14 juli 2026 I Rapport 2062.N.24

Perspectief groene grondstoffen voor biologisch mest aanzuren

Wim Bussink (NMI)
Jelle Boode (NMI)
Johan Sanders (Sanovations)

nmi soil for life

Nutriënten Management Instituut BV
e-mail: nmi@nmi-agro.nl
website: www.nmi-agro.nl

Referaat

Bussink DW, Boode, J & Sanders JPM (2026). Perspectief groene grondstoffen voor biologisch mest aanzuren, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2062.N.24, pp. 81.

Rapport in het kort

Deze studie onderzoekt het perspectief om de ammoniak- en methaanemissie vanuit rundveedrijfmest te verminderen door middel van biologisch aanzuren met gewassen en reststromen. Hiertoe zijn 4 proeven uitgevoerd, waarbij verschillende gewassen en reststromen zijn gemengd door mest. Het verzurend potentieel is bepaald door de pH gedurende 1-2 maanden te volgen. Gebruikte gewassen zijn mais, voederbiet, sorghum en silphie. Onderzochte restproducten zijn OPL, DPL, SWML (uit de zuivelindustrie, wei-stromen), maisweekwater (uit de zetmeelwinning) en glucose. De resultaten geven antwoord hoe biologisch aanzuren met gewassen of reststromen een oplossingsrichting is voor het verminderen van de ammoniak- en methaanemissie vanuit rundveedrijfmest. Daarnaast is uitgewerkt wanneer, in combinatie met biogasproductie en eventueel N-strippen, biologisch aanzuren kosteneffectief is.

© 2026 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.

Gereviewd door: D. van Rotterdam-Los, senior projectmanager NMI

Het project is (mede) gefinancierd is door:

ZuivelNL

Provincie Groningen

ForFarmers

Inhoudsopgave

Samenvatting en conclusies 5

1 Inleiding 9
1.1 Aanleiding 9
1.2 Doel 10
1.3 Leeswijzer 10

2 Biologisch aanzuren achtergrond: emissies, biogas en N-overschot 11
2.1 Aanzuren algemeen 11
2.2 Biologisch aanzuren 12
2.3 Routes en systemen voor biologisch aanzuren plus mestvergisting 15

3 Proefopzet en uitvoering 17
3.1 Algemene proefopzet 17
3.2 Proef 1: Gewassen 17
3.3 Proef 2: Gewassen en reststromen 19
3.4 Proef 3: Gewassen en reststromen met mest van 3 bedrijven 20
3.5 Proef 4: Fed-batch 20

4 Resultaten 22
4.1 Resultaten aanzuren met melasse en gewasresten 22
4.2 Resultaten aanzuren met gewasresten en reststromen 24
4.3 Resultaten proef met mest van verschillende bedrijven 27
4.4 Resultaten fed-batch proef 29

5 Kosten en opbrengsten aanzuren 35
5.1 Uitgangspunten 35
5.2 Scenario's 36

6 Discussie 39
6.1 Geteste gewassen en verzuringspotentieel 39
6.2 Inzet van gewassen vanuit economisch perspectief 40
6.3 Reststromen 41
6.4 Ontsluiting biomassa tot suikers 43
6.5 Betonaantasting door aanzuren 45
6.6 Overige 47

7 Conclusies en aanbevelingen 50

8 Literatuur 51

Bijlage 1. Achtergrondinformatie proeven 54

Bijlage 2. Zure ontsluiting van mais 72

Bijlage 3 Gewassen en gasproductie 75

Bijlage 4 Lezingen en bijeenkomsten 80

Samenvatting en conclusies

Aanleiding en doel

De ammoniak(NH_3)- en broeikasgasemissies uit melkveehouderij moeten sterk omlaag. Van de NH_3-emissie is ruim de helft afkomstig uit de stal. Stalaanpassingen zijn echter duur en vaak zijn ook extra maatregelen nodig om de emissie van methaan (CH_4) te beperken. Biologisch aanzuren (BA) van de mestopslag onder de roostervloer kan dat veranderen. Bij BA wordt een energierijk (suiker- of zetmeelrijk) product toegevoegd aan de mest. De makkelijk afbreekbare suikers worden door melkzuurbacteriën in de mest omgezet in melkzuur. De melkzuurvorming zorgt voor een pH-daling van de mest. Daardoor daalt de NH_3-emissie sterk en stopt de CH_4-emissie uit de mestopslag. Diverse studies geven aan dat op bedrijfsniveau meer dan 50% NH_3-emissiereductie mogelijk is door de mest aan te zuren tot pH van 5,5. De emissie van CH_4 is met zeker 20% te reduceren.

Het grote bijkomend voordeel van mest aanzuren met een energierijk biologisch product is dat de verkregen energierijke, "uurverse" mest daarna uitstekend vergist. De biogas/groengasopbrengst per m³ mest verdubbelt ongeveer en de verblijftijd in de vergister halveert ruimschoots. Zo kan aanzuren én rendabel worden (zeker bij grotere bedrijven of samenwerkingsverbanden) én tegelijk grote milieuwinst leveren, passend bij het landelijke streven naar meer groengas[1]. Verder kan door stikstofstrippen tijdens de vergisting vloeibare N-meststoffen met een potentiële Renure-status worden gemaakt. Daardoor daalt het stikstofoverschot op melkveebedrijven.

In eerdere studies is aangetoond dat melasse een effectief product is voor biologisch aanzuren, maar is in Nederland zelf beperkt beschikbaar. De centrale vraag van deze studie is daarom of eigen geteelde gewassen (silphie, sorghum, mais, voederbiet) en (goedkope) reststromen melasse geheel of gedeeltelijk kunnen vervangen. Daarbij is ook nagegaan wat dit betekent voor de NH_3- en CH_4 emissies, de biogasproductie en bedrijfseconomie, en welke neveneffecten (geur, betoncorrosie, stikstof-overschot, borging) optreden.

Gewas als substraat voor biologisch aanzuren

Aanzuren met gewassen is onderzocht in 4 laboratoriumproeven (aangevuld met verkennende proeven), met mest van melkveebedrijven. Proef 1 testte de toevoeging van de vier gewassen (grof- of fijngesneden in 3 hoeveelheden (50, 32,5 en 17,5 g ds) aangevuld met melasse (respectievelijk, 0, 24,5 en 45,5 gram per kg drijfmest). De referentie was 70 gram melasse per kg drijfmest. In proef 2 werd dit herhaald met fijngesneden gewas. Daarnaast werd toevoeging van 5 reststromen getest in 2 hoeveelheden. Het betrof OPL, DPL, SWML (reststromen uit de zuivelindustrie; gedelactoliseerde producten afkomstig uit diverse wei-stromen), maisweekwater (resterende ingedampte dunne fractie bij zetmeelwinning uit mais) en glucose. Proef 3 gebruikte drijfmest van 3 bedrijven met uiteenlopende rantsoenen om de invloed van de mestsamenstelling te toetsen. Dit werd gedaan met de gewassen mais en voederbieten in de hoge en lage dosering (zie proef 1) en voor OPL, DPL en SWML in twee hoeveelheden; 15% en 7,5% + 3,75% melasse. De referentie was met melasse (5% en 7,5%). Proef 4 was

[1] De komende jaren stimuleert het kabinet de productie van groengas via mestvergisting in combinatie met de opschaling van Renure. Dit draagt bij aan reductie van methaan- en ammoniakemissies. Het kabinet werkt samen met betrokken partijen aan een versnelling van deze ontwikkeling, waaronder de vergunningverlening en betrekt daarbij LTO, NVDE, Rabobank en anderen. Hiermee wordt uitvoering gegeven aan de motie Den Hollander c.s. betreffende de inzet op mestverwerking en mestvergisting.

een fed-batch proef waarin de mestput werd nagebootst door herhaald verse mest plus toevoegmiddel toe te voegen gericht op het bereiken en handhaven van een doel pH van ongeveer4,5 gedurende 2 maanden. Naast pH metingen zijn de NH_3- en broeikasgasemissie en biogaspotentieel bepaald. In alle proeven werd gewerkt met 2 kg drijfmest bij de start. Deze werd verkregen door feces en urine apart te verzamelen en kort voor aanvang van de proeven te mengen (2:1). Bij sommige behandelingen werd eerst aangezuurd met azijnzuur tot pH 6,2 om gunstigere condities voor melkzuurvorming te creëren.

Het verzurend potentieel van de 4 gewassen bleef achter bij wat op grond van hun samenstelling werd verwacht. Fijngesneden gewas werkte duidelijk beter dan grofgesneden. In de vervolgproeven is daarom alleen met fijngesneden gewas gewerkt. Van de gewassen presteerde voederbiet veruit het best. Alleen met voederbiet kon de mest zonder melasse voldoende en langdurig worden aangezuurd. In de fed-batch (proef 4) was een bijmenging van ongeveer 15% versgewicht voederbiet (=30 g ds/kg mest) nodig voor een pH<5 gedurende ruim 60 dagen. Mais was redelijk effectief, maar bijmenging met melasse was nodig (9,3- 7,2% versgewicht mais aangevuld met respectievelijk 2,5 - 3,5% melasse). De effectiviteit van ingekuilde silphie en sorghum was beperkt omdat hun vrije suikers/zetmeel tijdens de conservering al waren omgezet in zuren. Toevoeging van gewassen vergroot het mestvolume tot zo'n 15%, afhankelijk van de mate waarin melasse wordt vervangen door een fijngesneden gewas.

Van de reststromen waren de zuivelpermeaten OPL en SWML in vergelijking tot melasse het meest effectief in het aanzuren van mest. Wei, maisweekwater en DPL waren minder effectief waardoor grote hoeveelheden nodig zijn (wei ~50%). Deze mate van mestverdunning is vanuit het oogpunt van vergisting ongunstig. Bepalend voor het benodigde toevoegvolume is het suikergehalte in het product. Het aanwezige zuur in de producten was vrij gering en had daardoor een klein effect.

De drijfmest van verschillende bedrijven (3 in proef 3) reageren sterk verschillend door grote verschillen in buffercapaciteit. Een hoge buffercapaciteit vergt meer suikers en dus een hogere inzet van energierijk product om de mest tot pH 5 te laten dalen. In de praktijk is niet alleen het rantsoen (gunstig is een laag eiwitgehalte) maar beïnvloeden ook kalk en spoelwater in de drijfmest de buffercapaciteit.

In het fed-batch experiment was het fermentatierendement het hoogst bij melasse (+/- 100% van de theoretische H+-productie) en voederbiet en DPL (+/- 94%), en het laagst bij mais (+/- 52%) (silphie en sorghum niet bepaald). De resultaten met melasse duiden op homofermentatie waarbij alle suikers worden omgezet in melkzuur. Bij alle aangezuurde behandelingen daalde de ammoniakemissie sterk. Ook was er ruwweg een verdubbeling van de biogasopbrengst, van 30 m³ (referentie) naar 52–67 m³ per ton drijfmest, bij een vrijwel gelijke gaskwaliteit (CH_4-gehalte). De verblijftijd bij vergisting was 1,2–2,3 keer korter dan van onbehandelde drijfmest. De melasse behandeling had de kortste verblijftijd gevolgd door de behandeling met voederbiet en mais (~2). Een onverwacht en afwijkend resultaat was de emissie van methaan uit de aangezuurde mest. In de uitgevoerde labproef was deze 2–9 keer hóger dan de referentie, dit in tegenstelling tot praktijkonderzoek in 2024 en de literatuur. Dit vergt nader onderzoek.

Bedrijfseconomie

De bedrijfseconomie is doorgerekend voor 150, 300 en 600 koeien. De belangrijkste bevindingen zijn dat de schaalgrootte van doorslaggevend belang is. Een bedrijf met meer dan 300 koeien is nodig om de investeringen in onder meer een vergister terug te verdienen. Ondanks de milieuwinst en emissiebeperkingen is BA bij minder dan 300 koeien niet rendabel, maar qua kosten en opbrengsten zeker concurrerend met stalaanpassingen. Op buurtniveau kan echter wel voldoende schaalgrootte worden gerealiseerd door het bijmengen van BA-mest van een buur-/regiobedrijf in een bestaande vergister. De vergisting verloopt bij 1:1-mengsel van dagverse mest (DV) en BA-mest 2 keer zo snel en door het "rijkere" mengsel stijgt de gasproductie met een factor +/- 2,4 zónder dat extra vergistercapaciteit nodig is. Dit is een win-win situatie. Het vergistende bedrijf verhoogt zijn rendement, en het aanzurende bedrijf hoeft niet zelf in een vergister te investeren.

Bij 600 koeien wordt de marge duidelijk positief, en levert ammoniakstrippen extra voordeel op. Dit is omdat de afgevangen stikstof de status van Renure-meststof kan krijgen en omdat daardoor het N-overschot sterk wordt verlaagd en er geen kosten zijn voor mestafzet. De NH_3-emissie op bedrijfsniveau kan met 45–50% tot 65–70% dalen mede afhankelijk van al dan niet stikstofstrippen. Bij 300 koeien weegt de investering in een stripper nog niet op tegen de baten.

In aanvulling op het voorgaande is verkend hoe de inzet van gewassen uitpakt. Een kostprijsbenadering inclusief vergisting laat zien dat de inzet van voederbieten of mais + melasse gunstiger uitpakt dan alleen melasse: voederbiet heeft de laagste substraatkosten per m^3 extra groengas (ongeveer tweederde van melasse). Door het beperkte verzurend potentieel biedt de inzet van silphie of sorghum nauwelijks voordeel waardoor bijna evenveel melasse nodig blijft. Goedkope reststromen (OPL, DPL, SWML kosten vrijwel niets) zijn vooral aantrekkelijk om naast vermindering van de stalemissies de veldemissies bij toedienen te beperken. Vergisting bij inzet van goedkope reststromen levert door de verdunning minder biogas per m^3 drijfmest en er kunnen problemen optreden tijdens de vergisting door het vrijkomen van veel H_2S wat de vergisting remt en extra maatregelen vergt om de H_2S af te vangen.

Ontsluiting

Omdat melasse en suikerrijke reststromen nationaal gezien beperkt beschikbaar zijn, is verkend of suikers uit de lignocellulose in gewassen zijn vrij te maken. Een zuur- plus enzymbehandeling van bietenpulp kan vrije suikers leveren overeenkomend met 39–43% van de droge stof en bovendien kan de restbiomassa ook nog extra biogas opleveren. Voor stugger materiaal (stro, berm- en natuurgras, silphie, sorghum, mais) is een langere ontsluitingsduur nodig, bijvoorbeeld 2 dagen. Een oriënterende maisproef bevestigde dat zure ontsluiting fors extra suikers (vooral xylose) vrijmaakt. Het theoretisch potentieel van ontsluiting is groot, zeker voor natuur- en bermgras. De praktische en economische uitwerking in de balans tussen zuur gebruiken om suikers vrij te maken en dat vervolgen in te zetten om mest te verzuren vraagt om nader onderzoek.

Neveneffecten, borging en perspectief

Verkend is het risico op betonaantasting. De verkenning laat zien dat BA (waarbij vooral melkzuur ontstaat) een aanzienlijk geringer risico op betonaantasting geeft dan aanzuren met salpeter- of zwavelzuur. Het risico op aantasting van de kelderwand is een stuk geringer dan van een kuilplaat omdat de pH van BA mest hoger is dan van een maiskuil en het oppervlak van de kelderwand niet met lucht in contact komt. De verkenning laat zien dat beton van kwaliteit CEM III/A of B (standaard in stallen ná 2010) voldoende is. In aanvulling hierop laat 15 jaar aanzuren in Denemarken met zwavelzuur (tot pH 5,5) geen ernstige corrosie zien.

De geur van BA-drijfmest verschilt weinig van onbehandelde mest. Wel kan er een sterkere keur zijn tijdens het opstarten van BA. In tegenstelling tot aanzuren met een sterk zuur (zwavelzuur) vindt er ook geen schuimvorming plaats.

Bepalend voor de emissiereductie is de pH van de mestopslag. Voor de borging van BA wordt daarom ingezet op het monitoren van pH als borgingscriterium eventueel ondersteund met aanpalende parameters als middelen verbruik. Voor uitwerking hiervan wordt afstemming gezocht met de Kringloopwijzer. De verwachting is dat op basis van een aantal Nederlandse stalmetingen 35 jaar geleden en 3 meer recente jaarrond metingen in Denemarken 35% NH_3-reductie bij pH 5–5,5 een realistisch en effectief doel is om op te sturen. De Technische adviespool (TAP, beoordeelt of de metingen voldoen aan het meetprotocol) acht controle en borging goed mogelijk maar vraagt aanvullende stalmetingen.

Conclusies

- Biologisch aanzuren (BA) is kansrijk voor het verminderen van ammoniak- en methaanemissies uit de stal en in combinatie met vergisting ook voor het verhogen van de groengasproductie.
- Melasse is het meest effectieve substraat voor BA. Melasse kan ook (deels) worden vervangen door de gewassen voederbieten en mais. Voederbiet is het enige geteste gewas dat melasse volledig kan vervangen. Mais vraagt een beperkte bijmenging met melasse. Qua kostprijs zijn deze substraten goedkoper dan melasse per extra te produceren kg biogas bij de vergisting.
- Silphie en sorghum in ingekuilde vorm bleken niet tot weinig geschikt voor biologisch aanzuren.
- De weipermeaten (OPL, SWML) zijn goedkope reststromen met een hoog verzurend potentieel. Deze producten verbreden de keuzemogelijkheden voor BA; niet alleen voor de route van BA in de stal gevolgd door vergisting, maar ook voor de route waarbij deze worden bijgemengd aan mest voor toedienen aan het grasland ter verlaging van veldemissies.
- Andere mogelijkheden zijn om het verzurend potentieel van substraten met een beperkt verzurend potentieel (bijvoorbeeld bieten(pulp) en gras-/strostromen of mais) te verhogen door (zure) ontsluiting om zo extra suikers vrij te maken. Dit vergt nog wel aanvullend onderzoek
- Biologisch aanzuren is als systeem rendabel vanaf ongeveer 600 koeien. Schaalgrootte bepaalt de rentabiliteit. De meest kosteneffectieve maatregel om schaalgrootte te realiseren is het bijmengen van BA-mest van een buur-/regiobedrijf in een bestaande vergister in combinatie met N-strippen voor de productie van Renure-meststof en het (deels) opheffen van het N-overschot.

Aanbevelingen

- Het verkennen van andere reststromen uit de food en feed industrie voor geschiktheid als substraat voor biologisch aanzuren.
- Het verkennen van de mogelijkheden van zure ontsluiting van gewassen (mais, grassen, stro) of reststromen (berm/natuurmaaisel) voor het vrijmaken van suikers waardoor deze beter geschikt worden als substraat voor biologisch aanzuren in combinatie met toetsen in een praktijkomgeving.
- Kennisverdieping over de specifieke fermentatieprocessen die optreden in mest om te kunnen sturen op homofermentatie in combinatie met het optimale pH traject van biologisch aanzuren met gewassen/reststromen.

1 Inleiding

1.1 Aanleiding

De uitstoot van ammoniak en broeikasgassen in de Nederlandse veehouderij moet sterk verminderen. Meer dan de helft van de ammoniakemissie vanuit de veehouderij is afkomstig vanuit de melkveehouderij. Van deze emissie is 54% afkomstig uit de stal en 43% afkomstig vanuit de toediening van mest (Van Bruggen et al., 2024).

Door aanzuring van mest wordt de emissie van ammoniak (NH_3) en het broeikasgas methaan (CH_4) vanuit mest sterk verminderd. Dit kan door toevoeging van zuur aan de mest (bijvoorbeeld zwavelzuur) of door biologisch aanzuren. Hierbij wordt een energierijk product aan de mest toegevoegd. De suikers en zetmeel die hierin zitten worden vervolgens door de in de mest aanwezige bacteriën omgezet in melkzuur (dit proces is vergelijkbaar met het inkuilen van gras of het maken van zuurkool). Reducties van de ammoniakemissie van 54-65% zijn mogelijk over de keten van stal tot en met toediening van mest, wanneer mest biologisch wordt aangezuurd (Bussink et al., 2012 & 2014). De vorming van het CH_4 in de mestopslag stopt zelfs volledig volgens sommige auteurs (Reguiro et al., 2022). Dit is des te belangrijker nu recent onderzoek aangeeft dat de CH_4-emissie uit de mestopslag mogelijk veel hoger kan zijn dan waar tot dusver vanuit wordt gegaan (Ward et al., 2024). Eerder onderzoek gaf aan dat biologisch aanzuren relatief duur was (Bussink et al., 2014). Door deze energierijke mest (vanwege melasse toevoeging aan dagverse mest) te vergisten kan het biologisch verzuren van mest economisch rendabel worden op melkveebedrijven (Bussink & Sanders, 2024). Te meer daar biogas is om te zetten in groengas en het landelijk beleid streeft naar een sterke stijging van de groengasproductie. Biologisch aanzuren kan zo én rendabel worden én tegelijk een grote milieuwinst leveren.

Een recente proef met biologisch aanzuren uitgevoerd in een mestput van 240 m^3 bij een melkveehouder (Meiresonne et al., 2024) liet zien dat de biogasopbrengst per m^3 mest steeg van 23 m^3 naar 49 m^3 door aanzuren met melasse. Bij een praktijkproef in Groningen verdubbelde de biogasproductie naar 50 m^3 per m^3 mest door biologisch aanzuren met melasse (Bussink et al., 2025). Indien vergisting gecombineerd wordt met stikstofstrippen zijn er mogelijkheden om Renure N te maken en zo het stikstofoverschot op bedrijven te verkleinen.

Melasse is een effectieve energierijke koolstofbron, maar is in Nederland zelf beperkt beschikbaar. Een oplossing is om zelf energierijke gewassen te gaan telen en toe te voegen aan mest. Mogelijke gewassen zijn silphie, mais, sorghum, voederbieten. Van deze gewassen is bekend dat ze bij co-vergisting de biogasopbrengst van mest verhogen. Echter het is niet goed bekend hoeveel van dit gewas nodig is om mest te verzuren en welke extra biogasopbrengst dit kan opleveren. Dit vergt aanvullend onderzoek. Daarnaast zijn en er mogelijk andere energierijke reststromen die ook ingezet kunnen worden zoals OPL, DPL, SWML (reststromen uit de zuivelindustrie en wel vloeibare gedelactoliseerde producten afkomstig uit diverse wei-stromen) en maisweekwater (resterende ingedampte dunne fractie bij zetmeelwinning uit mais).

Op verzoek van ZuivelNL, Forfarmers en de Provincie Groningen heeft NMI onderzoek uitgevoerd naar de mogelijkheden om gewassen en andere reststromen dan melasse in te zetten voor biologische verzuring van mest. Naast het vaststellen van de geschiktheid voor verzuring is van belang wat het kan betekenen voor het vergistingspotentieel en de bedrijfseconomie en of er neveneffecten zijn zoals een andere geur of risico op betoncorrosie.

1.2 Doel

Dit project heeft als doel om na te gaan:

- Of gewassen als silphie, mais, sorghum, voederbieten en of energierijke reststromen anders dan melasse geschikt zijn om mest biologisch te verzuren om zo emissies van methaan en ammoniak uit rundveedrijfmest te verminderen en de biogasproductie te verhogen:
- Wat de inzet van gewassen en reststromen betekent voor bedrijfseconomie: en
- Of er neveneffecten zijn van biologisch aanzuren van mest zoals bijdrage aan verkleinen stikstofoverschotten door mestvergisting in combinatie met geur, betoncorrosie, en bewijslast/borging.

1.3 Leeswijzer

In H2 wordt enige achtergrondinformatie gegeven over het biologisch aanzuren van mest en welke factoren hierop van invloed zijn.

In H3 worden de opzet van de uitgevoerde proeven met de gewassen silphie, voederbieten, mais en sorghum en diverse gewasstromen besproken.

In H4 worden resultaten van de uitgevoerde proeven met de gewassen silphie, voederbieten, mais en sorghum en diverse gewasstromen besproken.

In H5 wordt ingegaan op de effecten op de bedrijfseconomie voor verschillende scenario's van biologisch aanzuren.

In H6 wordt in de discussie ingegaan op de verkregen resultaten, ammoniak-, methaanemissie, het perspectief van zure ontsluiting van gewassen/reststromen om suikers vrij te maken, en het risico op betoncorrosie.

Het rapport eindigt met conclusies en aanbevelingen.

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

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 geeft onderzoek aan dat aanzuren tot een pH 6 of lager de methaanemissie uit de mestopslag stopt of sterk reduceert (Oenema en Velthof, 1993; Ottoson 2009, Fuigero 2022).

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, voederbieten) wat door melkzuurbacteriën wordt omgezet (fermentatie) in melkzuur (vergelijkbaar met het maken van zuurkool of het inkuilen van gras/mais): *biologisch aanzuren*.

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 vergt dat extra veiligheidsvoorzieningen. Toediening van salpeterzuur is 35 jaar geleden onderzocht. Ook dit zuur vergt aandacht bij de handeling 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. 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). Ook meer recent zijn er diverse onderzoeken uitgevoerd: zowel 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) als op semipraktijkschaal (Clemens & Wulf, 2005, Andersen, 2019). Biologisch aanzuren heeft tot dusver weinig opgang gemaakt omdat het relatief duur is vanwege de kosten van het toevoegmiddel.

Een belangrijk potentieel 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. Recente praktijkpilots uitgevoerd in melkveehouderij (Meiresonne et a., 2025 en Bussink et al., 2025) waarbij de mestopslagen onder de roosters van ligboxenstal zijn aangezuurd met melasse laten zien dat het technisch uitvoerbaar is. Aanzuren met melasse is relatief duur (Bussink et al., 2014, Bussink et al., 2025) maar de kosten ervan zijn (voor een belangrijk deel) terug te verdienen door deze mest te vergisten en daarmee gunstiger uitpakt dan monomestvergisting van gangbare mest. Proeven laten zien (Bussink & Sanders 2025 en Sanders et al., 2025) op semipraktijk en praktijkschaal laten zien dat de biogasopbrengst per m^3 mest kan verdubbelen en dat de verblijftijd in de vergister van 40 dagen terug kan naar 14-20 dagen.

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 ($(NH_4)_2CO_3$) plaats. Dit dissocieert vrij gemakkelijk waarbij ammonium en (bi)carbonaat in oplossing komen. Het ammonium (NH_4^+) en het carbonaation (CO_3^{2-}) in mest vormen een aantal chemisch evenwichten:

$(NH_4)_2CO_3 \rightleftharpoons 2NH_4^+ + CO_3^{2-}$

$2NH_4^+ \rightleftharpoons 2\ NH_3 + 2H^+ \text{ -- > } NH_3\uparrow$ Vergelijking 1

$CO_3^{2-} + H^+ \rightleftharpoons HCO_3^-$ Vergelijking 2

$HCO_3^- + H^+ \rightleftharpoons H_2CO_3 \text{ --- > } H_2O + CO_2\uparrow$ Vergelijking 3

Of er veel of weinig NH_3 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 NH_3. Tegelijk zorgt het aanzuren ervoor dat het carbonaat evenwicht naar rechts verschuift wat ertoe 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 CO_2. Bij een pH van lager dan 5,5 is bijna al het carbonaat in mest geëmitteerd als CO_2 gas en is vrijwel alle NH_3 omgezet in het goed oplosbare NH_4^+. Verlaging van de mest pH van 7,5 naar 5,5 betekent dat de dampdruk/concentratie van NH_3 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 NH_4-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 veel vluchtige vetzuren. Dat betekent dat bij oude mest meer zuur nodig is om de pH te laten dalen dan bij verse mest. 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 heeft bij vergisting. Een ander bijkomend voordeel bij vergisting dat een deel van de CO_2 die tegelijk met methaan vrijkomt uit koolhydraten, wordt ingevangen in het digestaat omdat volgens vergelijking 3 het evenwicht weer naar links verschuift omdat de vergisting juist bij pH 7,8- 8,0 plaatsvindt. Dit heeft als consequentie dat de methaanconcentratie ca 10 procentpunten hoger is dan die bij vergisting van gangbare mest vrijkomt. (Sanders et al., 2025).

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 er moet een C-bron moet worden toegevoegd in de vorm van suiker- of zetmeelhoudende producten, zoals melasse, wei, siroop, bieten, maissilage, etc. Met betrekking tot de aanwezigheid van voldoende melkzuurbacteriën gingen Lameijer en Vervoort (1995) ervan uit dat inoculeren van mest het Lactobacillus plantarum (facultatief heterofermentatief) nodig was. Vrielink en Hendriks (1996a) hebben voor de start van hun onderzoek met varkens ook enting van de mest met (Latobacillus plantarum) toegepast. Lactobacillus plantarum is commercieel te verkrijgen omdat deze species ook wordt ingezet bij het inkuilen van gras. In andere labonderzoeken (Bussink et al., 2014; Regueiro et al., 2022) en praktijkpilots (Meiresonne et al., 2024 en Bussink et al., 2025) is geen enting toegepast. De fermentatie kwam vanzelf vrij snel op gang wat ook verwacht mag worden, immers in mest zijn volop melkzuurbacteriën aanwezig, vooral afkomstig van kuilvoerresten die 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.

De mest pH lijkt belangrijker dan mest enten met melkzuurbacteriën. Mest eerst eenmalig aanzuren tot pH 6,5 of zelfs tot 6,0 creëert gunstigere omgevingscondities voor melkzuurvorming door Lactobacillus species. (Lameijer & Vervoort, 1995; Hendriks & Vrielink, 1996a &b; Bussink et al., 2014), bevestigd door recent onderzoek (Gomez-Munoz et al., 2025) waarin eerst is aangezuurd tot pH 6,5. Daarbij maakte het niet uit 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; Kavanagh et al., 2021; Meiresonne et al., 2024). In een proef van Regueiro et al. (2022) werd zonder eerst aan te zuren de maximale melkzuurproductie na 28 dagen bereikt terwijl dat voor de aangezuurde variant binnen 14 dagen was. In de praktijkpilot te Someren (Meiresonne et al., 2024) werd na 15 dagen pH 5,0 bereikt met alleen melasse toevoegen bij rond 10 ^{o}C. In de praktijkpilot te Schildwolde is eerst aangezuurd tot pH 6,8 en vervolgens melasse toegediend, waarna binnen 12 dagen een pH van ongeveer 5,1 werd bereikt bij een mesttemperatuur van ruim 20 ^{o}C.

Door het toevoegen van suiker-of zetmeelrijke producten aan mest komt de fermentatie naar vooral melkzuur en andere organische zuren vanzelf op gang. Vooraanzuren kan dat versnellen. Na enkele dagen begint de mest pH te dalen, afhankelijk van de hoeveelheid substraat, de aanwezige Lactobacillus populatie, het mestzuurbufferpotentieel en de temperatuur kan de pH-daling enkele weken doorgaan. Naarmate de temperatuur lager is de pH daling langzamer als gevolg van een langzamere fermentatie.

Een mogelijk voordeel van bij de opstart eerst eenmalig snel aan te zuren is dat de methaanvorming sneller tot stilstand komt (veelal beneden pH 6). Zo wordt mogelijk vermeden dat er eerst nog kortdurend een extra piekemissie is van CH_4 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 van 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.

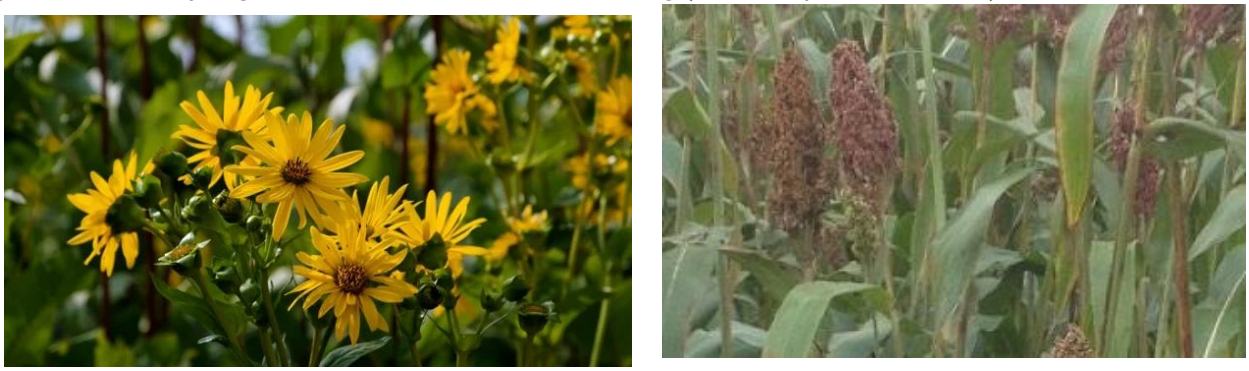
Volgens de literatuur zijn bij temperaturen beneden 30°C heterofermentatie melkzuurbacteriën in het voordeel (Lau et al., 2021). Dit strookt niet met de bevindingen van Bussink et al. (2014), waarbij op basis van fedbatch experimenten overwegend homofermentatie plaatsvond op basis van de uit de proeven 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. In de praktijkpilots te Someren en Schildwolde heeft vermoedelijk vooral in Schildwolde niet volledig homofermentatie plaatsgevonden op basis van de hoeveelheid melasse die is gebruikt en de hoeveelheid azijnzuur die werd gemeten in mest.

Het is belangrijk om te kunnen sturen op vooral homofermentatie omdat dan uit toegevoegde suiker uit reststromen volledige omzetting naar melkzuur plaatsvindt. Het is belangrijk vast te stellen onder welke randvoorwaarden dit in mest optreedt met minimale of geen competitie van andere organismen. Welk pH traject is optimaal, zodat en het aanzuurproces stabiel verloopt en er beperkt substraat nodig is (ook voor instandhouding van de populatie). Moet er gestuurd worden op een bepaalde Lactobacillus populatie maar ook wat is optimaal qua invoeding met substraat. Dit zal nog vervolgonderzoek vergen.

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, zemelen, geplet graan, appelpulp, bietsnippers, maisweekwater, lactosepermeaat, mais- en grassilage, etc. (Clemens J & Wulf S, 2005; Prado et al., 2020; Kavanagh 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 (zie ook H6.3). Veelal vergt dit sterke zuren en of vrij hoge temperaturen om dit te realiseren waardoor dit geen procede's zijn die op dit moment direct 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 rundermest. 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 bezien 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 bezien er voldoende melasse beschikbaar. 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 (Bufe & Koorevaar, 2018). Andere mogelijke gewassen zijn energiemais, sorghum, (voeder)bieten. Sorghum is een relatief nieuw gewas in Nederland dat relatief suikerrijk is kort voor de afrijping (30% suiker in de ds). De vraag is in welke mate deze gewassen een bijdrage kunnen leveren aan mestverzuring (onderwerp in deze studie).



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

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. Het groengas potentieel uit mest neemt dus sterk toe (dagvers en uit de toevoeging). En minstens zo belangrijk is dat de verblijftijd in de vergister meer dan halveert zo blijkt uit recent onderzoek op semi-praktijkschaal en praktijkschaal (Sanders & Bussink ,2025) en Sanders et al., 2025). Aangetoond is dat continue invoer van biologisch aangezuurde mest invoer in vergisters niet leidt tot een de pH daling in de vergister. Ten eerste wordt de zure mest door goede opmenging direct verdund en ten tweede wordt het melkzuur binnen korte tijd omgezet in methaan en CO_2 waardoor het zuurgehalte in de vergister gereduceerd wordt. Uit pilotproeven (Sanders & Bussink, 2025) blijkt dan ook dat de pH tijdens de toeloop van zure mest constant op pH 8 gehandhaafd blijft.

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 (zie ook Bussink et al., 2025):

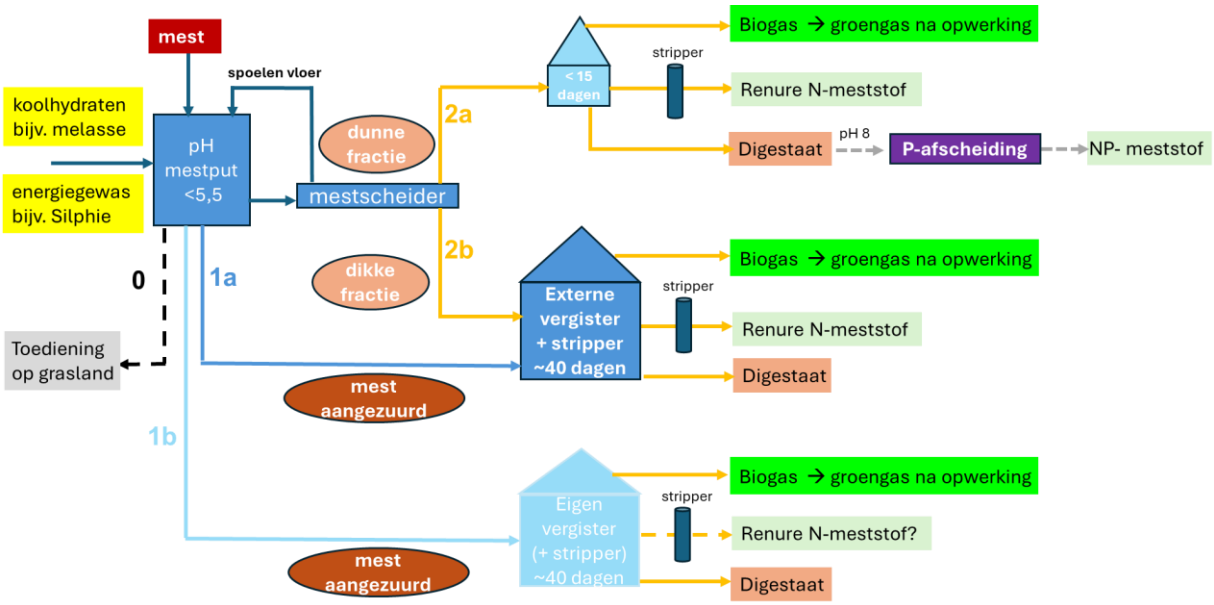
1) Aanzuren mest in de put waarna:
    a. Mest gaat naar een externe vergister
    b. Mest wordt op het bedrijf zelf vergist
2) Aanzuren mest in de put gevolgd door mestscheiding en de vloer spoelen met dunne fractie waarna:
    a. Dunne fractie wordt op het bedrijf zelf wordt vergist
        - Optioneel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

Route 1 (zie ook figuur 2-1) levert de minste NH_3-emissiereductie (alleen 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. Als na een grote vergister de mest gestript wordt ontstaan er een vloeibare ammoniummeststof en ammoniumarm digestaat. Als 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 mogelijk aantrekkelijk worden vanaf 150-300 stuks melkvee (zie H5 en Bussink et al., 2025). Daarbij wordt biogas wordt geproduceerd voor stroomproductie waarbij de restwarmte wordt benut voor andere toepassingen (zoals het op temperatuur houden van de vergister) of groengas (bij voorkeur) wat in het aardgasnetwerk wordt gepompt. Bij route 1b ontstaat wel digestaat met een hoge pH dat door organische stof afbraak 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 omdat de toe te voegen organische producten bijna altijd ook N bevatten (bijvoobeeld 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 digestaat met veel minder ammonium, weinig fosfaat (die zit opgelost in de dunne fractie door de lage pH) en relatief veel organische stof. Bij route 2 neemt het N-overschot op het bedrijf af omdat dit digestaat zijn weg zal vinden naar de akkerbouw. Als 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.



Route 1: Biologisch aanzuren gevolgd door mestvergisting extern (1a) of het eigen bedrijf (1b). De (grote) externe vergister produceert groengas en bevat een stripper om stikstof af te scheiden in de vorm van bijvoorbeeld een ammoniumsulfaat oplossing. De verwachting is dat dit een Renure-meststof wordt. Bij vergisting op het eigen bedrijf wordt biogas geproduceerd. Dit biogas is op te werken tot groengas of kan worden gecomprimeerd om elders toe te passen. Het op de boerderij inzetten van biogas voor stroomproductie wordt uit gefaseerd vanwege stroomnetcongestie. Een stikstofstripper is vaak niet aanwezig omdat dit te hoge investeringen vergt en met uitfasering van WKK-toepassing is er ook geen warmte meer beschikbaar voor het strippen.

Route 2: Aangezuurde mest wordt gescheiden in dik en dun. De dikke fractie (2b) gaat naar een externe vergister. De dunne fractie kan deels worden ingezet om de vloer te spoelen om zo de vloeremissie te verlagen. De rest van de dunne fractie (2a) gaat naar een kleine vergister waarin deze fractie met een verblijftijd van minder dan 15 dagen volledig vergist kan worden (bij de reguliere vergisting is de verblijftijd veelal 40 dagen) of kan emissiearm worden toegediend vanwege de lage pH (niet getoond in de figuur). Na vergisting van de dunne fractie kan de stikstof worden gestript worden uit het dunne digestaat, maar zoals boven al opgemerkt is voor een stripper achter een vergister wel enige schaal nodig.

Route 3: Eventueel kan ook P worden afgescheiden (dunne fractie (2a) bevat door de lage pH 80-90% van het mestfosfaat). De hoge pH na vergisten zorgt dat P weer onoplosbaar wordt en zo af te scheiden is (Sanders, 2025).

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

Route 1a, de mest extern vergisten is 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 is deze route vermoedelijk het snelst op te pakken omdat gebruik kan worden gemaakt van bestaande vergisters. Daarmee wordt wel alle mest van het bedrijf afgevoerd. Dat betekent dat het digestaat na vergisten weer terugkomt op het bedrijf, maar wel met een verlaagd stikstofgehalte (en het N-overschot dus omlaaggaat). 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). Daardoor neemt ook het N-overschot af. Tegelijk is bij route 2 de dunne fractie te gebruiken 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 Algemene proefopzet

Er zijn 4 proeven uitgevoerd om de potentie van gewassen en reststromen om mest aan te zuren te testen. Bij de eerste proef zijn vier verschillende gewassen getest. De eerste proef richtte zich enkel op 4 gewassen. De tweede proef richtte zich op 4 gewassen en 6 reststromen. De derde proef richtte zich op 2 gewassen, 4 reststromen en is uitgevoerd op mest van drie bedrijven met verschillende rantsoenen. De vierde proef richtte zich op 3 gewassen en 3 reststromen. Dit was een fed-batch proef gedurende twee maanden. Deze is bedoeld om vast te stellen welk evenwichtsniveau van een toevoegmiddel zich instelt na een aantal weken om een bepaalde pH te handhaven (bijvoorbeeld 4,5 of 5). Dit is gedaan door regelmatig een bepaalde hoeveelheid verse mest toe te voegen met een variërende hoeveelheid toevoegmiddel om zo de mestopslag onder de roosters van een ligboxstal te simuleren waar continu kleine hoeveelheden feces en urine worden toegevoegd aan de mestopslag. Bij deze proef zijn ook metingen van ammoniak en broeikasgasemissies gedaan. De vier proeven zijn uitgevoerd in 5 liter emmers met daarin 2 kg mest.

Verkennende proeven zijn uitgevoerd om restproducten voor de proef te selecteren en om hypotheses met betrekking tot invloed van temperatuur, begin pH en het toevoegen van enzymen aan reststromen te testen. De verkennende proeven zijn met kleinere hoeveelheden (100 g mest) uitgevoerd. De opzet en resultaten van deze proeven staan beschreven in bijlage 1 (Tabellen E-L).

3.2 Proef 1: Gewassen

Opzet

Bij de eerste proef werd in een batch experiment het potentieel om runderdrijfmest biologisch aan te zuren onderzocht met 4 gewassen:

- silphie,
- sorghum,
- voederbiet en
- mais.

Daarnaast werd ook het verzuringspotentieel van deze gewassen in combinatie met melasse onderzocht. Daartoe is op 10-3-2025 urine en feces separaat opgevangen in een melkveestal van een boerderij te Zeewolde (met een winterstalrantsoen met graskuil en mais). Deze werden twee dagen later op de dag van proefaanvang in een 2:1 feces-urine verhouding gemengd om dagverse drijfmest te verkrijgen. De dagverse mest werd eerst aangezuurd met azijnzuur tot pH 6,2 voordat de gewassen en melasse werden toegevoegd. Uit vooronderzoek was bekend dat na de eerste aanzuurstap met azijnzuur minimaal 50 gram melasse nodig is per kg mest om de pH beneden de 5 te krijgen.

Per gewas zijn 6 behandelingen uitgevoerd; drie verschillende hoeveelheden gewas die met mes grof- of fijngesneden waren. De drie hoeveelheden waren 100, 65 en 35 g droge stof (ds) per 2 kg mest. Om 100 g droge stof van de gewassen toe te voegen was voor mais, voederbiet, sorghum en silphie respectievelijk 277, 486, 354 en 535 gram versproduct nodig. De 3 gewashoeveelheden 100, 65 en 35 werden aangevuld met respectievelijk 0, 49 en 91 gram melasse. De gewas-melasse mengsels hadden een mengverhouding van:

- 100% - 0%
- 65% - 35%
- 35% - 65%

Hierbij kwam 100% gewas overeen met 50 g ds per kg mest en 100% melasse met 70 g melasse per kg mest (65%-35% is dan 32,5 g ds gewas en 24,5 g melasse per kg mest). De waarde van 70 gram komt overeen met 5 volumeprocent. Deze waarde is op basis van vooronderzoek ingeschat als ongeveer benodigde hoeveelheid voor verzuring.

Naast deze 24 behandelingen (4 gewassen x 2 fijnheden x 3 hoeveelheden) werden 3 controle behandelingen uitgevoerd gebruik makend van drijfmest afkomstig uit de mestopslag van de boerderij waar ook de feces en urine vandaan kwamen en wel:

- DM uit put = onbehandelde drijfmest uit mestopslag,
- Ref + zuur = feces+ urine (2:1) gemengd en aangezuurd tot pH 6,2 en
- Ref + zuur + 140 = feces+urine (2:1) gemengd en aangezuurd tot pH 6,2 met daarna 140 g melasse.

Tabel 3-1 geeft een overzicht van alle behandelingen.

Tabel 3-1 De 27 behandelingen bij proef 1. Bij de 4 gewassen geven de getallen aan hoeveel g ds per 2 kg mest (menging van feces+ urine (2:1) is toegediend. De hoeveelheid melasse die samen met de gewassen is toegevoegd bedraagt bij 100, 65 en 35 respectievelijk steeds 0, 49 en 91 gram. De codering "g" en "f" betekent grof- of fijngesneden gewas.

1. DM uit put	10. Voederbiet-g-35 g + 91 g melasse	19. Sorghum-f-35 g + 91 g melasse
2. Ref + azijnzuur	11. Voederbiet-g-65 g + 49 g melasse	20. Sorghum-f-65 g + 49 g melasse
3. Ref + azijnzuur + 140 g melasse	12. Voederbiet-g-100 g	21. Sorghum-f-100 g
4. Mais-g-35 g + 91 g melasse	13. Voederbiet-f-35 g + 91 g melasse	22. Silphie-g-35 g + 91 g melasse
5. Mais-g-65 g + 49 g melasse	14. Voederbiet-f-65 g + 49 g melasse	23. Silphie-g-65 g + 49 g melasse
6. Mais-g-100 g	15. Voederbiet-f-100 g	24. Silphie-g-100 g
7. Mais-f-35 g + 91 g melasse	16. Sorghum-g-35 g + 91 g melasse	25. Silphie-f-35 g + 91 g melasse
8. Mais-f-65 g + 49 g melasse	17. Sorghum-g-65 g + 49 g melasse	26. Silphie-f-65 g + 49 g melasse
9. Mais-f-100 g	18. Sorghum-g-100 g	27. Silphie-f-100 g

Uitvoering

In drie speciekuipen werd dagverse drijfmest gemaakt door feces en urine te mengen in verhouding 2:1. De mest in alle speciekuipen werd met azijnzuur (30%) aangezuurd tot een pH van 6,2 en er werd een schuimbreker toegevoegd. Daarna werden aan de speciekuipen 0%, 35% en 65% melasse toegevoegd. Hierna werd de mest verdeeld over 27 genummerde 5 liter emmers, zodat deze allen 2 kg mest bevatten. Hierbij werd gecompenseerd voor het gewicht van de toegevoegde melasse. Aansluitend werd per emmer gewas toegevoegd. De emmers werden afgesloten met een deksel. Hierin zaten twee gaten zodat eventueel opbouwende druk van gassen kon ontsnappen. De proefopstelling is weergegeven in Figuur 3-1. De gehele proef vond plaats bij 15 tot 20 graden Celsius.

Voor de grove variant werd gebruik gemaakt van voederbieten verkleind tot blokjes van 1-2 cm en ingekuilde mais, sorghum en silphie. Voor de fijne variant werden de voederbieten fijngesneden. Mais, sorghum en silphie werden bevroren fijngemalen in een blender. In bijlage 1 staan foto's ter indicatie van de fijnheid per behandeling.

Metingen

Na de start van het experiment werd de eerste drie dagen dagelijks de pH van de mest in de emmers gemeten, daarna eens per 3-4 dagen gemeten en uiteindelijk een keer per week. De pH is gemeten gedurende 42 dagen. Voor de metingen werd de mest geroerd. Na 23 en na 34 dagen is ook de redoxpotentiaal van de mest gemeten. Aan het begin van de proef zijn monsters van de gewone

drijfmest, feces, urine en gemende mest naar Eurofins gebracht voor analyse van de samenstelling. Na afloop van de proef is de per behandeling weer een mestanalyse gedaan. Hiervoor zijn bij mais, silphie en sorghum de behandelingen met fijn en grof samengevoegd.

Figuur 3-1 Proefopzet bij proef 1.

3.3 Proef 2: Gewassen en reststromen

Bij de tweede proef is proef 1 deels herhaald om de resultaten van deze proef te bevestigen. Nu is alleen de fijngesneden variant van de gewassen gebruikt (mede gebaseerd op de resultaten van proef 1). Verder zijn op basis van de resultaten van een verkennende proef met restproducten (bijlage 1 tabel E), zes reststromen geselecteerd om ook in de 5 liter emmers te testen. Dit waren: bietmelasse, maisweekwater, glucose, en vloeibare gedelactoliseerd producten afkomstig van wei-permeaat (OPL), caseine wei (DPL) en suikerwater afkomstig van zoete wei (SWML). Bietmelasse is 4% en 8% (op massabasis) toegevoegd. Van de overige reststromen is 8% en 12% (op massabasis) toegevoegd. De behandelingen zijn weergegeven in Tabel 3-2. Er zijn twee referentie behandelingen. Deze proef is uitgevoerd met urine en feces die op de ochtend van het inzetten van de proef (23-4-2025) is verzameld op dezelfde boerderij in Zeewolde als de mest bij proef 1. De pH is gemeten gedurende 47 dagen. Op dag 7 en dag 18 is de redoxpotentiaal gemeten. De gehele proef vond plaats bij 15 tot 18 graden Celsius.

Tabel 3-2 De 26 behandelingen bij proef 2. Bij de 4 gewassen geven de getallen aan hoeveel g ds per 2 kg mest is toegediend. De hoeveelheid melasse die samen met de gewassen is toegevoegd bedraagt bij 100, 65 en 35 respectievelijk steeds 0, 49 en 91 gram. De codering "f" betekent fijngesneden gewas. De getallen bij OPL, DLP, SWML, maisweekwater en bietmelasse geven aan welk gewichtspercentage reststroom is toegevoegd aan de mest.

1. Ref	10. Sorghum-f-65	19. OPL-8
2. Ref	11. Sorghum-f-100	20. OPL-12
3. Mais-f-35	12. Silphie-f-35	21. DLP-8
4. Mais-f-65	13. Silphie-f-65	22. DLP-12
5. Mais-f-100	14. Silphie-f-100	23. Glucose-8
6. Voederbiet-f-35	15. Bietmelasse-4	24. Glucose-12
7. Voederbiet-f-65	16. Bietmelasse-8	25. SWML-8
8. Voederbiet-f-100	17. Maisweekwater-8	26. SWML-12
9. Sorghum-f-35	18. Maisweekwater-12	

3.4 Proef 3: Gewassen en reststromen met mest van 3 bedrijven

De hoeveelheid zuur die nodig is om de pH van de mest te op een gewenste pH te krijgen, is afhankelijk van de samenstelling van de mest. Dit is weer afhankelijk van het rantsoen van het vee. Daarom is bij de derde proef gebruik gemaakt van mest van drie bedrijven met verschillende rantsoenen. De proef startte op 20-6-2025. Deze benodigde feces en urine is op de twee dagen voor het inzetten van de proef verzameld.

- Bedrijf A: rantsoen met gras en mais, sturend op een laag ruw eiwitgehalte
- Bedrijf B: rantsoen met gras en mais
- Bedrijf C: rantsoen met enkel gras

Aan deze drie verschillende typen mest zijn vier behandelingen met gewas (35 g gewas en 91 g melasse en 100 g ds (zonder melasse) fijngesneden mais en voederbieten) en acht behandelingen met reststromen uitgevoerd. In alle behandelingen met gewassen, is net als bij voorgaande proeven, de 2 kg mest vooraf aangezuurd. Er is gekozen om eenzelfde hoeveelheid azijnzuur aan de drie mesten toe te voegen zodat de pH van alle mesten 6,2 of lager is.

De behandelingen met restproducten omvatten 5% bietmelasse en 15% restproducten (op gewichtsbasis) OPL, SWML en DLP en 7,5% bietmelasse (bevat ruwweg 2 keer zoveel suiker dan de zuivelrestproducten). Verder zijn combinaties van 3,75% bietmelasse met 7,5% OPL, SWML en DL uitgevoerd. De behandelingen met reststromen zijn niet vooraf aangezuurd. Alle behandelingen staan weergegeven in Tabel 3-3. De pH is gemeten gedurende 64 dagen. Op 5 dagen is ook de redoxpotentiaal gemeten. De gehele proefuitvoering vond plaats bij 15 tot 20 graden Celsius.

Tabel 3-3 De 39 Behandelingen bij proef 3. De gebruikte feces en urine is afkomstig van 3 bedrijven (A, B en C). Bij de toevoeging van de 2 gewassen mais en voederbieten is respectievelijk 100 en 35 g ds gewas per 2 kg verse drijfmest toegediend en respectievelijk steeds 0 en 91 gram melasse. De codering "f" betekent fijngesneden gewas. Bij de behandelingen met OPL, DLP, SWML is 15% toegevoegd en bij bietmelasse 5% of 7,5%. Bij de behandelingen met OPL/mel, DLP/mel, SWML/mel is toegevoegd 7,5%/3,75% bietmelasse. (% is gewichtsprocent).

1. A-gemengde drijfmest	14. B-gemengde drijfmest	27. C-gemengde drijfmest
2. A-Mais-f-35	15. B-Mais-f-35	28. C-Mais-f-35
3. A-Mais-f-100	16. B-Mais-f-100	29. C-Mais-f-100
4. A-Voederbiet-f-35	17. B-Voederbiet-f-35	30. C-Voederbiet-f-35
5. A-Voederbiet-f-100	18. B-Voederbiet-f-100	31. C-Voederbiet-f-100
6. A-Bietmelasse-5% (aang.)	19. B-Bietmelasse-5% (aang.)	32. C-Bietmelasse-5% (aang.)
7. A-Bietmelasse-7,5%	20. B-Bietmelasse-7,5%	33. C-Bietmelasse-7,5%
8. A-OPL/mel	21. B-OPL/mel	34. C-OPL/mel
9. A-OPL	22. B-OPL	35. C-OPL
10. A-SWML/mel	23. B-SWML/mel	36. C-SWML/mel
11. A-SWML	24. B-SWML	37. C-SWML
12. A-DLP/mel	25. B-DLP/mel	38. C-DLP/mel
13. A-DLP	26. B-DLP	39. C-DLP

3.5 Proef 4: Fed-batch

Opzet

Proef 4 betrof een ongeveer twee maand durende fed-batch proef (start 11-11-2025). Deze is bedoeld om het evenwichtsniveau vast te stellen tussen de hoeveelheid toevoegmiddel benodigd om bij continue toevoer van mest een bepaalde pH te handhaven (bijvoorbeeld 4,5 of 5). Dit wordt gedaan door gedurende een aantal weken telkens een bepaalde hoeveelheid verse mest toe te voegen aan al aangezuurde mest en vervolgens een variërende hoeveelheid toevoegmiddel toe te voegen totdat een evenwichtssituatie is bereikt (bij hoeveelheid x aan toevoegmiddel blijft de pH constant).

In de fed-batch proef werd de mestput gesimuleerd door om de paar dagen verse mest en gewassen/reststromen toe te voegen. De proef begon met 2 kg verse drijfmest (feces: urine = 2:1) in 5 liter emmers die kort voor inzet van de proef werd aangemaakt. Er werden 10 behandelingen uitgevoerd (waarbij de keuze mede bepaald werd op basis van de bevindingen van de voorafgaande proeven). Deze zijn gegeven in Tabel 3-4. Behandelingen met gewassen en melasse werden vooraf aangezuurd met 30% azijnzuur tot een pH van 5,5. Behandelingen OPL een DLP begonnen met een overmaat van de reststroom, om de pH snel omlaag te krijgen. Daarna werd de dosering gehalveerd. Op dag 7, 9 en 11 na de start werd 200 g mest toegevoerd. Daarna werd 2 keer per week 300 g mest toegevoegd. Wanneer de emmers te vol werden, werd een deel van de mest verwijderd. Dit werd per behandeling naar rato gedaan, zodat het gewicht aan 'puur mest' per emmer gelijk bleef tussen de behandelingen. De gebruikte feces en urine is afkomstig van hetzelfde bedrijf in Zeewolde als bij proeven 1 en 2 en is 5 dagen voor de start van de proef verzameld. Gedurende de looptijd van de proef is de urine en feces opgeslagen in de koelkast, zodat op de dagen van toevoeging steeds feces en urine konden worden gemengd en worden toegevoegd in hoeveelheden van 200 g of 300 g. De gebruikte ingekuilde mais betrof een nieuwe partij. De gebruikte silphie en voederbieten waren afkomstig van te velde staande gewassen.

Tabel 3-4 De 10 behandelingen bij proef 4. De getallen geven aan welk deel van de behandeling uit gewas bestond.

Behandeling	Aangezuurd tot pH 5,5	Toegevoegd bij start	Biogasmeting
1. Ref	Nee	-	Ja
2. Bietmelasse	Ja	7%*	Ja
3. Mais-50	Ja	25 g ds mais per kg & 3,5%* melasse	Ja
4. Mais100	Ja	50 g ds mais per kg	Nee
5. Voederbiet-50	Ja	25 g ds voederbiet per kg & 3,5%* melasse	Nee
6. Voederbiet-100	Ja	50 g ds voederbiet per kg	Ja
7. Silphie-50	Ja	25 g ds silphie per kg & 3,5%* melasse	Ja
8. Silphie-100	Ja	50 g ds silphie per kg	Nee
9. DLP	Nee	25%	Nee
10. OPL	Nee	20%	Ja

* % is gewichtsprocent

Metingen

De pH in de emmers is gemeten voor en na het toevoegen van verse mest. Op dezelfde dagen is ook de emissie van NH_4, N_2O CO_2 en CH_4 uit de mest gemeten met behulp van een passieve fluxkamer-methode. Hiervoor is op dag 1, dag 21 en dag 56, 500 g mest uit de emmer overgebracht in een 1,5 liter emmer. Deze emmer werd afgesloten door er een 10 liter emmer op de kop overheen te plaatsen. Deze emmer werd verbonden met een Innova gassensor met een multi-sampling unit. Deze mat gedurende 1,5 uur elke 10 minuten de gasconcentraties in de emmer. De eerste meting was ongeveer een minuut nadat de fluxkamer geplaatst was. De emissie werd vervolgens bepaald door een exponentieel plateau model door de meetpunten te plotten en de helling op T=0 te bepalen.

Van zes behandelingen is op dag 21 een monster van 1kg weggebracht naar het lab van Opure te Ede voor een analyse van het biogaspotentieel.

4 Resultaten

4.1 Resultaten aanzuren met melasse en gewasresten

In de eerste proef is onderzocht in hoeverre melasse kan worden vervangen door gewasresten om rundveedrijfmest biologisch aan te zuren. In alle behandelingen met melasse en/ of gewasresten is een initiële aanzuurstap uitgevoerd waarbij de mest tot een pH van 6,2 is aangezuurd met azijnzuur.

Tabel 4-1 en Tabel 4-2 geven de samenstelling van de mest en gewassen gebruikt bij proef 1. Alle gehaltes van de 2:1 gemengde feces en urine (GEM) waren hoger dan die van drijfmest uit de put. Zo is de DS een factor 1,4 hoger. Dat kan het gevolg zijn van spoelwater in de mestput, afbraak van OS in de mestput en te ruime verhouding feces/urine (2:1). De verhoudingen tussen de verschillende stoffen in de mest kwamen wel goed overeen.

Voor de start van de proeven zijn van de gemengde mest (GEM) 2 titratiecurve gemaakt, zie bijlage 1. Omgerekend was ongeveer 3,5 en 4 ml geconcentreerd zwavelzuur nodig per kg mest om een pH van respectievelijk 5 en 4,5 te bereiken. (Bij oude mest is de benodigde hoeveelheid zuur vaak hoger omdat daar alle urine N is omgezet in ammoniumcarbonaat wat sterk buffert en al afbraak van os heeft plaatsgevonden. Bij verse mest is dat nog niet of maar beperkt het geval.)

Tabel 4-1 Samenstelling van de mest bij proef 1 in g/kg mest. DM = drijfmest uit put en GEM is feces en urine gemengd met verhouding 2:1.

Mest	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
DM	68	16	52	3,34	7	1,6	1,7	1,44	5,5	1,2	0,7
feces	123	20	103	3,93	12	0,3	3,6	2,63	1,6	1,7	0,6
urine	36	27	9	5,67	1	3,5	2,2	0,07	14,8	0,7	0,8
GEM	96	22	74	4,49	7	1,7	2,8	1,97	7	1,3	0,8

Tabel 4-2 Gewasanalyses proef 1, 2 en 3. Droge stof (DS) in g/kg product. Overig in g/kg DS.

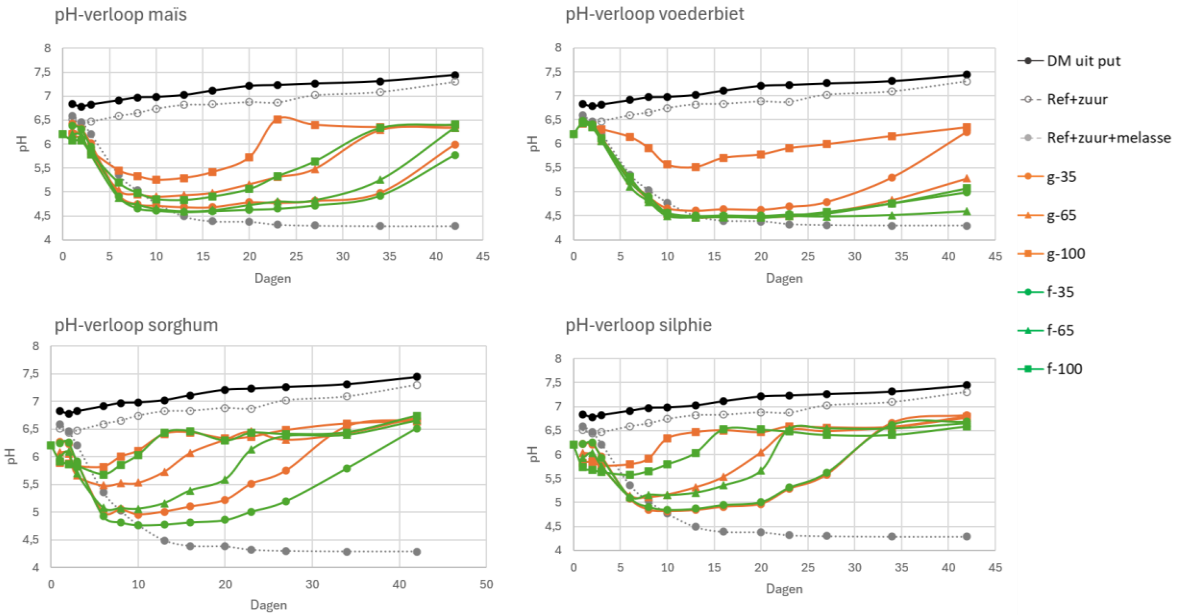
Gewas	DS	pH	Ruw eiwit	Ruwe celstof	Ruw as	Suiker	Zetmeel
Mais	350	3,9	48	192	46	12	347
Voederbiet	167					671	
Sorghum	172		91	325	91	11	
Silphie	214		44	354	94	13	

Figuur 4-1 geeft de gemeten pH voor alle behandelingen bij proef 1. De pH van drijfmest uit de put en feces nam toe vanaf de start van de proef tot 7,5. Door het toevoegen van zuur aan de gemengde feces en urine (GEM) daalde de pH initieel tot 6,4, maar daarna nam ook hier de pH toe vanaf de start van het experiment tot pH 7,3. Bij de behandeling met 140 g melasse daalde de pH tot onder 4,5 na 13 dagen en bleef daarna constant.

Behandelingen met mais, sorghum en silphie leidden direct tot een extra pH verlaging (op de verlaging tot 6,2 met azijnzuur) doordat de ingekuilde gewassen zelf zuur zijn. Bij behandelingen met sorghum-f-100 en silphie f-100 kwam de pH niet onder de 5,5. Bij een combinatie van sorghum of silphie met melasse kwam de pH net onder de 5,0 met uitzondering van grofgesneden sorghum en relatief veel

melasse (g-35). Bij behandelingen met 100% mais en voederbiet kwam de pH wel onder de 5,0 mits de gewassen fijngesneden waren. In combinatie met melasse, daalde de pH van behandelingen met mais en voederbiet tot rond de 4,5.

Gedurende de proef liep de pH van alle behandelingen weer op. De pH van behandelingen waar de pH minder sterk was gedaald (hogere minimum pH) begonnen eerder op te lopen dan behandelingen met een lagere minimum pH. Na 42 dagen lag de pH van alle behandelingen met sorghum en silphie weer boven de 6,5. De pH van behandelingen met mais begon later op te lopen. Na 42 dagen was bij mais enkel de pH van behandeling met 35 g mais ds per 2 kg mest met melasse nog onder de 6. Bij alle behandelingen met fijngesneden voederbiet bleef de pH gedurende de hele proef onder de 5,1. De pH van behandelingen met 100% en 65% grofgesneden voederbiet liepen wel op tot boven de 6,0.



Figuur 4-1 Het beloop van de pH bij proef 2 met toevoeging aan verse drijfmest (feces+ urine: 2:1) van fijn (f) of grof (g) gesneden mais, voederbiet, sorghum en silphie in 3 verschillende hoeveelheden (35 = 100 g ds +0 g mel, 65= 65 g ds + 49 g melasse en 35= 35 g ds+ 91 g mel per 2 kg mest) over een periode van ruim 40 dagen. Daarnaast was er een behandeling met mest uit de mestopslag en verse drijfmest aangezuurd met zuur en met zuur plus 140 g melasse.

Tabel 4-3 geeft de samenstelling van de mest per behandeling na afloop van de proef. Het organische stofgehalte van de mest ging omhoog door toevoeging van gewassen en melasse. Toevoeging van melasse leidde tot een hoger totaal stikstofgehalte in de mest, terwijl het totaal stikstofgehalte door toevoeging van de gewassen daalde.

Er is geen analyse uitgevoerd op de biogasproductie omdat van de meeste behandelingen de pH is opgelopen tot boven de 6.

Tabel 4-3 Samenstelling van de mest aan het eind van proef 1 in g/kg mest. Van mais, sorghum en silphie is alleen de fijne behandeling geanalyseerd.

Behandeling	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
DM uit mestput	65	16	49	3,03	7	1,3	1,7	1,37	5,3	1	0,7
Ref + zuur	79	21	58	4,76	5	1,9	2,9	1,95	6,5	1,3	0,6
Ref+ zuur +melasse	129	25	104	5,05	9	1,7	3,4	1,79	9,2	1,2	1,2
Mais-f-35	120	22	98	4,64	10	1,6	3	1,81	7,2	1,2	0,8
Mais-f-65	115	20	95	4,14	10	1,6	2,5	1,81	6,5	1,2	0,5
Mais-f-100	104	20	84	4,24	9	1,7	2,5	1,97	6,1	1,2	0,6
Voederbiet-g-35	104	21	83	4,53	8	1,6	2,9	1,83	7,5	1,3	0,8
Voederbiet-g-65	99	20	79	3,95	9	1,4	2,6	1,74	6,6	1,2	0,7
Voederbiet-g-100	84	18	66	3,69	8	1,6	2,1	1,63	5,8	1	0,6
Voederbiet-f-35	108	21	87	4,14	9	1,4	2,7	1,74	7,1	1,2	0,8
Voederbiet-f-65	104	20	84	4,06	9	1,3	2,8	1,79	6,7	1,2	0,7
Voederbiet-f-100	93	18	75	3,6	9	1,3	2,3	1,6	5,5	1	0,6
Sorghum-f-35	104	22	82	4,39	8	1,7	2,7	1,74	7,1	1,2	0,7
Sorghum-f-65	108	20	88	4,11	10	1,9	2,2	1,69	6,1	1,2	0,6
Sorghum-f-100	94	20	74	4,32	8	1,9	2,4	1,81	5,9	1,2	0,6
Silphie-f-35	103	23	80	4,72	8	1,9	2,8	1,83	7,1	1,3	0,7
Silphie-f-65	119	22	97	4,16	10	1,7	2,5	1,76	6,7	1,2	0,5
Silphie-f-100	116	22	94	4,24	10	1,6	2,6	1,9	6,3	1,3	0,6

Samengevat heeft het toevoegen van melasse het grootste verzurend potentieel; de mest bereikt de laagste pH en deze blijft over tijd (meer dan 40 dagen) laag. Met het vervangen van een deel van de melasse door voederbieten of mais kan eenzelfde lage pH worden bereikt, maar de pH begint te stijgen gedurende de proef. Deze pH stijgt eerder naarmate meer melasse is vervangen door gewasresten en wanneer de gewasresten grover zijn. Fijngesneden voederbieten geven de beste resultaten. De fijngesneden gewasresten leidde bij vrijwel alle behandelingen tot een lagere pH dan de grove variant. Gewas toevoegen (in hoeveelheden van 50 g ds/per kg mest) zonder een deel melasse leidde met uitzondering van bieten niet tot voldoende pH daling (na 40 dagen was deze vaak weer boven de 6).

4.2 Resultaten aanzuren met gewasresten en reststromen

In een tweede proef is niet alleen onderzocht in hoeverre melasse kan worden vervangen door gewasresten om rundveedrijfmest biologisch aan te zuren, maar is ook het verzurend potentieel van verschillende reststromen onderzocht. In de behandelingen met reststromen is geen melasse toegevoegd. In alle behandelingen met melasse en/ of gewasresten is een initiële aanzuurstap uitgevoerd waarbij de mest tot een pH van 6,2 is aangezuurd met azijnzuur.

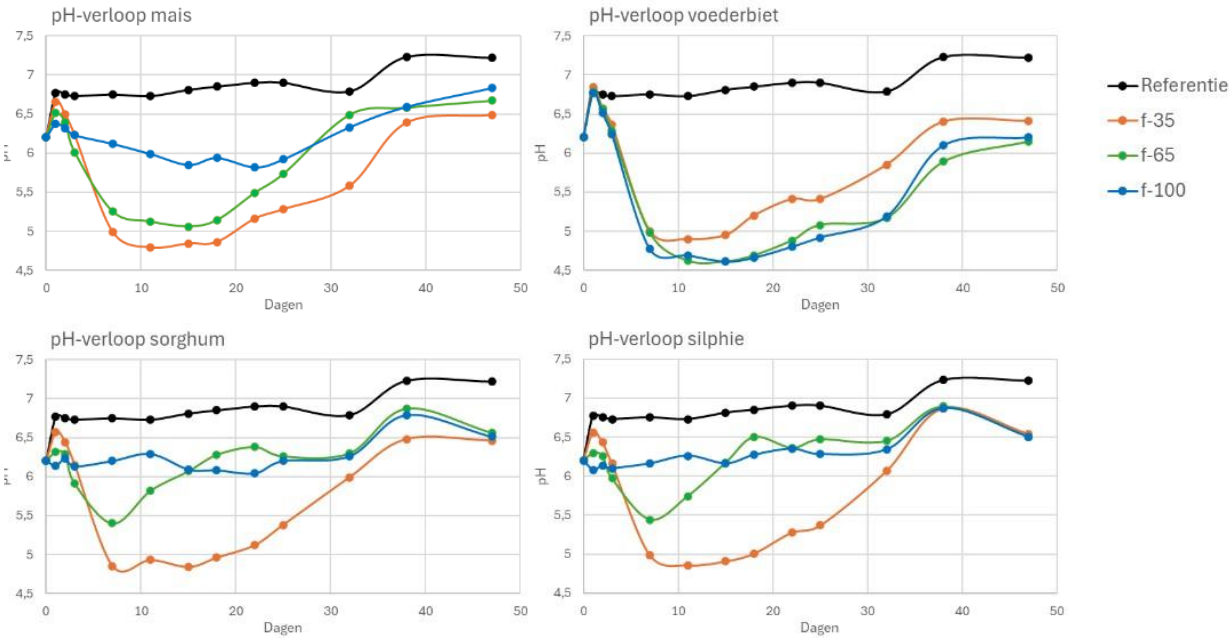
Tabel 4-3 geeft de samenstelling van de mest gebruikt bij proef 2. Feces en urine (1:2) zijn in 2 batches gemengd (GEM 2 en GEM 3) en deze zijn beide bemonsterd. Van GEM2 is een titratiecurve gemaakt, zie bijlage 1, tabel A. Het bleek dat ongeveer 4,5 en ruim 5 ml geconcentreerd zavelzuur nodig was per kg mest om een pH van respectievelijk 5 en 4,5 te bereiken, wat ongeveer 1 ml meer is als in proef 1.
Reststromen zijn toegevoegd aan GEM2 en gewassen (zie analyses Tabel 4-2) zijn toegevoegd aan GEM3.

Tabel 4-3 Samenstelling van de mest bij proef 2 in g/kg mest. FE is feces, UR is urine en GEM is feces en urine gemengd met verhouding 2:1.

Mest	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
FE 2	136	25	111	4,4	11	0,2	4,2	2,31	1,6	2,2	0,6
UR 2	32	20	12	3,61	1	0,2	3,4	0,07	12	0,7	0,7
GEM 2	97	23	74	4,24	8	1,4	2,8	1,47	6,1	1,5	0,6
FE 3	128	27	101	4,25	11	0,1	4,3	2,45	1,7	2,2	0,6
UR 3	44	26	18	4,63	2	0,3	4,3	0,07	15,5	0,7	1,2
GEM 3	105	27	78	4,54	8	1,6	2,9	1,6	6,5	1,7	0,7

Toevoegen van gewassen

Het toevoegen van gewasresten als dan niet in combinatie met melasse aan runderdrijfmest (aangezuurd tot pH 6,2 met azijnzuur) bevestigt het resultaat van proef 1. Van de behandelingen met eenzelfde hoeveelheid drogestof verzuren voederbieten het meest, gevolgd door mais en daarna silphie en sorghum.



Figuur 4.2 pH metingen over een periode van ruim 40 dagen bij proef 2 met toevoeging van 4 gewassen aan verse drijfmest voor de behandelingen 1-14: toevoeging van fijn (f) gesneden mais, voederbiet, sorghum en silphie in 3 verschillende hoeveelheden (100 = 100 g ds +0 g mel, 65 = 65 g ds + 49 g melasse en 35 = 35 g ds+ 91 g mel per 2 kg mest) in vergelijking tot mest uit mestopslag (Ref).

Het toedienen van fijngesneden voederbiet, mais, silphie en sorghum leidde in alle combinaties met melasse tot een tijdelijke pH verlaging, waarbij na 30 dagen de pH weer was opgelopen tot boven de 5,5 met uitzondering van voederbieten. Bij de gekozen hoeveelheden voederbieten heeft toediening van melasse geen toegevoegde waarde voor de verzuring. De varianten met 35 g ds uit gewas en 91 g melasse toevoeging bleven het langst op een lage pH. Gewas toevoegen zonder een deel melasse leidde met uitzondering van bieten niet tot voldoende pH daling. Voederbieten op afstand gevolgd door mais geeft het beste verzuringspotentieel.

Toevoegen van reststromen

De onderzochte reststromen verschillen in suikergehalte Tabel 4-4 Het hoogste gehalte aan (een vorm van) suiker zit in bietmelasse, gevolgd door SWML, OPL, glucose en DLP. Maisweekwater bevat weinig suiker maar wel veel meer azijn- en melkzuur dan de andere producten. Maisweekwater bevat eveneens weinig eiwit maar wel het meeste fosfor van alle producten.

Tabel 4-4 Samenstelling van melasse en 6 andere reststromen (g/kg).

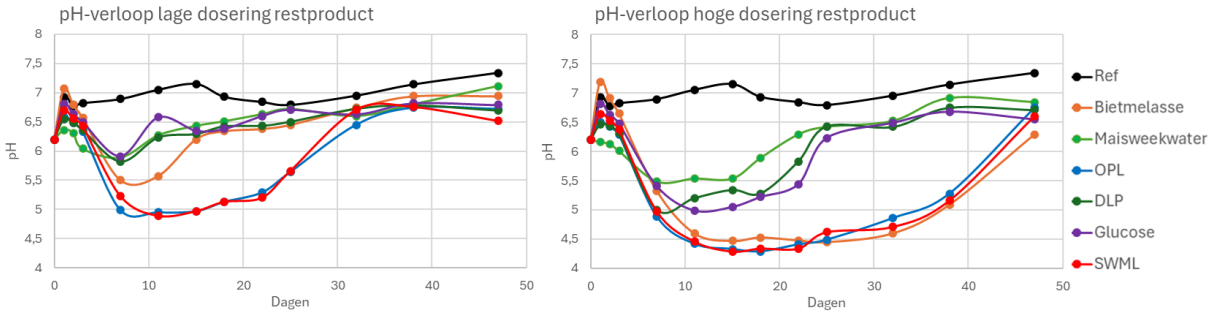
Rest-stroom	Vocht	RE	Ca	P	Na	K	Mg	S	Lac-tose	Azijn zuur	Melk zuur	Suiker	Zet-meel	N	pH
Bietmelasse	263	94,5	0,5	0,2	4,7	48	0,1	3,6		6,6	31	450	0	15,1	9,9
Maisweek-water	542	1,82	0,2	13,6	4,5	26	5,6	5,2		1,9	95,4	90	4,6	0,29	4,3
OPL	525	36	4,6	8,9	9,2	35	1,3	1,6	256	0,5	7,1		0,9	5,76	5,3
DLP	744	20,9	5,2	6,5	5,1	18	1,2	7,2	131	0	0,4		0	3,34	4,2
Glucose	812	0	0	0	0	0	0	0,3		0	0	163	0,7	0	5,1
SWML	590	27,6	5,8	4,1	4,9	16	1,1	1,1	272	0	2,6		0,2	4,42	5,9

De verschillende reststromen verschillen in verzurend potentieel (Figuur 4-3). Bij een lage dosering (8%) hebben OPL en SWML een vergelijkbaar hoog verzurend potentieel en zijn effectiever dan de andere reststroomproducten. Bij een hoge dosering (12%) hebben OPL, SWML en bietmelasse (8%) een vergelijkbaar hoog verzurend potentieel. Maisweekwater, DLP en glucose laten een pH daling zien, maar deze is van kortere duur.

Bij behandelingen met 8% maisweekwater, DLP of glucose kwam de pH nauwelijks onder de 6,0. De laagste pH werd bereikt na ongeveer 7 dagen en na ongeveer 15-20 dagen was de pH weer hoger dan 6,5. Bij een dosering van 8% OPL en SWML kwam de pH onder pH 5. De laagste pH werd vrijwel overal bereikt. Na 11-15 dagen werd de laagste pH gemeten. Na ongeveer 25 dagen was de pH hoger dan 5,5 en na ruim 30 dagen hoger dan 6,5. De behandeling met 4% bietmelasse kwam op 5,5 en liep na ruim 20 dagen op tot pH 6,5

Bij behandelingen met 12% maisweekwater, DLP of glucose kwam pH onder pH 5,5. De laagste pH werd bereikt na ongeveer 7-10 dagen bereikt om vervolgens na 25 dagen te zijn opgelopen naar 6,5. Bij een dosering van 12% OPL en SWML en 8% bietmelasse daalde de pH tot 4,5 na 15-20 dagen. Na ongeveer 35 dagen was de pH hoger dan 5 en na ruim 40 dagen hoger dan 5,5.

Er is geen analyse uitgevoerd op de biogasproductie omdat van de meeste behandelingen de pH was opgelopen tot boven de 6.



Figuur 4-3 Het beloop van pH metingen over een periode van ruim 40 dagen bij proef 2 met toevoeging van 6 reststromen aan verse drijfmest (feces+urine: 2:1) in hoeveelheden van 8% (links) en 12% (rechts) gewichtsprocenten ten opzichte van mest uit de mestopslag (Ref). Alleen bietmelasse werd in hoeveelheden van 4% en 8% (80 gram) toegediend.

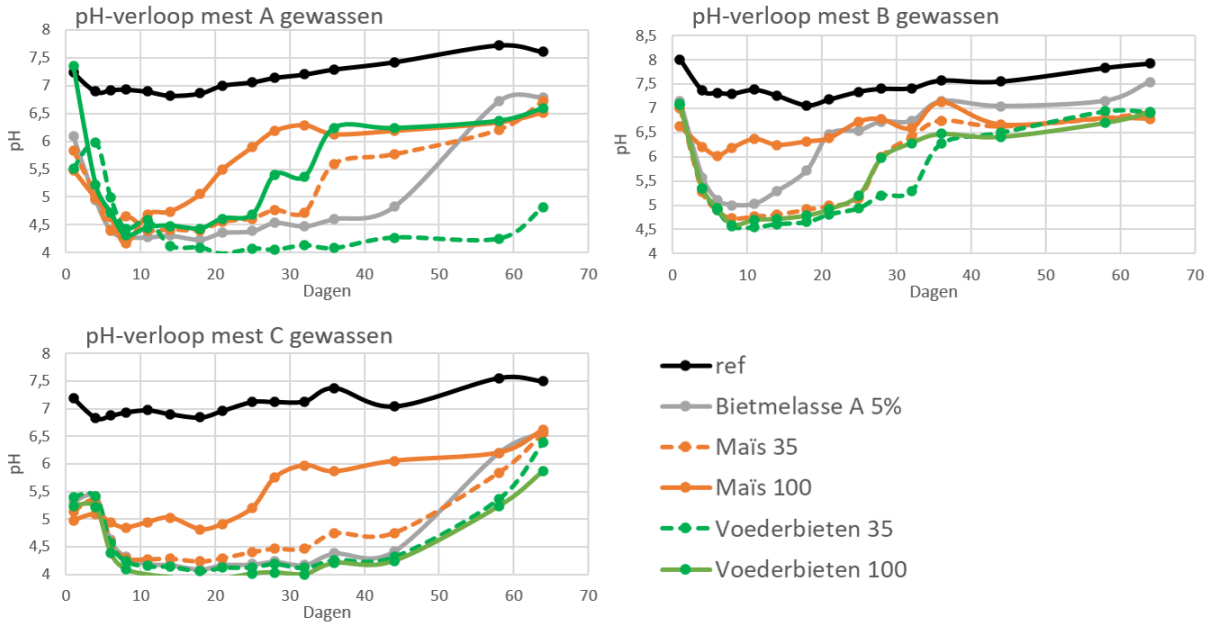
4.3 Resultaten proef met mest van verschillende bedrijven

Omdat mest in samenstelling sterk kan verschillen tussen bedrijven, is een proef uitgevoerd met mest van drie bedrijven. Aan deze mest zijn verschillende gewas/melasse combinaties toegevoegd en verschillende restproducten.

De variatie in mestsamenstelling is getoond in Tabel 4-5. Het N-totaal gehalte en de ammoniakale stikstof is het hoogst in de mest van bedrijf B, gevolgd door bedrijf A en bedrijf C. Dit hangt deels samen met het hogere organische stofgehalte van mest B. Ook de hoeveelheid zuur die nodig was om de pH van de mest onder de 5,0 te krijgen was het hoogst voor bedrijf B, gevolgd door bedrijf A en C (respectievelijk 5,5, 3,2 en 1,8 liter zwavelzuur m^{-3} feces+urine (2:1) kort na menging (zie bijlage 1, figuur A).

Tabel 4-5 Samenstelling van de mest bij proef 3 in g/kg mest. FE is feces, UR is urine en GEM is feces en urine gemengd met verhouding 2:1. Mest A van bedrijf met laag RE, Mest B van bedrijf met gemiddeld RE, mest C van bedrijf met hoog RE.

Mest	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
FE A	102	13	89	3,03	13	0,2	2,8	1,74	1,1	1,3	0,6
UR A	42	21	21	4,03	2	0,3	3,7	0,07	11,2	0,7	0,7
GEM A	92	16	76	3,5	10	1,3	2,2	1,15	5,1	1	0,6
FE B	116	16	100	3,05	15	0,1	3	2,11	0,8	2,3	0,6
UR B	53	29	24	7,16	2	3,5	3,7	0,07	16,7	0,7	1,3
GEM B	91	19	72	4,32	8	1,8	2,5	1,4	6,1	1,7	0,6
FE C	89	12	77	2,33	15	0,2	2,1	1,63	1,6	1,2	0,6
UR C	44	25	19	3,55	2	0,6	3	0,07	15,5	0,7	0,6
GEM C	82	17	65	2,81	10	1,2	1,6	1,12	6,3	0,8	0,6



Figuur 4-4 Het beloop van de pH over een periode van ruim 50 dagen bij proef 3 met verse drijfmest (feces+urine: 2:1) afkomstig van 3 bedrijven (A, B en C) bij toevoeging van fijngesneden mais en voederbiet in 2 verschillende hoeveelheden (100 = 100 g ds +0 g mel en 35= 35 g ds+ 91 g mel per 2 kg mest. Deze worden vergeleken met 5% (gewichtsprocent) bietmelasse toevoeging en mest uit mestopslag (Ref).

De mesten van drie verschillende bedrijven verschillen sterk van elkaar in hoe de pH reageert op de toediening van azijnzuur, en gewassen (mais en voederbieten) al dan niet in combinatie met melasse

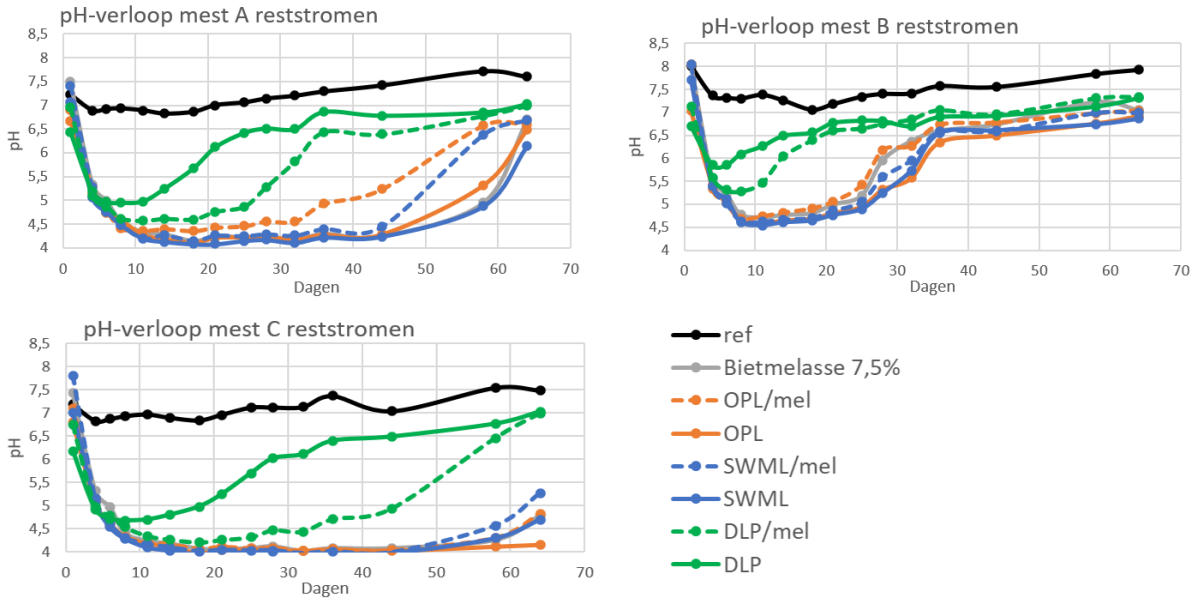
of bietmelasse (Figuur 4-4). Dit bevestigt het belang om de zuurbuffering van mest te testen voorafgaand aan aanzuren.

De pH daalt het sterkst en blijft het langst laag in mest van bedrijf C, gevolgd door bedrijf A. De mest van bedrijf B daalt het minst en stijgt weer het snelst en heeft daarmee de hoogste zuur buffercapaciteit. Dit komt ook overeen met de resultaten van de titratiecurve waarbij meer zuur nodig was om mest B aan te zuren (5,5 l) vergeleken met mest A (3,2 l) en mest C (1,8 liter zwavelzuur).

Bij bedrijf B verlaagt bietmelasse de pH tot 5,0 na 9 dagen. Bij bedrijf A kwam de pH op 4,5 en bij bedrijf C op 4,2. Bij bedrijf B begon de pH na 11 dagen weer op te lopen tot 7,5 na 64 dagen. Bij bedrijf A en C begon de pH pas na 44 dagen sterk op te lopen tot boven de 6,5 na 64 dagen.

Het verzurend potentieel van de verschillende fijngesneden gewassen al dan niet in combinatie met melasse bevestigt de eerdere resultaten. Voederbieten hebben een hoger verzurend potentieel dan mais. De combinatie met melasse vergroot het verzurende potentieel. De effectiviteit van bietenmelasse (5%) verschilt per mest. In de mest A is het verzurend potentieel groter dan alle gewascombinaties behalve suikerbiet met melasse, terwijl in mest B het verzurend potentieel minder groot is dan alle gewascombinaties behalve 100% mais. Eenzelfde dosis bietenmelasse, is net als de gewassen het meest verzurend in mest C en het minst in mest B.

Het verschil in pH verloop tussen de drie mesten is vergelijkbaar in de behandelingen met zuivelreststromen OPL, SWML en DLP en de combinatie van de zuivelreststromen met melasse (Figuur 4-5) als in de behandelingen met gewas en melasse Mest B heeft de hoogste zuurbuffering en mest C de laagste, mest A zit daar tussenin. Dit uit zich in hoe laadt de pH wordt en hoe snel deze weer sijgt. Bij mest B hebben alle behandelingen een pH van 5,5 of hoger na 30 dagen. Bij mest A is dat voor de meest behandelingen pas na 50 dagen en bij mest C is de pH veelal nog beneden de 5 na 60 dagen.



Figuur 4-5 Het beloop van de pH over een periode van ruim 60 dagen bij proef 3 met verse drijfmest (urine en feces) afkomstig van 3 bedrijven (A, B en C) bij toevoeging van 15% OPL, SWML en DLP en 7,5% OPL, SWML en DLP met 3,75%. Deze worden vergeleken met 7,5% bietmelasse toevoeging en mest uit mestopslag (Ref).

Het verschil in verzurende werking tussen de verschillende producten is vergelijkbaar met de eerdere proef. OPL, SWML en bietenmelasse hebben de meest verzurende werking en DLP minder. Bij alle mesten werd de pH het minst verlaagd door toediening van DLP. Behandelingen met bietmelasse, SWML en OPL verschilden weinig van elkaar. Halvering van de reststroom met toevoeging van melasse leidde tot een geringere pH daling dan het toedienen van de zuivere reststroom (met uitzondering van DLP). Alleen OPL en SWML lijkt ongeveer gelijkwaardig te zijn aan het effect van 7,5% bietmelasse.

4.4 Resultaten fed-batch proef

In de fed-batch proef wordt de stal nagebootst in de zin dat er geregeld (2-3 maal per week) nieuwe mest aan de emmer met aangezuurde mest werd toegevoegd. De proef is weer uitgevoerd met verschillende gewassen (voederbieten, mais en silphie) al dan niet in combinatie met melasse en verschillende restproducten (OPL, DPL).

4.4.1 pH en rendement

Tabel 4-6 en Tabel 4-7 geven de samenstellingen van de mest en het gewas bij proef 4. Het urinemonster kon niet geanalyseerd worden door Eurofins. Ook was er niet genoeg silphie over voor een analyse. Met het feces monsterleek ook iets mis te zijn gegaan; het had een DS en OS-gehalte dat lager is dan de gemengde mest, wat praktisch haast onmogelijk is. Heranalyse was niet meer mogelijk. De mest is afkomstig van hetzelfde bedrijf als bij proeven 1 en 2. De DS en OS van de voor deze proef gemengde mest (GEM4) waren in lijn met die van proeven 1 en 2 (Tabel 3-1). GEM4 is daarom als juist verondersteld. Van GEM4 is een titratiecurve gemaakt, zie bijlage 1. Er was ruim 5 l geconcentreerd zwavelzuur per m^3 mest nodig om pH 4,5 te bereiken, een hoeveelheid die ongeveer vergelijkbaar is met proef 2.

*Tabel 4-6 Samenstelling van de mest bij proef 4 in g/kg mest. FE is feces en GEM is feces en urine gemengd met verhouding 2:1. Waardes met * zijn onwaarschijnlijk.*

Mest	DS	RAS	OS	N-tot.	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	Na_2O
FE 4	73*	12	61*	2,22	12	0,2	2	1,6	0,6	1,2	0,6
GEM 4	96	22	74	3,91	9	1,1	2,8	2,04	5,2	1,5	0,6

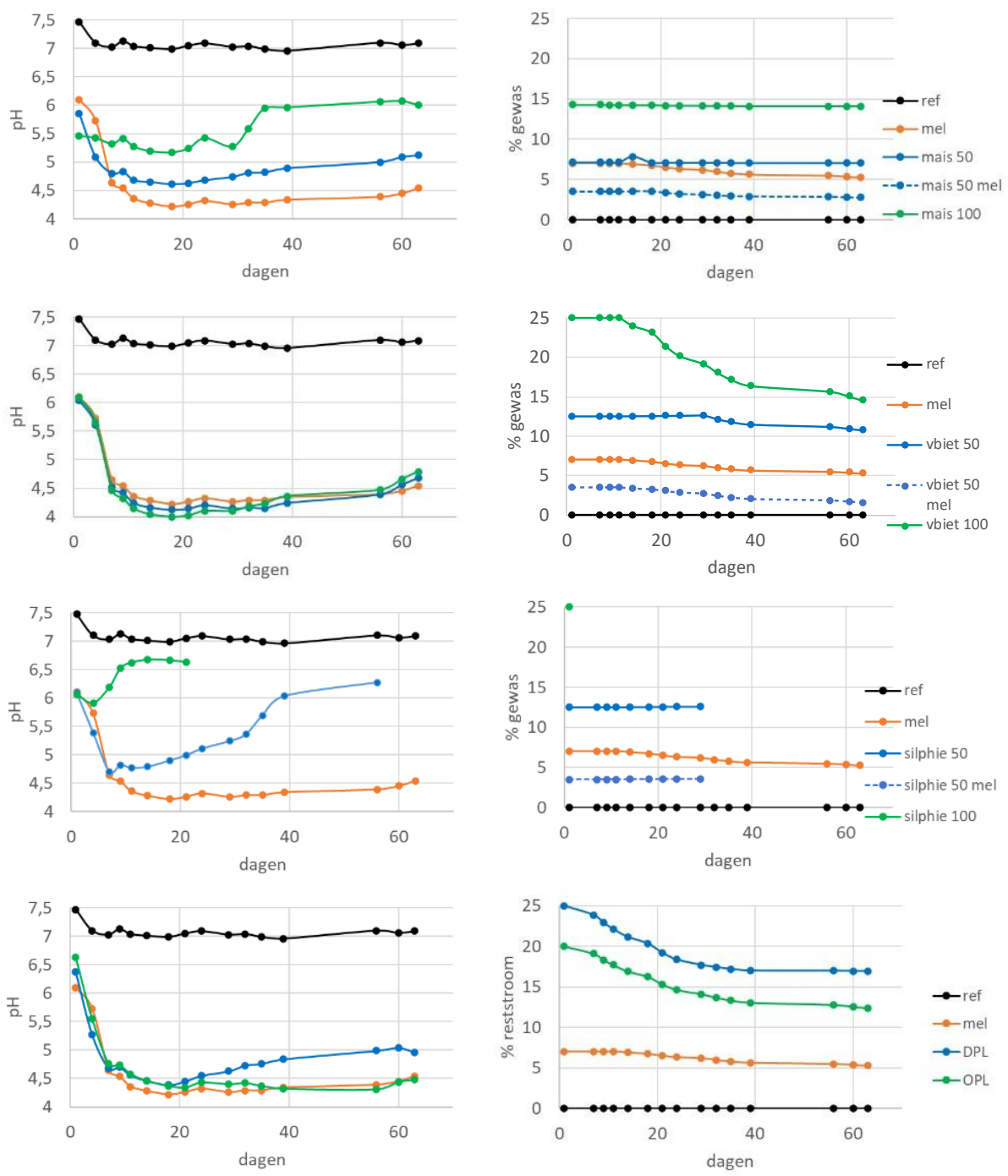
Tabel 4-7 Gewasanalyses proef 4. Droge stof (DS) in g/kg product. Overig in g/kg DS.

Gewas	DS	pH	Ruw eiwit	Ruwe celstof	Ruw as	Suiker	Zetmeel
Mais	390	3,9	76	186	36	12	314
Voederbiet	195		51	39	36	746	

Figuur 4-6 toont de verandering in pH gedurende de fed-batch proef (op elk tijdstip dat de pH is gemeten is ook extra mest toegevoegd). Daarnaast is de verandering in het gehalte van de gewassen en reststromen in de mest weergegeven. Melasse heeft bijvoorbeeld een groot verzurend potentieel. Bij de behandeling waar initieel 7% melasse is toegevoegd aan 2L mest, zakte de pH tot 4,3 na 10 dagen. Hierna werd de dosering verlaagd om ervoor te zorgen dat de pH op 4,5 zou uitkomen. Door het verlagen van de dosering om de pH te handhaven, zakte het gewogen gemiddelde gehalte melasse in de mest tot 5,3% aan het eind van de proef.

De resultaten met de drie gewassen zijn vergelijkbaar met de eerdere proeven; het verzurend potentieel van voederbieten is het grootst, gevolgd door mais en silphie heeft het laagste verzurend potentieel. De behandeling met silphie100 (100 g ds per 2 kg mest) leidde zelfs niet tot een verlaging van de pH. Deze behandeling is na enkele dagen gestopt. Behandeling silphie50 (50 g ds per 2 kg mest+ 3,5% melasse) is ook voortijdig gestopt, toen de pH boven de 6 uitkwam. De hoeveelheid silphie+melasse is hier constant gehouden en niet tussentijdse aangepast omdat op basis van versgewicht al grote hoeveelheden werden toegevoegd (500 g per 2 kg mest).

Bij mais100 bleef de pH 30 dagen onder de 5,5, zelfs met het geregeld toevoegen van mest, waarna de pH opliep tot boven de 6,0. Bij mais50 bleef de pH 50 dagen onder de 5,0 en liep deze langzaam op van 4,6 na 20 dagen tot 5,1 na 64 dagen. De dosering is tussentijds niet aangepast.



Figuur 4-6 Links: Het verloop van de pH gedurende 64 dagen bij de fed batch proef met als startbehandeling per 2 kg verse drijfmest mest 100 g ds mais, voederbieten of silphie; 50 g ds mais, voederbieten of silphie + elk met 3,5% melasse en 25% DLP en 20% OPL. Behandelingen met mais, voederbieten en silphie werden vooraf aangezuurd tot een pH van 6,2 met azijnzuur. Op de dagen dat de pH werd gemeten werd nadien 200 g (eerste week) of 300 gram verse mest toegevoegd. Rechts: Het verloop van het percentage reststroom of gewas (vers) aanwezig in de mest. Bij behandelingen mest gewas + melasse is het percentage melasse met een stippellijn weergegeven.

Beide behandelingen met voederbieten verlaagden de pH tot rond de 4,1 na 10 dagen. Daarom werd vanaf dat moment de dosering bij beide behandelingen verlaagd. Bij voederbiet50 werd de dosering van melasse vanaf dag 14 gehalveerd en van dag 32 af werd er geen melasse meer toegevoegd. Bij voederbiet100 werd vanaf dag 14 de toediening van voederbieten verlaagd tot 30 g ds per kg mest wat overeenkomt met 15% en op dag 32 tot 16,7 g ds per kg mest wat overeenkom met 8,3%. Hierdoor zakte

het gehalte voederbiet in de mest van 50 g ds per kg (is 250 g vers) aan het begin tot 29 g ds per kg (is 145 g vers) aan het eind.

Bij de reststromen DLP en OPL is bij het doseren van 200 of 300 g mest begonnen met 12,5% en 10% DLP en OPL (de halve dosering ten opzichte van initieel). De pH zakte tot 4,4 na 18 dagen. Daarna bleef de pH bij OPL stabiel en liep deze op bij DLP. Daarom is op dag 32 de dosering met DLP verhoogd van 12,5% naar 15,0% en op dag 56 naar 16,7%. Hierdoor zakte het gehalte DLP in de mest van 25,0% in het begin tot 16,9% aan het eind. De dosering van OPL bleef gedurende de hele proef op 10,0%, waardoor het initiële gehalte aan OPL zakte van 20,0% naar 12,3%.

Rendement fermentatie

De proef is bedoeld om te bepalen hoeveel toevoegmiddel nodig is om bij geregelde toevoer van mest een bepaalde pH te handhaven (bijvoorbeeld 4,5 of 5). Het aanzuren gebeurt door de fermentatie van suikers waarbij melkzuur wordt geproduceerd. De fermentatie van suikers kan via verschillende routes verlopen. Het hoogste rendement wordt behaald wanneer het verloopt via homofermentatie waarbij uit 1 mol suiker 2 mol melkzuur ontstaat. Tabel 4-8 toont het (fermentatie) rendement van het biologisch aanzuren met gewassen en reststromen voor de fed-batch experimenten, waarbij uit is gegaan van homofermentatie. Er is gecorrigeerd voor aanwezig azijnzuur en melkzuur bij het licht zure OPL en DPL (melasse bevat ook azijnzuur en melkzuur maar heeft van zichzelf toch een hoge pH door de aanwezigheid van kalk en daarom is niet gecorrigeerd voor de aanwezigheid van deze zuren die bij deze pH al volledig gedissocieerd zijn). Het rendement was het hoogst bij melasse. Hier werd 101% van potentiële H^+ productie bereikt. Het rendement was het laagst bij mais100. Hier werd slechts 52% van de potentiële H^+ productie bereikt.

Tabel 4-8 Berekening van het rendement van biologisch aanzuren in een fed-batch proef. Mol H+, %gewas/reststroom en gram suiker is hoeveelheid die aan het eind van de proef (na ongeveer 60 dagen) aanwezig is per kg mest. De Werkelijke hoeveelheid H^+ is geschat met de titratiecurve en de pH aan het eind van de proef. Mol H^+ theoretisch is wanneer alle suiker en zetmeel in de vorm van glucose aanwezig is, en 1 mol glucose 1 mol H^+ vormt. Voor mais50 en voederbiet50 is de mol H^+ theoretisch gesplitst over gewas en melasse.

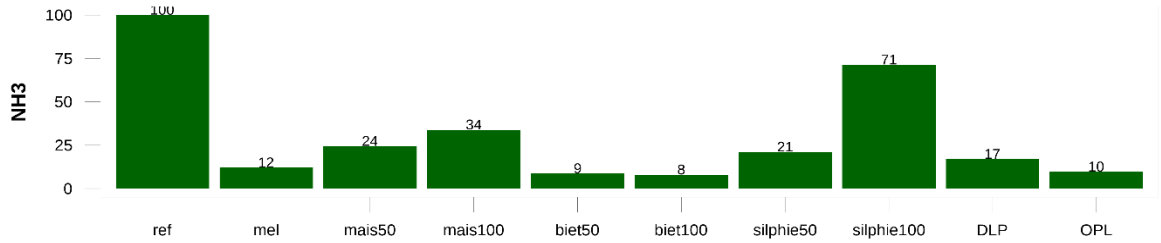
Behandeling	pH eind	mol H+ werkelijk	mol H+ azijnzuur toevoeging	% gewas / reststroom	gram suiker	Mol H+ theoretisch	Rendement
Ref	7,1						
Melasse	4,6	0,26	0,01	5,3	26,4	0,25	101%
Mais50: deel mais	5,2	0,22	0,01	7,0	10,0	0,11	82%
Mais50: deel melasse		0,00	0,00	2,8	13,9	0,15	
Mais100	6,0	0,13	0,02	14,1	19,9	0,22	52%
Voederbiet50: deel voederbiet	4,8	0,24	0,01	10,8	17,4	0,17	94%
Voederbiet50: deel melasse		0,00	0,00	1,5	7,7	0,08	
Voederbiet100	4,9	0,24	0,01	14,5	23,5	0,24	94%
DPL	4,9	0,24	0,00	16,9	24,6	0,25	94%
OPL	4,5	0,26	0,00	12,3	35,2	0,32	83%

4.4.2 Ammoniak- en broeikasgasemissies

Figuur 4-7 toont de ammoniakemissie aan het eind van de fed-batch proef. Omdat de verwacht wordt dat de emissie zoals gemeten onder labomstandigheden anders is dan emissies uit de mestput, is de emissie weergegeven als percentage van de emissie vanuit de referentie mest.

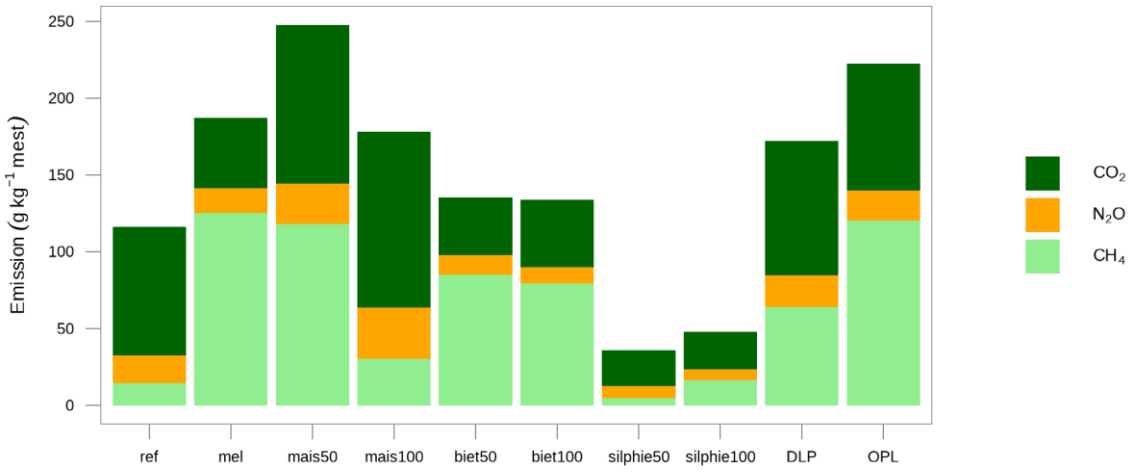
Bij alle aangezuurde behandelingen is de ammoniakemissie lager dan de emissie vanuit de referentie mest. Zoals verwacht hebben de behandelingen die de pH het meest verlagen, ook de laagste ammoniakemissie. De laagste ammoniakemissie wordt bereikt bij aanzuren met voederbieten al dan

niet in combinatie met melasse. De mest is dan al initieel verzuurd met azijnzuur. Voor voederbiet50 en voederbiet100 bedroeg de ammoniakemissie respectievelijk 9% en 8% van de emissie uit de referentie mest. Een reductie in ammoniakemissies van meer dan 90%.



Figuur 4-7 Totale ammoniakemissie bij proef 4 na 66 dagen (voor silphie50 en silphie100 na 21 dagen), gegeven als percentage van de ammoniakemissie van de referentie mest.

Figuur 4-8 toont de broeikasgasemissies van de verschillende behandelingen in g CO_2 equivalenten per kg mest. De emissies bij behandelingen met silphie zijn alleen de eerste 21 dagen gemeten. De CO_2-emissies komen enerzijds door afbraak van organische stof en anderzijds door omzetting van CO_3^{2-} naar CO_2 als gevolg van verlaging van de pH. Bij de behandelingen met gewassen en melasse, is vooraf aangezuurd met azijnzuur. Hierdoor is een deel van de CO_2 al geëmitteerd voordat de metingen begonnen. De daadwerkelijke CO_2-emissie zal dus hoger liggen. Daarentegen zal deze CO_2 uiteindelijk ook vanuit de referentie mest emitteren wanneer deze wordt toegediend aan grasland.



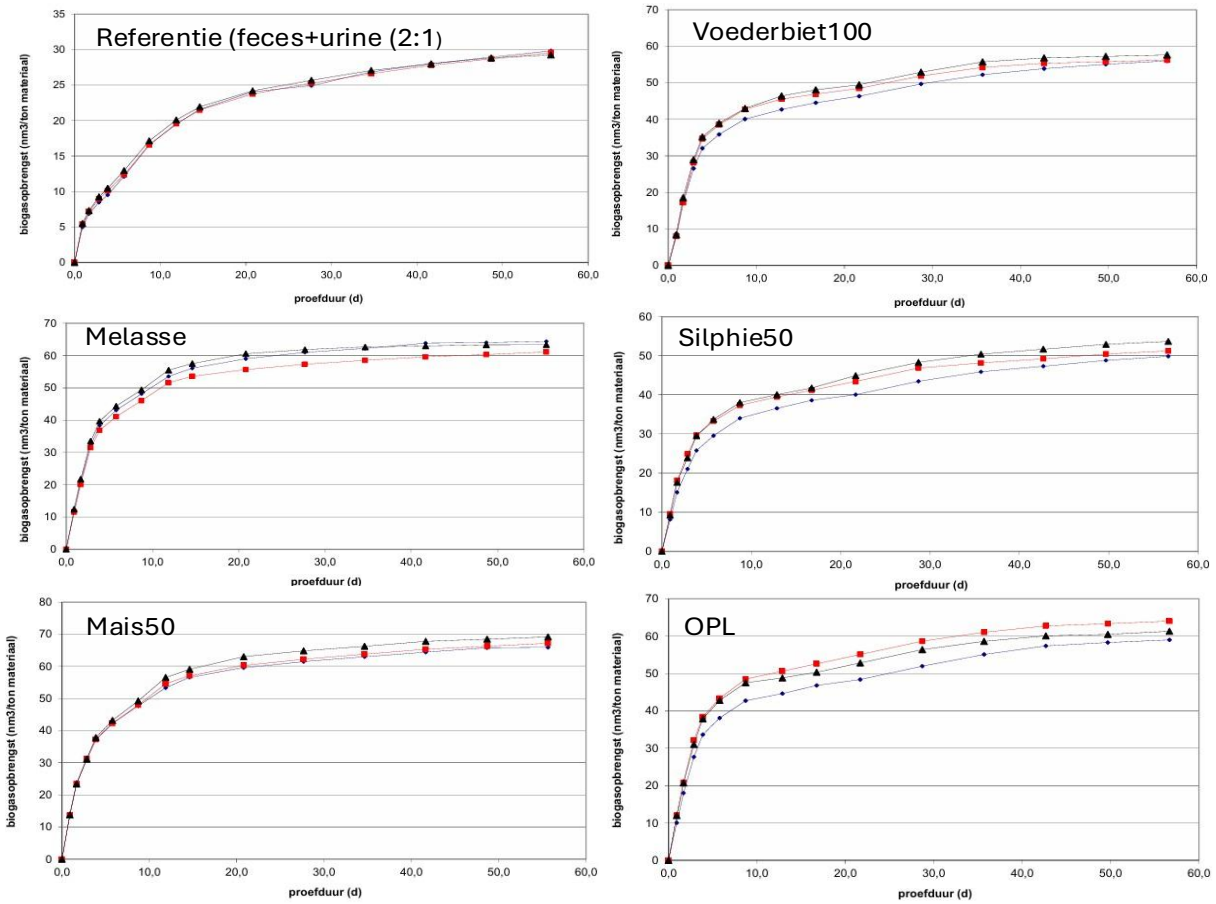
Figuur 4-8 Totale broeikasgasemissie bij proef 4 na 66 dagen (voor silphie50 en silphie100 na 21 dagen), gegeven in g CO_2-equivalenten per kg mest.

De totale BKG-emissie (uitgedrukt in CO_2 equivalenten) is het hoogst voor behandelingen met mais. Bij voederbiet en silphie is deze zo'n 3 á 4 keer lager. De restproducten DPL en OPL hebben een De N_2O emissies volgen een patroon dat zeer vergelijkbaar is met de CO_2-emissie. Uitgedrukt in CO_2-equivalenten is de N_2O-emissie gelijk aan zo'n 25% - 50% van de CO_2-emissie. Tegen de verwachting is, is de gemeten methaanemissie van aangezuurde mest 2 tot 9 keer zo hoog als de referentie emissie. Deze hogere emissies werden niet verwacht en zijn ook afwijkend van een eerdere studie (Bussink et al., 2025) en van hetgeen dat bekend is uit de literatuur (van Dam & Bussink, 2026).

4.4.3 Biogasopbrengst

Van de tien behandelingen met verschillende restproducten en gewassen (al dan niet in combinatie met melasse), zijn er van zes de biogasopbrengst bepaald. Dit is niet gedaan voor behandelingen mais100 en silphie100 omdat deze een pH van boven de 6 hadden. De behandeling voederbiet50 is niet meegenomen, omdat deze in verzurend potentieel heel vergelijkbaar was met voederbiet100. Hierdoor zou bijmengen van melasse in de praktijk niet nodig zijn. Van de restproducten is de behandeling met DLP niet meegenomen omdat deze een lager OS-gehalte heeft dan OPL en daardoor minder geschikt is voor vergisting.

Net als in voorgaande studies leidt verzuren van runderdrijfmest tot een hoger biogaspotentieel en snellere vergisting dan wanneer de mest niet is aangezuurd, en met een vergelijkbare kwaliteit van het biogas.



Figuur 4-9 De ontwikkeling van de biogasopbrengst over een periode van 56 dagen in Nm3 per ton gemeten door Opure. Voederbiet100 is 100 g ds voederbiet per 2 kg mest, Mais50 en Silphie50 = 50 g ds mais of silphie per 2 kg mest elk met 3,5% melasse, OPL is 18%OPL toevoeging, melasse is 5,1% melasse toevoeging. Behandelingen met mais, voederbieten en silphie werden vooraf aangezuurd tot een pH van 6,2 met azijnzuur.

Tabel 4-9 geeft de gemeten biogasopbrengst van de zes geselecteerde behandelingen na 56 dagen. De biogasopbrengst van de referentie mest (feces+urine (2:1)) is 30 m^3. Bij de aangezuurde mest was dit ongeveer 2 maal zo hoog variërend van 52 m^3 bij silphie50 tot 67 m^3 bij mais50. Door biologisch aanzuren nam de kwaliteit van het biogas nauwelijks af. Bij de referentie mest was het CH_4-gehalte in het biogas 59% en bij de aangezuurde mest was dit maximaal 2,6% lager en wel bij de behandeling met voederbieten. Opvallend is dat na verzuring van de mest de vergisting veel sneller verloopt (zie Figuur 4-9). Na 10 tot 12 dagen wordt al 80% van de maximale biogasproductie (op dag 56) bereikt. Ongeveer 90% wordt bereikt na 15 en 30 dagen. Bij de referentie wordt 80% en 90% van de maximale biogasproductie (op dag 56) bereikt na respectievelijk na 20 en 40 dagen. Om 90% van de maximale

biogasproductie te bereiken is de verblijftijd bij de aangezuurde varianten gedurende de vergisting 1,2 tot 2,3 keer korter dan voor de referentie, waarbij de melasse behandeling de kortste verblijftijd had gevolgd door de behandeling met voederbiet en mais (~2).

Tabel 4-9 Biogasopbrengst van 6 geselecteerde behandelingen na 56 dagen vergisting, mestmonsters genomen op dag 21 van proef 4, gemeten door Opure (gemiddelde van 3 submonsters).

Behandeling	CZV (kg/ton)	pH	DS (%)	OS (% DS)	Biogas (nm^3/ton)	Biogas kwaliteit (% CH_4)	Spec. biogas (Nm^3/kg os)	Afbraak OS (%)	H_2S (ppm)
Ref	102	7,0	9,7	76,1	29,6	59,2	0,400	49,0	401
Mel	158	4,2	13,0	78,9	62,9	58,9	0,614	75,4	430
Mais50	154	4,5	12,8	80,6	67,4	58,5	0,655	80,7	404
Voederbiet100	143	4,0	10,9	81,0	56,6	56,6	0,639	80,3	405
Silphie50	129	4,9	11,3	78,7	51,6	58,5	0,581	71,6	392
OPL	162	4,3	12,8	73,7	61,4	57,5	0,654	81,4	397

5 Kosten en opbrengsten aanzuren

Dit hoofdstuk behandelt voor een aantal scenario's de uitgangspunten, kosten en opbrengsten. De analyse beoordeelt de economische haalbaarheid van mestvergisting en groengasproductie van verzuurde mest, voor melkveehouderijen, met specifieke aandacht voor schaalgrootte, mestsoort (dagverse DV versus biologisch aangezuurde BA mest) en procesoptimalisaties. Hierbij wordt voortgebouwd op eerdere studies met inzet van melasse.

5.1 Uitgangspunten

Vergisting van biologisch aangezuurde mest levert meer biogas/groengas dan reguliere mest en de vergisting verloopt een factor 2 tot 3 sneller dan bij reguliere mest (Sanders en Bussink, 2025). Dit betekent een sterke stijging van de volumetrische productiviteit (de hoeveelheid geproduceerde m^3 biogas per m^3 vergisterinhoud per dag) tot wel 3,5 m^3 biogas/m^3.dag (Sanders en Bussink, 2025). Tegenover deze opbrengsten staan ook investeringskosten voor het systeem van biologisch aanzuren ter vermindering van emissies. De extra inkomsten uit de hogere gasproductie kunnen de kosten mogelijk dekken, maar dit is afhankelijk van de schaalgrootte. Dit is uitgewerkt in Bussink et al. (2025) voor dertien verschillende mogelijke scenario's van biologisch aanzuren (BA) op basis van melasse.

In het afgelopen jaar en tijdens het onderhavige onderzoek zijn nieuwe inzichten ontwikkeld, waardoor biologisch aanzuren mogelijk interessanter wordt voor bedrijven met 300-600 koeien (minder dan 300 koeien blijkt niet rendabel). Daartoe is een aantal nieuwe scenario's ontwikkeld en doorgerekend in aanvulling op Bussink et al. (2025) (Tabel 5-1). De nieuwe scenario's focussen op bijmengen van BA mest aan bestaande vergisters. Uitgangspunten bij deze nieuwe scenario's zijn dat:

- op bedrijven met monomestvergisters en dagverse (DV) mest het niet realistisch is dat overgestapt wordt naar volledig aangezuurde mest vanwege de grote investeringen die gedaan zijn voor aanpassingen in de stal voor het realiseren van dichte vloeren om zo DV mest snel uit de stal te kunnen verwijderen. Het is wel mogelijk om biologisch aangezuurde (BA) mest afkomstig van een buurbedrijf plus DV mest in een verhouding van 1:1 te vergisten zonder de vergistercapaciteit te moeten vergroten omdat de vergisting dan veel sneller verloopt. Praktijkonderzoek (Sanders et al., 2025) leverde voor deze 1:1 situatie hoge biogasopbrengsten bij een verblijftijd van ca 20 dagen. Voor een boerderijvergister wordt de biogasproductie verhoogd van 0,87 m^3 per dag per m^3 DV mest (35 m^3 gedurende 40 dagen) tot 2,12 m^3 biogas per m^3 vergisterinhoud per dag (35+50)/ (20+20). Met deze aanpassing van alleen DV mest naar een 1:1 mengsel van DV met BA mest is een verhoging met een factor 2,4 groengasproductie mogelijk.
- biogas invoeden in het gasnet pas gebeurt bij 300 koeien of meer met een veronderstelde groengas prijs van 1,55 €/m^3. (De waarde kan nog verder beïnvloed worden door Certificaten van Oorsprong waarbij de zg Carbon Intensity van de grondstoffen gewaardeerd worden op basis van de hoeveelheid fossiele CO_2 die uitgestoten wordt per MJ geproduceerde nuttige hernieuwbare energie. Naar verwachting zal dit leiden tot vervaging van het onderscheid tussen grote en kleine vergisters en tussen monomestvergisters en covergisters, welke indeling werd gemaakt om tot verschillende tarieven voor de SDE+ subsidie te komen.)
- bij minder dan 25 m^3 biogasproductie per uur het gas wordt afgevoerd via BASgas (deze firma koopt het ruwe biogas voor een vaste prijs. Op het erf plaatst BASgas haar eigen installatie voor de

reiniging en opwerking van gas. Vervolgens regelt BASgas het transport naar eigen regionale invoedpunten. Het gas wordt verkocht aan een energiebedrijf). Dat betekent wel een lagere prijs van 0,81 €/ m^3 (omgerekend naar groengas) maar in deze scenario's worden dus geen eigen kosten gemaakt voor groengasopwerking.
- de bedrijven een N-productie van 240 kgN/ha hebben (en op basis van de wettelijke gebruiksruimte voor dierlijke mest 70 kg N/ha afgevoerd moet worden tegen 30€/m3).
- Voor eenzelfde aantal koeien is mestvergisting dagvers vergeleken met mestvergisting van BA mest en met vergisting van 50% DV mest plus 50% BA van de buurman.
- bij gebruik van een ammoniakstripper een rendement van 50% is verondersteld (50% van de ammoniakale-N in mest wordt afgevangen). Bij op nog grotere schaal vergisten zijn hogere striprendementen mogelijk (75%).

De overige uitgangspunten staan in Bussink et al., 2025. Gehanteerde kostprijzen rondom vergisting en mestbewerking en transport zijn momentopnames en kunnen snel wijzigen. Voor de onderlinge vergelijking van systemen maakt dat niet veel uit.

5.2 Scenario's

In Tabel 5-1 is de businesscase doorgerekend voor situaties met 150, 300 en 600 koeien. Om goed te kunnen vergelijken tussen varianten is een groengasprijs berekend waarmee een PBT (Pay Back Time ofwel terugverdientijd) van 7 jaar behaald kan worden.

Voor kleine bedrijven (±150 koeien) is de businesscase uitdagend. Een hoge groengasprijs is vereist om kostendekkend te opereren, waarbij de benodigde prijs aanzienlijk boven het huidige niveau ligt. BA-mest heeft economisch meer potentie dan DV-mest; er is een minder hoge gasprijs nodig. Bij de situatie van 150 koeien is uitgegaan van geen eigen groengasinstallatie. De productie van groengas wordt door een derde verzorgt. Daardoor zijn de investerings- en operationele kosten per m^3 mest relatief laag, maar gaat een belangrijk deel van de opbrengsten naar de derde partij.

Vanaf 300 koeien wordt een eigen groengasproductie aantrekkelijker, ondanks hogere investeringskosten door inzet van een overgedimensioneerde en daardoor dure groengasinstallatie. De marge is nog licht negatief bij 300 koeien, maar positief bij 600 koeien. Schaalgrootte blijkt een cruciale randvoorwaarde voor economische haalbaarheid (vooral bij de inzet van een groengasinstallatie).

Schaalgrootte is ook te realiseren door het combineren van meststromen door DV-mest en BA-mest van een buurbedrijf te combineren. Een gemengd scenario (50% DV/50% BA) voor in totaal 300 koeien door het toevoegen van BA-mest van een buurbedrijf (150 koeien) leidt tot een verbetering van rendement, zelfs met een eigen groengasinstallatie. Het geeft ook beter rendement dan monomestvergisting van alleen DV-mest van 300 koeien. Dit wordt veroorzaakt door lagere investeringskosten voor kleinere vergister.

Bij grotere bedrijven (600 koeien) wordt het effect van samenwerking nog duidelijker: Toevoeging van BA-mest (scenario D3) resulteert in een positieve marge van respectievelijk per ongeveer 9€ m^3 en een terugverdientijd van ongeveer 11 jaar, terwijl scenario C5 nog licht negatief is. De belangrijkste driver is een significant hogere gasopbrengst uit bestaande installaties. Het rendement is enkele euro's beter dan vergisten van alleen DV-mest (scenario D2 versus D4).

Procesoptimalisatie door ook ammoniakstrippen toe te passen voor scenario's met 300 en 600 koeien (scenario's C4, C5, C6 en D2 en D4) verhoogt het rendement bij 600 koeien terwijl dat bij 300 koeien afneemt. De extra investeringen voor strippen worden bij 600 koeien meer dan goed gemaakt door een sterke reductie van de mestafzetkosten. Er is geen stikstofoverschot meer op het bedrijf. De door strippen afgevangen stikstof heeft de status van Renure-meststof en zal leiden tot besparingen op kunstmestbemesting. Bij 600 koeien zien we dat een PBT van 7 jaar met de huidige groengasprijs mogelijk wordt, bij 300 koeien duidelijk niet veroorzaakt door de investering in de stripper.

Verder leidt strippen tot een sterke daling van de ammoniakemissie, van ongeveer 45-50% naar 65-70% op bedrijfsniveau. Voor schaalniveaus tussen 300 en 600 koeien zijn de kosten voor het bewerkstellingen van 50% emissiereductie of meer beperkt. Vanaf 600 koeien zijn er zelfs opbrengsten.

Tabel 5-1 De kosten en opbrengsten bij verschillende scenario's van mestververgisten (dagvers, BA of de mix) voor verschillende schaalgroottes. (PBT= Pay back time of wel terugverdientijd).

Optie	Groengas SDE	€/m3	*Variant*	Aantal	Invest.	Rendement	% emissie	*PBT*	*Groengas*
	Nodig bij PBT =7jaar	nu		koeien	€/m³	€/m³	reductie	*jaar*	*m³/uur*
A		nvt	Niets doen	150	0,0	-12,2	16	nvt	0
B	nvt	nvt	BA en uitrijden	150	7,9	-18,0	75 (54)***		0
E	3,67	1,55*	Dagvers	150	86,0	-8,1	48		10
E1	2,53	1,55*	Vergisten BA	150	82,2	-8,3	52		15
C1	3,3	1,55	Vergisten DV + gg	300	156	-11	48		20
C2	2,2	1,55	Vergisten BA+ gg	300	113	-3,6	51		31
C3	2	1,55	Vergisten DV+BA + gg	300	119,0	-4,0	50	19,8	25
C4	3,73	1,55	als F + strippen	300	195	-13,4	65		20
C5	2,5	1,55	als G + strippen	300	150	-6,1	67		31
C6	2,8	1,55	als H + strippen	300	157	-6,5	70	19,8	25
D1	1,77	1,55	Vergisten DV + gg	600	132	**14,7**	48	9	40
D2	2,0	1,55	Vergisten DV + strip + gg	600	151,7	**13,4**	65	11,4	40
D3	1,72	1,55	Vergisten DV + BA + gg	600	96,2	**8,8**	50	11,0	51
D4	1,5	1,55	Vergisten DV + BA + strip + gg	600	115,1	**15,6**	70	7,4	51

* van 1,55 gaat deel naar BASGas en deel (0,81) naar de boer. *** indien de vloer niet wordt gespoeld.

Uit het bovenstaande blijkt dat het voor een melkveehouder die zelf DV-mest vergist het interessant om BA mest bij te mengen omdat er al een vergister aanwezig is en hier geen extra investering voor nodig is (doordat de verblijftijd van BA+DV mest in de vergister halveert en de gasproductie meer dan verdubbeld). Tegelijk hoeft een melkveehouder die biologisch wil aanzuren niet perse een eigen vergister te hebben. In de praktijk hebben veel boerenvergisters nu een warmtekrachtkoppeling (WKK) en worden geconfronteerd met netcongestie en zelfs negatieve stroomprijzen bij levering aan het net. Een overstap naar groengasproductie wordt aantrekkelijker vooral in combinatie met de toevoeging van BA-mest afkomstig van een bedrijf in de buurt/regio.

Andere punten die van belang kunnen zijn:

- Als meer centraal wordt vergist - bijvoorbeeld via een mesthub - zijn er lagere transportkosten omdat aangezuurde mest opgeslagen kan worden (en dus altijd volle vrachten) itt dagvers.
- Bij dagverse mest uit stallen waarvan de mestput behouden is onder de dichte vloer, kan het digestaat opgeslagen worden tot moment van uitrijden. Voor het digestaat van aangezuurde mest is een extra opslagruimte nodig.
- Er zijn aanwijzingen dat het methaangehalte in biogas hoger bij BA mest dan bij DV mest. In dat geval zijn de kosten voor groengasproductie lager bij gebruik van CO_2-absorptie als zuiveringsprincipe.

- Op termijn zijn andere opties denkbaar, zoals BA mest scheiden in dikke en dunne fractie en bij voorkeur de dunne fractie te vergisten in de maanden dat er uitgereden mag worden en de dikke fractie onder zure condities op te slaan en te vergisten juist in de wintermaanden zodat er middels combinatie met WKK-warmte voor verwarmen van de vergister beschikbaar komt in de koudste maanden en evt stroom voor een warmtepomp.

Conclusies

De economische haalbaarheid van mestvergisting en groengasproductie is sterk afhankelijk van schaal, bijmengen van BA mest en technologische keuzes. Bijmengen van BA-mest van een buur/regiobedrijf is een van de meest effectieve maatregelen om opbrengsten te verhogen zonder extra vergistingscapaciteit te hoeven realiseren. Het is een win win voor het bedrijf dat al een vergistingsinstallatie heeft en voor het bedrijf dat aanzuurt (hoeft niet zelf te investeren in een vergistingsinstallatie en te wachten op bouwvergunning. Wel zal er een vernieuwing van de vergunning nodig zijn voor uitbreiding van het mestvolume). Samenwerking tussen melkveehouders (uitwisseling van meststromen) is dus essentieel voor de rendabiliteit.

6 Discussie

6.1 Geteste gewassen en verzuringspotentieel

In deze studie zijn verschillende grondstoffen getest op hun bijdrage aan verzuring van drijfmest ter vervanging van melasse. Melasse heeft een hoog verzurend potentieel, maar is kostbaar en de beschikbaarheid is beperkt. In Tabel 6-1 is kwalitatief weergegeven hoe mais, sorghum, silphie en voederbieten bijdragen aan de verzuring in vergelijking tot melasse. Het verzurend potentieel van sorghum, silphie en zelfs mais is (veel) minder dan op basis van hun samenstelling en droge stofgehalte was ingeschat. Grof snijden gaf minder goede resultaten dan fijnsnijden. Zonder toevoeging van melasse levert fijngesneden mais een redelijke en voederbiet een goede verzuring op. Alle gewassen leveren een bijdrage aan de verzuring maar bij mais en biet is deze duidelijk beter dan bij sorghum en silphie. Bij alle gewassen met uitzondering van voederbiet is een deel melasse nodig om tot een goed resultaat te komen. Bij de proeven uitgevoerd met silphie en sorghum dient de bijdrage vanuit melasse zeker 2/3 van het verzurende potentieel te zijn (toevoeging van 4,5%) in combinatie met 35 g ds per 2 kg mest uit deze gewassen. Bij mais lijkt in combinatie met 65-50 g ds per 2 kg mest, 2,5-3,5 gewichtsprocenten uit melasse nodig te zijn.

Tabel 6-1 Inschattingen van de effectiviteit van de inzet van gewassen op basis van de uitgevoerde 4 proeven, waarbij "++++" qua score vergelijkbaar met het effect van inzet van alleen melasse. (f en g zijn fijn of grof snijden en 100, 65, 35 ds uit gewas per 2 kg mest aangevuld met 0, 49 en 91 gram melasse per 2 kg mest). In alle gevallen is de mest initieel aangezuurd tot een pH van 6,2 met azijnzuur.

	f-100	f-65	f-35	g-100	65-65	g-35
Mais	++	+++/++++	++++	++	++/+++	+++
Sorghum	+	++	++/+++	+	+/++	++
Biet	++++	++++	++++	++	+++	+++
Silphie	+	++	++/+++	+	+/++	++

Het toevoegen van gewassen vergroot het mestvolume. Bij de f-100 (100 g ds per 2 kg mest) behandelingen neemt het mestvolume bij inzet van mais, sorghum, voederbiet en silphie met respectievelijk 14, 29, 30 en 23 procent toe. Bij hogere ds-gehalten van ingekuilde sorghum of silphie en een ander voederbietenras kunnen deze hoge percentages wat lager worden, maar zal er nog steeds ongeveer 20% volume toename zijn. Tegelijk volstaat alleen maar gewas toedienen alleen bij voederbieten, zoals ook de fed-batch proef 4 liet zien. Daarbij volstond uiteindelijk ongeveer 15% toevoeging van fijngesneden voederbieten om de pH beneden de 5 te houden na 60 dagen. In een combi met melasse kan de volume toename bij de andere gewassen ook beperkt blijven tot ongeveer 15%. De resultaten verkregen met alleen melasse in proef duiden erop dat homofermentatie (volledige omzetting van suiker naar melkzuur) plaatsvond. Dit is gewenst. Het is belangrijk vast te stellen onder welke randvoorwaarden dit in mest optreedt zonder competitie van andere organismen. Welk pH traject is daartoe optimaal, zodat en het aanzuurproces stabiel verloopt en er beperkt substraat nodig is (ook voor instandhouding van de populatie). Moet er gestuurd worden op een bepaalde Lactobacillus populatie maar ook wat is optimaal qua invoeding met substraat.

In tegenstelling tot de verwachting zijn ingekuilde silphie en sorghum minder geschikt om via fermentatie mest te verzuren. Er zitten weinig vrije suikers in deze producten; tijdens de conservering zijn deze al omgezet in zuren en de overige organische verbinding zijn kennelijk beperkt geschikt als voedingsmateriaal voor melkzuurbacteriën. Mais bevat zetmeel dat wel gefermenteerd kan worden tot melkzuur. Voederbieten bevatten van nature veel suiker.

De drijfmest van de drie bedrijven had een sterk verschillende buffercapaciteit, naarmate het drogestof- en ammoniumgehalte toenam steeg de buffercapaciteit. Bij aanzuring in de praktijk kan ook het boxstrooisel (bijvoorbeeld de aanwezigheid van kalk) en spoelwater van invloed zijn. De laatste verdund niet alleen de drijfmest maar kan ook de zuurvraag vergroten doordat de spoelmiddelen vaak basisch zijn. Voor een minimale inzet van melasse onder praktijkomstandigheden kan kalk in boxstrooisel beter achterwege blijven evenals het lozen van spoelwater in de mestput. Het laatste verlaagt door de verdunning ook het rendement bij vergisting. Daarnaast kan het ammoniumgehalte in mest worden verlaagd door scherp op eiwit te voeren.

Een oorzaak voor het tegenvallende resultaat bij silphie kan zijn dat het ingekuilde product uit relatief oud materiaal bestond. Eind september 2025 is een tiental silphie planten geoogst nabij Schildwolde) en in vier delen opgedeeld en geanalyseerd op samenstelling en droge stof (Tabel 6-2). In totaliteit was er na drogen ongeveer 500 g ds over. De planten als geheel bevatten bijna 170 gram suiker per kg ds met de meeste suiker in het onderste en middendeel, wat overeenkomt met literatuurwaarden. Of jonger materiaal en of focussen op het onderste en middendeel (vooral stengels, ongeveer 60% van de totale drogestof) beter geschikt is voor aanzuren zal moeten blijken uit aanvullend onderzoek. Waarschijnlijk zal dat alsnog niet toereikend zijn en is de vraag of een (voor)ontsluiting mogelijk is waardoor meer suikers beschikbaar komen (zie paragraaf 6.3).

Tabel 6-2 De samenstelling van silphie op basis van een paar planten uitgesplitst naar gewasdelen.

tPlantdeel	Lengte	DS	DS%	Suikers g/kg ds	RC
Top	80	95	24	112	437
Midden	65	110	19	197	377
Onder	50	135	22	224	391
Blad	Nvt	170	31	105	153
Totaal	195	500	24	168	320

Opgemerkt moet worden dat het toevoegen van gewassen niet alleen het mestvolume maar ook het mestoverschot vergroot. Daarom is het van belang de BA-drijfmest tijdens of na vergisting te strippen om zo N af te scheiden, wat ingezet kan worden als Renure-meststof. Zo wordt het N-overschot niet vergroot maar zelfs verkleind afhankelijk van het rendement van de N-stripper.

6.2 Inzet van gewassen vanuit economisch perspectief

In hoofdstuk 5 zijn scenario's doorgerekend welke schaalgrootte ongeveer nodig is voor biologisch aanzuren in combinatie met mestvergisting en strippen van ammoniak om dit tegen lage overall kosten of zelfs met een positief saldo te kunnen uitvoeren. Om in plaats van melasse gewassen in te zetten voor het biologisch aanzuren moet het economisch plaatje van kosten en opbrengsten ongeveer vergelijkbaar zijn met dat van melasse. In de uitgevoerde proeven is getest of de gewassen mais, voederbieten, silphie en sorghum inzetbaar zijn bij biologisch aanzuren van mest. Het bleek dat vooral voederbieten goed inzetbaar zijn voor mestverzuring. Met de andere gewassen kon de mest niet

voldoende worden aangezuurd (tot pH 5,5). Er was nog inzet van melasse nodig; bij mais minder dan bij sorghum en silphie.

Ter verkenning van het economisch perspectief van de inzet van gewassen op basis van de verkregen resultaten is in bijlage 2 eerst nagegaan wat de globale kenmerken van de vier gewassen zijn en tot welke teeltkosten dit leidt (inclusief oogst). Op basis van deze kenmerken, de aanzuurresultaten in de uitgevoerde proeven en de verwachte biogasopbrengsten op basis van literatuur zijn de kosten berekend per kuub mest maar ook als een kostprijs per kg extra groengas die uit de toevoeging van melasse met gewas wordt verkregen. Uitgangspunt bij de berekeningen met behulp van Copilot is dat steeds pH 5 gerealiseerd kan worden. De berekeningen laten zien dat de inzet van gewassen gunstiger is dan melasse (Tabel 6-3). Alleen bij silphie of sorghum is dat niet of nauwelijks het geval (bijlage 2) omdat hier bijna net zoveel melasse nodig als in de situatie zonder gewas. Het toevoegen van gewassen betekent een vergroting van het mestvolume omdat de droge stof percentages van toe te voegen gewassen variëren van 20% (voederbiet) tot 35% (voor mais). Inzet van hoeveelheden van meer dan 25 kg ds per m^3 mest is dan ook niet zo waarschijnlijk temeer daar toevoeging van melasse nodig blijft met uitzondering voederbieten (en omdat grote hoeveelheden mogelijk ook minder goed mengbaar zijn met mest in vergelijking tot voederbiet die hele fijn versnipperd kan worden). Aanzuring met alleen voederbieten is mogelijk ondanks een volumevergroting met 25%, temeer daar de substraatprijs per kg CH_4 bijna tweederde is van de inzet van melasse.

Tabel 6-3 Scenario's van gewas + melasse waarbij pH 5 wordt gerealiseerd en de substraatkosten en de extra *verwachte* groengas (gg) *opbrengst* per ton drijfmest en de substraatkosten oer extra m^3 groengas.

Gewas + melasse	Gewas (kg ds/ton)	Melasse (kg/ton)	Gewaskosten (€/ton)	Melassekosten (€/ton)	Totale kosten (€/ton)	gg gewas (m^3/ron)	gg melasse (m^3/ton)	gg totaal (m^3/ton)	substraat € per m^3 gg
Voederbiet	10	60	1,1	9	10,1	2,8	15	17,8	0,57
	16,7	50	1,837	7,5	9,337	4,7	12,5	17,2	0,54
	25	40	2,75	6	8,75	7	10	17	0,51
	50	**0**	**5,5**	**0**	**5,5**	**14**	**0**	**14**	**0,39**
Mais	10	65	1,2	9,75	10,95	3	16,25	19,25	0,57
	16,7	**55**	**2**	**8,25**	**10,25**	**5**	13,75	18,75	0,55
	25	**45**	**3**	**6,75**	**9,75**	**7,5**	11,25	18,75	0,52
	50	30	6	4,5	10,5	15	7,5	22,5	0,47
Alleen melasse	0	70	0	10,5	10,5	0	17,5	17,5	0,60

Opgemerkt moet worden dat kosten van het toevoegen van gewassen en of melasse aan mest niet zijn meegenomen.

6.3 Reststromen

Naast melasse zijn er allerlei reststromen uit de voedings- en veevoerindustrie die restsuiker bevatten al dan niet met wat organische zuren. Een aantal zijn getest: maisweekwater (resterende ingedampte dunne fractie na zetmeelwinning uit mais), glucose, wei, OPL, DPL, en SWML (reststromen uit de zuivelindustrie en wel vloeibare gedelactoliseerde producten afkomstig uit diverse wei-stromen), waarvan de laatste drie uitgebreider. Maisweekwater en DPL hebben een vrij lage pH (rond de pH 4,

Tabel 3.5) door de aanwezigheid van organische zuren. Uit de proeven met reststromen blijkt dat vooral de hoeveelheid suiker bepalend is hoeveel van een product nodig is.

Van wei zijn grote hoeveelheden nodig omdat het maar weinig suiker bevat (rond de 25 g per liter en een pH rond de 4,6). Afhankelijk van de precieze samenstelling van wei en de mest kan wel 50 volumeprocent toevoeging nodig zijn zo blijkt uit een eerste test (Bijlage 1, Tabel M2). Gioelli et al. (2022) stelde eveneens vast dat grote hoeveelheden nodig zijn. Voor een pH verlaging tot 5,5 was in zijn proeven 40% toevoeging nodig.

Maisweekwater bevat ook relatief weinig suiker (<10%). Wel bevat het bijna 10% melkzuur en heeft maisweekwater een pH van 4,5. Desondanks zijn hoeveelheden van meer dan 12% nodig. De weipermeaten OPL, DPL en SWML bevatten respectievelijk ongeveer 260, 130 en 270 gram suiker in de vorm van lactose. OPL en SWML gaven vergelijkbare resultaten en afhankelijk van de mestsamenstelling is daar rond 15% van nodig. Van DPL is ongeveer 20% nodig (mede door de aanwezigheid van zuur).

Door de lactose te hydrolyseren met behulp van geimmobiliseerde beta-galactosidase (Fransen et al., 2013) kunnen de wei en de weipermeaten verder geconcentreerd worden zonder last van kristallisatie te krijgen waardoor meet veel kleinere volumes gewerkt kan worden.

De toevoegingen met reststromen leiden tot een groter mestvolume, waardoor extra opslagcapaciteit nodig kan zijn. Tegelijk wordt met deze producten extra N, P en K aangevoerd. Het N-overschot zal toenemen. Als de mest vergist wordt in combinatie met strippen is het mogelijk om het N-overschot deels om te zetten in Renure N-producten.

Reststromen verschillen sterk in prijs. Zo kost melasse rond de 150 euro per ton terwijl OPL, DPL en SWML vrijwel niets kosten. Inzet van melasse zal daarom vooral plaatsvinden in combinatie met vergisten om de totale kosten beperkt te houden of om bij grotere schaalgrootte er zelfs aan te kunnen verdienen (zie hfst hiervoor). Goedkope reststromen kunnen vooral ingezet worden in de combinatie van aanzuren en uitrijden van mest om de veldemissies te reduceren (zie hoofdstuk hiervoor en Bussink et al., 2025). Vergisten is overigens ook met deze reststromen een optie. Hoewel het een groter volume betreft is de verblijftijd in de vergister veel lager dan bij gangbare mest waardoor er per m^3 vergisterinhoud potentieel toch een hoge gasproductie is. Wel kunnen er tijdens de vergisting problemen optreden door het vrijkomen van veel H_2S wat de vergisting remt en extra maatregelen vergt om de H_2S af te vangen.

Naast de genoemde stromen zijn andere stromen denkbaar. In Tabel 6-4 is een voorzet gegeven van mogelijke producten die nu vaak ook in de veevoeding worden gebruikt. Een nadere analyse zal moeten uitwijzen welke producten op termijn inzetbaar zullen zijn. Dit vergt een nadere analyse. Bekend is dat het CDM vanuit LVVN een aanvullende opdracht krijgt om te onderzoeken welke producten mogelijk zouden moeten zijn om mest te vergisten.

Tabel 6-4 Kosten diverse reststromen (bron: Forfarmers) en omrekening naar een kostprijs met m³ biogas.

Bron	Prijs/ton suiker of zetmeel	Grondstof kosten /m³ biogas
Glucose coferment	105	0,22
Rietmelasse	48	0,09
CCM	150	0,33
Tarwezetmeel vloeibaar	117	0,37
Tarwezetmeel	200	0,29
Maisweekwater	510	0,3
Bietmelasse	233	0,41
Moederloog citroenzuur	??	
Biogaspellets	??	
Rijstsediment	70	
Aardappelzetmeel slib	35-165	

6.4 Ontsluiting biomassa tot suikers

Suikers uit lignocellulose bronnen

Voor biologisch aanzuren zijn suikers nodig die door melkzuurbacteriën worden omgezet naar overwegend melkzuur. Dit kan via melasse, maar melasse is relatief duur (referentieprijs ca. €300/ton vrije suikers). Afhankelijk van de mesteigenschappen is zo'n 25-35 kg suiker per m3 mest nodig, wat ruwweg € 10 per m^3 mest betekent. Naast melasse zijn er diverse andere reststromen uit de voedingsindustrie die nu deels worden ingezet als veevoer of producten waar minder goed een bestemming voor is zoals weipermeaten (onder andere OPL, DPL en SWML). Naast deze stromen zijn er veel producten/gewassen die (ligno)cellulose (In feite koolhydraatpolymeren van glucose en xylose) bevatten in combinatie met lignine waardoor deze reststromen in de natuur moeilijk afbreekbaar zijn. Om deze "suikers" vrij te maken en te kunnen inzetten als grondstof bij het aanzuren van mest is een vorm van ontsluiting nodig. Mogelijke grondstoffen die veel koolhydraatpolymeren bevatten zijn bijvoorbeeld bietenpulp, energiemais, (berm)gras slootmaaisel, kippenmest, stro, dikke fractie mest, riet, natuurgras en zaagsel en relatieve nieuwe gewassen als miscanthus, silphie en sorghum.

Ontsluiting van bietenpulp: zuur- en enzymbehandeling

Experimenten tonen aan dat een zuurbehandeling van droog bietenpulp bij pH 1,3 gedurende 24 uur bij 90°C gevolgd door enzymatische hydrolyse effectief vrije suikers vrijmaakt (Kühnel, S., Schols, H.A. and Gruppen, H., 2011). Zure omstandigheden werkt hier omdat bietenpulp voor een groot deel uit pectines en relatief makkelijk afbreekbare koolhydraatketens bestaat. Na pH-correctie naar ~5 werden zes enzymmixen getest (Ultraflow XL, Viscamyl Flow, Celluclast + Viscozym) in verschillende doseringen. De beste resultaten kwamen van Viscamyl Flow en de combinatie Celluclast + Viscozym, met vrije suikeropbrengsten overeenkomend met 39–43% van de drogestof. De kosten voor het grootschalig ontsluiten van bietenpulp om 625 ton vrije suiker te verkrijgen waarmee 25.000 m^3 mest aan te zuren (afkomstig van ongeveer 900 melkkoeien) wordt geraamd op 265 tot 295 € per ton. Dat is nauwelijks goedkoper dan melasse. Wel wordt minder zwavel en stikstof toegevoegd aan de mest in vergelijking tot melasse. Daarnaast levert de vergisting van de overgebleven componenten uit de pulp drogestof ca. 1.500 m³ biogas per ton suiker op hetgeen een waarde van € 750 representeert, waardoor deze route de combinatie van aanzuren en vergisten erg aantrekkelijk maakt. In geval zelfstandig groengas wordt

geproduceerd levert dit per ton suiker € 1.300 op. Bij inzet van 30 kg suiker per m^3 mest is dit een extra € 42 per m^3 mest.

Chemische en alkalische ontsluiting van lignocellulose

Voor lignocellulosehoudende reststromen (zoals tarwestro, bermgras, silphie, sorghum, mais) zijn zwaardere condities nodig om de suikers te ontsluiten, zoals hoge temperaturen (100°C of meer) of (sterke) zuren als zwavelzuur of het organische zuur maleinezuur (Kootstra et al., 2009) of alkalische incubatie (Maas et al., 2008). De ontsluiting verloopt dan in uren of dagen. Alkalische ontsluiting met calciumhydroxide lost gedeeltelijk lignine op, waardoor de (hemi)cellulose beter toegankelijk wordt voor cellulolytische enzymen. Figuur 6-1 toont visueel stapsgewijs de resultaten van een calciumhydroxide incubatie van tarwestro zoals door Maas et al. (2008) werd uitgevoerd uitgaande van 25% tarwestro. Alkalische ontsluiting verhoogt de suikeropbrengst maar vereist neutralisatie van het alkali met de gewonnen suikers/melkzuur.

Figuur 6-1 Calciumhydroxide ontsluiting van stro bij 95 °C gevolgd door enzymatische hydrolyse. In het middelste paneel de brij die ontstaat na ontsluiting en het rechter paneel toont chocolademelk achtig resultaat na een Cellulase GC 220 incubatie van het voorbehandelde stro na bijstellen van de pH.

Vanuit (investerings)kostenoogpunt, de benodigde speciale omgevingscondities en veiligheidsvoorzieningen, zijn hoge temperaturen en sterke zuren/ logen niet gewenst. [Grote industriële initiatieven (DSM, DuPont, Abengoa, Shell) voor bio-ethanol uit lignocellulose zijn gestrand door hoge kapitaals- en onderhoudskosten bij hoge temperaturen en corrosieve zuren. Lagere temperaturen (met gebruik van de Severity-index als gids) bieden een economisch aantrekkelijker alternatief.]

De Severity-index (R'o = t × (10–pH) × (T–100)/14,75) zoals beschreven en toegepast in Kühnel et al. (2011) geeft aan dat het mogelijk is hogere temperaturen en lage pH uit te ruilen tegen langere incubatietijden voor eenzelfde ontsluitingseffect. Dat betekent dat:

- bij 90°C en lage pH is 1 dag incubatie vergelijkbaar is met 30 minuten bij 140°C.
- Bij 60°C of omgevingstemperatuur respectievelijk een week of meerdere maanden nodig zijn.

Via een eenvoudige proef (bijlage 2) is verkend wat de ontsluiting van mais kan opleveren. Daartoe heeft een incubatieproef plaatsgevonden bij 95 °C gedurende 1 of 2 dagen met zure ontsluiting bij pH 1 en pH 2. De oriënterende proef laat zien dat bij 2 dagen ontsluiting veel extra suikers (en zuren) beschikbaar komen, waarbij ontsluiting bij pH 1 effectiever is dan ontsluiten bij pH 2. De verkregen hoeveelheden zijn

bij benadering voldoende om respectievelijk 8,5-7,5 m^3 mest aan te zuren met 1 ton mais met 33% drogestof gehalte. De investeringen die daarvoor gedaan moeten worden lijken op te wegen tegen de opbrengsten. Aanvullend onderzoek is nodig ter verdere onderbouwing en verkenning van mogelijkheden tot implementatie.

Beschikbare hoeveelheid stro en natuur- en bermgras

Natuur- en bermgras is in Nederland volop aanwezig. Deels wordt dat nu gecomposteerd wat gepaard met een poorttarief bij aanlevering bij de composteerder. Een alternatieve afzetroute zou welkom zijn. Stro is er ook volop. Volgens CE Delft (2008) is er jaarlijks 24 PJ energie aan natuur en bermgras beschikbaar. Dit komt overeen met 1,6 miljoen ton droge stof. Als van deze stroom de helft beschikbaar zou komen voor het aanzuren van mest en het mogelijk is een derde van de droge stof te ontsluiten tot suikers dan kan er potentieel 10 miljoen m^3 mest worden aangezuurd. Afhankelijk van moment van oogsten heeft bermgras aanzienlijk hogere lignine gehaltes dan mais. Daardoor zullen zwaardere procescondities nodig zijn. Uit vervolgonderzoek moet blijken hoeveel en in welke mate dit leidt tot een goed verdienmodel.

CE Delft geeft verder aan dat er 17 PJ aan energie beschikbaar is in Nederland uit stro. Stro kent al vele toepassingen dus het zal moeilijker zijn deze als grondstof voor biologisch aanzuren tegen redelijke prijzen te verkrijgen. Als van deze stroom een kwart beschikbaar zou komen voor het aanzuren van mest en het mogelijk is een derde van de droge stof te ontsluiten tot suikers dan kan er potentieel 3,7 miljoen m^3 mest mee worden aangezuurd. Eerste ruwe berekeningen geven aan dat de grondstofkosten voor natuur- en bermgras, inclusief ontsluiting om suikers vrij te maken, ongeveer de helft bedragen per m^3 biogas dan van melasse.

Conclusies en aanbevelingen

De combinatie van zuurbehandeling (pH 1,3, 90°C, 24 uur) met enzymatische hydrolyse zou een haalbare route kunnen opleveren voor suikerwinning uit bietenpulp met een kostprijs die competitief is met melasse. De aanvullende biogasopbrengst uit de vergisting van de resterende biomassa zou de businesscase economisch aantrekkelijk maken. Geadviseerd wordt om deze route nader te testen. Daarnaast is het gewenst om zure of alkalische ontsluitingsroutes in combinatie met een lange tijdsperiode van inwerking voor lignocellulosehoudende stromen als berm- en natuurgras, stro, mais, silphie of sorghum nader te verkennen. Dit kan in principe kleinschalig met behulp van ensilering in minisilo's of weckflessen met toevoeging van loog of zuur om zo meer vrij suiker te krijgen waardoor het product geschikt wordt voor BA.

6.5 Betonaantasting door aanzuren

Historie

Mest werkt in op de betonkwaliteit en geeft na verloop van tijd betonerosie. De mate waarin hangt sterk af van de betonkwaliteit. Biologisch aanzuren - waarbij melkzuur en azijnzuur ontstaat - kan het risico op betonerosie versterken, maar veel minder dan via aanzuren met salpeterzuur (in Nederland toegepast 35 jaar geleden) of zwavelzuur (zoals toegepast in Denemarken op zeker 150 bedrijven, 10 jaar of langer) of azijnzuur.

Ervaringen met salpeterzuur

Op het toenmalige ROC Bosma Zathe is tussen feb 1990 en mei 1994 onderzoek uitgevoerd naar kelderaanzuring van mest met salpeterzuur waarbij een pH tussen 4,0 en 4,5 werd gerealiseerd (van Lent et al., 1995). De corrosie van de mestopslag door aangezuurde mest is slechts in beperkte mate onderzocht. Door een betontechnologisch adviesbureau is tijdens twee inspecties vastgesteld dat er

een lichte aantasting was van de keldervloer bij het zuurdoseerpunt. De aantasting van beton, kalkzandsteen en metselmortel leek verder gelijk aan die bij onbehandelde mest. Verder leek in een 14 maanden durende proef de aantasting van proefstukken beton, kalkzandsteen en metselmortel gelijk aan die bij onbehandelde mest. De mest werd aangezuurd tot een pH van 5,5 wat ongeveer overeenkomt met de pH van (zure) 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).

Ervaringen met zwavelzuur

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).

Beton en biologisch aanzuren

Effect zuur

Beton bevat het alkalische calciumhydroxide dat reageert met zuur (melkzuur/azijnzuur/ zwavelzuur). Daardoor gaat calcium in oplossing en kan beton poreus worden. Hoe lager de pH en hoe meer blootstelling aan lucht des te sneller dit proces verloopt. Een betonnen kuilplaat (blootgesteld aan lucht) is duidelijk gevoeliger dan een betonwand in een mestkelder die biologisch is aangezuurd. In de kelder komt de mestwand niet in contact met zuurstof en is de pH (zuurgraad) bij de wand ongeveer 0,5 pH eenheid hoger dan verder van de wand af door o.a. buffering. Op basis van een korte literatuurverkenning (Glasser et al., 2008 en Zivica et al., 2001) en een AI-analyse met copilot geeft de volgende resultaten tav de blootstellingsklassen op beton dat in contact is met lucht (zoals een kuilplaat):

1. pH 5.5 is nog relatief mild — behalve voor zwavelzuur
    - Melkzuur en vetzuren veroorzaken weinig schade.
    - Salpeterzuur begint al te werken.
    - Zwavelzuur is zelfs bij pH 5.5 gevaarlijk door gipsvorming.
2. pH 5.0 is de omslagzone
    - Melkzuur wordt merkbaar agressief.
    - Salpeterzuur veroorzaakt diepe ontkalking.
    - Zwavelzuur veroorzaakt expansie en scheuren.
3. pH 4.5 is voor alle zuren problematisch
    - Melkzuur: sterke decalcificatie.
    - Salpeterzuur: structurele verzwakking.
    - Zwavelzuur: grote schade (ettringiet → afspatten).

De betonkwaliteit zou per zone moeten worden afgestemd want de betonwand onder de mest is minder gevoelig dan rond het mestniveau of nabij condenszones. Deze wordt beoordeeld als XA2[1] (CEM II betonkwaliteit is voldoende). Rond het mestniveau is beton gevoeliger voor aantasting (beoordeling XA3). (CEMIII/A en B betonkwaliteit is voldoende) en bij condenszones: extra bescherming (HDPE-liner of polyurea).

Figuur 6-2 Risico inschatting op beton aantasting gegeneerd met Co-pilot. Vergelijking blootstellingswaarde voor melkzuur, azijnzuur en zwavelzuur

In Denemarken en het Baltische gebied komt men tot een mildere beoordeling met betrekking tot de aantasting door zwavelzuur dan hierboven is weergeven, waarschijnlijk omdat de mestwand niet in contact is met lucht (zoals bij een kuilplaat). Er wordt geen melding gemaakt dat er serieuze beton corrosie optreedt terwijl aanzuren soms al 15 jaar of langer wordt toegepast in Denemarken.

Betonkwaliteit

De betonkwaliteit zelf is ook van invloed. Bij lage w/c (water vs cement verhouding) < dan 0,45 is beton beter bestand tegen pH 5,0- 5,5 van aangezuurde mest. Bij pH < 5 is er risico op oppervlakkige aantasting. Deze betonkwaliteit wordt ook CEM III/B genoemd. Deze betonkwaliteit wordt vaak gebruikt voor matig chemisch agressieve omgevingen waarin dit beton moet functioneren zoals: mest, silagesap, organische zuren, pH ~4,0–6,0. Hoe beter de betonkwaliteit des te minder risico

Stallen gebouwd na 2010 hebben doorgaans betonkwaliteit CEM III A of B; Stallen gebouwd voor 2010 hebben meestal een lagere betonkwaliteit en zijn dus kwetsbaarder voor lage pH condities.

Toelichting op cementklassen

- *CEM I = 100% Portlandcement*
- *CEM III/A = 36-65% Portlandcement en 35-64% hoogovenslak/ vliegas/kalksteenmeel*
- *CEM III/B / Geopolymeer = 0-19% Portlandcement en 81-100% hoogovenslak + alkalische activatie*

6.6 Overige

Methaanemissie

Het is al heel lang bekend dat aanzuren de methaanemissie verminderd. Onderzoek van Oenema et al. (1993) toonde aan dat toevoegen van salpeterzuur de vorming van CH_4 vrijwel geheel stil legde. Tijdens de bewaarperiode van 160 dagen was de CH_4-emissie uit aangezuurde mest minder dan 0,1% van die van onbehandelde mest. In de metingen die in deze proef zijn uitgevoerd kwam dat niet naar voren in tegenstelling tot een eerder uitgevoerde grotere proef met drijfmest van het bedrijf in Groningen waar de pilot biologisch aanzuren met melasse is uitgevoerd (Bussink et al., 2025). Een recente notitie (van Dam & Bussink, 2026) naar het effect van aanzuren met zwavelzuur, andere minerale zuren, organische zuren of organische substraten zoals melasse laat zien dat de methaanemissie met ongeveer 85% daalt bij een pH beneden de 6 (gebaseerd op 50 data) ongeacht het substraat waarmee deze pH daling is bewerkstelligd. De notitie is gebaseerd op studies vanaf 2006.

Geuremissie

Bekend is al 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 in pilotproef te Groningen (Bussink et al., 2025). Uit hun onderzoek van Van Lent et al. (1995) bleek dat het gehalte VVZ tussen oude aangezuurde mest en onbehandelde mest nauwelijks verschillend. 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 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 van Bussink et al. (2014) met biologisch aangezuurde mest is de geur kwalitatief onderzocht. Dat leverde geen eenduidig beeld op. 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.

Borging

Biologisch aanzuren van de mestopslag werkt en leidt tot een emissiereductie van ammoniak en methaan. In de Denemarken wordt al veel jaren mest aangezuurd met zwavelzuur in zowel rundvee- als melkveestallen. Mestaanzuring is daar een erkende techniek, maar niet in Nederland. Van belang voor de Nederlandse situatie is om aanzuring van de mestopslag onder de roosters van een ligboxenstal te borgen. De vraag daarbij is wat de feitelijk NH_3-reductie is voor ligboxenstallen met roostervloer en opslag onder de roosters (ruwweg 80% van de stallen). Voor de onderbouwing van de emissiefactor kan ook gebruik gemaakt worden van de resultaten van eerder uitgevoerd onderzoek in Nederland en Denemarken wat gerapporteerd is door Bussink (2025), zodat metingen mogelijk niet nodig zijn Er zijn resultaten van drie Nederlandse proeven met aanzuring van de mestopslag onder de roosters. Voor de aanzuring is gebruik gemaakt van salpeterzuur en aangezuurd tot een pH tussen 4 en 5. De 3 proeven gaven gemiddeld een emissiereductie van 38%. Alle drie de proeven zijn uitgevoerd in een mechanisch geventileerde stal. In Denemarken zijn drie jaarrond proeven uitgevoerd in melkveeligboxenstallen met roostervloer met een volstalse methode (de CO_2-tracer methode). De pH varieerde veelal tussen 5,4 en 6. Dit leidde tot een emissiereductie van 34% voor biologisch aanzuren (gemeten in één stal in 2017/2018) en tot 33% voor aanzuren met zwavelzuur op basis van metingen in twee stallen in 2018/2019. In Denemarken is een waarde van 33% opgenomen als emissiereductiefactor in de “Lijst van milieutechnologieën met bewezen effect binnen veehouderijsystemen voor de landbouw” van Deens Landbouwagentschap (Anonymus, 2025). Bussink concludeert dat een ondergrens voor de te behalen emissiereductie van 35% reëel is bij een pH van de mest tussen 5 en 5,5 op basis van Nederlandse en Deense metingen. De resultaten van de studie zijn tezamen met aanvullende gegevens (hoe vaak pH meten, melasse toevoegen, mixen, etc.) in een memo van H. Radstaak namens een werkgroep van Triple P+ (2026) voorgelegd aan de TAP (Technische adviespool). De vraag aan de TAP was om tot een OW-erkenning te komen met als reductiefactor 35%. De TAP gaf in haar beantwoording aan dat aanvullende metingen nodig zijn maar acht de controle en borging van dit systeem goed mogelijk. De uitgebreide reactie is weergeven in Triple P+ (2026: Bijlage 11 pag. 62-69).

Op dit moment wordt - met als initiatiefnemers Forfarmers, FrieslandCampina en NMI - gewerkt aan een nadere uitwerking van een protocol voor borging met als doel om mestopslag aanzuring op te kunnen opnemen in de Kringloopwijzer, mede gebaseerd op de uitgangspunten zoals beschreven in Triple P+ (pag 53). Stalmetingen zijn voorzien bij de verdere opschaling van biologisch aanzuren binnen Triple P+ en bij op te zetten pilots door Forfarmers.

Bodemkwaliteit

Er zijn geen studies bekend over het toedienen van biologisch aangezuurde mest en bodemkwaliteit. Wel zijn er enkele studies over het toedienen van melkzuur (en melkzuurbacteriën) aan grond of van aanzuren met minerale zuren.

Rodrigues Morgado et al. (2017) geven dat toegediend melkzuur snel werd afgebroken door de micro-organismen in de bodem wat leidde tot een verhoogde biologische activiteit en een hogere enzymactiviteit. Daardoor werd fosfaat beter beschikbaar. Zij concluderen dat melkzuur toediening de bodemvruchtbaarheid bevordert. Dat stellen Murindangabo et al. (2023) ook, naast nog diverse andere positieve eigenschappen, op basis van hun meta-analyse. Biologisch aangezuurde mest toedienen zou dus mogelijk positief kunnen werken op de bodemkwaliteit. Tegelijk kan door het biologisch aanzuren afhankelijk van het toegevoegde substraat het kaligehalte sterk stijgen (zoals bij toediening van OPL of melasse). Indien de aangezuurde mest of na vergisting als digestaat wordt toegediend dienen dan kleinere hoeveelheden mest te worden toegediend (~15 m^3) om het risico op zoutschade maar ook overbemesting met kali te vermijden.

Zo'n 35 jaar geleden is in Nederland veel onderzoek uitgevoerd naar het aanzuren van mest met salpeterzuur. Er werd toen vooral gekeken naar de ontwikkeling van de bodem pH en N- en P-werking van aangezuurde mest. Van Lent et al. (1995) concludeerden dat in de uitgevoerde meerjarige bemestingsproeven aangaven dat aangezuurde mest geen extra verzurende werking had ten opzichte van bemesting met kalkammonsalpeter of onbehandelde mest aangevuld met kalkammonsalpeter. Verder werd geconcludeerd dat aangezuurde mest geen significant additioneel effect had op de mobilisatie van fosfor, aluminium en zware metalen in de bodem gebaseerd op onderzoek van Oenema. Aanzuren met salpeterzuur leidt tot een sterke verhoging van het minerale N-gehalte van mest. In de graslandproeven die destijds zijn uitgevoerd was de stikstofwerking, op basis van de minerale N, 100% (Van Lent et al. 1995). Andere eigenschappen van de bodem zijn niet bestudeerd. Aanzuren met zwavelzuur gebeurt in Denemarken en is/wordt getest in diverse landen. Met betrekking tot de bodem wordt vooral gekeken naar pH, en N en P-beschikbaarheid. Zireeni (2025) constateerde dat er geen langetermijneffecten zijn van aangezuurde mest op zowel de bodem pH als oogsthoeveelheid over een periode van 2 jaar. Daarentegen nam de - beschikbaarheid wel iets af. Ook is er een groot risico op overbemesting met zwavel wat kan leiden tot sulfaatuitspoeling. Dit is één van de redenen dat aanzuren met zwavelzuur niet wordt toegepast in Nederland. Langley (2022) heeft een tweejarige veldproef uitgevoerd met aangezuurde op grasland bij verschillende N-niveaus. Diverse bodemanalyses zijn uitgevoerd zoals bodem-pH, elektrische geleidbaarheid, de hoeveelheid anorganische N en P. Ook bodembiologische parameters - inclusief micro-, meso- en macrofauna, bodemrespiratie en broeikasgasemissies zijn geanalyseerd. De conclusie was dat er geen langetermijneffecten zijn van het toepassen van aangezuurde mest op de bodemkwaliteit.

Daar het aantal proeven met betrekking tot bodemkwaliteit beperkt is zal op termijn aanvullend onderzoek nodig zijn om de positieve en negatieve effecten op bodemkwaliteit beter in beeld te krijgen.

Maatschappij

Biologisch aanzuren is voor Nederland een nieuwe techniek. De afgelopen twee jaar is daarom veel aandacht besteed aan communicatie rondom biologisch aanzuren (lezingen en demo's (RTV noord, 2025) en gesprekken met stakeholders. In bijlage 4 is een overzicht gegeven van gehouden lezingen en gesprekken door NMI en Sanovations. Binnen Triple+ is en wordt gecommuniceerd met omwonenden, maatschappelijke organisaties en lokale overheden en is aangegeven hoe dit gebeurt (bijlage 10, TripleP+ 2025). De verbinding en discussie met de praktijk zal plaatsvinden tijdens demo's en bijeenkomsten die worden georganiseerd bij NMI waar de proeven plaatsvinden en bij een bedrijf in Groningen waar in de put de mest wordt verzuurd met melasse en andere bedrijven waar aanzuren opgestart gaat worden

7 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

- Biologisch aanzuren (BA) is kansrijk voor het verminderen van ammoniak- en methaanemissies uit de stal en in combinatie met vergisting ook voor het verhogen van de groengasproductie.
- Melasse is het meest effectieve substraat voor BA. Melasse kan ook (deels) worden vervangen door de gewassen voederbieten en mais. Voederbiet is het enige geteste gewas dat melasse volledig kan vervangen. Mais vraagt een beperkte bijmenging met melasse. Qua kostprijs zijn deze substraten goedkoper dan melasse per extra te produceren kg biogas bij de vergisting.
- Silphie en sorghum in ingekuilde vorm bleken niet tot weinig geschikt voor biologisch aanzuren.
- De weipermeaten (OPL, SWML) zijn goedkope reststromen met een hoog verzurend potentieel. Deze producten verbreden de keuzemogelijkheden voor BA; niet alleen voor de route van BA in de stal gevolgd door vergisting, maar ook voor de route waarbij deze worden bijgemengd aan mest voor toedienen aan het grasland ter verlaging van veldemissies.
- Andere mogelijkheden zijn om het verzurend potentieel van substraten met een beperkt verzurend potentieel (bijvoorbeeld bieten(pulp) en gras-/strostromen of mais) te verhogen door (zure) ontsluiting om zo extra suikers vrij te maken. Dit vergt nog wel aanvullend onderzoek
- Biologisch aanzuren is als systeem rendabel vanaf ongeveer 600 koeien. Schaalgrootte bepaalt de rentabiliteit. De meest kosteneffectieve maatregel om schaalgrootte te realiseren is het bijmengen van BA-mest van een buur-/regiobedrijf in een bestaande vergister in combinatie met N-strippen voor de productie van Renure-meststof en het (deels) opheffen van het N-overschot.

Aanbevelingen

- Het verkennen van andere reststromen uit de food en feed industrie voor geschiktheid als substraat voor biologisch aanzuren.
- Het verkennen van de mogelijkheden van zure ontsluiting van gewassen (mais, grassen, stro) of reststromen (berm/natuurmaaisel) voor het vrijmaken van suikers waardoor deze beter geschikt worden als substraat voor biologisch aanzuren in combinatie met toetsen in een praktijkomgeving.
- Kennisverdieping over de specifieke fermentatieprocessen die optreden in mest om te kunnen sturen op homofermentatie in combinatie met het optimale pH traject van biologisch aanzuren met gewassen/reststromen.

8 Literatuur

Andersen M (2019). JH BioAcidificatie NH4+. Samenvatting Deens Technologisch Instituut, AgroTech, Aarhus 8 pp.

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.

Bufe C & Korevaar H (2018). Evaluation of additional crops for Dutch list of ecological focus area: Evaluation of Miscanthus, Silphium perfoliatum, fallow sown in with melliferous plants and sunflowers in seed mixtures for catch crops. Wageningen Plant Research. https://doi.org/10.18174/444086

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 (1989). Ammoniakemissie van dunne rundermest met en zonder additief, NMI, rapport A 89.093-II, Den Haag.

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 AMD & Wenzl W (2012). Potential of biological acidification of cattle slurry to reduce NH3 emissions: NMI-rapport 1422.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 NH_3 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.

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 NMI report 1422.N.12, 54 pp.

Bussink DW, Sanders, JPM & Boode, J (2025). Praktijkproef biologisch aanzuren in een rundveestal NMI rapport 2035a.N.24, 65 pp.

Bussink DW (2025). Overzicht van de NH_3-emissiereductie door aanzuren van de mestopslag onder de roostervloer in ligboxenstallen. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2035a.N.25, pp. 23.

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.

Deru J, van Rotterdam D, el Mahdi J, de Stigter J & Beek J (2024). Ammoniak- en broeikasgasemissies van gescheiden mestfracties in een incubatie-experiment, LBI. Publicatienr. 2023-01 LbD, 50 pp.

Franssen MC, Steunenberg P, Scott EL, Zuilhof H, & Sanders JPM (2013). Immobilised enzymes in biorenewables production. Chemical Society Reviews, 42(15), 6491-6533.)

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. JournalofEnvironmentalChemicalEngineering13. 115825

Glasser FP, Marchand J & Samson E (2008). Durability of concrete—Degradation phenomena involving detrimental chemical reactions. Cement and concrete research, 38(2), pp.226-246.

Kootstra AMJ, Beeftink HH, Scott EL & Sanders JP (2009). Optimization of the dilute maleic acid pretreatment of wheat straw. Biotechnology for Biofuels, 2(1), p.31.

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 (1996a). Aanzuren van vleesvarkensmest met organische zuren. Praktijkonderzoek Varkenshouderij. Proefverslag nummer P 1.150, Raalte, pp 20. https://edepot.wur.nl/29988

Hendriks JGL & Vrielink MGM (1996b). Microbieel aanzuren van vleesvarkensmest. Praktijkonderzoek Varkenshouderij. Proefverslag nummer P 1.148, Raalte, pp 24. https://edepot.wur.nl/44683

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.

Kühnel S, Schols HA & Gruppen H (2011). Aiming for the complete utilization of sugar-beet pulp: Examination of the effects of mild acid and hydrothermal pretreatment followed by enzymatic digestion. *Biotechnology for biofuels*, *4*(1), p.14.

Kowalska G, Pankiewicz U & Kowalski R (2020). Evaluation of Chemical Composition of Some Silphium L. Species as Alternative Raw Materials. Agriculture 10(4), 132; https://doi.org/10.3390/agriculture10040132

Lameijer E, & Vervoort K (1995). Eu patent 0 612 704 B1.

Langley J(2022). The impact of slurry acidification on soil and crop quality: a UK case study. PhD thesis, Bangor University UK, 194 pp.

Maas RH, Bakker RR, Jansen ML, Visser D, De Jong E, Eggink G & Weusthuis RA (2008). Lactic acid production from lime-treated wheat straw by Bacillus coagulans: neutralization of acid by fed-batch addition of alkaline substrate. Applied microbiology and biotechnology, 78(5), pp.751-758.

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.

Murindangabo YT, Kopecký M, Perná K, Nguyen TG, Konvalina P, M Kavková (2023). Prominent use of lactic acid bacteria in soil-plant systems. Applied Soil Ecology.

Oenema O & Velthof GL (1993). Denitrification in nitric-acid-treated cattle slurry during storage. Netherlands Journal of Agricultural Science 41: 63 – 80.

Oenema O & Velthof GL & Bussink (1993) Ernissions of ammonia, nitrous oxide and methane from cattle slurry, In: Oremland RS (ed.) The biogeochemistry of Global Change: Radiative Trace Gases, p. 419-433, Chapman & Hall, New Vork.

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.

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, Kieronczyk M, Mazur K, Neumann S & Sekowski M (2018) Titration, Buffer Capacity and Acid Consumption of Animal Slurries in Baltic Sea Region Countries: Research Results; 2018.

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 & Fangueiro 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.

Regueiro I, Gómez-Muñoz B, Lübeck M, Hjorth M & Stoumann Jensen l (2022). Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. Bioresource Technology Reports, 19, 101135.

RTV Noord (2025). *Provincie omarmt 'kansrijke proef': biologisch aanmengen van mest kan stikstofuitstoot terugdringen - RTV Noord*

Sanders JPM & Bussink DW (2025). Snelle vergisting van biologisch aangezuurde rundveemest, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2035.N.24, pp 25

Regueiro I, Gómez-Muñoz B, Lübeck M, Hjorth M & Stoumann Jensen l (2022). Bio-acidification of animal slurry: Efficiency, stability and the mechanisms involved. Biores Techn Reports, 19, 101135.

Rodríguez-Morgado B, Jiménez PC, Moral MT& Rubio JP (2017). Effect of l-lactic acid from whey wastes on enzyme activities and bacterial diversity of soil Volume 53; 389–396

Triple P+ (2025). Het bruine goud. Deze blauwdruk is tot stand gekomen dankzij de expertise van: Dina Boer en Ruud Paap (New Energy Coalition), Johan Sanders (Sanovations), Wim Bussink (NMI), Hans Duym (Gasunie), Nico la Crois, Klaas de Jong en Sietse Draaijer (Ekwadraat), Henk Radstaak (ForFarmers), Gerrit Schilstra (GSC), Joris Craandijk (Ipion), Bart de Voogd (Imagro), Nicky Kamminga (NCM). https://www.provinciegroningen.nl/projecten/triple-p/

Van Dam N & Bussink DW (2026). Vermindering van CH4-emissie uit opslag drijfmest door aanzuring. NMI Wageningen. Notitie 9 pp.

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.

Van der Most M, van Bruggen C, Bannink A, Bleeker A, Bussink DW, van Dooren HJC, Huijsmans JFM, Kros J, Oltmer K, Ros MBH, Schulte-Uebbing L, Velthof GL & van der Zee TC (2025). Emissies naar lucht uit de landbouw berekend met NEMA voor 1990-2023. Wageningen, WOT Natuur & Milieu, WOT-technical report 283.

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

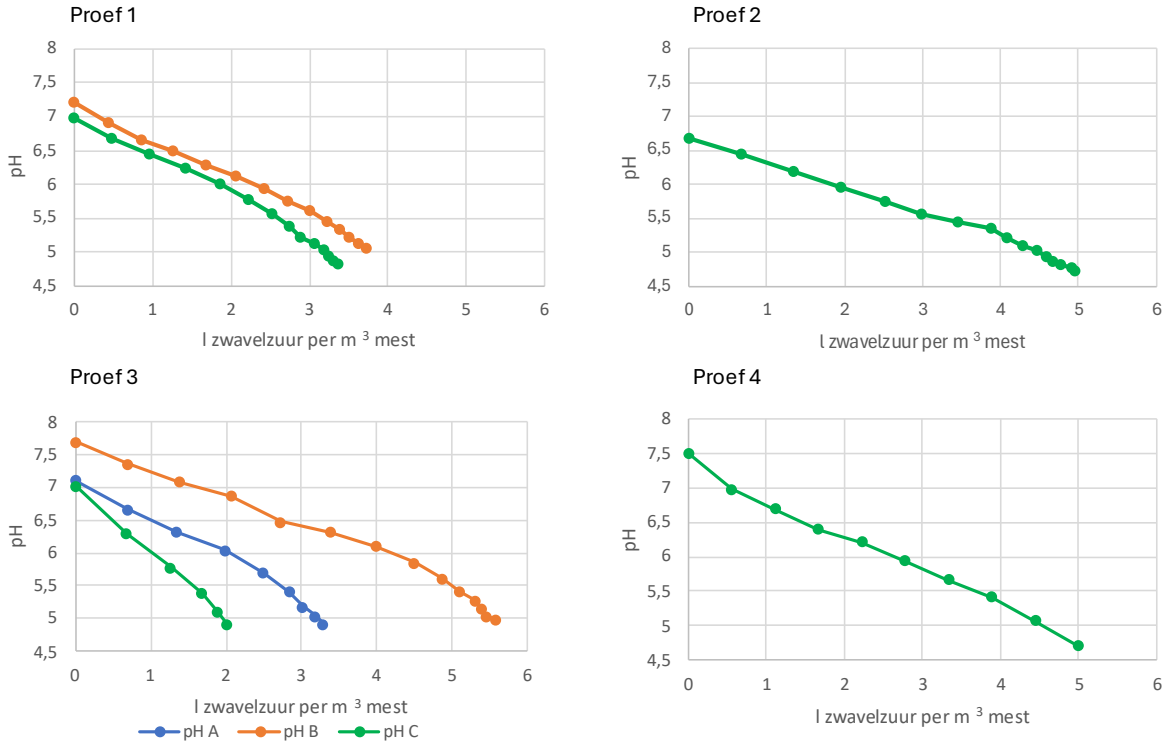
Yan Q, Liu X, Wang Y, Li H, Li Z, Zhou L, Qu Y, Li Z & Bao X (2018). Cow manure as a lignocellulosic substrate for fungal cellulase expression and bioethanol production. *Amb Express*, *8*, 1-12.

Yusra Z (2025) Effect of cattle slurry acidification on nutrient and carbon dynamics in the soil-plant system. PhD thesis, Bangor University UK, 238 pp.

Zivica V & Bajza A (2001). Acidic attack of cement-based materials—a review.: Part 1. Principle of acidic attack. *Construction and Building materials*, *15*(8), pp.331-340.

Bijlage 1. Achtergrondinformatie proeven

Titratiecurves



Figuur A. Titratiecurves bij de start van proeven 1 t/m 4. Bij proef 1 is de titratiecurve in duplo gemaakt. Titratiecurves zijn gemaakt met 200 gram verse drijfmest (2 delen feces en 1 deel urine).

Foto’s gewassen proef 1

Figuur B. Grof en fijngesneden gewassen bij proef 1.

pH proef 1

Tabel A. pH metingen bij proef 1.

Behandeling	start	dag 1	dag 2	dag 3	dag 6	dag 8	dag 10	dag 13	dag 16	dag 20	dag 23	dag 27	dag 34	dag 42
Ref gewone DM	6,83	6,83	6,78	6,82	6,91	6,97	6,98	7,02	7,11	7,21	7,23	7,26	7,31	7,44
Ref gemengde DM + zuur	6,20	6,51	6,44	6,47	6,59	6,65	6,74	6,82	6,83	6,88	6,87	7,02	7,09	7,30
Melasse 100	6,20	6,59	6,46	6,21	5,36	5,03	4,77	4,49	4,39	4,38	4,32	4,30	4,29	4,29
Mais-g-35	6,20	6,43	6,32	6,01	4,94	4,74	4,71	4,68	4,68	4,78	4,77	4,81	4,98	5,99
Mais-g-65	6,20	6,29	6,18	5,80	5,03	4,95	4,90	4,93	4,98	5,16	5,31	5,48	6,29	6,34
Mais-g-100	6,20	6,20	6,09	5,86	5,45	5,33	5,25	5,29	5,41	5,72	6,52	6,40	6,35	6,39
Mais-f-35	6,20	6,38	6,31	5,94	4,91	4,66	4,61	4,58	4,60	4,63	4,65	4,72	4,92	5,77
Mais-f-65	6,20	6,20	6,18	5,78	4,88	4,74	4,65	4,60	4,62	4,73	4,80	4,83	5,25	6,34
Mais-f-100	6,20	6,08	6,07	5,81	5,19	4,98	4,85	4,83	4,90	5,06	5,33	5,64	6,34	6,41
Voederbiet-g-35	6,20	6,45	6,39	6,13	5,26	4,90	4,66	4,61	4,64	4,63	4,69	4,79	5,30	6,25
Voederbiet-g-65	6,20	6,43	6,36	6,07	5,23	4,84	4,54	4,47	4,48	4,48	4,49	4,57	4,83	5,28
Voederbiet-g-100	6,20	6,42	6,37	6,30	6,14	5,91	5,57	5,52	5,71	5,78	5,91	5,99	6,16	6,34
Voederbiet-f-35	6,20	6,48	6,40	6,11	5,21	4,90	4,57	4,50	4,51	4,50	4,53	4,55	4,76	4,99
Voederbiet-f-65	6,20	6,43	6,34	6,05	5,11	4,79	4,49	4,46	4,47	4,46	4,49	4,48	4,51	4,59
Voederbiet-f-100	6,20	6,43	6,34	6,11	5,31	4,84	4,55	4,47	4,48	4,46	4,50	4,58	4,76	5,07
Sorghum-g-35	6,20	6,27	6,23	5,90	5,00	5,05	4,96	5,01	5,10	5,22	5,51	5,75	6,55	6,67
Sorghum-g-65	6,20	6,08	6,06	5,66	5,48	5,52	5,53	5,73	6,07	6,31	6,46	6,31	6,43	6,71
Sorghum-g-100	6,20	5,89	5,88	5,83	5,82	6,00	6,11	6,41	6,44	6,33	6,36	6,48	6,60	6,64
Sorghum-f-35	6,20	6,25	6,26	5,91	4,93	4,82	4,77	4,78	4,82	4,86	5,01	5,20	5,79	6,51
Sorghum-f-65	6,20	5,99	6,09	5,70	5,08	5,07	5,06	5,16	5,39	5,59	6,13	6,38	6,40	6,66
Sorghum-f-100	6,20	5,92	5,87	5,83	5,68	5,85	6,03	6,43	6,46	6,29	6,43	6,41	6,44	6,74
Silphie-g-35	6,20	6,22	6,21	5,95	5,08	4,85	4,82	4,84	4,91	4,97	5,28	5,58	6,66	6,82
Silphie-g-65	6,20	6,03	5,98	5,72	5,14	5,11	5,16	5,31	5,53	6,04	6,50	6,48	6,56	6,76
Silphie-g-100	6,20	5,83	5,84	5,76	5,79	5,91	6,33	6,46	6,50	6,46	6,58	6,56	6,57	6,79
Silphie-f-35	6,20	6,22	6,25	5,93	5,10	4,91	4,85	4,87	4,95	5,01	5,31	5,62	6,62	6,68
Silphie-f-65	6,20	5,93	6,03	5,75	5,11	5,16	5,15	5,20	5,35	5,66	6,53	6,54	6,54	6,65
Silphie-f-100	6,20	5,73	5,68	5,63	5,57	5,65	5,79	6,03	6,53	6,52	6,48	6,41	6,41	6,59

pH proef 2

Tabel B. pH metingen bij proef 2

Behandeling	start	dag 1	dag 2	dag 3	dag 7	dag 11	dag 15	dag 18	dag 22	dag 25	dag 32	dag 38	dag 47
Ref	6,20	6,92	6,77	6,82	6,89	7,05	7,15	6,93	6,84	6,79	6,95	7,14	7,34
Bietmelasse 4	6,20	7,07	6,80	6,57	5,50	5,57	6,20	6,34	6,38	6,45	6,74	6,94	6,94
Bietmelasse 8	6,20	7,19	6,91	6,65	5,33	4,60	4,47	4,53	4,48	4,45	4,60	5,09	6,29
Maisweekwater 8	6,20	6,36	6,31	6,04	5,89	6,27	6,43	6,51	6,63	6,72	6,60	6,80	7,11
Maisweekwater 12	6,20	6,16	6,13	6,01	5,49	5,54	5,54	5,89	6,29	6,42	6,52	6,91	6,84
OPL 8	6,20	6,58	6,48	6,33	4,99	4,95	4,97	5,13	5,29	5,64	6,45	6,74	6,72
OPL 12	6,20	6,50	6,42	6,29	4,89	4,42	4,33	4,29	4,41	4,49	4,86	5,28	6,75
DPL 8	6,20	6,54	6,48	6,36	5,82	6,23	6,29	6,42	6,43	6,50	6,72	6,78	6,69
DPL 12	6,20	6,46	6,44	6,31	5,00	5,20	5,34	5,28	5,83	6,43	6,42	6,75	6,71
Glucose 8	6,20	6,81	6,63	6,50	5,91	6,58	6,35	6,38	6,60	6,71	6,63	6,82	6,79
Glucose 12	6,20	6,81	6,63	6,48	5,41	4,99	5,05	5,22	5,44	6,23	6,49	6,68	6,55
SWML 8	6,20	6,69	6,56	6,43	5,23	4,89	4,97	5,13	5,20	5,66	6,71	6,76	6,52
SWML 12	6,20	6,64	6,53	6,37	4,98	4,46	4,29	4,34	4,34	4,62	4,71	5,16	6,60
Ref	6,20	6,77	6,75	6,73	6,75	6,73	6,81	6,85	6,90	6,90	6,79	7,23	7,22
Mais 35	6,20	6,66	6,50	6,23	4,99	4,79	4,84	4,86	5,16	5,28	5,58	6,39	6,49
Mais 65	6,20	6,51	6,39	6,01	5,25	5,12	5,06	5,14	5,49	5,73	6,49	6,58	6,67
Mais 100	6,20	6,37	6,32	6,23	6,12	5,99	5,85	5,94	5,82	5,92	6,33	6,59	6,83
Suikerbiet 35	6,20	6,84	6,57	6,36	5,00	4,90	4,95	5,20	5,41	5,41	5,85	6,40	6,41
Suikerbiet 65	6,20	6,79	6,56	6,29	4,98	4,62	4,61	4,69	4,88	5,08	5,17	5,89	6,15
Suikerbiet 100	6,20	6,77	6,51	6,24	4,77	4,69	4,61	4,66	4,80	4,92	5,19	6,10	6,20
Sorghum 35	6,20	6,57	6,44	6,15	4,85	4,93	4,84	4,96	5,12	5,38	5,99	6,48	6,46
Sorghum 65	6,20	6,32	6,29	5,91	5,40	5,82	6,07	6,28	6,38	6,26	6,30	6,87	6,56
Sorghum 100	6,20	6,14	6,23	6,13	6,20	6,29	6,09	6,08	6,04	6,20	6,26	6,79	6,51
Silphie 35	6,20	6,56	6,43	6,16	4,99	4,86	4,91	5,01	5,28	5,37	6,07	6,87	6,54
Silphie 65	6,20	6,29	6,26	5,97	5,44	5,74	6,17	6,50	6,36	6,47	6,45	6,89	6,50
Silphie 100	6,20	6,08	6,13	6,10	6,16	6,26	6,16	6,27	6,35	6,28	6,34	6,87	6,50

pH proef 3

Tabel C. pH metingen bij proef 3.

Mest	Behandeling	start	dag 1	dag 4	dag 6	dag 8	dag 11	dag 14	dag 18	dag 21	dag 25	dag 28	dag 32	dag 36	dag 43	dag 58	dag 64
A	ref	6,67	7,23	6,89	6,92	6,93	6,89	6,82	6,86	7,00	7,06	7,14	7,20	7,29	7,42	7,72	7,60
A	Bietmelasse A 5%	5,51	6,09	4,95	4,41	4,29	4,28	4,31	4,24	4,36	4,39	4,54	4,48	4,61	4,83	6,72	6,79
A	Bietmelasse 7,5%	6,67	7,49	5,34	4,99	4,55	4,34	4,29	4,15	4,25	4,23	4,25	4,17	4,30	4,25	4,96	6,70
A	Voederbieten 35	5,51	5,98	4,99	4,43	4,58	4,12	4,09	3,98	4,07	4,05	4,13	4,08	4,27	4,25	4,82	6,24
A	Mais 100	5,51	5,48	4,97	4,64	4,17	4,69	4,74	5,05	5,49	5,89	6,18	6,28	6,12	6,18	6,33	6,51
A	Mais 35	5,51	5,83	5,02	4,39	4,66	4,40	4,41	4,40	4,55	4,61	4,76	4,72	5,59	5,76	6,20	6,72
A	Voederbieten 100	5,51	7,35	5,21	4,72	4,31	4,45	4,48	4,43	4,61	4,68	5,40	5,36	6,24	6,23	6,36	6,59
A	OPL/mel	6,67	6,90	5,16	4,78	4,41	4,36	4,40	4,36	4,43	4,46	4,56	4,56	4,93	5,24	6,58	6,59
A	OPL	6,67	6,66	5,27	4,74	4,58	4,27	4,18	4,10	4,21	4,22	4,24	4,17	4,27	4,28	5,32	6,49
A	SWML/mel	6,67	7,41	5,27	4,77	4,49	4,20	4,27	4,15	4,26	4,25	4,29	4,26	4,40	4,45	6,38	6,68
A	SWML	6,67	7,07	5,06	4,76	4,48	4,20	4,13	4,08	4,08	4,15	4,17	4,11	4,22	4,24	4,88	6,14
A	DLP/mel	6,67	6,96	5,09	4,87	4,62	4,57	4,61	4,60	4,76	4,87	5,28	5,82	6,44	6,39	6,78	6,99
A	DLP	6,67	6,43	5,19	4,97	4,95	4,98	5,25	5,68	6,12	6,42	6,51	6,50	6,86	6,78	6,85	7,02
B	ref	7,05	8,01	7,36	7,32	7,30	7,38	7,26	7,06	7,18	7,34	7,40	7,41	7,57	7,55	7,83	7,92
B	Bietmelasse A 5%	6,22	7,15	5,57	5,10	5,00	5,02	5,28	5,71	6,46	6,54	6,72	6,73	7,14	7,04	7,15	7,54
B	Bietmelasse 7,5%	7,05	8,04	5,56	5,22	4,77	4,71	4,76	4,80	4,99	5,18	5,96	6,37	6,60	6,74	7,23	7,05
B	Voederbieten 35	6,22	7,09	5,34	4,90	4,56	4,54	4,61	4,65	4,81	4,94	5,20	5,28	6,27	6,50	6,94	6,93
B	Mais 100	6,22	6,62	6,20	6,02	6,18	6,36	6,24	6,31	6,38	6,72	6,77	6,58	7,12	6,66	6,79	6,78
B	Mais 35	6,22	7,00	5,27	4,89	4,73	4,77	4,81	4,91	4,99	5,14	5,99	6,40	6,74	6,62	6,79	6,91
B	Voederbieten 100	6,22	7,07	5,35	4,94	4,59	4,69	4,71	4,78	4,91	5,20	5,97	6,28	6,47	6,41	6,7	6,91
B	OPL/mel	7,05	8,05	5,33	5,05	4,69	4,74	4,82	4,91	5,06	5,42	6,18	6,27	6,73	6,78	6,98	7,04
B	OPL	7,05	7,03	5,43	5,03	4,66	4,59	4,65	4,69	4,81	4,95	5,32	5,57	6,35	6,50	6,76	6,92
B	SWML/mel	7,05	8,04	5,39	5,02	4,63	4,62	4,67	4,70	4,86	5,05	5,59	5,96	6,58	6,59	6,99	6,99
B	SWML	7,05	7,70	5,39	5,11	4,61	4,54	4,60	4,64	4,76	4,89	5,24	5,73	6,55	6,61	6,74	6,86
B	DLP/mel	7,05	7,13	5,58	5,31	5,28	5,46	6,04	6,39	6,60	6,65	6,75	6,85	7,05	6,96	7,31	7,34
B	DLP	7,05	6,70	5,85	5,85	6,09	6,26	6,49	6,56	6,77	6,82	6,81	6,70	6,90	6,93	7,13	7,31
C	ref	6,63	7,19	6,83	6,87	6,93	6,97	6,90	6,84	6,96	7,12	7,12	7,13	7,37	7,04	7,55	7,49
C	Bietmelasse A 5%	5,09	5,32	5,41	4,62	4,32	4,19	4,17	4,09	4,17	4,18	4,23	4,17	4,38	4,42	6,20	6,58
C	Bietmelasse 7,5%	6,63	7,44	5,32	4,97	4,41	4,24	4,18	4,07	4,06	4,08	4,12	4,02	4,08	4,08	4,26	4,79
C	Voederbieten 35	5,09	5,40	5,41	4,57	4,24	4,15	4,14	4,06	4,12	4,13	4,19	4,12	4,26	4,32	5,36	6,39
C	Mais 100	5,09	4,97	5,09	4,93	4,84	4,94	5,02	4,81	4,91	5,20	5,75	5,97	5,86	6,05	6,20	6,62
C	Mais 35	5,09	5,13	5,33	4,59	4,29	4,27	4,28	4,23	4,29	4,40	4,46	4,46	4,74	4,75	5,84	6,56
C	Voederbieten 100	5,09	5,23	5,21	4,38	4,09	3,99	3,94	3,87	3,91	4,01	4,03	4,00	4,20	4,24	5,23	5,87
C	OPL/mel	6,63	7,11	5,13	4,63	4,33	4,21	4,17	4,07	4,11	4,08	4,09	4,03	4,06	4,04	4,31	4,83
C	OPL	6,63	6,81	5,08	4,59	4,33	4,19	4,12	3,98	4,05	4,06	4,06	4,02	4,06	4,03	4,12	4,16
C	SWML/mel	6,63	7,81	5,15	4,61	4,30	4,17	4,10	4,01	4,04	4,03	4,03	3,97	4,01	3,99	4,57	5,27
C	SWML	6,63	7,01	5,09	4,54	4,29	4,10	4,03	3,95	3,99	3,99	4,01	3,95	3,98	3,98	4,30	4,70
C	DLP/mel	6,63	6,74	4,98	4,79	4,54	4,35	4,27	4,21	4,26	4,32	4,47	4,44	4,71	4,94	6,46	6,99
C	DLP	6,63	6,18	4,92	4,72	4,68	4,70	4,80	4,98	5,24	5,70	6,02	6,11	6,40	6,49	6,77	7,03

pH proef 4

Tabel D. pH metingen bij proef 4. Metingen zijn gedaan voor toevoeging van verse mest.

Behandeling	dag 1	dag 4	dag 7	dag 9	dag 11	dag 14	dag 18	dag 21	dag 24	dag 29	dag 32	dag 35	dag 39	dag 56	dag 60	dag 63	dag 66
Ref	7,47	7,10	7,03	7,13	7,04	7,01	6,99	7,05	7,09	7,03	7,04	6,99	6,96	7,10	7,06	7,09	7,07
Mel	6,10	5,73	4,64	4,54	4,36	4,28	4,22	4,26	4,32	4,26	4,29	4,29	4,34	4,39	4,45	4,54	4,59
Mais 50	5,86	5,09	4,80	4,83	4,68	4,65	4,61	4,63	4,68	4,74	4,81	4,82	4,89	5,00	5,09	5,12	5,15
Mais 100	5,46	5,42	5,32	5,41	5,27	5,19	5,17	5,24	5,42	5,27	5,59	5,95	5,96	6,06	6,07	6,00	6,00
Voederbiet 50	6,04	5,61	4,52	4,42	4,24	4,16	4,12	4,14	4,20	4,14	4,16	4,15	4,24	4,39	4,56	4,68	4,79
Voederbiet 100	6,10	5,66	4,46	4,32	4,14	4,04	4,00	4,02	4,10	4,10	4,18	4,23	4,36	4,47	4,66	4,79	4,91
Silphie 50	6,09	5,39	4,70	4,82	4,77	4,79	4,90	4,99	5,11	5,24	5,36	5,69	6,03	6,27			
Silphie 100	6,06	5,91	6,19	6,52	6,62	6,67	6,66	6,63									
DPL	6,37	5,27	4,68	4,70	4,56	4,46	4,39	4,45	4,55	4,63	4,73	4,76	4,84	4,99	5,04	4,96	4,94
OPL	6,63	5,55	4,76	4,74	4,58	4,46	4,37	4,34	4,43	4,40	4,42	4,37	4,32	4,31	4,44	4,48	4,50

Redoxpotentiaal proef 1

Behandeling	dag 23	dag 34
Gewone DM	-307	-346
Gemengde DM + zuur	-318	-346
Melasse 100	-36,7	-35,1
Mais-g-35	-91,3	-150,5
Mais-g-65	-140,4	-293
Mais-g-100	-264	-276
Mais-f-35	-82,3	-194,7
Mais-f-65	-75,5	-199
Mais-f-100	-114,7	-279
Voederbiet-g-35	-94	-148,7
Voederbiet-g-65	-67,5	-106,1
Voederbiet-g-100	-243	-260
Voederbiet-f-35	-49,9	-90,5
Voederbiet-f-65	-56,9	-93,8
Voederbiet-f-100	-62,5	-96,7
Sorghum-g-35	-168,1	-218
Sorghum-g-65	-262	-278
Sorghum-g-100	-235	-285
Sorghum-f-35	-84,1	-250
Sorghum-f-65	-286	-287
Sorghum-f-100	-293	-287
Silphie-g-35	-177,8	-317
Silphie-g-65	-308	-317
Silphie-g-100	-315	-316
Silphie-f-35	-185,4	-311
Silphie-f-65	-295	-329
Silphie-f-100	-298	-328

Redoxpotentiaal proef 2

Behandeling	dag 7	dag 18
Ref	-307	-345
Bietmelasse 4	-221	-274
Bietmelasse 8	-212	-103,1
Maisweekwater 8	-272	-342
Maisweekwater 12	-234	-292
OPL 8	-208	-175,9
OPL 12	-169,6	-71,9
DLP 8	-289	-321
DLP 12	-227	-223
Glucose 8	-278	-312
Glucose 12	-217	-163,8
SWML 8	-243	-156,9
SWML 12	-241	-79,3
Ref	-319	-317
Mais 35	-206	-109,8
Mais 65	-227	-146,7
Mais 100	-251	-248
Voederbiet 35	-218	-170,1
Voederbiet 65	-191,6	-104,6
Voederbiet 100	-176,4	-83,2
Sorghum 35	-186,1	-129,4
Sorghum 65	-190,2	-214
Sorghum 100	-203	-161,9
Silphie 35	-179,6	-133,2
Silphie 65	-201	-263
Silphie 100	-228	-259

Redoxpotentiaal proef 3

Mest	Behandeling	dag 8	dag 11	dag 18	dag 25	dag 32
A	Ref	-344,3	-443,3	-431	-370,6	-343,7
A	Bietmelasse A 5%	-119,2	-104	-107,7	-36,5	-45,3
A	Bietmelasse 7,5%	-138,1	-133,7	-79,5	-57,4	-15,1
A	Voederbieten 35	-130,3	-75,2	-36,8	-51,6	-13
A	Mais 100	-66,6	-99,6	-114,2	-268	-317,5
A	Mais 35	-137	-166,5	-73,9	-130,4	-167,9
A	Voederbieten 100	-112,3	-136,8	-87	-144,9	-278,7
A	OPL/mel	-148,1	-99,4	-95,2	-65,3	-208
A	OPL	-140,4	-229,9	-47,9	-28,2	-20,6
A	SWML/mel	-75,7	-114,6	-49,5	24,5	-39,8
A	SWML	-179,5	-133,4	-31,1	-20,1	-8,6
A	DLP/mel	-190,5	-156,9	-37,5	-122,4	-270,9
A	DLP	-216,8	-173,6	-248,9	-347,5	-397,1
B	Ref	-419,6	-386,7	-406,3		-405
B	Bietmelasse A 5%	-208,4	-245,3	-271,8	-375,2	-329,4
B	Bietmelasse 7,5%	-217,8	-146,8	-153	-159,3	-357,4
B	Voederbieten 35	-206,2	-183,9	-109,4	-207,1	-164
B	Mais 100	-306	-303,5	-276,4	-310,9	-360,7
B	Mais 35	-264	-195,2	-149,1	-193,4	-327,3
B	Voederbieten 100	-257,7	-134,3	-119	-196,6	-329,8
B	OPL/mel	-185	-171,6	-181,2	-240,5	-361,6
B	OPL	-259,9	-180,2	-128,4	-205,1	-306,7
B	SWML/mel	-246,1	-158,2	-166,8	-240,2	-307,7
B	SWML	-276,3	-221,7	-140,8	-229,7	-329,4
B	DLP/mel	-268,1	-288	-304,4	-283,9	-358,9
B	DLP	-393,8	-368,1	-383,3	-307,6	-334,4
C	Ref	-443,6	-355,9	-380,2	-360,2	-396,4
C	Bietmelasse A 5%	-132,8	-136,8	-37,2	-57,9	-33,7
C	Bietmelasse 7,5%	-221,7	-66,2	-70	4,5	-27,7
C	Voederbieten 35	-169,6	-61,5	-72	-23,9	-9,8
C	Mais 100	-131,2	-152,1	-151	-248,1	-251,9
C	Mais 35	-131,8	-118,6	-67,8	-18,8	-97,4
C	Voederbieten 100	-117,2	-115,3	-59,3	-23,7	-52,3
C	OPL/mel	-192,4	-63,2	-37,7	-1,1	-34,4
C	OPL	-147,2	-78,4	-39,1	-19,5	20,4
C	SWML/mel	-133,9	-102,9	-61,6	-19,2	-12,2
C	SWML	-123,2	-95,9	-27,4	-7,8	-21,1
C	DLP/mel	-162	-119,4	-64,8	-74,6	-69,1
C	DLP	-178,8	-198,4	-189,8	-268,6	-334

Quickscan reststromen

Als voorbereiding op proef 2

Opzet

Deze proef was een quickscan om te testen of verschillende reststromen potentie hadden om gebruikt te worden voor het biologisch aanzuren van mest. De volgende 8 reststromen werden getest, gegeven in tabel E.

Tabel E. Samenstelling van reststromen.

Reststroom	Vocht	RE	Ca	P	Na	K	Mg	S	Lactose	Azijnzuur	Melkzuur	Suiker	Zetmeel	pH	N
Bietmelasse	263	94,5	0,5	0,2	4,7	48,4	0,1	3,63		6,6	31	449,8	0	9,9	15,12
Protamylasse	431	157	0,6	5,9	3,5	86,1	3,8	9,14		16,5	51,5	77,7	2,3	6,1	25,12
Maisweekwater	542	1,82	0,2	13,6	4,5	26,3	5,6	5,23		1,9	95,4	89,6	4,6	4,3	0,29
OPL	525	36	4,6	8,9	9,2	35,1	1,3	1,59	256	0,5	7,1		0,9	5,3	5,76
DLP	744	20,9	5,2	6,5	5,1	17,6	1,2	7,17	131	0	0,4		0	4,2	3,34
Glucose	812	0	0	0	0	0	0	0,27		0	0	162,6	0,7	5,1	0
SWML	590	27,6	5,8	4,1	4,9	16,2	1,1	1,12	272	0	2,6		0,2	5,9	4,42

De proef is uitgevoerd met 250 ml potjes, waarin 100 ml mest werd gedaan. Hiervoor is dezelfde mest als bij proef 1 gebruikt. Deze mest is eerst aangezuurd met azijnzuur tot een pH van 6.2. Van alle reststromen is een behandeling met 5% en 10% toegediend. Van bietmelasse is ook nog een behandeling met 2,5% toegediend en er zijn twee referenties meegenomen. De pH is gedurende 26 dagen gevolgd. De meting op dag 1 was kort na toediening van de reststromen.

Resultaten

De gemeten pH van de quickscan met reststromen staan gegeven in Tabel F. Van de reststromen lieten grijs zetmeel en Protamylasse het minste potentie zien om gebruikt te worden voor biologisch aanzuren van mest. Behandelingen bij met 10% bietmelasse, maisweekwater en de zuivelreststromen kwam de pH onder de 5,5. Daarom werden deze reststromen meegenomen bij proef 2.

Tabel F. pH metingen quickscan 8 reststromen.

Behandeling	pH start	dag 1	dag 2	dag 3	dag 4	dag 5	dag 9	dag 12	dag 15	dag 19	dag 23	dag 26
Ref	6,20	6,33	6,62	6.82	7,04	7,19	7,45	7,66	7,37	7,20	7,45	7,73
Ref	6,20	6,32	6,56	6.78	6,92	7,06	7,68	7,68	7,32	7,23	7,49	7,67
Bietmelasse 2.5	6,20	6,60	6,34	5.79	5,54	5,97	6,90	7,24	7,43	7,46	7,44	7,40
Bietmelasse 5	6,20	6,64	6,38	5.71	5,23	5,06	4,99	5,14	5,10	5,39	6,42	7,09
Bietmelasse 10	6,20	6,81	6,46	5.72	5,16	4,94	4,53	4,33	4,45	4,62	4,41	4,31
Protamylasse 5	6,20	6,41	6,28	6.23	6,54	6,96	7,15	7,51	7,69	7,81	8,14	8,21
Protamylasse 10	6,20	6,35	6,25	5.75	5,88	6,08	6,92	7,07	7,21	7,54	7,78	7,85
Maisweekwater 5	6,20	6,07	5,95	6.02	6,23	6,68	7,07	7,24	7,59	7,51	7,53	7,70
Maisweekwater 10	6,20	5,83	5,74	5.38	5,34	5,34	5,5	5,83	6,20	7,09	7,40	7,62
OPL 5	6,20	6,37	6,23	5.65	5,67	6,19	6,77	7,08	7,42	7,43	7,23	7,27
OPL 10	6,20	6,31	6,17	5.46	5,19	5,07	5,01	5,06	5,09	5,25	5,86	6,26
DLP 5	6,20	6,35	6,22	5.83	6,09	6,46	6,94	7,23	7,37	7,29	7,22	7,15
DLP 10	6,20	6,25	6,13	5.48	5,21	5,23	5,45	5,91	6,43	7,00	7,18	7,23
Glucose 5	6,20	6,51	6,28	5.77	5,99	6,43	6,72	7,03	7,13	7,16	7,36	7,32
Glucose 10	6,20	6,51	6,28	5.55	5,15	5,14	5,24	5,65	5,76	6,62	7,00	7,20
SWML 5	6,20	6,55	6,29	5.63	5,76	6,12	6,72	6,98	7,43	7,28	7,33	7,30
SWML 10	6,20	6,47	6,24	5.46	5,18	5,07	5,11	5,21	5,41	6,03	6,79	7,10
Grijs zetmeel 5	6,20	6,33	6,37	6.55	6,59	6,63	6,79	7,05	7,16	7,20	7,35	7,40
Grijs zetmeel 10	6,20	6,17	6,19	6.46	6,44	6,44	6,30	6,55	6,84	7,09	7,22	7,12

Proef reststromen: effect versheid van mest en temperatuur

Als voorbereiding op proef 2

Opzet

Deze proef is uitgevoerd te het effect te bepalen van de versheid van mest en de temperatuur op het biologisch aanzuren van de mest. De proef is uitgevoerd in potjes met 100 g mest. Als behandelingen zijn bietmelasse 10%, OPL 20% en SWML 20% gebruikt. Behandelingen zijn toegediend op vers gemengde mest en mest die 5 dagen eerder was gemengd. Na toediening zijn potjes weggezet bij twee verschillende temperaturen, 17 ºC en 20 ºC. Het was gepland dat dit temperatuurverschil groter was, maar de gekoelde opslag bleek achteraf niet voldoende te koelen. In een volgende proef (bijlage …) is het effect van temperatuur op biologisch aanzuren nogmaals onderzocht.

Resultaten

De gemeten pH staat gegeven in tabel G. Bij de start van de proef had de oude mest een pH van 7,23 terwijl de vers gemixte mest een pH van 7,63 had. Na 4 dagen was dit verschil echter bij alle behandelingen verdwenen. Daarna zat er voor iedere behandeling weinig verschil tussen gemeten pH in de oude en nieuwe mest.

Tabel G pH metingen quickscan reststromen, effect versheid mest en temperatuur.

Restproduct	Type mest	Temperatuur	start	dag 1	dag 4	dag 5	dag 6	dag 7	dag 8	dag 11	dag 13	dag 19	dag 22	dag 29
-	Oud	10-15 (17)	7,23	7,11	7,31	7,31	7,40	7,34	7,20	7,20	7,50	8,15	8,28	8,45
-	Oud	Kamertemp	7,23	7,14	7,29	7,38	7,13	7,06	7,29	7,08	7,35	8,03	8,13	8,49
-	Nieuw	10-15 (17)	7,63	7,45	7,32	7,34	7,53	7,40	7,49	7,16	7,39	7,83	8,21	8,18
-	Nieuw	Kamertemp	7,63	7,48	7,40	7,67	7,37	7,26	7,38	7,17	7,31	7,83	7,88	8,56
Bietmelasse	Oud	10-15 (17)	7,23	7,25	6,22	5,98	5,74	5,58	5,3	5,06	5,16	5,16	5,02	5,14
Bietmelasse	Oud	Kamertemp	7,23	7,47	5,84	5,72	5,25	5,24	5,22	5,18	5,33	5,42	5,57	7,35
Bietmelasse	Nieuw	10-15 (17)	7,63	7,84	6,19	5,93	5,67	5,34	5,16	5,03	5,18	5,25	5,27	6,15
Bietmelasse	Nieuw	Kamertemp	7,63	7,65	5,82	5,66	5,16	5,16	5,25	5,12	5,24	5,34	5,57	7,08
OPL	Oud	10-15 (17)	7,23	6,57	6,24	6,13	5,92	5,61	5,41	5,06	5,03	4,85	4,67	4,77
OPL	Oud	Kamertemp	7,23	6,59	6,11	5,72	5,32	5,19	5,00	4,82	4,91	4,78	4,86	5,22
OPL	Nieuw	10-15 (17)	7,63	6,72	6,16	5,97	5,81	5,59	5,51	4,98	4,95	4,68	4,64	4,82
OPL	Nieuw	Kamertemp	7,63	6,74	6,04	5,73	5,26	5,09	5,12	4,73	4,82	4,70	4,79	5,03
SWML	Oud	10-15 (17)	7,23	6,82	6,09	5,99	5,78	5,6	5,44	5,06	5,02	4,68	4,69	4,73
SWML	Oud	Kamertemp	7,23	6,79	5,75	5,64	5,31	5,14	5,04	4,81	4,95	4,86	4,85	4,87
SWML	Nieuw	10-15 (17)	7,63	6,76	6,26	6,02	5,68	5,56	5,41	4,90	4,87	4,56	4,49	4,63
SWML	Nieuw	Kamertemp	7,63	7,06	5,94	5,59	5,22	5,03	4,89	4,77	4,91	4,88	4,91	5,23

Proef reststromen: effect temperatuur

Als voorbereiding op proef 3

Opzet

Om nogmaals het effect van temperatuur op biologisch aanzuren te onderzoeken, zijn er tijdens proef 3 duplo's van 6 behandelingen in een koelkast bij 10 °C weggezet. Proef 3 vond zelf plaats bij 15 tot 20 °C. De pH van de 6 duplo's in de koelkast is gelijktijdig met proef 3 gemeten

Resultaten

Tabel H geeft de gemeten pH van de behandelingen bij hoge en lage temperatuur. Voor alle behandelingen zakte de pH sneller bij hoge temperatuur dan bij lage temperatuur. Na 4 dagen waren de pH alle behandelingen bij de hoge temperatuur al rond de 5,5 of lager. Bij de lage temperatuur duurde dit 6 tot 11 dagen. De minimale pH niet per behandeling werd bereikt, lag voor de hoge en lage temperatuur ongeveer gelijk. De pH bleef langer laag bij de behandelingen op lage temperatuur, terwijl de pH bij de behandeling op hoge temperatuur al op begon te lopen.

Tabel H. Resultaten proef reststromen op twee temperaturen. De pH-waarden beneden de 5,5 zijn groen gemaakt.

Mest	Behandeling	Temperatuur	start	dag 1	dag 4	dag 6	dag 8	dag 11	dag 14	dag 18	dag 21	dag 25	dag 28	dag 32	dag 36	dag 43	dag 58	dag 64
A	Bietmelasse 7,5%	hoog	6,67	7,49	5,34	4,99	4,55	4,34	4,29	4,15	4,25	4,23	4,25	4,17	4,30	4,25	4,96	6,70
B	Bietmelasse 7,5%	hoog	7,05	8,04	5,56	5,22	4,77	4,71	4,76	4,80	4,99	5,18	5,96	6,37	6,60	6,74	7,23	7,05
C	Bietmelasse 7,5%	hoog	6,63	7,44	5,32	4,97	4,41	4,24	4,18	4,07	4,06	4,08	4,12	4,02	4,08	4,08	4,26	4,79
A	OPL	hoog	6,67	6,66	5,27	4,74	4,58	4,27	4,18	4,10	4,21	4,22	4,24	4,17	4,27	4,28	5,32	6,49
B	OPL	hoog	7,05	7,03	5,43	5,03	4,66	4,59	4,65	4,69	4,81	4,95	5,32	5,57	6,35	6,5	6,76	6,92
C	SWML	hoog	6,63	7,01	5,09	4,54	4,29	4,10	4,03	3,95	3,99	3,99	4,01	3,95	3,98	3,98	4,30	4,70
A	Bietmelasse 7,5%	laag	6,67	7,49	6,40	6,14	5,89	5,48	5,22	4,90	4,80	4,72	4,56	4,45	4,41	4,34	4,32	4,34
B	Bietmelasse 7,5%	laag	6,22	8,11	6,52	6,23	6,06	5,65	5,41	5,04	4,91	4,79	4,73	4,64	4,66	4,63	4,70	4,84
C	Bietmelasse 7,5%	laag	6,63	7,56	5,96	5,63	5,39	5,22	5,11	4,79	4,71	4,57	4,43	4,27	4,23	4,15	4,12	4,10
A	OPL	laag	6,67	6,80	6,11	5,68	5,20	4,88	4,81	4,60	4,58	4,55	4,4	4,27	4,25	4,16	4,23	4,26
B	OPL	laag	7,05	7,15	6,03	5,87	5,69	5,35	5,16	4,83	4,77	4,75	4,62	4,55	4,58	4,54	4,63	4,67
C	SWML	laag	6,63	6,98	5,97	5,47	5,26	5,05	4,71	4,37	4,31	4,25	4,18	4,07	4,10	4,02	4,07	4,05

Zetmeel en enzymen

Als voorbereiding op proef 3: enzymen toevoegen had weinig effect en is daarom niet meegenomen in proef 3.

Opzet

Uit de quickscan met reststromen bleek dat grijs zetmeel weinig potentie had om gebruikt te worden voor het biologisch aanzuren van mest. Wel kwam hieruit de vraag naar voren of biologisch aanzuren met zetmeel meer potentie zou hebben wanneer er enzymen aan werden toegevoegd die helpen bij het afbreken van het zetmeel. Daarom is een proef uitgevoerd waarbij twee types tarwezetmeel (Corami en Amidyn) en twee enzymen (NSPase en Amylo) zijn toegevoegd aan mest. Samenstelling van de types zetmeel staat gegeven in Tabel I. Voor ieder zetmeel is een blanco behandelingen, een behandeling met de afzonderlijke enzymen en een behandeling met een combinatie van beide enzymen. De proef is in duplo uitgevoerd in potjes met 100 g mest. Hieraan is 15 g tarwezetmeel toegevoegd. De pH is gedurende 16 dagen gemeten.

Tabel I. Samenstelling van de twee typen tarwezetmeel. DS in g kg^{-1}. Overig in g kg^{-1} DS

Type zetmeel	DS	RE	Suiker	Zetmeel	Melkzuur	N
Corami	280	200	140	275	100	32
Amidyn	190	155	300	225	100	25

Resutaten

Tabel J geeft de gemeten pH bij de proef met zetmeel en enzymen. Behandelingen met Corami hadden een grotere pH daling dan behandelingen met Amydin. Er was geen duidelijk verschil tussen de behandelingen met en zonder toevoeging enzymen. Er is dus geen effect van de enzymen op het biologisch aanzuren van de mest met tarwezetmeel.

Tabel J. pH metingen proef zetmeel en enzymen.

Behandeling	pH dag 1	pH dag 2	pH dag 4	pH dag 7	pH dag 10	pH dag 16
Ref	7,5	7,48	7,44	7,6	7,22	7,19
Ref	7,45	7,44	7,41	7,41	7,12	7,6
Corami blanco	7	6,71	5,74	5,44	5,82	6,21
Corami blanco	6,92	6,69	5,59	5,13	5,15	5,22
Corami NSPase	6,79	6,67	5,5	5,22	5,65	6,4
Corami NSPase	7	6,67	5,51	5,19	5,71	6,3
Corami Amylo	6,95	6,7	5,58	5,25	5,65	6,42
Corami Amylo	6,95	6,68	5,53	5,16	5,29	6,01
Corami beiden	7,02	6,7	5,65	5,26	5,2	5,23
Corami beiden	6,85	6,66	5,57	5,24	5,51	6,26
Amidyn blanco	6,83	6,65	5,93	6,06	6,47	6,99
Amidyn blanco	6,91	6,68	5,97	5,92	6,24	6,33
Amidyn NSPase	6,78	6,62	5,9	5,87	6,23	6,23
Amidyn NSPase	6,93	6,67	5,95	5,71	6,19	6,33
Amidyn Amylo	6,85	6,68	5,98	5,97	6,27	6,65
Amidyn Amylo	6,67	6,62	5,94	5,97	6,21	6,25
Amidyn beiden	6,72	6,62	5,87	6,03	6,23	6,22
Amidyn beiden	6,74	6,62	5,96	5,79	6,3	6,27

Test fed-batch proef

Als voorbereiding op proef 4

Opzet

Voordat proef 4 is uitgevoerd, is er eerst een kleinere fed-batch proef met 4 behandelingen uitgevoerd. Ervaringen hieruit konden worden gebruikt bij het opstellen van het protocol voor proef 4. De behandelingen die zijn: 5% bietmelasse vooraf aangezuurd tot pH 6,2, 10% bietmelasse, 20% OPL en 20% SWML. De proef begon met 2kg mest in 5 liter emmers. Vanaf dag 8 werd er elke 2-3 dagen 200 mest toegevoegd. Ook werd de reststroom toegevoegd, waarbij werd gestuurd op het verlagen van het gehalte reststroom in de mest zonder de pH op te laten lopen.

Resultaten

Tabel K1 geeft de pH metingen bij de test fed-batch proef. De pH van alle behandelingen daalde tot dag 11. Vanaf dag 13 liepen de pH op dus werd de dosering van de reststromen verhoogd (tabel K2). Bij OPL en SWML leidde dit tot een verdere daling van de pH. Bij bietmelasse10 bleef de pH stabiel rond 5,1 en bij de vooraf aangezuurde bietmelasse5 liep de pH op tot 6,22 op dag 41. Dit zelfs terwijl het gehalte melasse inmiddels hoger was dan bij bietmelasse10. Hieruit blijkt dat sturing op een lage pH (richting 4,5) belangrijk is en dat het lastig is het oplopen van de pH terug te draaien door biologisch aan te zuren. Behandeling met OPL en SWML laten zien dan de pH makkelijker constant blijft wanneer deze onder de 5,0 is, zelfs wanneer de dosering van de reststromen wordt afgebouwd. Bij de fed-batch proef van proef 4 werd hierom met een overmaat van reststromen om de pH rond de 4,5 te krijgen, alvorens de dosering werd afgebouwd.

Tabel K1. pH metingen bij test ten behoeve van fed-batchproef 4

Behandeling	dag 1	dag 4	dag 6	dag 8	dag 11	dag 13	dag 18	dag 20	dag 22	dag 27	dag 29	dag 32	dag 41
Bietmelasse5 aang	6,57	6,09	5,17	5,26	5,29	5,82	5,98	6,39	5,73	6,17	6,26	6,06	6,22
Bietmelasse10	8,04	6,17	5,42	5,27	4,88	5,1	4,97	5,13	5,1	5,16	5,14	5,16	6,64
OPL	6,73	6,1	5,45	5,3	4,78	5,03	4,59	4,79	4,72	4,64	4,77	4,84	4,98
SWML	6,77	6,11	5,45	5,49	4,88	5,02	4,71	4,76	4,71	4,62	4,76	4,81	4,94

Tabel K2. Percentage reststroom in de mest bij test ten behoeve fed-batchproef 4.

Behandeling	dag 1	dag 4	dag 6	dag 8	dag 11	dag 13	dag 18	dag 20	dag 22	dag 27	dag 29	dag 32	dag 41
kg mest in emmer	2,0	2,0	2,0	2,2	2,4	2,6	2,8	3,0	3,2	3,4	3,6	2,8	3,0
Bietmelasse5 aang	5,0	5,0	5,0	4,9	4,8	4,8	5,1	5,5	6,1	6,7	8,1	8,7	9,2
Bietmelasse10	10,0	10,0	10,0	9,5	9,0	8,6	8,6	8,3	8,3	8,4	8,4	8,6	8,7
OPL	20,0	20,0	20,0	18,9	18,0	17,2	17,1	16,5	16,0	15,4	14,8	14,1	13,5
SWML	20,0	20,0	20,0	18,9	18,0	17,2	17,1	16,5	16,0	15,4	14,8	14,1	13,5

Rendement van aanzuren met melasse

Idealiter vindt er homolachtische fermentatie plaats waarbij uit suiker 2 melkzuur wordt gevormd. Verkend is of dit ook daadwerkelijk is gebeurd. De resultaten zijn vooral indicatief.

Opzet

Om te bepalen hoeveel melasse er wordt omgezet in melkzuur is een proef uitgevoerd waarbij verschillende toevoegingen met melasse zijn vergeleken met toevoeging van zwavelzuur. Deze proef is uitgevoerd in 250 ml potjes met 100 gram mest. Hieraan is 0 tot 6 ml 2M zwavelzuur en/of 0 tot 14

gram melasse toegevoegd, in verschillende combinaties. De hoeveelheid melkzuur die potentieel gevormd kon worden uit melasse is berekend uitgaande dat uit 1 mol glucose 2 mol H^+ gevormd kon worden. De daadwerkelijke hoeveelheid H^+ uit melasse is geschat door de minimale pH per behandelingen te vergelijken met de hoeveelheid zwavelzuur die nodig was om eenzelfde pH te bereiken. Hieruit is het aanzurend rendement van de melasse berekend als het percentage van de potentiële H^+ dat daadwerkelijk gevormd werd. Bij behandelingen met zwavelzuur en melasse is gecorrigeerd voor de hoeveelheid H^+ uit zwavelzuur.

Resultaten

Tabel L geeft de gemeten pH en het berekende aanzurend rendement van melasse. Wanneer de minimale pH tussen twee behandelingen met alleen zwavelzuur viel, is het gemiddelde hiervan genomen als werkelijke hoeveelheid H^+ gevormd uit melasse. Het rendement varieerde van 26% tot 114%. Over het algemeen gold dat de pH niet onder de 4 uitkwam, waardoor een overmaat aan melasse een lager rendement opleverde. Wel bleef bij deze behandelingen de pH langer laag. In één geval werd een rendement van meer dan 100% berekend. Dit was bij de laagste dosering van melasse. Waarschijnlijk zat het werkelijke rendement tegen de 100% zijn en is de rest te verklaren door de meetfout in het afwegen van de mest en melasse, het toevoegen van het zwavelzuur en de pH-meting.

Tabel L. pH metingen bij proef rendement van aanzuren met melasse.

ml 2M H_2SO_4	g melasse	mmol glucose	mmol H^+ uit H_2SO_4	mmol H^+ uit glucose potentieel	mmol H^+ uit glucose werkelijk	pH dag 1	pH dag 2	pH dag 3	pH dag 6	pH dag 10	pH dag 16	pH dag 23	pH dag 29	Rendement (%)
0	0	0	0	0		7,33	7,16	7,19	7,23	7,21	7,01	7,16	7,64	
1	0	0	4	0		6,77	6,55	6,78	7,01	7,00	6,89	6,95	7,47	
2	0	0	8	0		6,32	6,16	6,56	6,73	6,82	6,91	6,89	7,40	
3	0	0	12	0		5,46	5,43	5,53	6,11	6,62	6,72	6,64	7,15	
4	0	0	16	0		4,91	4,94	4,96	4,89	5,03	5,76	6,08	6,63	
5	0	0	20	0		4,46	4,40	4,46	4,46	4,43	4,51	4,76	5,37	
6	0	0	24	0		3,60	3,66	3,72	3,73	3,75	3,81	3,89	3,89	
0	2,8	7	0	14	16	7,42	6,44	5,50	4,99	6,64	6,95	6,97	7,35	114
0	5,6	14	0	28	20	7,38	6,45	5,15	4,64	4,49	4,53	4,58	6,07	71
0	8,4	21	0	42	22	7,51	6,46	5,24	4,65	4,42	4,28	4,96	6,83	52
0	11,2	28	0	56	22	7,45	6,52	5,29	4,68	4,46	4,29	4,31	4,71	39
0	14	35	0	70	18	7,62	6,69	5,38	4,75	4,52	4,41	4,32	4,53	26
1	2,8	7	4	14	12	6,77	6,33	5,08	4,51	5,31	6,57	7,12	7,32	86
1	5,6	14	4	28	16	6,69	6,3	5,06	4,56	4,28	4,43	4,77	6,58	57
1	8,4	21	4	42	18	6,88	6,38	5,03	4,56	4,33	4,30	4,24	4,65	43
1	11,2	28	4	56	18	6,9	6,42	5,13	4,56	4,36	4,27	4,37	4,51	32
2	2,8	7	8	14	8	6,09	6,03	4,97	4,74	5,59	6,44	6,98	7,29	57
2	5,6	14	8	28	14	6,22	6,08	4,79	4,24	4,14	4,17	4,49	6,31	50
2	8,4	21	8	42	14	6,23	6,14	4,92	4,37	4,19	4,13	4,24	5,25	33
3	5,6	14	12	28	10	5,54	5,57	4,95	4,30	4,08	4,11	4,39	4,66	36

Andere reststromen

Verkend is of glycerine, wei en vinasse interessante reststromen zijn. Zo ja dan zouden die kunnen worden meegenomen in een gedetailleerdere beproeving (wat uiteindelijk niet is gebeurd)

Opzet

Drie andere reststromen die zijn onderzocht zijn glycerine, wei en vinasse. Deze zijn alle drie in afzonderlijk proeven onderzocht in 250 ml potjes met 100 g mest. Van glycerine werden behandelingen met 2,5% 5% en 10% uitgevoerd. Van vinasse werden behandelingen met 5%, 10% en 20% uitgevoerd. Van wei was al bekend dat het enkel in hogere doseringen effectief kan zijn, dus werd hiervan 30% en 50% toegevoegd. De toegevoegde vinasse had een pH van 1,5. De pH van wei is niet gemeten, maar varieert veelal tussen 4,5 en5.

Resultaten

Onderstaande tabellen geven de resultaten van de proeven met glycerine, wei en vinasse. Bij alle behandelingen met glycerine kwam de pH binnen 12 dagen niet onder de 6,0. Bij behandelingen met 2,5% en 5% liep de pH vanaf dag 12 alweer op.

Wei zorgde direct voor een verlaging van de pH, maar bij 50% wei kwam de pH niet lager dan 6,12 op dag 4, waarna de pH weer opliep. Afhankelijk van de samenstelling van de mest kunnen nog grotere hoeveelheden nodig zijn om de pH onder de 5,5 te krijgen.

Vinasse zorgde direct voor een sterke pH verlaging tot 2,6 bij 20% vinasse. Bij geen van de behandelingen daalde de pH na de initiële pH-daling nog verder. Vinasse kan dus wel gebruikt voor het initieel aanzuren van mest, maar is vanuit het perspectief van biologisch aanzuren minder interessant.

Tabel M1. pH metingen bij proef met glycerine.

Behandeling	pH start	pH dag 1	dag 2	dag 3	dag 5	dag 9	dag 12
Glycerine 2.5%	7,63	7,44	7,44	7,51	6,82	6,64	6,91
Glycerine 5%	7,63	7,54	7,47	7,54	6,86	6,24	6,38
Glycerine 10%	7,63	7,53	7,45	7,61	7,02	6,32	6,01

Tabel M2. pH metingen bij proef met wei.

Behandeling	pH dag 1	pH dag 4	pH dag 8	pH dag 14
Wei 30%	6,79	6,47	6,63	6,83
Wei 50%	6,6	6,12	6,48	6,68

Tabel M3. pH metingen bij proef met vinasse.

Behandeling	pH start	dag 1	dag 3	dag 8	dag 11	dag 15	dag 18	dag 22	dag 25	dag 29
Vinasse 5%	7,20	4,74	4,82	4,8	5,21	5,32	5,53	6,49	6,89	7,08
Vinasse 10%	7,20	3,68	3,65	3,61	3,64	3,63	3,64	3,67	3,63	3,61
Vinasse 20%	7,20	2,6	2,74	2,74	2,76	2,73	2,76	2,79	2,74	2,72

Zuurvraag

Mest verschilt sterk in bufferende werking. Verkend is of er een relatie is tussen mestkenmerken en de benodigde hoeveelheid zuur om een pH van 5 of 5,5 te realiseren op basis van de uitgevoerde proeven. Dat bleek niet goed mogelijk. De zuurvraag van mest het best bepaald kan worden door het maken van een titratiecurve

Resultaten

De zuurvraag van mest om een bepaalde pH te realiseren kan sterk verschillen. Bij de vier proeven varieerde de hoeveelheid zwavelzuur dat nodig was om de pH tot 5,0 te verlagen van 1,9 tot 5,5 liter per m^{-3} mest. Om gewassen en reststromen goed te doseren, is het dus belangrijk om de zuurvraag van de mest te bepalen. Een mogelijkheid hiervoor is om de zuurvraag te schatten aan de hand van gemeten mesteigenschappen. Tabel N geeft de R-kwadraat waarden voor mesteigenschappen versus de hoeveelheid zwavelzuur die nodig is om mest aan te zuren tot pH 5,5 en pH 5,0. Hiervoor zijn regressies gedaan met de 6 mesten gebruikt voor de proeven. Op de waarde voor MgO na, zijn de berekende R^2 laag en daarnaast is het aantal mesten dat is gebruikt ook te klein om hier conclusies aan te verbinden. Bij een vergelijkbare analyse met 17 verschillende mesten in de Baltische staten kon ook geen duidelijk verband worden aangetoond tussen de zuurvraag en gemeten mesteigenschappen (Pizzul et al., 2018). In de praktijk zal dit betekenen dat de zuurvraag van mest het best bepaald kan worden door het maken van een titratiecurve.

Tabel N. R-kwadraat waarden voor mesteigenschappen versus de hoeveelheid zwavelzuur die nodig is om mest aan te zuren tot pH 5,5 en pH 5,0 (n=6).

	DS	OS	N-tot	C/N	$N\text{-}NH_3$	N-org	P_2O_5	K_2O	MgO	pH
R^2 pH 5,5	0,19	0,20	0,40	0,14	0,21	0,30	0,06	0,07	0,79	0,51
R^2 pH 5,0	0,35	0,25	0,52	0,23	0,17	0,48	0,11	0,04	0,92	0,29

Bij de proeven was de zuurvraag van de mest afhankelijk van het volume mest dat werd gebruikt. Bij proeven met kleinere hoeveelheden mest (100 g) was de zuurvraag hoger dan bij proeven met grotere volumes (2 kg). Dit kwam voornamelijk doordat de pH sneller begon op te lopen bij kleinere hoeveelheden. Een relatief groot contactoppervlak met de lucht in verhouding met de hoeveelheid mest kan hierbij een rol spelen (Pizzul et al., 2018).

Bijlage 2. Zure ontsluiting van mais

Aanleiding

De proeven met toevoeging van snijmaiskuil hebben aangetoond dat er enige verzuring optreedt in de mest door fermentatie. Op basis van het aanwezig zetmeel zou er veel meer potentieel moeten zijn voor mestverzuring. Kennelijk kan het aanwezige zetmeel slechts beperkt worden omgezet in suikers beschikbaar voor fermentatie tot melkzuur. De vraag is hoe ontsluiting van mais en of andere producten is te optimaliseren zodat uit natuurlijke grondstoffen meer suikers beschikbaar komen en daarmee beter geschikt worden voor mestfermentatie en wat dit betekent voor het biogaspotentieel. Bekend is dat met zure ontsluiting meer suikers beschikbaar kunnen komen uit de mais en dat dit beter gaat naarmate de temperatuur hoger is. Via een simpele proef kan dit worden gedemonstreerd.

Doel

Verkennen in welke mate suikers beschikbaar kunnen komen door zure ontsluiting van ingekuilde snijmais, hoe dit te optimaliseren is en wat dit betekent voor de biogasproductie. Het navolgende is niet meer dan een aanzet ter beantwoording van de vragen in doelstelling.

Uitvoering simpele proef met snijmais

Ingekuilde snijmais met pH 4,0 werd verkregen van een boer in Haren (Gr). Een hoeveelheid van 400 gram werd met 12 ml dan wel 28 ml 4M H_2SO_4 gedurende 24 en 48 uur geïncubeerd bij 95 ^oC in Weckflessen van 1 liter. Daarmee wordt glucose en xylose vrijgemaakt. Deze zijn geanalyseerd via HPLC, evenals de aanwezige hoeveelheid melkzuur en azijnzuur. Op basis van een titratiecurve met zwavelzuur was van tevoren berekend dat genoemde hoeveelheden zwavelzuur leiden tot een pH van respectievelijk 2 en pH 1.

Het drogestofgehalte van de mais werd bepaald door drogen gedurende 6 uur bij 105 ^oC op 33%. Naar schatting bevat de mais ca 35% zetmeel, 22 % hemicellulose + pectine, 21% cellulose en 4% lignine en 3% organische zuren (azijnzuur, appelzuur, citroenzuur).

Resultaat voorbehandeling mais

Door de ontsluiting vervloeit de mais tot een soort dunne pap.

In Tabel 2A is te zien dat de ontsluiting leidt tot het vrijmaken van de suikers xylose en glucose en de zuren melkzuur en azijnzuur. Te zien is dat ontsluiten bij pH 1 meer suikers en zuren oplevert dan bij pH 2 (ongeveer 20 % extra). Verlenging van de tijdsduur levert eveneens meer suikers en zuren op (ongeveer 35-40%). Daarbij levert verlenging van 24 naar 48 uur bij pH 2 een hogere productie van suikers en zuren op dan ontsluiten bij pH 1 gedurende 24 uur. Het waargenomen melkzuur is waarschijnlijk al in de kuil aangemaakt uit zetmeelsuikers. Opmerkelijk is dat xylose uit hemicellulose aanzienlijk hoger is dan de glucose die uit zetmeel vrijgemaakt wordt.

Bij pH 1 kon ca 57% geïdentificeerd worden als vrije suiker of azijnzuur of melkzuur. Bij pH 2 was dit 51% na 48 uur. Het is mogelijk dat er nog maltodextrines aanwezig zijn die niet op de gebruikte HPLC-kolom aangetoond kunnen worden.

Tabel 2A. Ontsluiting van 1 kg snijmaiskuil (330 g droge stof) bij pH 1 en 2 en de verkregen hoeveelheid suikers en zuren in grammen.

Tijdsduur	Xylose	Glucose	Melkzuur	Azijnzuur	Totaal
pH = 1					
24 uur	87	17	25	18	147
48 uur	121	22	24	22	189
pH = 2					
24 uur	75	16	23	12	125
48 uur	106	20	25	17	168

Discussie

Hoeveel mest kan worden aangezuurd met ontsloten mais?

Het experiment bij pH 1 levert uit 330 gram droge stof 189 gram suikers en organische zuren. Dit is 57%. Per ton ontsloten maiskuil dus 189 kg. Per ton maiskuil is 28 kg zwavelzuur toegevoegd, dit is equivalent met 30 kg melkzuur. Ruwweg is 25 kg suiker of melkzuur nodig om 1 m^3 mest van pH 7,3 op pH 5,5 te brengen (en 30 kg voor pH 5) Op basis van deze vuistregel kan één ton maiskuil na incubatie gedurende 48 uur bij pH 1 een hoeveelheid van (189+30)/25= 8,7 m^3 mest aanzuren met een volume toename van 11,5% als gevolg.

Ingeval de maiskuil bij pH 2 werd behandeld kan worden berekend dat 181/25= 7,25 m^3 mest kan worden aangezuurd met één ton zuurbehandelde maiskuil waardoor een volume toename van bijna 14 % resulteert.

Verhoging van biogasopbrengst

Uitgaande van ca 600 m^3 biogas opbrengst uit 1 ton mais droge stof, kan worden berekend dat de 9,7 (8,7+1) m^3 aangezuurde mest (ontsloten bij pH 1) per m^3 mest 600*(1*0,33)/9,7=20 m^3 extra biogas oplevert. Voor de mest die met mais ontsloten bij pH 2 is aangezuurd is dit zelfs 600*(1*0,33)/8,25= 24 m^3 biogas extra. Bij de mildere zuurbehandeling van de maiskuil komt de niet voor het aanzuren van mest beschikbare koolhydraten in ieder geval wel bij de biogas productie tot hun recht.

Economie

Kosten per ton maiskuil: Euro's

- Verse mais per ton (33% ds en 120€/ ton ds 40
- Inkuilen 10-15
- Zwavelzuur pH 1 400€/ton* 28 kg 11,2
- Zwavelzuur pH2 400€/ton * 12 kg 4,8
- Maleinezuur pH 2 2000€* 12 24
- Warmte 20 C*4,2MJ*6€/1000 MJ= 0,48
- Incubatie vat 100 m^3 =150k€
    - Jaarkosten 20.000€ bij 150 incubaties van 50 m^3/j 2,7

De totale kosten voor ontsluiting met zwavelzuur bedragen dan 63-68 € voor pH 2 en 69-74€ voor pH 1. Hieruit volgt € 9,0 en € 8,2 kosten per m^3 mest voor respectievelijk mais bij pH 2 en pH 1 behandeld.

Inkomsten:

Behalve de ammoniak- en de methaanemissie reductie voor het milieu levert de route van aanzuren per m^3 mest ca 10-15 m^3 biogas verlies minder op dan gangbare mest en bovendien 20-24 per m^3 biogas uit de mais. Dit betekent per ton ontsloten maiskuil 250-300 m^3 biogas. Bij een toegerekende waarde

van € 0,5 per m^3 biogas representeert dit een waarde van € 125- 150 per ton met zuur behandelde maiskuil.

Perspectief ontsluiten

Ontsluiten bij lage pH en hoge temperatuur werkt. Het nadeel van de inzet van zwavelzuur voor pH verlaging is dat het zwavelgehalte van de mest toeneemt met 0,5 of 1 kg/m^3 mest indien aangezuurd wordt bij pH 2 dan wel pH 1. Langere incubatietijden kunnen verlaging van zwavelzuurconcentratie mogelijk maken. Een andere strategie om geen zwavelverhoging te krijgen is het gebruik van organische zuren zoals maleinezuur dat succesvol is toegepast door Kootstra et al. (2009). Maleinezuur zou zwavelzuur kunnen vervangen bij pH =2. De kosten worden daardoor € 20 hoger per m^3 verse mais maar er komt € 7,5 meer aan biogasproductie terug.

Uitgaande van een samenwerking van boeren met gezamenlijk 800 koeien en dus en 24.000 m^3 mest per jaar moet ca 3000 ton maiskuil worden zuurbehandeld met een volume van ca 7.500 m^3. Het best is dat de samenwerkende boeren op één bepaalde plaats een aantal maiskuilen aanleggen en dat deze gedurende het jaar in een propstroomvat met vijzelschroef ter menging en verplaatsing van de ingekuilde mais wordt gevoerd zodat deze ook verwarmd ton 95 ^oC kan worden met warmtewisseling in tegenstroom. Tijdens de ontsluiting verliest de maiskuil zijn structuur en krijgt deze een ca twee en half keer kleiner volume. Een deel van de ontsloten mais wordt teruggemengd in de inkomende stroom samen met de benodigde hoeveelheid zuur, waardoor het zuur zich veel beter kan mengen met de mais. Daardoor zal waarschijnlijk aan verblijftijd bespaard kunnen worden ten opzichte van de batch aanpak zoals hierboven beschreven en daardoor zal niet een berekend reactor volume van 40 m^3 nodig zijn maar is naar verwachting 25 m^3 al toereikend. De zuurbehandelde mais wordt uit de reactor met tankwagens van 35 ton naar de tussenopslagen bij de deelnemende boeren getransporteerd voordat deze in de mestput wordt ingemengd.

In plaats van snijmais zou men kunnen kiezen voor energiemais als grondstof om de discussie Food or Fuel niet te hoeven voeren.

Bij verkleining van de veestapel zal er land beschikbaar komen om mais te (blijven) telen. Met een ha mais kan men ca 420 m^3 mest aanzuren (de mest van 14 koeien) en dit levert ca 10.800 m^3 biogas op met waarde van € 5.400 ha bij een biogasprijs van € 0,50. Wordt gerekend met een groengasprijs van € 1,55 dan levert 1 ha mais kuil naast een reductie van de ammoniak- en methaanemissie, een omzet van € 9.300.

Bijlage 3 Gewassen en gasproductie

Gewassen

Algemeen

Mais, voederbieten, silphie en sorghum kunnen worden ingezet cosubstraat bij de vergisting van mest (vooral in Duitsland). Getest is of deze gewassen ook inzetbaar zijn bij biologisch aanzuren van mest. Uit de proeven bleek dat vooral voederbieten goed inzetbaar zijn voor mestverzuring. Met de andere gewassen kon de mest niet voldoende worden aangezuurd (pH 5,5). Er was daarnaast inzet van melasse nodig. In het navolgende zijn de gewassen en de teelt kort beschreven inclusief enkele bijzonderheden (zie ook Tabel 3A). Voor meer achtergrondinformatie wordt verwezen naar teelthandleidingen van de gewassen. Aansluitend is met behulp van copilot berekend wat de kosten van een substraatmix van gewas en melasse en welke methaanproductie te verwachten is.

Silphie

Silphie kan ingezet worden als voedergewas of als cosubstraat bij mestvergisting voor de productie van biogas, zoals in Duitsland nu meer en meer gebeurt ter vervanging van mais. Silphie is een meerjarig (20-30 jaar) gewas, dat 1 tot 2 keer per jaar geoogst kan worden. De opbrengst varieert tussen 12-20 ton droge stof per hectare op basis van de review van Bufe & Korevaar, 2018. Volgens Kestem & Kempenaar (2024), kan silphie zelfs 18 tot 22 ton droge stof opbrengen. De teelt van silphie draagt bij aan het verbeteren van de biodiversiteit en organischestofopbouw in de bodem. Het bloemvormende gewas is aantrekkelijk voor bijen en andere insecten (Bufe & Korevaar, 2018).

Biertümpfel et al. (2018) hebben een teelthandleiding opgesteld, inclusief een kostencalculatie van de teelt en de inzet als voedergewas of als cosubstraat. Het meerjarige gewas vergt weinig bemesting (Biertümpfel et al., 2018). Na de aanleg is ongeveer 135 kg N per ha nodig bij een jaarproductie va 15 ton ds/ha. Silphie is wel gevoelig voor plagen en ziekten. Het oogsten van silphie kan met dezelfde apparatuur als bij mais. Na de aanleg (die duur is) vergt de teelt weinig werk. Biertümpfel et al. (2018) berekenen productiekosten (van teelt tot oogst) over een periode van 10 jaar van gemiddeld ongeveer € 0,16 per kg droge stof. Na 10 jaar neemt de jaarproductie wat af. De voederwaarde van silphie is iets lager dan die van mais. Bij inzet als cosubstraat is de methaanproductie 10 tot 15% lager dan die van mais per kg ds (Biertümpfel et al., 2018). Schürlein (2017) en Hermann et al. (2016) hebben respectievelijk een ruim 15% en 30% lagere gasproductie gemeten in vergelijking tot mais.

Sorghum

Het LBI heeft teeltbrochure opgesteld voor sorghum (Bruinenberg et al., 2023). Het van oorsprong subtropische gewas wordt op bescheiden schaal geteeld in Nederland. Het heeft een minimumtemperatuur van 12 graden nodig voor het kiemen van de zaadjes (Verstand et al., 2022). In Nederland wordt daarom geadviseerd om sorghum tussen 15 mei en begin juni te zaaien (Bruinenberg et al., 2023). Sorghum heeft een korte groeiperiode (ongeveer 3 maanden). Als veevoer heeft het een lagere voederwaarde dan mais (ongeveer 20%; Bruinenberg et al., 2023). Het streven is om het gewas in zijn geheel te oogsten en in te kuilen bij ongeveer 28-32% drogestof. Wel zijn er grote verschillen in rassen qua voederwaarde. Sorghum heeft een lage behoefte aan water en nutriënten, wat gepaard gaat met lagere kosten (de stikstofbehoefte bedraagt ongeveer 100-20 kg N er ha). Volgens Kestem & Kempenaar (2024) kan sorghum een droge stof opbrengen van 15 tot 20 ton per hectare en groeit het

goed op zand, klei en veengronden. In de proeven genoemd in Bruinenberg et al. (2023), varieert de opbrengst veelal tussen 10 en 15 ton ds per ha. De totale teeltkosten voor sorghum zijn berekend op € 1.215 per ha (ofwel € 0,08-0,12 per kg ds), wat ruim 500 euro lager is dan die van mais (Bruinenberg et al., 2023). Wel is de opbrengst van mais meestal 25-40% hoger per teelt. De biogasproductie per kg organische stof is 5%-15% lager dan bij mais afhankelijk van het ras (Herrman et al., 2016).

Voederbiet

Voederbiet is een geschikt gewas voor veevoer. Voederbieten hebben een hoge eiwit- (DVE) en energiewaarde en worden daarom worden ingezet als krachtvoervervangers. Het is een gewas dat zeer goed tegen droogte kan en hoge opbrengsten geeft van 16-25 ton (mede beïnvloed door het oogtijdstip, voederbieten kunnen lang doorgroeien). Het wordt veelal geoogst tussen september en half december. De interesse voor de teelt is de laatste jaren toegenomen. In vergelijking tot mais draagt het meer bij aan de biodiversiteit (Bussink et al, 2020). Het areaal bedroeg 4600 ha in 2025. Er is potentie voor meer ha's maar de complexheid van de teelt, de benodigde inzet van gewasbeschermingsmiddelen en de hoeveelheid werk werkend belemmerd ondanks het feit dat de teelt van voederbieten een saldoverbetering kan geven van 40 tot 80 euro per koe per jaar (Bussink et al., 2020). Voederbieten kunnen niet jaarrond worden opgeslagen. Per 1 april mogen er geen voederbieten meer aanwezig op bedrijven. Het telen en oogsten van voederbieten kost tussen de 1800 en € 2.200 afhankelijk van de specifieke omstandigheden. Ruwweg komt dit overeen met een kostprijs van krap € 0,10 per kg ds. De biogasproductie per kg organische stof is ongeveer 10% hoger dan bij mais (Herrman et al., 2016).

Mais

Mais is na gras het belangrijkste veevoergewas. Het heeft een hoge voederwaarde (bevat veel zetmeel) en bevat weinig eiwit (Van Schooten et al., 2017). Mais heeft een zeer hoog productiepotentieel, tot wel 25 ton ds per ha. In de praktijk varieert het echter veelal tussen 12 en 20 ton ds/ha (lage opbrengsten o.a. door droogte). De maiszaai start vanaf eind april. Na opkomst van mais vindt veelal 1 keer een bespuiting plaats tegen onkruid al dan niet in combinatie met mechanische onkruidbestrijding. Vaak wordt mais ook beregend en is het nodig om 1 of 2 keer gewasbescherming toe. Bij de oogst varieert het drogestofgehalte veelal tussen 28 tot 35 procent. Het zetmeelgehalte verschilt tussen de 250 en 400 g zetmeel/kg DS. Meer informatie over de teelt is gegeven in Handboek snijmais. De teeltkostenbedragen ongeveer € 1.750 per ha (Bruinenberg et al., 2023). Bij 16 ton ds/ha komt dat overeen met € 0,115 per kg ds.

Tabel 3A. Enkele kenmerken over de teelt van mais, sorghum, silphie en voederbiet.

	Mais	Sorghum	Silphie	Voederbiet
Teeltduur	eind april- half sept/okt	half mei -eind augustus	meerjarig, 10 tot wel30 jaar*	april- december
Opbrengst (ton ds/ha)	12-20 (16)	10-15 (12,5)	12-20 (16)	16-25 (18,5)
grondsoort	geen veen	geen veen	Alle (pH >5.5)	geen veen
N-bemesting (kg per ha jaar)	112-165	60-80	120-150	132 -165
Onkruidbestrijding	1, 2 keer	aanbevolen	Eerste 2 jaar	frequent
Teeltkosten (€ per kg ds)	0,115	0,10	0,16*	0,11

* Gebaseerd op Duitse cijfers

Verzuringseffect van gewassen

De uitgevoerde proeven laten zien dat van de 4 geteste gewassen voederbiet de sterkste biologische verzuringsbron is. Bij een dosering van 50 kilogram droge stof per ton mest daalt de pH tot circa 5,0–5,1, zonder toevoeging van melasse. Daarmee is voederbiet het enige gewas dat zelfstandig in staat is om de gewenste zuurgraad te bereiken. Bij lagere doseringen – zoals 10, 16,7 of 25 kg ds – is een aanvulling met melasse nodig om pH 5 te halen, maar de benodigde hoeveelheid melasse neemt af naarmate meer voederbiet wordt toegevoegd.

Mais heeft minder verzuringskracht dan voederbieten. Er was in alle geteste situaties een aanvulling met melasse nodig. Sorghum en silphie bleven duidelijk achter ten opzichte van mais. Zelfs bij hoge doseringen bleef bij deze gewassen de pH boven 5,5, waardoor veel melasse nodig is. Dit maakt deze gewassen economisch ongeschikt als verzuringsbron, al kunnen ze ecologisch waardevol zijn binnen biodiversiteitsgerichte teeltsystemen.

Op basis van de uitgevoerde proeven is uitgegaan van 70 kg melasse per m^3 drijfmest. Daarbij bestaat de drijfmest in veel van de uitgevoerde proeven uit 1deel urine en 2 delen feces.

Kostenvergelijking combinaties van gewas en melasse voor de productie van groengas bij vergisting

De kosten per ton mest worden bepaald door de kosten van het gewas en de benodigde hoeveelheid melasse. Omdat melasse relatief duur is, daalt de totale kostprijs wanneer een gewas voldoende verzuring levert om de melasse dosering te verlagen. Tabel 3B toont de kostenvergelijking van gelijkwaardige combinaties van gewas en melasse om pH 5 te realiseren in wat dat betekent voor de totaal substraat kosten en de verwachte methaanopbrengst bij vergisten (exclusief de bijdrage vanuit de mest zelf). Te zien is dat de hogere drogestofdoseringen gewas bij voederbieten en mais met minder melasse inzet van melasse leiden tot een lagere substraatprijs en lagere prijs per kg te produceren methaan. Bij silphie en sorghum wordt de substraatprijs juist hoger. Alleen doordat hier het toegevoegde gewas hier ook meer groengas produceert is de substraatprijs per g groengas lager dan bij melasse.

Tabel 3B. Scenario's van gewas + melasse waarbij pH 5 wordt gerealiseerd en de substraatkosten en de extra verwachte groengas (gg) opbrengst per ton drijfmest en de substraatkosten oer extra m³ groengas.

Gewas + melasse	Gewas (kg ds/ton)	Melasse (kg/ton)	Gewaskosten (€/ton)	Melassekosten (€/ton)	Totale kosten (€/ton)	gg gewas (m³/ron)	gg melasse (m³/ton)	gg totaal (m³/ton)	substraat € per m³ gg
Voederbiet	10	60	1,1	9	10,1	2,8	15	17,8	0,57
	16,7	50	1,837	7,5	9,337	4,7	12,5	17,2	0,54
	25	40	2,75	6	8,75	7	10	17	0,51
	50	**0**	**5,5**	**0**	**5,5**	**14**	**0**	**14**	**0,39**
Mais	10	65	1,2	9,75	10,95	3	16,25	19,25	0,57
	16,7	**55**	**2**	**8,25**	**10,25**	**5**	13,75	18,75	0,55
	25	**45**	**3**	**6,75**	**9,75**	**7,5**	11,25	18,75	0,52
	50	30	6	4,5	10,5	15	7,5	22,5	0,47
Sorghum	10	70	1	10,5	11,5	2,7	17,5	20,2	0,57
	16,7	65	1,67	9,75	11,42	4,5	16,25	20,75	0,55
	25	60	2,5	9	11,5	6,8	15	21,8	0,53
	50	50	5	7,5	12,5	13,5	12,5	26	0,48
Silphie	10	70	1,6	10,5	12,1	2,3	17,5	19,8	0,61
	16,7	65	2,67	9,75	12,42	3,8	16,25	20,05	0,62
	25	60	4	9	13	5,8	15	20,8	0,63
	50	55	8	8,25	16,25	11,5	13,75	25,25	0,64
Alleen melasse	0	70	0	10,5	10,5	0	17,5	17,5	0,60

Biogasopbrengst

De methaanopbrengst van gewassen** varieert tussen 230 en 300 m³ CH_4 per ton DS, afhankelijk van het gewas. Melasse heeft een zeer hoge vergistbaarheid door het hoge suikergehalte en levert ongeveer 0,20 m³ CH_4 per kilogram melasse. Hierdoor draagt melasse in veel scenario's substantieel bij aan de totale biogasproductie.

Bij voederbietdoseringen van 50–60 kg ds per ton mest ontstaat een interessante situatie: de pH daalt voldoende zonder melasse, terwijl de methaanopbrengst uit het gewas zelf oploopt tot 14–17 m³ CH_4 per ton mest. Dit maakt voederbiet zowel vanuit verzuring als vanuit energieopbrengst de meest efficiënte optie.

Conclusie

Voederbiet is de meest effectieve en economisch aantrekkelijke biologische verzuringsbron. Het gewas combineert sterke verzuring met een gunstige kostenstructuur en een hoge methaanopbrengst. Voor bedrijven die melasse willen blijven gebruiken, is een dosering van 25 kg ds voederbiet per ton mest het economisch optimum. Voor bedrijven die melasse willen vervangen, vormen doseringen van 50 tot 60 kg ds per ton mest een effectief en kostenefficiënt alternatief. Mais is biogastechnisch interessant,

maar minder geschikt voor verzuring. Dat kan veranderen als verdere ontsluiting (zoals eerder geschetst mogelijk wordt). Sorghum en silphie zijn vanuit verzuringsperspectief niet aan te bevelen.

Op basis van Europese cijfers voor energiegewassen in biogasinstallaties:

- Voederbiet (suikerbiet): ≈ 280 m³ CH_4/ton DS
- Mais: ≈ 300 m³ CH_4/ton DS
- Sorghum (Sudangras): ≈ 270 m³ CH_4/ton DS
- Silphie: ≈ 230 m³ CH_4/ton DS

Referenties

Bussink W, Thijssen D, Hoekstra S, Knol W & Heijdra L (2020). Natuur-inclusieve landbouw met de voederbiet, samenvattende notitie. Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 1713b.N.17, pp 25

Biogasausbeuten verschiedener Substrate - Programm Berechnung - LfL

Herrmann C, Plogsties V, Willms M, Hengelhaupt F, Eberl V, Eckner J, Strauß C, Idler C, Heiermann M (2016). LANDTECHNIK 71(6), 2016, 194–209. DOI:10.15150/lt.2016.3142

Van Schooten, H., Philipsen, B., & Groten, J. (2019). Handboek snijmaïs no 40. WUR. Pp.197

Biertümpfel A, Köhler J, Reinhold G, Götz G & Zorn W (2018). Leitlinie zur effizienten und umweltverträglichen Erzeugung von Durchwachsener Silphie. Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft. Jena. Pp. 23

Bruinenberg, M, van Eekeren N, van Agtmaal M, Klop A, Boerboom N, Kuenen R, Maas L, van Summeren T, & de Milliano WAJ (2023). Teeltbrochure Sorghum: Sorghum als potentieel voedergewas in de melkveehouderij. Louis Bolk Instituut.

Bufe C, & Korevaar H (2018). Evaluation of additional crops for Dutch list of ecological focus area: Evaluation of Miscanthus, Silphium perfoliatum, fallow sown in with melliferous plants and sunflowers in seed mixtures for catch crops. Wageningen Plant Research. https://doi.org/10.18174/444086

Kestem L. & Kempenaar C (2024). Innovatie en perspectief voor de landbouw. Ministerie van LNV. https://edepot.wur.nl/646561

Schürlein AK (2017). Vergärung von Durchwachsener Silphie - Beurteilung mittels eines Gärtestes. Phytobiotics Futterzusatzstoffe GmbH / SensoPower. Eltville. Pp 10

Bijlage 4 Lezingen en bijeenkomsten

Biologisch aanzuren is een vrije nieuwe oplossingsrichting voor het verminderen van emissies. Dit heeft impact op het bedrijf maar ook op de omgeving (bijvoorbeeld meer mestvergisters). In diverse lezingen en interactieve sessies is biologisch aanzuren onder de aandacht gebracht. Kort samengevat wordt het als kansrijk gezien mits voldoende onderbouwd (door onder andere pilots in de praktijk). Hieronder is een lijst van bijeenkomsten en overleggen weergegeven sinds eind 2024

19 september 2024
Leerzame sessie over biologisch aanzuren van mest | Praktijkaanpak Emissiearme Veehouderij

4 december 2024
Bijeenkomst Regio orgaan te Veenendaal. Presentatie over biologisch aanzuren in de praktijk; Pilot Groningen

4 februari 2025
Presentatie Groningse aanpak voor de opgaven landelijk gebied in Den Haag voor ambtenaren. Daar werd ook nadrukkelijk ingegaan op de mogelijkheden van biologisch aanzuren

6 mei 2025 Laren/Lochem
Bijeenkomst met veel boeren georganiseerd door For Farmers

9 december 2024 en 24 juni 2025
Gesprekken met diverse boeren over, monomestvergister Vinkenbuurt en biologisch aanzuren

14 april 2026
Gesproken met de mestverkenner Knops te Groningen in het kader van TripleP+

20 juni 2025
Presentatie resultaten biologisch aanzuren op bedrijf Pimmelaar te Groningen. Publiek ambtenaren, agrarisch ondernemer, pers en andere belangstellenden

Provincie steunt proef met biologisch aanzuren van mest - RTV Noord en
Provincie omarmt 'kansrijke proef': biologisch aanmengen van mest kan stikstofuitstoot terugdringen - RTV Noord

4 maart 2026
Manureresource bijeenkomst te Wageningen. Lezing over perspectief biologisch aanzuren en een lezing over geconcentreerd fosfaat terugwinnen na aanzuren

19 maart 2026 Arnhem
Slot symposium 'Praktijkaanpak emissiearme veehouderij'. Forfarmers is sinds voorjaar 2025 ook actief betrokken bij biologisch aanzuren en gaf een presentatie op het symposium PowerPoint-presentatie gebaseerd op de bevindingen tot dusver (ref) en wat de mogelijkheden zijn

Voorjaar 2026
Gesprekken met ZuivelNL, WUR, Frieslandcampina, Forfarmers en NMI over de route tot inbedding in de Kringloopwijzer.

Juli 2025-2026
Realisatie TripleP+. Met een breed consortium is in opdracht van de Provincie Groningen een blauwdruk opgesteld. Dit document maakt inzichtelijk hoe emissiereductie, groengasproductie,

nutriëntenbenutting en een toekomstbestendig verdienmodel voor de landbouw in samenhang kan worden gerealiseerd. Het biedt een oplossingsrichting voor de bottom-up vastgestelde gebiedsplannen en de bijbehorende opgaven. Biologisch aanzuren van mest en deze vervolgens vergisten om zo en minder emissies te realiseren en meer groen gas maakt daar een centraal onderdeel van uit.

Daarnaast is er gesproken met diverse bedrijven: Aware Friesland Campina, DOC, Rabo Cosun Biolectric For Farmers Agrifirm de Heus Oosterhof Holman, Twence en met diverse politieke ambtsdragers.

Ook zijn er diverse publicaties geweest in de vakpers en op regio tv (zie hierboven 20 juni 2025).

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