i en spalte øges risikoen ved anaerobe denitrifikationsforhold betydeligt.

IPCC's reference for injektioner er en stigning på 1 kg N<sub>2</sub>O pr. ha. Den beregnede CO<sub>2</sub>eq er 300.

Hvis forsuring erstattede injektion på 1 ha, er det undgåede N<sub>2</sub>O:

$$1 \text{ kg/ha} \times 1 \text{ ha} \times 300 = 300 \text{ kg CO}_2\text{eq} / \text{ha pr. år.}$$

### **CO<sub>2</sub>eq - Reduktion i diesel forbrug ved højt trækraftforbrug**

Brugen af forsuring kræver en bom til overfladespredning. Dette undgår injektionen, som er en dieselforbrugende proces gennem skiveskærene og smal arbejdsbredde. Forskellen er målt til 5-liters diesel pr. ha.

$$\text{Beregning: } 5 \text{ L/ha} \times 2,67 \text{ kg CO}_2/\text{L} = 13,35 \text{ kg CO}_2\text{eq undgået pr. ha}$$

### **CO<sub>2</sub>eq-reduktion ved mindre brug af mineralgødning**

Effekten i mængden af kvælstof fra forsuring varierer meget, især afhængigt af indhold af ammoniumkvælstof i gyllen, volumen af gylle, pH og klimatiske forhold. En variation på 5 – 50 kg N tab pr. ha er normal, og et gennemsnit på 15 kg – 20 kg, afhængigt af klimaområdet. Forsuring kaldes også kommercielt stabilisering af gylle, fordi effekten af kvælstof i gyllen er mere forudsigelig og kan gøre det muligt for landmanden at reducere sin tilførsel af mineralsk gødning uden tab af udbytte.

$$15 \text{ kg} / \text{ha} \times 1 \text{ ha} \times \text{Haber-Bosch forbrug } 2,3 \text{ kg CO}_2 / \text{kg N} = 35 \text{ kg CO}_2 \text{ undgået pr ha}$$

Over CO<sub>2</sub>eq-faktorerne varierer afhængigt af mange faktorer. Der bør laves et estimat pr maskine/landbrugsdrift til ESG-dokumentation og lignende.

Vi mener dog, at det er sikkert at anslå en minimumseffekt af forsuring i marken til 200 kg/ha pr. år.

## 6. e-missioN System

Introduktion:

e-missioN-systemet er et gylleprogram og en digital teknologi designet til at optimere udnyttelsen af kvælstof i gylle. Traditionelt har landmænd i Danmark brugt normative værdier baseret på dyreart med tilhørende staldsystem til at estimere kvælstoftilgængelighed i gylle. Myndighedernes udbredte anvendelse af normative værdier i regnskab- og regler, har ført til manglende gylle prøve udtagning, ineffektiv anvendelse af gylle, unødvendigt mineralsk gødningskøb og miljømæssige store belastninger med for meget kvælstofbrug. Brug af de normative regler er blevet understøttet af landbrugets alt for store produktion af gylle og dermed afledte strukturproblemer, til at ignorere problemet med et "business as usual".

e-missioN introducerer et nyt begreb - Nitrogen Plant Availability (NPA) – der er en reeltidsmåling på gyllevognen under udbringning af gylle, for hvor meget kvælstof fra gylle der faktisk bliver tilgængeligt for afgrøder under/efter gyllespredning efter emission. Da logistik betyder alt for de 35 Mio m<sup>3</sup> der skal spredes i et meget lille tidsrum, er det logistikken der får lov til at bestemme hvornår gyllen skal udbringes – ikke de klimamæssige forhold, der hvert år skaber en udnyttelse af kvælstof fra 20 % til 90 %! Uden mulighed for at monitorere hvad der faktisk sker under- og efter gylleudbringningen, er det umuligt at sige noget om den effektive mængde kvælstof til rådighed for planten og dermed bestemme hvor meget ekstra mineralsk kvælstof der skal tildeles. Derfor er anvendelse af normative værdier – som er udtryk for det bedste teoretiske gennemsnit - den foretrukne / eneste metode som en planteavlser kan benytte i arbejdet med at lave gødningsplaner for landmanden

Lav kvælstof effektivitet ved brug af gylle er en af verdens allerstørste miljøudfordringer. Det bidrager til høje omkostninger for landmænd, drivhusgasudledning og tab af biodiversitet. 70 % af den samlede danske kvælstofbelastning af miljøet, er luftbåren og stammer fra husdyrbrug i ind- og udland. Den globale gennemsnitlige kvælstofudnyttelse for gylle er omkring 30 % mens den i Danmark er omkring 50 %. NPA-værdier kan variere fra 20–90 % afhængigt af gyllens sammensætning, vejr og applikationsmetode. Ved at forbedre NPA kan landmænd:

- Øge udbyttet gennem bedre kvælstofudnyttelse.
- Reducer køb af mineralgødning (ofte ved at erstatte dem én-til-én med organisk kvælstof).
- Reducerer udvaskning af kvælstof med estimeret 3.000 ton pr år i Danmark
- Reducerer CO<sub>2</sub>-udledning forbundet med gødningsproduktion og kvælstoftab
- Bidrage til en i verdensklasse forbedring af biodiversiteten

## Teknologi og datagrundlag

e-mission Systemet kerne, er en database med over 600 forsøg med 30.000 målinger af ammoniakudledning i Europa og Nordamerika – alfam2. Ved hjælp af sensorer på gyllevognen – gyllevolumen, pH, klimaforhold som temperatur, vindhastighed og fugtighed, tørstofindhold og ammonium kvælstofindhold kombineret med GPS, beregner e-mission NPA værdien dynamisk under spredning af gyllen. Dette er en realtidsmåling i kombination med anvendelse af en model til estimering af ammoniakemission. AU har målt præcisionen til at være +/- 10 %

Systemet viser kvælstofeffektivitet i realtid som % tab af kvælstof, hvilket muliggør bedre beslutninger, såsom om man skal bruge forsuring og med hvilken mængde syre (økonomieffektivitet) eller justere gyllespredningstidspunktet.

## Nøglefunktioner af e-mission

- **Under gyllespredning:** Måler kvælstoftab, viser effektivitet i % af mængde ammonium i gyllen og via et "trafiklys"-interface og understøtter beslutninger om anvendelse af forsuring og gyllespredning.
- **Efter gyllespredning:** Leverer kort (som anvendt mængde, NPA, huller/overlap, ammoniakemission. Dertil en shape fil variabel dosering af mineralsk gødning (VRA) til finjustering af brug af mineralgødning.
- **Beslutningsstøtte:** Erstatte statistisk planlægning/brug af mineralsk gødning med dynamiske justeringer i løbet af sæsonen.
- **Automatisk dokumentation:** Genererer automatisk næringsstofregnskab, overholdelsesregistre og bæredygtighedsrapporter for landmænd, rådgivere eller entreprenører.

## Hovedfaktorer, der påvirker ammonium kvælstof tab

1. Gylle-egenskaber (pH, tørstof, ammonium kvælstofindhold).
2. Påføringsmetode (bredspreddning = højt tab; Slæbeslange/sko = middel tab, injektion eller forsuring = lavt tab).
3. Klimaforhold (køligt, fugtigt, vindstille = bedst; varmt, tørt, blæsende = værst).

## Økonomisk potentiale

- At undgå overlap og huller kan spare op til 8 % nitrogen nationalt i Danmark – svarende til store reduktioner i CO<sub>2</sub>-udledninger.
- En praktisk casestudie viste besparelser på 2.300 € på 98 ha, med op til 47.000 € potentiale pr. sæson for 2.000 ha.
- Optimeret NPA forhindrer både udbyttetab ved undergødskning og omkostningstab ved overgødskning.

## Miljømæssige fordele

- Reducerede drivhusgasudledninger (N<sub>2</sub>O, metan, ammoniak).
- Lavere efterspørgsel efter energikrævende mineralsk gødningsproduktion.
- Bedre beskyttelse af biodiversiteten ved at undgå kvælstofoverforsyning i følsomme habitater.

- Bidrag til EU's Green Deal-mål (–50% tab af næringsstoffer, –20% brug af mineralgødning inden 2030).

## Implementering

Systemet kan installeres på alle gyllevogne, enten som eftermontering eller OEM. Der findes to niveauer:

- Grundlæggende: Ammonium kvælstof effektivitetsmonitor.
- Avanceret: Præcisionslandbrug med fuld beslutningsstøtte, VRA kort til positionsbestemt dosering af mineralsk gødning og tilhørende dokumentation.

Nøgleudstyr kan omfatte ISOBUS-terminal, gylle flowsensor, telematik, vejrstation, pH-sensor, ECU og eventuelt en NIR-sensor til detaljeret monitorering af næringsindhold i slurry.

## Fremtidsudsigter

Med stigende gødningsomkostninger, klimareguleringer og CAP-reform forventes digitale værktøjer som e-mission at blive standardpraksis. De gør det muligt for landmænd at opretholde udbyttet samtidig med at de reducerer kvælstoftab, sikrer overholdelse af miljøpolitikker og potentielt genererer CO<sub>2</sub>-kreditter.

## Konklusion:

e-mission repræsenterer et stort fremskridt inden for gylle-håndtering. Ved at ændre kvælstof effektivitet fra et gæt til et målbart parameter skaber det en win-win-win: højere rentabilitet på anvendelse af gylle, reduceret afhængighed af mineralsk gødning og reduceret miljøpåvirkning. Det forventes at blive en hjørnesten i bæredygtig næringsstofforvaltning i europæisk landbrug inden 2030.

## Bilag: Analyse af 27 internationale studier af forsuring i marken

|                                                                                                        |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Titel: Forsuring og opskæring – Hvad er fordelene ved nye påføringsteknikker for slurry og fordøjelse? | 27 |
| Feltforsøg om forsuring af organiske gødninger i Slesvig-Holsten (Tyskland)                            | 29 |
| Syretilførsel til gødning til reduktion af NH <sub>3</sub> -emissioner (Aarhus Universitet, 2021)      | 30 |
| Forsuring af digestate i vinterbyg – Wehnen prøvestation (Tyskland)                                    | 31 |
| ALFAM2-modellen til forudsigelse af ammoniakemissioner fra feltpåført slurry                           | 32 |
| NH <sub>3</sub> emissionsmålinger med forsuret gødning – Triesdorf-forsøg (Tyskland)                   | 33 |
| Ammoniakemissioner fra kvæggødsel – Sverige, 2019                                                      | 34 |

|                                                                               |    |
|-------------------------------------------------------------------------------|----|
| Forsuret slurry i græsland og vinterhvede – Estland                           | 35 |
| Forsuret digestate i græsland – Danmark                                       | 36 |
| Danske SyreN-udbytteforsøg (Winter Wheat, 2010–2017)                          | 37 |
| GülleBest Multi-Site Trials – Tyskland (2019–2020)                            | 38 |
| Forsuret svineslurry og jordmikrobielle effekter – Estland (2017–2018)        | 40 |
| NH <sub>3</sub> -emissioner fra forsuret digestate – Baasdorf                 | 41 |
| SyreN-teknologi til ammoniakreduktion – Danmark                               | 42 |
| In-field forsuring af adskilt digestate – Danmark                             | 43 |
| Forsuring vs injektion i boreale græsarealer – Finland (2017–2018)            | 45 |
| Livscyklusvurdering af strategier for gylle forsuring                         | 47 |
| SyreN vs. Infarm vs Injection – Danmark (2010)                                | 49 |
| Miljømæssige bivirkninger af forsuret slurry – Danmark (Anmeldelse)           | 50 |
| Forsuring vs injektion vs udsendelse – Tyskland & Danmark (2011–2013)         | 52 |
| Feltforsøg med forsuret kvæg og svineslurry – Sverige (2013)                  | 53 |
| Forsuring vs. injektion på græsarealer – Tyskland & Danmark (2012–2013)       | 55 |
| Nationalt scenarie – Forsuring af 50% af dansk slurry                         | 56 |
| SyreN forsuringssystem – VERA-certificeret (2010-test)                        | 58 |
| Omkostningseffektivitet af forsuret kvægslurry – Tyskland (2019 Field Trials) | 59 |
| Måling af ammoniaktab fra behandlede slurries – Tyskland (2019, udgivet 2024) | 60 |
| Danske SyreN vinterhvedeudbytteforsøg (2010–2017)                             | 62 |
| Indhegning - Sammenfatning af stiens effekt                                   | 63 |

# Titel: Forsuring og injektion – Hvad er fordelene ved nye applikationsteknikker for gylle og biogas gylle?

**Forfattere:** Dr. I. Bull, L. Kureck, C. Ramp

**Event:** 4. dialog om vandrammedirektivet og landbrug

**Sted/dato:** Güstrow, 30.10.2014

---

## Resumé af nøglefund

### Formål:

Studiet vurderede effektiviteten af **forsuring i marken og slot-injektion** af kvæggylle og digestate på ammoniakemissioner og afgrødeudbytte under praktiske landbrugsforhold.

---

### Eksperimentelt setup:

- **Materiale:** Medfermenteret digestate
  - **pH før behandling:** 7,5–7,6
  - **Mål-pH efter forsuring:** ~6,0
  - **Anvendte metoder sammenlignet:**
    - Slæbende slange (med og uden syre)
    - Slot-injektion (med og uden syre)
    - Kontrol (ingen behandling)
  - **Måling:** NH<sub>3</sub>-emissioner og hvedeudbytte
- 

### Resultater:

- **Yield Improvement (sammenlignet med ubehandlet slæbeslange):**
    - +4,1 dt/ha korn
    - +0,3% råprotein
    - +0,7 dt/ha råproteinudbytte
    - +20% DM-effektivitet (MDÄ)
  - **Kvælstofbalance:**
    - –12 kg N/ha nettobalance (indikerer bedre optagelse)
  - **Ammoniaktab (estimeret):**
    - Baseline: ~30 kg NH<sub>3</sub>/ha (ingen syre)
    - Forsuring sænkede pH og halverede sandsynligvis NH<sub>3</sub>-tab (ikke kvantificeret i rapporten)
- 

### Tekniske aspekter:

- **Brugt syre:** Svovlsyre

- **Typisk dosis:** 0,5–3,0 L/m<sup>3</sup>
  - **S bidrag:** 0,58 kg S pr. liter → ~29–43 kg S/ha afhængigt af slurry-mængden
  - **Omkostningsestimat (pr. 30 m<sup>3</sup>/ha anvendelse):**
    - Syrepris: €20/ha
    - SyreN-system: €15/ha
    - Udbytteforøgelse til en værdi af €72/ha eller
    - N gødningsbesparelser: ~€20/ha
- 

## Konklusioner:

- **Forsuring gav klare fordele:** højere udbytte, lavere ammoniakudledning og bedre nitrogeneffektivitet.
- **Sammenlignet med injektion** har forsuring operationelle fordele:
  - Mindre skade på sværdet
  - Lavere trækraftbehov
  - Større arbejdsbredder
  - Lettere eftermontering af eksisterende udstyr
- **Svovlsyre foretrækkes** på grund af effektivitet, pris og plantetilgængelighed af sulfat.

## **Eksperimentoversigt: Feltforsøg om forsuring af organiske gødninger i Slesvig-Holsten (Tyskland)**

**Kilde:** S. Neumann, LLUR, præsenteret 7. december 2018

| <b>Parameter</b>                                  | <b>Detaljer</b>                                                                                                      |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                       | Afbødning af ammoniakemissioner ved forsuring af organiske gødninger                                                 |
| <b>År(e)</b>                                      | 2017 og 2018                                                                                                         |
| <b>Slurry-type</b>                                | Digestate (initial pH 8,7)                                                                                           |
| <b>pH før forsuring</b>                           | 8.7                                                                                                                  |
| <b>Syre tilsat</b>                                | Svovlsyre (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ), 4 l/m <sup>3</sup> i pilotfarme; reduceret til pH 5,5–6                 |
| <b>pH efter forsuring</b>                         | 5.5–6                                                                                                                |
| <b>Målt NH<sub>3</sub>-emissionsreduktion</b>     | – 68 % i 2017 (hvede) – 8 % i 2018 (hvede med tekniske problemer) – 71 % i 2017 (græsareal) – 67 % i 2018 (græsland) |
| <b>Udbytteeffekt – Hvede (mikroplots)</b>         | +2 t/ha (ved 100 kg N/ha) – 9,38 t/ha vs 7,39 t/ha (forsuret vs. ikke)                                               |
| <b>Udbytteeffekt – Græsarealer (mikroområder)</b> | Lidt højere udbytte for forsuret digestate (ikke altid signifikant)                                                  |
| <b>Udbytteeffekt – Pilotgårde</b>                 | Eksempel: Bellin-sted – Forsuret fordøjelse: 116,6 dt/ha vs. ubehandlet: 81,6 dt/ha                                  |
| <b>Nitrogentilførselsrater</b>                    | 100–360 kg N/ha                                                                                                      |

## Eksperimentoversigt: Syretilførsel til gødning til reduktion af NH<sub>3</sub>-udledninger (Aarhus Universitet, 2021)

Kilde: DCA – Aarhus Universitet, Forsuringsnotat 15.02.2021

| Parameter                                 | Detaljer                                                                                                                                             |
|-------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Studietitel                               | Ammoniakudledning fra forsuret slurry under påføring med slæbende slanger                                                                            |
| År                                        | 2020–2021 (studie og rapport), laboratorieforsøg med 32 gylleprøver                                                                                  |
| Slurrytyper                               | Kvæg, søer/pattegrise, færdiggrise, fordøjet gjødsel                                                                                                 |
| pH før forsuring                          | Varierer efter type: kvæg ~7,0 svin ~7,1–7,2 fordøjede ~8,1                                                                                          |
| Syre tilsat                               | 96% svovlsyre (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                                                                                      |
| Mål-pH for 25% NH <sub>3</sub> -reduktion | Typisk 6,6–6,8 (varierer med slurrytype)                                                                                                             |
| Påkrævet syremængde                       | For at opnå <b>en reduktion på 25% i NH<sub>3</sub></b> :<br>Kvæg: <b>2,2 kg/t</b><br>Griseslød: <b>1,7 kg/t</b><br>Fordøjet slurry: <b>1,8 kg/t</b> |
| Maksimal syredosis (90% tillid)           | Kvæg: 3,1 kg/t, Grise: op til 3,0 kg/t, Fordøjet: 2,3 kg/t                                                                                           |
| NH <sub>3</sub> Emissionsreduktion        | Modelleret med ALFAM2 – <b>≥25% reduktion</b> opnået ved angivne doser                                                                               |
| Udkastningseffekt                         | Ikke en del af denne laboratoriebaserede undersøgelse                                                                                                |

Undersøgelsen lægger vægt på variation i syrebehov afhængigt af slurrybufferens kapacitet, pH og tørstof. Fordøjet slurry har tendens til at kræve mere syre for at opnå tilsvarende pH på grund af højere bicarbonatniveauer

## **Eksperimentoversigt: Forsuring af digestate i vinterbyg – Wehnen Trial Station (Tyskland)**

**Kilde:** Kai-Hendrik Howind, LWK Niedersachsen – 2018 Data

| <b>Parameter</b>                         | <b>Detaljer</b>                                                       |
|------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>              | Digestate-gødning i vinterbyg med forskellige påføringsteknikker      |
| <b>År</b>                                | 2018 (såning: september 2017; høst: 17. juli 2018)                    |
| <b>Slurry-type</b>                       | Digestate (fermenteret gødning)                                       |
| <b>Syre tilsat</b>                       | Svovlsyre (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                           |
| <b>Mål-pH efter forsuring</b>            | pH 6,0                                                                |
| <b>pH før forsuring</b>                  | Ikke eksplicit angivet, men typisk ~7,0–8,0 for ubehandlet digestate  |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                | Trailing slange, trailing sko og diskinjektion (med/uden forsuring)   |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b> | Ikke direkte målt, men udledt via mineralgødningsækvivalenter (MDÄ)   |
| <b>Udbytteeffekt (Relativ MDÄ)</b>       |                                                                       |
| Slange, der følger efter:                |                                                                       |
| – Uden syre: 32,0% MDÄ                   |                                                                       |
| – Med syre (pH 6,0): 46,8% MDÄ           |                                                                       |
| Bagende sko:                             |                                                                       |
| – Uden syre: 44,0% MDÄ                   |                                                                       |
| – Med syre (pH 6,0): 60,0% MDÄ           |                                                                       |
| <b>Udbytteeffektivitet vs mineral N</b>  |                                                                       |
| Slange (pH 6,0): 66,4%                   |                                                                       |
| Bageste sko (pH 6,0): 76,7%              |                                                                       |
| <b>Total N anvendt</b>                   | 132 kg N/ha (kun økologisk), 207 kg N/ha (økologisk + mineraltilskud) |

Dette forsøg viser klare fordele ved forsuring i at forbedre nitrogeneffektiviteten i fordøjelsen – hvilket øger mineralgødningsækvivalenten med 14–16 procentpoint afhængigt af påføringsmetoden.

## Studieresumé: ALFAM2-modellen til forudsigelse af ammoniakemissioner fra feltpåført slurry

**Kilde:** Hafner et al., *Atmospheric Environment* (2019)

Denne artikel præsenterer **ALFAM2** semi-empiriske model, udviklet til at forudsige ammoniakfordampning ( $\text{NH}_3$ -tab) fra slurry-anvendelse, baseret på omfattende feltdata.

| Parameter                                                                   | Detaljer                                                                                                                 |
|-----------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                 | ALFAM2 ammoniakemissionsmodel fra slurry-anvendelse                                                                      |
| <b>År(e)</b>                                                                | Data fra forskellige forsøg (13 lande); Udgivelse i 2019                                                                 |
| <b>Slurry-type</b>                                                          | Kun svine- og kvægslurry; tørstof $\leq 15\%$                                                                            |
| <b>pH før forsuring</b>                                                     | Typisk $\sim 7,5$ (referenceværdi)                                                                                       |
| <b>Estimat af forsuringseffekten</b>                                        | Reduktionsfaktor på <b>2,13 pr. pH-enhedsfald</b> (dvs. pH 7,5 $\rightarrow$ 6,5 reducerer udledningen med $\sim 50\%$ ) |
| <b>Syre tilsat</b>                                                          | Ikke specificeret direkte – udledet af pH-effekten i forsurede forsøg                                                    |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                   | Modellerede scenarier med pH 6,4 og 6,0                                                                                  |
| <b><math>\text{NH}_3</math> Emissionsreduktion</b>                          |                                                                                                                          |
| – pH 6,4 $\rightarrow$ 43–55% reduktion af udledningen                      |                                                                                                                          |
| – pH 6,0 $\rightarrow$ 60–70% reduktion                                     |                                                                                                                          |
| – Under højemissionsforhold er reduktionerne <b>mindre</b> (f.eks. 14–38 %) |                                                                                                                          |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                    | Ikke anvendelig – modelbaseret studie                                                                                    |
| <b>Modelanvendelser</b>                                                     | Forudsigelse af emissioner, evaluering af afbødningsstrategier, emissionsinventar                                        |

Dette er en **modelleringsundersøgelse**, ikke et feltforsøg, men den syntetiserer data fra 490 plots på tværs af 6 lande og er meget relevant for at estimere  $\text{NH}_3$ -reduktion fra forsuringstrategier.

## Eksperimentoversigt: NH<sub>3</sub>-emissionsmålinger med forsuret gødning – Triesdorf-forsøg (Bayern, Tyskland)

**Kilde:** Landbrugsskoler Triesdorf, MuD SäurePlus projekt (2023)

| Parameter                                                                                                       | Detaljer                                                           |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                     | Ad hoc målinger af ammoniakkoncentration efter gødningsanvendelse  |
| <b>År</b>                                                                                                       | 2023 (forårs- og sommerprøver)                                     |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                              | Kvægslurry (forår), digestate (sommer), både adskilt og uadskilt   |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                              | Svovlsyre (varierende doser: 2–7 L/m <sup>3</sup> )                |
| <b>pH før forsuring</b>                                                                                         | Forår: pH 6,8 (kvægslurry)                                         |
| Sommer: pH 7,7–7,9 (fordøjelse)                                                                                 |                                                                    |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                                                       | Varierede fra 7,1 til så lavt som 5,9, afhængigt af dosis og prøve |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                        |                                                                    |
| – Forår: <b>minimal effekt</b> (køligt, blæsende, vådt – NH <sub>3</sub> grundlinje var lav)                    |                                                                    |
| – Sommer:                                                                                                       |                                                                    |
| • Digestate pH 7,9 → ~70% reduktion ved 5 L/m <sup>3</sup>                                                      |                                                                    |
| • Adskilt digestate viste 60% reduktion (men emissionerne steg ved 4 L/m <sup>3</sup> dosis)                    |                                                                    |
| <b>Temperaturforhold</b>                                                                                        |                                                                    |
| – Forår: 5–9 °C                                                                                                 |                                                                    |
| – Sommer: op til 33 °C (varmt, uden vind)                                                                       |                                                                    |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                                        | Ikke inkluderet i denne præsentation                               |
| <b>Vigtige observationer</b>                                                                                    |                                                                    |
| – For lidt syre → ufuldstændigt pH-fald → risiko for <b>øgede emissioner</b>                                    |                                                                    |
| – Adskilt slurry kan frigive mere NH <sub>3</sub> , når der tilsættes syre på grund af brudte kemiske bindinger |                                                                    |

## Eksperimentresumé: Ammoniakemissioner fra kvægslurry – Sverige, 2019

**Kilde:** Andersson et al., *Biosystems Engineering* (2023)

| Parameter                                           | Detaljer                                                                                                                                                  |
|-----------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                         | Ammoniakemissioner fra ubehandlet, adskilt og fordøjet kvægslurry                                                                                         |
| <b>År</b>                                           | 2019                                                                                                                                                      |
| <b>Slurrytyper</b>                                  | Ubehandlet kvægslurry (CS), separeret væskefraktion (LF), fordøjet slurry (BD)                                                                            |
| <b>pH før forsuring</b>                             | CS: 6,8 LF: 7,1 BD: 7,6–7,8                                                                                                                               |
| <b>Syre tilsat</b>                                  | Svovlsyre (96%) – CS & LF: ~8 kg/m <sup>3</sup> ; BD: ~11 kg/m <sup>3</sup>                                                                               |
| <b>pH efter forsuring</b>                           | CS & LF: 6,0 BD: 6,7                                                                                                                                      |
| <b>Påføringshastighed (kg TAN/ha)</b>               | CS: 65 LF: 64–72 BD: 56–60                                                                                                                                |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                           | Trailing slange, trailing shoe, forsuret trailing slange, 20 & 50 mm indsprøjtning                                                                        |
| <b>NH<sub>3</sub> emissionsreduktion (70 timer)</b> | Forsureret:                                                                                                                                               |
| CS – 75%                                            |                                                                                                                                                           |
| LF – 88%                                            |                                                                                                                                                           |
| BD – 85%                                            |                                                                                                                                                           |
| Trailing shoe (vs. slange):                         |                                                                                                                                                           |
| CS – 27%                                            |                                                                                                                                                           |
| LF – 16%                                            |                                                                                                                                                           |
| BD – 7%                                             |                                                                                                                                                           |
| 50 mm indsprøjtning (vs. slange):                   |                                                                                                                                                           |
| LF – 37%                                            |                                                                                                                                                           |
| <b>Kumulative emissioner (ubehandlede)</b>          |                                                                                                                                                           |
| CS – 29% af TAN                                     |                                                                                                                                                           |
| LF – 23%                                            |                                                                                                                                                           |
| BD – 32%                                            |                                                                                                                                                           |
| <b>Udkastningseffekt</b>                            | Ikke rapporteret                                                                                                                                          |
| <b>Yderligere noter</b>                             | Udledningerne toppede i de første 6–14 timer. ALFAM2-modellen overvurderede emissioner fra forsurede slurries. BD havde den hurtigste tidlige udsendelse. |

Studiet viste betydelige NH<sub>3</sub>-reduktioner gennem forsuring og dybere injektion. Især forsurede behandlinger viste stærk tidlig afbødning, hvor forskelle mellem slurrytyper påvirkes af pH, tørstof og infiltrationsdynamik.

## Eksperimentoversigt: Forsuret slurry i græsland og vinterhvede – Estland

**Kilde:** Estlands Afgrødeforskningsinstitut, Baltisk Slurry Forsuringsprojekt (2017)

| Parameter                                                             | Detaljer                                                                                                                            |
|-----------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                           | Effekt af forsuret slurry på græsarealer og vinterhvede                                                                             |
| <b>År</b>                                                             | 2017                                                                                                                                |
| <b>Slurrytyper</b>                                                    | Græsland: Kvægslurry Hvede: Svineslurry                                                                                             |
| <b>Syre tilsat</b>                                                    | Græsarealer: 5,14 L/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> (96%) Hvede: 2,47 L/m <sup>3</sup> H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> |
| <b>pH før forsuring</b>                                               | Græsarealer: ~7,6 hvede: ~7,7                                                                                                       |
| <b>pH efter forsuring</b>                                             | Græsarealer: ~5,5 Hvede: ~6,3                                                                                                       |
| <b>Ansøgningsrate</b>                                                 | 30,4 t/ha (græsareal), 48 t/ha (hvede)                                                                                              |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                              | Ikke direkte målt, men svovlniveauerne (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> ) i jorden steg markant efter påføring med forsuret slurry    |
| <b>Udbytteeffekt – Græsland</b>                                       |                                                                                                                                     |
| – Kontrol: 4089 kg DM/ha                                              |                                                                                                                                     |
| – Ubehandlet slurry: 4351 kg                                          |                                                                                                                                     |
| – Forsuret slurry: 4232 kg                                            |                                                                                                                                     |
| → Udbyttet er ikke signifikant højere for syre- vs. ubehandlet slurry |                                                                                                                                     |
| <b>Udbytteeffekt – Vinterhvede</b>                                    |                                                                                                                                     |
| – Kontrol: 3968 kg DM/ha                                              |                                                                                                                                     |
| – Syret slurry: 5675 kg                                               |                                                                                                                                     |
| – Ubehandlet slurry: 5431 kg                                          |                                                                                                                                     |
| → Let udbyttefordel ved forsuret over ubehandlet slurry               |                                                                                                                                     |
| <b>Proteinindhold (hvede)</b>                                         |                                                                                                                                     |
| – Ubehandlet: 10,7% Forsuret: 10,4%                                   |                                                                                                                                     |
| <b>Sygdomsobservationer (hvede)</b>                                   | Syret slurry reducerede forekomsten af septoria og solbrune pletter                                                                 |

Dette projekt omfattede højt strukturerede videnskabelige forsøg med omhyggelig kontrol og replikation. Fordelen ved forsuring var mere tydelig i vinterhvede end i græsarealer, med beskedne stigninger i udbyttet og reduceret sygdomsforekomst.

## Eksperimentoversigt: Forsuret digestate i græsland – Danmark (Biogas Denmark & Linkogas)

**Kilde:** Bruno Sander Nielsen, Biogas Denmark Conference, december 2023

| Parameter                                                                                                                                                                                                                                      | Detaljer                                                                                                                                  |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                                                                                                                                                    | Feltforsøg testede justerede syredoseringskrav for forsuret digestat                                                                      |
| <b>År</b>                                                                                                                                                                                                                                      | 2023                                                                                                                                      |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                                                                                                                                                             | Primær <b>fordøjet biomasse</b> (biogasfordøjelse) og <b>kvægslurry</b>                                                                   |
| <b>Syre tilsat</b><br>– 3 L/ton i behandling af trailing sko<br>– 6 L/ton i behandling af slæbslange<br>– Referencestandard: 11 kg/ton ifølge reglerne                                                                                         | Svovlsyre (96%)                                                                                                                           |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                                                                                                                                                                                      | Ca. pH 2 (rapporteret fra høj syredosis-scenarie)                                                                                         |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                                                                                                                                                                                                                      | Indsprøjtning, slæbende slange, trailing shoe, separation + spredning                                                                     |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b><br>– <b>3 L/ton syre + trailing shoe</b> ≈ samme NH <sub>3</sub> -reduktion som <b>6 L/ton + trailing slange</b><br>– Separation + trailing hose viste også sammenlignelig NH <sub>3</sub> -afbødning |                                                                                                                                           |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                                                                                                                                                                       | Ikke rapporteret i numeriske termer, men fokus var på <b>NH<sub>3</sub> og omkostningseffektivitet</b>                                    |
| <b>Hovedkonklusion</b>                                                                                                                                                                                                                         | Syredosis kan sandsynligvis reduceres <b>med 50 %</b> ved brug af trailing shoe-teknik uden at miste NH <sub>3</sub> -reduktionsfordelene |
| <b>Økonomiske noter</b>                                                                                                                                                                                                                        | Forsuring er i øjeblikket <b>5–600 DKK/ha dyrere</b> end injektion                                                                        |

---

Dette forsøg understøtter optimering af syreforbruget afhængigt af anvendelsesmetoden, især ved **græslandsgødning**. Sig til, når du er klar til den næste!

## Eksperimentoversigt: Danske SyreN-udbytteforsøg (Winter Wheat, 2010–2017)

**Kilde:** SEGES PlantelInnovation – Martin Nørregaard Hansen

| Parameter                                                                                                                                                 | Detaljer                                                                |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                                                               | Udkastningsrespons efter slurryforsuring med SyreN-teknologi            |
| <b>År</b>                                                                                                                                                 | 2010–2017                                                               |
| <b>Antal retssager</b>                                                                                                                                    | 31 forsøg i alt (2–6 om året)                                           |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                                                                        | Ikke specificeret, men typisk for SyreN: kvæg-/grise-slurry             |
| <b>Syre tilsat</b><br>– Gennemsnit: 2,1 L/m <sup>3</sup><br>– Rækkevidde: 1,7–3,3 L/m <sup>3</sup>                                                        | Svovlsyre                                                               |
| <b>pH efter forsuring</b><br>– Interval: 5,8–6,3                                                                                                          | Gennemsnit: 6,1                                                         |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                                                                  | Ikke kvantificeret i dette datasæt, men udledt ud fra pH og syreforbrug |
| <b>Udbytteeffekt (vinterhvede)</b><br>– Rækkevidde: –0,4 til +6,3 hkg/ha (hektokilogram = 100 kg)<br>– Vægtet gennemsnit: <b>+2,2 hkg/ha = +220 kg/ha</b> |                                                                         |

---

Dette langsigtede danske datasæt bekræfter beskedne, men overvejende positive udbytteeffekter fra forsuring af slurry med SyreN-systemet, især når pH sænkes til 6,1 eller derunder. Den største fordel blev observeret i 2017 med pH 5,8.

## Eksperimentoversigt: GülleBest Multi-Site Trials – Tyskland (2019–2020)

**Kilde:** ten Huf et al. (2023), *Agronomy*, Vol. 13, Artikel 472

| Parameter                                                                                                                                                                                                                                                                           | Detaljer                                                                                          |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                                                                                                                                                                                         | Effekter af flydende gødningsmetoder på NH <sub>3</sub> -udledning og udbytte                     |
| <b>År</b>                                                                                                                                                                                                                                                                           | 2019–2020                                                                                         |
| <b>Slurrytyper</b>                                                                                                                                                                                                                                                                  | Kvægslurry (CS), biogas-digestate (BD)                                                            |
| <b>Syre tilsat</b><br>– Gennemsnit: CS: ~3,6 L/m <sup>3</sup> BD: ~5,2 L/m <sup>3</sup><br>(98% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                                                                                                                                                    | Svovlsyre til pH ~6,0                                                                             |
| <b>pH før forsuring</b>                                                                                                                                                                                                                                                             | CS: ~7,4 BD: ~7,7                                                                                 |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                                                                                                                                                                                                                           | CS: ~5,9 BD: ~6,2                                                                                 |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                                                                                                                                                                                                                                                           | Trailing slange (TH), TH + syre, slot injection + trailing shoe (SI/TS), +/- nitrifikationshæmmer |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b><br>– Forsuring reducerede NH <sub>3</sub> med <b>~65% (CS)</b> og <b>~63% (BD)</b><br>– SI/TS reducerede NH <sub>3</sub> med <b>~26% (CS)</b> og <b>~18% (BD)</b><br>– Forsuring var mest effektiv samlet set                              |                                                                                                   |
| <b>NH<sub>3</sub> emissionsbaseline</b>                                                                                                                                                                                                                                             | CS: ~19 kg N/ha BD: ~30 kg N/ha (med TH, ubehandlet)                                              |
| <b>Udkastningseffekt</b><br>– Alle slurrybehandlinger ≈ 7 t/ha<br>– CAN (mineral): 7,9 t/ha<br>– Kontrol (ingen N): 4,5 t/ha<br>– Ingen signifikant udbytteforskel mellem syre- og ikke-surificeret slurry                                                                          |                                                                                                   |
| <b>Optagelse af nitrogen</b><br>– Organiske materialer: ~150 kg N/ha<br>– CAN: ~190 kg N/ha<br>– N0: ~90 kg N/ha                                                                                                                                                                    |                                                                                                   |
| <b>Vigtige observationer</b><br>– Forsuring reducerer NH <sub>3</sub> betydeligt, men <b>forbedrer ikke altid udbyttet</b><br>– Jordens pH, vind og jordens tæthed påvirker effektiviteten<br>– Biogas-digestate kræver mere syre end kvægslurry på grund af højere bufferkapacitet |                                                                                                   |

Vores beregninger viste, at jordens pH signifikant påvirkede NH<sub>3</sub>-udledninger og viste en let til medium effektstyrke (R = 0,47). Ligesom pH-effekten af flydende organiske gødninger flytter en

høj jord-pH  $\text{NH}_3/\text{NH}_4^+$ -forholdet mod  $\text{NH}_3$ , hvilket øger  $\text{NH}_3$ -udledningerne. Anvendelse af ko-slurry (CS) viste en lidt stærkere respons på jordens pH sammenlignet med biogas-digestate (BD) anvendelse (Tabel 5), hvilket antyder, at BD's pH-bufferkapacitet kan være højere, hvilket potentielt kan reducere jordens pH-effekter. Adsorption af  $\text{NH}_4^+$  til jordens kationudvekslingssteder kan sænke  $\text{NH}_3$ -udledningerne. Dog påvirkede jordens kationudvekslingskapacitet (CEC) i vores toårige feltstudie kun  $\text{NH}_3$ -emissioner efter CS-påføring ( $R = 0,53$ ) og havde ingen effekt på BD-anvendelsen ( $R = -0,01$ ; Tabel 5). [literatur.thuenen.de](http://literatur.thuenen.de)

*Kilde: Thünen Institute Report on Acidification, side 8.*

---

Dette er et af de mest omfattende multi-lokationsforsøg til dato, og det bekræfter det høje afbødningspotentiale ved forsuring, samtidig med at det viser, at udbytteeffekter er kontekstafhængige.

## Eksperimentresumé: Forsuret svinegylle og jordmikrobielle effekter – Estland (2017–2018)

**Kilde:** Edesi et al. (2020), *Soil & Till Research*, Vol. 202

| Parameter                                                                                                                 | Detaljer                                                                           |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                               | Effekter af forsuret svineslurry på jordens kemiske og mikrobiologiske egenskaber  |
| <b>År</b>                                                                                                                 | 2017 og 2018                                                                       |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                                        | Griselød                                                                           |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                                        | Svovlsyre (96%) til mål <b>pH 6,0</b> (simulering af forsuret system i opbevaring) |
| <b>pH før forsuring</b>                                                                                                   | Ikke eksplicit angivet (typisk er grise-slurry ~7,5–7,8)                           |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                                                                 | pH 6,0                                                                             |
| <b>Anvendelsesmetode</b>                                                                                                  | Anvendelse af markoverflader på vinterhvede                                        |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                                  | Ikke direkte målt, men underforstået ved forsøringsbrug                            |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                                                  | Ikke rapporteret                                                                   |
| <b>Jordens kemiske virkninger</b>                                                                                         |                                                                                    |
| – <b>SO<sub>4</sub>-S (sulfatsvovl)</b>                                                                                   | steg markant 2 uger efter spredning, forblev forhøjet indtil høsten                |
| – Ingen signifikant ændring i <b>jordens pH-</b> , <b>NO<sub>3</sub>-N-</b> eller <b>NH<sub>4</sub>-N-koncentrationer</b> |                                                                                    |
| <b>Jordens mikrobielle effekter</b>                                                                                       |                                                                                    |
| – Ingen signifikant ændring i <b>dehydrogenaseaktivitet (DHA)</b>                                                         |                                                                                    |
| – Ingen klar ændring i mikrobielt samfund (PLFA-profil)                                                                   |                                                                                    |
| – <b>Forekomsten af actinobakterier</b> steg en smule (knyttet til nitrat)                                                |                                                                                    |

---

Denne undersøgelse fokuserede på **jordkvalitet og mikrobiel sundhed**, ikke direkte udbytte eller emissioner, men bekræftede, at **forsuret slurry ikke skadede jordens mikrobiom** under markforhold.

## Eksperimentoversigt: NH<sub>3</sub>-emissioner fra forsuret digestate – Baasdorf (Tyskland)

**Kilde:** Baasdorf NH<sub>3</sub> Measurement Report, 22.–23. september 2014

| Parameter                                                                     | Detaljer                                                    |
|-------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                   | Måling af ammoniakudledning: forsuring af adskilt digestate |
| <b>År</b>                                                                     | 2014                                                        |
| <b>Slurry-type</b>                                                            | Adskilt <b>væskefase</b> af digestate                       |
| <b>Ansøgningsrate</b>                                                         | 25 m <sup>3</sup> /ha                                       |
| <b>Syre tilsat</b>                                                            | Svovlsyre (H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> ):                |
| – 0 l/m <sup>3</sup> (pH1 – ubehandlet)                                       |                                                             |
| – 2,5 l/m <sup>3</sup> (pH2)                                                  |                                                             |
| – 5,0 l/m <sup>3</sup> (pH3)                                                  |                                                             |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                     | Ikke numerisk angivet, men reduceret med dosisniveau        |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                      |                                                             |
| – <b>Betydelig reduktion</b> ved stigende syredosis                           |                                                             |
| – Laveste kumulative emissioner på <b>5,0 l/m<sup>3</sup></b>                 |                                                             |
| – Forskellene var <b>statistisk signifikante (p &lt; 0,05)</b> via Tukey-Test |                                                             |
| <b>Målevarighed</b>                                                           | Over 24 timer                                               |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                      | Ikke målt                                                   |

---

Dette forsøg viser tydeligt en dosis-respons-sammenhæng: højere svovlsyretilførsel resulterede i større ammoniakreduktion, og signifikansen blev bekræftet med statistisk analyse.

## Eksperimentresumé: SyreN-teknologi til ammoniakreduktion – Danmark

**Kilde:** Dansk Teknologisk Institut (Frandsen, 2019); original test af Hansen (2011), AU-Foulum

| Parameter                                                                                | Detaljer                                                   |
|------------------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                              | Ammoniakreduktion efter slurry-påføring med SyreN-systemet |
| <b>År</b>                                                                                | 2010 (4. maj og 18. maj)                                   |
| <b>Slurry-type</b>                                                                       | Griseslød                                                  |
| <b>Afgrøde</b>                                                                           | Vinterhvede                                                |
| <b>Ansøgningsrate</b>                                                                    | ~31 tons/ha                                                |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                       |                                                            |
| – 2,0 L/t (4. maj)                                                                       |                                                            |
| – 2,2 L/t (18. maj)                                                                      |                                                            |
| – Svovlsyre ( $H_2SO_4$ ) påført under spredning ved brug af SyreN-systemet              |                                                            |
| <b>pH før/efter forsuring</b>                                                            |                                                            |
| – 4. maj: 7.2 → 6.1                                                                      |                                                            |
| – 18. maj: 7.9 → 6.7                                                                     |                                                            |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                                                                |                                                            |
| – Reference: Slæbende slanger (ubehandlede)                                              |                                                            |
| – Sammenligning:                                                                         |                                                            |
| • SyreN (forsureret) + slæbende slanger                                                  |                                                            |
| • Overfladisk injektion (ubehandlet)                                                     |                                                            |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                 |                                                            |
| – <b>Bagslanger (ubehandlede):</b> 23% af NH <sub>4</sub> -N udledt                      |                                                            |
| – <b>Overfladisk indsprøjtning:</b> 11%                                                  |                                                            |
| – <b>SyreN (forsureret):</b> 15%                                                         |                                                            |
| → <b>SyreN reducerede emissionerne med ~35 %</b> sammenlignet med ubehandlede bagslanger |                                                            |
| <b>Jord- og vejrforhold</b>                                                              |                                                            |
| – 4. maj: 5,6°C, 2,2 mm regn, vind 4,0 m/s                                               |                                                            |
| – 18. maj: 12,5°C, ingen regn, vind 3,6 m/s                                              |                                                            |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                 | Ikke rapporteret                                           |
| <b>Målevarighed</b>                                                                      | 144 timer (6 dage), med passive ammoniakprøvetagere        |

Undersøgelsen bekræftede, at **SyreN-systemet signifikant reducerer ammoniaktab** under slurryspreddning, med en lidt lavere ydeevne end lav injektion, men med fordelene ved at bevare overfladepåføring.

## **Eksperimentresumé: Forsuring i marken af adskilt digestate – Danmark (Demonstrationsforsøg)**

**Kilde:** Mogens Kjeldal, DME (udateret, sandsynligvis ~2010'erne)

| <b>Parameter</b>                                                                                                                                                                     | <b>Detaljer</b>                                                                                          |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                                                                                          | Demonstration af tilsætning af svovlsyre til adskilt digestate under feltanvendelse                      |
| <b>År</b>                                                                                                                                                                            | Ikke specificeret (sandsynligvis midt i 2010'erne)                                                       |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                                                                                                   | Adskilt, fordøjet slurry (fra Fangel Bioenergi)                                                          |
| <b>Ansøgningsrate</b>                                                                                                                                                                | 45 tons/ha                                                                                               |
| <b>Syre tilsat</b><br>– 0,6 L/ton<br>– 1,3 L/ton<br>– 2,0 L/ton<br>(Svovlsyre 96%)                                                                                                   |                                                                                                          |
| <b>pH før forsuring</b>                                                                                                                                                              | 7.49–7.54                                                                                                |
| <b>pH efter forsuring</b><br>– 0,6 L/t: 7,10 → 7,32<br>– 1,3 L/t: 6,96 → 7,15<br>– 2,0 L/t: 6,91 → 7,05 (målt over 60 minutter efter påføring)                                       |                                                                                                          |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                                                                                             | Ikke direkte målt, men kraftigt pH-fald observeret umiddelbart efter påføring (største fald med 2,0 L/t) |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                                                                                                             | Ikke testet                                                                                              |
| <b>Næringstilførsel fra slurry (kg/ha)</b><br>– Samlet N: 160<br>– NH <sub>4</sub> -N: 140<br>– P: 6,8<br>– K: 90,9<br>– S:<br>• 0,6 L/t: 17,1<br>• 1,3 L/t: 34,2<br>• 2,0 L/t: 54,5 |                                                                                                          |
| <b>Observationer</b><br>– pH stiger efter påføring og stabiliseres inden for 30 minutter<br>– Effektiv pH-kontrol kræver hurtig infiltration i jorden                                |                                                                                                          |

- Stationær syredosering var praktisk uden skumproblemer; Mobile syretanke kan udgøre sikkerhedsbekymringer

Dette forsøg bekræfter, at **forsuring på marken er teknisk mulig og effektiv til pH-reduktion**, især for adskilt slurry, der bruges i fuld-gødningsregimer. Det fremhæver dog også **logistiske og sikkerhedsmæssige udfordringer**, når syre håndteres i traditionelle slurrtanke.

## **Eksperimentoversigt: Forsuring vs injektion i boreale græsarealer – Finland (2017–2018)**

**Kilde:** Keskinen et al. (2022), *Nutrient Cycling in Agroecosystems*

| <b>Parameter</b>                                                  | <b>Detaljer</b>                                                              |
|-------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                       | Slurryforsuring overgik injektion som en ammoniakemissionsreducerende teknik |
| <b>År</b>                                                         | 2017 og 2018                                                                 |
| <b>Slurry-type</b>                                                | Kvægslurry (fra biogas-forlagring)                                           |
| <b>Ansøgningsrate</b>                                             | 42,5 tons/ha                                                                 |
| <b>Syre tilsat</b>                                                | Svovlsyre (93%)                                                              |
| – 3,3 L/ton (2017)                                                |                                                                              |
| – 2,6 L/ton (2018)                                                |                                                                              |
| – Mål-pH: 5,5                                                     |                                                                              |
| <b>pH Før / Efter</b>                                             | Ubehandlet pH: ~7,3                                                          |
| – Forsuret pH: 5,5 (2017), 5,6 (2018)                             |                                                                              |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                                         |                                                                              |
| – Båndspredning (ubehandlet)                                      |                                                                              |
| – Overfladisk injektion (ubehandlet)                              |                                                                              |
| – Båndspredning af forsuret slurry                                |                                                                              |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                          |                                                                              |
| – 2017 (køligere, vejr):                                          |                                                                              |
| • Forsuring: –97%                                                 |                                                                              |
| • Injektion: –97%                                                 |                                                                              |
| – 2018 (varmere):                                                 |                                                                              |
| • Forsuring: –95%                                                 |                                                                              |
| • Injektion: –43%                                                 |                                                                              |
| <b>→ Forsuring overgik injektionen (især under varme forhold)</b> |                                                                              |

### **Kumulative NH<sub>3</sub>-tab (kg/ha)**

- Ubehandlede: 22 (2017), 10 (2018)
- Injektion: 0,7 (2017), 5,7 (2018)
- Forsureret: 0,7 (2017), 0,5 (2018)

### **Udkastningseffekt**

- 2017: Ingen væsentlige forskelle
- 2018:
  - Forsuret slurry: +29% DM-udbytte
  - +65% N-genopretning vs. ubehandlet båndspredning

### **Apparent N Recovery**

- Ubehandlet: 11–17%
- Injektion: 15–19%
- Forsuret: 13–28%

### **Jordpåvirkning**

- Forsuring øgede jordens svovlindhold
- Ingen negative pH- eller mikrobielle påvirkninger påvist

---

Denne velkontrollerede finske undersøgelse viser, at **forsuring er mere effektiv og pålidelig** end injektion til at reducere NH<sub>3</sub>-udledninger i **boreale græslandsforhold**, især i varmere årstider. Den viste også **målbare gevinster i udbytte og N effektivitet** med forsuret slurry.

## Studieresumé: Livscyklusvurdering af strategier for gylleforsuring

Kilde: ten Hoeve et al. (2016), *Journal of Cleaner Production*

| Parameter                                                                                     | Detaljer                                                              |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| <b>Studiefokus</b>                                                                            | Miljøpåvirkninger af <b>forsuring af marken vs. forsuring i huset</b> |
| <b>Omfang</b>                                                                                 | Danmark, svineslurry, systemniveau (bolig → opbevaring → mark)        |
| <b>Slurry-type</b>                                                                            | Griseslød                                                             |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                            |                                                                       |
| – Felt: 5,2 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t for at nå <b>pH 6,2</b>                      |                                                                       |
| – Internt: 9,7 kg H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> /t for at nå <b>pH 5,5</b>                   |                                                                       |
| <b>pH før forsuring</b>                                                                       | ~7,5 (typisk grise-slurry)                                            |
| <b>pH efter forsuring</b>                                                                     | Felt: 6,2 Internt: 5,5                                                |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                      |                                                                       |
| – Forsuring af marken: <b>–30%</b>                                                            |                                                                       |
| – Intern forsuring: <b>–71%</b> (dækker boliger, lager, mark)                                 |                                                                       |
| <b>Reduktion af drivhusgasudledninger</b>                                                     |                                                                       |
| – Feltforsuring øgede <b>drivhusgaspåvirkningen</b> en smule på grund af brug af syre og kalk |                                                                       |
| – Intern forsuring <b>reducerede drivhusgasudledninger</b> samlet set                         |                                                                       |
| <b>Yield Effect (modelleret)</b>                                                              |                                                                       |
| – Ikke-syret slurry: 7,2 t/ha                                                                 |                                                                       |
| – Feltforsuret: 7,4 t/ha                                                                      |                                                                       |
| – In-house forsuret: 7,7 t/ha                                                                 |                                                                       |
| <b>Miljøpåvirkningskategorier</b>                                                             |                                                                       |
| – <b>Terrestrisk eutrofieringspotentiale (TEP):</b>                                           |                                                                       |
| • Felt: –30%                                                                                  |                                                                       |
| • In-house: –71%                                                                              |                                                                       |
| – <b>Klimaforandringspotentiale (CCP):</b>                                                    |                                                                       |
| • Felt: højere (syre- og kalkpåvirkning)                                                      |                                                                       |
| • Internt: lavere                                                                             |                                                                       |
| – <b>Marin eutrofieringspotentiale (MEP):</b>                                                 |                                                                       |
| • Lignende på tværs af metoder                                                                |                                                                       |
| – <b>Toksicitetspotentiale (TP):</b>                                                          |                                                                       |
| • Drives for det meste af zink i svineslurry, upåvirket af syreningsmetoden                   |                                                                       |
| <b>Effekt af N Regulation</b>                                                                 | Forsuring er <b>mere gavnlig under strengere N-tilførselsgrænser</b>  |

## Konklusion

- **Intern forsuring** er **mest effektiv** til at reducere  $\text{NH}_3$  og den samlede miljøbelastning.
- **Forsuring af marken** hjælper, men giver mindre samlede fordele og kan en smule øge drivhusgaspåvirkningen.
- **Reguleringsrammer** har stor indflydelse på den samlede miljømæssige fordel ved forsuringsstrategier.

## Eksperimentoversigt: SyreN vs Infarm vs Injection – Danmark (2010)

**Source:** Aarhus University, Notat til Miljøstyrelsen, Foulum (Tavs Nyord et al.)

| Parameter                                                         | Detaljer                                                                                                                                              |
|-------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                       | Evaluering af ammoniak, lugt og drivhusgasemissioner fra forsuringsteknikker                                                                          |
| <b>År</b>                                                         | 2010                                                                                                                                                  |
| <b>Slurrytyper</b>                                                | Svineslurry (vinterhvede), kvæggjødse (græsmark)                                                                                                      |
| <b>Anvendelseshastigheder</b>                                     | ~31–37 tons/ha                                                                                                                                        |
| <b>Syre tilsat</b>                                                |                                                                                                                                                       |
| – SyreN: 1,9–2,9 L/ton                                            |                                                                                                                                                       |
| – Infarm (instabil forsuring): ~3,3 L/ton                         |                                                                                                                                                       |
| <b>pH før/efter forsuring</b>                                     |                                                                                                                                                       |
| – Grise-slurry: ~7,2–7,9 → 6,1–6,7                                |                                                                                                                                                       |
| – Kvægslurry: ~7,4–7,8 → 6,4–6,5                                  |                                                                                                                                                       |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                          | I forhold til ubehandlet trailing slange-anvendelse:                                                                                                  |
| – Injektion: –54%                                                 |                                                                                                                                                       |
| – <b>SyreN (forsuret under spredning): –42%</b>                   |                                                                                                                                                       |
| – Infarm (forsurificeret): –59%                                   |                                                                                                                                                       |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                          | Ikke rapporteret                                                                                                                                      |
| <b>Lugtemission (lugt)</b>                                        |                                                                                                                                                       |
| – Lignende lugtniveauer for ubehandlet og forsuret slurry (SyreN) |                                                                                                                                                       |
| – <b>Lavere lugt</b> fra injiceret og jernsulfatbehandlet slurry  |                                                                                                                                                       |
| <b>Noter om lugtkemi</b>                                          | Forsuring øger <b>H<sub>2</sub>S-udledningerne</b> på kort sigt, hvilket bidrager til lugt; jernsulfat reducerer H <sub>2</sub> S ved at binde sulfid |
| <b>GHG-udledninger</b>                                            | Ingen tydelig stigning fra forsuret slurry                                                                                                            |

### Vigtige pointer:

- **SyreN reducerer NH<sub>3</sub> med ~42%**, men ikke lige så effektivt som Infarm eller injektion.
- **Lugtniveauet** umiddelbart efter spredning forbedres ikke nødvendigvis med SyreN alene.
- Surt slurry med **jernsulfat** kunne reducere lugten, men denne kombination blev ikke fuldt testet.

## Studieresumé: Miljømæssige bivirkninger af forsuret slurry – Danmark (Anmeldelse)

**Kilde:** Aarhus Universitet (DCE Rapport nr. 257, 2018) – Jensen et al.

| Parameter                                                                                              | Detaljer                                                                        |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Fokus</b>                                                                                           | Potentielle bivirkninger ved brug af svovlsyrebehandlet slurry på landbrugsjord |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                     | Svine- og kvægslurry (generelt udbredt over Danmark)                            |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                     | Svovlsyre (typisk mål-pH: 6,0 eller lavere)                                     |
| <b>pH før/efter forsuring</b>                                                                          | ~7,5 → ~6,0                                                                     |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                               | Anerkendt som effektiv; ikke numerisk vurderet her                              |
| <b>Jordens mikrobielle effekter</b>                                                                    |                                                                                 |
| – Midlertidigt <b>pH-fald i jorden er ikke skadeligt</b> for mikrobiel aktivitet eller hvirvelløse dyr |                                                                                 |
| – <b>Kortvarig hæmning</b> af nitrifikation og denitrifikation omkring slurry-patches                  |                                                                                 |
| – Ingen varig indvirkning på mikrobiel nedbrydning af N-forbindelser                                   |                                                                                 |
| <b>GHG-udledninger</b>                                                                                 |                                                                                 |
| – Metanemissionen <b>reduceret</b>                                                                     |                                                                                 |
| – N <sub>2</sub> O emissioner: Ingen signifikant stigning fundet i laboratorietests                    |                                                                                 |
| <b>Jordfauna (f.eks. regnorme)</b>                                                                     |                                                                                 |
| – For det meste <b>positive eller neutrale</b> effekter                                                |                                                                                 |
| – Midlertidig undgåelsesadfærd observeret på grund af ammoniak/syre                                    |                                                                                 |
| – Langsigtet risiko minimal ved typisk pH i marken (>5,5)                                              |                                                                                 |
| <b>Tungmetalmobilitet</b>                                                                              |                                                                                 |
| – pH-reduktion (0,5 enheder) kan <b>fordoble/tredoble Ni og Zn i porevand</b>                          |                                                                                 |
| – Størst risiko i sandede jorde og med <b>svineslurry (højt Zn)</b>                                    |                                                                                 |
| – Risiko for <b>cadmiumophobning</b> ved ekstra kalkbrug                                               |                                                                                 |
| <b>Risiko for udvaskning af fosfor</b>                                                                 |                                                                                 |
| – Forsuring øger <b>vandopløseligt P</b> i slurry (op til 2×)                                          |                                                                                 |
| – Risikoen for P-tab stiger på <b>ikke-inkorporeret</b> slurry i græsarealer                           |                                                                                 |
| <b>Kalkkrav</b>                                                                                        | Sur slurry øger det langsigtede kalkbehov for at opretholde jordens pH          |

---

### Vigtige pointer:

- Forsuring er effektiv til at afhjælpe  $\text{NH}_3$ , men **kræver god håndtering** for at undgå uønskede bivirkninger.
- Opmærksomhed er nødvendig i **zinkfølsomme områder** og **vådområder** (for P-mobilisering).
- Ingen større mikrobiologiske risici identificeret under normale landbrugsforhold.

## Eksperimentresumé: Forsuring vs Injektion vs Broadcast – Tyskland & Danmark (2011–2013)

Kilde: Pacholski et al., RAMIRAN Conference Presentation, 2015

| Parameter                                                                                                   | Detaljer                                                                       |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                 | Påføringsteknikker til at reducere nitrogentab og øge udbyttet                 |
| <b>År</b>                                                                                                   | 2011–2013 (flere feltprøver)                                                   |
| <b>Slurrytyper</b>                                                                                          | Kvægslurry og co-fermenteret svineslurry                                       |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                          | Svovlsyre for at opnå pH 6,5 eller 6,0 (afhængigt af forsøg)                   |
| <b>pH før/efter forsuring</b>                                                                               | ~7,2 → 6,5 eller 6,0                                                           |
| <b>Anvendelsesteknikker</b>                                                                                 |                                                                                |
| – Udsendelse                                                                                                |                                                                                |
| – Slæbende slange (med/uden syre)                                                                           |                                                                                |
| – Lav indsprøjtning (17,5 cm / 35 cm rækkeafstand)                                                          |                                                                                |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                    |                                                                                |
| – Udsendelse: højt NH <sub>3</sub> -tab                                                                     |                                                                                |
| – Slæbende slange (ubehandlet): moderat tab                                                                 |                                                                                |
| – <b>Forsuring (pH 6,0):</b> NH <sub>3</sub> -tab reduceret med ~50%                                        |                                                                                |
| – Injektion (35 cm): <b>laveste NH<sub>3</sub>-tab</b> (~5–10 kg N/ha)                                      |                                                                                |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                                                    |                                                                                |
| – Ingen signifikante forskelle mellem metoder (280 kg NH <sub>4</sub> -N/ha)                                |                                                                                |
| – Lille udbyttefordel ved <b>forsuring pH 6,0 og injektion 35 cm</b>                                        |                                                                                |
| <b>N<sub>2</sub>O-emissioner</b>                                                                            | Ingen stigning fra forsuret slurry;<br>Indsprøjtning havde lignende emissioner |
| <b>Jordpåvirkning</b>                                                                                       |                                                                                |
| – Indsprøjtning på sandjord øgede skader på sad                                                             |                                                                                |
| – Forsuringen var mildere på græsarealer                                                                    |                                                                                |
| <b>Konklusion</b>                                                                                           |                                                                                |
| – Forsuring (pH 6,0) er et pålideligt afbødningsværktøj                                                     |                                                                                |
| – Bedste NH <sub>3</sub> -reduktion med <b>injektion</b> , men <b>forsuring er mere fleksibel</b> i praksis |                                                                                |

Dette forsøg viste, hvordan forsuring giver **betydelige emissionsreduktioner**, samtidig med at overfladespredningens enkelhed bevares, hvilket især er nyttigt, hvor injektion kan skade græsarealer.

## **Eksperimentresumé: Feltforsøg med forsuret kvæg og svineslurry – Sverige (2013)**

**Kilde:** Kjell Gustafsson m.fl., Agroväst / SLU / HS Sjuhärad

| <b>Parameter</b>                                                                                                                                                                                                                                               | <b>Detaljer</b>                                                                |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                                                                                                                                                                    | Forsuring af slurry og digestate i græsarealer og vinterhvede                  |
| <b>År</b>                                                                                                                                                                                                                                                      | 2013                                                                           |
| <b>Slurrytyper</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Kvægslurry (rå og fordøjet)</li><li>– Griseslæm (rå og fordøjet)</li></ul>                                                                                                                          |                                                                                |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                                                                                                                                                                             | Svovlsyre (96%), manuelt tilsat under spredning for at opnå <b>pH ~6,0</b>     |
| <b>pH før/efter forsuring</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Kvægslurry: ~7,0–7,2 → ~6,0</li><li>– Biogasslurry: ~7,5–8,0 → ~6,0</li></ul>                                                                                                            |                                                                                |
| <b>Anvendelseshastigheder</b>                                                                                                                                                                                                                                  | ~450–570 kg N/ha (baseret på NH <sub>4</sub> -N-indhold), 45–57 tons/ha slurry |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                                                                                                                                                                       | Ikke direkte målt – udledt ud fra pH-kontrol og vejrforhold                    |
| <b>Udbytteeffekt – Græsland</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– <b>Forsuret slurry øgede tørstofudbyttet med 400–1100 kg/ha</b> (1. snit)</li><li>– +250–750 kg/ha (2. snit)</li><li>– Særligt stærk effekt for <b>forsuret biogasslurry</b></li></ul> |                                                                                |
| <b>Udbytteeffekt – Vinterhvede</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– <b>Ingen fordel</b> ved forsuring</li><li>– Let udbyttenedsættelse observeret i nogle forsurede slurrybehandlinger</li></ul>                                                        |                                                                                |
| <b>Nitrogenforbrugseffektivitet (hvede)</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Biogasslurry havde højere gødningsværdi end rå slurry</li><li>– Forsuring <b>øgede mineralgødningsækvivalensen fra ~30% til 70%</b></li></ul>                              |                                                                                |
| <b>Observationer</b> <ul style="list-style-type: none"><li>– Sen gødning kan have reduceret effekt i hvede</li><li>– Mulig forsinkelse i nitrificering på grund af lav pH</li></ul>                                                                            |                                                                                |

- Skumning og skumdannelse under syretilsætning forårsagede praktiske problemer

### **Konklusion**

- Forsuring er **tydeligvis gavnlig på græsarealer**
  - Resultater blandet for vinterhvede på grund af vejr, afgrødefase og timing
- 

Dette var det **første svenske feltforsøg med slurryforsuring**, inspireret af dansk SyreN-teknologi. Den fremhæver et stærkt argument for at bruge forsuret digestat i græslandssystemer, men viser også vigtigheden af **timing og teknik** i kornsorter som vinterhvede.

## Eksperimentoversigt: Forsuring vs injektion på græsarealer – Tyskland & Danmark (2012–2013)

**Kilde:** Seidel et al., abstract fra Kiel Universitet & Aarhus Universitet

| Parameter                                                                    | Detaljer                                                           |
|------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                  | Reduktion af ammoniaktab fra kvægslurry ved forsuring og injektion |
| <b>År</b>                                                                    | 2012 og 2013                                                       |
| <b>Slurry-type</b>                                                           | Kvægslurry                                                         |
| <b>Syre tilsat</b>                                                           |                                                                    |
| – pH 6,5: ~2,7 L/t                                                           |                                                                    |
| – pH 6,0: ~4,4 L/t                                                           |                                                                    |
| (Brugt syre: 96% H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub> )                            |                                                                    |
| <b>pH Før / Efter</b>                                                        |                                                                    |
| – Ubehandlet: ~7,2                                                           |                                                                    |
| – Forsuret: 6,5 eller 6,0                                                    |                                                                    |
| <b>Anvendelsesmetoder</b>                                                    |                                                                    |
| – Bandspredning                                                              |                                                                    |
| – Indsprøjtning (17,5 cm og 35 cm spalteafstand)                             |                                                                    |
| – Slæbende slange med forsuret slurry                                        |                                                                    |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                     |                                                                    |
| Relativt til <b>båndspredning (14,0 % af NH<sub>4</sub>-N tabt)</b> :        |                                                                    |
| – Injektion 17,5 cm: <b>-31,4%</b>                                           |                                                                    |
| – Injektion 35 cm: <b>-60,6%</b>                                             |                                                                    |
| – Forsuring til pH 6,5: <b>-42,2%</b>                                        |                                                                    |
| – Forsuring til pH 6,0: <b>-68,9 %</b> (laveste NH <sub>3</sub> -tab: 4,4 %) |                                                                    |
| <b>Målemetode</b>                                                            | Passive fluxprøvetagere, multi-site replikerede feltforsøg         |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                     | Ikke rapporteret                                                   |

---

### Vigtig konklusion:

- **Forsuring til pH 6,0 er mere effektiv** end de fleste injektionsteknikker til at reducere ammoniakudledninger.
- Resultaterne var **statistisk** signifikante med standardafvigelse <1%.
- Undersøgelser viser, at forsuring kan være en praktisk og meget effektiv afbødningsmulighed for kvægslurry på græsarealer.

## Studieresumé: Nationalt scenarie – Syre 50% af dansk slurry

**Kilde:** Henning Lyngsø Foged m.fl., Organe Institute (2017, Baltic Slurry Acidification project)

| Parameter                                                                                         | Detaljer                                                                         |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Scenarietype</b>                                                                               | <b>Fremvisning på nationalt niveau</b> – ikke feltforsøg                         |
| <b>Slurrytyper</b>                                                                                | Svineslurry, kvægslurry, fordøjet slurry                                         |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                | Svovlsyre, typiske mængder:                                                      |
| – Gris: 2,6–3,5 L/ton                                                                             |                                                                                  |
| – Kvæg: 3,0–4,5 L/ton                                                                             |                                                                                  |
| – Fordøjet: 7,9–9,0 L/ton                                                                         |                                                                                  |
| <b>pH-mål</b>                                                                                     | pH 5,5–6,4 afhængigt af metoden                                                  |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion (modelleret)</b>                                             |                                                                                  |
| – ~40–60% reduktion på tværs af alle teknologier                                                  |                                                                                  |
| – Markforsuring (in-field) anslået til ~45%                                                       |                                                                                  |
| – Staldforsuring (instabil): højere samlet systempåvirkning (~60%)                                |                                                                                  |
| <b>GHG-udledninger</b>                                                                            |                                                                                  |
| – Metanreduktion op til <b>67–87%</b> (lagringsrelateret)                                         |                                                                                  |
| – Let N <sub>2</sub> O-reduktion (usikker)                                                        |                                                                                  |
| <b>Sundheds- og miljøfordele</b>                                                                  |                                                                                  |
| – Sundhedsbesparelser: <b>429 millioner DKK om året</b>                                           |                                                                                  |
| – Reduceret luftbåren N-deponering: <b>~4.600–6.900 tons N/år</b>                                 |                                                                                  |
| – Reduktion af drivhusgasser: <b>23.598 tons CO<sub>2</sub>e/år</b> (~2,6 % af DK-målet for 2030) |                                                                                  |
| <b>Økonomisk omkostning (landmand)</b>                                                            |                                                                                  |
| – Gennemsnit: <b>5,70 DKK/ton</b> (~€0,77/ton) for 14 millioner tons slurry                       |                                                                                  |
| – Dyrest: <b>forsuret fordøjet kvægslurry</b> (~DKK 17–20/ton)                                    |                                                                                  |
| <b>Break-even N-fordel</b>                                                                        | Ikke længere attraktiv efter 2016 på grund af lempede befrugtningsnormer         |
| <b>Investeringsbehov</b>                                                                          | ~400 millioner DKK for at tredoble den nuværende forsøringskapacitet             |
| <b>Politiknote</b>                                                                                | EU anerkendte slurryforsuring som <b>bedste tilgængelige teknik (BAT)</b> i 2017 |

### Vigtige indsigter:

- At forsure halvdelen af dansk slurry **kan næsten nå** målet for reduktion af NH<sub>3</sub> i 2020.

- De miljømæssige **fordele opvejer omkostningerne** på nationalt plan, især for sundhed og luftkvalitet.
- **For landmænd** er den direkte profit **negativ**, medmindre den støttes af incitamentter eller strengere reguleringer.

## Teknologioversigt: SyreN forsuringssystem – VERA-certificeret (2010 Test)

**Kilde:** VERA Verifikationserklæring 001, BioCover A/S, testet af Aarhus Universitet & AgroTech A/S

|                                                                            |                                                                                          |
|----------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Teknologinavn</b>                                                       | <b>SyreN (fremstillet af BioCover A/S)</b>                                               |
| <b>Testår / Sted</b>                                                       | 2010 – Foulum, Danmark (græsland og vinterhvede)                                         |
| <b>Testede slurrytyper</b>                                                 | Kvægslød og svineslurry                                                                  |
| <b>Brugt syre</b>                                                          | Svovlsyre (96%)                                                                          |
| – Kvægslurry: 2,3–2,9 L/ton                                                |                                                                                          |
| – Griseslød: 1,9–2,9 L/ton                                                 |                                                                                          |
| <b>Mål-pH efter forsuring</b>                                              | Kvæg: ~6,4–6,5                                                                           |
| Gris: ~6,1–6,7                                                             |                                                                                          |
| <b>Applikationssystem</b>                                                  | Slanger med bagslænger (30 cm afstand), syre tilsat under spredning (på farten)          |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                   |                                                                                          |
| – Kvægslurry: <b>49% reduktion</b> (gennemsnit; interval 34–61%; SD = 11%) |                                                                                          |
| – Griseslød: <b>37% reduktion</b> (gennemsnit; interval 18–52%; SD = 12%)  |                                                                                          |
| <b>Lugtreduktion</b>                                                       | Ingen væsentlig ændring i lugtemissioner (målt kun for kvægslurry)                       |
| <b>Operationel stabilitet</b>                                              | Bekræftet som <b>tilfredsstillende</b> – inkluderer realtids pH- og syredoseringskontrol |
| <b>Andre funktioner</b>                                                    |                                                                                          |
| – Online datalogning: pH (ind/ud), syreforbrug, slurryvolumen              |                                                                                          |
| – Systemet opretholder mål-pH via automatisk syrejustering                 |                                                                                          |
| <b>Observerede bivirkninger</b>                                            | <b>Ingen</b> under testen                                                                |

### Vigtige pointer:

- SyreN demonstrerede **pålidelig ammoniakreduktion** (49 % for kvægslurry, 37 % for svineslurry) under kontrollerede markforhold.
- Systemet **er VERA-certificeret** for miljømæssig og operationel ydeevne.
- Der blev ikke fundet nogen lugt eller utilsigtede bivirkninger, og brugen af syre blev håndteret godt via realtidskontroller.

## Eksperimentoversigt: Omkostningseffektivitet af forsuret kvægslurry – Tyskland (2019 feltforsøg)

**Kilde:** Jorissen & Recke (2021), Hochschule Osnabrück, præsenteret ved DHF 2021

| Parameter                                                                                                        | Detaljer                                                                                                                                                              |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                                                      | Omkostningsanalyse af ammoniakreduktion via forsuret kvægslurry                                                                                                       |
| <b>År</b>                                                                                                        | 2019                                                                                                                                                                  |
| <b>Afgrøder</b>                                                                                                  | Vinterhvede                                                                                                                                                           |
| <b>Slurry-type</b>                                                                                               | Kvægslurry                                                                                                                                                            |
| <b>Anvendelsesmetode</b>                                                                                         | Slæbende slange (med og uden svovlsyre)                                                                                                                               |
| <b>Syre tilsat</b>                                                                                               |                                                                                                                                                                       |
| – 6,5 L/m <sup>3</sup> i Kiel/Langenburg                                                                         |                                                                                                                                                                       |
| – 8,5 L/m <sup>3</sup> i Hohenheim                                                                               |                                                                                                                                                                       |
| → Mål: pH 6,0                                                                                                    |                                                                                                                                                                       |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                                                         |                                                                                                                                                                       |
| – Kiel: <b>–11,7 kg NH<sub>3</sub>/ha</b>                                                                        |                                                                                                                                                                       |
| – Hohenheim: <b>–4,1 kg NH<sub>3</sub>/ha</b>                                                                    |                                                                                                                                                                       |
| <b>Kornudbytteeffekt</b>                                                                                         |                                                                                                                                                                       |
| – Kiel: fra 6,4 til 7,0 t/ha (+600 kg)                                                                           |                                                                                                                                                                       |
| – Hohenheim: fra 11,4 til 10,7 t/ha (–700 kg)                                                                    |                                                                                                                                                                       |
| <b>Stråudbytte-effekt</b>                                                                                        |                                                                                                                                                                       |
| – Køl: +400 kg/ha                                                                                                |                                                                                                                                                                       |
| – Hohenheim: +800 kg/ha                                                                                          |                                                                                                                                                                       |
| <b>Omkostningsanalysemetode</b>                                                                                  | NH <sub>3</sub> afbødningsomkostninger = ændring i margin (DAK) pr. kg NH <sub>3</sub> undgået                                                                        |
| <b>Økonomisk resultat</b>                                                                                        |                                                                                                                                                                       |
| – <b>Forsuring øgede omkostningerne pr. hektar</b>                                                               |                                                                                                                                                                       |
| – NH <sub>3</sub> -afhjælpningsomkostningerne varierede op til <b>€1.200–2.400/ha</b> , afhængigt af lokaliteten |                                                                                                                                                                       |
| <b>Konklusion</b>                                                                                                | Forsuring <b>effektiv for reduktion af NH<sub>3</sub></b> , men <b>økonomisk ugunstig</b> , medmindre den støttes af politik eller behov for høj nitrogeneffektivitet |

### Vigtig indsigt:

Selvom forsuring effektivt reducerede NH<sub>3</sub>-udledningen og øgede halmudbyttet, **varierede rentabiliteten kraftigt** mellem lokaliteterne, hvor ét sted (Hohenheim) endda viste **lavere kornudbytte** efter forsuring.

## Eksperimentoversigt: Måling af ammoniaktab fra behandlede slurries – Tyskland (2019, udgivet 2024)

**Kilde:** Urs Schmidhalter, *J. Plant Nutr. Jordvidenskab.* (2024)

| Parameter                                                                         | Detaljer                                                                                       |
|-----------------------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <b>Eksperimentets titel</b>                                                       | <sup>15</sup> N massebalance til måling af NH <sub>3</sub> -tab fra additivbehandlede slurries |
| <b>År</b>                                                                         | 2019 (resultater offentliggjort 2024)                                                          |
| <b>Slurrytyper</b>                                                                | Biogasslurry, kvægslurry, svineslurry                                                          |
| <b>Testede tilsætningsstoffer</b>                                                 | 18 i alt, inkl.                                                                                |
| – Svovlsyre (5 niveauer)                                                          |                                                                                                |
| – Adsorbenter (f.eks. trækul, bentonit)                                           |                                                                                                |
| – Melasse ± mikroorganismer                                                       |                                                                                                |
| – Vandfortynding (1:1, 1:0,5)                                                     |                                                                                                |
| <b>pH før/efter forsuring</b>                                                     | Biogas: 7,9 → 5,6                                                                              |
| Kvæg: 7,2 → 5,2                                                                   |                                                                                                |
| Gris: 7,7 → 5,8–6,1                                                               |                                                                                                |
| <b>NH<sub>3</sub>-tab i ubehandlede kontroller</b>                                |                                                                                                |
| – Biogas: <b>54,4%</b> af NH <sub>4</sub> -N                                      |                                                                                                |
| – Kvæg: <b>33,9%</b>                                                              |                                                                                                |
| – Gris: <b>11,0%</b>                                                              |                                                                                                |
| <b>NH<sub>3</sub> Emissionsreduktion</b>                                          |                                                                                                |
| – <b>Svovlsyre (pH ~5,2–5,9):</b>                                                 |                                                                                                |
| • Biogas: –69% til ~99%                                                           |                                                                                                |
| • Kvæg: –53% til 80%                                                              |                                                                                                |
| • Gris: –48% til ~99%                                                             |                                                                                                |
| – <b>1:1 vandfortynding:</b>                                                      |                                                                                                |
| • Biogas: –39%                                                                    |                                                                                                |
| • Kvæg: –50%                                                                      |                                                                                                |
| • Gris: –58%                                                                      |                                                                                                |
| – <b>Melasse (med eller uden mikrober):</b>                                       |                                                                                                |
| • Biogas: ~40–43%                                                                 |                                                                                                |
| • Kvæg: ~44–50%                                                                   |                                                                                                |
| • Gris: 5–34%                                                                     |                                                                                                |
| – <b>Adsorbenter:</b> for det meste <b>ineffektive</b> eller let øgede emissioner |                                                                                                |
| <b>Udkastningseffekt</b>                                                          | Ikke målt – containerstudie                                                                    |
| <b>Nøglemetode</b>                                                                | Præcis <sup>15</sup> N-isotopteknik med små beholdere og kontrolleret miljø                    |

### Vigtige pointer:

- **Svovlsyreforsuring** er bekræftet som den mest **pålidelige og potente metode til at afbøde  $\text{NH}_3$**  på tværs af slurrytyper.
- **Melasse og vandfortynding** er lovende alternativer, især hvor syreforbruget er begrænset.
- **Adsorbenter var ineffektive** under disse forhold.
- $^{15}\text{N}$ -metoden tilbyder en **ny referencestandard** til evaluering af additiv  $\text{NH}_3$ -afbødning.

Denne undersøgelse bidrager med robuste kvantitative data under semi-feltforhold og understøtter prioritering af forsøringsstrategier.

## Eksperimentoversigt: Danske SyreN vinterhvedeudbytteforsøg (2010–2017)

**Kilde:** Martin Nørregaard Hansen, SEGES PlantelInnovation

| Parameter                                                                      | Detaljer                                                           |
|--------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| Dækkede år                                                                     | 2010–2017                                                          |
| Antal retssager                                                                | I alt 30 forsøg over 8 år                                          |
| Slurrytyper                                                                    | Dyreslurry (sandsynligvis gris og/eller kvæg)                      |
| Brugt syre                                                                     | Svovlsyre (SyreN-systemet)                                         |
| Gennemsnitlig syredosis                                                        | <b>2,1 L/m<sup>3</sup></b> (rækkevidde: 1,7–3,3 L/m <sup>3</sup> ) |
| Gennemsnitlig mål-pH                                                           | <b>6,1</b> (interval: 5,8–6,3)                                     |
| Udbytterespons                                                                 |                                                                    |
| – Vægtet gennemsnit over alle år: <b>+2,2 hkg/ha</b><br>(= <b>+220 kg/ha</b> ) |                                                                    |
| Årlige resultater                                                              |                                                                    |
| – 2010: +4,0 hkg/ha                                                            |                                                                    |
| – 2011: +5.0                                                                   |                                                                    |
| – 2013: +3.2                                                                   |                                                                    |
| – 2014: +0.3                                                                   |                                                                    |
| – 2015: –0.4                                                                   |                                                                    |
| – 2016: +0.7                                                                   |                                                                    |
| – 2017: +6,3 (højeste registrerede)                                            |                                                                    |

---

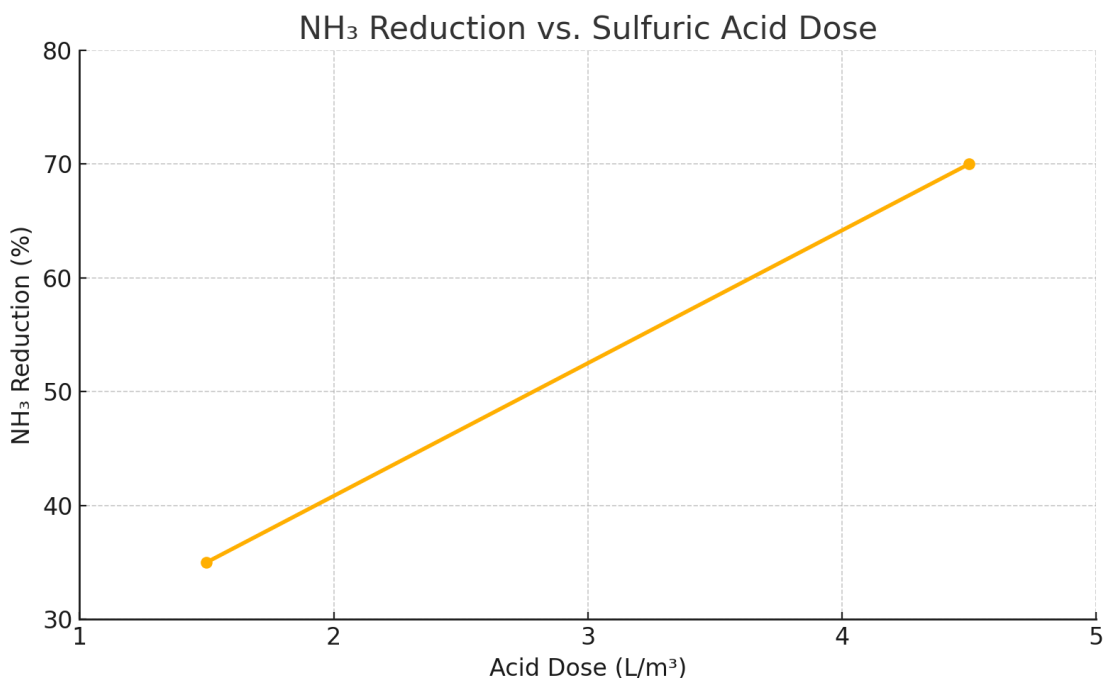
### Vigtige pointer:

- Forsuring med SyreN viser en **konsekvent, omend beskeden, positiv udbytteeffekt** i vinterhvede.
- Den **største fordel** blev set i 2017 ved **pH 5,8**, hvilket understøtter konklusionen om, at **lavere pH øger effektiviteten**.
- Disse data bekræfter det tidligere SEGES-resumé og validerer SyreN-systemets langsigtede ydeevne.

## Indhegning: Oversigt over forsøg

### Resumé af grafen: $\text{NH}_3$ -reduktion vs. svovlsyredosis

Et forenklet diagram illustrerer sammenhængen mellem svovlsyredosis ( $\text{L/m}^3$ ) og reduktion af  $\text{NH}_3$ -emissionen (%). Grafen forbinder to nøgledatapunkter: ved  $1,5 \text{ L/m}^3$  syredosis er  $\text{NH}_3$ -reduktionen cirka 35 %, mens reduktionen ved  $4,5 \text{ L/m}^3$  når op på 70 %. Denne lineære tendens bekræfter visuelt, at højere syrepåføring fører til bedre emissionskontrol. Den illustrerer også, at moderate doser (f.eks.  $\leq 2,5 \text{ L/m}^3$ ) kan give meningsfulde reduktioner (op til ~50%), mens doser over  $4,0 \text{ L/m}^3$  giver de stærkeste resultater – selvom de kan overskride sulfatgrænserne uden omhyggelig håndtering



### Resumé af grafisk analyse: $\text{NH}_3$ -reduktion vs syredosis (med pH)

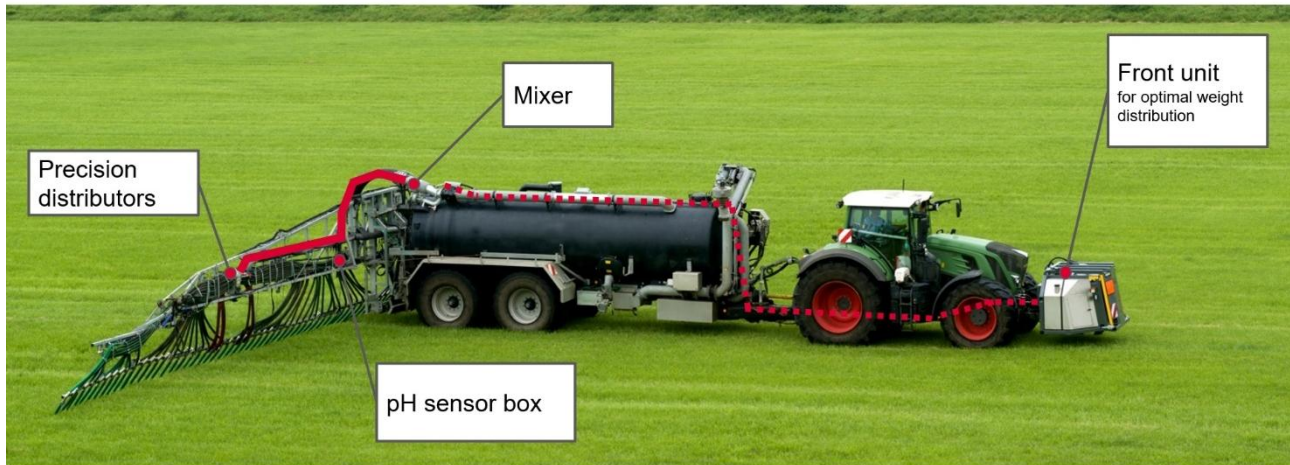
Et spredningsdiagram blev produceret ved hjælp af 60+ forsøg, der viste sammenhængen mellem syredosis ( $\text{L/m}^3$ ) og ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) reduktion, hvor mål-pH repræsenteres ved farveskygger.

#### Vigtige observationer:

- $\text{NH}_3$ -reduktionen stiger ved højere syredoser, især over  $2,5 \text{ L/m}^3$ .
- Forsøg, der opnåede et mål om  $\text{pH} \leq 6,0$ , gav konsekvent **>60% reduktion af  $\text{NH}_3$** .
- Lavere pH-værdier (mørkere prikker) samlet i **øverste højre hjørne**, hvilket bekræfter en stærk korrelation mellem **lav pH og høj  $\text{NH}_3$ -afbødning**.
- Doser i området **1,7–2,5  $\text{L/m}^3$**  resulterede typisk i **en reduktion på 30–50 % af  $\text{NH}_3$** , hvilket stemmer overens med moderate svovlforbrugsgrænser (40–50 kg  $\text{SO}_4\text{-S/ha}$ ).
- Variationen stiger ved lave doser og højere pH, sandsynligvis på grund af slurrytype, påføringsmetode og miljømæssige faktorer.

#### Konklusion fra grafen:

Forsuring er mest effektiv, når dosen er  $\geq 2,5 \text{ L/m}^3$  og mål-pH er  $\leq 6,0$ . Disse indstillinger giver høj  $\text{NH}_3$ -reduktion med acceptable svovlmængder under almindelige reguleringsgrænser. Dog kan betydelige reduktioner stadig opnås ved lavere doser, hvis de håndteres omhyggeligt.



# SyreN-systemet

## 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-missionN 2021
- Agromek prisen 2022

