



Praktijkproef biologisch aanzuren mest in een rundveestal

D.W. Bussink

J.P.M. Sanders

J. Boode

Sanovations bv

Referaat

Bussink DW, Sanders JPM & Boode J (2025). Praktijkproef biologisch aanzuren mest in een rundveeststal, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2035a.N.24, pp. 60.

Rapport in het kort

Biologisch aanzuren van mest is een potentiële techniek om de emissie van ammoniak en methaan uit de stal sterk te onderdrukken, maar wordt in de praktijk nog niet toegepast. Via een proef op een melkveebedrijf in Groningen is gedurende ruim een halfjaar biologisch aanzuren van mest getest door toevoeging van melasse aan de mestput en de inzet van deze mest voor het winnen van biogas. In dit rapport worden de praktische ervaringen met biologisch aanzuren beschreven, is indicatief vastgesteld welke emissiereducties er in de praktijk kunnen optreden en zijn er verschillende scenario's uitgewerkt wat betreft milieudoelstellingen en economie. De scenario's omvatten verschillende bedrijfsgroottes, mesthubs en wel of niet strippen na mestvergisting om zo na te gaan welke (milieu)voordelen te behalen zijn met biologisch aanzuren en wat dit bedrijfseconomisch zou kunnen betekenen.

© 2025 Wageningen, Nutriënten Management Instituut NMI B.V.

Alle rechten voorbehouden. Niets uit de inhoud mag worden verveelvoudigd, opgeslagen in een geautomatiseerd gegevensbestand, of openbaar gemaakt, op welke wijze dan ook, zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van de directie van Nutriënten Management Instituut NMI.

Rapporten van NMI dienen in eerste instantie ter informatie van de opdrachtgever. Over uitgebrachte rapporten, of delen daarvan, mag door de opdrachtgever slechts met vermelding van de naam van NMI worden gepubliceerd. Ieder ander gebruik (daaronder begrepen reclame-uitingen en integrale publicatie van uitgebrachte rapporten) is niet toegestaan zonder voorafgaande schriftelijke toestemming van NMI.

Disclaimer

Nutriënten Management Instituut NMI stelt zich niet aansprakelijk voor eventuele schadelijke gevolgen voortvloeiend uit het gebruik van door of namens NMI verstrekte onderzoeksresultaten en/of adviezen.

Verspreiding

Provincie Groningen

digitaal

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies	3
1 Inleiding	8
2 Biologisch aanzuren achtergrond: emissies, biogas en N-overschot	10
2.1 Aanzuren algemeen	10
2.2 Biologisch aanzuren	11
2.3 Routes en systemen voor biologisch aanzuren plus mestvergisting	14
3 Proefopzet en uitvoering	16
3.1 Opzet	16
3.2 Uitvoering	17
4 Resultaten en discussie	22
4.1 pH verloop in de mestput	22
4.2 Mestsamenstelling en biogasproductie	23
4.3 Gasconcentraties in de mestput	27
4.4 Stalvloer spoelen met dunne fractie	29
4.5 Incubatieproef	30
5 Verwacht economisch en milieu rendement aanzuren	34
5.1 Algemene uitgangspunten scenario's	34
5.2 Scenario's aanzuren en vergisting op boerderijschaal	35
5.3 Scenario's met samenwerkingsverbanden voor vergisting	37
5.4 Scenario's mestvergister met coproducten	39
5.5 Kostendekkendheid algemeen	39
6 Discussie, conclusies en aanbevelingen	41
6.1 Biologisch aanzuren in de praktijk	41
6.2 Ammoniak- en methaanemissie	41
6.3 Geuremissies, overige gassen en risico betonaantasting	42
6.4 Onzekerheid economisch rendement en stikstofoverschot	44
6.5 Borging en andere regelgeving	45
6.6 Conclusies	46
6.7 Aanbevelingen	47
Dankwoord:	48
7 Referenties	49
Bijlage 1: Vooronderzoek	51
Bijlage 2: Gegevens emissiemetingen	53
Bijlage 3: Data incubatieproef	56
Bijlage 4: Achtergrond informatie scenarioberekeningen H5	57

Samenvatting en conclusies

De veehouderij heeft veel uitdagingen. Zo moet de melkveehouderij de uitstoot van ammoniak (NH_3) en broeikasgassen (o.a. methaan) sterk verminderen. Ruim de helft van de NH_3 -emissie in de melkveehouderij is afkomstig is uit de rundveestal. Stalaanpassingen om deze te verlagen zijn vaak duur en vergunningen zijn steeds moeilijker te verkrijgen. Daarnaast zijn vaak aanvullende maatregelen nodig om de uitstoot van methaan (CH_4) te beperken. Biologisch aanzuren van de mestopslag onder de stalvloer (in de huidige praktijk veelal een roostervloer) is een techniek die daar verandering in kan brengen, maar wordt tot nu toe nog nauwelijks toegepast.

Bij biologisch aanzuren van mest worden energierijke (rest)producten zoals bijvoorbeeld melasse, toegevoegd aan de mestopslag. De suikers in deze producten worden door melkzuurbacteriën via fermentatie omgezet in melkzuur (vergelijkbaar met inkuilen van gras en maïs of het maken van zuurkool). De productie van melkzuur zorgt voor een pH-daling van de mest waardoor de NH_3 -emissie sterk daalt en de CH_4 -uitstoot stopt. Op basis van deskstudies zijn op bedrijfsniveau NH_3 -emissiereducties van meer dan 50% mogelijk. De CH_4 -uitstoot kan op bedrijfsniveau met 20-25% dalen. Door deze biologisch aangezuurde mest (Amest) te vergisten worden inkomsten gegenereerd. Biologisch aanzuren is zo mogelijk tegen lage kosten of kostenneutraal uitvoerbaar is, temeer daar Amest een hoog biogaspotentieel heeft omdat het “uurverse” mest betreft die verrijkt is met een energierijk product. Een sterke stijging van de biogas- of groengasproductie is maatschappelijk zeer gewenst ter vervanging van aardgas. Door ook stikstof te strippen (het verwijderen van minerale stikstof uit de mest) tijdens de vergisting kunnen vloeibare N-meststoffen worden gemaakt. Deze komen qua samenstelling in aanmerking voor de Renure-status. Na erkenning van de Renure-status leveren deze N-meststoffen een bijdrage aan de verkleining van het stikstofoverschot op melkveebedrijven.

De provincie Groningen, heeft de ambitie om milieudoelstellingen op het gebied van NH_3 en CH_4 te realiseren en meer groene energie te produceren. Zij heeft NMI en Sanovations gevraagd om een praktijkpilot uit te voeren op het melkveebedrijf Pimmelaar met als doelstellingen om aan te tonen dat:

- biologisch aanzuren technisch uitvoerbaar is op praktijkschaal;
- met deze techniek de NH_3 -en CH_4 -emissies sterk verminderen;
- het biogas(groengas)potentieel van de mest sterk toeneemt; en
- het bedrijfseconomisch een interessante optie is om aan milieudoelstellingen te voldoen.

Naast toepassing van biologisch aanzuren en metingen in de stal zijn aanvullende experimenten in het lab uitgevoerd met de mest van het praktijkbedrijf. Deze gegevens zijn samen met data uit literatuur gebruikt om in een scenariostudie de mogelijkheden en de milieutechnische en economische gevolgen te verkennen van diverse implementatieroutes in de praktijk van biologisch aanzuren in combinatie met mestvergisting, variërend van klein- tot grootschalig en van op bedrijfsniveau of via mesthubs al dan niet in combinatie met stikstofstrippen. De resultaten vormen de basis voor een vervolgaanpak om biologisch aanzuren uiteindelijk in de praktijk breed te kunnen uitrollen.

Praktijkervaring aanzuren in de stal

De praktijkpilot is uitgevoerd vanaf eind augustus 2024 tot in voorjaar 2025 in een ligboxenstal met 240 melkkoeien. De aanzuring van de mestput vond plaats in een staldeel met 60 melkkoeien. De mestopslagcapaciteit onder de roostervloer bedroeg 1500 m^3 in de vorm van twee mestkanalen die met elkaar verbonden waren. Mest kon per kanaal worden gemixt met elektrische staafmixers, één per mestkanaal. De aanzuring vond plaats door toediening van een product nabij de mixer. Gestart is met eenmalige toevoeging van 5 m^3 mierenzuur (30%) om de pH van de startvoorraad mest van 600 m^3 snel te verlagen. Vervolgens is melasse gedoseerd vanuit kuubscontainers (IBC's) om het biologische verzuringsproces op gang te brengen. De pH werd handmatig gemeten per mestkanaal op 6 punten over

de gehele mestlaag. Dit werd de eerste maanden twee tot drie keer per week gedaan en na drie maanden wekelijks. Melasse toediening vond ongeveer met dezelfde frequentie plaats om de pH tussen 5 en 5,5 te houden.

Begin november is ongeveer 350 m³ gescheiden in een dikke en dunne fractie voor aanvullende proeven (separate vergisting van dikke en dunne fractie en vloerspoeling). In het najaar zijn in de stal puntmetingen uitgevoerd om indicatief de emissiereductie te meten met en zonder vloerspoeling met aangezuurde dunne fractie en zijn metingen gedaan onder de roostervloer bij aangezuurde en onbehandelde mest. Aanvullend zijn in het lab incubatieproeven uitgevoerd om de emissie van ammoniak- en broeikasgassen uit de in de stal aangezuurde mest en onbehandelde mest langere tijd te volgen. Gedurende de looptijd van het project zijn regelmatig mestmonsters genomen voor het vaststellen van de chemische samenstelling en het biogaspotentieel. Daarnaast is in een aanpalend project de biogasproductie gemeten met een pilotvergister van 2,5 m³ inhoud.

Resultaten biogas en emissies

Met de initiële zuurtoevoeging daalde de pH tot ongeveer 6,7. Na ruim 1 week werd de streef pH tussen 5 en 5,5 bereikt door het toevoegen van melasse. Deze pH kon gedurende de looptijd gehandhaafd worden door het regelmatig blijven toevoegen van melasse. De hoeveelheid melasse benodigd om per kuub mest de pH te handhaven daalde gedurende de looptijd van ruim 7 volume procent gedurende de eerste vier maanden tot krap 5 volume procent over de periode januari tot april. De daling van de benodigde inzet van melasse is waarschijnlijk voor een groot deel toe te schrijven aan de stijging van het aandeel dagverse mest. Het gebruik van kalk in de boxen en het vrij hoge eiwitgehalte van het rantsoen zijn factoren die de benodigde hoeveelheid melasse per kuub nadelig hebben beïnvloed (de zuurbufferende werking van mest neemt toe bij gebruik van kalk en een hoger eiwitgehalte in het rantsoen, waardoor meer melasse nodig was). Mest die is aangezuurd tot een pH lager dan 5,5 bleef langer dan een half jaar op dit niveau, zo bleek uit een incubatie van 1 m³ aangezuurde mest in een IBC.

Kort na aanzuren was er een afwijkende geur van aangezuurde mest. Na enkele weken werd er geen verschil meer waargenomen door de boer en ervaren erfbetreders op het bedrijf. Er zijn geen verhoogde H₂S-waarden gemeten met een H₂S-sensor. In de mestanalyses die zijn uitgevoerd week het H₂S-gehalte van aangezuurde mest niet af van die van onbehandelde mest (Dit stemt overeen met eerder onderzoek.). Kort na het toedienen van melasse trad schuimvorming op tot aan de roosters. Na toevoeging van een schuimbreker was dit probleem verholpen.

Het biogaspotentieel van één kuub aangezuurde mest is ongeveer 50-55 m³ biogas en daarmee een stuk hoger dan de ongeveer 20 m³ van onbehandelde mest. Opgemerkt moet worden dat er een verschil is tussen laboratoria, waarbij één lab structureel te lage waarden gaf vergeleken met proeven met een pilotvergister (2,5 m³). De proeven met de pilotvergister lieten ook zien dat de verblijftijd van dunne fractie en van aangezuurde mest sterk kon worden beperkt tot ongeveer 12 dagen, terwijl de normale verblijftijd in de vergister ongeveer 40 dagen is. Dit betekent dat voor aangezuurde mest kan worden volstaan met een kleinere vergister ofwel dat de capaciteit van een vergister met een factor 2-3 toeneemt.

Puntmetingen met een fluxkamertechniek toonden aan dat het spoelen van de vloer met dunne fractie de emissie van NH₃ met 90% kan reduceren ten opzichte van een onbehandelde vloer. Direct na spoelen de vloer schoon schrapen leidde tot een reductie van rond de 55%. Spoelen met water gaf een reductie van rond de 75%. Deze resultaten zijn indicatief maar geven wel aan dat spoelen met de dunne fractie verkregen na mestscheiding van aangezuurde mest een groot potentieel heeft om de emissies van de stalvloer sterk te reduceren. De concentratiemetingen met een gassensor onder de roosters lieten zien dat de concentraties van NH₃ en CH₄ lager waren dan bij onbehandelde mest. Het betrof momentopnames. Voor een duidelijker beeld en vaststelling van het emissiereductie potentieel zijn metingen gedurende langere tijd nodig van de gehele stal.

De incubatieproeven in het lab (10 weken) lieten een cumulatieve emissiereductie zien van meer dan 90% voor zowel NH_3 als CH_4 met aangezuurde (pH =5,1) mest vergeleken met onbehandelde mest van het praktijkbedrijf.

Bredere praktische mogelijkheden biologisch aanzuren en mestvergisting

Biologisch aanzuren kan met koolhydraatrijke (rest)producten als melasse, siroop, maisweekwater, lactosepermeaat en mogelijk met gewassen als mais, sorghum of Silphie, maar dat vergt nog aanvullend onderzoek. De hoeveelheid product die nodig is hangt af van de samenstelling (koolhydraat inhoud) en de mestsamenstelling. Verse mest heeft over het algemeen een lagere buffercapaciteit dan oude mest waardoor minder zuur nodig is voor dezelfde pH-daling. De verzuring van mest door melkzuurbacteriën komt sneller op gang door mest eerst aan te zuren met een organisch zuur tot pH 6-6,5 en daarna te starten met het toedienen van het restproduct, maar dit is niet strikt noodzakelijk. Een goede menging van de mest is belangrijk. Dit vergt mestopslagen zonder dode hoeken.

Het vergisten van aangezuurde mest kan via verschillende routes zoals:

1. Aanzuren mest in de put waarna de:
 - 1.1. mest naar een externe vergister gaat
 - 1.2. mest op het bedrijf zelf wordt vergist
2. Aanzuren mest in de put gevolgd door mestscheiding en vloerspoeiing met de verkregen dunne fractie waarna de:
 - 2.1 dunne fractie op het bedrijf zelf wordt vergist (optioneel kan ook nog fosfaat worden afgescheiden (route 3) en
 - 2.2 de dikke fractie naar een externe vergister gaat.

Route 1 zal een lagere NH_3 -emissiereductie (alleen reductie uit de mestopslag) opleveren dan route 2, maar is het eenvoudigst te implementeren. Door de mest naar een externe vergister (route 1.1) te brengen hoeft men niet zelf te investeren in een vergistingsinstallatie. Indien in een grote vergister de mest gestript wordt ontstaan er een vloeibare ammoniummeststof en ammoniumarm digestaat. Indien de laatste weer terugkomt op het eigen bedrijf betekent dat voor het bedrijf een lager N-overschot én een beperkt risico op NH_3 -emissie bij digestaatopslag tijdens het winterseizoen en bij het toedienen.

Vergisting op het eigen bedrijf (route 1.2) kan ook interessant zijn vanwege de productie van biogas of groengas. Omdat bij biologisch aanzuren meer gas (naar verwachting $> 20 \text{ m}^3/\text{m}^3$) wordt geproduceerd dan bij mono-mestvergisting kan vergisting op het eigen bedrijf al bij een kleinere veestapel aantrekkelijk worden in vergelijking tot mono-mestvergisting. Bij optie 1.2 ontstaat digestaat met een hoge pH wat ammoniumrijker is geworden. Vervolgstappen zijn nodig om een hogere NH_3 -emissie bij toedienen te voorkomen. Dit kan door het digestaat direct te strippen om zo ammonium te verwijderen en af te vangen als ammoniumsulfaat (een Renure-meststof, mits het wordt erkend en voldoet aan de voorwaarden). Tegelijk kan zo het N-overschot op het bedrijf afnemen.

Bij route 2.1 ontstaat eveneens een ammoniumrijk digestaat. Daardoor zijn net als bij 1.2 vervolgstappen nodig om geen hogere emissie te krijgen bij het toedienen. Bij route 2.2 wordt alleen de dikke fractie extern vergist. In die variant ontstaat een digestaat met veel minder ammonium en weinig fosfaat (die zit opgelost in de dunne fractie door de lage pH), die relatief rijk is aan organische stof. Bij route 2 neemt het N-overschot op het bedrijf af omdat digestaat uit de dikke fractie zijn weg zal vinden naar de akkerbouw. Indien bij route 2.1 ook strippen plaatsvindt dan kan het N-overschot nog verder afnemen. Route 3 kan een optie zijn als er een nog een fosfaatoverschot is na afvoer van dikke fractie (10-20% van de P-productie met drijfmest).

Indien mestvergisting op korte termijn niet mogelijk is (bijvoorbeeld vanwege onvoldoende vergistercapaciteit), is toediening van aangezuurde mest direct in het veld een optie. Dit geeft een sterke reductie van de NH_3 -emissie maar is een vrij dure oplossing afhankelijk van de gebruikte reststroom.

Milieurendement en de economie van biologisch aanzuren voor verschillende scenario's

In een scenariostudie zijn 15 verschillende varianten van biologisch aanzuren in combinatie met mestvergisting en al dan niet stikstofstrippen geanalyseerd. Uitgangspunten waren i) de gebruiksnorm voor stikstof uit dierlijke mest wordt teruggebracht van 240 naar 170 kg N per ha (vanwege het verdwijnen van de derogatie), ii) de mestopslag wordt aangezuurd met melasse en iii) vloerspoeling plaatsvindt met (zure) dunne fractie na mechanische mestscheiding op het bedrijf en iv) het product van ammoniakstrippers krijgt de Renure-status en is daarmee geen dierlijke mest meer.

De analyse laat zien dat bij de boerderijvergisters (150-300 melkkoeien) het vergisten van aangezuurde mest voordeliger lijkt dan mono-mestvergisting. Dit wordt vooral veroorzaakt door een hogere gasopbrengst en snellere vergisting. Deze kleinere boerderijvergisters met dagverse mest zijn economisch lastig rendabel te krijgen met de huidige SDE-tarieven. Hoewel nog steeds niet kostendekkend, kan biologisch aanzuren dit perspectief wel verbeteren. Tegelijk kan op bedrijfsniveau 45-50% reductie van de NH_3 -emissie worden bereikt zonder stikstofstrippen van het digestaat.

Het milieukundig en economisch rendement neemt toe door samenwerkingsverbanden (Mesthubs) aan te gaan. Een grotere schaal (minimaal de mest van 900-1200 melkkoeien) maakt investeringen in ammoniakstrippers en groengasopwerking aantrekkelijker, wat resulteert in verdere emissiereductie en verkleining van het stikstofoverschot en (potentiële) inkomsten uit Renure-meststoffen). Op deze schaal is een licht positieve marge van enkele euro's per kuub mest mogelijk. Bij nog grotere mesthubs 100.000 tot 300.000 m^3 (10.000 koeien) neemt het rendement met biologisch aanzuren, vergisten en strippen sterk toe en daalt de terugverdientijd naar minder dan 4 jaar. Voor de situaties van mesthubs in combinatie met een efficiënte stripper kan op bedrijfsniveau de emissie van ammoniak met ruim 70% dalen. De scenario's kennen wel een grote onzekerheid door de prijsontwikkeling van groengas, de prijs van koolhydraatrijk (rest)product, het poorttarief voor mest dat naar een vergister gaat en andere factoren. Op 25 april 2025 is door het Kabinet besloten per 1 januari 2027 de Bijmengverplichting (van groengas in aardgas) in te voeren. Door schaarste van groengasproductie zal daardoor de marktprijs van groengas waarschijnlijk stijgen, mogelijk wel tot rond de 2€/m³. Daarmee wordt een groter aantal van de beschreven varianten economisch haalbaar.

Conclusies

- Biologisch aanzuren is op praktijkschaal technisch goed uitvoerbaar en kan de ammoniak- en methaanemissie sterk reduceren en het biogaspotentieel van mest meer dan verdubbelen.
 - Naast reductie van de ammoniakemissie uit de mestopslag kan het spoelen van de vloer met dunne fractie (verkregen na mestscheiding van aangezuurde mest) de totale stalemissie sterk doen dalen. Stalmetingen zijn nodig om de overall emissiereductie vast te stellen.
 - De biogasproductie kan door aanzuren meer dan verdubbelen ten opzichte van reguliere mest en bedroeg in deze pilot ongeveer 50 m³ per kuub mest. Bovendien verkort aangezuurde mest de verblijftijd in een vergister met een factor 2-3 wat het rendement van de vergister vergroot.
- Scenarioberekeningen laten zien dat mestvergisting van aangezuurde mest op mesthubniveau (vanaf 900-1200 melkkoeien) in combinatie met stikstofstrippen de meeste voordelen biedt voor emissiereductie, stikstofbenutting en energieproductie van groengas. Vanaf de schaal van mono-mesthubniveau met mest van 10.000 koeien is een positieve marge te verwachten en kan potentieel meer dan 70% NH_3 -emissiereductie worden bereikt. Voor co-vergisters wordt een gunstig businessmodel al veel eerder bereikt. Na invoeren van de 'Bijmengverplichting' zal de groengas prijs gaan stijgen waardoor de rendabiliteit verbetert en ook kleinschaligere mesthub initiatieven perspectief hebben.

Aanbevelingen

- Zet vol in op het biologisch aanzuren van mest in combinatie met mestvergisting en stikstofstrippen (vanaf 600 koeien) als techniek voor het verminderen van emissies van ammoniak en methaan en het verhogen van de productie van groengas en het verkleinen van het dierlijke N-overschot. Vanwege de relatief lage investeringskosten om het aanzuursysteem te implementeren, is dit een No Regret oplossing.
- Om biologisch aanzuren rendabel te maken en te kunnen uitrollen is een plan van aanpak op gebiedsniveau met voorbeeld pilots gewenst en focus daarbij voor de vergisting van mest op mesthubs vanaf 600 melkkoeien en meer.
- Zet in op het ontwikkelen/aanpassen van vloerspoelsystemen die geschikt zijn voor het toepassen van dunne fractie die verkregen wordt na het scheiden van aangezuurde mest om zo de ammoniakemissie van de stalvloer sterk te verlagen.
- Verken de mogelijkheden van aanzuren van mest in mestopslag en het vervolgens toedienen van deze aangezuurde mest(fracties) als (tijdelijk) maatregel om de ammoniakemissie op bedrijfsniveau te verlagen.
- Verken de mogelijkheden om de benutting van alle nutriënten in vergiste, aangezuurde mest en de verkregen Renure meststof, digestaat en eventueel gescheiden mestfracties te optimaliseren in het bemestingsplan.
- Ontwikkel een pH gestuurd doseer- en controlesysteem voor het toedienen van koolhydraat (rest)product aan de mest en online monitoring van de mest pH.
- Verricht stalmetingen emissiemetingen voor ammoniak en methaan overeenkomstig bestaande protocollen om zo een emissiereductiefactor voor beide vast te stellen.
- Creëer een handreiking voor de borging van niet-erkende maatregelen zoals biologisch aanzuren.
- Streef naar aanpassing van de regelgeving voor groengas en toegestane toevoegmiddelen.

1 Inleiding

De melkveehouderij moet de uitstoot van ammoniak- en broeikasgassen sterk verminderen. De melkveehouderij is verantwoordelijk voor meer dan 50% van emissie van ammoniak (NH_3) uit de veehouderij. Van deze emissie is 54% afkomstig uit de stal en is 43% afkomstig van de mesttoediening (Van Bruggen et al., 2024).

Gewenst is om vooral relatief eenvoudige en betaalbare technische oplossingen te ontwikkelen die snel zijn te implementeren in de praktijk om de emissie van ammoniak (NH_3) uit de melkveehouderij omlaag te brengen. Biologisch aanzuren is zo'n techniek die in principe in de huidige stallen (overwegend ligboxstallen met roostervloer) toegepast kan worden. Deze techniek speelt in op het feit dat het evenwicht tussen ammonium in mest en het gasvormige ammoniak is te sturen door het verlagen van de pH van de mest. Bij biologisch aanzuren van mest worden energierijke (rest)producten (zoals melasse, siroop, bieten, mais etc.) toegevoegd aan de mestput. De suikers (zetmeel) in deze producten worden door melkzuurbacteriën via fermentatie omgezet in melkzuur (dit is een vergelijkbaar proces als bij het inkuilen van gras en mais of bij het maken van zuurkool optreedt). De productie van melkzuur zorgt voor een pH-daling van de mest en daarmee tot een *sterke daling van de NH_3 -emissie*. Tegelijk zorgt het ook voor een *stopzetting van de uitstoot van het broeikasgas methaan (CH_4)* uit de mestput. Op bedrijfsniveau zijn NH_3 -emissiereducties van meer dan 50% mogelijk afhankelijk van het bedrijfssysteem (Bussink et al., 2012, 2014; Puente et al., 2022). De uitstoot van CH_4 kan op bedrijfsniveau met 20-25% afnemen en volgens recente informatie nog veel sterker omdat de emissie van CH_4 volgens (Ward et al., 2024) sterk wordt onderschat.

Hoewel biologisch aanzuren effectief is en de techniek bekend is, wordt het tot nu toe nauwelijks toegepast vanwege de hoge kosten voor de toevoeging van energierijk substraat. Dat wordt anders zodra de biologisch aangezuurde mest (Amest) wordt vergist. Amest heeft een *hoog groengas potentieel* omdat het "uurverse" mest betreft die verrijkt is met energierijke producten. De Nederlandse overheid wil de productie van groengas sterk verhogen. Door de Minister van EKZ is in 2023 de doelstelling voor de productie van groengas in 2030 verhoogd tot 2 bcm (miljard m^3) ten opzichte van ~0,2 bcm in 2022 met een bijmengverplichting van 1,1 bcm groengas. Heel recent heeft het kabinet besloten (25 april 2025) om een daadwerkelijk een bijmengverplichting voor groengas in te voeren per 1-1-2027 en daarbij de doelstelling voor groengas te verlagen tot 0,8 bcm per 2030. Eerste berekeningen geven aan dat door de huidige prijzen voor groengas, biologisch aanzuren tegen lage kosten tot bijna kosten neutraal kan worden uitgevoerd. In twee recente papers is het perspectief aangeven van biologisch aanzuren (Van Noord et al., 2022) en welke varianten van aanzuren en groengasproductie mogelijk zijn (Bussink & van Rotterdam; 2023). Daarbovenop kan mestvergisting gecombineerd worden met een stikstofstripper. Dat biedt de mogelijkheid om een RENURE meststof te maken om zo het stikstofoverschot op bedrijven te verkleinen en tegelijkertijd de NH_3 -emissie bij het uitrijden nog verder terug te dringen.

Biologisch aanzuren zou in potentie ammoniak- en broeikasgasemissies uit mest sterk kunnen reduceren en tegelijk kunnen bijdragen aan de ambitie voor de productie van veel meer groengas waardoor dit proces mogelijk ook kostenneutraal zou kunnen worden uitgevoerd.

Actuele pilots om het biologisch aanzuren te demonstreren en breder toepasbaar te maken in de praktijk ontbreken vrijwel. Recentelijk heeft de HAS Den Bosch (Meiresonne et al., 2024) een proef uitgevoerd met biologisch aanzuren op een praktijkbedrijf. De eerste ervaringen zijn positief. Tegelijk zijn meerdere pilots nodig om praktijkervaring op te doen en het breder toepasbaar te maken voor diverse situaties.

De provincie Groningen heeft de ambitie om milieudoelstellingen op het gebied van NH_3 en CH_4 te realiseren maar ook om meer eigen (groene) energie te produceren in de landbouw. De provincie zoekt naar mogelijkheden om agrariërs daarbij te faciliteren en zo tegelijk ook andere problemen aan te pakken zoals lekkende mestkelders (deels een gevolg van aardbevingsschade). De provincie heeft NMI en Sanovations verzocht een praktijkpilot uit te voeren in 2024 op het melkveebedrijf Pimmelaar gedurende meerdere maanden. De pilot is vooral gericht op ervaring opdoen met biologisch aanzuren op praktijkschaal. Het zal zich richten op zowel de technische aspecten van biologisch aanzuren als het verkennen van de te verwachten emissiereducties van ammoniak en methaan en het bedrijfseconomisch perspectief. De resultaten vormen de basis voor een grootschaliger aanpak in een vervolgfase waarvoor een projectplan zal worden opgesteld.

Doelstelling

Aantonen dat biologisch aanzuren technisch uitvoerbaar is op praktijkschaal in de melkveehouderij en:

- dat met deze techniek de ammoniak- en methaanemissie sterk kan worden verminderd;
- het biogas(groengas)potentieel van de mest sterk toeneemt; en
- dat het bedrijfseconomisch een interessante optie kan zijn om aan milieudoelstellingen te voldoen.

Aanvullend wordt mede op basis van de resultaten van de proef op praktijkschaal en andere beschikbare informatie omtrent biologisch aanzuren een opzet gemaakt wel aanvullend (praktijk)onderzoek nodig is voor biologisch aanzuren voor verschillende stalconcepten.

Leeswijzer

In hoofdstuk 2 wordt nader ingegaan op het concept van biologisch aanzuren ter vermindering van emissies en de productie van groengas en welke oplossingsrichting dit nog meer kan bieden met betrekking tot het verkleinen van het stikstofoverschot

In de hoofdstukken 3 en 4 wordt de opzet en de resultaten van de praktijkproef op het bedrijf Pimmelaar beschreven.

In hoofdstuk 5 wordt een scenario analyse uitgevoerd naar verschillende bedrijfsconcepten/schaalgroottes van biologisch aanzuren inclusief een indicatie van het bedrijfseconomisch perspectief.

In hoofdstuk 6 vindt de algehele discussie plaats en worden aanbevelingen voor een vervolg om biologisch aanzuren te kunnen opschalen en uit te rollen in de praktijk.

2 Biologisch aanzuren achtergrond: emissies, biogas en N-overschot

In dit hoofdstuk wordt nader ingegaan op het biologisch aanzuren. Wat is er bekend over dit proces, wat is er bekend over emissies, de benodigde hoeveelheden substraat, hoe kun je het proces op praktijkschaal zo goed mogelijk inrichten en de randvoorwaarden voor de praktijkpilot.

2.1 Aanzuren algemeen

Aanzuren van mest is een route om de ammoniakemissie sterk te verlagen zowel uit de mestopslag als bij het toedienen van de aangezuurde mest, Bussink et al., 1994; van Lent et al., 1995). Daarnaast leidt aanzuren tot een pH 6 of lager tot het tot stilstand brengen van de methaanemissie uit de mestopslag (Oenema en Velthof, 1993; Ottoson 2009).

Aanzuren kan door het toedienen aan de mestopslag van:

- sterke minerale zuren (zwavelzuur, salpeterzuur)
- organische zuren (azijnzuur, melkzuur, citroenzuur etc) of
- gemakkelijk afbreekbaar energierijk organisch materiaal (bijvoorbeeld melasse, siroop) wat door melkzuurbacteriën wordt omgezet (fermentatie) in melkzuur (vergelijkbaar met het maken van zuurkool of het inkuilen van gras/mais)

Internationaal is er veel onderzoek naar gedaan, vooral naar aanzuren met zwavelzuur. In Denemarken, Duitsland en Verenigd Koninkrijk wordt het systeem van aanzuren toegepast bij toedienen van mest en direct in de stal. Een bezwaar van aanzuren met zwavelzuur voor de Nederlandse situatie is dat het leidt tot overbemesting met zwavel. Bovendien is de handling van sterke geconcentreerde zuren gevaarlijk en kunnen er door de corrosieve eigenschappen problemen ontstaan met betrekking tot het gebruik ervan, hetgeen kostbare investeringen vereist. Het toedienen van salpeterzuur is 35 jaar geleden onderzocht. Ook dit zuur vergt aandacht bij de handling en er is een groot risico op denitrificatie waarbij ook lachgasemissie optreedt. Begin jaren 90 is de ontwikkeling dit procedé niet doorgezet.

Het toedienen van organische zuren kan ook (Hendriks en Vrielink, 1996, Berg et al., 2006, Bussink et al., 2014, Fuchs et al., 2021), echter deze zuren zijn veel duurder dan zwavelzuur. De zuursterkte is beperkter dan van zwavelzuur waardoor ook relatief veel zuur nodig is. Ook bij geconcentreerde organische zuren is aandacht nodig voor de handling en opslag.

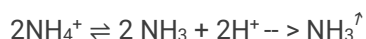
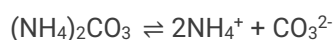
Biologisch aanzuren van mest is al ruim 30 jaar bekend (Lameijer en Vervoort, 1995; Hendriks en Vrielink, 1996; Clemens en Wulf, 2005). En ook meer recent zijn er diverse onderzoeken uitgevoerd (vooral op labschaal) naar biologisch aanzuren (Bussink & van Rotterdam 2011; Bussink et al., 2014; Prado et al., 2020; Kavanagh et al. 2021; Fuchs et al., 2021; Overmeyer et al., 2021, Gioelli et al. 2022, Regueiro, 2022). Een belangrijk voordeel van biologisch aanzuren is dat het betrekkelijk gemakkelijk is in te bouwen in bestaande stallen in de melkveehouderij (veelal een ligboxenstal met een roostervloer en mestopslag onder de roosters) of varkenshouderij (Hendriks & Vrielink, 1996). Het vergt alleen een doseerunit voor het toevoegen van substraat, een mestmixer om het substraat goed door de mest te mengen) en een pH meting om te kunnen sturen op de gewenste pH. Dit procedé heeft echter geen opgang gemaakt omdat de kosten van de eventueel te gebruiken toevoegmiddelen (maissilage,

graanproducten, melasse, vinasse, siroop, etc.) het een duur procedé maakten (Hendriks & Vrielink, 1996; Bussink et al., 2014) en er destijds geen verdienmodel was voor vergisting van deze energierijke mest met een hoog biogaspotentieel. Daar is nu verandering in gekomen met de sterk toegenomen interesse voor meer groengas. Vergisting van met zwavelzuur aangezuurde mest is problematisch vanwege het hoge zwavelgehalte.

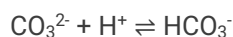
2.2 Biologisch aanzuren

2.2.1 De benodigde hoeveelheid koolhydraten bij biologisch aanzuren

Ammoniakemissie vindt plaats na een aantal reacties in mest. Eerst vindt een snelle omzetting van vooral ureum naar ammoniumcarbonaat ((NH₄)₂CO₃) plaats. Dit dissocieert vrij gemakkelijk waarbij ammonium en (bi)carbonaat in oplossing komen. Het ammonium (NH₄⁺) en het carbonaation (CO₃²⁻) in mest vormen een aantal chemisch evenwichten:



Vergelijking 1



Vergelijking 2



Vergelijking 3

Of er veel of weinig NH₃ kan emitteren uit mest wordt bepaald door de pH. In runderdrijfmest is de pH van nature relatief hoog (tussen 7 en 8). Door aanzuren worden H⁺ ionen aan het systeem toegevoegd en zal de reactie (vergelijking 1) naar links verschuiven, waardoor de ammoniakdampdruk afneemt en dus de emissie van NH₃. Tegelijk zorgt het aanzuren ervoor dat het carbonaat evenwicht naar rechts verschuift wat er toe leidt dat koolstofdioxide emitteert. De pH van de mest gaat pas sterk dalen nadat er zoveel zuur is toegevoegd of gevormd dat vrijwel al het carbonaat is ontsnapt uit de mest in de vorm van CO₂. Bij een pH van lager dan 5,5 is bijna al het carbonaat in mest geëmitteerd als CO₂ gas en is vrijwel alle NH₃ omgezet in het goed oplosbare NH₄⁺. Verlaging van de mest pH van 7,5 naar 5,5 betekent dat de dampdruk/concentratie van NH₃ boven het mestoppervlak met ongeveer een factor 100 daalt.

Hoeveel zuur(vormend potentieel) nodig is om de pH van mest te laten dalen naar 5,5 of lager wordt sterk bepaald door het minerale stikstofgehalte van de mest en de ouderdom van de mest. Volgens Bussink et al., 2014 & Pizzul et al. (2018) is per kg NH₄-N gemiddeld ongeveer 2,3 liter zwavelzuur nodig om pH 5,5 te bereiken, zij vinden echter ook een vrij grote variatie. In oude mest zit relatief veel ammoniumcarbonaat mede door vrijkomen uit organische stof in de mest dat langzaam wordt afgebroken. Daarnaast bevat oude mest ook veel vluchtige vetzuren. Dat betekent dat bij oude mest meer zuur nodig is om de pH te laten dalen dan bij verse mest; in een proef van Lameijer en Vervoort (1995) zelfs bijna dubbel zoveel. Bij biologisch aanzuren wordt het zuur gevormd door fermentatie van energie(rijke) producten die aan de mest zijn toegevoegd waarbij vooral melkzuur ontstaat. Voor een minimaal gebruik van deze producten kan dus het beste met zo vers mogelijke mest worden begonnen met aanzuren. Bijkomend voordeel is dat de mest door de verzuring “uurvers” blijft en zo een hoog methaanpotentieel bij vergisting.

2.2.2 Fermentatie door melkzuurbacteriën en de omgevingscondities

Afhankelijk van de bacteriën die in een product (mest, graskuil etc) aanwezig zijn, kunnen er drie soorten van melkzuurfermentatie plaatsvinden: homofermentatief, waarbij alleen melkzuur wordt geproduceerd, heterofermentief waarbij naast melkzuur ook azijnzuur, citroenzuur en ethanol ontstaat (Hakim et al., 2023) en facultatief heterofermentatief. De laatste groep schakelt tussen homo- en heterofermentatie,

afhankelijk van de omgevingsomstandigheden en de beschikbaarheid van het substraat. Bij homolactische fermentatie wordt dus meer melkzuur gevormd. Dit proces is te sturen.

De omgevingscondities voor fermentatie in mest moeten gunstig zijn. Er moet een gemakkelijk afbreekbaar C-bron aanwezig zijn en natuurlijk melkzuurbacteriën. Mest bevat van zichzelf maar weinig direct fermenteerbaar materiaal dus deze C-bron moet worden toegevoegd in de vorm van suiker- of zetmeelhoudende producten, zoals melasse, wei, bieten maissilage etc.. Met betrekking tot de aanwezigheid van voldoende melkzuurbacteriën gingen Lameijer en Vervoort (1995) er vanuit dat inoculeren van mest met *Lactobacillus plantarum* (facultatief heterofermentatief) nodig was. Vrielink en Hendriks (1995) hebben voor de start van hun onderzoek met varkens ook enting van de mest met (*Lactobacillus plantarum*) toegepast. *Lactobacillus plantarum* is commercieel te verkrijgen omdat deze species ook wordt ingezet bij het inkuilen van gras. In andere onderzoeken is geen enting toegepast (Bussink et al., 2014; Regueiro et al., 2022). De fermentatie komt ook daar vrij snel op gang wat ook verwacht mag worden, immers in mest zijn volop melkzuurbacteriën aanwezig bijvoorbeeld doordat kuilresten (geënsileerd voer) in de mestput terecht komen. In één experiment van Bussink et al. (2014) werd wel enting toegepast, maar kon geen additioneel positief effect worden aangetoond.

Belangrijker dan het enten van mest met melkzuurbacteriën lijkt de pH van mest te zijn. Door mest eerst eenmalig aan te zuren tot pH 6,5 of zelfs tot 6,0 worden gunstigere omgevingscondities gecreëerd voor melkzuurvorming door *Lactobacillus* species (Lameijer & Vervoort, 1995; Hendriks & Vrielink, 1995; Bussink et al., 2014), bevestigd door recent onderzoek (Gomez-Munoz et al., 2025) waarin eerst is aangezuurd tot pH 6,5 waarbij het niet uitmaakte of zwavelzuur of een organisch zuur werd gebruikt. De melkzuurvorming komt sneller op gang bij een lage pH, maar er zijn ook diverse succesvolle proeven gedaan zonder de mest eerst aan te zuren (Clemens & Wulf 2025; Kavanaugh et al., 2021; Meiresonne et al., 2024).

Door het toevoegen van suiker-of zetmeelrijke producten aan mest komt de fermentatie naar vooral melkzuur en andere organische zuren vanzelf op gang. Na enkele dagen begint de pH van de mest te dalen en afhankelijk van de hoeveelheid substraat en van de temperatuur kan deze daling van de pH enkele weken doorgaan. Bij een lage temperatuur gaat de pH daling langzamer (Bussink et al. 2014).

In een proef van Regueiro et al. (2022) werd zonder de mest eerst aan te zuren de maximale melkzuurproductie na 28 dagen bereikt terwijl dat voor de aangezuurde variant binnen 14 dagen was. Een mogelijk ander voordeel van bij de opstart eerst eenmalig snel aan te zuren is dat de methaanvorming direct tot stilstand komt. Zo wordt mogelijk vermeden dat er eerst nog kortdurend een extra piekmissie is van methaan uit het toegevoegde energierijke substraat (zoals melasse).

De temperatuur heeft invloed naast het feit dat processen in het algemeen sneller verlopen bij hogere temperatuur (Bussink et al., 2014). Bij lage temperatuur (10°C) wordt meer suiker uit melasse/siroop in zuur omgezet dan bij een hoge temperatuur (25 °C). Dit is tegenovergesteld aan de meeste biologische reacties die juist sneller verlopen bij hoge temperatuur. Een mogelijke verklaring is dat bij een hogere temperatuur er meer competitie is met andere micro-organismen die het substraat niet in zuur omzetten. Wel verloopt de pH daling bij het opstarten bij een lage temperatuur langzamer (Bussink et al. 2014). De daling van de pH gaat meestal niet sneller door meer substraat (energierijke producten toe te voegen). Wel kan de lagere pH langer worden gehandhaafd bij meer substraat.

Volgens de literatuur zijn bij temperaturen beneden 30°C heterofermentatie melkzuurbacteriën in het voordeel (Lau et al., 2021). Dit strookt niet met de bevindingen van Bussink et al. (2014), waarbij op basis van fedbatch experimenten overwegend homofermentatie plaatsvond op basis van de uit de proeven afgeleide zuurproductie. Alleen in enkele gevallen is ook heterolactische fermentatie waargenomen. Ook Regueiro et al. (2022) geven aan dat na aanvankelijk heterolactische fermentatie er na enkele weken een overgang was naar homolactische fermentatie.

2.2.3 Reststromen en of gewassen als toevoegmiddel.

Voor een goede fermentatie is het van belang dat het toe te voegen product aan mest veel gemakkelijk afbreekbare koolhydraten heeft (suikers, zetmeel). Er zijn veel restproducten waarmee biologisch aanzuren van mest mogelijk is. In de literatuur zijn proeven gedaan met melasse, siroop, wei, bran, geplet graan, appelpulp, bietsnippers, maisweekwater, lactosepermeaat, mais- en grassilage etc. (Clemens J & Wulf S, 2005; Prado et al., 2020; Kavanaugh et al., 2021). Al deze producten werken om de pH in mest te verlagen, maar van de suikerrijke producten als melasse en siroop is relatief het minste nodig vanwege de grote hoeveelheid gemakkelijk afbreekbare koolhydraten. Dagverse mest bevat in principe ook fermenteerbaar substraat, maar te weinig gemakkelijk afbreekbare koolhydraten om de verzuring in stand te houden nadat de verzuring op gang is gebracht (Bussink et al. 2014). Mest bevat veel suikers die zijn vastgelegd in lignocellulose. In de literatuur zijn diverse methodieken beschreven om de suikers in lignocellulose te ontsluiten. Veelal vergt dit sterke zuren en of vrij hoge temperaturen om dit te realiseren waardoor dit geen procede's zijn die op dit moment toepasbaar zijn in het concept van biologisch aanzuren. Yan et al. (2018), combineren een chemische en enzymatische voorbehandeling om redelijk hoge ethanol opbrengst te genereren uit rundmest. Deze werkwijze zou mogelijk ook geschikt kunnen zijn voor melkzuurproductie uit de suikers die zijn opgesloten in lignocellulose in mest. Als dit mogelijk is, zou na het initieel aanzuren van mest, in theorie geen extra toevoeging van zuur of makkelijk afbreekbare suikers meer nodig zijn.

Toevoegmiddelen als melasse en siroop zijn op nationale schaal gezien beperkt beschikbaar. Het aanbod aan suikerhoudende reststromen uit Nederland wordt mogelijk beperkend zeker als mestvergisting een grote vlucht gaat nemen. Import van suikerhoudende reststromen is een optie omdat op wereldschaal gezien er voldoende melasse beschikbaar is. Om niet afhankelijk te zijn van importen of een beperkt aantal en hoeveelheid aan reststromen, is de inzet van gewassen of gewasresten een optie. Daarbij geldt dat deze niet concurrerend mogen zijn met voedselproductie. Een voorbeeld van zo'n gewas kan het in Nederland nog nauwelijks geteelde gewas Silphie (Zonnekroon) zijn (Figuur 2-1). Zonnekroon maakt in Duitsland opgang omdat de biogasproductie minimaal gelijkwaardig is aan die van mais en omdat dit mooi bloeiende meerjarige gewas (15 tot 20 jaar) meerwaarde oplevert vanuit het oogpunt van biodiversiteit. Andere mogelijke gewassen zijn mais, Sorghum, (voeder)bieten. Sorghum is een relatief nieuw gewas in Nederland dat relatief suikerrijk is kort voor de afrijping (30% suiker in de ds).

Het is bekend dat de fermenteerbare energie uit het substraat dat is toegevoegd om mest aan te zuren in de stal, in de vergister volledig beschikbaar komt voor methaanproductie zodra de aangezuurde mest in het pH gunstige milieu van de vergister (pH 7-8) wordt gebracht (Gioelli et al. 2022). Het groengas potentieel uit mest neemt dus sterk toe (dagvers en uit de toevoeging). Bij de huidige werkwijze van continue mest invoer in vergisters hoeft men niet bang te zijn dat de pH in de vergister door het invoeren van aangezuurde mest (Amest), omlaag gaat. Ten eerste wordt de zure mest door goede opmenging direct verdund en ten tweede wordt het melkzuur binnen korte tijd omgezet in methaan en CO₂ waardoor het zuurgehalte in de vergister gereduceerd wordt. Uit pilotproeven met Amest (Sanders & Bussink, 2025) blijkt dan ook dat de pH tijdens de toeloop van zure mest constant op pH 8 gehandhaafd blijft.



Figuur 2-1. Silphie (links) en Sorghum rechts.

2.3 Routes en systemen voor biologisch aanzuren plus mestvergisting

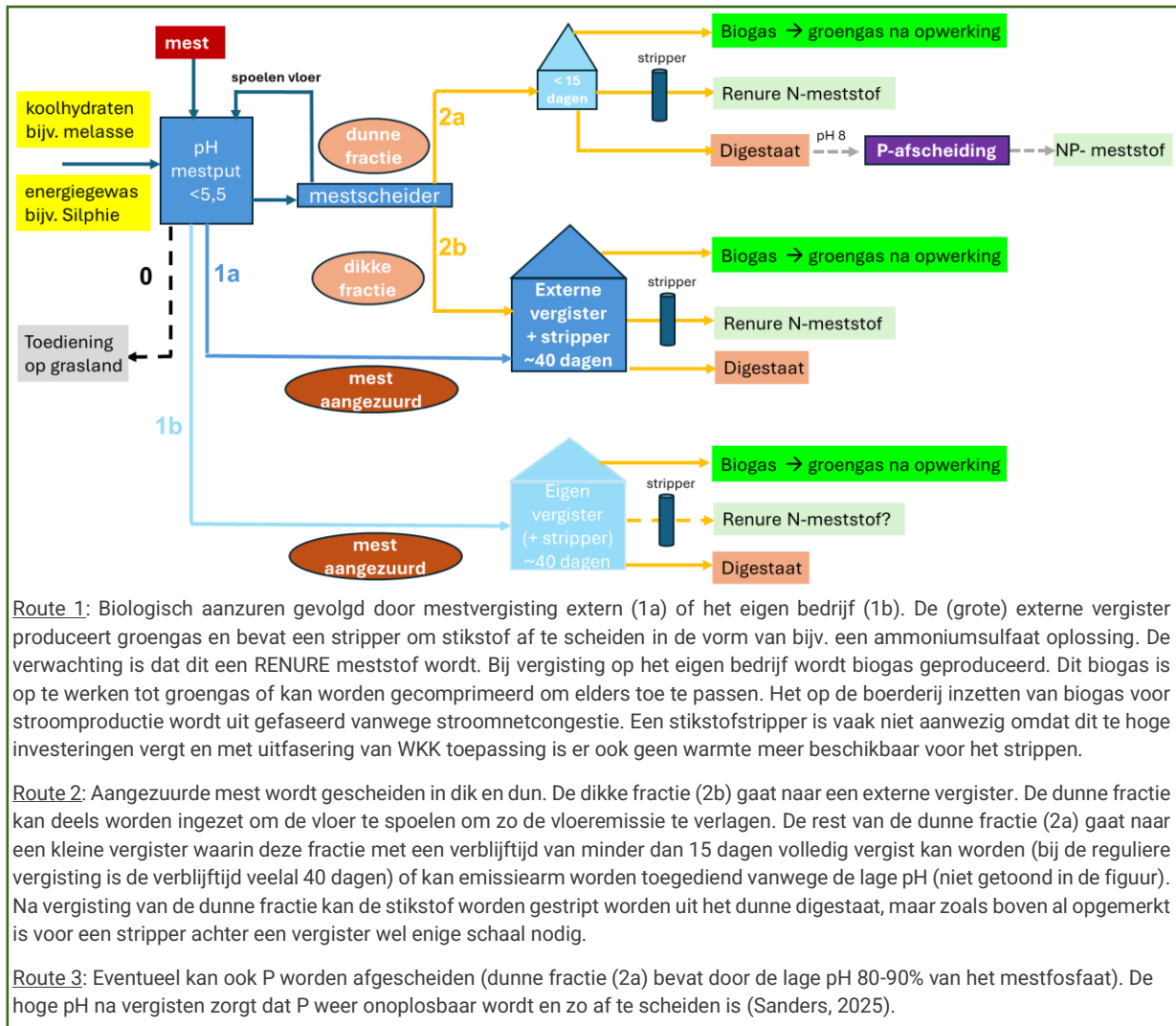
In de melkveehouderij is de ligboxenstal met mestopslag onder de roostervloer het meest gangbare systeem. Voor dit systeem zijn de volgende basisvarianten denkbaar :

- 1) Aanzuren mest in de put waarna:
 - a. Mest gaat naar een externe vergister
 - b. Mest wordt op het bedrijf zelf vergist
- 2) Aanzuren mest in de put gevolgd door mestscheiding en de vloer spoelen met dunne fractie waarna:
 - a. Dunne fractie wordt op het bedrijf zelf wordt vergist
 - Optioneel kan ook nog fosfaat worden afgescheiden (variant 3)
 - b. Dikke fractie naar een externe vergister gaat

In Figuur 2-2 is dit schematisch weergegeven. Route 1 levert de minste NH_3 -emissie reductie (alleen reductie uit de mestopslag) maar is het eenvoudigst te implementeren. Door de mest naar een externe vergister (route 1a) te brengen hoeft men niet zelf te investeren in een vergistingsinstallatie. Indien in een grote vergister de mest gestript wordt ontstaan er een vloeibare ammoniummeststof en ammoniumarm digestaat. Indien dit digestaat weer terugkomt op het eigen bedrijf betekent dat voor het bedrijf én een lager N-overschot en een beperkt risico op ammoniakemissie bij digestaatopslag tijdens het winterseizoen en bij het toedienen.

Vergisting op het eigen bedrijf (route 1b) kan ook zoals nu met mono-vergisting gebeurt. Daarbij wordt biogas geproduceerd of groengas wat in het aardgasnetwerk wordt gepompt of omgezet in stroom waarbij de restwarmte wordt benut voor andere toepassingen (waaronder het op temperatuur houden van de vergister). Mono-mestvergisting kan pas uit bij 300 of meer koeien. Echter bij toepassing van biologisch aanzuren wordt tot twee keer zoveel gas geproduceerd, omdat er een toevoegmiddel is gebruikt en de mest echt uurvers (hooguit een paar uur oud) geconserveerd wordt, terwijl bij mono-mestvergisting de 'dagverse' mest meerdere dagen oud is voordat deze wordt vergist. Daardoor kan vergisting op het eigen bedrijf mogelijk aantrekkelijk worden bij 150 stuks melkvee (zie H5). Bij optie 1b ontstaat wel digestaat met een hoge pH dat door indikking ammoniumrijker is geworden. Daardoor zijn vervolgstappen nodig om geen hogere emissie te krijgen bij het toedienen. Dit kan door of het digestaat direct te strippen of door het digestaat bij toedienen in de grond te brengen. Het N-overschot op het bedrijf neemt toe door het toevoegmiddel omdat organische producten bijna altijd ook N bevatten (bijv. melasse). Bij route 2a ontstaat eveneens een ammoniumrijk digestaat daardoor zijn net als bij 1b vervolgstappen nodig om geen hogere emissie te krijgen bij het toedienen. Bij route 2b wordt alleen de dikke fractie extern vergist. In die variant ontstaat een digestaat met veel minder ammonium, weinig fosfaat (die zit opgelost in de dunne fractie door de lage pH) en relatief rijk is aan organische stof. Bij route 2 neemt het N-overschot op het bedrijf af omdat dit digestaat zijn weg zal vinden naar de akkerbouw, indien bij route 2a ook strippen plaatsvindt dan kan het N-overschot nog verder afnemen. Route 3 kan een optie zijn als er een nog een fosfaatoverschot is na afvoer van dikke fractie (10-20% van de P-productie met drijfmest).

Indien vergisting van mest op korte termijn niet mogelijk (bijvoorbeeld omdat er onvoldoende vergister capaciteit is) kan aangezuurde mest ook direct worden toegediend in het veld (route 0). Dit geeft een sterke reductie van de ammoniakemissie in het veld maar is een vrij dure oplossing (Bussink et al., 2014 en zie verderop in hoofdstuk 5) bij gebruik van melasse als toevoegmiddel. Dan zijn goedkope reststromen gewenst om mest biologisch aan te zuren zoals bijvoorbeeld met lactosepermeaat.



Figuur 2-2. Routes van biologisch aanzuren in combinatie met vergisting.

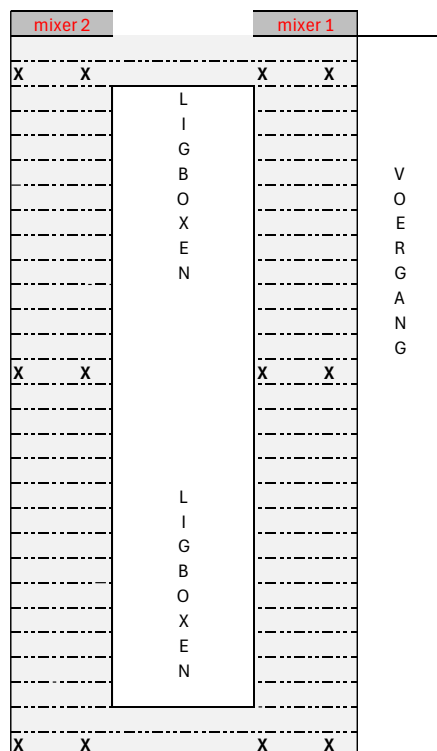
Route 1a de mest extern vergisten is waarschijnlijk voor veel bedrijven de beste oplossing. In deze situatie hoeft men zich niet bezig te houden met het managen van een vergistingsinstallatie wat ook tijd en kennis vraagt. Bovendien kan deze route vermoedelijk het snelst worden opgepakt omdat gebruik kan worden gemaakt van bestaande vergisters. Daarmee wordt wel alle mest van het bedrijf afgevoerd, wat betekent dat het digestaat na vergisten weer terugkomt op het bedrijf, maar wel met een verlaagd stikstofgehalte (waardoor het N-overschot dus omlaag gaat). Dit kan efficiënt met de retourvrachtwagen maar het vergt wel meer transport dan bij route 2 waarbij alleen de dikke fractie extern vergist wordt en het digestaat niet terugkomt op het bedrijf (gaat naar de akkerbouw) waardoor ook het N-overschot afneemt. Tegelijk kan bij route 2 de dunne fractie worden gebruikt om de vloer te spoelen* voor lagere emissie van de stalvloer.

* Mogelijk kan ook de aangezuurde mest zelf worden gebruikt om de vloer te spoelen nadat deze is gefilterd ter verwijdering van grote deeltjes en voerresten.

3 Proefopzet en uitvoering

3.1 Opzet

De proef werd uitgevoerd op het melkveebedrijf Pimmelaar te Schildwolde (Figuur 3-1). Dit bedrijf houdt 240 melkkoeien in een ligboxenstal met roostervloer. De stal heeft twee voergangen met aan beide kanten voerhekken en respectievelijk 1500 m³ en 4000 m³ opslagcapaciteit onder elke "stalhelft". Het biologisch aanzuren vond plaats in de kleinste opslag. De aanzuur stalhelft bestond uit een opslag in twee delen (put 1, het dichtst tegen de buitenkant en put 2 meer naar binnen) die voor en achter met elkaar verbonden waren en over de gehele lengte van de mestopslag maar dan pas vanaf 60 cm hoogte. De diepte van de mestopslag bedroeg 2,25 m. Om de mest in deze twee putten goed te mixen zijn kort voor de start van de proef twee elektrische mixers van 13 kWh geplaatst in de pompgaten. Dit maakte het mogelijk om eventueel ook meerdere keren per dag te mixen om zo een homogene mest te verkrijgen en te houden. De totale doorlooptijd van de proef was gepland op ongeveer 6 maanden. De pH van de mest werd frequent gemeten op meerdere plekken in de put (zie Figuur 3-1), variërend van twee wekelijks in het begin tot wekelijks na enige maanden (wordt gecontroleerd door frequent meten). Voor de pH meting zijn Hach pH-meters (PHC10103) gebruikt met een drie meter kabel plus bijbehorende draagbare pH-meter (HQ 2200) en bufferoplossingen. De benodigde hoeveelheid zuur werd in IBC's aangevoerd. De grondstof melasse werd eerst in IBC's aangevoerd. Deze IBC's zijn na legen in de mestput regelmatig bijgevuld vanuit een tankwagen.



Figuur 3-1 Weergave boerderij met het stalgedeelte voor 60 koeien en twee mixers aan de achterkant en de schematische weergave van de vorm van de mestopslag (grijs) met aan de achterkant twee mixers (mixer 2 = put 2 en mixer 1 = put 1) plus de weergave van de pH meetpunten.

Voor de start van de eigenlijke proef heeft een kort vooronderzoek (Bijlage 1) plaatsgevonden met de mest van het bedrijf om in het lab vast te stellen hoeveel mierenzuur en melasse nodig is en om de toediening van beide bij de start optimaal op elkaar af te stemmen voor een zo efficiënt mogelijk gebruik van deze hulpmiddelen. Verwacht werd dat 5 m³ mierenzuur (30 %) nodig zou zijn om pH 6,5 te bereiken bij een mestvoorraad van 450 m³ om naar verwachting gunstigere condities voor het biologisch aanzuren te creëren. Aansluitend werd een zodanige hoeveelheid melasse toegediend dat pH 5-5,5 bereikt kon worden binnen enkele dagen. Na het bereiken van de gewenste pH werd regelmatig melasse gedoseerd (1 tot 2 keer per week), afgestemd op de dagelijks mestproductie van de veestapel.

In het lab is tussen half september en half december een incubatieproef uitgevoerd met wel en niet aangezuurde mest om de emissiereductie en het biogaspotentieel te meten (H3.2.3).

Begin november werd een deel van de aangezuurde mest gescheiden in een dikke en dunne fractie (H3.2.2) waarbij de dunne fractie werd opgeslagen in een mestzak en de dikke fractie werd afgedekt met plastic. Een deel van de dunne fractie werd gebruikt om de biogasproductie in een pilotopstelling op het bedrijf Pimmelaar te meten, waarbij de verwachting was dat de reguliere verblijftijd terug kon van 40 dagen naar 10-15 dagen. Dit is in separaat rapport beschreven (Sanders & Bussink 2025). Met de dikke fractie is een eerste praktijktest uitgevoerd naar bijmengen in een bestaande vergister om de uitvoerbaarheid te verkennen en om te proberen de meeropbrengst aan biogas te meten.

Met de dunne fractie zijn kleine delen van de roostervloer gespoeld om indicatief vast te stellen in hoeverre spoelen de ammoniakemissie van de roostervloer kan verminderen (het betrof puntmetingen, zie H3.2.4), waarbij onbehandeld, spoelen met water en spoelen met dunne fractie met elkaar vergeleken werd.

Gedurende de looptijd van de proef zijn mestmonsters genomen voor analyse op samenstelling en vaststelling van het biogaspotentieel.

3.2 Uitvoering

3.2.1 Zuur en melassedosering

Het aanzuren is gestart op 29 augustus met het toevoegen van 5 m³ mierenzuur (30%). Dit gebeurde door via een overloop zuur vanuit de IBC direct tussen de roosterspleten door in de buurt van de mixer in de put te laten lopen (Figuur 3-2). Dit nam ongeveer 2 uur in beslag. Bij de start van het aanzuren bleek er 90 cm mest aanwezig te zijn (~600 m³) in plaats van de van tevoren verwachte hoeveelheid van ongeveer 450 m³. Deze 90 cm bleek ook ongeveer nodig te zijn om mest goed te kunnen mixen. De hoeveelheid zuur per m³ mest was daardoor lager dan beoogd. Na het toedienen van het zuur werd de pH gemeten en werd gestart met het doseren van melasse vanuit IBC's in het pompgat van de mestputten, in totaal 24,5 ton. In het weekend van 1 september bleek er schuimvorming op te treden. Op diezelfde dag nog is er een schuimbreker toegevoegd aan de mest in combinatie met wat langer mixen waarna het schuimprobleem was opgelost. De verklaring voor de schuimvorming is de (vrij snelle) pH daling die optreedt wat zorgt voor veel CO₂ vorming (zie vergelijking 3).

Op 4-sep werd nieuwe melasse geleverd, het grootste deel ging in de put (put 1 en put 2) en de rest werd gebruikt om de IBC's mee te vullen (ongeveer 900 liter per IBC). Op 11-sep is er opnieuw melasse geleverd waarvan eveneens een deel in de put ging en een beperkt deel werd gebruikt om de IBC's bij te vullen. Na 20 september werd de te doseren hoeveelheden kleiner en werd er op weekbasis melasse toegevoegd aan put 1 en 2, variërend tussen 2 en 4 IBC's tot aan het eind van 2024. De voorraad melasse werd daarna nog aangevuld op 20 nov en 30 december. Vanaf 20 november werd in lege IBC's 100 liter water gedaan alvorens deze te vullen met 800 liter melasse. Dit om melasse ook goed vloeibaar te houden bij lagere temperaturen. De levering van 30 december was toereikend tot medio maart. Met betrekking tot de samenstelling is uitgegaan van 45% suiker per kg product en een dichtheid van 1,4.



Figuur 3-2. Doseren van mierenzuur door de rooster (linksboven), de mestmixers (rechtsboven), het doseren van melasse linksonder en de ibc's met melasse rechtsonder (29 augustus 2024).

Tabel 3-1. De aanvoer van melasse

Datum	Hoeveelheid (kg)	vorm
14-aug	24480	IBC's
4-sep	29900	tankauto
11-sep	18720	tankauto
20-sep	29300	tankauto
20-nov	35120	tankauto
30-dec	30440	tankauto

De pH- metingen vonden plaats door in de stal op verschillende plekken (ongeveer de plekken x in Figuur 3-1) in de stal door mestmonsters te nemen met een holle buis met stop die door de roosterspleten heenging en mest te verzamelen van verschillende dieptes (van bovenin tot onderin). Per plek leverde dit 1 monster voor de pH bepaling. In totaal zijn er per meetdag per put zo 6 monsters genomen waarin de pH werd bepaald. In het begin waren er minimaal 2 meetdagen per week tot begin november. Daarna werd de pH wekelijks bepaald. Van de referentie put werden minder frequent pH monsters genomen. Af en toe werd de mesthoogte gemeten om zo de mestvoorraad te kunnen schatten.

3.2.2 Mestscheiding

Tussen 30 oktober en 6 november is bij een mesthoogte van ruim 140 cm mest verwijderd uit de put. Een hoeveelheid van 40 m³ is verwijderd en gescheiden via de vijzelpers en 310 m³ is via een decanter gescheiden. De dunne fractie uit de decanter is opgeslagen in een container en werd gebruikt voor de

vergisterproef (Sanders, 2025); De dunne fractie uit de decanter is opgeslagen in mestzak ook ten behoeve de vergisterproef maar ook voor andere proeven. De dikke fractie, ongeveer 50 m³, is afgedekt. Van de dikke fractie is een 35 ton afgevoerd naar een vergister om te testen of dit gemakkelijk toe te voegen is en wat dit doet voor de gasproductie.



Figuur 3-3. Mestscheiding met een decanter, productie dikke fractie (links), de opslag van dunne fractie (midden) en een 2,5 m³ vergistingsinstallatie ten behoeve van dunne fractie vergisting (6 november 2025).

3.2.3 Incubatieproef

Op 3 oktober 2023 is ongeveer 100 liter mest uit de referentie put en 20 liter mest uit de behandelde put gehaald. Deze mest is meegenomen naar Wageningen, om daar een incubatieproef te doen. Het doel van deze proef was om de gasemissies NH₃, CH₄, CO₂ en N₂O-emissie vanuit de aangezuurde te kwantificeren. De proef bestond uit de volgende zes verschillende behandelingen die in duplo werden gemeten:

- A: onbehandelde mest uit referentieput
- B: mest uit de aangezuurde put
- C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse
- D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse
- E: mest uit de referentieput + omgerekend 6 liter zwavelzuur (98%) per m³ mest + 2,5% melasse
- F: mest uit de referentieput + omgerekend 6 liter zwavelzuur (98%) per m³ mest + 4,0% melasse

Het zwavelzuur werd in verdunde vorm toegediend (2 M).

De proef bestond uit 12 buizen (60 cm hoog, diameter 19 cm) die werden gevuld met 10 kg (behandelde mest). De buizen zaten dan ongeveer voor de helft gevuld met mest. De buizen stonden binnen bij een temperatuur rond de 15 °C. De bovenkant van de kolom was open, waardoor de mest in contact stond met de lucht. De NH₃, CH₄, CO₂ en N₂O-emissie werd gedurende 2,5 maand gevolgd. Om de emissie te meten werd de buis 3 uur afgesloten met een deksel. Aan deze deksel zat een slangetje die verbonden werd met een gassensor. De gassensor nam van de headspace iedere buis elke 12 minuten en luchtmonster en waarvan de gasconcentraties werden gemeten. In de deksels op de buizen zaten kleine gaatjes om voor het drukverlies door het nemen van de monsters te compenseren. Aan het begin van de proef werd er dagelijks gemeten. Het tijdsinterval liep daarna op tot eens in de anderhalve week. Verder werden naast elke meting ook de pH en de diepte van de headspace gemeten. Dit laatste omdat de diepte kon variëren door schuimvorming en verdamping.

De emissie is berekend door aan te nemen dat de gemeten gasconcentraties over de tijd de curves van en exponentieel plateau volgen (dit plateau wordt bereikt op het moment dat de gasconcentraties in de headspace dusdanig hoog zijn, dat er een evenwicht is tussen verversing met schone lucht en emissie vanuit de mest). Vervolgens werd de emissiesnelheid bepaald aan de hand van de afgeleide van de curve aan het begin van de meting. In enkele gevallen kon geen goede curve over de metingen worden

gelegd en werd de emissiesnelheid bepaald aan de hand van de helling van lineaire functie door de metingen.

Bij behandeling A (onbehandelde mest uit referentieput) was de emissie van NH_3 zo hoog, dat het plateau vaak al bij de tweede meting was bereikt. Daarom zijn deze metingen vervangen door een extra NH_3 meting met intervallen van 1 minuut tussen de metingen.

3.2.4 Stalvloer spoelen met dunne fractie

Opzet

Met de dunne fractie kan de stalvloer (roostervloer) worden gespoeld om de ammoniakemissie van de vloer te reduceren. Op 14 november en 3 december zijn in totaal vier verkennende proeven uitgevoerd om het effect van het spoelen met aangezuurde dunne fractie te vergelijken met het niet spoelen van de stalvloer en het spoelen van de stalvloer met water. Er is gebruik gemaakt van twee verschillende dunne fracties; één gescheiden door een vijzelpers en één gescheiden door een Decanter. Omdat de dunne fractie deels op de roostervloer bleef liggen, en niet net zo snel als water de put in stroomde, is ook gekeken naar het effect van het schoonschrappen van de vloer kort nadat de vloer was gespoeld met dunne fractie. Tabel 3-2 geeft een overzicht van welke behandelingen per proef zijn uitgevoerd. Voor alle proeven zijn de behandelingen in viervoud uitgevoerd.

De ammoniakemissie werd bepaald met gesloten fluxkamers. Daarbij werd een U-vormig frame van 4 cm hoog op de roostervloer geplaatst. Op dit frame werd een petrischaal geplaatst van 9 cm doorsnede gevuld met 20 ml 0,1 M HCl. Het vullen van het petrischaaltje gebeurde met behulp van een dispenser. Hierover heen werd een 1,8 liter emmertjes van 16,9 cm doorsnede (buitenmaat) en 12,8 cm hoogte geplaatst om het geheel af te sluiten. Ammoniak (NH_3) dat emitteert vanaf het roosteroppervlak wordt via diffusie getransporteerd naar de HCl-oplossing waarin het reageert tot NH_4^+ . Na een half uur werd de zuuroplossing overgebracht naar een afsluitbaar buisje. Bij proeven 2, 3 en 4 werd hierna een tweede meting van een half uur gedaan en bij proeven 3 en 4 werd ook nog een derde meting van een uur gedaan. Na afloop van een experiment zijn de ammoniumconcentraties in de zuuroplossing gemeten in het laboratorium van AgroCares te Wageningen.

Tabel 3-2 Overzicht uitgevoerde spoelbehandelingen per proef.

	Proef 1 (14nov)	Proef 2 (14nov)	Proef 3 (3dec)	Proef 4 (3dec)
Referentie	X	X	X	X
Water	X	X	X	X
Vijzelpers			X	X
Vijzelpers + schrapen	X		X	X
Decanter		X	X	X
Decanter + schrapen		X	X	X

Uitvoering

Voor de proef werd een gedeelte van de stal afgezet, waardoor de proef niet werd verstoord door de koeien. Wel liepen de koeien er nog tot kort voor de start van de proef, waardoor de mest op de roosters nog vers was. De roosters werden eerst schoon geschrapt met een mestschraper om overtollige mest te verwijderen en gelijkmatige bedekking met mest te krijgen. Vervolgens werden de locaties uitgekozen voor de metingen en werd de vloer gespoeld en geschrapt, zie Figuur 3-4.



Figuur 3-4 Links: de onbehandelde referentie voordat de petrischaaltjes en emmers werden geplaatst. Midden: vloer gespoeld met dunne fractie. Rechts: op de achtergrond de meetopstelling nadat de petrischalen en emmers zijn geplaatst. Op de voorgrond de meetopstelling voor het meten van de gasconcentraties in de mestkelder.

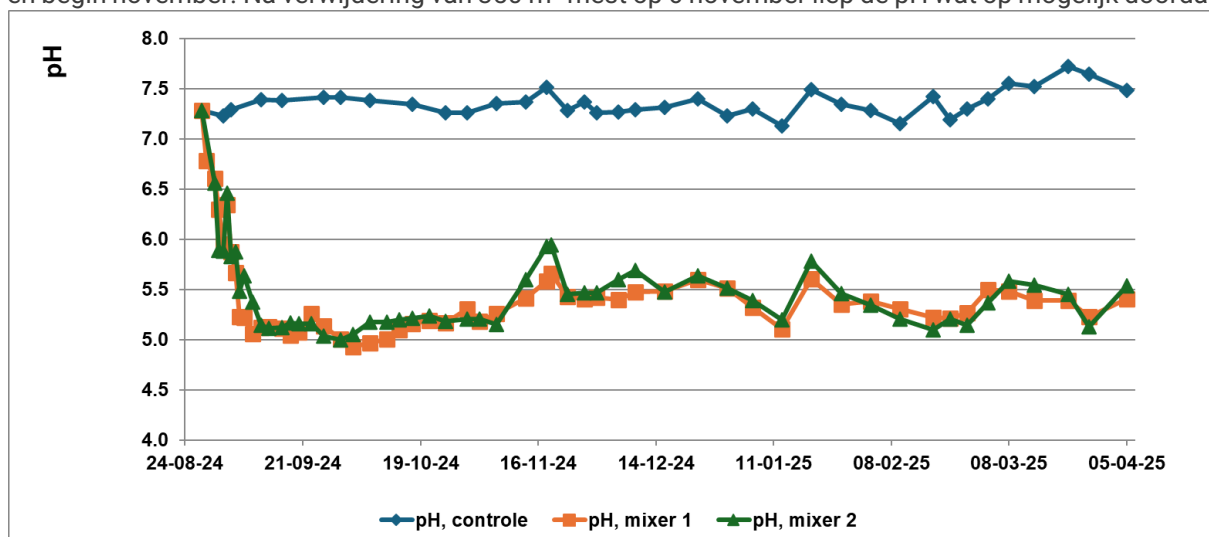
3.2.5 Gasemissie vanuit de mestopslag

Om een indicatief beeld te krijgen van het effect van biologisch aanzuren met melasse op de gasemissies vanuit de mestopslag zijn op 14 november en 3 december de concentraties van NH_3 , CH_4 , CO_2 en N_2O in de lucht onder de roosters gemeten gedurende enkele uren. De metingen zijn uitgevoerd in de referentieput en de aangezuurde put op drie dieptes: net boven het mestoppervlak, net onder de roosters en daar tussenin. De gasconcentraties zijn gemeten met een gassensor (Innova Type 1512) in combinatie met een multisampler (Innova Type 1409). Hieraan werden zes slangetjes verbonden, die met behulp van pvc-buizen naar de juiste diepte onder de rooster werden geplaatst. Op deze manier werd op twee plekken per put en op drie dieptes tegelijkertijd gemeten, zie Figuur 3-4. Op beide dagen werd eerst enkele uren gemeten in de behandelde put en daarna in de referentieput. Ter referentie zijn ook via twee slangetjes de gasconcentraties in de verse lucht buiten de stal gemeten.

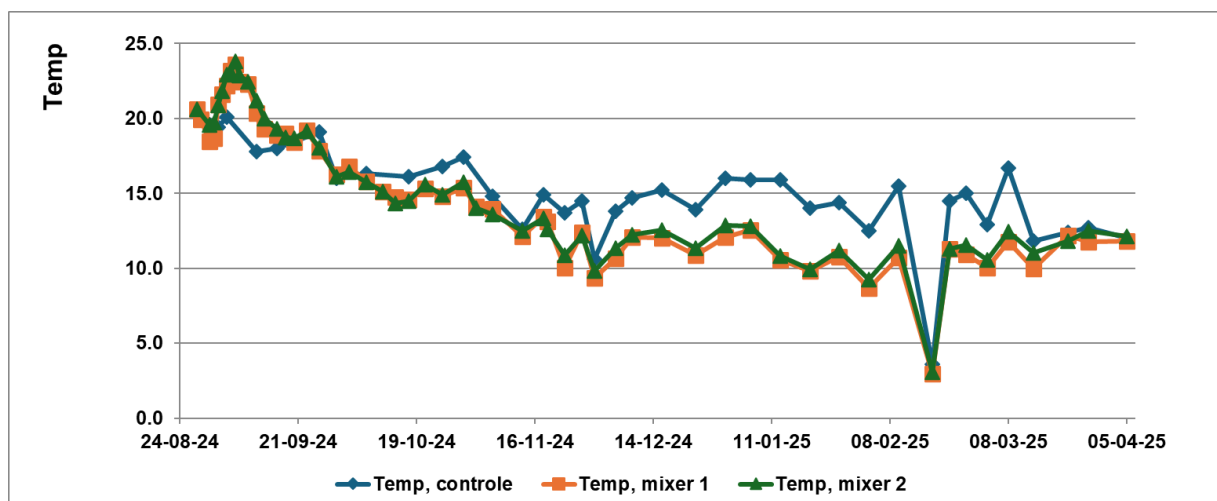
4 Resultaten en discussie

4.1 pH verloop in de mestput

In Figuur 4-1 is het beloop van de pH weergegeven. Na het toevoegen van het zuur op 29 augustus daalde de pH direct tot ongeveer 6,8. Initieel was ongeveer pH 6 verwacht als er 450 m³ mest aanwezig zou zijn geweest in plaats van 600 m³. Op dezelfde dag is ook begonnen met melasse doseren. De pH zakte vrij snel naar 5,8 om daarna weer langzaam op te lopen naar 6,4, vermoedelijk een soort na-ijl effect en het nog niet perfect gemixt zijn van de mest. Na 10 september is het goed gelukt om de pH tussen 5 en 5,5 te houden. Eind september was de pH 5,0 om daarna weer iets te stijgen tot 5,2 gedurende oktober en begin november. Na verwijdering van 350 m³ mest op 6 november liep de pH wat op mogelijk doordat



Figuur 4-1 Het verloop van de pH van de mest in de mestput waar initieel mierenzuur en daarna meerdere keren melasse aan is toegevoegd (oranje en groene lijnen) vanaf 29 augustus tot 5 april 2025, vergeleken met de referentieput (blauwe lijn) die niet is aangezuurd.



Figuur 4-2 Het verloop van de temperatuur vanaf 29 augustus tot 5 april 2025.

het vrij koud was tijdens melasse doseren op 7 november (max 7 °C) waardoor de melasse erg viskeus was. Na het doseren kan het naar de bodem van de put zijn gezakt en mogelijk niet goed zijn gemengd. Dat gold ook voor de dosering een week later (vanaf medio november is er 100 liter water in de IBC's gedaan voordat ze met 800 liter melasse werden gevuld om melasse ook bij lagere temperaturen goed vloeibaar te houden). Vanaf eind november is de pH op 5,5 gehouden tot begin januari. De dip en piek in pH kort na de jaarwisseling is waarschijnlijk het gevolg van een temperatuurdaling van de mest gevolgd door een stijging (Figuur 4-2). Vanaf eind januari bleef de pH ruim onder de pH 5,5 met nauwelijks nog toevoeging van melasse. Na begin oktober bleef de temperatuur duidelijk onder die van de referentieput. Mogelijk is dat het gevolg van minder afbraak van organische stof (minder biologische activiteit) als gevolg van het stopzetten van de methaanvorming.

Het melassegebruik daalde van initieel 8,0% van het totale mestvolume de eerste maand na start van de pilot tot gemiddeld 6,5% over de periode 29 augustus tot 6 november. Na verwijdering van 350 m³ mest nam het melasseverbruik toe tot ongeveer 10 % tussen 6 november en 30 december. Niet echt duidelijk is waarom. Mogelijk is uitzakken van melasse een oorzaak of het mogelijk slechter mengen. Voor het laatste is op 19 november een controle meting van de pH bovenin in de mest en onderin de mest gedaan. Dit gaf slechts kleine verschillen van 0,1-0,2 pH eenheid, met bovenin de hoogste waarden. Na januari daalde het melasseverbruik met een heel laag melasseverbruik tussen half februari en medio maart (2,5%). Gemiddeld werd over de periode 30 dec tot 5 april werd 4,2% melasse toegevoegd. Van belang is om het melasseverbruik over een langere tijd te monitoren. Verwacht wordt dat het melasseverbruik daalt naarmate het aandeel dagverse mest toeneemt. Door de constante toevoer van verse mest en tussentijdse afvoer van een deel van de aangezuurde mest neemt het aandeel verse mest gestaag toe, waardoor eind maart het aandeel oude mest in de aangezuurde mest nog ongeveer 1/3 was. Over de gehele periode van eind augustus tot half maart bedroeg het melassegebruik 6,7% (v/v).

Tabel 4-1 Het melasseverbruik over een periode van ruim een half jaar.

Startdatum	29-aug	23-sep	6-nov	30-dec	18-feb	5-april
cumulatief gebruik melasse (m ³)		59	65,9	97,3	114,3	119,1
cumulatief gebruik zuur (m ³)		5	5	5	5	5
mestvoorraad in put (+melasse) (m ³)		799	667	1009	1267	1420
mestscheiding			350			
cumulative afvoer naar vergister en land (m ³)					35	100
totaal volume mest+ melasse (m ³)	600	799	1017	1359	1652	1905
netto volume mest (m ³)	600	735	946	1257	1532	1781
melassegebruik voortschrijdend gemiddelde per m ³ mest (v/v)		8,0	6,5	7,7	7,5	6,7
melassegebruik per tijdsinterval (% tov m ³ mest)		8,0	3,3	10,1	6,2	1,9

4.2 Mestsamenstelling en biogasproductie

4.2.1 Mestsamenstelling

Er zijn op meerdere momenten mestmonsters genomen door Eurofins (Tabel 4-2) en door Innolab (ook biogasmeting, Tabel 4-3). De gemeten droge stof gehaltes in de mest varieerden sterk over de tijd en tussen de opslagputten met direct al grote verschillen bij de start. Een representatief monster nemen bij mestbemonstering is lastig en wordt sterk bepaald door hoe goed een mestput gemengd is. Door de grote variatie is op basis van de mestanalyses lastig vast te stellen of door aanzuren meer stikstof in

de mest achterblijft. Een parameter die een aanwijzing zou kunnen geven is de stikstof / fosfaat ratio. Als het verschil tussen deze ratio van de referentieput en de aangezuurde putten in de loop van de tijd toeneemt kan dat een aanwijzing zijn dat er meer stikstof is vastgehouden (minder ammoniakemissie) in de aangezuurde put. De resultaten in Tabel 4-2 laten zien dat tussen begin oktober en half december het verschil tussen deze ratio's groter wordt. Emissiemetingen zullen meer duidelijkheid geven.

Het organisch N-gehalte en het kaligehalte is duidelijk gestegen bij de aangezuurde mest ten opzichte van eind augustus. Melasse bevat ongeveer 10-15 kg stikstof en ruim 45-55 kg kali per m³. Toevoeging van 75 liter melasse per kuub mest betekent dat het N-gehalte van de mest met meer dan 15% kan stijgen. Het kaligehalte kan met meer dan 40% stijgen wat ook terug te zien is in Tabel 4-2 en Tabel 4-3.

Naast de minerale samenstelling van mest is in september en november van in totaal 4 referentiemonsters en 8 aangezuurde monsters het H₂S-gehalte in de mest bepaald. Dit bedroeg gemiddeld respectievelijk 97 en 93 ppm wat volgens het laboratorium gemiddelde waarden zijn voor mest. De veehouder heeft in het najaar ook met een H₂S meter rondgelopen in de stal. Er zijn geen waarden gemeten boven ppm niveau. Lage waarden zijn ook te verwachten volgens de literatuur (van Lent et al., 1995 en Fuchs et al., 2021) zo lang geen zwavelzuur wordt gebruikt.

Tabel 4-2 Samenstelling van de mest in de referentie put en de aangezuurde put gedurende de proef in g kg⁻¹ mest. De samenstelling van de mest in de aangezuurde put op 28-8 is van voor dat de melasse is toegevoegd. De samenstelling van de mest is gemeten door Eurofins Agro op 28-8 en 3-10 en door Innolab op 11-12. Hierdoor zijn niet alle eigenschappen bepaald bij de laatste meting.

Monster	Datum	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	N-NH ₃	N-org	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Na ₂ O	N _{tot} /P ₂ O ₅
Referentie	28-8	99	38	61	3,9	7	1,7	2,2	2,2	6,3	1,7	0,7	1,8
Put 1	28-8	64	19	45	3,4	6	1,3	2,1	1,7	5,3	1,2	0,7	1,2
Put 2	28-8	75	23	52	3,4	7	1,4	2	1,5	5,3	1,3	0,7	2,2
Referentie	3-10	66	19	47	3,4	6	1,6	1,8	1,4	5,9	1	0,7	2,5
Put 1+2	3-10	101	25	76	4,0	9	1,2	2,8	1,6	9	1	1,6	2,5
Referentie	6-11	87	24	63	4,4	6	2	2,4	1,8	6,7	1,2	0,8	2,5
Put 1+2	6-11	97	24	73	4,0	8	1,3	2,7	1,5	9	1	1,5	2,7
Referentie	11-12	83	23	60	4,1	7	x	x	1,5	5,2	1,1	X	2,6
Put 1+2	11-12	83	23	59	4,0	7	x	x	1,2	7,0	0,8	X	3,4

4.2.2 Biogas- en methaanproductie uit onbehandelde mest en Amest

Gedurende de pilot zijn op meerdere momenten monsters genomen uit de mestopslagput om het biogasproductiepotentieel vast te stellen, zowel van de mestopslagen in de praktijk als van de incubatieproef in het lab (Tabel 4-3). Tien dagen na de start van de praktijkproef was de biogas- en CH₄-productie bij de aangezuurde mest (Amest) in de put 51 en 27 Nm³ ton⁻¹ verse mest en daarmee ruim hoger (21 en 8 Nm³ ton⁻¹) dan van de referentie put. Half december was de biogas- en CH₄-productie van de Amest 55 m³ en 35 m³. Daarbij is de productie van biogas en methaan uit de aangezuurde put toegenomen en die uit de referentieput afgenomen (waarden van rond de 20 m³ biogas uit “oudere” mest zijn ongeveer normaal).

In oktober zijn incubatieproeven gestart in het lab met de mest uit de aangezuurde en referentie put (zie H3.2.3). Het biogaspotentieel is bepaald bij het afsluiten van de proef op 13 december. Variant B (mest uit de aangezuurde put) gaf ongeveer dezelfde gasproductie als het monster uit de put van 9 september. Van de mest uit de referentieput waar melasse, eventueel in combinatie met zwavelzuur, aan was

toegevoegd, gaf variant D (+7,5% melasse) met de meeste melasse de hoogste gasproductie. Variant C (+6,25% melasse), E (omgerekend 6 liter zwavelzuur (98%) per m³ mest + 2,5% melasse) en F (omgerekend 6 liter zwavelzuur (98%) per m³ mest + 4,0% melasse) gaven lagere gasproducties, waarbij de productie lager was naarmate er minder melasse was gebruikt. Na beëindigen van de proef is de mest opgeslagen in minicontainers bij 5°C.

Tabel 4-3 Biogasproductie en samenstelling van verschillende mestmonsters tijdens de proefuitvoering in de praktijk en na de incubatieproef in het lab gemeten door Innolab. Biogas- en methaanproductie is gegeven in Nm³ ton⁻¹ verse mest (VM).

Datum	Locatie	Melasse l m ⁻³ mest	DS %	OS %ds	N-tot g kg ⁻¹	P ₂ O ₅ g kg ⁻¹	K ₂ O g kg ⁻¹	N _{tot} /P	pH	Duur in dagen	Biogas Nm ³ ton ⁻¹ VM	CH ₄ Nm ³ ton ⁻¹ VM
Mestput												
9-9	Ref.	0	11, 0	72,6	4,3	2,5	5,1	1,8	7,5	30	30	19
9-9	Amest	80	12, 1	72,0	4,6	1,8	8,1	2,6	5,2	30	51	27
13-12	Ref.	0	8,3	72,6	4,1	1,5	5,2	2,6	7,2	35	18	11
13-12	Amest	77	8,3	71,8	4,0	1,0	7,0	3,4	5,4	50	55	35
Incubatie- proef (lab)												
13-12	A (ref.)	0	7,1	68,1	3,2	1,3	5,4	2,4	7,4	35	19	12
13-12	B (Amest)	80	11, 3	74,4	4,5	1,2	8,5	3,1	5,1	35	54	33
13-12	C	68	9,8	70,0	4,6	1,3	8,7	3,5	5,9	35	44	28
13-12	D	83	10, 8	70,9	4,9	1,3	9,6	3,8	5,1	35	59	37
13-12	E*	28	8,2	0,6	3,9	1,3	6,7	3,1	5,6	30	35	23
13-12	F*	45	9,8	0,7	4,1	1,2	7,5	3,2	4,3	30	30	20

* met zuurtoevoeging, ** met extra micro-organismen toevoeging

4.2.3 Biogas- en methaanproductie uit dikke en dunne fractie

Op 6 november is mest gescheiden in een dikke en dunne fractie van zowel de Amest put als de referentieput. Bij de Amest zijn op verschillende tijdstippen gedurende de dag monsters genomen van de dikke en dunne fractie. Deze zijn naar een Vlaams lab gestuurd. De biogasproductie van de referentie mest was laag met nog geen 20 Nm³ ton⁻¹ (Tabel 4-4), maar vergelijkbaar met die van 13 dec (Tabel 4-3). Bij een scheiding van de referentie mest in 1 deel dik en 5 delen dun is de gasproductie van de dikke fractie en dunne fractie samen wel ongeveer gelijk aan die van niet gescheiden mest. Het drogestofgehalte van de dikke fractie van gescheiden Amest varieerde sterk. Monster 1, 17 en 32 geven bij terug rekening naar eenzelfde gehalte drogestof ongeveer eenzelfde lage gasproductie van 2 m³ biogas per procent drogestof, wat ook werd gemeten bij de dunne fracties. Op basis van het beloop van de gasproductie in de tijd bleek dat de biogasproductie moeilijk op gang kwam. De oorzaak is onduidelijk. Navraag bij lab leverde geen verklaring voor de lage meetwaarden, niet anders dan dat het opgevalen was dat de gasproductie laag was over een langere periode. De waarden stroken ook niet met andere metingen zoals bijvoorbeeld blijkt uit tabel 4.3 op basis van de meetwaarden van 9 september voor Amest, de meting op 13 december (behandeling B) en metingen door Bioclear aan dunne fractie (45 m³ biogas) en Amest (42-56 m³ biogas) (Tabel 4-4). Daarnaast zijn er in de winter van proeven uitgevoerd met een continue geroerde pilotvergister van 2,5 m³, waarbij hoge biogasproducties zijn gemeten (Sanders & Bussink, 2025). Op basis van 60 dagelijkse metingen tussen half december en

half februari werd gemiddeld ongeveer 35 m³ biogas gemeten van dunne fractie Amest bij een verblijftijd kleiner dan 15 dagen. Metingen aan Amest gaven ongeveer 45 m³ biogas bij eenzelfde verblijftijd van 15 dagen (wat uitzonderlijk kort is vergeleken met normaal 35 a 40 dagen en daarbij moet bedacht worden dat dit doorstroomproeven zijn waardoor er ongeveer 3 m³ biogas wordt gemist ten opzichte van batchproeven met eenzelfde tijdsduur). In Sanders & Bussink (2025) wordt hier nader op ingegaan.

Tabel 4-4 Biogasproductie van verschillende mestmonsters na de mestscheiding op 6 november door verschillende laboratoria. Biogas- en methaanproductie is gegeven in Nm³ ton⁻¹. De gemiddelde gedoseerde hoeveelheid melasse bedroeg 65 liter per m³ mest. De gescheiden mest is teruggerekend naar ongescheiden mest.

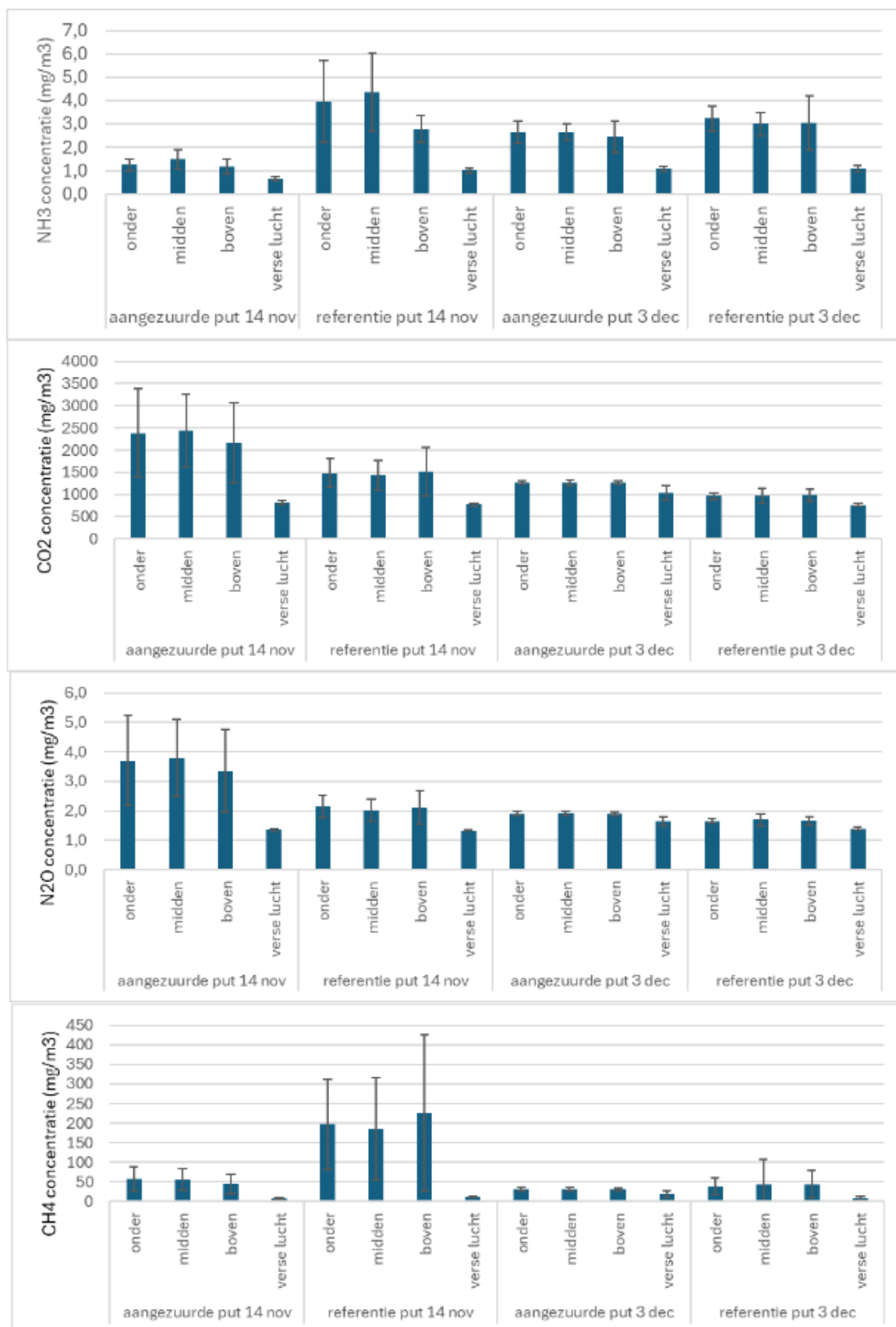
omschrijving	DS %	OS %DS	pH	Duur in dagen	Biogas Nm ³ ton ⁻¹ VM	Methaan Nm ³ ton ⁻¹ VM
Innolab						
referentie mest	8,9	73	7,1	55	16,6	9,9
dik (referentie)	25,8	83	8,5	55	47,5	26,6
dun (referentie)	6,1	65	7,3	55	9,7	5,7
1 dik en 5 dun	9,4	68	7,5	55	16	9,2
aangezuurde mest	9,9	74	5,4	55	20*	12,3*
dun	9,0	71	5,3	55	18,6*	10,6*
dun	8,9	73	5,3	55	17,8*	11,2*
dun	8,3	71	5,4	55	15,6*	9,6*
dik	42,9	88	5,1	55	83,2	49,9
dik	26,1	86	5,2	55	54,7	34,6
dik	23,8	80	5,2	55	46,1	25,5
1 dik en 5 dun **	12,4	74		55	24,7	14,8
Bioclear						
dun				26	46	25,6
dun				26	42	23,3
dun				26	45	25,0
dun				26	47	26,1
dun				26	45	25,0
aangezuurde mest				26	42	23,3
aangezuurde mest				26	42	23,3
aangezuurde mest+ extra micro-organismen				26	56	31,1
aangezuurde mest + verrijkt inoculum				26	45	25,0
aangezuurde mest halve belasting				26	50	27,8
Referentie mest				26	22	12,2
Leaf						
dik	23,7				67	40,9

* onwaarschijnlijk laag, navraag bij het lab leverde geen verklaring. Metingen met een pilotvergister van 2,5 m³ geven een dubbel zo hoge gasproductie. ** gemiddeld over dikke fractie en dunne fractie waarbij een verhouding is toegepast van 1 deel dik ten opzichte van 5 delen dun.

4.3 Gasconcentraties in de mestput

Figuur 4-3 geeft de gemeten NH_3 , N_2O , CO_2 en CH_4 -concentraties in de lucht op twee plekken in de stal onder de roosters van de aangezuurde en de referentie put op 14 november (T mest was 13°C) en 3 december (T mest 10°C) 2024. De gegeven waarden zijn het gemiddelde over 2 keer een periode van 1 tot 2 uur waarin iedere 8 minuten de concentratie gemeten werd (zij Bijlage 2) voor de afzonderlijke periode). Op 14 november werd in het achterste gedeelte van de stal gemeten. Op 3 december werd meer voorin gemeten. De windrichting op 14 november was overwegend noordwest en op 3 december overwegend west bij buitentemperaturen van respectievelijk maximaal 11°C en 7°C.

Op 14 november is te zien dat de NH_3 - en CH_4 -concentraties in de aangezuurde put lager zijn dan in de referentieput. De N_2O - en CO_2 -concentraties zijn in de aangezuurde put hoger dan in de referentieput. De lagere NH_3 - en CH_4 -concentraties in de aangezuurde put komen overeen met de verwachting dat de emissie van deze gassen wordt gereduceerd door het biologisch aanzuren. De hogere CO_2 -concentratie is waarschijnlijk te verklaren door de omzetting van CO_3^{2-} en HCO_3^- naar CO_2 als gevolg van de lagere pH. Op 3 december zijn de verschillen tussen de aangezuurde put en de referentieput minder groot. Mogelijk is dit mede beïnvloed door de meetplek voorin de stal, omdat dit de kant was waar de wind vandaan kwam, in combinatie met vrij matig tot matige windsnelheden (4-6 m/s) wat zorgt voor meer uitwisseling van lucht onder de roosters met lucht boven de roosters (emissie vanaf de roosters). Dat kan mogelijk deels verklaren waarom er geringe verschillen zijn qua NH_3 -concentratie tussen de aangezuurde en de referentieput. Op 14 november was de noordwesten wind zwakker (3-4 m/s). Op beide meetdagen is geen eenduidige relatie gevonden tussen de gemeten gasconcentraties en de diepte in de mestkelder (net boven de mest, net onder de roosters, en daar tussenin) waarop gemeten werd. De meetresultaten zijn indicatief en geven slechts een aanwijzing dat mest met een lagere pH lagere emissies geeft van NH_3 en CH_4 . Metingen over een langere tijd van de gehele stal zijn nodig om een representatief beeld te krijgen.



Figuur 4-3 NH₃, N₂O, CO₂ en CH₄ concentraties in de lucht in de aangezuurde put en de referentieput.

4.4 Stalvloer spoelen met dunne fractie

Er zijn vier proeven uitgevoerd waarbij de NH_3 -emissie van de referentievloer is vergeleken met de referentie stalvloer die is gespoeld met water of verschillende aangezuurde dunne fracties al dan niet met schrapen van de roostervloer (zie paragraaf 3.2.4). In Tabel 4-5 is de gemeten NH_3 -emissie na het spoelen van de stalvloer weergegeven in $\text{mg m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$ en als percentage van de referentie. De emissie van de referentie varieerde tussen 3,1 en 31 $\text{mg N m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$. De gemeten emissies bij proef 2 (tegelijk gemeten met proef 1 op 14 november) zijn hoog in vergelijking met de andere proeven. Niet duidelijk is waarom.

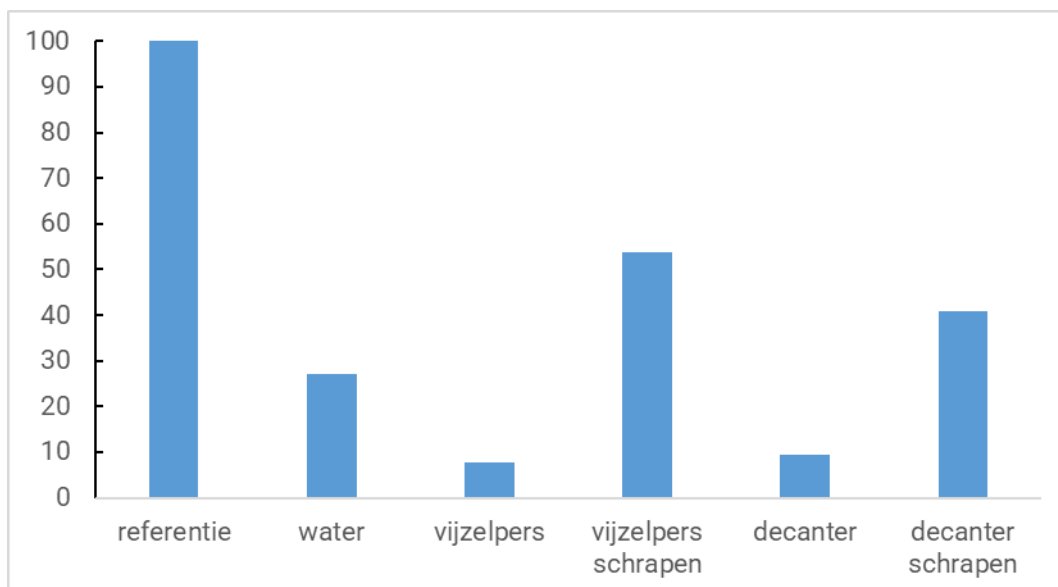
Het spoelen van de vloer met water leidde tot een emissiereductie van gemiddeld 73% in vergelijking met de referentie. De emissiereductie nam bij proeven 2, 3 en 4 toe gedurende de proef. Spoelen met beide dunne fracties leidde tot nog grotere emissiereducties dan spoelen met alleen water; een gemiddelde reductie van 92% met de dunne fractie van de vijzelpers en een gemiddelde reductie van 91% met de dunne fractie van de decanter in vergelijking met de referentie. Wanneer de vloer na spoelen met dunne fractie direct werd schoon geschraapt, nam de emissie reducerende werking van de dunne fractie sterk af. Bij proef 4 werd de NH_3 -emissie van de geschraapte dunne fractie zelfs hoger dan de referentie. Door te schrapen wordt de zure fractie weer verwijderd en wordt de mest bovendien goed uit gesmeerd. Verder heeft de roostervloer een poreuze toplaag waarin mestvocht zit van waaruit ook emissie kan plaatsvinden.

Tabel 4-5 Ammoniakemissie als percentage van de referentie. Eerste rij geeft ammoniakemissie van de referentie in $\text{mg N m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$. Proef 1 en 2 op 14 november. Proef 3 en 4 op 3 december. Gemiddelde is berekend aan de hand van de gemiddelde emissie per proef. In proef 1 is 1 meting uitgevoerd, in Proef 2 2 metingen en in de proeven 3 en 4 zijn achtereenvolgens 3 metingen uitgevoerd. Bij berekening van het gemiddelde is elke proef even zwaar gewogen (dus niet gemiddeld over meting).

Behandeling	Proef 1	Proef 2	Proef 3	Proef 4	Gewogen gemiddelde
	M1	M1 M2	M1 M2 M3	M1 M2 M3	
Referentie ($\text{mg N m}^{-2} \text{ uur}^{-1}$)	3,14	14,9 31,3	4,86 3,70 3,43	3,69 3,89 4,51	
Referentie (%)	100	100 100	100 100 100	100 100 100	100
water	41	23 19	25 24 20	25 23 20	27
vijzelpers			7 10 9	8 7 6	8
vijzelpers schrapen	35		29 34 44	63 101 105	54
decanter		7 3	8 14 32	7 10 4	9
decanter schrapen		6 5	10 12 12	79 111 122	41

In Figuur 4-4 zijn alle resultaten samengevoegd. Gemiddeld over 4 proeven gaf spoelen met zure dunne fractie ruim 90% emissiereductie en spoelen met water ruim 70%. Direct schrapen na spoelen gaf 40-50% reductie. Het is waarschijnlijk beter om niet direct maar enige tijd na spoelen te schrapen (niet getest).

Een voordeel van spoelen met aangezuurde dunne fractie ten opzichte van water is dat het totaalvolume aan te zuren mest niet toeneemt, het is immers een interne loop. Er treedt dus geen verdunning op en is daarmee waarschijnlijk ook niet nadelig voor het biogaspotentieel per kuub mest (niet getest).



Figuur 4-4 De relatieve emissie van verschillende roostervloerbehandelingen of de ammoniakemissie ten opzichte van de referentie (niet behandeld), gemiddeld over 4 meetperioden.

4.5 Incubatieproef

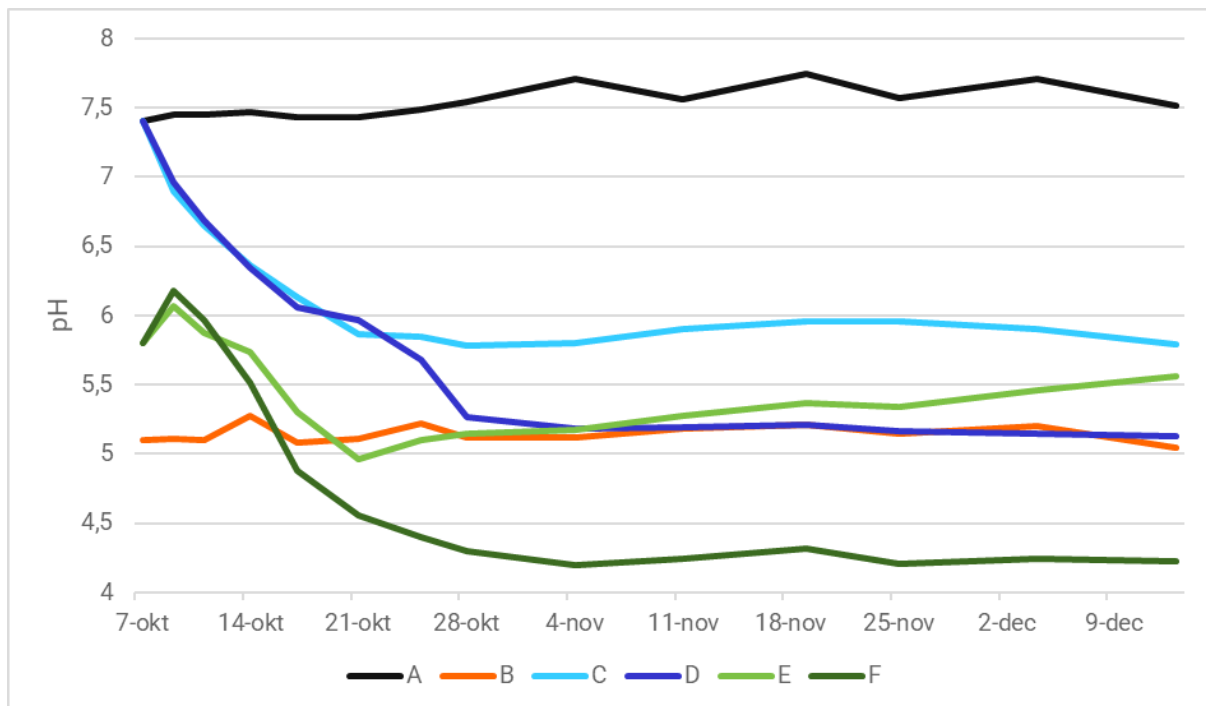
Tijdens de praktijkproef zijn mestmonsters uit de referentieput en de aangezuurde mestput naar het lab gebracht. Van de mest uit de referentieput zijn ook verschillende hoeveelheden melasse toegevoegd, eventueel in combinatie met zwavelzuur (zie H3.2.3). Het biogaspotentieel aan het einde van de incubatieproef is in H4.2.2 al besproken. Hier wordt het verloop van pH en de gasemissies besproken.

4.5.1 Verloop van de pH

Figuur 4-2 geeft de gemiddelde pH per behandeling weer gedurende de proef. De pH van de referentie bleef vrij constant rond de 7,5. De aangezuurde mest uit de put (B) was gedurende de gehele periode (10 weken) ongeveer gelijk aan de startwaarde van 5,1. Bij de mest waar enkel melasse aan toe is gevoegd (behandeling C en D) is te zien dat de daling in pH gedurende de eerste twee weken gelijk was. Na twee weken werd de pH bij behandeling C constant en bleef op een niveau van ongeveer 5,8. Behandeling D (met meer melasse) fermenteerde nog een week langer door en produceerde zo meer zuur. De pH daalde uiteindelijk tot ongeveer pH 5,2.

In twee van de behandelingen werd aan mest uit de referentieput 6,6 liter zwavelzuur per kuub mest toegevoegd + 2,5% melasse (E) en +4% melasse (F). De start pH werd gemeten voor het toevoegen van de melasse. Hierdoor was op dag 2 de pH bij behandelingen E en F iets opgelopen. Daarna daalde bij behandeling E de pH in twee weken tot rond de 5. Hierna nam de pH langzamerhand toe tot 5,5 aan het eind van de meetperiode. Bij behandeling F werd de laagste pH bereikt. Na drie weken was de pH rond de 4,3 en deze bleef constant tot het einde van de meetperiode.

Opvallend was dat de pH enkel bij behandeling E na verloop van tijd begon op te lopen. Eerdere verkennende proeven met een kleinere hoeveelheid mest (100 g) lieten zien dat de pH van mest die was aangezuurd met melasse na verloop van tijd weer begon op te lopen. Het verschil met de verkennende proeven is te verklaren door de kleinere oppervlakte/inhoud verhouding bij deze incubatieproef, waardoor er minder contact is met zuurstof uit de lucht wat voor omzettingen kan zorgen. De pH van de mest blijft daardoor langer stabiel laag. Dat wordt bevestigd door de incubatie van 1 m³ aangezuurde mest in een IBC (zie Figuur 4-7), waar de pH ongeveer constant 5 bleef over een periode van een half jaar.



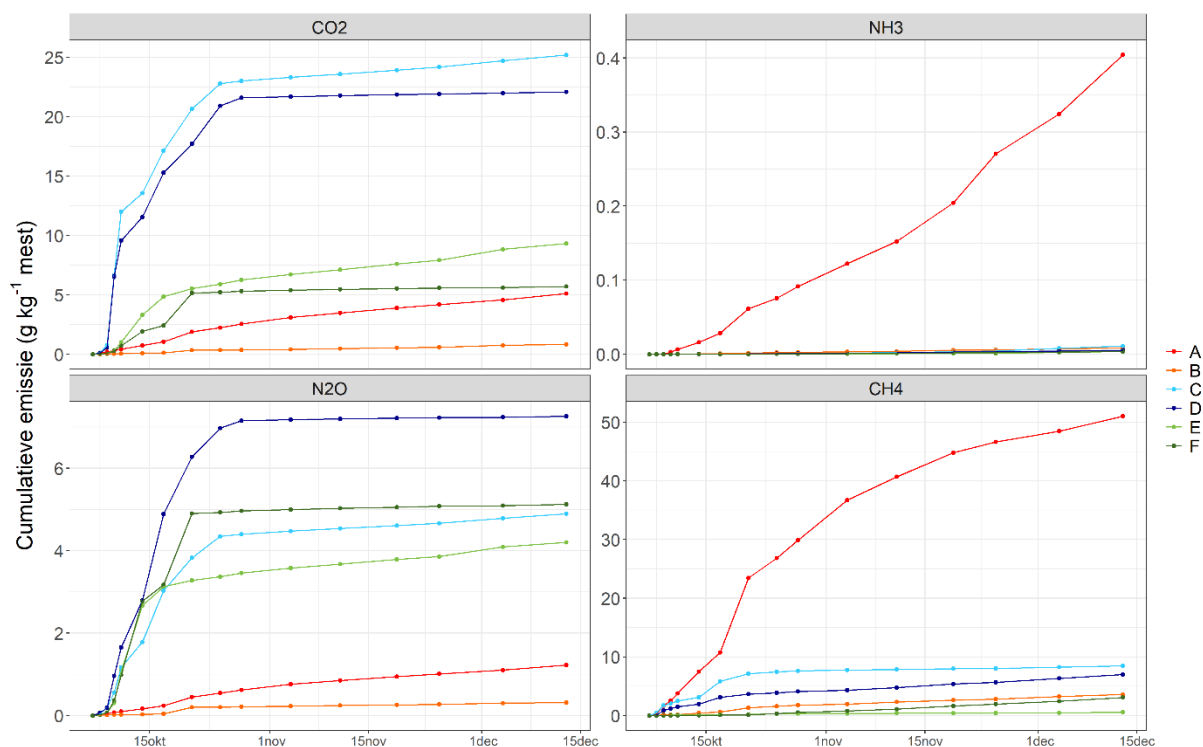
Figuur 4-5 Het pH beloop van de verschillende behandelingen gedurende de incubatieproef (A: onbehandelde mest uit referentieput, B: mest uit de aangezuurde put, C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse, D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse, E: mest uit de referentieput + 6,6 liter zwavelzuur per kuub mest + 2,5% melasse, F: mest uit de referentieput + 6,5 liter zwavelzuur per kuub mest + 4,0% melasse).

4.5.2 Gasemissies

Tijdens de incubatieproef zijn van de verschillende behandelingen de gasemissies gemeten. Figuur 4-6 geeft de cumulatieve emissies van CO₂, NH₃, N₂O en CH₄ gedurende de proef. De emissies van NH₃ en CH₄ zijn sterk gereduceerd door het aanzuren van de mest. Ten opzichte van mest uit de referentieput (A) is de NH₃-emissie van de mest uit de aangezuurde put 98% lager en is de CH₄-emissie 93% lager. De andere behandelingen leverden gelijke reducties met betrekking tot NH₃. De reductie van CH₄-emissie varieerde tussen 83 en 99%. In Bijlage 2 en 3 is meer detailinformatie gegeven.

De CO₂-emissie was het hoogst bij de behandelingen die enkel zijn aangezuurd met melasse (C en D). Dit komt omdat de verzuring bij toediening van melasse langzaam op gang komt waarbij de gevormde H⁺ reageert met de in de mest aanwezige HCO₃⁻ en CO₃²⁻ tot CO₂. Bovendien komt bij de omzetting van melasse ook wat CO₂ vrij. Op het moment dat de pH constant wordt, neemt de CO₂-emissie sterk af en komt bijna stil te staan. Wanneer de mest eerst wordt aangezuurd met zwavelzuur (E en F) vindt er direct een reactie plaats met de HCO₃⁻ en CO₃²⁻ in de mest (de mest begint direct te schuimen) en komt er meteen CO₂ vrij. De mest die met zwavelzuur is aangezuurd zat op dat moment nog niet in de kolommen en die emissie is dus ook niet gemeten. De werkelijke emissie bij behandeling (E en F) zal dus hoger zijn geweest. Hetzelfde geldt voor de mest uit de aangezuurde put (B). Belangrijke kanttekening is dat wanneer de referentiemest in het veld wordt uitgereden, dat dan alsnog de CO₂ uit de onbehandelde mest vrij zal komen. Daardoor zal, cumulatief over stal en mest toedienende, de CO₂-emissie van alle behandelingen dichterbij elkaar liggen dan dat de metingen van de incubatieproef aangeven.

De N₂O-emissie neemt tijdelijk sterk toe door het biologisch aanzuren van de mest. Dit komt overeen met de bevindingen van Dalby et al. (2022) waar bij het aanzuren van varkensdrijfmest een sterke piek in N₂O emissie werd gemeten rond een pH van 6,3. Op het moment dat de pH van de mest constant wordt, neemt ook de N₂O emissie sterk af.



Figuur 4-6 Cumulatieve emissies. NH₃ in g N kg⁻¹ mest en CO₂, N₂O en CH₄ in g CO₂-equivalenten kg⁻¹ mest. (A: onbehandelde mest uit referentieput, B: mest uit de aangezuurde put, C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse, D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse, E: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 2,5% melasse, F: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 4,0% melasse).

Tabel 4-6 Stikstofbalans van de proeven. In gram N per kolom. Ervan uitgaande dat 6% van de massa van de mest is verdampt. Er is gerekend met 10 g N kg⁻¹ melasse. Laatste kolom geeft het percentage dat de hoeveelheid stikstof aan het eind van de proef + de emissie afwijkt van de hoeveelheid stikstof aan het begin van de proef.

Buis	Behan- deling	NH ₄ -N start	N-tot start	N-tot melasse	NH ₄ -N eind	N-tot eind	Gemeten emissie van N (als NH ₃ +N ₂ O)	% afwijking
1	A	16,0	34,3	0	13,2	29,9	4,9	1,3
2	A	16,0	34,3	0	14,1	31,0	3,2	0,1
3	B	12,0	39,6	0	12,2	38,4	0,1	2,6
4	B	12,0	39,6	0	12,2	39,3	0,1	0,6
5	C	14,7	31,5	8,75	16,0	39,8	0,1	1,0
6	C	14,7	31,5	8,75	16,0	39,4	0,2	1,9
7	D	14,5	31,0	10,5	16,9	44,0	0,1	6,2
8	D	14,5	31,0	10,5	16,0	41,3	0,1	0,4
9	E	14,6	31,3	3,5	16,0	35,1	0,1	0,9
10	E	14,6	31,3	3,5	16,9	35,7	0,1	2,8
11	F	14,3	30,7	5,6	16,0	36,6	0,1	0,9
12	F	14,3	30,7	5,6	16,9	37,7	0,1	3,9

De totale emissie van broeikasgassen in CO₂-equivalenten is het hoogst bij de referentiebehandeling. Biologisch aanzuren van de mest leidde bij alle behandelingen tot een lagere uitstoot van broeikasgassen. Dit is grotendeels het gevolg van de sterke vermindering in CH₄-emissie door het

aanzuren. Dit compenseert ruimschoots voor de (tijdelijke) verhoging in N_2O -emissie door aanzuren. Ter verificatie van de emissiemetingen van NH_3 en N_2O is ook een stikstofbalans van de kolommen gemaakt (zie tabel 4-5). Omdat gedurende de proef een deel van het vocht uit de mest is verdampt, was het gewicht van de mest in de kolommen niet constant. Daarom is de massabalans uitgedrukt in het totale aantal grammen stikstof in de kolommen. Uit de gemeten hoogte van de headspace van de kolommen bleek dat gemiddeld 6% van de massa is verdampt. Er is verondersteld dat de melasse ongeveer 10 g N kg^{-1} bevat (Het N-gehalte tussen partijen melasse kan verschillen en wordt niet standaard gemeten per partij. Er is daarom een inschatting gemaakt op basis van diverse resultaten van de website [agribiosource](#)). Het maximale verlies aan N - bepaald door het verschil tussen de hoeveelheid stikstof aan het begin van de proef en aan het eind van de proef + de emissie - is 6% (bepaald in kolom 7).

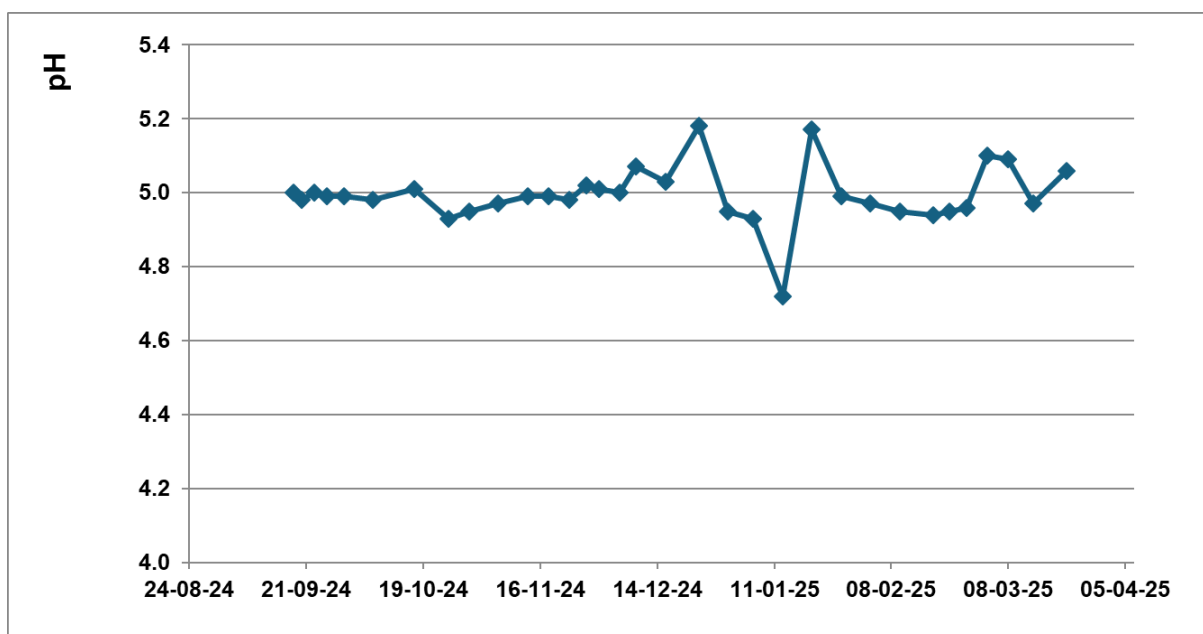
4.5.3 Overige waarnemingen

Geur

Vooraf de eerste week na toedienen van melasse was er een sterke geur. Nadien was geen sprake meer van een sterke geur. Wel werd ervaren dat de geur anders was dan van de onbehandelde mest. Dit stemt overeen met proeven uit het verleden (zie discussie). Het aanzuren van de mest leidt tot een andere geur van de mest. Er zijn geen metingen uitgevoerd naar het vrijkomen H_2S . Dit is niet gedaan omdat uit eerder onderzoek bekend was dat er geen extra risico was (zie ook discussie).

Stabiliteit mest

Op 18 september is een IBC gevuld met aangezuurde mest met een pH van 5,0. De pH werd regelmatig gemeten. Na een half jaar was de pH nog steeds 5,1 met kleine schommelingen tussentijds. De fluctuatie in pH eind december tot eind januari heeft mogelijk te maken met temperatuurschommelingen (er is tussentijds geen melasse gedoseerd).



Figuur 4-7 Het verloop van de pH vanaf 18 september tot 22 maart 2025 van een ibc gevuld met 1 m^3 Amest.

5 Verwacht economisch en milieu rendement aanzuren

Gedurende dit lopende project en het 'Tussenproject' (Sanders & Bussink, 2025) dat parallel verliep en dat zich vooral concentreerde op versnelde vergisting van dunne fractie en ongescheiden aangezuurde mest (Amest), zijn veel nieuwe inzichten verzameld. In dit hoofdstuk zijn deze inzichten samengebracht in een scenariostudie waarin onderscheid is gemaakt tussen verschillende varianten van biologisch aanzuren en het daarvan afgeleide financiële rendement en de milieuprestaties. In de scenariostudie zijn een vijftiental varianten doorerekend om economische en milieuparameters met elkaar te kunnen vergelijken. De varianten variëren in wel of niet scheiden van de mest, lokaal of extern vergisten, al dan geen ammoniakstripper, het aantal koeien en of oude of dagverse mest wordt gebruikt. De achterliggende spreadsheet is opvraagbaar bij J. Sanders (zie bijlage 4 voor details en alle uitgangspunten/ aannames en onderzochte parameters) waarvan een aantal in de onderstaande tabellen zijn samengevat. Een aantal resultaten zijn niet opgenomen in de tabel: investering per kg vermeden NH_3 -emissie, de CO_2 - en CH_4 -emissiereductie, groengasproductie per uur, het aantal vrachtwagens per jaar, straal werkgebied en vrachtwagenkilometers per jaar.

De scenario's geven een grof inzicht en richting. Een exacte inschatting is erg afhankelijk van specifieke omstandigheden en uitgangspunten, die anno 2025 snel kunnen veranderen. Daarmee kan ook de voorkeursroute veranderen. Een voorbeeld: de huidige derogatie problematiek en het daarmee ontstane mestoverschot geldt voor heel veel melkveehouders en zal over een jaar of 5 zijn afgenomen. De bijmengverplichting en daarmee de waarde van een m^3 geproduceerd groengas zal voornamelijk een moeilijk maar niet onbelangrijke in te schatten parameter worden. Bij de afronding gaan van dit rapport, op 25 april 2025 besloot het Kabinet de Bijmengverplichting van groengas in aardgas leveranties in te voeren en wel per 1-1-2027. Omdat er zeker in de eerste 5 jaren grote schaarste aan groengas zal zijn, zullen de marktprijzen hoog zijn, naar verwachting 2€/ m^3 groengas of zelfs nog hoger. In de tabellen 5-1 tot 5-3 is de SDE groengasprijs weergegeven, die nodig is om een terugverdientijd van 4 jaar te kunnen bereiken. Hieruit kan worden afgeleid dat veel scenario's sneller economisch rendabel worden al de verwachte groengasprijs boven de SDE prijs van 2025 uitkomt maar wel onder de 2€ blijft.

5.1 Algemene uitgangspunten scenario's

Voor de scenario's is verondersteld dat in de uitgangssituatie 240 kg N per ha aan dierlijke mest beschikbaar is die moet worden teruggebracht naar 170 kg N per ha vanaf 1 januari 2026 waarbij er geen wijzigingen in dieraantallen optreden. Tegelijk wordt met de aanvoer van energierijk substraat ook extra nutriënten aangevoerd en daarmee het N-overschot op bedrijfsniveau nog iets vergroot afhankelijk van de bron. In de scenarioberekeningen is er vanuit gegaan dat maximaal 5 volumeprocent melasse wordt toegevoegd per m^3 mest, wat overeenkomt met ongeveer 0,4 kg N/ m^3 mest. Deze N is na vergisting omgezet in ammoniumstikstof en kan via strippen voor een groot deel uit de mest worden verwijderd en omgezet worden in (toekomstige) Renure meststof (dat dan niet meer meetelt in de 170 kg N/ha). Er zijn ook andere energierijke substraten met een lagere N-aanvoer zoals bijvoorbeeld

snoepsiroop. Bij de aanzuurvarianten is verondersteld dat ook de vloer gespoeld wordt met aangezuurde dunne fractie.

Als potentiële inkomsten is gerekend met voor 2025 geldende SDE tarieven (stimulering duurzame energieproductie) die afhankelijk zijn van schaalgrootte. In het scenario met een NH₃-stripper, wordt ook voor de geproduceerde Renure meststof een waarde van 200€/ ton stikstof als inkomsten gerekend. In het geval dat de stripper meer stikstof uit de mest verwijdt dan de 170 kg N/ha die zonder derogatie mag worden uitgereden, dan is bovendien met inkomsten gerekend voor het plaatsen van mest uit de buurt tegen het tarief van 30€/ m³ mest.

Er is ook rekening gehouden met milieueffecten en transport. In het SDE groengas tarief is een bijdrage voor CO₂-reductie vanwege vermijden fossiel aardgas gebruik, maar niet voor reductie van methaan- en ammoniakuitstoot tijdens mestopslag, verkleinen van stikstofoverschot als gevolg van afbouw derogatie, en ook niet voor minder transportkilometers mesttransport. Mogelijk wordt dat in de nabije toekomst beloond van overheidswege en/ of door de ketenpartijen. In Bijlage 4 is meer achtergrondinformatie gegeven over de uitgangspunten voor de berekeningen.

5.2 Scenario's aanzuren en vergisting op boerderijschaal

Algemeen

Berekeningen laten zien dat op het boerenbedrijf vergisten van aangezuurde mest voordeliger is dan mono-mestvergisting vanwege een hogere gasopbrengst per m³ mest en een snellere vergisting. (Sanders, 2025). Per saldo zijn bij de aanzuurroute ook de emissie van CH₄ en NH₃ wat lager dan bij mono-mestvergisting bij een gelijke veestapelomvang. Biologisch aanzuren en vergisting op boerderijschaal opent een kosteneffectieve route voor kleinere bedrijven omdat zij geen kapitaalsintensieve stalaanpassing voor dagverse mest (hoger biogasrendement dan oude mest) nodig hebben gekoppeld aan intensieve transport intensiteit met kleine en daardoor dure vrachten. Wel is een investering in een vergister op het bedrijf nodig.

Details

In Tabel 5-1 wordt 'niets doen' (variant A) vergeleken met:

- B. alleen aanzuren van de mest en deze toedienen op het veld.
- C. een vergister met dagverse mest van 300 melkkoeien
- D. een boerderij vergister met dagverse mest van 600 melkkoeien plus een groengas faciliteit met eenvoudige ammoniakstripper
- E. een vergister met aangezuurde mest van 150 melkkoeien zonder stripper en
- F. aangezuurde mest van 150 melkkoeien zonder stripper wordt met korte verblijftijd in bestaande mono-mestvergister vergist

Bij de keuze van het aantal koeien is rekening gehouden met een vergelijkbare economische uitkomst tussen de verschillende scenario's. Een vergister is al mogelijk bij aanzuren met mest van 150 koeien. Een vergister met dagverse mest waarbij de stalvloer moet worden aangepast wordt haalbaar bij 300 koeien. Pas bij variant D is door het grotere aantal koeien (600) een eenvoudige stripper en een groengasfaciliteit aanwezig. Voor de andere drie (C, E en F) wordt verondersteld dat ze gebruik maken van de diensten van derden voor afvoer van het bedrijf van gecompriemd biogas omdat een groengas opwerking op die kleine schaal te kostbaar is. Daarvoor is met inkomsten per m³ biogas met 0,45€ gerekend.

Niets doen is duur (marge van -12 €/m³) vanwege de hoge mestafzetkosten van 80 kg N/ha (gerekend met 30 €/m³) en geeft enige emissiereductie (16%) omdat er minder mest wordt toegediend op het

Tabel 5-1. Vergelijking op boerderijschaal van de optie 'niets doen' met aanzuren en toedienen van aangezuurde mest met mestvergisting dagvers (met en zonder stripper) en na aanzuren. Een schatting van de onzekerheid op de marge is in Figuur 6-1 weergegeven.

Variant	Toelichting	Aantal koeien	SDE groen €/ m ³ (2025)	Gas benodigd* D €/m ³	Investering €/m ³	arge €/m ³	NH ₃ reductie %	Renure kg N/m ³ mest	Km**/ koe- plaats. Jaar
A	niets doen	150		0	0	-12	16	0	14
B	aanzuren + toedienen	150		0	8	-18	78 (54)***	0.0	14
C	vergister dagvers	300	1,55	3,5	94	-6,0	44	0.0	14
D	vergister dagvers stripper	600	1,21	3,3	159	-2,0	47	1,1	0
E	vergister aangezuurd	150	1,55	2,7	86	-7,4	50	0.0	14
F	bestaande mono- verg. aangezuurd	150	1,55	1,68	24	3,3	50	0.0	14

* uitgaande van een terugverdientijd van 4 jaar. ** vrachtwagen km's voor mesttransport. *** indien de vloer niet gespoeld wordt.

bedrijf. Aanzuren van mest in de stal met melasse en deze toedienen is het duurst (marge van -18 €/m³), maar leidt wel tot een sterke emissiereductie van maximaal 78% door minder NH₃-emissie uit de stal en bij toedienen en door het feit dat een deel van de mest moet worden afgevoerd om een N-overschot van 170 kg N per ha te realiseren. Als er geen N-overschot zou zijn, dan zou de NH₃-emissiereductie op bedrijfsniveau ongeveer 60% bedragen. Indien de stalvloer niet gespoeld wordt met zure dunne fractie bedraagt de emissie 54% op bedrijfsniveau. Vanwege de reductie van NH₃-emissie uit de stal, zal in het digestaat een grotere hoeveelheid NH₄⁺-N aanwezig zijn. In de berekening is hiervoor gecorrigeerd. De varianten met de aanschaf van een vergister op het bedrijf (C: dagverse mest, D: dagvers met stripper en E: aangezuurde mest) zijn economisch gunstiger dan niets doen of alleen aanzuren en komen tot vergelijkbare licht negatieve marges (-2 tot -7,4 €/m³). Echter de investering per m³ mest komt, ondanks de Economy of Scale (600 koeien, variant D), aanzienlijk hoger uit voor de grootste vergister hetgeen veroorzaakt wordt door de dure NH₃-stripper. Variant D heeft van de drie opties met aanschaf van een vergister (variant C, D, E) wel de kleinste marge (-2,- €/m³). De terugverdientijd is een maat voor de economische aantrekkelijkheid. In al deze drie gevallen wordt de investering niet terugverdiend. Het SDE tarief dat nodig is om de investeringen binnen 4 jaar terug te verdienen uit de marge, is fors hoger dan de huidige SDE tarieven hetgeen aangeeft dat deze kleine vergisters economisch niet uitkunnen, maar hun verantwoording halen uit de milieuprestaties. De bijmengverplichting van groengas als aardgas- vervanger zal tot flink hogere groengasprijzen leiden, maar deze zijn nog steeds onvoldoende voor deze boerderij vergisters.

Het meest rendabele scenario (marge van +3,3 €/m³) is wanneer er op het bedrijf al een vergister aanwezig is (variant F). Vanwege de snelle vergistbaarheid van de aangezuurde mest kan tenminste een even grote hoeveelheid mest extra in een al bestaande vergister worden mee vergist. Omdat de investering in een vergister wordt uitgespaard kunnen de overige investeringen al binnen 4 jaar worden terugverdiend bijna voor het huidige SDE tarief.

Vergisten van dagverse mest leidt tot een sterke emissiereductie van NH₃ vergeleken met niets doen (A). Het is wel lager dan van alleen mest aanzuren (B). Strippen (D) en aanzuren (E en F) leiden beide tot een kleine extra emissiereductie ten opzichte van alleen vergisten. Voor de berekening van NH₃-emissiereductie is uitgegaan van een gemiddelde NH₃-N uitstoot per koe van 10,7 in de stal en 10,2 kg bij het uitrijden van mest mede omdat de mest iets verrijkt is. De ingeschatte NH₃-emissiereductie bij dagverse mest op bedrijfsniveau is berekend op 30%. Bij dagverse mest is er geen uitstoot uit de put en

de uitstoot van de vloer is gereduceerd. Na het vergisten is echter tijdens de wintermaanden het digestaat opslag nodig waarbij er weliswaar nauwelijks NH₃-emissiereductie plaatsvindt ten opzicht van 'niets doen', maar de emissie is bij toedienen hoger vanwege een hoger ammonium-N gehalte in de mest. Door deze mest te strippen (variant D) daalt het gehalte van de mest en daarmee de emissie uit opslag van het digestaat, maar vooral bij het toedienen van mest. De berekende emissiereductie voor variant E en F zijn iets hoger als gevolg van het aanzuren in vergelijking met variant D.

Vanwege de NH₃-stripper (D) komt er ongeveer 1,1 kg Renure stikstof beschikbaar per m³ mest van ca 4 kg N. Dit is net genoeg om gemiddeld geen mest te hoeven afzetten na afbouw derogatie (hier terug van 240 naar 170 kg N/ha). Daardoor komt de configuratie met boerderij stripper (D) gunstig uit en zijn geen vrachtwagen kilometers nodig omdat er geen mestoverschot is. Voor de andere scenario's is ongeveer 14 vrachtwagenkilometers transport nodig per koeplaats per jaar voor afzet van mest.

Bij de varianten C en D en bij E en F is een biogasproductie berekend van respectievelijk 35 en 50 m³ per m³ mest.

5.3 Scenario's met samenwerkingsverbanden voor vergisting

Algemeen

Samenwerkingsverbanden leiden tot een aantrekkelijke Economy of Scale en daardoor bieden deze investeringsruimte voor een eigen ammoniakstripper en groengasopwerking en dat leidt tot verdere verlaging van de NH₃-emissie en verkleining van het stikstofoverschot in de keten en hogere groengas productie en inkomsten. Maar samenwerken is niet gemakkelijk.

Details

In Tabel 5-2 wordt een *biogashub* waar 8 kleine boerderij vergisters (zonder stripper) voor de mest van 150 koeien op zijn aangesloten (variant G, in Tabel 5.2), vergeleken met verschillende mesthubs qua schaalgrootte met oude en dagverse mest en met wel of niet aangezuurde mest:

- H. oude mest 3300 melkkoeien
- I. dagverse mest van 1200 melkkoeien
- J. aangezuurde mest van 1200 melkkoeien
- K. aangezuurd van 3300 melkkoeien
- L. aangezuurd van 10000 melkkoeien

waarbij steeds ammoniakstrippen plaatsvindt met een efficiënte stripper.

Tabel 5-2. Vergelijking van 1 biogashub (G) en 5 mesthub varianten (H tot en met L) die alle 5 voorzien zijn van een stripper'. Een schatting van de onzekerheid op de marge is in figuur 6-1 weergegeven

Variant	Toelichting	aantal koeien	SDE groen €/ m ³ (voorjaar 2025)	gas benodigd* €/m ³	investering €/m ³	marge €/m ³	NH ₃ reductie %	Renure kg N/m ³ mest	Km**/ koe- plaats. Jaar
G	Biogashub dagvers	1200	1,21	4,8	184	-30	45	0.0	14
H	oude mest	3330	1,21	2,0	64	6	43	2,1	5
I	dagvers	1200	1,21	2,7	135	6	69	2,2	3
J	aangezuurd	1200	1,21	1,7	108	13	74	2,3	3
K	aangezuurd	3300	0,91	1,25	67	9	74	2,5	5
L	aangezuurd	10000	0,91	0,91	51	18	74	2,5	9

* uitgaande van een terugverdientijd van 4 jaar. ** vrachtwagen km's voor mesttransport.

De biogashub dagvers heeft een sterk negatieve marge. Dit wordt veroorzaakt doordat ieder van de deelnemende boeren zijn stalvloer moet aanpassen, een eigen kleine vergister moet aanschaffen inclusief navergister, er biogas transportleidingen gelegd moeten worden naar de centrale groengasopwerking voor invoer in het gasnet. Omdat er op deze kleine schaal niet is geïnvesteerd in kleine ammoniakstrippers omdat de investering op deze kleine schaal onevenredig hoog is, moet het overschot aan stikstof toch van elk van de boerenbedrijven worden afgevoerd tegen hoge kosten. Indien de aan de hub verbonden boeren hun mest twee aan twee gezamenlijk zouden vergisten, dan zou de gezamenlijk investering significant lager en de business case daardoor minder negatief uitvallen.

Variant I met gezamenlijk 1200 melkkoeien, scoort beduidend beter met een positieve marge van 6 €/m³ in vergelijking tot boerderijvergister dagvers met 300 koeien (-3 €/m³ variant C, Tabel 5.1), wel zijn de investeringskosten per m³ bij variant I hoger dan bij C omdat nu een stripper en een eigen groengas opwerking aanwezig is. Bij een mesthub voor 1200 melkkoeien geeft aangezuurde mest (variant J) een veel hogere marge (13 €/m³) dan dagverse mest (variant I). Minstens zo belangrijk is dat met beide Mesthub varianten veel hogere NH₃-emissiereducties te behalen zijn van respectievelijk 74 en 69% op bedrijfsniveau inclusief uitrijden. De Biogashub dagvers haalt ongeveer 45% emissiereductie dat bij het vergisten van rijpe mest iets hoger is dan van oude mest. Door het strippen wordt een goede hoeveelheid Renure gemaakt en is er geen mestoverschot met kortere vrachtwagenkilometers per koe tot gevolg.

Om bij het vergisten van oude mest een vergelijkbare marge als bij dagvers te realiseren is mest van bijna 3 keer zoveel koeien nodig.

Bij grotere mesthubs gaat het Economy of Scale voordeel sterker mee te tellen. Hoewel bij variant K (3300 koeien, 100.000 m³ mest) de marge wat lager is dan bij variant J (1200 koeien), door de lagere SDE-vergoeding, hoeft de SDE-vergoeding minder te stijgen om de investeringen binnen 4 jaar terug te verdienen. Bij een zeer grote mesthub (variant L, komt overeen met 300.000 m³ mest) is de investering binnen 4 jaar terugverdiend ondanks de lagere SDE-vergoeding. Bij grotere mesthubs is een duurdere maar efficiëntere stripper¹⁾ inzetbaar waardoor meer N teruggewonnen kan worden als potentiële Renure meststof. Wel nemen bij de grotere installaties het aantal km's per koeplaats weer licht toe omdat mest van verder weg aangevoerd moet worden. Transport is echter nog steeds minder dan 'niets doen' (variant a Tabel 5.1) of het biogashub scenario (variant G Tabel 5.2) waarbij vanwege derogatie afbouw ongeveer 1/3 van de mest van het bedrijf afgevoerd moet worden.

Profiteren van grote schaal voordelen, betekent tegelijkertijd samenwerken en dat is niet altijd even gemakkelijk. Eigen baas zijn moet afgewogen worden ten opzichte van samenwerken in gemeenschappelijk bedrijf of coöperatie of tegen een langjarig leveringscontract gekoppeld aan een fors poorttarief.

Een punt van aandacht kan zijn het hygiëniseren van mest. Wanneer de mest van meer dan één bedrijf vergist wordt en het digestaat op een of andere wijze weer teruggebracht wordt om uit te rijden dan is hygiëniseren van de mest aantrekkelijk/ noodzakelijk om mogelijke ziekte verspreiding tussen de deelnemende bedrijven te beheersen. Het ligt voor de hand om het hygiëniseren te integreren met strippen van ammoniak omdat daarbij ook warmte nodig is. Bij een grote stripper is het hygiëniseren in de kostprijs inbegrepen met een goede warmte wisselaar voor de warmterecuperatie. Deze warmte kan worden verkregen uit de restwarmte die ontstaat bij het comprimeren van biogas wat nodig is voor de scheiding van CH₄ en CO₂. De warmte die hierbij vrijkomt verlaagt de warmtebehoefte voor efficiënt strippen en hygiëniseren. De warmte die van deze processen vrijkomt bij lagere temperatuur dan de ingangstemperatuur kan gebruikt worden om de vergister 's winters op temperatuur te houden. Met een grotere snelheid vergisten gecombineerd met hoge biogasopbrengst per m³ mest levert voordeel in de warmtehuishouding omdat weliswaar het opwarmen van de mest naar bedrijfstemperatuur van de vergister per m³ gelijk is ten opzichte van reguliere mest en daardoor in de tijd groter, maar de afkoeling van de vergister zelf is onafhankelijk van de instroomsnelheid van de mest en daardoor in de tijd gelijk.

5.4 Scenario's mestvergister met coproducten

In deze scenario's wordt als referentie een co-vergister met aangezuurde mest die wordt vergist in een *mesthub* van 1200 melkkoeien vergeleken met co-vergister met mest van 300 koeien en daardoor een beter SDE groengas tarief en vergeleken met mest van 300 koeien co-vergist met kippenmest met een nog beter SDE tarief omdat het hier om mono-mestvergisting gaat en niet om co-vergisting (In Tabel 5-3). Bij alle drie de varianten vindt stikstofstrippen plaats met een (efficiënte) stripper. Dit is lonend omdat de cosubstraten (en kippenmest) veel stikstof verhoging opleveren ten opzichte van de mest van de koeien.

Tabel 5-3. Vergelijking van 2 co-vergister *mesthub* varianten met aangezuurde "mono"-mestvergisting varianten (M tot en met O) die alle 3 voorzien zijn van een stripper'. Een schatting van de onzekerheid op de marge is in figuur 6-1 weergegeven. De kostprijs (en uiteindelijke beschikbaarheid) van cosubstraten heeft grote invloed op de marge.

Variant	Toelichting	aantal koeien	SDE groen €/ m ³ (voorjaar 2025)	gas benodigd* €/m ³	investering €/m ³	marge €/m ³	NH ₃ reductie %	Renure kg N/m ³ mest	Km**/ koe- plaats. Jaar
M	co-vergist + aangezuurd	1200	0,91	0,91	153	36	76	13,5	3
N	co-vergist + aangezuurd	300	0,91	1,11	256	24	54	11,2	1
O	aangezuurd + kippenmest	300	1,21	1,8	217	12	54	5,0	1

* uitgaande van een terugverdientijd van 4 jaar. ** vrachtwagen km's voor mesttransport.

Het inzetten van co-producten bij de vergisting en waarbij biogasopbrengsten van rond de 400 m³ per ton mest of meer behaald worden, maakt dat zowel op vergisterniveau maar ook op de groengas opwerking en in mindere mate voor de stripper een Economy of Scale voordelen behaald worden. De boerderijstripper die met rundermest maar 1 kg N uit het digestaat stript, kan in het (stikstof rijkere) digestaat van een co-vergister veel hogere striprendementen behalen (omdat met de cosubstraten extra stikstof is toegevoegd aan het systeem) en daarmee meer Renure meststoffen maken. Daardoor is het mogelijk om zelfs op boerderijschaal met 300 koeien met aangezuurde mest redelijke marges te halen.

Bij een terugverdientijd van 4 jaar kan een co-vergister met aangezuurde mest van 1200 koeien uit met het SDE tarief van 0,91€/ m³ groengas. Een co-vergister met aangezuurde mest van 300 koeien heeft een vele kortere terugverdientijd dan een boerderijvergister met 300 koeien op dagverse mest (variant C, Tabel 5-1) zoals beschreven in sectie 5.2. Een "mono"-mestvergister die met kippenmest (variant O) en niet met co-producten de biogasopbrengst weet te verhogen, heeft met een groengasprijs van 1,8€/m³ al genoeg en dat is twee maal lager dan die van de boerderijvergister met dagverse mest van 300 koeien die pas bij een gasprijs van 3,5€/m³ een terugverdientijd van 4 jaar heeft. Veel belangrijker nog is dat de co-vergister en ook de mono-mestvergister met kippenmest - ook bij de omvang van 300 koeien goede milieuprestaties levert, waarbij de ammoniakemissie sterk (54%) is gereduceerd.

Bij een verwachte groengasprijs van 2€ per januari 2027, zodra de Bijmengverplichting is ingevoerd, zou variant O, de mono-mestvergister met kippenmest economisch rendabel worden. Voor de andere twee co-vergister varianten is dat al veel eerder het geval. Dit maakt dat ook duurdere co-producten mogelijk zijn en dat betekent dat het aantal kleine co-vergisters groter kan worden.

5.5 Kostendekkendheid algemeen

De inkomsten uit groengas, Renure, en zelfs verwijdering van N door middel van NH₃ strippen (waarbij ook mest van omliggende bedrijven kan worden aangewend wanneer het strippen leidt tot lagere

gehalten dan 170 kg/ ha dierlijke mest) zijn veelal onvoldoende om de investerings-, en materiaalkosten volledig te compenseren op basis van de huidige SDE tarieven..

Van de 15 scenario's levert slechts een drietal een bescheiden marge op die voor grootste deel komt uit de groengas inkomsten. Daarnaast zijn er bescheiden inkomsten door Renure meststoffen en wanneer de stripper meer NH_3 uit het digestaat stript dan noodzakelijk is om voor het betreffende bedrijf binnen de 170 kg dierlijke N/ ha te blijven. In het laatste geval ontstaat er enige ruimte om onbehandelde mest uit de buurt op te nemen en uit te rijden. Voor deze mest is een tarief gerekend van 30€/ m³.

Terwijl Economy of Scale een belangrijke route biedt ter verbetering van de marges, is er pas bij 300.000 m³ (10.000 koeien) biologisch aanzuren, vergisten en strippen een terugverdientijd kleiner dan 4 jaar. Een co-vergister met mest van 1200 koeien komt tot een marge van 36€/m³ en 4 jaar terugverdientijd indien de cosubstraten voor hoogstens per 0,30€/ m³ biogas bijdragen. Een boer met 300 koeien die in plaats van cosubstraten kippenmest inzet in zijn mono-mestvergister behaalt hogere SDE gas tarieven en komt daardoor uit op een marge van 8€/ m³. Bij de scenario's zonder extra stappen, met aanzuren en met een vergister op het bedrijf (varianten A t/m E) zijn de terugverdientijden veel groter dan 4 jaar. Wanneer er op het bedrijf al een vergister aanwezig is (variant F) komt de terugverdientijd in de buurt van de 4 jaar. In de praktijk kunnen deze varianten (met 300-600 melkkoeien) op termijn alleen renderen indien de boer zelf of een groep boeren en/ of andere (keten) partijen bijdragen in de (investerings)kosten. NB. Vanaf het moment dat de Bijmengverplichting groengas is ingevoerd, zal de marktprijs van groengas beduidend hoger zijn dan de huidige SDE tarieven. Daardoor wordt een groter aantal varianten zoals in dit rapport beschreven economisch aantrekkelijk.

6 Discussie, conclusies en aanbevelingen

6.1 Biologisch aanzuren in de praktijk

De pilot biologisch aanzuren heeft ruim een half jaar gelopen. De focus lag voor een belangrijk deel op “werkt aanzuren grootschalig in de praktijk en wat kan het betekenen voor emissies en het biogaspotentieel.” De resultaten laten zien dat de pH op een voldoende laag niveau gehouden kon worden (rond de 5,5), dat het biogas- en groengaspotentieel toenam tot respectievelijk ruim 50 en 30 m³ per kuub mest. Over de periode eind augustus tot begin april is bijna 1800 m³ Amest gerealiseerd. Frequent mixen was alleen initieel nodig. Nadien werd alleen gemixt bij het toevoegen van melasse.

Om de pH op 5,5 te houden was gemiddeld 6,7 volume% melasse nodig. Dit verbruik is relatief hoog in vergelijking met een eerdere proef (Meiresonne et al., 2024) op een melkveebedrijf in Noord-Brabant waar 240 m³ mest is aangezuurd. Daar werd ongeveer 3,8% melasse gebruikt. Dit grote verschil heeft meerdere oorzaken. Op bedrijf Pimmelaar werd gestart met een 40% volle mestopslag. In Brabant werd gestart met een wat legere put (ca 15% gevuld) en daardoor was het aandeel dagverse mest hoger na 11 weken. Ook het rantsoen kan verschillen veroorzaken. Indien het eiwitgehalte van het rantsoen in Noord-Brabant lager zou zijn geweest (niet bekend) dan in Groningen (168 g per kg drogestof) betekent dit dat minder melasse nodig is. Bij een lagere uitscheiding van ureum wordt minder ammoniumcarbonaat gevormd in de drijfmest en is minder zuur nodig om de pH te laten dalen. Een ander belangrijk verschil is dat in Noord-Brabant bij de start van de proef een overmaat aan melasse is gedoseerd (12%), waardoor de pH sterk daalde en wel tot 4,7. Daarnaast was de temperatuur in de mestput (rond de 10°C) zo’n 5-10 graden lager vergeleken met de eerste 2 maanden van de proef bij Pimmelaar. Mogelijk geeft dit een efficiëntere omzetting van de suikers in melasse naar melkzuur (homofermentatie). Een factor die ook van invloed is op het relatief hoge melasseverbruik bij Pimmelaar is het gebruik van kalk in de boxen. Op jaarbasis wordt er 20 ton kalk gebruikt. Dit betekent dat gedurende de proefperiode in het staldeel met 60 koeien ruim 2,5 ton kalk in de mestput terecht is gekomen. Deze kalk buffert de zuurproductie en moet dus ook worden weg gebufferd. Berekend is dat dit kalk ongeveer 1,5% (15 liter per m³) melasse vergt.

Het kalkgebruik, de start met veel oudere mest en relatief veel eiwit in het rantsoen zijn waarschijnlijk de belangrijkste oorzaken voor het relatief hoge melasseverbruik. De verwachting is dan ook dat zonder kalk in de boxen, beginnen met weinig oude mest en een eiwitarm rantsoen zal leiden tot minder dan 5% melasse toevoeging. Mogelijk kan nog verder worden gefinetuned door gericht te sturen op homofermentatie, wat tot meer melkzuur leidt dan heterofermentatie. Dat vergt aanvullend onderzoek.

6.2 Ammoniak- en methaanemissie

Proeven

Uit de incubatieproef bleek dat de ammoniak- en methaanemissie van aangezuurde mest van het bedrijf Pimmelaar met meer dan 90% werd gereduceerd (respectievelijk 98 en 93%) ten opzichte van onbehandelde mest. De puntmetingen die zijn uitgevoerd in de stal op de roostervloer gaven aan dat

vloerspoelen met zure dunne fractie (verkregen na mestscheiding van de aangezuurde mest) de vloeremissie met ongeveer 90% deed dalen. Concentratietingen onder de roosters lieten zien dat concentraties verlaagd zijn maar dat de variatie in meetwaarden groot is. Fuchs et al. (2021) geeft een overzicht van gerapporteerde waarden in de literatuur van aanzuren van mest in labproeven. Ruwweg variëren de emissiereducties tussen 60 en 90%. Uit hun proeven op praktijkschaal bleek dat een organisch zuur (azijnzuur) efficiënter was in het reduceren van NH_3 - en CH_4 -emissie dan zwavelzuur bij pH 5,5. Bij aanzuren met een mix van 25% zwavelzuur en 75% azijnzuur was de emissiereductie respectievelijk 78% en 92%, terwijl bij een verhouding van 75% zwavelzuur en 25% azijnzuur emissiereducties van respectievelijk 71% en 89% zijn gemeten.

De gegevens geven aan dat aanzuren effectief is. Om emissiecijfers op praktijkschaal te verkrijgen zijn aanvullende metingen nodig over de gehele stal. Om vloerspoelen in te praktijk te implementeren moet er nog wel een systeem van vloerspoelen worden ontwikkeld. Mogelijk kunnen bestaande systemen voor water daarvoor worden aangepast.

Scenario's

In hoofdstuk 5 is voor verschillende situaties berekend welke emissiereducties is te behalen zijn uitgaande van het feit dat er 240 kg N per ha beschikbaar is en dat deze teruggebracht wordt tot 170 kg N/ha. Alleen mestafvoeren leidt dan op bedrijfsniveau tot maximaal 16% ammoniakemissiereductie bij dag en nacht opstallen. Is er veel weidegang op bedrijf dan is de emissiereductie lager. Alleen aanzuren en emissiearm uitrijden van 170 kg N/ha is berekend op maximaal 78% (indien de vloer gespoeld wordt en inclusief minder uit te rijden mest). Indien het bedrijf geen N-overschot heeft en geen vloerspoeling toepast dan is het ongeveer 65%. In eerdere studies zijn reducties van meer dan 50% genoemd (Bussink et al., 2012, 2014; Puente et al., 2022) waarbij de precieze bedrijfsinrichting bepaalt wat het percentage is. Alleen de put aanzuren en de aangezuurde mest toedienen kan ook. Het is wel een dure oplossing afhankelijk van de kosten van het substraat. Toch kan deze oplossing zeker op de korte termijn interessant zijn omdat deze vrijwel direct is op te starten en in principe ook bij een groot aantal bedrijven een groot effect heeft op de emissies en vaak toch nog goedkoper is dan alternatieven. Wel moet daarvoor de borging worden geregeld (zie verderop).

Door aangezuurde mest te vergisten neemt het emissiepotentieel voor NH_3 weer toe doordat de vergiste mest een relatief hoog gehalte aan minerale stikstof heeft en de pH van de vergiste mest hoog is (rond de 8). Er zijn dan extra maatregelen nodig om niet alsnog extra verliezen te krijgen bij het toedienen van mest. Dit kan door op bouwland de mest te injecteren. Op grasland zijn er nog geen operationele technieken beschikbaar die lagere emissies geven dan zodenbemesting. Het is dan ook van belang dat mest in de vergister gestript wordt. Bij kleinschalige vergisters zijn dan op bedrijfsniveau emissiereducties van 35-50% mogelijk. Bij grootschalige vergisters zijn dan reducties van rond de 70% mogelijk. Voor alle doorgerekende situaties geldt dat de methaanemissie uit de opslag sterk afneemt mogelijk met meer dan 90% op basis van de uitgevoerde incubatiestudie. In de literatuur worden iets lagere waarden genoemd, maar dat betreft veelal aanzuren met minerale zuren. Onderzoek van Fuchs et al (2021) geeft aan dat organische zuren de emissie van methaan bijna volledig onderdrukken. Onderzoek in het lab toont aan dat de methaanemissie laag blijft, ook als de pH van de mest weer toeneemt (Deru et al., 2024).

6.3 Geuremissies, overige gassen en risico betonaantasting

Geuremissie

Bekend is uit aanzuuronderzoek met salpeterzuur op ROC Bosma Zathe (Van Lent et al., 1995) dat aangezuurde mest anders ruikt. Vooral bij opstarten van het aanzuren kan er de eerste dagen een sterke geur zijn die later afneemt. Dat werd ook zo ervaren op het bedrijf Pimmelaar. Na drie weken was er

geen verschil meer waarneembaar door de boer en drie ervaren erfbezoekers. Geur wordt bepaald door veel componenten, waaronder vluchtige vetzuren (VVZ). Uit hun onderzoek bleek dat het gehalte VVZ tussen oude mest die aangezuurd werd en onbehandelde mest nauwelijks verschilde. Daarentegen was het gehalte VVZ in verse drijfmest (direct na de productie) die werd aangezuurd 3 tot 6 keer lager dan van de onbehandelde mest. Dat betekent dat in verse mest minder VVZ geproduceerd worden. De sterke afname in VVZ laat zich waarschijnlijk verklaren door het stilleggen van de methanogenese waardoor geen of vrijwel geen VVZ worden geproduceerd. In maart 2025 zijn vetzuurbepalingen gedaan door Sanders en Bussink (2025) in biologisch aangezuurde mest en mestfracties. In de aangezuurde mesten waren de vetzuurgehalten hoger dan in onbehandelde mest en dan vooral in de dunne aangezuurde fractie (verkregen na mestscheiding).

In het vroegere onderzoek zijn er geurmetingen gedaan bij toedienen van aangezuurde mest. Bussink (1989) en Bussink et al. (1991) hebben de geur- en vetzuuremissie volvelds bepaald van toegediende aangezuurde drijfmest met een micrometeorologische methode. De conclusie was dat er weinig verschil was in geur- en vetzuuremissie. In recenter onderzoek Bussink et al. (2014) met biologisch aangezuurde mest is de geur kwalitatief onderzocht maar daar kwam geen eenduidig beeld uit. In onderzoek daarna is er beperkt aandacht voor geuremissie. Fuchs et al. (2021) concludeerde dat aanzuren met organisch zuur; azijnzuur minder geuremissie gaf dan aanzuren met zwavelzuur. Regueiro et al. (2022) geeft aan dat eerst mest aanzuren tot pH 5,5 en daarna organische substraten toedienen tot minder vetzuurproductie leidt dan alleen toevoegen van organisch substraat.

Overige gassen

Op ROC Bosma Zathe is in 1990 op meerdere tijdstippen kort voor en na aanzuren ook de concentratie H_2S en HCN gemeten met Drägerbuisjes. Uit de metingen bleek dat zowel voor als na het mixen, onder de roosters en op dierhoogte bij aangezuurde mest geen HCN en H_2S voorkwamen. Op basis van deze resultaten zijn er nadien geen metingen meer uitgevoerd in 1991 en 1992. Bekend is dat bij aanzuren met zwavelzuur er H_2S kan ontstaan (Eriksen et al. 2008). Bij toevoeging van organisch zuren is dat nauwelijks het geval zo laat onderzoek van Fuchs et al (2021) zien. Bij aanzuren met azijnzuur op stalniveau gedurende een langere periode was de concentratie van H_2S erg laag en werd de emissie van H_2S zelfs gereduceerd. Dat verwachten Fuchs et al., (2021) ook bij inzet van andere organische zuren. Toepassing van azijnzuur verbeterde de kwaliteit van verzuurde mest voor gebruik in de daaropvolgende biogasproductie, wat ook is aangetoond door Bussink et al. (2014).

Indicatief is in september en november 2024 het H_2S -gehalte in de mest bepaald. Er waren geen verschillen tussen aangezuurde en niet aangezuurde mest. Verder heeft de veehouder in de stal met een H_2S meter geen waarden gemeten boven ppm niveau.

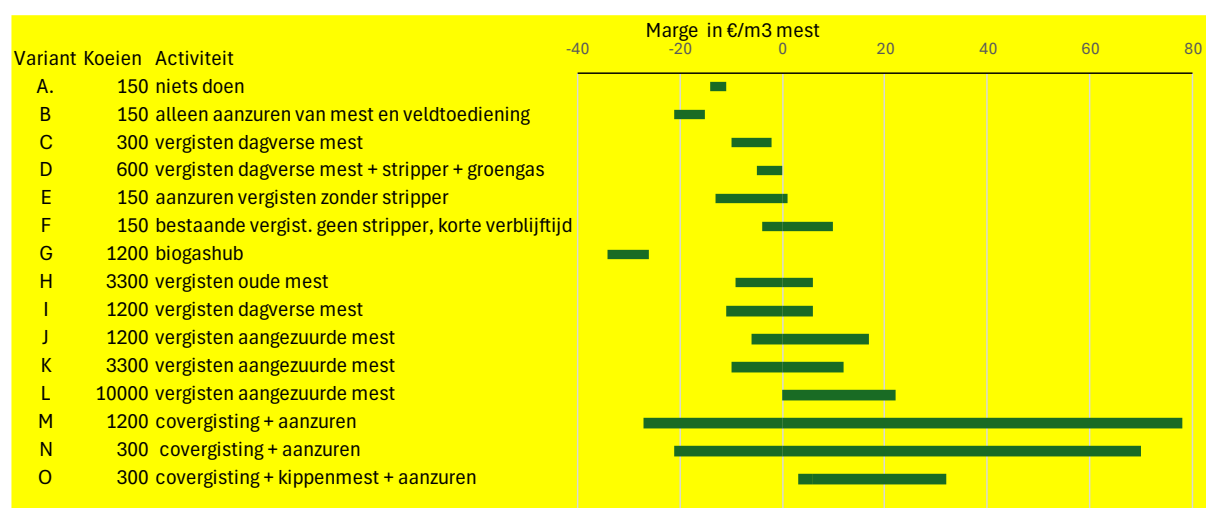
Beton aantasting

Van Lent et al (1995) geven aan dat de corrosie van de mestopslag door aangezuurde mest slechts in beperkte mate is onderzocht. In een 14 maanden durende proef leek de aantasting van proefstukken beton, kalkzandsteen en metselmortel gelijk aan die bij onbehandelde mest. De mest wordt aangezuurd tot een pH van 5,5 wat ongeveer overeenkomt met de pH van regen. Wel was de pH na 6 maanden op de proefstukken met aangezuurde mest opgelopen naar 7 (waarschijnlijk door de blootstelling aan de lucht van slechts een dunne laag mest).

In Denemarken is gekeken naar de aantasting van beton door aanzuren met zwavelzuur tot pH 5,5. Anonymus (2019) stellen dat betonafbraak door het aanwezige sulfaat groter is dan de aantasting als gevolg van het zuureffect. Bij biologisch aanzuren is geen sulfaat aanwezig in de mest. Over een tijdshorizon van 20-25 jaar verwacht men geen grote problemen. Ook een studie in de Baltisch regio verwacht geen grote problemen (Lyngsø et al., 2019). Aanvullend onderzoek kan uitsluitsel geven.

6.4 Onzekerheid economisch rendement en stikstofoverschot

Berekend is wat voor verschillende varianten het te verwachten rendement is van biologisch aanzuren in combinatie met mestvergisting en stikstofstrippen. Deze berekeningen worden door een groot aantal parameters beïnvloed. In Figuur 6-1 is behalve de marge berekend voor de 'Base case' ook voor elke variant een 'Worst case' en een 'Best case' doorgerekend door een beperkt aantal parameters te veranderen. In de worst case zijn de kosten voor afvoer mest 5€ hoger per m³ en zijn de melasse of cosubstraat kosten 20% hoger dan in de Base case en zijn de gasopbrengsten 10% lager. Ook zijn er geen inkomsten uit organische stof en opvangruimte voor stikstof van de burens. Bij de Best case is het afvoer tarief voor mest 5€/m³ lager, zijn de melasse en cosubstraat prijzen 20% lager en zijn de gasopbrengsten 10% hoger. Deze worst en best cases geven een indruk van de economische gevoeligheden. De spreadsheet is beschikbaar om andere parameters te variëren. Rekening houdend met de brandbreedte is onder gunstige condities ook bij de kleinschaligere varianten een neutraal tot licht positief resultaat mogelijk. Bij de grootschaligere varianten is het financieel rendement duidelijk beter en blijft ook positief bij ongunstigere aannames met betrekking tot te verwachten gasopbrengsten en te maken kosten evenals de te verwachten emissiereductie. Variant K komt ondanks de grotere schaal dan variant J enigszins slechter uit. Dit wordt veroorzaakt door een aanzienlijk lager SDE tarief.



Figuur 6-1 Gevoeligheid van het economisch resultaat voor verschillende schaalgroottes per jaar voor verschillende verwerkingsvormen. Linker uiteinde van elke balk betreft worst case; rechter uiteinde betreft best case.

Het aanzuren met een energierijk substraat betekent dat er ook extra nutriënten naar het bedrijf worden aangevoerd en waardoor er dus meer N van het bedrijf moet worden afgevoerd in de vorm van mest of meer N uit de mest gestript moet worden. Bij aanzuren van de mestput en de mest direct uitrijden is het van belang om een toevoegmiddel te gebruiken dat relatief weinig stikstof bevat. Immers een bedrijf dat dit procedé toepast moet sowieso mest afvoeren (terug naar 170 kg N/ha). Voor deze bedrijfssituatie maar ook voor de andere varianten geldt dat aanvullende bedrijfsmaatregelen in principe positief werken op het berekende rendement. Te denken valt aan scherp sturen op eiwit in het rantsoen en weinig kalkgebruik (in stal). Dit betekent dat minder energierijk substraat nodig is om aan te zuren en tegelijk daalt daarmee het N-overschot op bedrijfsniveau. Ook krap jongvee aanhouden draagt bij aan het verlagen van het N-overschot. Tegelijk draagt scherp sturen op eiwit en minder jongvee ook direct bij aan het verlagen van de ammoniakemissie. Kortom het is en blijft van belang om aanpalende maatregelen toe te passen voor het verminderen van emissies, het N-overschot en het rendement.

6.5 Borging en andere regelgeving

Borging

Biologisch aanzuren werkt op bedrijfsschaal op basis van deze studie en een eerdere studie (Meiresonne, 2024). De uitdaging is om dit systeem nu op te schalen in diverse varianten zowel op individueel bedrijfsniveau voor grotere bedrijven als wel op mesthubniveau met daarbij aandacht voor automatisering van de toediening van energierijk substraat en wel aangestuurd op basis van automatische pH monitoring van de mest. Deze systemen zijn operationeel in Denemarken (in het verleden ook in Nederland) waar al een tiental jaren aanzuring van mest plaatsvindt met zwavelzuur. Van belang is om de systematiek te borgen, want op dit moment is biologisch aanzuren geen erkende emissie reducerende techniek voor stallen.

Er zijn drie hoofdroutes denkbaar voor erkenning van een nieuwe techniek/maatregel binnen de nieuwe omgevingswet (Spijker et al., 2025):

1. De middelgerichte vergunningsroute (RAV-erkenning)
2. Erkenning van het VERA systeem als erkende best practice
3. De doelgerichte vergunningsroute (doelsturingsvergunning)

Bij route 1 betreft het vooral maatregelen die gekoppeld zijn aan stalsystemen. Slecht bekend is dat een maatregel die gebruik maakt van techniek en controleerbare managementmaatregelen voor erkenning in aanmerking kan komen. Biologisch aanzuren van drijfmest in de mestopslag (onder de roosters in een ligboxenstal) zou hieronder kunnen vallen. RAV/OW erkenning vraagt echter een kostbaar traject voor het vaststellen emissiefactoren (Bijvoorbeeld een case-control metingen gedurende een bepaalde tijd in combinatie met meten in 2 andere stallen.). Pas nadat die emissiefactoren getoetst en erkend zijn in Nederland kan de techniek/maatregel als best beschikbare techniek opgenomen worden in de RAV/OW-lijst. Dit vraagt ook een behoorlijke doorlooptijd.

Route 2 is gelinkt met het Deense systeem van aanzuren op basis van *batch-behandeling waarbij drijfmest wordt verwijderd uit de stal, vervolgens wordt aangezuurd met zwavelzuur tot een pH-waarde van 5.5. Na de behandeling wordt de aangezuurde drijfmest teruggepompt in de stal/mestput. Dit systeem heeft een VERA verificatie traject* doorlopen in 2016 en gaf in de *verificatieprocedure toonde NH₃-emissiereductie efficiëntie van 64% bij varkensstallen* (daarbij is gebruik gemaakt van Test Protocol for Livestock Housing and Management Systems (Version 2, 2011)). Omdat dit een erkend systeem is zou dit als best available technology(BT) kunnen worden toegepast met pH sturing als controle middel (in plaats van emissiemetingen). Aanpalend kan ook gemonitord worden hoeveel toevoegmiddel wordt gebruikt en kunnen steekproefsgewijze mestsamenstellingen worden gedaan. In aanvulling hierop kan indien aangezuurde mest direct in het veld wordt toegediend ook de pH van de uit te rijden mest gemonitord worden. Vroeger onderzoek heeft uitgewezen dat er een direct verband bestaat tussen de emissie in het veld en de pH van de mest (Bussink et al., 1994). Er is ook veel recent onderzoek beschikbaar waar de ammoniakemissiereductie bij mesttoediening van aangezuurde mest met een zodenbemester of een sleepvoeten machine uit af te leiden is.

Route 3 voor nog niet erkende emissie reducerende technieken vraagt om een zogenaamde 'passende beoordeling'. Daarbij wordt inzichtelijk wordt gemaakt wat de gevolgen van een bepaalde nieuwe activiteit zijn voor de instandhoudingsdoelen voor Natura 2000-gebieden. Hiervoor is een (wetenschappelijk) onderbouwde bewijsvoering nodig hoe een bepaalde emissiereductieprestatie vast te stellen en te borgen is. Tot nu ontbreekt een handreiking om deze doelgerichte route voor nog niet erkende maatregelen op te starten. Spijker et al. (2025) doen een aanzet hoe deze route opgepakt kan worden voor de situatie van biologisch aanzuren.

Verschillende routes zijn dus mogelijk, waarbij route 2 misschien het meest interessant omdat deze naar verwachting het snelst te realiseren is. Sowieso geldt dat deze routes wel eerst meer diepgaand verkend moeten worden om niet later tegen problemen aan te lopen.

Andere regelgeving

Een ander aspect met betrekking tot de borging is het reguleren welke toevoegmiddelen in aanmerkingen komen voor biologisch aanzuren. In principe zou het moeten gaan om grotere reststromen en of specifieke gewassen, waarbij bij de reststromen “schone” producten worden gebruikt die passen binnen de vereisten van de meststoffenwetgeving en de uitvoeringsregeling meststoffenwet passen. De commissie deskundigen meststoffenwet (CDM) gaat in 2025 daarover een advies uitbrengen aan het ministerie van LNV.

Volgens de huidige regelgeving is het niet toegestaan 5% toevoegmiddelen te gebruiken voor mono-mestvergisting met gunstige tarieven groengas. Die regel is paar jaar geleden afgeschaft omdat het niet logisch was 5% aan het totale Nederlandse mestvolume toe te voegen. Er wordt naar gestreefd om deze regel weer toe te mogen passen. Invoering van de Bijmengverplichting zal betekenen dat meer dan 5% toevoegmiddelen gebruik mogelijk wordt en zal door de marktwerking op de groengasprijs het verdienmodel van biologisch aanzuren versterken waardoor ook kleinschaligere initiatieven sneller aantrekkelijk worden.

6.6 Conclusies

De pilot op een praktijkbedrijf waarbij de mestopslag van een staldeel met 60 melkkoeien werd aangezuurd toonde aan dat:

- Op praktijkschaal biologisch aanzuren van de mestopslag onder een roostervloer goed mogelijk is. Door frequent melasse toe te voegen kon de pH van de mest tussen 5 en 5,5 worden gehouden over een periode van meer dan half jaar.
- het gebruik van melasse daalde na een half jaar tot ca 2% ten opzichte van verse mest die in de put komt en bedroeg gemiddeld ongeveer 6,7% volumepercent per m³ mest over de gehele periode van het experiment.
- spoelen van de roostervloer met dunne fractie (verkregen na mestscheiding van aangezuurde mest) ongeveer 90% reductie in ammoniakemissie kan geven op basis van oriënterende puntmetingen.
- de emissie van ammoniak en methaan uit de mestopslag op basis van ondersteunde metingen in het lab zeer sterk wordt gereduceerd (~90%).
- de biogasopbrengst stijgt van 22 m³ tot ongeveer 50-55 m³ per m³ mest.

Scenarioberekeningen voor een bedrijfssysteem waarbij de plaatsingsruimte van mest terug moet van 240 naar 170 kg N per ha, tonen aan dat de ammoniakemissie op bedrijfsniveau met 75% kan dalen door mest aan te zuren via het toevoegen van melasse indien de mestopslag wordt aangezuurd, de vloer wordt gespoeld met zure dunne fractie (verkregen door mestscheiding) en de vergisting van mest gepaard gaat met de inzet van een efficiënte stikstofstripper. Voor boerderijvergisters levert biologisch aanzuren een beter verdienmodel dan mono-mestvergisting maar beide zijn bij de huidige SDE tarieven nog niet kostendekkend. Voor mesthubs vanaf 1200 koeien is er een positieve marge bij mestvergisting na aanzuren van mest. Deze marge neemt verder toe bij grotere systemen. Een groot deel van de doorgerekende varianten is in investering per kg NH₃-reductie (aanzienlijk) goedkoper dan het uitkopen van boeren.

Naast reductie van ammoniak- en methaanemissie en het verlagen van het N-overschot dat is ontstaan door afbouw van de derogatie leiden deze innovaties tot extra bedrijvigheid. Alleen aanzuren van de mestopslag en deze mest vervolgens toedienen geeft een hoge emissiereductie maar is een vrij dure oplossing. Het zou als tijdelijke oplossing aantrekkelijk kunnen zijn.

6.7 Aanbevelingen

De volgende aanbevelingen worden gedaan:

- Zet vol in op het biologisch aanzuren van mest in combinatie met mestvergisting en stikstofstrippen (vanaf 600 koeien) als techniek voor het verminderen van emissies van ammoniak en methaan en het verhogen van de productie van groengas en het verkleinen van het dierlijke N-overschot. Vanwege de relatief lage investeringskosten om het aanzuursysteem te implementeren, is dit een No Regret oplossing.
- Om biologisch aanzuren rendabel te maken en te kunnen uitrollen is een plan van aanpak op gebiedsniveau met voorbeeld pilots gewenst en focus daarbij voor de vergisting van mest op mesthubs vanaf 600 melkkoeien en meer.
- Zet in op het ontwikkelen/aanpassen van vloerspoelsystemen die geschikt zijn voor het toepassen van dunne fractie die verkregen wordt na het scheiden van aangezuurde mest.
- Verken de mogelijkheden van aanzuren van mest in mestopslag en het vervolgens het toedienen van deze aangezuurde mest als (tijdelijk) maatregel om de ammoniakemissie op bedrijfsniveau te verlagen.
- Verken de mogelijkheden om de benutting van alle nutriënten in vergiste, aangezuurde mest en de verkregen Renure meststof, digestaat en eventueel gescheiden mestfracties te optimaliseren in het bemestingsplan.
- Ontwikkel een pH gestuurd doseer- en controlesysteem voor het toedienen van koolhydraat (rest)product aan mest en online monitoring van de mest pH.
- Verricht stalmetingen emissiemetingen voor ammoniak en methaan overeenkomstig bestaande protocollen om zo een emissiereductiefactor voor beide vast te stellen.
- Creëer een handreiking voor de borging van niet-erkende maatregelen zoals biologisch aanzuren. Streef naar aanpassing van de regelgeving voor groengas en toegestane toevoegmiddelen.

Dankwoord:

- De provincie Groningen voor financiële ondersteuning van deze studie.
- De heer Pimmelaar voor het meewerken aan de pilot en het beschikbaar stellen van zijn bedrijf voor de pilot
- De heren Steenhuizen en Mossel voor uitvoerende werkzaamheden op het bedrijf Pimmelaar.
- Een 'Initiatiefgroep' bestaande uit Ton Voncken, Rembert van Noort, Nicky Kamminga, Eise Spijker, en twee auteurs van dit rapport kwamen sinds oktober 2022 elke 3 weken bijeen voor overleg hoe biologisch aanzuren van mest van de grond te krijgen. Zij hebben meegedacht over diverse aspecten die in het onderhavige rapport aanbod zijn gekomen in het bijzonder rondom borging en groengas gerelateerde zaken
- Cosun Beet Company vanwege de gratis levering van een aantal vrachten melasse.
- Fabiton vanwege de hulp bij het mest scheiden middels de vijzelpers.

7 Referenties

- Berg W, Türk M & Hellebrand HJ (2006b). Effects of Acidifying Liquid Cattle Manure with Nitric or Lactic Acid on Gaseous Emissions. In: Workshop on Agricultural Air Quality. Washington D.C. (USA), pp. 492–498.
- Bode de MJC de (1990). Onderzoek naar de geuremissie bij aanwending van aangezuurde mest", IMAG-DL0 nota P-563, Wageningen
- Bruggen C van, Bannink A, Bleeker A, Bussink DW, Dooren HJC, Groenestein CM, Huijsmans JFM, Kros J, Oltmer K, Ros MBH, van Schijndel MW, Velthof GL & van der Zee T (2024). Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2020. Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2022. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOT-technical report 264
- Bussink DW (1989). Ammoniakemissie van dunne rundermest met en zonder additief, NMI, rapport A 89.093-II, Den Haag.
- Bussink DW, Huijsmans JFM & Ketelaars JJMH (1994). Ammonia volatilization from nitric-acid treated cattle slurry surface applied to grassland, Netherlands Journal of Agricultural Science 42: 293-309.
- Bussink DW, Velthof GL & Oenema (1991). Emissie van ammoniak, vetzuur, geur, methaan en lachgas uit onbehandelde en met Orgakem behandelde dunne rundermest, NMI, rapport A 90.093-II.
- Bussink DW & Van Rotterdam-Los AMD (2011). Perspectieven om broeikasgas- en ammoniakemissies te reduceren door het aanzuren van mest. Wageningen: NMI, rapport 1426.N.11 pp.51.
- Bussink DW, Van Rotterdam-Los AMD, Vermeij I, Van Dooren HCJ, Bokma S, Ouwerkerk GJ, van der Draai H & Wenzl D (2014). Reducing NH₃ emissions from cattle slurry by (biological) acidification: experimental proof and practical feasibility. Wageningen: Nutrient Management Institute. Report 1422.N.12. pp.54.
- Bussink W, Van Rotterdam D (2023). Mest biologisch aanzuren: Minder emissie, meer biogas. V-focus november 2023, p. 14-17.
- Clemens J & Wulf S (2005). Reduktion der Ammoniakausgasung aus Kofermentationssubstraten und Gülle während der Lagerung und Ausbringung durch interne Versauerung mit in NRW anfallenden organischen Kohlenstofffraktionen.
- Dalby FR, Guldborg L, Feilberg A & Kofoed MV (2022). Reducing greenhouse gas emissions from pig slurry by acidification with organic and inorganic acids. *PLoS ONE*, 17.
- Deru J, van Rotterdam D, el Mahdi J, de Stijter J, Beek J (2024). Ammoniak- en broeikasgasemissies van gescheiden mestfracties in een incubatie-experiment, LBI. Publicatienr. 2023-01 LbD, 50 pp..
- Eriksen J, Sørensen P, Elsgaard L (2008). The fate of sulfate in acidified pig slurry during storage and following application to cropped soil. *J. Environ. Qual.* 37, 280–286.
- Fuchs A, Dalby FR, Liu D, Kai P & Feilberg A (2021). Improved effect of manure acidification technology for gas emission mitigation by substituting sulfuric acid with acetic acid. *Cleaner Engineering and Technology* 4 (2021) <https://doi.org/10.1016/j.clet.2021.100263>
- Gioelli F, Grella M, Scarpeci TE, Rollè L, Pierre FD & Dinuccio E (2022). Bio-Acidification of Cattle Slurry with Whey Reduces Gaseous Emission during Storage with Positive Effects on Biogas Production. *Sustainability*, 14, 12331. <https://doi.org/10.3390/su141912331>.
- Gomez-Munoz B, Jensen LS, Regueiro I (2025). Efficiency of different strategies for pig slurry bioacidification to reduce ammonia and greenhouse gas emissions during long term storage. *Journal of Environmental Chemical Engineering* 13. 115825
- Habtewold J, Gordon R, Sokolov V, VanderZaag A, Wagner-Riddle C, Dunfield K. Reduction in Methane Emissions From Acidified Dairy Slurry Is Related to Inhibition of Methanosarcina Species. *Front*

- Microbiol. 2018 Nov 20;9:2806. doi: 10.3389/fmicb.2018.02806. PMID: 30515146; PMCID: PMC6255968. <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pmc/articles/PMC6255968/>
- Hakim BNA, Xuan NJ, Oslan SNH (2023). A Comprehensive Review of Bioactive Compounds from Lactic Acid Bacteria: Potential Functions as Functional Food in Dietetics and the Food Industry. *Foods*;12(15):2850. doi: 10.3390/foods12152850
- Hendriks JGL & Vrielink MGM (1996). Aanzuren van vleesvarkensmest met organische zuren. <https://library.wur.nl/WebQuery/wurpubs/fulltext/29988>
- Kavanagh I, Fenton O, Healy MG, Burchill W, Lanigan GJ & Krol DJ (2021). Mitigating ammonia and greenhouse gas emissions from stored cattle slurry using agricultural waste, commercially available products and a chemical acidifier. *Journal of Cleaner Production*, 294, 126251.
- Lameijer E, & Vervoort K (1995). Eu patent 0 612 704 B1.
- Oenema O & Velthof GL (1993). Denitrification in nitric-acid-treated cattle slurry during storage. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 41: 63 – 80.
- Ottosen LDM, Poulsen HV, Nielsen DA, Finster K, Nielsen LP & Revsbech NP (2009). Observations on microbial activity in acidified pig slurry. *Biosystems engineering* 102: 291-297.
- Lyngsø H et al (2019). Policy recommendations for supporting SAT implementation. [interreg-baltic.eu/wp-content/uploads/2021/10/62-Baltic_Slurry_Acid_Policy_recommendations_for_supporting_SAT_implementation_A6.3.pdf](https://baltic.eu/wp-content/uploads/2021/10/62-Baltic_Slurry_Acid_Policy_recommendations_for_supporting_SAT_implementation_A6.3.pdf)
- Meiresonne J, Bakker R, Sanders J & Loverbosch H (2024). Biologisch aanzuren van dierlijke mest: Snelle en kosteneffectieve methode voor het terugdringen van emissies. HAS Green academy rapport. Pp 36. <https://mestverwaarding.nl/storage/article/files/2024/09/66f6bcd7a886a.pdf>
- Noord R, Bussink W, Voncken T & Sanders J (2022). Met biologisch aanzuren van mest minder ammoniak en minder broeikasgassen en meer groen gas. <https://www.nmi-agro.nl/news/met-biologisch-aanzuren-mest-minder-ammoniak-en-minder-broeikasgassen-en-meer-groen-gas/>
- Overmeyer, Kube A, Clemens J, Büscher W & Trimborn M (2021). One-Time Acidification of Slurry: What Is the Most Effective Acid and Treatment Strategy? *Agronomy*, 11, 1319. <https://doi.org/10.3390/agronomy11071319>
- Pizzul L, Rodhe L, Burzynska I, Kierończyk M, Mazur K, Neumann S, Tamm K, Jakovickis R & Sękowski M (2018). Titration, buffer capacity and acid consumption of animal slurries in Baltic Sea Region countries. *Baltic slurry acidification, report WP2, activity 3*. Pp.40
- Prado J, Chieppe J, Raymundo A & Figueiro D (2020). Bio-acidification and enhanced crusting as an alternative to sulphuric acid addition to slurry to mitigate ammonia and greenhouse gases emissions during short term storage. *Journal of Cleaner Production* 263, 121443.
- Puente-Rodríguez D, Gollenbeek LR, Verdoes N & Bos AP (2022.) Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren. *Wageningen Livestock Research, Rapport 1375*. pp. 32.
- Regueiro I, Gómez-Muñoz B, Lübeck M, Hjorth M & Stoumann Jensen I (2022). Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101135.
- Sanders WTM (2001). Anaerobic hydrolysis during digestion of complex substrates. PhD Thesis. Wageningen University & Research, Wageningen.
- Sanders JPM & Bussink DW (2025). Snelle vergisting van biologisch aangezuurde rundveemest, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2035.N.24, pp 25
- Spijker E et al. (2025). Juridische erkenning van biologisch aanzuren drijfmest als emissie reducerende techniek in de veehouderij in Nederland. *Nota platform groengas (in prep)*
- Van Lent AJH, Schils RLM, Boxem Tj, Zonderland J & Verboon MC (1995). Aanzuren van rundermest in stal en silo. PR-rapport 156. Lelystad. <https://edepot.wur.nl/25383>
- Ward N, Atkins A & Atkins P (2024). Estimating methane emissions from manure: a suitable case for treatment? *Environ. Res.: Food Syst.* 1 <https://doi.org/10.1088/2976-601X/ad64d7>
- Yan Q, Liu X, Wang Y, Li H, Li Z, Zhou L, ... & Bao, X. (2018). Cow manure as a lignocellulosic substrate for fungal cellulase expression and bioethanol production. *Amb Express*, 8, 1-12.

Bijlage 1: Vooronderzoek

Opzet

Er is verkend hoe het biologisch aanzuurproces optimaal in te richten is. Daarvoor was informatie nodig van de infrastructuur van het bedrijf Pimmelaar, de omvang van de mestput, het aantal mestkanalen, de minimale opslagcapaciteit en de inrichting ervan. Dit bepaalde mede de benodigde mixcapaciteit via elektrische mixers. De aanwezige veestapel en de minimaal aanwezige hoeveelheid mest geven een indicatie van de benodigde hoeveelheid toevoegmiddelen bij de start van de praktijkproef en de dagelijkse/wekelijks additie van toevoegmiddelen.

Er werden mestmonsters genomen op het bedrijf om voorafgaande aan de praktijkproef in het lab te bepalen hoeveel zuur (bij de opstart) en melasse nodig is per kuub mest. Daarvoor zijn titratiecurves gemaakt en werden aan mest verschillende hoeveelheden zuur en melasse toegevoegd om de snelheid van verzuring te bepalen. Ook werd nagegaan in hoeverre het toepassen van inoculanten de verzuring door het toevoegen van melasse versnelde. Dit stuurt de benodigde hoeveelheid zuur en melasse bij de start en draagt bij aan een goede inrichting van het biologisch verzuren op bedrijfsniveau.

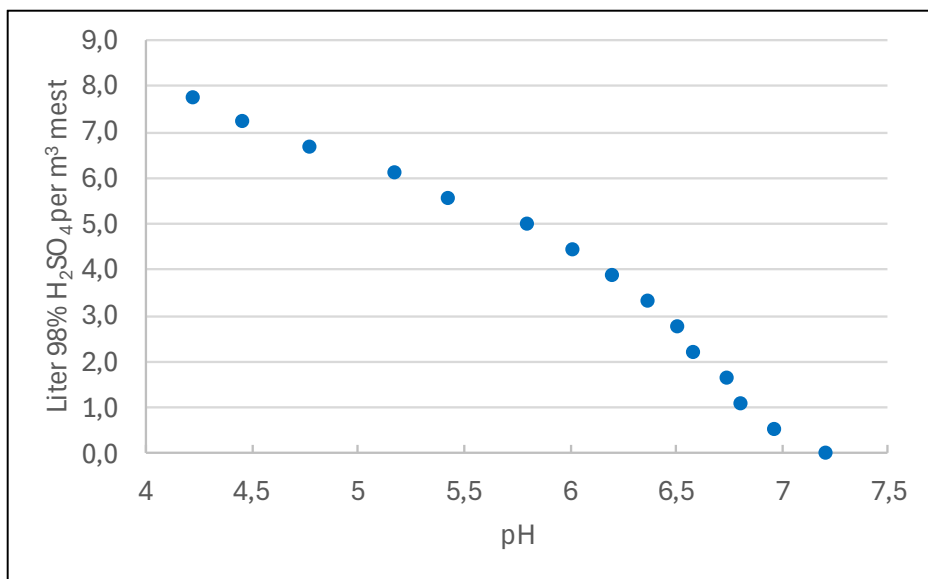
Resultaten

Titratiecurves

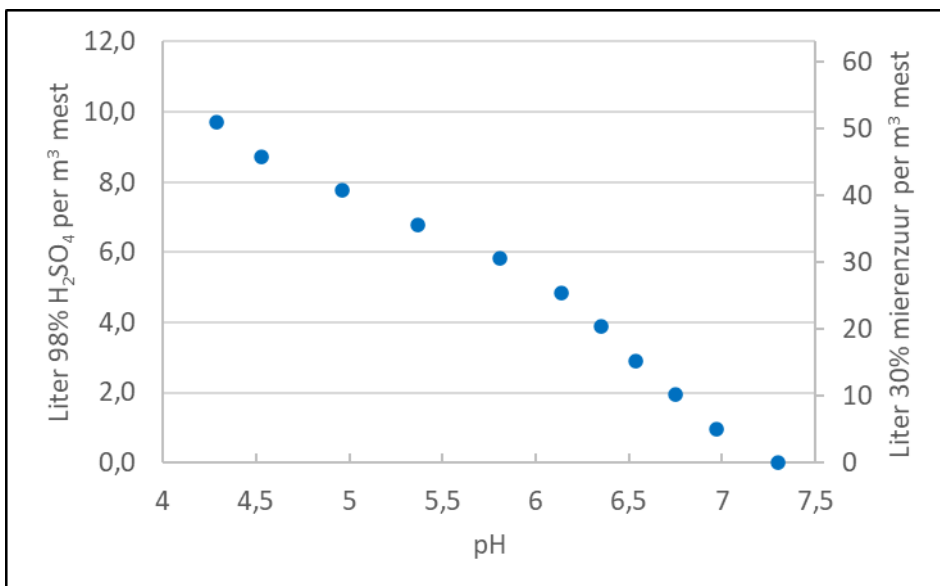
In mei 2024 is een kleine hoeveelheid mest opgehaald bij het bedrijf Pimmelaar. De samenstelling is in Tabel 8-1 weergegeven. Van deze mest is een titratiecurve gemaakt. Figuur 8-1 laat zien dat er 2,8, 4,5 en bijna 6 liter geconcentreerd zwavelzuur nodig was om de pH naar respectievelijk 6,5, 6 en 5,5 te laten dalen. Dit zijn normale hoeveelheden om runderdrijfmest aan te zuren. Omgerekend naar 30% mierenzuur is dus ongeveer 12 liter mierenzuur nodig m³ mest om pH 6,5 te realiseren, ofwel 6 IBC's per 500 m³ mest. Dit is in augustus 2024 nog een keer bevestigd op basis van een nieuwe titratiecurve.

Tabel 0-1 Samenstelling van de gebruikte runderdrijfmest per behandeling. Gemiddelde van mestmonster voor en na het aanleggen van het proefveld.

Pimmelaar		DS g/kg	RAS k/kg	OS g/kg	N-tot. g/kg	C/N -	N-NH ₃ g/kg	N-org g/kg	P ₂ O ₅ g/kg	K ₂ O g/kg	MgO g/kg	Na ₂ O g/kg
Proef 1	ref	89	21	68	3,88	8	1,5	2,4	2,02	4,8	1,2	0,7

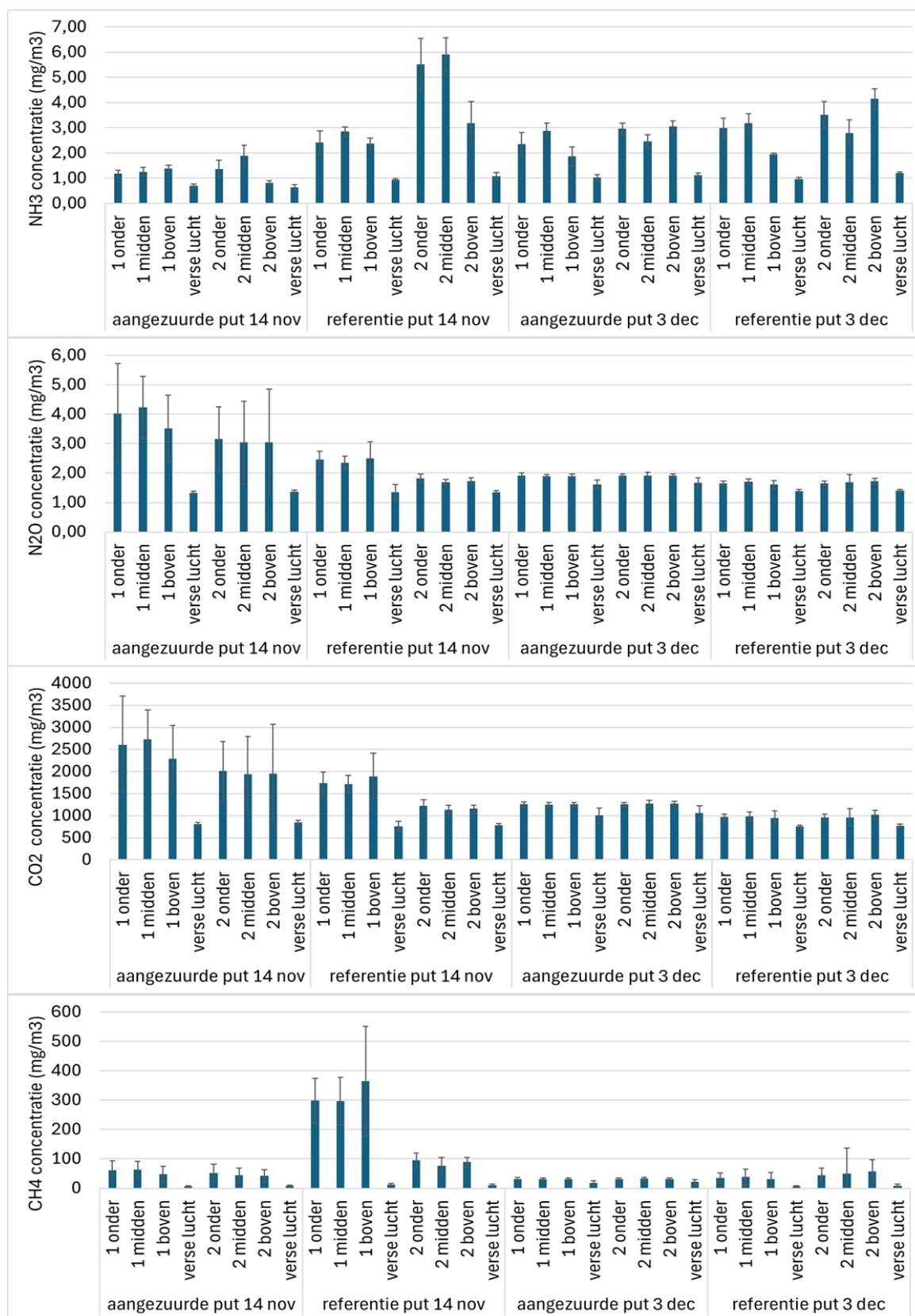


Figuur 0-1 pH-titratiecurve van mest uit april 2024 van het bedrijf Pimmelaar bij uitgedrukt in liters geconcentreerd zwavelzuur per m³ mest.

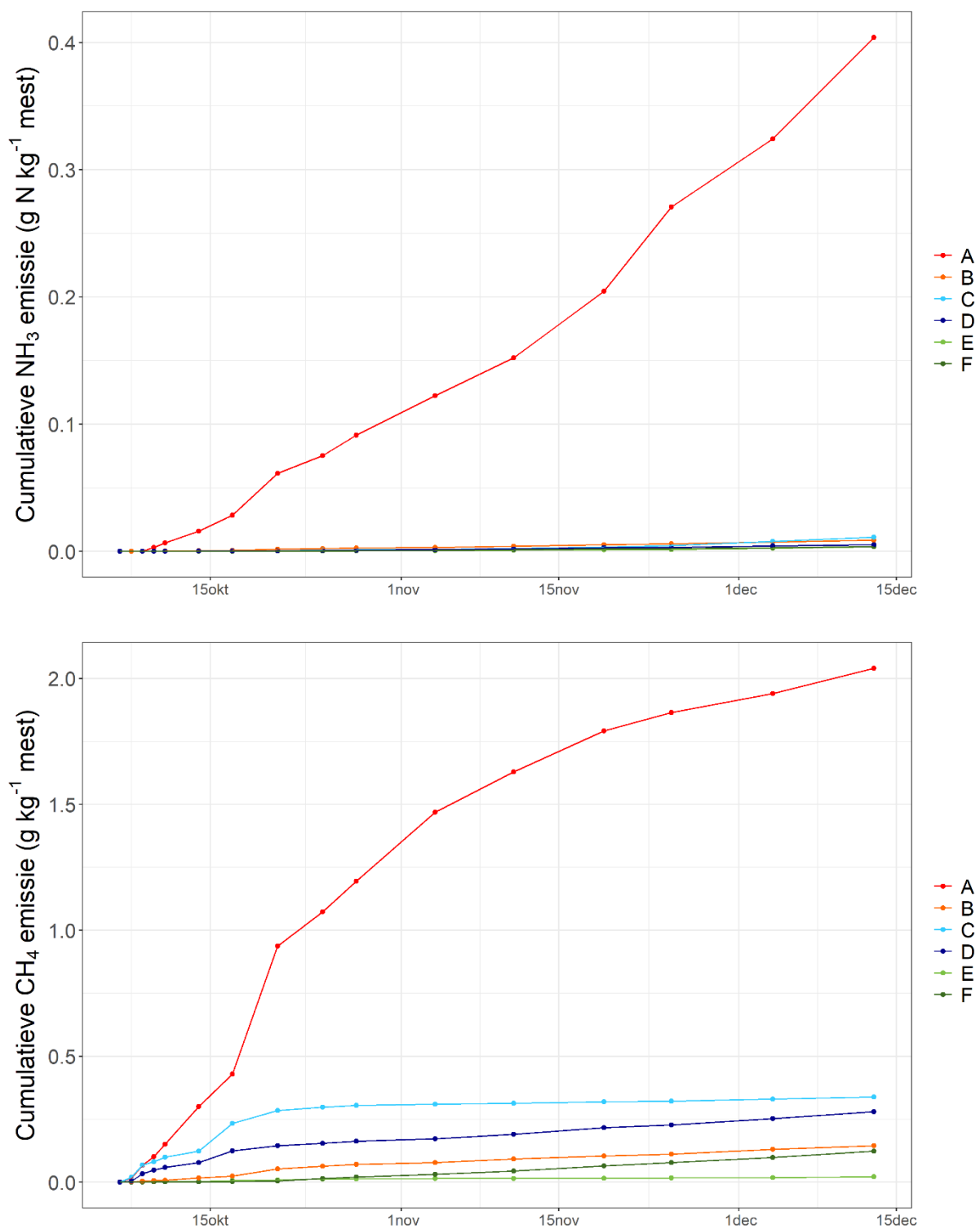


Figuur 0-2 pH-titratiecurve van mest uit augustus 2024 van het bedrijf Pimmelaar bij uitgedrukt in liters geconcentreerd zwavelzuur per m³ mest. Titratiecurve is gemaakt met 30% mierenzuur, omdat dit zuur ook is gebruikt als opstartzuur bij de proef.

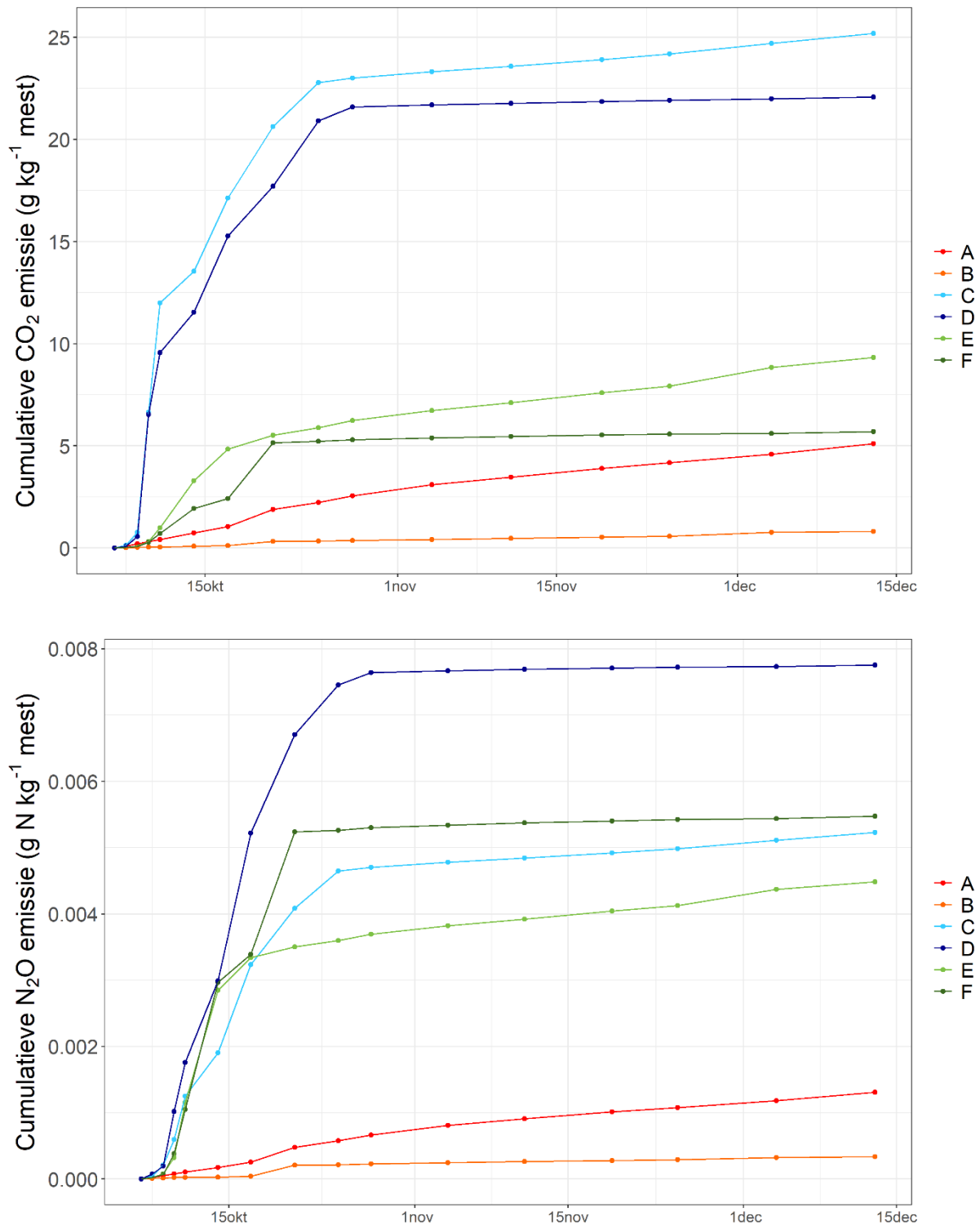
Bijlage 2: Gegevens emissiemetingen



Figuur 0-3 NH₃, N₂O, CO₂ en CH₄ concentraties in de lucht in de aangezuurde put en de referentieput per meetperiode van 1- 2 uur..



Figuur 0-4 Cumulatieve emissies. NH₃-N en CH₄ g kg⁻¹ mest (A: onbehandelde mest uit referentieput, B: mest uit de aangezuurde put, C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse, D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse, E: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 2,5% melasse, F: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 4,0% melasse).



Figuur 0-5 Cumulatieve emissies. CO₂ en N₂O-N in g kg⁻¹ mest. (A: onbehandelde mest uit referentieput, B: mest uit de aangezuurde put, C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse, D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse, E: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 2,5% melasse, F: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 4,0% melasse).

Bijlage 3: Data incubatieproef

Tabel 0-2 Cumulatieve emissies. NH_3 in g N kg^{-1} mest en CO_2 , N_2O en CH_4 in g CO_2 -equivalenten kg^{-1} mest. (A: onbehandelde mest uit referentieput, B: mest uit de aangezuurde put, C: mest uit de referentieput + 6,25% melasse, D: mest uit de referentieput + 7,5% melasse, E: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 2,5% melasse, F: mest uit de referentieput + 6 liter zwavelzuur per kuub mest + 4,0% melasse).

	7-10- 2024	8-10- 2024	9-10- 2024	10-10- 2024	11-10- 2024	14-10- 2024	17-10- 2024	21-10- 2024	25-10- 2024	28-10- 2024	4-11- 2024	11-11- 2024	19-11- 2024	25-11- 2024	4-12- 2024	13-12- 2024
CH₄																
A	0,00	0,39	1,68	2,55	3,78	7,51	10,74	23,44	26,85	29,90	36,72	40,71	44,78	46,62	48,48	51,01
B	0,00	0,03	0,11	0,15	0,18	0,43	0,61	1,32	1,59	1,78	1,96	2,30	2,60	2,78	3,26	3,62
C	0,00	0,48	1,73	2,03	2,49	3,10	5,83	7,13	7,45	7,63	7,74	7,85	7,98	8,04	8,26	8,45
D	0,00	0,09	0,86	1,20	1,48	1,94	3,11	3,63	3,88	4,09	4,30	4,76	5,41	5,67	6,32	6,99
E	0,00	0,00	0,02	0,06	0,08	0,08	0,15	0,21	0,30	0,34	0,35	0,38	0,40	0,42	0,47	0,55
F	0,00	0,00	0,01	0,03	0,03	0,03	0,06	0,14	0,36	0,52	0,77	1,12	1,62	1,96	2,46	3,09
CO₂																
A	0,00	0,10	0,21	0,31	0,42	0,74	1,05	1,89	2,24	2,56	3,11	3,48	3,90	4,18	4,59	5,12
B	0,00	0,02	0,03	0,04	0,05	0,09	0,13	0,33	0,34	0,37	0,42	0,47	0,53	0,58	0,77	0,82
C	0,00	0,13	0,77	6,64	12,00	13,56	17,14	20,64	22,79	23,00	23,32	23,58	23,91	24,18	24,70	25,19
D	0,00	0,09	0,56	6,55	9,57	11,55	15,27	17,70	20,91	21,60	21,69	21,77	21,85	21,91	21,99	22,07
E	0,00	0,04	0,10	0,31	1,00	3,30	4,85	5,52	5,89	6,25	6,73	7,11	7,60	7,92	8,84	9,33
F	0,00	0,03	0,08	0,28	0,72	1,94	2,42	5,16	5,23	5,31	5,39	5,47	5,54	5,58	5,61	5,70
N₂O																
A	0,00	0,02	0,05	0,07	0,10	0,16	0,24	0,45	0,54	0,62	0,76	0,85	0,95	1,01	1,11	1,22
B	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,04	0,20	0,20	0,21	0,23	0,25	0,26	0,27	0,31	0,32
C	0,00	0,04	0,19	0,56	1,17	1,78	3,03	3,83	4,35	4,40	4,47	4,54	4,61	4,67	4,79	4,90
D	0,00	0,07	0,19	0,96	1,65	2,80	4,89	6,28	6,98	7,15	7,18	7,20	7,22	7,23	7,24	7,26
E	0,00	0,02	0,07	0,30	1,08	2,67	3,13	3,28	3,37	3,46	3,58	3,67	3,79	3,86	4,09	4,20
F	0,00	0,02	0,07	0,36	0,98	2,78	3,17	4,90	4,92	4,97	5,00	5,03	5,06	5,08	5,09	5,13
NH₃																
A	n.g.	n.g.	0,000	0,003	0,007	0,016	0,029	0,061	0,075	0,091	0,122	0,152	0,204	0,271	0,324	0,404
B	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009
C	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,005	0,008	0,011
D	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,002	0,003	0,003	0,004	0,005
E	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,001	0,003	0,004
F	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,000	0,001	0,001	0,001	0,002	0,002	0,003	0,004

Bijlage 4: Achtergrond informatie

scenarioberekeningen H5

Overzichtstabel is afgeleid van grote spreadsheet die op aanvraag bij jpsanders@sanovations.com verkregen kan worden. In deze uitgebreide spreadsheet zijn 15 varianten geanalyseerd.

- A. niets doen
- B. alleen aanzuren van de mest en deze toedienen op het veld.
- C. een vergister met dagverse mest van 300 melkkoeien
- D. een boerderijvergister met dagverse mest van 600 melkkoeien plus een eenvoudige ammoniakstripper en groengas faciliteit en
- E. een vergister met aangezuurde mest van 150 melkkoeien zonder stripper en
- F. aangezuurde mest van 150 melkkoeien zonder stripper wordt met korte verblijftijd in bestaande mono-mestvergister vergist
- G. biogashub 1200 melkkoeien
- H. oude mest 3300 melkkoeien
- I. dagverse mest van 1200 melkkoeien
- J. aangezuurde mest van 1200 melkkoeien
- K. aangezuurd van 3300 melkkoeien
- L. aangezuurd van 10000 melkkoeien
- M. co-vergisting plus aanzuren en 1200 melkkoeien
- N. co-vergisting plus aanzuren en 300 melkkoeien
- O. co-vergisting plus kippenmest plus aanzuren en 300 melkkoeien

De varianten H tot en met O hebben alle een stripper en een groengasfaciliteit. In de spreadsheet zelf is een uitgebreide toelichting gegeven op de uitgangspunten en de rekenwijze. In het navolgende zijn de belangrijkste uitgangspunten voor de berekening weergegeven

Uitgangspunten:

- In de spreadsheet zijn respectievelijk de investeringskosten, de operationele kosten en de jaarlijkse kosten, steeds in k€/ jaar worden aangegeven, waarbij als CAPEX is gerekend met slechts afschrijving investeringen: stalaanpassingen en gasleidingen 20 jaar; stripper Byosis 15 jaar. Alle overige 10 jaar.
- De berekende m^3/j aan drijfmest ($30 \text{ m}^3 \text{ mest}/\text{koe.j}$) inclusief 5% melasse
- er is uitgegaan van een methoeveelheid van $240 \text{ kg N}/\text{ha}$ die teugmoet naar $170 \text{ kg N}/\text{ha}$. Deze hoeveelheid wordt afgevoerd
- Er zijn ongeveer 2 melkkoeien per ha
- Bij mesthubs en boerderijvergister met stripper in cases D en H tot en met O is er steeds van uitgegaan dat alle mest per tankwagen naar de mesthub gaat en dat het geproduceerde digestaat weer met de retourvracht terug naar het melkveebedrijf wordt terug gebracht.
- Er is bij de berekening van aantal vrachten uitgegaan van een gemiddeld aantal koeien per boer van 150. De vergister staat bij één boer.
- Bij de boerderijvergisters met stripper is er niets te transporteren. Het aantal vrachtwagen.kilometers is berekend door uit te gaan van dat de vergister in het midden staat van een cirkelvormig gebied dat bestaat uit al het grasland van de desbetreffende bedrijven plus drie maal overig land bestaande uit akkers, bewoond gebied, infrastructuur etc., waarin alle

boerderijen op een random plaats liggen en daarmee gemiddeld 2/3 van de straal van de cirkel verwijderd zijn van de vergister.

- Bij afvoer van derogatieafbouwoverschot is het aantal kilometers langer omdat naar verder gelegen akkers etc gereden moet worden. Er is gerekend met 40 km voor dit afvoeren plus 10 km voor het leeg rijden van de vrachtwagen naar volgend adres om volgende mest op te pakken.
- **Stalaanpassingen:** Voor dagverse mest is gerekend met 900 € per koeplaats middels bijvoorbeeld rubbermatten zoals geleverd door Spijker in Dalfsen (90€/m²*10m²). Aan dit bedrag moet nog één of twee mest verzamelaars en stroomverbruik worden toegevoegd. Bij biologisch aanzuren wordt met 30k€ investering gerekend voor 120 koeien voor melassevat en automatische doseertoelooop gestuurd door 1-2 pH meters.
- **Gasleidingen.** Er is gerekend met 100€ per strekkende meter voor aanleg inclusief toestemming over land van derden. Door handig de gasleidingen te verknopen is gerekend met 500 meter per 9 van de 10 boerderijen.
- **Melasse.** Bij een dosering van 5%v/v = 7% w/v en bij prijzen onder 143€ per ton op boerderij afgeleverde melasse bedraagt de kosten 10€/ m³ aangezuurde mest. Huidige melasseprijs is 125€ (jan 2025).
- **Kosten voor cosubstraten** zijn heel bepalend voor de businesscase bij co-vergisters. Omdat co-vergisters vaak partijtjes afgekeurd voer krijgen aangeleverd is een lagere prijs per m³ biogas reeel. Bij gemiddeld 100 €/ ton met gemiddeld 350 m³ biogas per ton, dus ca 0,30€/ m³ biogas en daarmee goedkoper dan de melasse. Voor kippenmest met 50% DS en 180m³ biogas/ ton is gerekend met 33€/ ton aanvoer bij vergister.
- **Transportkosten** voor mesthubs zijn berekend met 5€/m³ heen en weer vracht. Dit is mogelijk omdat na aanvoer van de aangezuurde mest bij de vergister, de tankwagen direct weer wordt beladen met digestaat dat naar de boer teruggebracht wordt waar de volgende aangezuurde mest weer wordt opgehaald.
- **Erfaanpassingen.** Deze post is natuurlijk erg afhankelijk van bestaande situatie en grootte van de voorzieningen: is er een nieuwe weg nodig, een weegbrug, een bemonsteringrobot, een loods om zo emissie arm te kunnen werken. Afhankelijk van de grootte van de vergister is een ruwe inschatting gemaakt en opgenomen.
- **Vergister.** Het benodigde volume van de vergister(s) is berekend op basis van 36 dagen verblijftijd (HRT) en 14 dagen verblijftijd. De investeringen voor de vergister(s) zijn gecheckt bij Referm voor een aantal verschillende groottes. De investeringskosten voor de HRT 36 dagen zijn opgenomen en op het totale investeringsbedrag is een correctie ingevoerd op basis van de mogelijk kleinere vergister die nodig is bij kortere verblijftijd van 14 dagen HRT. Om daarmee een alternatieve Terugverdiëntijd uit te rekenen.
- **Navigers.** De investeringskosten voor navigers liggen aanzienlijk lager en zijn ingeschat de spreadsheet, Voor de navigers is geen kleiner alternatief opgenomen bij kortere HRT in de vergisters omdat wettelijk vastligt dat de verblijftijd in de naviger altijd meer dan 28 dagen moet zijn en daardoor afhankelijk van de hoeveelheid verwerkte mest.
- **Opslagen mest en digestaat.** In geval van de wat grotere verwerkingsvolumes vanwege onbalans in aan- en afvoer en in geval van een stripper vanwege hold up tijden is voor mest dan wel digestaat opslagkosten eenzelfde bedrag gekozen als dat voor de navigers.
- **Voorbereidingen en onvoorzien:** hiervoor is als voorziening 4% van de uiteindelijke totale investering opgenomen.
- **Gas- en elektra-aansluiting;** als inschatting wordt 3% van de totale investering gerekend behalve bij de kleinere installaties: 4% en bij de grootste juist 2%. Bij de cases C, E en F, boerderij vergisters waarbij BASgas het gas comprimeert is slechts een bescheiden elektrische aansluiting nodig die waarschijnlijk al op het bedrijf aanwezig is.
- **Stripper en hygiëniserie** is voor de Byosis stripper op basis van Directeur Byosis J. van den Broek. De Farmcubes stripper zonder hygiëniserie is op basis van een offerte van Farmcubes.

- **Groengas opwerking.** Is op basis van informatie van Referm ingeschat voor de verschillende capaciteiten. Bij case C,E en F bij deze boerderijvergisters wordt groengas gemaakt door externe partij zoals BASgas of Powercrumbs. Aangenomen is dat dit net zo efficiënt gaat als een eigen groengas opwerking bij uiteraard groot volume. BASgas heeft een vergoeding per m³ biogas geboden van 0,45€. Met dit bedrag is de business case doorgerekend voor de varianten C,E en F.
- **Aanvullen Kalium.** Bij het afvoeren van derogatie afbouw overschotten van een derde van de mest verlaat ook de kalium het bedrijf. Deze zal dus weer aangevoerd moeten worden. Bij gebruik van melasse wordt de mest en daarmee het uiteindelijke digestaat verrijkt met kalium. Deze waarden zijn voor de tonprijs gewaardeerd.
- Met 1 ton **effectieve organische stof** per ha krijg je naar schatting 2 ton bieten extra per jaar gedurende 3 jaar, dit ter waarde van $2 \cdot 40 \cdot 3 = 240\text{€}$. Per m³ mest wordt uiteindelijk $0,23 \cdot 85 = 20$ kg eff organische stof geproduceerd. Dit heeft dus een waarde van 4,8€/ m³ mest.
- **Inkomsten van uit groengas** op basis van SDE 2025 tarieven voor diverse categorieën. Tevens zijn de tarieven voor productie van stroom en warmte aangegeven voor de verschillende groottes van biogasvergister uitvoeringen.
- **Inkomsten uit Renure** ingeval van strippen op basis van 20 € per ton N in ammoniumsulfaat oplossing zoals mee gerekend door Byosis.
- Vergiste dunne fractie bevat 37 kg OS / ton en 1,5 kg P₂O₅. Na centrifuge scheiding bij 3000rpm ontstaat 0,23 m³ dikke fractie met 85 kg OS per m³ en 5,5 kg P₂O₅ en 0,77 dunne fractie met 22 kg OS/m³ en 0,32 kg P₂O₅. Met 1 ton eff OS per ha wordt naar schatting 2 ton bieten extra per jaar verkregen gedurende 3 jaar, dit ter waarde van $2 \cdot 40 \cdot 3 = 240\text{€}$. Per m³ mest wordt uiteindelijk $0,23 \cdot 85 = 20$ kg eff OS geproduceerd. Dit heeft dus een waarde van 4,8€/ m³ mest.
- **N uit derogatie overschot van derden opnemen:** In het geval een stripper wordt ingezet met voldoende striprendement dan is het mogelijk om meer stikstof uit het digestaat te verwijderen dan strikt noodzakelijk is voor de bedrijven waar de mest vandaan komt. Dan ontstaat de mogelijkheid voor de boeren die met deze stripper werken om onvergiste mest of in ieder geval niet gestript digestaat op hun land uit te rijden waardoor inkomsten mogelijk worden tegen de geldende mest afvoertarieven zoals in blauwe vak van rij g. aangegeven. Dat levert meteen inkomsten voor de boer op waardoor zijn marge significant omhoog gaat zonder dat hij van anderen afhankelijk is daarvoor. Bij co-vergisters ontstaat teveel N en daardoor is afvoer nog nodig en dat kost marge.
- NH₃ uitstoot stal kg/jaar per koe, als mediaan is genoemd 10,3 kg N/koe.j; en uitstoot bij uitrijden bedraagt 17% van de ammoniakale N 19,7 kg mest N per ha.
- NH₃ uitstoot put zomer 2,5 kg/koe.j; put winter 1,25 kg/koe.j; vloer :7 kg/koe.j en ook totale = 21 kg NH₃ uitstoot per m³ mest.jaar.
- **De extra stikstof ruimte voor derden** die door goed strippen wordt vrijgemaakt in tonnen N per jaar. Bij co-vergisting geeft een m³ mest en een m³ cosubstraat 2 m³ met 8 kN/ m³ ontstaat. Bij kippenmest ontstaat 1,5 m³ met 6 kg N/m³ digestaat uit elke m³ mest input.
- Hoeveel biogas wordt geproduceerd? Er is uitgegaan van 40 m³ op moment dat mest het dier verlaat: 34 m³ bij dagverse mest die op de boerderij vergist wordt, 30 m³ voor dagverse mest die naar Mesthub getransporteerd wordt voor vergisting, 50 m³ voor aangezuurde mest, 200 m³ voor co-vergister mest. Naar believen kunnen deze opbrengsten nog worden aangepast.
- Bij het uitrijden is emissie per variant gecorrigeerd voor verhoging van het stikstofgehalte door toevoeging van melasse.
- De striprendementen zijn afhankelijk van de begin concentratie aan N nl 4, 8, 6 kgN/m³ voor resp rundermest, eindmengsel van rundermest en cosubstraat en eindmengsel van rundermest en kippenmest en natuurlijk de rest N die in het gestripte digestaat achterblijft afhankelijk van type stripper: bij Byosis blijft 1,8 kg/m³ achter bij Farmcubes 3 kg/m³.

- In de (zeker niet uitputtende) rondgang langs stakeholders werd de indruk verkregen dat er wel verschillende kleine strippers op de markt zijn maar dat de operationele + kapitaalskosten al gauw 10- 13 €/ m³ digestaat bedragen en dat de striprendementen bescheiden blijven op 1- 1,3 kg/ m³ digestaat. De striptechniek van Byosis behaalt striprendementen boven 2 kg en doet dit bij bescheiden integrale kosten van 5€/ m³ maar vereist een schaal van zeker 36.000 m³ en liever groter omdat de investeringskosten aanzienlijk hoger liggen dan de overige strippers. De integrale kosten bij 100.000 m³ digestaat bedragen 5€/ m³. In beide schaalgroottes komt 0,71€ terug in de vorm ammonium sulfaat (bij 20€/ ton). Strippen is essentieel voor verkleinen van derogatie problematiek en zorgt ook voor verkleinen van de ammoniak uitstoot tijdens opslag van het digestaat van vergisters zonder strippers tijdens het winterseizoen. 12 € en 1,2 kg N verwijdering bespaart het afvoeren van 1 m³ mest met 4kg N voor **27€/ m³** (bij 12.000 m³ digestaat per jaar). De Byosis stripper kost in feite **slechts 6 € of 7,5 €** (respectievelijk bij 100.000 en 36.000 ton/jaar inclusief de waarde van ammonium sulfaat) om het afvoeren van 1 m³ mest met derogatie overschot af te voeren. Het is niet verrekend wat het kost om de kalium en fosfaat en andere mineralen en organische stof die tegelijk wordt afgevoerd zo nodig te vervangen.

Inschattingen van investeringskosten, vergistersilo's en groengasopwerking getoetst met Referm. Cijfers voor operationeel niet van Referm overgenomen vanwege dubbeltelling transport, hygiëniseren, en energie vanwege ontbreken warmte integratie van groengascompressie warmte, en stripperwarmte met hygiëniseren en opwarmen vergister.



Nutriënten Management Instituut BV
Nieuwe Kanaal 7c
6709 PA Wageningen

tel: (06) 29 03 71 03
e-mail: nmi@nmi-agro.nl
website: www.nmi-agro.nl