

Biologisch aanzuren van dierlijke mest

Snelle en kosteneffectieve methode voor het terugdringen
van emissies

30 augustus 2024, 's-Hertogenbosch

In samenwerking met Sanovations B.V. en een melkveehouder in Someren

STUURGROEP LANDBOUW INNOVATIE BRABANT



Cosun Beet
COMPANY



HAS green academy
Onderwijsboulevard 221
Postbus 90108
5200 MA 's-Hertogenbosch
Telefoon: 088 890 36 00

Documenttitel: Biologisch aanzuren van dierlijke mest: Snelle en kosteneffectieve methode voor het terugdringen van emissies

Status: Definitief 2.0

Contactpersoon: Jan Meiresonne (J.Meiresonne@has.nl)

Projectteam: Jan Meiresonne, HAS green academy
Rob Bakker, HAS green academy
Johan Sanders, Sanovations
Hans Loverbosch, melkveehouder

Plaats: 's-Hertogenbosch

Datum: 30-8-2024

**Dit onderzoek is gefinancierd en ondersteund door Stuurgroep Landbouw
Innovatie Brabant en Cosun Beet Company**

Samenvatting

De EU en Nederland streven naar significante reducties in broeikasgas- en stikstofemissies tegen 2030. De Nederlandse melkveehouderij draagt met respectievelijk 36% en 48% bij aan de broeikasgasuitstoot en de ammoniakemissies van de landbouw. Het aanzuren van mest met zwavelzuur, zoals in Denemarken, is effectief maar kostbaar. Dit onderzoek evalueert de haalbaarheid van biologisch aanzuren van dierlijke mest met melasse als alternatief, met als doel het verminderen van emissies en het verbeteren van mestverwaarding.

Op een melkveehouderij in Someren met circa 100 koeien werd een experiment uitgevoerd waarbij een kleinere mestkelder werd biologisch aangezuurd met melasse en een grotere kelder als controle diende. Beide kelders werden op 6 november 2023 nagenoeg leeggepompt en aan de kleine kelder werd 12% melasse (op initiële hoeveelheid mest basis) toegevoegd. De pH in de aangezuurde mestkelder daalde van 8,1 naar 5,5 in 13 dagen en stabiliseerde op 4,7. Na 9 weken steeg de pH naar 6,0. De aangezuurde dunne fractie bevatte significant meer fosfaat (61%) en de biogasopbrengst steeg met 43% ten opzichte van de controle.

Dit onderzoek bevestigt de hypothese dat het toevoegen van organische (rest)stromen aan mestkelders effectief is om methaan- en ammoniakemissies te verlagen en de mestverwaarding te verbeteren. Daarnaast is de aanpak passend binnen de huidige bedrijfsvoering inclusief de regelgeving. De biogasproductie nam significant toe waardoor de mestverwaarding verbeterde.

Aanbevolen wordt om de pH van drijfmest rond 5,5 te houden, het verzuringsproces eventueel op te starten met een organisch zuur, en verder onderzoek te doen naar optimale melassedosering, frequenter mengen, en inzet van alternatieve suikerrijke resstromen. Voor borging van het proces zijn implementatie van een pH-monitoringssysteem en aanvullende emissiemetingen noodzakelijk.

Inhoud

Samenvatting	2
1. Introductie	5
2. Methode	7
2.1 Praktijksituatie	7
2.2. Opstart van de proef	7
2.3. Monitoring	8
2.4. Risicoborging	9
2.5. Biogas en NPK-analyses	9
3. Resultaten	11
3.1. pH en temperatuur monitoring in mestkelders	11
3.2. Potentieel bio-methaanopbrengst	12
3.3. Invloed biologisch aanzuren op NPK verhouding	14
4. Discussie	16
4.1. Fysisch-chemische observaties	16
4.2. Melassedosering en temperatuurinvloeden op pH	16
4.3. Effect van mixen op pH-stabiliteit en H ₂ S-emissies in mestkelder	17
4.4. Biogasproductie	18
4.5. Invloeden op de pH in aangezuurde mest	18
4.6. Toename fosfaat en stikstof in aangezuurde dikke fractie	19
4.8. Invloed biologisch aanzuren op droge stof	20
4.9. Kosten en baten	20
4.10. Wetgeving	20
5. Conclusie	22
6. Aanbevelingen	23
6.1 Optimalisatie van melassedosering en pH management	23
6.2 Emissiemetingen en toepassing dunne fractie	23
6.3. Fosfaatmobilisatie en stikstofbehoud	24
6.4. Alternatieven voor melasse	24
6.5. Verdienmodel voor de boer	24

Literatuur.....	26
Bijlage I: Samenvatting voorgaand onderzoek IBC-proef.....	30
Bijlage II: pH verloop en melasse concentratie IBC-proef.....	32
Bijlage III: Correctie melasse en spoelwater bio-methaanopbrengst.....	33
Bijlage IV: Melasse correctie NPK.....	35

1. Introductie

De Europese Unie streeft naar een reductie van 55% van de broeikasgasuitstoot in 2030 ten opzichte van 1990 (Europese Commissie, 2021). Ook Nederland heeft eigen doelstellingen om de broeikasgassen te reduceren, namelijk met 60% in 2030 (Rijksoverheid, 2024). Daarnaast heeft Nederland zich gecommitteerd aan het reduceren van de stikstofuitstoot. In het coalitieakkoord van het kabinet Rutte IV staat opgenomen dat in 2030 74% van de stikstofgevoelige natuur in Natura-2000-gebieden de kritische depositiewaarden (KDW) niet meer overschrijdt, om de biodiversiteit en ecosystemen te beschermen (Rijksoverheid, z.d.).

De Nederlandse melkveehouderij speelt een belangrijke rol in het behalen van deze doelstellingen aangezien de sector verantwoordelijk is voor 5,4% (in 2020) van de landelijke broeikasgasemissies en 48% (in 2022) van de landelijke ammoniakemissies (Centraal Bureau voor de Statistiek, z.d.; WUR, z.d.; Centraal Bureau voor de Statistiek, 2023). Gezien de grote bijdrage aan emissies vanuit deze sector is het belangrijk om effectieve maatregelen te nemen om de milieu-impact te reduceren.

Een van de mogelijke maatregelen is het aanzuren van mest onder toevoeging van het anorganische zuur zwavelzuur. Verschillende studies tonen aan dat aanzuren tot een pH lager dan 6 leidt tot een significante reductie van zowel ammoniak- als methaanemissies (Overmeyer et al., 2023; Habtewold et al., 2018; Ottosen et al., 2009). Door mest aan te zuren verschuift het chemisch evenwicht in de mest tussen ammonium en ammoniak richting ammonium, hierdoor wordt er minder ammoniak in de mest gevormd. Echter zijn de kosten en investeringen voor aanzuren met sterke zuren erg hoog ten opzichte van andere emissiereducerende maatregelen (Regueiro et al., 2022; Puente-Rodríguez et al., 2022). Daarnaast leidt het op grote schaal gebruiken van zwavelzuur mogelijk tot opbouw van sulfaten in bodem en water.

Onderzoek door Bussink et al. (2012) toonde aan dat biologisch verzuren van mest onder toevoeging van bietenmelasse (hierna te noemen: biologisch aanzuren) een veelbelovend alternatief is voor chemisch aanzuren, doordat het zowel de pH verlaagt als de methaan- en ammoniakemissies vermindert. Van Noort et al. (2022) bevestigen deze voordelen in een recente discussiepaper en voegen toe dat biologisch aanzuren ook een significante verhoging van de biogasproductie kan opleveren. Dit proces is vergelijkbaar met fermentatietechnieken zoals inkuielen, waarbij de pH snel daalt en de emissies worden verminderd zonder nadelige bijwerkingen voor het milieu. Daarnaast is biologisch aanzuren relatief eenvoudig te implementeren op boerderijniveau, zonder de noodzaak voor kostbare en ingrijpende stalaanpassingen, wat het een potentieel haalbare optie maakt binnen de huidige landbouwpraktijken.

In de zomer van 2023 bevestigde onderzoek uitgevoerd onder leiding van HAS green academy op Intermediate Bulk Container (IBC) schaal dat biologisch aanzuren leidt tot verlaging van de pH en remming van methanogene micro-organismen (Meiresonne et al., 2024). Bovendien toont het een toename van de biogasproductie met 51% ten opzichte van niet verzuurde mest, wat overeenkomt met eerdere bevindingen (zie Bijlage I). Deze resultaten suggereren dat biologisch aanzuren een kansrijke maatregel is zonder kapitaalintensieve kosten (Kavanagh et al., 2021; Prado et al., 2020).

In dit onderzoek wordt de praktische haalbaarheid van biologisch aanzuren in de mestkelder op een melkveehouderij onderzocht. Daartoe is een proef uitgevoerd bij een melkveehouder in Someren met ca. 100 melkkoeien. De stal heeft twee afzonderlijke mestkelders. De kleinere mestkelder is verzuurd met 3,8% melasse en de grotere mestkelder heeft gediend als controle. Tijdens de proef is de stal gewoon in bedrijf gebleven.

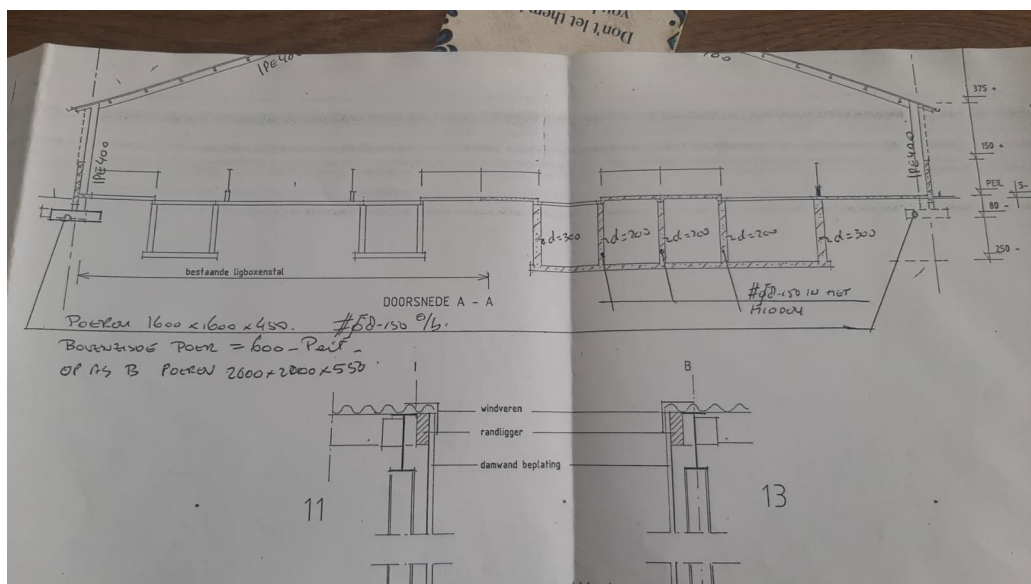
De hypothese luidt als volgt: Het toevoegen van organische koolhydraat houdende (rest)stromen aan mestkelders is effectief voor het verlagen van methaan- en ammoniakemissies en het verbeteren van de mestverwaarding, passend binnen de huidige regelgeving en bedrijfsvoering. Deze hypothese stuurt de richting van dit onderzoek waarbij nieuwe inzichten worden ontwikkeld voor de praktische haalbaarheid, verhoging van de biogasproductie, en de verlaging van ammoniak- en methaanemissies in Nederland.

Dit onderzoek is gefinancierd en ondersteund door Stuurgroep Landbouw Innovatie Brabant en Cosun Beet Company.

2. Methode

2.1 Praktijksituatie

De proef is uitgevoerd bij een melkveehouder in Someren met ca. 100 melkkoeien. De stal dateert uit 2004 en beschikt over een roostervloer waardoor de drijfmest in een mestkelder terecht komt. Deze stal bevat twee afzonderlijke mestkelders: een kleinere mestkelder met een capaciteit van circa 240 m³ en een grotere mestkelder met een capaciteit van circa 800 m³ (Figuur 1). Op basis van fabrieksgegevens van de melkrobot was bekend dat de kleine mestkelder dagelijks naar schatting 492 liter spoelwater ontving van de melkrobot. De melasse met een sucrose inhoud van 47% van Cosun Beet Company was voorgaand aan de proef geleverd in IBC vaten en deze waren op het erf van de veehouder opgeslagen.



Figuur 1: Plattegrond met links de kleine mestkelder van circa 240 m³ en rechts de grote mestkelder van circa 800 m³.

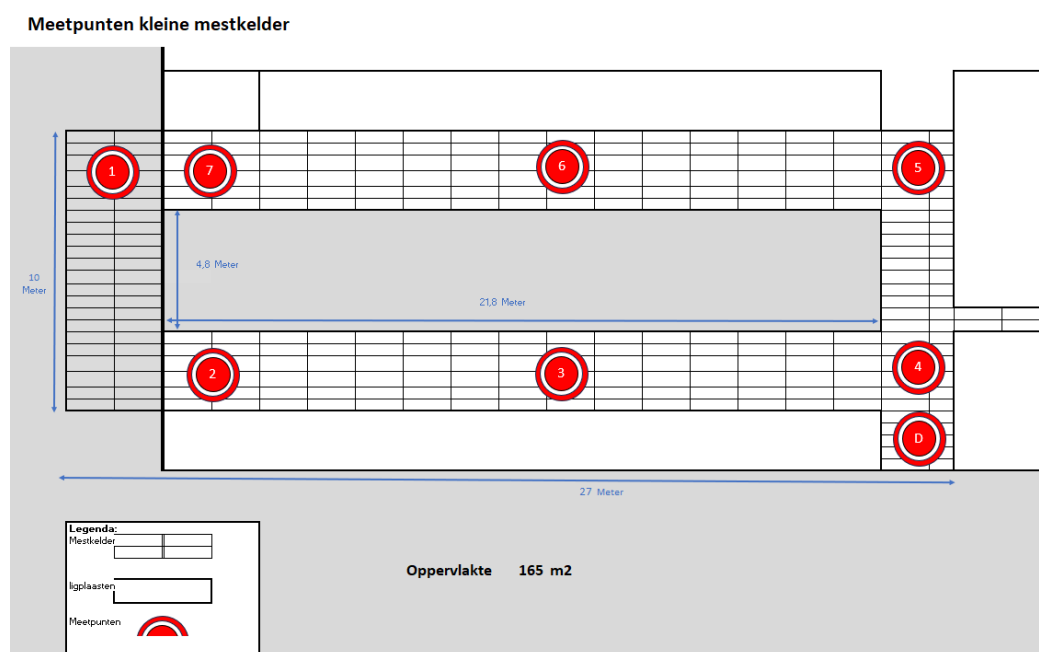
2.2. Opstart van de proef

Op 6 november 2023 werden de kleine en grote mestkelders zo grondig mogelijk leeggepompt met een tractor aangedreven mestpomp. Na het leegpompen bleef er ongeveer 36 m³ oude mest achter in de kleine mestkelder. De benodigde hoeveelheid melasse, welke door Cosun Beet Company ter beschikking was gesteld voor dit onderzoek, werd bepaald op basis van eerder onderzoek uitgevoerd op IBC-schaal, waarbij een concentratie van circa 12% melasse effectief bleek om de mest te verzuren tot een pH van 5,5 (zie Bijlage II). Om een homogene menging te waarborgen, werd circa

5,25 m³ melasse uit IBC-containers boven de ingang van de kleine mestkelder toegevoegd terwijl de mestpomp in werking was. Na 8 dagen bleek de pH weer te stijgen waardoor een tweede dosering van 5,25 m³ melasse is toegevoegd. In deze periode is er 31,9 m³ mest in de kelder gevallen. Om excessieve schuimvorming tegen te gaan is ongeveer 2 liter van een 1:1 zonnebloemolie en polyethyleen oplossing toegevoegd tijdens de opstart om de oppervlaktespanning te verhogen.

2.3. Monitoring

Na de toevoeging van melasse werd in de eerste week de pH dagelijks gemeten in beide mestkelders op 8 verschillende meetpunten. Figuur 2 visualiseert de meetpunten in de aangezuurde kelder. Hiervoor werd de Hach HQ2200 Multimeter gebruikt, samen met twee Hach Intellical pH-elektroden die voor gebruik gekalibreerd waren. De pH werd gemeten door de elektrode te bevestigen aan een lange stok en deze vervolgens tussen de roostervloer, in de mestkelder te steken. Er werd gebruik gemaakt van twee elektroden om duplometingen uit te voeren ter borging van de datakwaliteit. Tijdens de pH-metingen werd ook de temperatuur van de mest gemeten met behulp van de pH-meter, terwijl de buitentemperatuur ter plekke werd waargenomen. Het doel was de temperatuur vast te leggen om mogelijke effecten van mesttemperatuur op het aanzuurproces te kunnen identificeren.



Figuur 2: Locatie van 8 meetpunten voor pH metingen.

De hoeveelheid mest in de mestkelder werd geschat door een meetstok door de roostervloer in de mest te steken, waarna de hoogte van de 'mestafdruk' op de stok werd gemeten. Deze gemeten

hoogte werd vervolgens gebruikt om, in combinatie met de bekende breedte en lengte van de mestkelder, het volume van de aanwezige mest te berekenen.

Nadat de pH was gedaald tot <5,5 hebben pH metingen wekelijks plaatsgevonden. Aangezien tijdens de proef melkvee aanwezig was in de stal, is de mestkelder eens per 10 dagen gemixt om de verse mest te mixen in de verzuurde mest.

2.4. Risicoborging

Tijdens het mixen van de mestkelder werd gezorgd voor adequate ventilatie in de stal om de concentraties van mogelijk gevaarlijke gassen, zoals waterstofsulfide (H_2S), te verminderen. Dit werd geborgd door de zijanten van de stal open te houden en de ventilatoren maximaal te laten draaien. Ook werd gebruik gemaakt van de Honeywell BW MicroClip XL, uitgerust met zowel een H_2S - als LEL-detector, om direct te waarschuwen bij het overschrijden van veilige concentraties. HAS studenten die meegewerkt hebben aan het onderzoek, zijn bovendien gewezen op de informatie over het veilig werken in een stalomgeving (www.mestgassen.nl).

Alle gemeten en verzamelde data werden gedocumenteerd in een logboek. Dit logboek bevatte naast de pH- en temperatuurmetingen ook gegevens over de samenstelling van de mest, om de verdunning door het spoelwater van de melkrobot en de melasseconcentratie bij te houden.

2.5. Biogas en NPK-analyses

Aan het einde van de proef op 31 januari zijn twee 5L mestmonsters genomen uit zowel de aangezuurde kelder als de controlekelder. Dit tijdstip was gekozen aangezien de pH voor het eerst was gestegen naar 6. Voorafgaande aan de monsternamen werden de mestkelders gedurende 30 minuten gemixt om meer homogeniteit in de mestkelder te verkrijgen. De monsters werden genomen bij de opening van de mestkelder terwijl het mixen nog bezig was. Beide monsters zijn vervolgens op de HAS green academy ingevroren om microbiële activiteit te remmen.

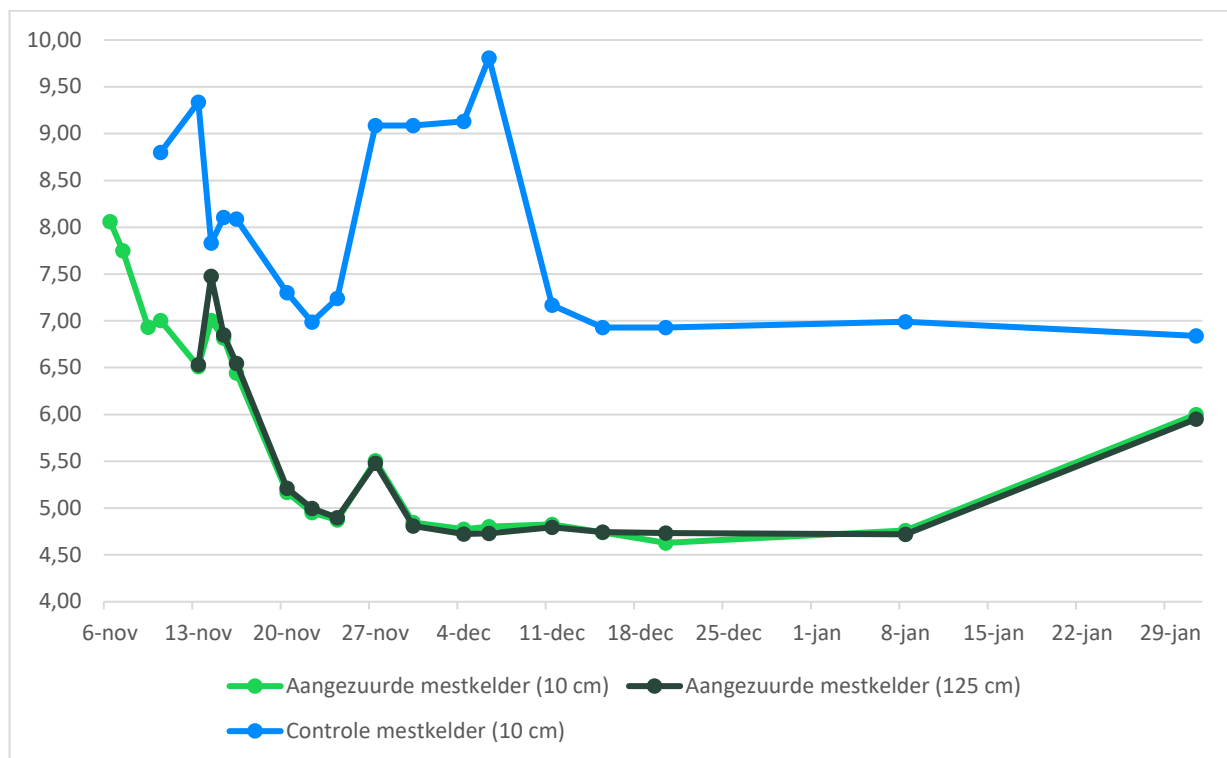
Een fractie van beide monsters is verzameld uit de controle en de aangezuurde kelder en opgestuurd naar LeAF Wageningen en Eurofins om geanalyseerd te worden. De monsters bestemd voor Eurofins werden (voor invriezen) voorbehandeld met behulp van de Eppendorf 5804 centrifuge op 5000 omwisselingen/min (rpm) om de mest te scheiden in een dikke en dunne fractie. Het centrifugeren resulteerde verhoudingsgewijs in één deel dikke fractie en vier delen dunne fractie. Beide fracties werden vervolgens geanalyseerd om inzicht te krijgen in de invloed van biologisch aanzuren op de verhouding van stikstof, fosfor en kalium. De monsters die geanalyseerd werden door LeAF waren niet voorbehandeld. Voor beide monsters is een biochemisch methaanpotentieel

(BMP) uitgevoerd om het verschil in biogasopbrengst tussen de aangezuurde en controle kelder te bepalen. Beide analyses zijn gecorrigeerd op melasse en/of spoelwater (Bijlage III en IV).

3. Resultaten

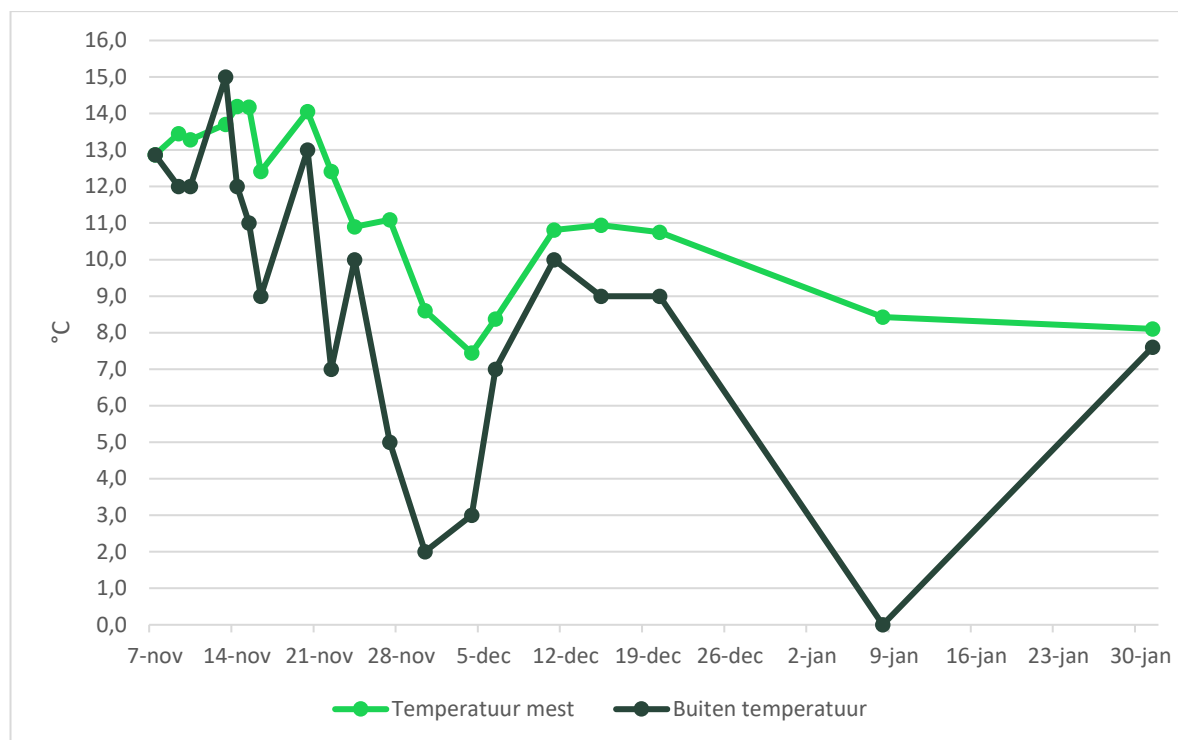
3.1. pH en temperatuur monitoring in mestkelders

Gedurende de eerste week vertoonde de pH in de aangezuurde mestkelder op 10 cm diepte een dalende trend van 8,1 naar 6,9 (Figuur 3). Tegen het einde van de week (14 november) begon de pH weer te stijgen en bereikte 7,0 op 10 cm mestdiepte en 7,5 op 125 cm mestdiepte. Daarom werd opnieuw melasse 5,25 m³ gedoseerd om de pH verder te verlagen. Vanaf dit moment zijn ook diepere metingen uitgevoerd op 125 cm. Uiteindelijk is de pH op 19 november gezakt naar 5,5 waarna deze stabiel is gebleven op 4,7 tot 8 januari. De pH is vanaf 8 januari langzaam toegenomen naar 6,0 op 31 januari. De pH in de controle mestkelder fluctueerde op 10 cm tussen pH 8,8 en 9,8 gedurende de periode van 7 november en 10 december waarna deze stabiliseerde op 7,0.



Figuur 3: pH verloop in aangezuurde en controle kelder op 10 en 125 cm diepte. Op 6 en 14 november is in beide kelders 5,25 m³ melasse gedoseerd.

Figuur 4 toont de temperatuur van de mest in de mestkelders en de buitentemperatuur over de periode van 7 november tot 31 januari. De temperatuur van de mest varieerde tussen 12,9°C en 8,1°C, terwijl de buitentemperatuur fluctueerde tussen maximaal 15,0 en 0,0 graden Celsius. In het eerste deel van de proef veranderd mesttemperatuur met de buitentemperatuur, in het tweede deel is dat minder het geval.

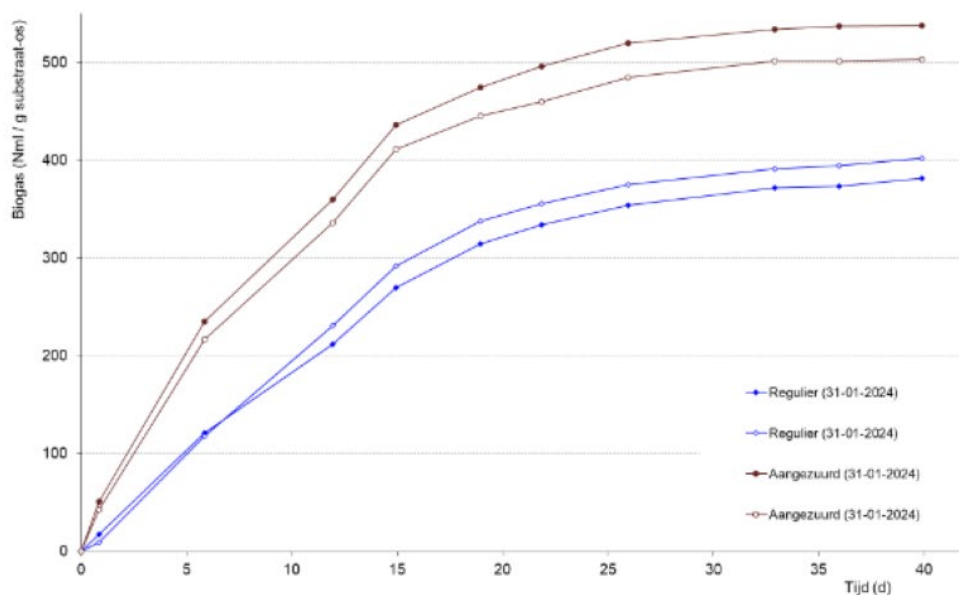


Figuur 4: Mesttemperatuur in kelder, en buitentemperatuur.

3.2. Potentieel bio-methaanopbrengst

Het biochemisch methaanpotentieel en het droge stofgehalte van de genomen mestmonsters aan het einde van de proef op 31 januari is te zien in Figuur 5. In totaal was er 219,5 m³ mest in de kleine kelder verzuurd. Het aangezuurde mestmonster heeft een biogaspotentieel van 42,0 Nm³ biogas per ton mest, zoals blijkt uit de analyses van LeAF. Ter vergelijking, het mestmonster uit de controlekelder, aangeduid als 'regulier' in de grafiek, heeft een biogaspotentieel van 22,7 Nm³ biogas per ton mest. De methaanconcentratie in het biogas varieerde van 62% in het monster uit de

grote mestkelder, en 64% in het monster uit de kleine mestkelder.



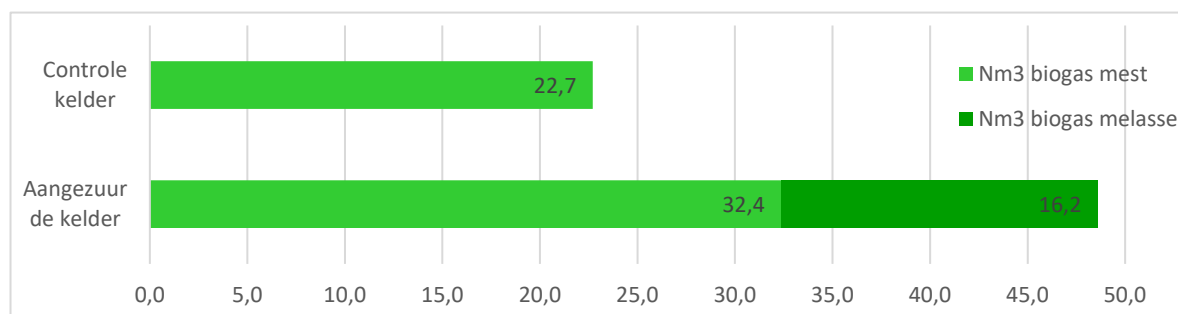
Figuur 3-1 Biogasproductie in Nm³ biogas / ton substraat-OS.

Tabel 3-1. Samenvatting van de testresultaten.

Monster	Biogasproductie		CH ₄ gehalte van het biogas (%)	Droge stofgehalte (g/kg)
	(Nm ³ /ton substraat-OS)	(Nm ³ /ton substraat)		
regulier	392 ± 10	22,7 ± 0,1	62	72
aangezuurd	520 ± 17	42,0 ± 1,4	64	100

Figuur 5: Biochemisch methaanpotentieel van controle en aangezuurde monsters. (bron: LeAF rapportage)

Aangezien de biogasproductie in het aangezuurde monster mede werd beïnvloed door de toevoeging van melasse (3,8%) en spoelwater (15,7%), zijn de resultaten gecorrigeerd volgens de methode beschreven in Bijlage III. Na deze correcties bleek de aangezuurde mest een significant hoger biogaspotentieel te hebben van 32,37 Nm³ ten opzichte van 22,7 Nm³ biogas per ton mest.

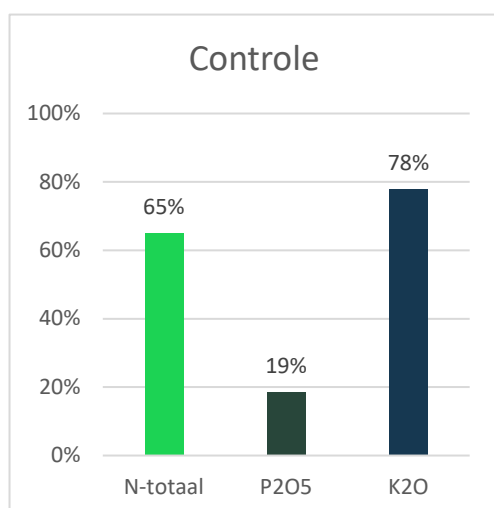


Figuur 6: Biogas opbrengstpotentieel in Nm³/ton mest na correctie van melasse en spoelwater.

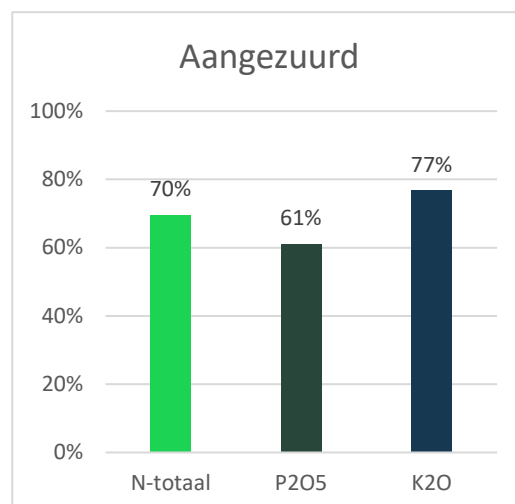
3.3. Invloed biologisch aanzuren op NPK verhouding

De invloed van biologisch aanzuren op de concentraties van de macronutriënten NPK in de dikke en dunne fractie na scheiding van de mest wordt weergegeven in Figuur 7 en 8 en Tabel 1 en 2. Hoewel het aangezuurde monster werd gecorrigeerd voor de toevoeging van NPK uit melasse, zoals beschreven in Bijlage IV, blijkt uit de berekeningen dat de bijdrage van melasse aan de NPK-waarden verwaarloosbaar is. De analyses van Eurofins tonen een significant verschil aan tussen de verdeling van deze mineralen.

De aangezuurde dunne fractie bevat 61% van de in de oorspronkelijke mest voorkomende fosfaat (1,1 g/kg), terwijl het controlemonster slechts 19% fosfaat bevat (0,2 g/kg). Wat betreft het totale stikstofgehalte (N-totaal) is er een verschil van 5% tussen het controlemonster en het aangezuurde monster: het controlemonster bevat 65% N-totaal (2,74 g/kg), terwijl het aangezuurde monster 70% N-totaal bevat (3,4 g/kg). Het kaliumgehalte bedraagt respectievelijk 78% in het controlemonster (4,0 g/kg) en 77% in het aangezuurde monster (5,8 g/kg).



Figuur 7: Aandeel NPK in dunne fractie van controle mestmonster.



Figuur 8: Aandeel NPK in dunne fractie van aangezuurd mestmonster.

De aangezuurde dikke fractie bevat 39% van de in de oorspronkelijke mest voorkomende fosfaat (2,9 g/kg), terwijl het controlemonster 81% fosfaat bevat (4,0 g/kg). Het totale stikstofgehalte (N-totaal) heeft geen verschil tussen het controlemonster en het aangezuurde monster: beide bevatten 5,9 g/kg, wat overeenkomt met respectievelijk 35% en 30% van de N-totaal in de oorspronkelijke mest. Het kaliumgehalte bedraagt respectievelijk 22% in het controlemonster (4,5 g/kg) en 23% in het aangezuurde monster (7,0 g/kg).

Aangezuurd Monster

Tabel 1: Stikstof, fosfaat en kalium concentraties in aangezuurde dun en dik fractie

Fractie	N-totaal (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Dun	3,4 (70%)	1,1 (61%)	5,8 (77%)
Dik	5,9 (30%)	2,9 (39%)	7,0 (23%)

Controle Monster

Tabel 2: Stikstof, fosfaat en kalium concentraties in controle dun en dik fractie

Fractie	N-totaal (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Dun	2,74 (65%)	0,2 (19%)	4,0 (78%)
Dik	5,9 (35%)	4,0 (81%)	4,5 (22%)

4. Discussie

4.1. Fysisch-chemische observaties

Vanaf de opstart van de proef werd een mogelijke uitdaging verwacht met het verpompen en mixen van de mest door de toevoeging van melasse. Vanuit voorgaande experimenten op de HAS green academy waarbij rundermest werd aangezuurd met melasse bleek de mest in het ene monster dikker te worden, en de andere mest juist dunner. Voor de start van de praktijkproef werd de mestkelder leeggepompt, waardoor er geen spoelwater aanwezig was. Tijdens de opstartfase werden geen problemen ondervonden met het inmengen van de melasse in de mest. Halverwege de proef bleek echter dat de melkrobot dagelijks ~492 liter spoelwater in de kleine kelder pompte. Gedurende de rest van de proef werden er geen problemen ondervonden met de mengbaarheid van de mest, wat mogelijk kan worden toegeschreven aan de aanwezigheid van het spoelwater. Het is niet direct aangetoond dat de aanwezigheid van spoelwater de afwezigheid van mengproblemen veroorzaakte. Verder onderzoek zou moeten verifiëren of de mengbaarheid inderdaad niet afhankelijk is van de aanwezigheid van spoelwater om deze hypothese definitief te bevestigen.

Vanuit bezoekers die het erf hadden betreden bij de melkveehouder, als door de boer zelf werd een andere geur vernomen van de mest uit de mestkelders. Geobserveerd was dat de geur sterker leek te zijn dan niet aangezuurde mest, maar zich minder goed verspreid over het erf. Geur van verzuurde mest is enigszins vergelijkbaar met de geur die ontstaat door inkuilen (melkzuur). Dit suggereert dat de toevoeging van melasse mogelijk leidt tot een vermindering van geurverspreiding. Aangezien er bij deze proef maar één mestkelder was verzuurd kan dit mogelijk veelbelovend zijn voor de omgeving wanneer alle aanwezige mest wordt verzuurd op het erf.

4.2. Melassedosering en temperatuurinvloeden op pH

Tijdens de opstart van de proef werd verwacht dat de melasse eenmalig gedoseerd diende te worden. Echter bleek de pH na de initiële daling, na 7 dagen weer te stijgen, waardoor een tweede dosering nodig was. De melassedosering was gebaseerd op een IBC-proef die is uitgevoerd in de zomer van 2023 met een gemiddelde temperatuur van 25 graden Celsius. Tijdens deze proef werd melasse gebruikt met een sucrose-inhoud van 44% ten opzichte van 47% in de praktijkproef. Theoretisch gezien zou er dus minder melasse toegevoegd moeten worden tijdens de praktijkproef in vergelijking met de pilotproef. De tweede dosering van melasse toont wel aan dat de pH van mest gestuurd kan worden tijdens het proces, door middel van (tijdige) melasse dosering).

De praktijkproef heeft plaatsgevonden einde herfst 2023 – midden winter van 2024 met een gemiddelde buitentemperatuur van 8,8 graden Celsius. Bussink et al. (2014) suggereren dat lagere temperaturen (rond 10 graden Celsius) resulteren in een verhoogde zuurproductie door minder concurrentie tussen micro-organismen, in tegenstelling tot hogere temperaturen (rond 25 graden Celsius). Echter, tijdens deze praktijkproef in de herfst/winter was een hogere dosering suiker nodig dan in de IBC-proef tijdens de zomer, wat aangeeft dat lagere temperaturen niet resulteerden in een significant verhoogde zuurproductie uit melasse.

Tijdens de proef op IBC- en praktijkschaal was er een verschil in start-pH. In de praktijkproef was de initiële pH 8, terwijl deze in de pilotproef pH 7 was. Hoewel de hogere pH tijdens de opstart van de praktijkproef een rol kan hebben gespeeld, is het waarschijnlijk dat juist de buffercapaciteit van de mest bepalend was voor de noodzaak van een tweede dosering melasse. Mest met een hogere concentratie ammonium, en daarmee meer ammoniumcarbonaat, heeft een sterkere buffercapaciteit waardoor meer zuurvormend vermogen nodig was om de pH te laten dalen.

Deru et al. (2023) toonden tijdens een incubatie experiment aan dat de toevoeging van melasse aan dikke fractie uit mest leidde tot een initiële piek in de productie van koolstofdioxide (CO₂) en methaan (CH₄), en een afname van ammoniakemissie. Dit impliceert dat tijdens de eerste dosering melasse een deel van de suikers direct wordt omgezet naar CO₂ en CH₄. De pH zal door deze omzetting van vetzuren uit de suiker weer langzaam toenemen. Hierdoor dient een nieuwe hoeveelheid suiker toegevoegd te worden voor voldoende pH daling waardoor methanogene bacteriën worden geremd. De directe daling van pH en vervolgens stijging kan hierdoor verklaard worden.

Hoewel de concurrentie tussen micro-organismen niet lijkt te verminderen, kan een lagere temperatuur de activiteit van de micro-organismen remmen wat leidt tot een trager proces van zuurvorming (Appels et al., 2008). Hierdoor verloopt de pH-daling langzamer, waardoor mogelijk methanogene bacteriën meer vetzuren kunnen omzetten naar CO₂ en CH₄. Dit kan verklaren waarom er meer melasse nodig is om voldoende zuren te produceren voor een effectieve pH-daling in koudere omstandigheden.

4.3. Effect van mixen op pH-stabiliteit en H₂S-emissies in mestkelder

Tijdens het meten van de pH in de grote kelder werden significante fluctuaties waargenomen, waarbij de pH in drie dagen toenam van 7,2 naar 9,1. Dit bleek te wijten aan organisch materiaal dat vast kwam te zitten in de pH-elektrode, wat niet-representatieve en mogelijk deels foutieve metingen veroorzaakte. Na deze bevinding is hierdoor meer stabiliteit in de metingen te zien vanaf

12 december. Dit heeft verder geen invloed gehad op de resultaten aangezien de grote kelder als een controle diende.

De mestkelder is iedere 10 dagen gemixt om een homogene verzuring te borgen. Tijdens het meten van de pH waren tussen de acht verschillende meetpunten variaties gemeten van $\pm 0,6$. Mogelijk dat door vaker te mixen de onderlinge pH minder varieert. Omdat de pH gedurende de proef $< 6,0$ was waren de resultaten hierdoor niet beïnvloed. Verder is voor de veiligheid van mens en dier gebruik gemaakt van een H_2S - en LEL-detector. Tijdens het mixen was de H_2S -concentratie maximaal 20 ppm. Zonder mixen kwam H_2S niet boven de detectielimiet van de detector. Dit suggereert dat tijdens biologisch aanzuren met melasse geen langdurige gevaarlijke concentraties worden verwacht. Waarschijnlijk vervluchtigd de H_2S die ontsnapt uit de mest, veel geleidelijker tijdens pH daling, waardoor geen ophoping ontstaat.

4.4. Biogasproductie

De toename van 43% biogasproductie door biologisch aanzuren met melasse bevestigt de hypothese dat organische (rest)stromen de mestverwaarding kunnen verbeteren doordat minder methaan (en ammoniak) vervluchtigd naar het milieu. Habtewold et al. (2018) tonen aan dat aanzuring van mest kan leiden tot een reductie van methaanemissies met 69-84%. Deze vermindering wordt toegeschreven aan de remming van Methanosarcina-soorten, wat bijdraagt aan lagere methaanemissies. Dit wordt ook bevestigd door Ottosen et al. (2009) waarbij aanzuren met zwavelzuur tot pH 5,5 zorgde voor een sterke remming van methanogene micro-organismen.

4.5. Invloeden op de pH in aangezuurde mest

Na de opstartfase daalde de pH van 8,0 naar 4,7. Na een periode van 75 dagen steeg de pH weer tot 6,0, waarmee de proef werd beëindigd. Deze verandering in pH kan worden verklaard door verschillende chemische en biologische processen die plaatsvinden tijdens en na het aanzuren van mest.

Kort na de aanzuring van de mest vindt ontgassing van koolstofdioxide (CO_2) plaats, zoals omschreven door Adamsen, Nyord en Hafner (2021). Door het evenwicht tussen water, koolzuur en koolstofdioxide, wordt meer koolzuur gevormd wanneer de pH daalt. Het geproduceerde koolstofdioxidegas vervluchtigd vervolgens uit de mest, wat leidt tot een toename van de pH. Verder spelen voornamelijk fermentatieprocessen een rol in de verandering van de pH. De fermentatie van koolhydraten, in dit geval melasse, in de mest is verantwoordelijk voor de productie van onder andere organische zuren, wat de pH verlaagt (Bussink et al., 2012).

Hoewel methanogene micro-organismen normaal gesproken bijdragen aan de stijging van de pH door de omzetting van vetzuren in methaan en kooldioxide, zijn deze sterk geremd bij een lage pH van 4,7. Hierdoor is dit in deze context geen mogelijke verklaring van de verhoging van de pH. Verwacht wordt dat de geleidelijke stijging van de pH heeft plaatsgevonden doordat de mestkelder steeds voller kwam met verse mest. De gefermenteerde melasse produceert een bepaalde hoeveelheid zuur die de verse mest wat in de kelder valt, ook kan verzuren. Uiteindelijk is er een kantelpunt dat er onvoldoende zuur in de kelder aanwezig is om al de extra verse mest te verzuren. Hierdoor zorgt verse mest voor een langzame stijging van de pH van 4,7 naar 6,0 gedurende de 75 dagen.

4.6. Toename fosfaat en stikstof in aangezuurde dikke fractie

Wanneer aangezuurde mest wordt gescheiden in een dikke en een dunne fractie mobiliseert een deel van de aanwezige fosfaten uit de dikke fractie, naar de dunne fractie. Dit verschil wordt veroorzaakt door de verhoogde oplosbaarheid van fosfaat bij een lagere pH, in dit geval 6,0 ten opzichte van 8,0 bij verse, niet aangezuurde mest. Bij lage pH-waarden kunnen fosfaatverbindingen die normaal minder oplosbaar of (organisch) gebonden zijn, oplossen in water. Dit wordt bevestigd door literatuur waaruit blijkt dat verzuring van mest de concentratie van opgelost anorganisch fosfaat verhoogt (Pedersen et al., 2016; Regueiro et al., 2020). Christensen et al. (2009) toonden aan dat 70% van het totale fosfaat in (varkens)mest oplost bij een pH van 5,5, wat suggereert dat een groot deel van het fosfaat in (varkens)mest in anorganische vorm aanwezig is en bij lagere pH-waarden in oplossing gaat. Dit blijkt ook uit de analyses van Eurofins waarbij 61% van het totale fosfaat bij een pH van 6,0 in oplossing is gegaan.

Bij een pH van 6 is diwaterstoffosfaat (H_2PO_4^-) de meest voorkomende vorm van fosfaat (pK_a 2,15, 7,20, 12,35). Wanneer de pH daalt, kunnen organische fosfaatverbindingen omgezet worden naar beter oplosbare anorganische vormen (Regueiro et al., 2020). Daarnaast kan de toename in anorganisch fosfaat kan ook het gevolg zijn van microbiële activiteit tijdens biologisch aanzuren, waarbij organisch fosfaat wordt afgebroken tot anorganisch fosfaat.

In de dunne fractie van mest komt stikstof voornamelijk voor in minerale vorm. Door de pH van 6 vervluchtigt ammonium niet als ammoniak vanwege het chemisch evenwicht met ammoniak wat resulteert in een hoger stikstofgehalte in aangezuurde mest (Regueiro et al., 2020). Kalium wordt minder beïnvloed door pH-veranderingen omdat het voornamelijk in oplosbare vorm aanwezig blijft (Tran et al., 2018).

4.8. Invloed biologisch aanzuren op droge stof

Het biologisch aanzuren van mest heeft invloed op het droge stof gehalte van de mest. Analyse van LeAF toont aan dat het droge stof gehalte in de controle mest 7,2% was, terwijl in de aangezuurde mest dit gehalte veel hoger was, ca. 10%. Deze toename wordt toegeschreven aan de toevoeging van suikers aan de mest, zoals in dit geval melasse. De verhoging van het droge stofgehalte is belangrijk voor boeren die hun mest willen laten vergisten, omdat vergisters een optimaal droge stofgehalte vereisen om een efficiënt en stabiel vergistingsproces te waarborgen. Hoewel vergisters binnen een bepaald bereik kunnen functioneren, is een hoger droge stofgehalte vaak gunstig omdat het meer organisch materiaal biedt voor microbiële afbraak en omzetting naar biogas. Te veel of te weinig droge stof kan echter leiden tot respectievelijk verzuring of inefficiëntie.

4.9. Kosten en baten

De huidige prijs van melasse bedraagt op het moment van het schrijven van dit rapport €320 per ton. Deze kosten kunnen aanzienlijk zijn voor veehouders, vooral bij grootschalige toepassing. Om de kosten te reduceren, kunnen alternatieve (rest)stromen overwogen worden die goedkoper zijn dan melasse. Dit betreffen stromen die momenteel al worden gebruikt voor co-vergisting aangezien deze ook wettelijk toegestaan zijn voor vergisting, wat hun implementatie eenvoudiger maakt.

Naast de directe kosten van de suikers, zijn er bijkomende operationele kosten verbonden aan biologisch aanzuren. Veehouders moeten vaker mengen om een gelijkmatige verdeling van de toegevoegde suikers in de mest te garanderen, wat resulteert in hogere energiekosten en een verhoogde arbeidsbehoefte. Dit intensievere mengproces kan de operationele kosten verhogen, vooral voor grotere bedrijven met grotere mestopslagen.

Verder is het noodzakelijk om de pH-waarde van de mest regelmatig te controleren om emissiereductie te waarborgen. Het huidige proces van handmatige pH-metingen op verschillende plekken in de mestkelder is tijdrovend en arbeidsintensief, wat extra kosten en inefficiënties met zich meebrengt.

4.10. Wetgeving

In het Besluit activiteiten leefomgeving (Bal) en de Omgevingswet wordt een onderscheid gemaakt tussen monomestvergisting en covergisting. Monomestvergisting houdt in dat alleen dierlijke mest wordt vergist zonder toevoeging van andere organische materialen. Covergisting omvat de vergisting van dierlijke mest in combinatie met andere organische reststromen (minimaal 50%

dierlijke mest gebaseerd op gewicht). Covergisting is enkel toegestaan als het digestaat nog als meststof kan worden toegepast (Informatiepunt Leefomgeving, z.d.-a; Informatiepunt Leefomgeving, z.d.-b). Deze voorwaarden zijn vermeld in bijlage Aa artikel 4 van de Uitvoeringsregeling Meststoffenwet.

Deze bijlage specificeert welke stoffen en bijproducten legaal mogen worden gebruikt als meststof. Melasse is genoemd als een toegestane stof. Onder G1 punt 43 staat het volgende vermeld: "Reststof die is verkregen bij de verwerking van suikerbieten of suikerriet en die in hoofdzaak bestaat uit suikers die resteren na suikerproductie (melasse)." (*Uitvoeringsregeling Meststoffenwet*, 2024). Melasse voldoet dus aan de wettelijke definities en voorwaarden voor gebruik als meststof, mits het niet leidt tot negatieve milieu-effecten. Dit ondersteunt de hypothese dat het toevoegen van melasse aan de mestkelder een wettelijk toegestane praktijk is en dat biologisch aanzuren ook binnen de wettelijke regelgeving valt.

In feite is melasse een additief dat toegevoegd wordt aan mest. Een additief dat wettelijk is toegestaan. In het kader van de Ruimtelijke ordeningsregels (Bal) is er dus sprake van monomestvergisting. Of dat ook in het kader van de SDE++ regeling zo beoordeeld wordt is nog een punt van onderzoek.

5. Conclusie

De onderzoeksresultaten bevestigen de hypothese dat het toevoegen van organische (rest)stromen aan mestkelders effectief is voor het verlagen van methaan- en ammoniakemissies en het verbeteren van de mestverwaarding, passend binnen de huidige regelgeving.

De toevoeging van melasse aan een in bedrijf zijnde mestkelder bleek praktisch eenvoudig te implementeren binnen de huidige bedrijfsvoering van melkveehouderijen. Gedurende de proef werd 12% melasse (47% sucrose w/w) toegediend aan de mestkelder, dat leidde tot een aanzienlijke daling van de pH van 8,0 naar 4,7 over een periode van 75 dagen. Aan het einde van de proef was het melassegehalte gedaald tot 3,8%. De biogasproductie van de biologisch aangezuurde mest nam met 43% toe (32,37 m³ biogas/ton mest) na correctie voor melasse, vergeleken met het controlemonster. Daarnaast resulteerde de scheiding van de mest in dikke en dunne fracties na aanzuring in een hoger fosfaatgehalte (61%) in de dunne fractie vergeleken met het controlemonster (19%). De proef toonde ook aan dat lagere buitentemperaturen niet leidden tot een verhoogde zuurproductie, waardoor eventueel minder melasse nodig is bij lagere temperaturen (rond 10 graden Celcius).

De toepassing van melasse aan dierlijke mest voldoet aan de huidige wetgeving en kan, volgens literatuuronderzoek, legaal worden toegepast binnen de kaders van de Meststoffenwet en de Omgevingswet. Het blijft echter onduidelijk of deze techniek moet worden geclassificeerd als monomestvergisting of covergisting.

6. Aanbevelingen

6.1 Optimalisatie van melassedosering en pH management

Tijdens het onderzoek is geconstateerd dat de pH na de tweede dosering melasse daalde naar 4,7, wat aangeeft dat er te veel melasse is toegevoegd (doel is om pH op 5,5 te handhaven). Aangezien methanogene bacteriën sterk worden geremd vanaf een pH lager dan 6, is een optimale melasse dosering van belang voor de economische haalbaarheid van biologisch aanzuren. Er dient zo min mogelijk grondstof (suiker) gebruikt worden voor de hoogste effectiviteit. Hiervoor dient verder onderzoek worden uitgevoerd naar de optimale dosering van melasse, waarbij rekening wordt gehouden met variaties in (seizoen)temperatuur en de initiële pH van de mest. Het doel van het onderzoek betreft de langdurige verlaging van de pH, waarbij de pH rond de 5,5 wordt gehouden. Bij een stijging van de pH naar 6 zou een kleine hoeveelheid melasse toegevoegd moeten worden om de pH weer terug te brengen naar 5,5.

Omdat tijdens de proef pH-varianties van $\pm 0,6$ tussen de meetpunten werden gemeten, wordt aanbevolen om in een toekomstige proef vaker te mixen (~iedere 5 dagen) wanneer de pH tot 5,5 wordt verlaagd. Door vaker te mixen, wordt verwacht dat de verzuring homogener verloopt, wat een nauwkeuriger dosering van extra melasse mogelijk maakt. Verder onderzoek zou daarnaast moeten verifiëren of de mengbaarheid inderdaad niet afhankelijk was van de aanwezigheid van spoelwater.

Het efficiënter gebruik van melasse kan worden bereikt door te beginnen met het doseren van een organisch zuur tot een pH van 6,5. Dit wordt aanbevolen omdat tijdens de opstart van de proef suiker uit melasse deels wordt omgezet naar CO_2 en CH_4 . Door eerst een organisch zuur te doseren, wordt extra broeikasgasemissie voorkomen en kan de pH sneller en efficiënter worden verlaagd. Vervolgens kan biologische verzuring met melasse worden toegepast om de pH verder te verlagen tot 5,5 en stabiel te houden.

6.2 Emissiemetingen en toepassing dunne fractie

Voor inzicht in reductie van ammoniakemissies dienen stalemissies gemeten worden. Verder kan de aangezuurde dunne fractie gebruikt worden om de roostervloeren te spoelen om zo veel mogelijk stalemissies te reduceren. Hiervoor moet een proef uitgevoerd worden waarbij beide mestkelders gedurende een bepaalde periode biologisch verzuurd worden. Na deze periode dienen de emissies zonder biologisch aanzuren gemeten te worden als controle. Op deze manier kan een vergelijking

worden gemaakt en de effectiviteit van biologisch aanzuren voor het terugdringen van emissies in kaart gebracht worden.

6.3. Fosfaatmobilisatie en stikstofbehoud

Er dient verder onderzoek gedaan te worden naar de mobilisatie van fosfaten en de invloed van aanzuren op het remmen van mineralisatie van organische stikstof, en voorkomen van vervluchtiging van minerale stikstof. Hierdoor wordt bijgedragen aan een beter beheer van nutriënten in mest. Indien consistent aangetoond kan worden dat fosfaten mobiliseren naar de dunne fractie dient een plan opgesteld te worden om de fosfaten te verwijderen uit de dunne fractie met bijvoorbeeld struviet. Dit biedt mogelijke economische voordelen voor boeren die mest moeten afzetten doordat meer mest uitgereden kan worden vanwege een lager fosfaatgehalte in de mest.

6.4. Alternatieven voor melasse

Hoewel melasse effectief is voor biologisch aanzuren, heeft het als veevoer een hoogwaardiger toepassing. Een potentieel interessant alternatief is het gewas Silphie, ook wel bekend als zonnekroon, dat in Duitsland al veel wordt gebruikt voor vergisting. Silphie bevat mogelijk ook gemakkelijk afbreekbare suikers die geschikt zijn voor biologisch aanzuren. Daarnaast heeft dit gewas bijkomende voordelen: het is een meerjarige plant die weinig kunstmest en pesticiden nodig heeft, wat de ecologische voetafdruk verkleint. Bovendien verbetert de diepe wortelstructuur de bodem en helpt bij waterretentie. De bloemen trekken veel insecten, waaronder bijen en vlinders, wat de biodiversiteit bevordert. Verdere onderzoeken naar de samenstelling en effectiviteit van Silphie voor biologisch aanzuren zijn nodig om de volledige potentie van dit gewas te bevestigen.

6.5. Verdienmodel voor de boer

Om biologisch aanzuren minder arbeidsintensief te maken voor de boer kan een pH-monitoringssysteem geïmplementeerd worden in mestkelder. Een dergelijk systeem kan de noodzaak voor handmatige metingen verminderen, wat resulteert in lagere arbeidskosten. De constante monitoring is essentieel voor het waarborgen van de kwaliteit van de aangezuurde mest. Bovendien kan het systeem aangeven wanneer er opnieuw melasse gedoseerd dient te worden, wat helpt om een stabiele pH-waarde te handhaven en overdosering te voorkomen.

Voor opschaling van biologisch aanzuren zal in de toekomst een kosten-batenanalyse uitgevoerd moeten worden. Deze analyse moet niet alleen de initiële investeringskosten van het systeem in kaart brengen, maar ook de besparingen op lange termijn door verminderde arbeidskosten en de

potentiële toename in biogasopbrengst. De verhoogde biogasopbrengst kan een belangrijke factor zijn aangezien dit kan resulteren in hogere inkomsten voor de boer, wat de initiële investeringskosten kan compenseren en mogelijk kan dienen als een nieuw verdienmodel.

Literatuur

1. Adamsen, A.P., Nyord, T. & Hafner, S. 2021. The stability of pH of acidified stored manure slurry. Advisory note from DCA – Danish Centre for Food and Agriculture, Aarhus University, 17. May 2021
2. Appels, L., Baeyens, J., Degreè, J., & Dewil, R. (2008). Principles and potential of the anaerobic digestion of waste-activated sludge. *Progress in Energy And Combustion Science*, 34(6), 755–781. <https://doi.org/10.1016/j.peccs.2008.06.002>
3. Bussink, D. W., Van Rotterdam- Los, A. M. D., Vermeij, I., Van Dooren, H. J. C., Bokma, S., Wageningen, Nutrient Management Institute NMI B.V., & HBLFA Raumberg - Gumpenstein. (2014). [Reducing NH₃ emissions from cattle slurry by (biological) acidification: experimental proof and practical feasibility]. Wageningen, Nutrient Management Institute NMI B.V. <https://www.nmi-agro.nl/wp-content/uploads/2019/09/Report-1422.N.12.pdf>
4. Bussink, D.W., Van Rotterdam- Los, A.M.D., & Wenzl, W. (2012). Biologisch aanzuren van mest kansrijk voor melkveebedrijven. Wageningen. NMI, rapport 1422.N.11.
5. Centraal Bureau voor de Statistiek. (2023, 2 maart). Uitstoot landbouw lager dan in 1995, maar laatste jaren niet meer gedaald. Centraal Bureau Voor de Statistiek. <https://www.cbs.nl/nl-nl/nieuws/2023/09/uitstoot-landbouw-lager-dan-in-1995-maar-laatste-jaren-niet-meer-gedaald>
6. Centraal Bureau voor de Statistiek. (z.d.). Stikstofemissies naar lucht. Centraal Bureau Voor de Statistiek. <https://www.cbs.nl/nl-nl/dossier/dossier-stikstof/stikstofemissies-naar-lucht>
7. Christensen, M. L., Hjorth, M., & Keiding, K. (2009). Characterization of pig slurry with reference to flocculation and separation. *Water Research*, 43(3), 773–783. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2008.11.010>
8. Deru, J., Van Rotterdam, D., El Mahdi, J., De Stigter, J., Beek, J., Louis Bolk Instituut, Nutriënten Management Instituut, Wageningen University & Research, & KTC Zegveld. (2023). Ammoniak- en broeikasgasemissies van gescheiden mestfracties in een incubatie-experiment (Nr. 2023-01 LbD). https://www.louisbolk.nl/sites/default/files/publication/pdf/ammoniak-en-broeikasgasemissies-van-gescheiden-mestfracties-een-incubatie-experiment_0.pdf
9. Europese Commissie. (2021, 14 juli). De Europese Green Deal. https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/european-green-deal_nl
10. Habtewold, J., Gordon, R., Sokolov, V., VanderZaag, A., Wagner-Riddle, C., & Dunfield, K. (2018). Reduction in Methane Emissions From Acidified Dairy Slurry Is Related to Inhibition of Methanosarcina Species. *Frontiers in Microbiology*, 9. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2018.02806> <https://www.nmi-agro.nl/wp-content/uploads/2013/03/Rapport-1422-met-kaft.pdf>
11. Informatiepunt Leefomgeving. (z.d.-a). Covergisten en doelmatig beheer. <https://iplo.nl/thema/praktijksituaties/veehouderijen/covergisten-mest/covergisten-doelmatig-beheer/>

12. Informatiepunt Leefomgeving. (z.d.-b). Toelaten mestvergisting op een locatie.
<https://iplo.nl/thema/praktijksituaties/veehouderijen/toelaten-mestvergisting-locatie/>
13. Kavanagh, I., Fenton, O., Healy, M. G., Burchill, W., Lanigan, G., & Król, D. (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.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126251>
14. Meiresonne, J. W. P., Bakker, R., & Sanders, J. P. M. (2024, 21 maart). Enhancing Biogas Production and Mitigating Ammonia and Methane Emissions through Biological Acidification of Cattle Manure [Presentatieslides]. ManuREsource, Antwerpen, België.
15. Ottosen, L. D., Poulsen, H. V., Nielsen, D. A., Finster, K., Nielsen, L. P., & Revsbech, N. P. (2009). Observations on microbial activity in acidified pig slurry. *Biosystems Engineering*, 102(3), 291–297. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.12.003>
16. Overmeyer, V., Trimborn, M., Clemens, J., Hölscher, R., & Büscher, W. (2023). Acidification of slurry to reduce ammonia and methane emissions: Deployment of a retrofittable system in fattening pig barns. *Journal Of Environmental Management*, 331, 117263.
<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.117263>
17. Pedersen, I.F., Rubæk, G.H. & Sørensen, P. Cattle slurry acidification and application method can improve initial phosphorus availability for maize. *Plant Soil* 414, 143–158 (2017).
<https://doi.org/10.1007/s11104-016-3124-6>
18. Petersen, S. O., Andersen, A. J., & Eriksen, J. (2012). Effects of Cattle Slurry Acidification on Ammonia and Methane Evolution during Storage. *Journal Of Environmental Quality*, 41(1), 88–94. <https://doi.org/10.2134/jeq2011.0184>
19. Prado, J., Chieppe, J., Raymundo, A., & Fanguero, 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.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121443>
20. Puente-Rodríguez, D., Gollenbeek, L.R., Verdoes, N. & Bos, A.P. (2022.) Perspectief van het aanzuren van mest in Nederland om methaan- en ammoniakemissie te reduceren. Wageningen Livestock Research, Rapport 1375. <https://edepot.wur.nl/572080>
21. Regueiro, I., Gómez-Muñoz, B., Lübeck, M., Hjorth, M., & Jensen, L. S. (2022). Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. *Bioresource Technology Reports*, 19, 101135. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2022.101135>
22. Regueiro, I., Siebert, P., Liu, J., Müller-Stöver, D., & Jensen, L. S. (2020). Acidified Animal Manure Products Combined with a Nitrification Inhibitor Can Serve as a Starter Fertilizer for Maize. *Agronomy*, 10(12), 1941. <https://doi.org/10.3390/agronomy10121941>
23. Rijksoverheid. (2024, 2 mei). Klimaatbeleid.
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/klimaatverandering/klimaatbeleid>

24. Rijksoverheid. (z.d.). Aanpak stikstofuitstoot verminderen.
<https://www.rijksoverheid.nl/onderwerpen/aanpak-stikstof-natuur-water-en-klimaat/aanpak-stikstofuitstoot-verminderen>
25. Tran, Q. T., Maeda, M., Oshita, K., Takaoka, M., & Saito, K. (2018). Phosphorus and potassium availability from cattle manure ash in relation to their extractability and grass tetany hazard. *Soil Science And Plant Nutrition*, 64(3), 415–422. <https://doi.org/10.1080/00380768.2018.1433958>
26. Uitvoeringsregeling Meststoffenwet. (2024, 28 maart).
<https://wetten.overheid.nl/BWBR0018989/2024-03-28#BijlageAa>
27. Van Noort, R., Kamminga, N., Bussink, W., Voncken, T., Sanders, J., NMI agro, NCM, & Platform Groen Gas. (2022). Met biologisch aanzuren mest minder ammoniak en minder broeikasgassen en meer groen gas.
<https://mestverwaarding.nl/storage/article/files/2022/12/63a5b2c264c65.pdf>
28. WUR. (z.d.). Methaan. <https://www.wur.nl/nl/onderzoek-resultaten/dossiers/dossier/methaan-1.htm>
29. Zireeni, Y., Jones, D. L., & Chadwick, D. R. (2023). Influence of slurry acidification with H₂SO₄ on soil pH, N, P, S, and C dynamics: Incubation experiment. *Environmental Advances*, 14, 100447. <https://doi.org/10.1016/j.envadv.2023.100447>

Bijlagen

Bijlage I: Samenvatting voorgaand onderzoek IBC-proef

In de zomer van 2023 hebben Sanovations b.v. en HAS green academy, in samenwerking met een melkveehouder in Someren een aantal proeven op Intermediate Bulk container (IBC) schaal uitgevoerd met bietsuikermelasse op het erf. Het onderzoek richtte zich op de mogelijkheden van het biologisch aanzuren van rundermest met behulp van melasse als toevoegmiddel. De centrale doelen waren het valideren van de volgende hypothesen:

1. Aanzuren van mest met melasse zorgt voor een blijvende pH daling van mest en een lagere verwachte ammoniakemissie.
2. Aanzuren van mest met melasse zorgt voor een hogere biogasproductie en verlaagt daarbij methaanemissies.
3. Aanzuren van mest met melasse is eenvoudig toe te passen op de melkveehouderij.
4. Aanzuren van mest heeft geen aantoonbare invloed op de chemische samenstelling van biogas.

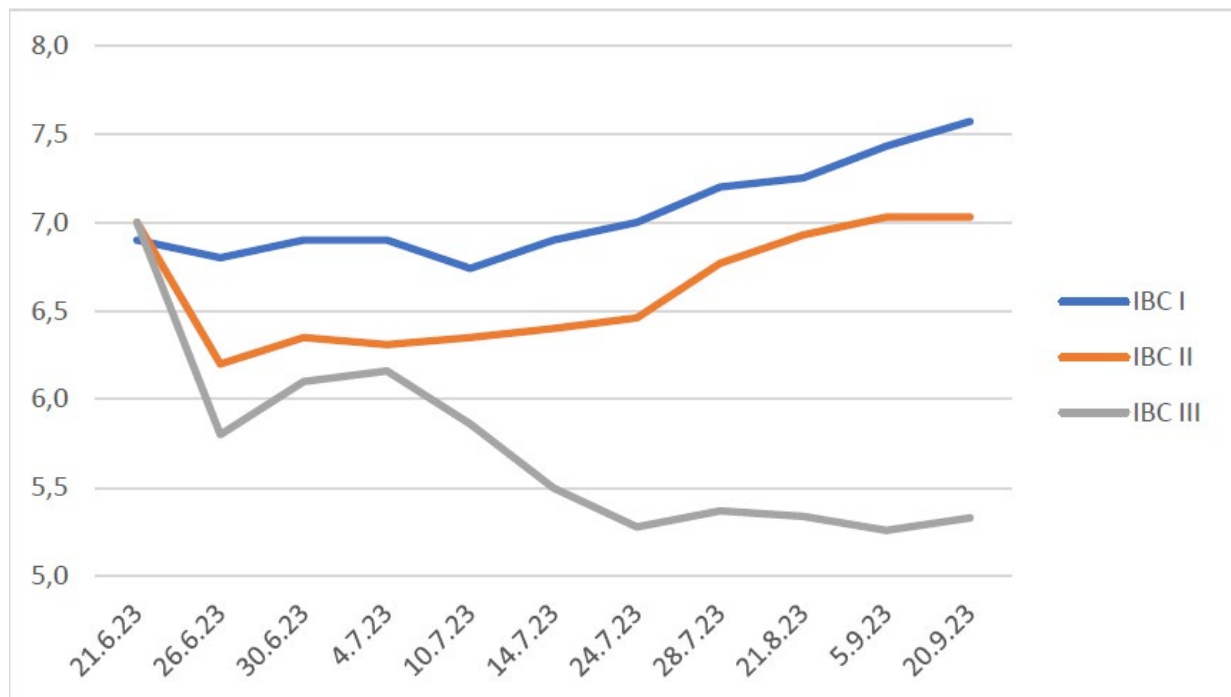
De hypothesen zijn onderzocht door twee IBC's te vullen met verschillende verhoudingen melasse en rundermest en een controle IBC met enkel rundermest. Gedurende het onderzoek is minimaal wekelijks de pH gemeten en zijn de aangezuurde monsters vergist in een bioreactor op de HAS green academy. Tevens zijn verschillende analyses uitgevoerd zoals droge stofbepaling, $\text{NH}_4\text{-N}$, vluchtige vetzuren en kalium. Naast de uitgevoerde analyses heeft een externe validatie plaatsgevonden voor de biogasproductie door LeAF, waarbij het biomethaanpotentieel van mestmonsters uit de drie IBC's zijn bepaald.

De resultaten van het onderzoek bevestigen dat het aanzuren van rundermest met melasse leidt tot een pH-daling en stabilisatie tot 5,3 – 5,5 en 50% meer biogasproductie (en dus verlaging van methaanemissies). Doordat de pH van IBC II en IBC III na de opstart van de proef binnen twee dagen is gedaald onder 6,7, wordt een aanzienlijke ammoniakreductie verwacht. Verder blijkt dat deze aanpak eenvoudig in de bestaande praktijk geïntegreerd kan worden. Daarnaast toont de analyse van de chemische samenstelling van het geproduceerde biogas aan dat het aanzuren met melasse geen invloed heeft op de chemische samenstelling van het biogas.

De groep van betrokken organisaties en bedrijven ontwikkelt nu een plan om tot toepasbaarheid van de techniek op bedrijfsniveau te komen, en ook om op basis van toepassing van deze techniek, een emissiefactor voor ammoniak vast te stellen via de RAV methodiek. Daarnaast past de techniek in

het opzetten van een geïntegreerde circulaire keten. Hierbij wordt de (niet-geëmitteerde) ammoniak uit mest bij vergisting teruggewonnen wordt via strippen, met hergebruik van stikstof als meststof.

Bijlage II: pH verloop en melasse concentratie IBC-proef



Figuur 9: IBC I: controle, IBC II: 3,4% melasse, IBC III: 12% melasse

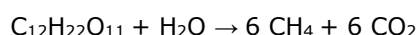
N.B. de sucrose inhoud was 43%.

Bijlage III: Correctie melasse en spoelwater bio-methaanopbrengst

Voor de correctie van melasse in de aangezuurde monsters werd een specifieke methode gevolgd. De melasseconcentratie in de monsters werd bepaald aan de hand van gegevens uit het logboek, resulterend in een waarde van 3,8% melasse. Cosun leverde melasse met 47% sucrose en de monsters bevatten 15,7% spoelwater. De hoeveelheid toegevoegde suiker werd berekend met de formule:

$$1 \text{ m}^3 \text{ mest} = 1000 \text{ kg} \times 3,8\% \times 47\% = 17,86 \text{ kg sucrose}$$

De theoretische biogasopbrengst werd berekend met de volgende stappen. Eerst werd de reactievergelijking opgesteld voor de fermentatie van sucrose naar CO₂ en CH₄:



Vervolgens werd de theoretische biogasopbrengst in m³ berekend met de formule:

$$(17860 \text{ g sucrose} / 342,3 \text{ g/mol} \times 12) \times 22,4 \text{ L/mol} / 1000$$

Dit resulteert in een theoretische biogasopbrengst van 14,03 Nm³ uit melasse. Uit de BMP-analyse van LeAF bleek dat het aangezuurde monster 42 m³ biogas produceerde. Om de bijdrage van melasse te corrigeren, werd de theoretische biogasopbrengst van melasse afgetrokken van de totale biogasopbrengst:

$$42 - 14,03 = 27,97 \text{ Nm}^3$$

De biogasopbrengst uit mest en melasse werd gecorrigeerd voor de invloed van spoelwater met een factor 1,157:

$$\text{Mest: } 27,97 \times 1,157 = 32,37 \text{ Nm}^3$$

$$\text{Melasse: } 14,03 \times 1,157 = 16,23 \text{ Nm}^3$$

De toename aan biogasopbrengst uit de aangezuurde mest ten opzichte van de controle werd berekend door de toename aan biogas uit het aangezuurde monster te delen door de opbrengst uit de controle:

$$32,37 - 22,7 = 9,67 \text{ Nm}^3 \text{ biogas}$$

$$9,67 / 22,7 * 100 = 43\% \text{ toename biogas ten opzichte van controle.}$$

Bijlage IV: Melasse correctie NPK

Aangezien melasse extra NPK toevoegt aan de mest, zijn de NPK-analyses gecorrigeerd om de daadwerkelijke NPK-inhoud van de mest te bepalen. In dit onderzoek bleek de bijdrage van melasse aan de NPK-waarden echter zo klein dat deze verwaarloosbaar is. Hieronder worden de berekeningen gepresenteerd die deze conclusie onderbouwen, evenals de impact van de melassecorrectie op de uiteindelijke mineralenverdeling.

Stap 1: Resultaten van Eurofins

De initiële analyse van de NPK-waarden in het biologisch aangezuurd mestmonster werd uitgevoerd door Eurofins. De resultaten hiervan zijn weergegeven in Tabel 3.

Tabel 3: Resultaten Eurofins aangezuurd monster.

Fractie	N-totaal (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Dikke fractie	5,9	2,9	7,2
Dunne fractie	3,4	1,2	6,0

Stap 2: Correctiehoeveelheden

Voor de NPK-correctie werd de samenstelling van melasse gebruikt, zoals vermeld in het Tabellenboek Voeding Herkauwers 2022. De NPK-waarden van melasse zijn:

- Stikstof (N): 0,656% (berekend door ruw eiwit (RE) te delen door 6,25)
- Fosfor (P): 0,6%
- Kalium (K): 28,8%

De bijdrage van melasse aan de NPK-waarden in het mestmonster werd berekend met de formule:
Bijdrage = Percentage Melasse × Percentage NPK in melasse.

Voor een melasse percentage van 3,8% in het mestmonster resulteert dit in:

- $N = 0,656\% \times 3,8\% = 0,025\%$
- $P = 0,6\% \times 3,8\% = 0,023\%$
- $K = 28,8\% \times 3,8\% = 1,094\%$

Deze waarden werden vervolgens gebruikt om de hoeveelheden te corrigeren, zoals weergegeven in Tabel 4.

Tabel 4: Te corrigeren hoeveelheden NPK

Fractie	N (g/kg)	P (g/kg)	K (g/kg)
Dikke fractie	0,00005	0,00005	0,00219
Dunne fractie	0,00020	0,00018	0,00876

Stap 3: Verdeling van de NPK-waarden

De totale hoeveelheid NPK in het aangezuurde monster werd verdeeld over de dikke en dunne fractie, waarbij 20% werd toegewezen aan de dikke fractie en 80% aan de dunne fractie, zoals gebaseerd op de centrifugeresultaten weergegeven in Tabel 5.

Tabel 5: Volume correctie op basis van centrifuge resultaten.

Fractie	N-totaal (g/kg)	P ₂ O ₅ (g/kg)	K ₂ O (g/kg)
Dikke fractie	5,9	2,9	7,2
Dunne fractie	13,6	4,6	24,0

Stap 4: Correctie van de hoeveelheden

De hoeveelheden uit Tabel 3 werden gecorrigeerd met de volumeverdeling uit Tabel 5. Echter, gezien de minimale bijdrage van melasse aan de NPK-waarden, blijkt de correctie in Tabel 4 uiterst klein en daardoor verwaarloosbaar.

Stap 5: Eindverdeling van de mineralen

De uiteindelijke verdeling van de mineralen over de dikke en dunne fractie werd berekend door de gecorrigeerde waarden uit Tabel 5 te delen door het totale aantal, zoals weergegeven in Tabel 6.

Tabel 6: Eindverdeling NPK per fractie.

Fractie	N-totaal (%)	P ₂ O ₅ (%)	K ₂ O (%)
Dunne fractie	70%	61%	77%
Dikke fractie	30%	39%	23%