



Vergisting op praktijkschaal van biologisch aangezuurde mest in Niebert

J.P.M. Sanders

D.W. Bussink

J. van der Veen

G. van der Veen

Sanovations bv

nmi  soil for life

Nutriënten Management Instituut BV

e-mail: nmi@nmi-agro.nl

website: www.nmi-agro.nl

Referaat

Sanders JPM, Bussink DW, Van der Veen J, en van der Veen G, 2025, Vergisting op praktijkschaal van biologisch aangezuurde mest in Niebert, Nutriënten Management Instituut BV, Wageningen, Rapport 2035c.N.24, pp. 28.

Rapport in het kort

Vergisting van biologisch aangezuurde rundveemest in een anaerobe pilotvergister met 2,5 m³ inhoud is beschreven in Sanders en Bussink (2025). Het bleek dat de vergisting ruim 3 keer zo snel verliep dan die van reguliere mest. “The proof of the pudding is in the eating”. In dit vervolgonderzoek is biologisch aangezuurde mest (via melasse verkregen) als toeloop voor een praktijkschaal vergister gebruikt. Nagegaan is of de ruim drie maal hogere volumetrische biogasproductiviteit die bereikt werd in de pilotvergister nu ook op praktijkschaal kon worden aangetoond.

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

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

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

Disclaimer

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

Verspreiding

Provincie Groningen

digitaal

Inhoudsopgave

Samenvatting	2
1 Inleiding	4
2 Materialen en Methoden	5
3 Resultaten	7
3.1 Algemeen	7
3.2 Indeling proefperioden, bijzonderheden en resultaten samengevat	7
3.3 Stabiliteit vergister pH gedurende de proef	9
3.4 Biogasopbrengst in de verschillende periodes.	9
3.5 Volumetrische productiviteit	11
3.6 Temperatuur van de vergister	11
3.7 Kwaliteit van het digestaat	11
3.8 Het methaangehalte van het biogas	12
3.9 Beperkingen proefopstelling	13
4 Discussie	14
4.1 Oorzaak H ₂ S-vorming en oplossingsrichtingen	14
4.2 Het methaangehalte van het biogas	16
4.3 Lonkend perspectief: half regulier en half aangezuurd vergisten	16
5 Conclusies en aanbevelingen	18
6 Acknowledgements	19
7 Referenties	20
Bijlage 1: H₂S-vorming en wegvangen door reactie met ijzer	21
Bijlage 2. Toeloop van verschillende mestsoorten tijdens de proef	25
Bijlage 3. Analyses Opure	26

Samenvatting

Gebruik makend van 2000 m³ biologisch aangezuurde mest werd in een anaerobe vergister met 1450 m³ werkvolume op praktijkschaal biogas geproduceerd bij 42 °C. Het doel was om aan te tonen dat de gemiddelde verblijftijden van 36-42 dagen voor mest in de vergister die gebruikelijk zijn in de sector aanzienlijk kon worden verkort bij behoud van een hoge biogasproductie, en of dit de eerdere resultaten in 2025 met een pilotvergister van 2,5 m³ bevestigt (reductie van de verblijftijd met een factor 3). Tevens was het doel om de biogasopbrengst per m³ biologisch aangezuurde mest te bepalen onder praktijkcondities. In een voorbereidingsfase met reguliere mest werd de spreiding van verschillende operationele parameters bepaald, zodat na start van de toeloop met aangezuurde mest, bij duidelijke afwijking van de kritische parameters, er snel zou kunnen worden ingegrepen indien het vergistingsproces verstoord dreigde te worden. Omdat er een beperkt volume aangezuurde mest beschikbaar was, is de vergister tot 1200 m³ vulling afgetapt om zo snel mogelijk op de samenstelling van aangezuurde mest te komen.

De biogasopbrengst met de praktijkschaal vergister bedroeg circa 50 m³ biogas/m³. Dit was circa 5 m³ hoger dan eerder in de pilotvergister werd gerealiseerd. De hogere biogasopbrengst per m³ mest kan veroorzaakt zijn door een hogere temperatuur (42 °C) ten opzichte van die in de pilot vergisterproef (37 °C) en/ of door een hogere melasseconcentratie in de aangezuurde mest 7,5% ten opzichte van 6,7% in de pilot. De hoge biogasopbrengst werd al na twee dagen na overschakeling op aangezuurde mest bereikt. Bijzonder is dat het biogas uit aangezuurde mest een significant 10% hoger methaangehalte (relatief) had dan normaliter wordt gemeten bij de productie van biogas uit mest.

Bij een gemiddelde verblijftijd van 28 dagen werd een volumetrische productiviteit bereikt van 2,2 m³ biogas/m³ vergister/dag. Dit is aanzienlijk hoger dan de 0,7 m³ biogas/m³/dag welke bij het goed functioneren van boerderij monomestvergisters bereikt kan worden. Nog kortere verblijftijden met alleen aangezuurde mest (tot 14 dagen op basis van de pilotvergister) en daarmee een nog hogere gasproductie per dag waren niet mogelijk tijdens deze proef vanwege de beperkte capaciteit van de aanwezige warmtekrachtkoppeling (WKK) wat zou leiden tot het affakkelen van en het teveel aan geproduceerde biogas. Wel kon een kortere verblijftijd van 21 dagen worden getest door de helft van de biologisch aangezuurde mest te vervangen door reguliere mest met aanzienlijk lagere biogasopbrengst per m³ mest, wat resulteerde in een volumetrische productiviteit van 2,0 m³/m³/dag. Dit toont aan dat een bestaande monomestvergister (bij een verblijftijd van 40 dagen) een tweemaal groter volume mest kan vergisten. Omdat ook de biogas opbrengst per m³ mest een stuk hoger ligt dan die uit gangbare mest, leidt dit tot een driemaal hogere biogasopbrengst uit dezelfde bestaande vergister. Op basis van deze resultaten kan de huidige vergistingscapaciteit zonder veel grote investeringen eenvoudig met een factor 3 opgeschaald worden wat positief is voor het businessmodel. Voor het verkrijgen van deze extra vergistingscapaciteit hoeft dus niet geïnvesteerd te worden in extra vergistervolume en is eveneens geen bouwvergunning nodig. Als de gasproductie zo fors wordt verhoogd is in de praktijk wel een grotere gasopwerking nodig en daarmee een nieuwe vergunning. Voor bedrijven met een monomestvergister die nog elektriciteit opwekken met een WKK, zal de overstap naar groengasproductie gemakkelijker te behappen zijn vanwege de relatief hoge kosten van groengasopwerking bij kleine installaties.

Er zijn problemen geweest door overmatige H_2S -productie als gevolg van een te hoge vergistertemperatuur (46°C in plaats van 42°C). Deze liep ongewenst snel op door de snellere biochemische omzettingen met meer biogas tot gevolg en omdat de WKK door meer biogas inzet voor elektriciteitsproductie ook meer warmte produceerde dan nodig is om de vergister op een optimale werktemperatuur te houden. In de proefserie kon de H_2S effectief worden weggevangen door toedienen van ijzerpoeder.

De hoge concentraties H_2S in het biogas hadden voorkomen kunnen worden door:

- zorgen voor een goede afvoer van het overschot aan warmte, zodat de vergistertemperatuur niet boven de 42°C uitkomt. Met de snelle vorming van biogas uit aangezuurde mest is er eigenlijk weinig reden om de vergisting boven de 37°C uit te voeren. Hiertoe moet de warmte van de WKK te Niebert niet op de vergister worden weggekoeld. Beter is het om biogas op te werken tot groengas, dan is dit probleem er niet meer en neemt het energetisch rendement toe;
- vroegtijdiger ingrijpen op het oplopen van de H_2S -concentratie in het biogas en beter nog door monitoring van de opgeloste H_2S -concentratie in de vloeistof in de vergister zodat het niet zo ver komt dat biogasproductie afneemt; en
- of door preventief ijzerhydroxide te doseren bij verzwaring van de procescondities, maar daar zijn relatief hoge kosten aan verbonden.

Conclusies

Biologisch aangezuurde mest laat zich goed vergisten in een praktijkschaal vergister van 1450 m^3 inhoud bij een verblijftijd van 28 dagen. Dit is ook het geval wanneer een 1:1 mengsel van gangbare mest en aangezuurde mest wordt ingezet bij een verblijftijd van 21 dagen. Dit betekent dat het 1:1 vergisten van mest en aangezuurde mest uitzicht biedt op:

- een verdubbeling van het mestvolume dat door bestaande vergisters kan worden verwerkt; en
- een verhoging van de biogasopbrengst uit bestaande vergisters met een factor 3.

1 Inleiding

Algemeen

Nederland zit in de ban van de stikstofproblematiek. De uitstoot van stikstof moet drastisch omlaag. Tegelijkertijd is er een overschot aan stikstof in dierlijke mest nu per januari 2026 de derogatie volledig afgeschaft wordt en ook Nederlandse boeren zich moeten houden aan de maximale gift van 170 kg N uit dierlijke mest per hectare landbouwgrond zoals dit in de Nitraatrichtlijn is afgesproken. Biologisch aanzuren van mest in de put en op de roostervloer is op praktijkschaal in 2024 en 2025 getoetst (Meiresonne et al., 2024 en Bussink et al., 2025). Doorrekening van 15 scenario's op milieu en economische prestatie laat zien dat biologisch aanzuren (door toevoeging van melasse) een kansrijke route is om te volgen. De uitgevoerde metingen en berekeningen laten zien dat de emissies van ammoniak en methaan sterk afnemen in de stal. Tegelijkertijd is er een sterke toename van de biogasproductie uit de toegevoegde melasse maar ook doordat bij lage pH geen methaan meer gevormd wordt en ontsnapt uit de mestput tijdens het opslaan van de mest (Bussink et al., 2025). De kosten voor melasse worden grotendeels tot meer dan gedekt door de extra biogasopbrengst afhankelijk van schaalgrootte en groengasprijzen. De meeropbrengst aan groengas in combinatie met de kortere verblijftijden zijn de economische pijlers onder het systeem. Sanders en Bussink (2025) tonen aan dat de aangezuurde mest al met korte verblijftijden van 12 dagen in een 2,5 m³ pilotvergister, hoge biogasopbrengsten opleveren, tot wel 4 keer hoger per m³ vergister inhoud per dag in vergelijking met reguliere monomestvergisters.

Dit rapport beschrijft de resultaten van een kortlopend project in opdracht van de Provincie Groningen van het testen van de vergisting van biologisch aangezuurde mest op praktijkschaal, in een Oosterhof-Holman vergister van 1450 m³ inhoud. De vergisting wordt bij hoge temperatuur bedreven (42 °C).

Doelstelling

Kan biologisch aangezuurde mest op praktijkschaal vergist worden bij korte een HRT* (verblijftijd) met behoud van een hoge gasproductie? Welke factoren zijn hierop van invloed? Daartoe zal worden verkend:

- de pH stabiliteit van de vergister bij korte verblijftijden
- de biogasopbrengst bij diverse verblijftijden;
- of er onverwachte opschalingsproblemen zijn;
- de optimale verblijftijd en doorstroomsnelheid;
- de kwaliteit van het digestaat; en
- de meerwaarde van aangezuurde mest voor grootschalige vergisters.

*HRT, hydraulic retention time is de ratio van vergister volume en dagelijkse toevoer van mest(fractie) in een continue geroerde vergister of wel de verblijftijd.

2 Materialen en Methoden

Proefopzet/uitvoering/kwaliteit van de mest

Gedurende een periode van ongeveer 10 weken vanaf half april 2025 zal 2000 m³ aangezuurde mest worden vergist in een 1500 m³ vergister. Deze mest is afkomstig van boer Pimmelaar in Schildwolde en aangezuurd vanaf augustus 2024 (Bussink et al., 2025).

De ervaring opgedaan op pilotschaal (vergistervolume 2,5 m³) (Sanders en Bussink, 2025) was leidend in het ontwerpen van de huidige proef op grote schaal. Het is de bedoeling om bij stabiele vergisting de verblijftijd van de mest te verkorten en dus de invoer hoeveelheid mest per dag te verhogen. Er zal worden gestart met een aanlooffase (periode 1) van twee weken, waarin nog reguliere mest met vaste stalmest zal worden vergist (zie Bijlage 2 voor hoeveelheden mest per dag tijdens de gehele proef). In deze fase worden een aantal metingen gedaan om inzicht te krijgen in de spreiding van verschillende belangrijke parameters, zoals pH, temperatuur en CH₄- en H₂S-gehalte. Na deze aanlooffase zal aangezuurde mest worden gedoseerd (max 60-90 m³ per dag). Gedurende 10 weken zullen verschillende aanpassingen worden doorgevoerd gedurende perioden van 1 tot 2 weken met betrekking tot de invoeding van aangezuurde mest. De aanpassingen worden sterk bepaald door de bevindingen van de voorafgaande periode.

Gedurende het gehele experiment worden een aantal analyses verricht:

- Om mogelijke verzuring van de vergister vroegtijdig te detecteren zullen dagelijks pH-metingen en FOS/TAC analyses worden uitgevoerd (zie Sanders en Bussink, 2025). De FOS/TAC verhouding geeft een indicatie van de stabiliteit van het fermentatie proces. Een goede FOS/TAC verhouding zorgt voor evenwicht tussen de productie van vluchtige vetzuren zoals azijnzuur, propionzuur en boterzuur en de capaciteit deze met voldoende carbonaten te bufferen. Een te hoge FOS/TAC verhouding wijst op ophoping van vetzuren meestal doordat de methaanvorming geremd wordt en dit kan leiden tot verzuring van de vergisting waardoor de vergister een tijd buiten werking kan treden. Omdat het streven is steeds grotere hoeveelheden aangezuurde mest toe te voegen, is het monitoren van de FOS/TAC essentieel.
- De samenstelling van het digestaat en de aangezuurde mest zal aan het begin en eind van de proef worden gemeten.
- Aan het eind van de proef vinden biogas- en restgasproductiemetingen plaats van verschillende monsters om de efficiëntie van de vergisting te kunnen berekenen. Deze zullen worden uitgevoerd door Opure in Ede.

Vooraf is een proefschema opgesteld wanneer er monsters ter analyse genomen moeten worden.

De biogasopbrengsten van de vergister zullen indirect worden bepaald door uit te gaan van de opgewekte stroom in kWh, waardoor enige onnauwkeurigheid insluit vanwege verschil in efficiency bij verschillende biogas belasting van de warmtekrachtkoppeling (WKK). Indien de WKK, in feite de motor die gevoed wordt met biogas en die een elektrische generator aandrijft, een elektrisch rendement van 33% heeft (bij volledige belasting) dan is voor elke kWh_e er 3 kWh_e input nodig in de vorm van biogas. 3 kWh = 10,8 MJ_t. De opbrengsten aan biogas zullen worden teruggerekend naar 1 m³ biogas met 20 MJ/m³. Dus 1 kWh_e heeft bij 33% elektrisch rendement 10,8/20 = 0,54 m³ biogas nodig. Bij een lage belasting van de WKK zal er een lager elektrisch rendement zijn van bijvoorbeeld 25% wat overeenkomt met 1 kWh_e en 0,72 m³ biogas.

Met behulp van een Multitec 545 | Sewerin gassamenstellingsmeter zal minimaal dagelijks het: CH₄, CO₂, O₂ en H₂S-gehalte worden gemeten van het geproduceerde biogas.

Behalve bovenstaande analyses zal elke dag genoteerd worden: soort en hoeveelheid mest, pH van vergisterinhoud, temperatuur van de vergister, dagelijkse stroomopbrengst, bijzonderheden zoals bijvoorbeeld mogelijke stilstand van de WKK bijvoorbeeld vanwege negatieve stroomprijzen overdag, toeloop van hoeveelheid en eventueel benodigd ijzerhydroxide om H₂S-vorming tegen te gaan.

3 Resultaten

3.1 Algemeen

Door omstandigheden startte de proef een maand later dan gepland waardoor na een aanloopfase van twee weken (periode 1) pas half mei biologisch aangezuurde mest werd ingevoerd. Meerdere keren per week (en soms meerdere keren per dag) werd mest aangevoerd van het bedrijf Pimmelaar in hoeveelheden van 35 m³ per vracht. Deze werden opgeslagen in een tussenopslag van waaruit de vergister werd gevoed met wisselende hoeveelheden. De latere start had tot gevolg dat de mestput in Schildwolde vanaf mei erg vol zat waardoor het mengen slecht ging en de pH is opgelopen ondanks dat in deze periode extra melasse werd gedoseerd tot 7,5% v/v. De pH van de aangezuurde mest was tijdens de eerste helft van de vergisterproef net onder pH 6 en in tweede helft van de proef liep deze langzaam op tot 6,2 veroorzaakt doordat de put steeds leger werd en het aandeel verse mest daardoor groter.

3.2 Indeling proefperioden, bijzonderheden en resultaten samengevat

Ten tijde van het begin van periode 2 (22 mei) werd de biogasopbrengst van de aangezuurde mest bepaald door Opure op 46 m³ biogas/m³ mest (na 40 dagen in de test bij Opure, Bijlage 3).

In de navolgende stappen (opgedeeld in 9 perioden met een verschillende tijdsduur) is weergegeven welke aanpassingen in de 10 weken durende proef hebben plaatsgevonden.

Periode 1, 6-18 mei 2025: Aanloopfase met mengsel van reguliere mest en vaste stal mest.

Periode 2, 19-25 mei: Elk uur werd 2,5 m³ aangezuurde mest gedoseerd ofwel 60 m³ per dag. De gemiddelde verblijftijd bedroeg 27 dagen.

Nadat de vergisting stabiel werd is de invoersnelheid van de mest verhoogd.

Periode 3: 26 mei - 2 juni: De beoogde gemiddelde verblijftijd was nu 20 dagen. Met twee dagen beperkte toeloop (minder dan 60 m³) vanwege stilzetten WKK vanwege hoge stroomleverprijzen werd de gemiddelde verblijftijd over de periode 24 dagen.

Op 26 mei ging de H₂S-concentratie in het biogas omhoog; deze is dankzij ijzertoediening op 29 mei weer naar normale lage waarden teruggeakt. De doseerpomp ging stuk rond 30 mei. De rookgaswarmtewisselaar is verstopt geraakt en de reparatie ervan kostte een week. De vergister werd op een verlaagde invoer van 10 m³ per dag gezet teneinde de microbiologie intact te laten en na de reparatie weer met een hogere invoer de draad weer op te pakken.

Periode 4, 3-10 juni: Gedurende deze periode is de WKK gerepareerd vanwege verstopping van de rookgaswarmtewisselaar, waarschijnlijk veroorzaakt door te hoge H₂S-gehalten. Dit werd daardoor een waakvlamperiode met een lage toeloop van aangezuurde mest.

Periode 5, 11-18 juni: Versnellen toeloop van mest tot 60 m³ per dag met ijzerdoseringen om H₂S te neutraliseren.

Periode 6, 19-30 juni: Dit was een stabiele fase maar de toeloopsnelheid moest beperkt worden tot 50 m³ gemiddeld (HRT 28 dagen) omdat de WKK niet meer biogas kon verwerken. In monster digestaat

van 22 juni nadat 12 dagen steeds aangezuurde mest was toegelopen, kon nog 7 m³ (na 40 dagen) biogas worden gemeten als restgas.

Periode 7, 1-6 juli: Omdat de WKK een beperkte capaciteit had kon met aangezuurde mest vanwege de hoge biogasproductie per m³ geen kortere verblijftijden worden onderzocht (<25 dagen). Omdat gangbare mest een veel lagere biogas opbrengst per m³ mest kent, konden we dat wel met een mix van half reguliere mest en half aangezuurd mest. In deze periode werd de toeloop vergroot tot 60-70 m³ (HRT 21 dagen). In feite is hier de vraag onderzocht of een bestaande monomestvergister die op reguliere mest bij een verblijftijd van 40 dagen biogas maakt een dubbele hoeveelheid mest kan vergisten door de verblijftijd te halveren zonder noemenswaardig verlies aan biogasopbrengst. In monster digestaat van 6 juli nadat 6 dagen steeds 1:1 reguliere mest en aangezuurde mest was toegelopen, kon nog 9 m³ (na 40 dagen) biogas worden gemeten als restgas.

Periode 8, 7-10 juli: Afbouw naar Business as usual (gewone mest en stalmest): De aangezuurde mest was vrijwel opgebruikt.

Periode 9, 11-21 juli: Business as usual.

De belangrijkste resultaten zijn per periode samengevat in Tabel 3.1 en worden hierna verder toegelicht.

Tabel 3.1 Samenvatting van verschillende proefresultaten.

Periode	datum		tempe- ratuur Vergis- ter C	biogas prod/ verwach- ting*	HRT (dag)	vol. Prod m ³ /m ³ .d	ijzer (kg Fe(OH) ₂ /m ³	H ₂ S ppm**	CH ₄ ⁺ %	CO ₂ ⁺⁺ %
1	6-18/5	aanloop- fase	42,5	0,9	46	0,7	0	198	63	39
2	19-25/5	voorzich- tige start	45,1	0,99	27	1,9	0	380	67	36
3	26/5- 2/6	H ₂ S remming	43	0,4	24	0,9	4,6	446	71	32
4	'3-10/6	reparatie en opstart	41,6	0,62	60	0,5	0	22	68	35
5	11-18/6	versnellen met ijzer	42,4	0,7	24	1,6	2,5	379	70	29
6	19-30/6	beperkt door WKK	44,1	1,1	28	2,2	3	378	69	30
7	1-6/7	versnellen helft Amest	45	1,07	21	2	3,7	147	68	30
8	7-10/7	afbouw naar BAU	45,1	1,04	23	1,5	2,4	88	67	33
9	11-21/7	Business as usual	45,8	0,73	26	0,9	0	166	63	37

* reguliere mest 30 m³ biogas/m³; vaste mest 75 m³/m³ en aangezuurde mest 50 m³ biogas/ m³ mest

** in periode 3 werd op twee dagen 1200 ppm gemeten

+ laagste 59% op 6 mei en hoogste 72% op 2 juni

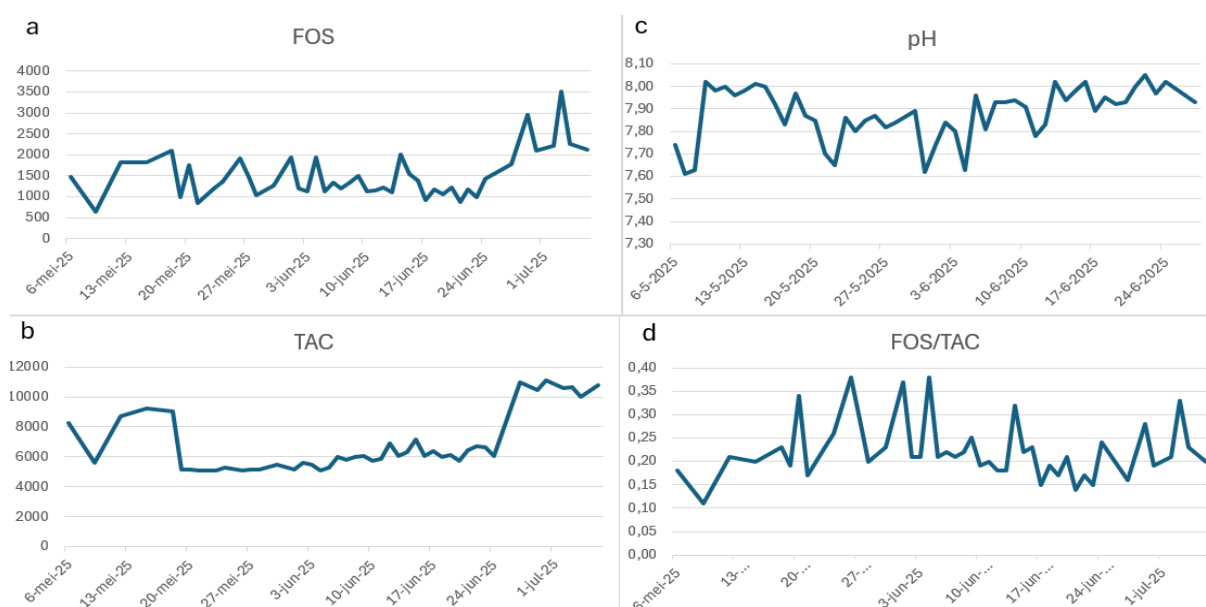
++ hoogste 44% op 6 mei en laagste 25% op 13 juni

+++ Opgemerkt moet worden dat de methaancijfers systematisch 5% te hoog worden weergegeven veroorzaakt door de ijkmethode van de gasmeter.

3.3 Stabiliteit vergister pH gedurende de proef

De vergister in Niebert heeft een bovenroerder en een onderroerder met in totaal een capaciteit van 35 kW. Gedurende de proef hebben de roerders 30 minuten per uur gedraaid. Bij goede menging zoals in de pilotvergister wordt elk uur de toeloop van mest met lage pH snel weggemengd over het veel groter volume (>500 keer) van de hele vergister en bij voldoende biologische activiteit wordt het melkzuur omgezet naar methaan en CO₂ waardoor het zuur in feite wordt geneutraliseerd. De vraag is de mengfunctie van de roerder in de 1450 m³ vergister toereikend is en blijven er geen zones met lage pH in de vergister waardoor de vergister gaat verzuren? De metingen werden op 6 mei opgestart (periode 1, de aanloopfase) om inzicht te krijgen van de normale schommelingen bij het meten van deze parameters. Het blijkt dat het mengen van de aangezuurde mest in de vergister gedurende de 10 weken zonder problemen is verlopen, want de pH blijft stabiel. Zelfs uit de FOS/TAC (Figuur 3.1) metingen is geen aanwijzing verkregen dat de vergisting minder stabiel is geweest tijdens de proefperiode. De pH werd elke dag gemeten in het digestaat en was over de gehele periode gemiddeld 7,86 met als laagste waarde 7,62 en als hoogste waarde 8,05. Zie Figuur 3-1 c.

Om de overschakeling van reguliere mest naar aangezuurde mest sneller te kunnen bereiken, werd vlak voor het begin van periode 2 op 19 mei het niveau van de mest in de vergister tot 1200 m³ teruggebracht en dit niveau kwam in een aantal dagen weer op het normale werkvolume van 1450 m³ terug door de toeloop van aangezuurde mest.



Figuur 3.1 FOS, TAC, en pH verloop gedurende de gehele proefperiode.

3.4 Biogasopbrengst in de verschillende periodes.

Teneinde een vergelijking tussen verschillende periodes van de gasopbrengsten mogelijk te maken werd de waargenomen biogasopbrengst gedeeld door de verwachte biogasopbrengst. Deze verwachte biogasopbrengst werd voor de reguliere mest op 30 m³ biogas per m³ mest ingeschat, op basis van de verblijftijd in de mestput voor vaste stalmest op 75 m³ biogas en 50 m³ biogas/m³ voor de aangezuurde mest (Deze 50 m³ biogas/m³ is behaald bij mest met een OS van 74 g/kg in analyses door Opure (Bijlage 3). De analyse van Eurofins geeft een waarde van 81 g/kg voor de OS. Dit betekent dat de opbrengst aan biogas van 50 m³/m³ mogelijk ook 10% hoger kan zijn geweest). Deze waarde werd berekend na correctie vanwege het methaangehalte van 69,7% tov 55-57% die in biogas van gangbare mest verkregen wordt. De biogasopbrengst per m³ was groter dan gemeten tijdens de pilotproef in

Schildwolde (Sanders & Bussink, 2025) omdat daar de genormeerde hoeveelheid m^3 werd bepaald terwijl in Niebert de calorische waarde van het biogas werd berekend uit de kWh opbrengst per uur. Vanwege het gemeten hoger CH_4 -gehalte dat uit aangezuurde mest kan worden opgewekt (zie sectie 3.8 en tabel 3-1 hieronder) zou het biogas uit Schildwolde dus ook gecorrigeerd moeten worden naar 20 MJ per m^3 biogas. De meting van Opure (Bijlage 3) van aangezuurde mest (Amest) op 22 mei toonde 46 m^3 biogas per m^3 mest na correctie voor het hogere methaangehalte. Periode 1 en 2 komen vrijwel op de biogas opbrengstverwachting uit (zie Bijlage 1 voor de hoeveelheden van reguliere mest, stalmest aangezuurde mest die per dag zijn toegelopen aan de vergister).

Al twee dagen na overschakeling op aangezuurde mest ging de biogasproductie naar de hoeveelheid die overeenkwam met de hoeveelheid biogas die uit berekening op basis van hierboven genoemde biogasopbrengst inschattingen maximaal uit de toegelopen aangezuurde mest behaald kon worden. Dit werd ook zichtbaar door verhoging van de temperatuur in de vergister veroorzaakt door de biologische warmte uit de omzetting van melkzuur naar CH_4 en CO_2 , maar vooral door de restwarmte van de WKK die op de vergister werd gekoeld.

In periode 3 blijft de biogasproductie zwaar achter bij de verwachte opbrengst veroorzaakt door remming vanwege hoge H_2S -concentraties (tot wel 1200 ppm). De gasproductie liep constant terug vanaf 24 mei bij een H_2S -gehalte van ca 400 ppm en 284 ppm op 25 mei. Op 26 mei bedroeg het H_2S -gehalte 800 ppm en op 27 en 28 mei zelfs 1200 ppm. De terugval in biogasproductie die op 24 mei inzette was dus het gevolg van H_2S -remming en had direct moeten leiden tot ijzerdosering. De dosering van ijzerhydroxide is pas begonnen op 27 mei toen het H_2S -gehalte 1200 ppm bereikte.

Het in de vergister aanwezige Thiobacillus systeem (Buisman et al., 1991) kon de H_2S niet langer voldoende in elementaire zwavel omzetten. Doserend van ijzerhydroxide was noodzakelijk en afdoende om de biogasproductie weer op niveau te krijgen. Om ijzerhydroxide te kunnen doseren in de vorm van afvalwaterzuiveringsslib, is het nodig om tegelijkertijd ook 4 ton stalmest toe te voegen aan de vergister vanwege de vermengbaarheid in de vergister en om te vermijden dat het ijzer naar de bodem van de vergister zakt.

Opure (Bijlage 3) heeft de H_2S -concentratie in biogas uit aangezuurde mest geproduceerd bij 37 °C bepaald op 220 ppm. Dit is een normale waarde en weinig hoger dan die in periodes 1 en 9 gemeten werden in biogas met lagere methaangehaltes.

In periode 4 en 5 komt de biogasproductie weer langzaam op gang door gericht ijzerhydroxide toe te voegen waardoor in periode 6 de stabiele biogasproductie bereikt wordt. Periode 6, 7 en 8 komen goed op de verwachting uit.

Periode 6, bij een HRT van 28 dagen, ligt 10% boven de verwachte gasopbrengst. Kortere verblijftijden konden niet getest worden vanwege de beperkte WKK capaciteit en dus kon er geen hogere biogasproductie worden bereikt omdat de capaciteit van de WKK de beperkende factor was. Er werd 8 m^3 restgas gemeten per m^3 digestaat uit deze periode. Dit is een normale waarde.

In periode 7 is daarom gekozen om de helft van de Amest te vervangen door reguliere mest met een lagere opbrengst per m^3 , zodat er wel met een kortere HRT van 21 dagen konden worden vergist met een 7% hogere gasopbrengst dan verwacht als resultaat. Aan deze 107% mag geen absolute waarde worden gekoppeld, deze weergave als opbrengst ten opzichte van verwachting maakt de vergelijking tussen periodes overzichtelijker. Er had van een ander rendement van de WKK kunnen worden uitgegaan of andere maximale biogasopbrengst uit de verschillende gebruikte mestsoorten. Er werd 10,5 m^3 restgas gemeten per m^3 digestaat uit deze periode. Deze waarde ligt hoger dan uit het digestaat van slechts aangezuurde mest uit periode 6 veroorzaakt door een korte verblijftijd en/ of doordat de gangbare mest langzamer vergist dan aangezuurde mest.

In feite is hier een resultaat gerealiseerd waarmee op bestaande monomestvergisters - waarin op dit ogenblik slechts (dagverse) mest wordt toegelopen - bij een HRT van circa 40 dagen een

mestcapaciteitverdubbeling als invoer verkregen kan worden door een gelijk volume aangezuurde mest extra boven op de huidige (dagverse) mest toeloop in te zetten.

Ook periode 8 komt de biogasproductie iets hoger uit dan de verwachte waarde.

Periode 9 kwam met hoge vaste mest toeloop omdat er gebrek aan regulier mest was, met een lagere productie dan berekend. Bij voldoende lange verblijftijden zal de biogas opbrengst wel weer op peil terug komen.

3.5 Volumetrische productiviteit

De vijfde kolom van Tabel 3.1 geeft per periode de gemiddelde HRT aan, in feite de gemiddelde verblijftijd van de mest in de vergister. Zoals reeds beschreven door Sanders en Bussink (2025), en hierboven bij periode 6, leidt het biologisch aanzuren tot de verhoging van de biogasopbrengst verkregen per vergister volume en per tijdseenheid, de volumetrische productiviteit, zoals in kolom 6 van Tabel 3.1 weergegeven. Periode 1 toont met $0,7 \text{ m}^3$ biogas per m^3 reactor inhoud per dag een waarde die ook elders met een goed werkende monomestvergister wordt gehaald in Nederland en België. Periode 2 komt daar ruim 2 maal boven en periode 6 en 7 komen op een driemaal hogere volumetrische productie welke waarschijnlijk nog hoger kan bij kortere HRT. Sanders en Bussink (2025) hebben een volumetrische productiviteit van $3,5 \text{ m}^3/\text{m}^3$ dag bereikt met alleen aangezuurde mest bij een gemiddelde verblijftijd van 12 dagen.

3.6 Temperatuur van de vergister

De Niebert vergister wordt normaal bij hoog mesofiele/ laag thermofiele condities bedreven boven de 50°C . Uit voorzorg om de robuustheid van het microbiom zo goed mogelijk te behouden vanwege de korte verblijftijden die we van plan waren alsmede de te verwachten verhoogde warmteproductie die bij aangezuurde mest met 50 m^3 biogas per m^3 potentieel en de daarmee samenhangende lagere relatieve afkoeling van de vergister (zie hiervoor volgende paragraaf), hebben we de vergister temperatuur aan het begin van periode 1 op 42°C ingesteld. Deze temperatuur was einde periode 1 daadwerkelijk bereikt. In Tabel 3.1 staan de gemiddelde temperaturen vermeld van de volgende periodes. Duidelijk is te zien dat bij combinatie van korte verblijftijden met verwachte hoge biogasproductie, de temperatuur van de vergister oploopt. In periode 2 gemiddeld tot $45,1^\circ\text{C}$ en in periode 6,7 en 8 eveneens. Bij de omzetting van koolhydraten naar methaan en CO_2 komt ca $6,5\%$ van de energie die in methaan eindigt als warmte vrij. Behalve de biologische warmte komt tegelijkertijd extra warmte in de WKK beschikbaar wanneer door de hoge biogasproductie in periodes 2, 6, 7, 8 meer biogas wordt aangeboden. De WKK gebruikt de vergister om te koelen. Dus beide warmtebronnen werken additioneel. De buitentemperaturen waren in deze periode overdag $20\text{-}25^\circ\text{C}$ en 's nachts rond de 15°C .

3.7 Kwaliteit van het digestaat

Een monster Amest en een van het digestaat zijn eind juni onderzocht op samenstelling door Opure (Ede). (Tabel 3.2 en Bijlage 3)) In vergelijking met de analyses uit een vorig project waar Amest vergist werd met een HRT van 15 dagen in een pilot vergister van $2,5 \text{ m}^3$, zien we een lagere ammoniakale stikstof ten opzichte van N-totaal en zien we ook een lager kaliumgehalte, zowel voor het Amest monsters als ook het digestaat monster. Het drogestofgehalte en organische stof gehalte komen goed overeen met de eerdere analyses van monsters uit de pilot vergister in Schildwolde.

Als bemestingswaarde komt het digestaat uit de analyse erg overeen met het landelijk gemiddelde zoals door Eurofins vermeld. Het asgehalte ligt wat hoger veroorzaakt vooral door hoger kalium (uit de

melasse). Het ammoniakale N en organisch gebonden N komt niet-verwacht sterk overeen met het landelijk gemiddelde van niet vergiste mest. De stikstofwaarden uit het digestaat van 3 maart komt wel overeen met de verwachting dat een deel van de organisch gebonden stikstof wordt omgezet naar ammoniak. De afbraak van organische stof naar methaan en CO₂ is terug te zien terug in de analysesresultaten.

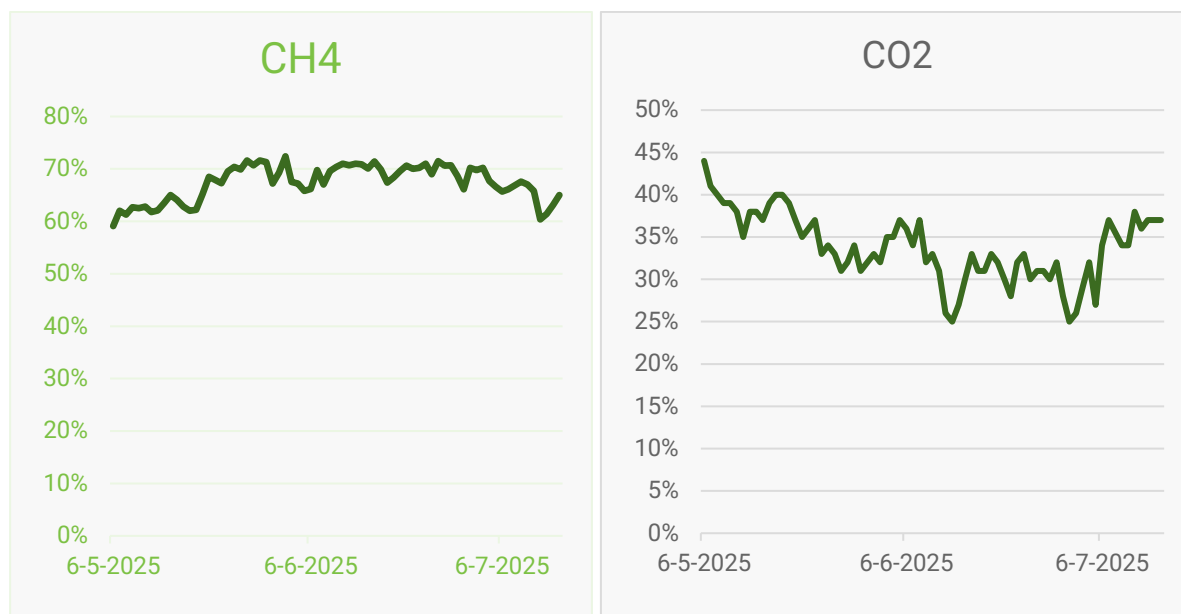
Tabel 3.2 Analyse van mest uit controleput, aangezuurde mest (Amest) en digestaat* uit de vergister in kg/m³(Eurofins).

ALNN		DS	RAS	OS	N	C/n	NH ₄ ⁺ -N	Org N	P ₂ O ₅	K ₂ O	MgO	Na ₂ O
Controle	30 nov	75	23	50	3,72	6,7	1,67	2,05	1,64	6,13	1,15	0,73
Amest	28 nov	101	28	73	3.99	9,1	1,67	2,32	1,5	9,59	0,96	1,76
Digestaat Amest	3 mrt	67	25	42	3,96	5,3	2,33	1,63	1,51	8,96	1	1,6
Amest	21 juni	108	27	81	4,6	8	1,5	3,1	1,67	8	1	1,6
Digestaat	22 juni	65	24	41	4,17	4	1,8	2,4	1,42	7,5	1	1,6
Landelijk gemiddelde		76	19	55	4,3		1,8	2,5	1,4	5,4	1,3	0,9

*digestaat uit de Amest (geanalyseerd door Opure, Bijlage 3) bevat 68 kg/ m³ droge stof en 43 kg/m³ organische stof. Digestaat uit het 1:1 gemengde mest 78 en 49 kg/ m³ DS en OS.

3.8 Het methaangehalte van het biogas

In de aanlooperperiode 1 en in Business as usual periode 9 bedraagt het methaangehalte van het biogas 63% (Figuur 3.2). In de tussenliggende periodes waar aangezuurde mest het hoofdbestanddeel was, bedroeg de methaanconcentratie rond de 70%. Dit betekent een verhoging van 12%. Complementair nam het CO₂-gehalte af van 39% en 37% in periode 1 en 9 tot 29%. Dat maakt het rendement groter bij



Figuur 3.2 Methaan- en CO₂-gehalten in het ontstane biogas tijdens de vergisting in Niebert.

de groengas opwerking en ook bij het comprimeren van biogas bij vergisters die te klein zijn om de investering in een groengasopwerking rendabel te laten zijn. Opgemerkt moet worden dat de methaancijfers systematisch 5% te hoog worden weergegeven veroorzaakt door de ijkmethode van de gasmeter. In de discussie sectie wordt ingegaan op verschillende oorzaken van deze methaangehalteverhoging van biologisch aangezuurde mest. Opure (Bijlage 3) heeft in het biogas geproduceerd uit aangezuurde mest een methaan gehalte van 69,7% gemeten als gemiddelde van 3 steekmonsters terwijl het methaangehalte uit twee restgasmetingen gemiddeld 58% te zien gaven, hetgeen 20% verhoging betekent.

3.9 Beperkingen proefopstelling

Vanwege netcongestie konden overdag de stroomprijzen voor teruglevering sterk negatief zijn waardoor het niet verantwoord was stroom te blijven maken. Daardoor moest biogas worden opgeslagen in de navergister, maar vanwege de maximale capaciteit van de WKK moest de dosering aangezuurde mest omlaag om de stilstand van de WKK te compenseren. Bij korte stilstand van de WKK kon het geproduceerde biogas gebufferd worden in de navergister; bij langdurige stilstand moest worden afgefakkeld.

Behalve enkele korte haperingen van de WKK met uitval tot gevolg is de WKK langdurig uitgevallen door verstopping van de rookgas koeler waarschijnlijk veroorzaakt door te hoog H_2S gehalte in het biogas. Dit H_2S wordt in de WKK geoxideerd tot zwavelzuur met aantasting van de rookgasreiniger tot gevolg.

Het hoogste vermogen van de WKK was 275 kW_e omdat de warmte niet anders afgevoerd kon dan naar de vergister. Daardoor kon een kortere HRT (hydraulic retention time= gemiddelde verblijftijd) dan 28 dagen niet getest worden behalve in periode 7 met 50% Amest en 50% gangbare mest met een HRT van 21 dagen.

4 Discussie

4.1 Oorzaak H₂S-vorming en oplossingsrichtingen

Hoeveel H₂S kan maximaal uit mest komen?

Verschillende verklaringen voor de hoge H₂S-productie in het biogas zijn systematisch geanalyseerd in bijlage 1, zoals:

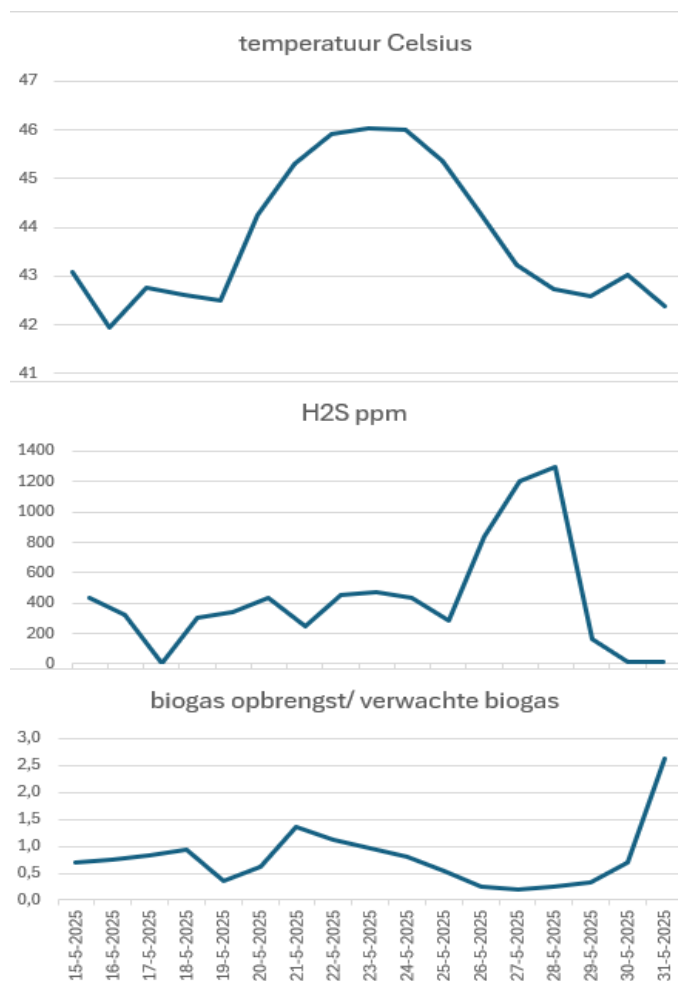
- Komt de hoge H₂S-productie uit de toegevoegde melasse?
- Hoeveel H₂S kan maximaal met Fe₂(OH)₃ dosering gebonden worden?
- Hoeveel H₂S zit in 50 m³ biogas met 1200 ppm die uit 1 m³ aangezuurde mest komt?
- Kunnen we sulfaat uit melasse verwijderen?
- Kan het H₂S probleem ontstaan door vorming uit een specifiek zwavelhoudende component, bijvoorbeeld sulfaat?
- Nalevering door latente ophoping
- Nalevering door verlaging H₂S oplosbaarheid door temperatuurverhoging

De meest waarschijnlijke verklaring voor de hoge productie van H₂S is toe te schrijven aan de verhoging van de temperatuur van de vergister. Het gas H₂S remt bij hoge temperatuur (55 °C) de methaanvorming al bij 400-800ppm. Bij 37 °C zal dat pas boven de 800- 1000 ppm het geval zijn. (Jung et al., 2019). Twee dagen na het bereiken van 46 °C begint de H₂S-vorming op gang te komen en krijgt zijn piek nog twee dagen later met 1200 ppm (Figuur 4.1). Uit voorzorg was de temperatuur al verlaagd tot 42 °C (19 mei), maar door de hoge toeloopsnelheid en het hoge biogaspotentiaal van aangezuurde mest, is er veel biologische warmte vrijgekomen in korte tijd en tegelijkertijd produceerde de WKK extra veel warmte die werd weggekoeld op de vergister waardoor de temperatuur van de vergister opliep tot 46 °C (23-25 mei). Bovendien was de buitentemperatuur rond de 20 °C waardoor de vergister minder afkoelde dan in de winter. In grotere vergisters zal het afvoeren van grote hoeveelheden warmte nog kritischer zijn.

De bovenstaande bevindingen leiden tot twee aanbevelingen om herhaling te voorkomen: Voorkom hoge temperatuur van de vergister door de koeling van de WKK niet meer op de vergister te doen en/ of door het wegnemen van warmte (koeling via afvoerwarmte middels warmtepomp zie sectie warmtehuishouding). De vergisting bij 37 °C uitvoeren leidt tot een stabiel systeem en de hoge snelheid van vergisting van aangezuurde mest compenseert de lagere temperatuur met gemak. Een tweede maatregel is eerder beginnen met preventief ijzerhydroxide doseringen. Uit voorzorg was het beter geweest bij de overgang naar hogere belasting van de vergister (verlaging van HRT) dit al meteen te doen en daarmee de H₂S-concentratie zeker niet hoger dan 400 ppm te laten worden. Systematisch ijzer toepassen is echter een kostbare aangelegenheid.

De pilotvergisting verliep bij 37 °C. Er zijn toen geen H₂S-concentraties bepaald, maar er is ook geen remming van de biogasproductie ondervonden bij de hoge volumetrische productiviteit van 3,5 m³ biogas/ m³ vergister inhoud per dag terwijl deze waarde in Niebert ongeveer 2 bedroeg. Opure heeft de H₂S-concentratie in biogas geproduceerd bij 37 °C uit aangezuurde mest bepaald op 220 ppm (bijlage 3). Een normale waarde weinig hoger dan die in periodes 1 en 9 gemeten werden in biogas met lagere methaangehaltes.

De veel lagere temperatuur van 37 °C is daarom aan te bevelen als vergistingstemperatuur. Hoge temperatuur vergisting bij een WKK om daarmee de afvalwarmte onder te brengen is voor de toekomst met groengasproductie dus geen relevante oplossing meer.



Figuur 4.1 Temperatuur en H₂S ontwikkeling en opbrengst biogas ten opzichte van verwachting.

Uit de berekeningen van de hoeveelheid zwavel en ijzer aanwezig in de mest blijkt dat het ijzerpoeder bij lange na niet gedaan heeft wat het had moeten doen. Een mogelijke oorzaak is slechte menging van het ijzer. De hoeveelheid H₂S die eenmaal in de headspace zit zal niet makkelijk reageren met ijzer in de mestoplossing, temeer doordat bij hoge temperatuurvergisting H₂S slechter oplosbaar wordt in water. De H₂S die in de naverdiger tijdelijk is opgeslagen in biogas zal zeker niet worden ingevangen door het ijzer in de hoofdvergister, omdat er weinig gasuitwisseling is tussen het gasgedeelte van de vergister en het gasgedeelte van de naverdiger. Doordat de biogasvorming thermofiel bij lagere concentraties al wordt geremd, zal in de gasmeting de H₂S die de vorige dag geproduceerd is nog lang blijven na-ijlen omdat het 'oude' biogas maar weinig verdund wordt met 'nieuw' biogas mede vanwege de lage productie. Een accurater signaal zou het meten van de H₂S-concentratie in oplossing zijn omdat dan eerder een stijging en daling van de H₂S-productie kan worden opgemerkt. In het derde panel van figuur 4-1 met biogasopbrengst zien we duidelijk dat de H₂S-productie wordt geremd en dat de productie (veel) hoger is dan verwacht na de periode van remming. Kennelijk komt het methaan vertraagd vrij.

4.2 Het methaangehalte van het biogas

Er is een combinatie van verschillende verklaringen voor de verhoogde methaanconcentratie aan te voeren (Figuur 3.2). Allereerst zal er bij mest met pH 5,5 minder CO₂ en carbonaten in oplossing zijn dan bij pH 7,5. Dit verschil is ca 85 mM of te wel 5 kg CO₂/m³ verschil. Tijdens de vergisting gaat de pH weer omhoog naar 8 en zal het digestaat weer CO₂ opnemen uit het geproduceerde biogas. Daardoor neemt het CO₂-gehalte af en dus het methaangehalte toe. In een vergisting met reguliere mest komt de mest met al CO₂ verzadigde toestand binnen en er is tijdens de vergisting dus geen ruimte meer om CO₂ uit biogas op te nemen. Dit effect zal door hoge temperatuur van de vergisting in Niebert kleiner zijn omdat bij hoge temperatuur de CO₂ minder zal oplossen in het digestaat. Om het methaangehalte van het biogas verder te verhogen zou dit nog een extra argument zijn de vergisting bij 37 °C te bedrijven.

Uit eerdere resultaten (Sanders en Bussink, 2025) is te zien dat er zich meer vetzuren ophopen tijdens het biologisch aanzuren dan dat er in reguliere mest aanwezig zijn. Ook dit zal leiden tot een verhoging van het methaangehalte in het biogas. Wanneer koolhydraten, melkzuur en azijnzuur worden omgezet in biogas zal het methaangehalte 50% zijn, maar bij de hogere vetzuren ligt dit anders. Propionzuur, boterzuur, valeriaanzuur en capronzuur zullen bij omzetting naar biogas respectievelijk 58, 62, 65 en 67% methaan opleveren.

Een derde mogelijke oorzaak van verhoogd methaangehalte kan zijn dat tijdens het aanzuren in de put een deel van de suiker is omgezet naar ethanol middels een heterofermentatieve route. Omzetting van ethanol naar methaan en CO₂ leidt tot biogas met een methaangehalte van 75%.

Terugkijkend op de pilotvergisting kan met deze kennis van verhoogd methaangehalte een correctie worden aanbrengen in de productie van biogas in de orde van 10%. In Figuur 3.2 van Sanders en Bussink (2025) gaat de biogasproductie uit dunne fractie van 35 m³ dan naar 38 m³ (gestandaardiseerd op 20 MJ/ m³ biogas) en die van 46 m³ voor Amest gaat naar ruim 50 m³/m³ mest, steeds bij gemiddelde verblijftijden van de mest van 15 dagen of korter.

4.3 Lonkend perspectief: half regulier en half aangezuurd vergisten

Een halvering van de verblijftijd ten opzichte van vergisten van dagverse mest werd gerealiseerd met een mengsel van 50% aangezuurde mest en 50% reguliere mest omdat de biogasproductie van dit mengsel ook bij een verblijftijd van 21 dagen binnen de grenzen van de WKK bleef. De praktische betekenis is dat op korte termijn in bestaande monomest vergisters de capaciteit te verdubbelen is bij invoer van gelijke hoeveelheden reguliere mest en aangezuurde mest (of beter nog een dubbele hoeveelheid aangezuurde mest). Hierdoor kunnen we op korte termijn zonder een vergister te bouwen extra NH₃ en CH₄ uitstootreductie realiseren.

Omdat voor dit extra volume mest geen investering noodzakelijk is en in feite de kosten per m³ mest dalen, wordt de business case voor vergisten gunstiger. Deze optie is als scenario F beschreven in Bussink et al. (2025). De biogasopbrengst tijdens het testen van half aangezuurd en half regulier bedroeg 107% van de verwachte biogasopbrengst op basis van reguliere mest 30 m³ biogas en aangezuurde mest 50 m³ biogas per m³ mest. Die 7% verschil is mogelijk te verklaren uit een hogere efficiency van de WKK bij volle belasting, maar we hadden ook onze inschatting van de biogasopbrengst 7% hoger kunnen kiezen.

Volgens Sanders en Bussink (2025) zou op basis van de proeven met de pilotvergister (waar geen warmteproblemen optraden) zelfs met nog kortere verblijftijd gewerkt kunnen worden en dus een grotere biogasproductie per m³ per dag bereikt kunnen worden, maar zoals eerder opgemerkt door de beperkte verwerkingscapaciteit van de WKK was het niet mogelijk dit tijdens het nu beschreven project

te testen. Het wordt aanbevolen om in een niet al te grote boerderijvergister een test te gaan uitvoeren waarin stapsgewijs wordt toegewerkt naar een gemiddelde verblijftijd van 12 dagen, zoals beschreven door Sanders en Bussink (2025), die dit hebben uitgevoerd in een 2,5 m³ pilot vergister. Langs deze route kunnen is dus zonder veel kosten en op korte termijn en aanzienlijke ammoniak- en methaanemissiereductie te verkrijgen. De biogasopbrengst zal daarmee meer dan verdubbelen en bovendien zal de winstgevendheid verbeterd worden, omdat immers niet extra geïnvesteerd hoeft te worden in een vergister. Dat betekent heden ten dage ook vaak een voordeel van veel tijdwinst, omdat dus ook geen vergunning voor het bouwen van de vergister nodig is. Wel moet in aantal gevallen de vergunning voor het te vergisten mestvolume worden aangepast en toestemming om mest van de buurman aan te voeren. Omdat het aanzuren van mest tegelijkertijd het voordeel heeft van minder ammoniak- en methaanemissie zouden de desbetreffende overheden met deze vergunningen coulant kunnen omgaan. De investering in een (grotere) gasopwerking is door economy of scale ook voordelig op voor het verdienmodel. Voor de gasopwerking is in Nederland uiteraard ook een vergunning nodig.

5 Conclusies en aanbevelingen

Productie van biogas uit 2000 m³ biologisch aangezuurde mest in een grootschalige vergister van 1450 m³ is aangetoond bij een gemiddelde verblijftijd van de aangezuurde mest van 28 dagen. In de vergister in Niebert was een kortere verblijftijd niet te testen omdat dit meer biogas op zou leveren dan de warmtekrachtkoppeling kon verwerken.

Een halvering van de verblijftijd ten opzichte van vergisten van dagverse mest werd gerealiseerd met een mengsel van 50% aangezuurde mest en 50% reguliere mest. De praktische betekenis is dat op korte termijn in bestaande monomestvergisters de capaciteit te verdubbelen is bij invoer van gelijke hoeveelheden reguliere mest en aangezuurde mest of alleen aangezuurde mest.

In Niebert zijn er problemen geweest door een overmatige H₂S-productie als gevolg van een te hoge vergistertemperatuur (46 °C) door de snellere omzettingen en de slechte afvoer van warmte. De hoge concentraties H₂S in het biogas hadden voorkomen kunnen worden door:

- vergisting bij 37 °C bedrijven. De aangezuurde mest levert meer dan voldoende snelheid in de gasproductie. Bovendien is er met groengasproductie geen WKK meer waarvan de afvalwarmte ergens gekoeld moet worden;
- een vroegtijdiger ingrijpen op het waarnemen van het verhoogde H₂S-gehalte in het biogas en zeker op de vermindering van de biogasproductie. De gaskwaliteit tweemaal daags meten met name H₂S is zonder veel inspanning mogelijk en is zelfs te automatiseren, zeker bij verhogen van grondstof toevoer naar de vergister;
- mocht het bovenstaande onvoldoende veiligheid bieden dan kan worden onderzocht of monitoring van de opgeloste H₂S-concentratie in de vloeistof in de vergister middels snelle analyses een betere attendering biedt. Bovendien kan door preventief ijzerhydroxide te doseren bij verandering van de procescondities ook extra zekerheid bieden, maar hieraan zijn forse kosten mee verbonden.

In het algemeen is het niet meer nodig elke dag een FOS/TAC analyse uit te voeren. Gedurende alle ups en downs tijdens de proefperiode is de pH van de vergister prima rond de 7,8 gebleven en de FOS/TAC stabiel. pH dagelijks meten zou toereikend moeten zijn.

6 Acknowledgements

- Dit vergisterproject is uitgevoerd in opdracht van de Provincie Groningen onder regie van Jon Knook. De Provincie Groningen beoogt biologisch aanzuren van mest vorm te geven met een goed businessmodel voor boeren en tegelijkertijd een goede bijdrage aan verschillende milieuprestaties.

7 Referenties

- Buisman CJN, IJspeert P, Hof A, Janssen AJH, Ten Hagen R & Lettinga G (1991). Kinetic parameters of a mixed culture oxidizing sulfide and sulfur with oxygen. *Biotechnol. Bioeng.* 38: 813-820.
- Bussink DW, Sanders, JPM en Boode, J (2025) Praktijkproef biologisch aanzuren in een rundveestal NMI rapport 2035a.N.24. , 65 pp.
- Jung H Kim J & Lee C (2019) Temperature effects on methanogenesis and sulfidogenesis during anaerobic digestion of sulfur-rich macroalgal biomass in sequencing batch reactors. *Microorganisms*, 7: 682. 16 pp. doi:10.3390/microorganisms7120682
- Sanders, JPM & Bussink DW (2025) snelle vergisting van biologisch aangezuurde rundveemest en fosfaatwinning uit digestaat, NMI rapport 2035b.N.24. 30 pp.

Bijlage 1: H₂S-vorming en wegvangen door reactie met ijzer

Hoeveel H₂S kan uit mest komen?

Rundveemest bevat ca 4 kg N/m³ mest, waarvan ongeveer de helft organisch is gebonden. Dit laatste komt overeen met maximaal 13 kg ruweiwit. Stel dat de twee zwavelhoudende aminozuren methionine en cysteïne gemiddeld in eiwit met dezelfde frequentie voorkomen als de overige 18 aminozuren (hetgeen een flinke overschatting is) dan zou $2/20 \times 32/125 \times 13 = 0,3$ kg zwavel per m³ mest aanwezig zijn.

*Hoeveel H₂S kan **maximaal** uit melasse komen?*

Analyse van melasse geeft een waarde van 3,02 g zwavel per liter. Bij een dosering van 5% v/v zou dit 0,15 g/l de concentratie verhogen dus naar 0,45g/l. Bij een nog hogere melasse dosering dan 5 % moet dus rekening gehouden worden met een grotere toename. Recente analyse met melasse aangezuurde mest geeft een waarde van 0,41 g/l dus redelijk in lijn met verwachtingen (zie Tabel B1). In feite zal in de ongescheiden aangezuurde mest het zwavelgehalte hoger liggen omdat bij de analyse uitgegaan is van de dunne fractie. Een eerste poging om het zwavelgehalte uit melasse te verlagen door CaCl₂ aan melasse toe te voegen teneinde CaSO₄ te kunnen precipiteren heeft niet tot een gewenste verlaging geleid. Nader onderzoek is nodig om vast te stellen of langs deze route zwavelinput vanuit melassedosering is te verlagen om aldus de kans op H₂S-vorming te verlagen. Het oplosbaarheidsproduct van calciumsulfaat ligt rond de 0,01mol/l hetgeen overeenkomt met 0,3 gram S/l. Dit ligt ca 10 maal lager dan het zwavelgehalte in melasse. Een calciumbehandeling zou enig effect moeten hebben.

Analyse van het zwavelgehalte van digestaat laat zien dat de ijzerbehandeling effectief is geweest.

Tabel B1. Zwavelgehalte mest, melasse en digestaat.

	S-gehalte (g/l)
Dunne aangezuurde fractie mest november 2024	0,41
Digestaat 1 juni 2025	<0,13
Melasse	3,02
Melasse CaCl ₂ behandeld	2,87

Hoeveel H₂S kan maximaal met Fe₂(OH)₃ dosering gebonden worden?

Volgens de reactie vergelijking $\text{Fe}_2(\text{OH})_3 + \text{H}_2\text{S} \rightarrow \text{FeS} + 2\text{H}_2\text{O} + \text{OH}^-$ is 55 gram Fe (dus ca 106 gram ijzerhydroxide) nodig om 34 gram H₂S te binden. In periode 3 is gemiddeld 4,6 kg Fe₂(OH)₃ gedoseerd per m³ mest. Hiermee kan dus $4,6 \times 34 / 106 = 1,47$ kg H₂S gebonden worden bij volledige reactie. Dat is veel meer dan er aan zwavel in een m³ mest zit.

Einde periode 3 toen de H₂S-concentratie weer laag was, is de zwavelconcentratie in het digestaat geanalyseerd op onder de detectiegrens van 0,13 g/l (Tabel B1).

Hoeveel H₂S zit in 55 m³ biogas met 1200 ppm die uit 1 m³ aangezuurde mest komt?

Aangezuurde mest produceert $55 \times 1200 / 1000000 \times 1000 / 22,4 \times 34$ gram = 100 gram H₂S die afkomstig is uit de aangezuurde mest en/ of uit mest die nog aanwezig (niet weggevangen door Fe₂(OH)₃) was en/of die met de vaste stalmest mee komt. Deze 100 gram is veel lager dan de 1,56 kg H₂S die bij een volledige reactie weggevangen wordt met de toegediende ijzerhydroxide.

Wanneer we deze uitkomsten combineren betekent dat er 100 gram H₂S in het gasvolume komt per m³ aangezuurde mest en dat er maximaal 430 gram S van de 0,53 kg S(0,41+0,12*) door het toegevoegde ijzer is weggevangen terwijl er ijzer gedoseerd werd genoeg voor 1,56 kg H₂S, en dit terwijl daarmee de Thiobacillus capaciteit niet eens is meegerekend en dus ook niet de zwavel die nog in een andere vorm dan H₂S in de mest achterblijft. Als alle toegediend ijzer met de zwavel had gereageerd zou er geen enkele H₂S in het biogas gekomen moeten zijn.

In periode 2 met gemiddeld 60 m³ aangezuurde mest is H₂S nog niet verontrustend hoog (gemiddeld 380 ppm) maar op dag 2 van periode 3 gaat H₂S snel omhoog (1200 ppm) ondanks dosering van 240 kg ijzerhydroxide. Op dag 3 (1300 ppm) en 4 van deze periode werd nog eens 480 kg en 680 kg gegeven waardoor op dag 4 de H₂S weer op 164 ppm terug was. Een hoeveelheid van 240 kg ijzerhydroxide zou bij volledige reactie 81,6 kg H₂S moeten wegvangen terwijl er uit 72 m³ aangezuurde mest op die dag 72×100 gram = maar 7,2 kg H₂S maximaal gevormd kan zijn. Op de volgende dag werd 480 kg ijzerhydroxide gegeven, nog steeds niet voldoende om de H₂S-concentratie te verlagen. Dit lukte pas op dag vier. Op die dag werd nog eens 680 kg ijzerhydroxide gegeven (waarschijnlijk voor de meting van de H₂S)

Totaal is er gedurende de proef met 2000 m³ aangezuurde mest maximaal 0,5 kg zwavel per m³ dus 1000 kg zwavel aangevoerd terwijl dit met reguliere mest ca 600 kg zwavel geweest zou zijn. Er is in totaal ca 7500 kg ijzerhydroxide gebruikt uit ijzerslib en ijzerwater en voor ca 10% uit ijzerpoeder. De totale kosten voor deze ijzerhydroxide zijn $7,5 \times (520 \times 0,9 + 1580 \times 0,1) = 4700$ €. Dat is 2,53 €/m³ mest.

Deze hoeveelheid ijzerhydroxide had bij volledige reactie 2400 kg zwavel moeten kunnen binden, of te wel 1,18 kg S/m³ aangezuurde mest terwijl daar niet meer dan 0,5 kg/m³ aanwezig was.

Kunnen we sulfaat uit melasse verwijderen?

In een poging om het zwavelgehalte te verlagen door met CaCl₂ (28 g/ liter) gips te vormen en neer te slaan middels een centrifuge stap, konden we slechts 5% van het zwavel omlaag krijgen. (Tabel 4.1). Of het zwavel vooral in aminozuren aanwezig is, zou een plausibele verklaring zijn. Immers in de carbonatatiestap tijdens de suikerraffinage is al een groot deel van het sulfaat uit het ruwsap geprecipiteerd.

Voetnoot *: 0,115 kg S werd berekend door $2/20 \times 32/125 \times 4,5$ kg. Rapport Bussink et al. 2025 toont de verdeling van N over de dikke en de dunne fractie van aangezuurde mest, waarbij de dikke fractie 18% van 4 kg N = 0,72 kg N = 4,5 kg RE. Er wordt ook wel gewerkt met een vuistregel dat de N/S verhouding in eiwit 10 bedraagt.

Kan het H₂S probleem ontstaan door vorming uit een specifiek zwavelhoudende component, bijvoorbeeld sulfaat?

Het grootste deel van de in mest aanwezige zwavel zit gebonden in aminozuren in eiwit. Eerst moet het eiwit worden afgebroken en vervolgens moeten methionine en / of cysteine omgezet worden naar H₂S. Zou zwavel in andere componenten zoals sulfaat zich sneller laten omzetten in H₂S? Analyse van het zwavelgehalte van digestaat (Tabel 4-1) gaf aan dat het zwavelgehalte niet detecteerbaar was: alle zwavel is omgezet naar H₂S en deze is door binding aan ijzer verwijderd uit het zicht van de analyse. Een lagere vergistingstemperatuur leidt waarschijnlijk tot veel minder vergaande afbraak van eiwit waardoor minder H₂S gevormd wordt per m³ vergiste mest. Er kan hierop slechts uitsluitsel worden gegeven door het restzwavelgehalte van digestaat uit een vergisting die bij 37 °C is bedreven te bepalen.

Nalevering door latente ophoping

De maximaal mogelijke H₂S die uit alle aangezuurde mest (600 m³) die tot op dag 3 van periode 3 werd gegeven, zou 0,65*600=390 kg zijn, een overschatting omdat al veel H₂S met het biogas van alle voorgaande dagen is afgevoerd. De 240+480 kg ijzerhydroxide zou 245 kg H₂S weggevangen moeten kunnen hebben. Inclusief de 680 kg op dag 4 zelfs 476 kg. Bestudering van het temperatuurverloop, de H₂S-vorming en de productie van biogas uitgedrukt als biogas opbrengst ten opzichte van de berekende verwachte opbrengst (zoals in Figuur 3.2 weergegeven), dan valt op dat op dag 1 van periode 2 (19 mei), de start van met een verhoogde snelheid toe laten lopen van aangezuurde mest, dat dan de relatieve opbrengst biogas omlaag ging. Dit is te verklaren doordat de vergisting van de toeloop tijd nodig heeft om op gang te komen. Na twee dagen is de productie volgens verwachting en wordt deze nog hoger op 21 mei en neemt vanaf dat moment af tot 26 mei het tijdstip dat de H₂S-concentratie is opgelopen tot 840 ppm. Remming van biogasproductie is dus ingezet vanaf 22 mei bij een H₂S-concentratie van 450 ppm. Deze duurt tot 29 mei op welke dag de H₂S-concentratie weer onder 200 ppm is gekomen. Nalevering van H₂S bij 46 °C uit mest waarvan de zwavel bij 42 °C niet volledig is omgezet naar H₂S kan een bijdrage geleverd hebben in de snelle toename van de H₂S-concentratie.

Nalevering door verlaging H₂S-oplosbaarheid door temperatuurverhoging

Hierboven is aangegeven dat in de aangezuurde mest de zwavelconcentratie ca 410 gram/m³ mest bedraagt. Bij de overgang van periode 1 naar 2 is de vergister vooral gevuld met mest die er met gemiddelde verblijftijd van 46 dagen al in de vergister zit. Zou de 410 g/m³ zwavel allemaal H₂S zijn, dan nog is deze hoeveelheid bij 50 °C goed oplosbaar met 1900 g/m³. De oplosbaarheid bij 45 °C is 2100 g/liter en bij 40 °C ca 2300 g/m³. Bij pH 7,8 ligt het evenwicht richting HS⁻ en zeker niet naar H₂S. (pK_a van H₂S is 7,0). Resumerend is er toch een mogelijke effect van een snelle temperatuurverhoging van 3 graden Celsius op de oplosbaarheid van H₂S waardoor de H₂S-concentratie in het op die dag geproduceerde biogas snel zou toe kunnen nemen.

Hoeveel H₂S is vrijgekomen uit de mest toen 1200 ppm H₂S in het biogas werd gemeten?

Vanaf het moment dat de Amest met 72 m³ per dag werd ingevoerd is het H₂S-gehalte in de mest sterk omhoog gegaan.

In 1 m³ biogas zit 1200/ 1000000 X 1000/ 22,4 X 34 = 1,8 gram H₂S

Het volume van de vergister met doorsnede 18 meter hoogte 6 meter (1526 m³) en daarboven een halve bol (= 1526 m³) is eigenlijk afgeplatte bol met hoogte 5 meter daarom houden we 900 m³ aan voor de halve bol. De mest heeft volume van 1450 m³, dus de headspace bedraagt ca 1000 m³.

Het volume van de navergister is met diameter 32 m en 6 meter hoogte en koepel van 4 meter hoogte ca 4825 (cilinder) + 2300 m³ (afgeplatte koepel met 4m hoogte). De headspace van de navergister is circa 7125 m³ omdat de navergister leeggemaakt was.

Een hoge schatting van H_2S hoeveelheid door aanname dat biogas vrijelijk kan uitwisselen tussen de twee headspaces betekent dat er een totaal gasvolume van $1000 + 7125 = 8125 \text{ m}^3$ was. Dit komt overeen $8125 \times 1,8 \text{ gram} = 14,6 \text{ kg } H_2S$.

Een lage schatting van de hoeveelheid H_2S wordt verkregen door aan te nemen dat er geen of nauwelijks uitwisseling is tussen de twee headspaces. De WKK gevoed met gasleiding direct uit de vergister en gassamenstelling wordt vanuit deze leiding bemonsterd. Dit komt overeen met $1000 \times 1,8 = 1,8 \text{ kg } H_2S$.

$1,8\text{--}14,6 \text{ kg } H_2S$ komt overeen met de hoeveelheid zwavel uit $3\text{--}24 \text{ m}^3$ mest terwijl de toeloop in de vergister 60 m^3 per dag bedroeg. Het is niet waarschijnlijk dat alle zwavel is vrijgekomen uit de mest ook al weten we dat de Thiobacillus in de vergister ook een deel van de H_2S heeft omgezet naar elementaire zwavel.

Beter is te stellen: als per m^3 biogas 1200 ppm H_2S aanwezig is dan is dus bij 55 m^3 biogas per m^3 aangezuurde mest $55 \times 1200 / 1000000 \times 1000 / 22,4 \times 34 \text{ gram} = 55 \times 1,8 = 100 \text{ gram } H_2S$ die afkomstig komt uit de aangezuurde mest en/ of uit mest die nog aanwezig was of die met de vaste stalmest mee komt.

Hoeveel $Fe_2(OH)_3$ is nodig om alle gevormde H_2S te binden?

Volgens de reactie vergelijking $2Fe_2(OH)_3 + 2H_2S \rightarrow 2FeS + 3H_2O$ is 50 gram Fe (dus circa 100 gram ijzerhydroxide) nodig om 34 gram H_2S te binden. In de periode tussen 27 mei en 1 juni is 10 ton slib (60 kg ijzer) en 15 zakken à 20 kg = 150 kg ijzer en 10 kuub ijzerwater is 30 kg ijzer, dus totaal 240 kg ijzer ingevoerd in de vergister. Dit is voldoende voor wegvangen van $34/50 \times 240 = 163 \text{ kg } H_2S$. Meer dan tienmaal de hoogste hoeveelheid die in de periode tussen 27 mei en 1 juni is vrijgekomen. Deze ijzerhydroxide zal beschikbaar zijn voor nieuw aangemaakte H_2S tenzij dat deze geleidelijk mee uitspoelt met het digestaat.

Gerekend werd met: IJzerwater bevat 60 kg $Fe_2(OH)_3$ per ton; IJzerslib het dubbele dus 120 kg/ton; IJzerpoeder is voor ruim 90% $Fe_2(OH)_3$ in zakken van 20 kg aangeleverd. IJzerslib kost ca 60€ per ton. Dus ijzerhydroxide ca 0,50€ per kg.

Bijlage 2. Toeloop van verschillende mestsoorten tijdens de proef

		reguliere	aangezuurde	vaste			periode 5	11-6-2025	72	4	80
		mest m3	mest m3	mest m3	Fe ₂ (OH) ₃ (kg)			12-6-2025	72	4	120
periode 1	6-5-2025	25		8				13-6-2025	60	2	400
	7-5-2025	25		8				14-6-2025	50	2	240
	8-5-2025	25		8				15-6-2025	55	0	
	9-5-2025	25		8				16-6-2025	50	0	480
	10-5-2025	25		8				17-6-2025	50	0	
	11-5-2025	25		8				18-6-2025	55	0	
	12-5-2025	25		4			periode 6	19-6-2025	50	0	
	13-5-2025	25		4				20-6-2025	60	2	160
	14-5-2025	25		4				21-6-2025	60	2	240
	15-5-2025	25		4				22-6-2025	60	2	240
	16-5-2025	25		4				23-6-2025	60	2	240
	17-5-2025	25		4				24-6-2025	60	0	
	18-5-2025	25		4				25-6-2025	45	2	240
periode 2	19-5-2025		60	0				26-6-2025	40	2	
	20-5-2025		55	0				27-6-2025	40	2	720
	21-5-2025		35	0				28-6-2025	30	2	
	22-5-2025		50	0				29-6-2025	25	4	
	23-5-2025		60	0				30-6-2025	72	0	
	24-5-2025		60	0			periode 7	1-7-2025	30	30	2 240
	25-5-2025		60	0				2-7-2025	35	35	2 480
periode 3	26-5-2025		72	0				3-7-2025	35	35	2 480
	27-5-2025		72	4	240			4-7-2025	35	35	2 480
	28-5-2025		72	4	480			5-7-2025	35	35	2 480
	29-5-2025		72	4	680			6-7-2025	35	35	2 120
	30-5-2025		30	4	600		periode 8	7-7-2025		50	0
	31-5-2025		10	0				8-7-2025		60	2
	1-6-2025		72	4	100			9-7-2025		60	4
	2-6-2025		60	0				10-7-2025		60	6
periode 4	3-6-2025		10	0			periode 9	11-7-2025	60	8	
	4-6-2025		10	0				12-7-2025	60	8	
	5-6-2025		10	0				13-7-2025	45	8	
	6-6-2025		10	0				14-7-2025	45	8	
	7-6-2025		30	0				15-7-2025	45	8	
	8-6-2025		30	0				16-7-2025	45	10	
	9-6-2025		35	0				17-7-2025	45	10	
	10-6-2025		60	0				18-7-2025	45	10	
								19-7-2025	45	10	
								20-7-2025	30	10	
								21-7-2025	35	12	

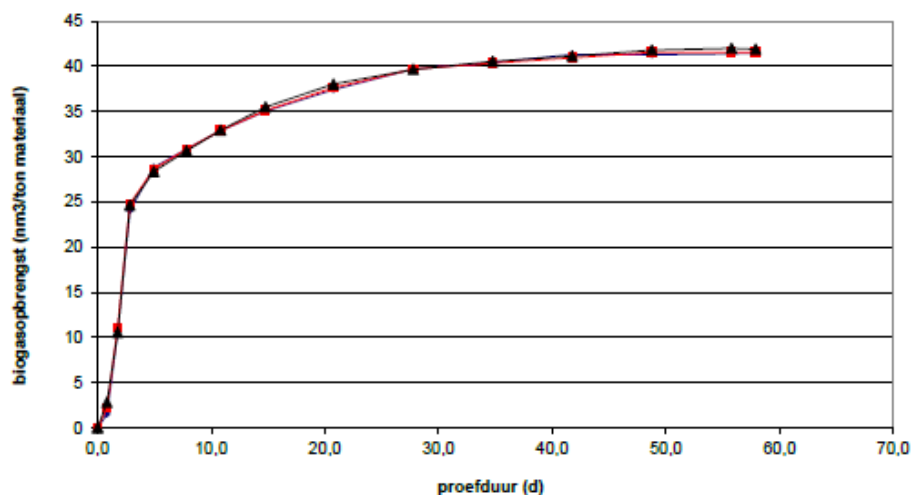
Bijlage 3. Analyses Opure



Analysebericht: Onderzoek vergistbaarheid Aangezuurde Mest 19/05

projectnr: p.025383
 auteur: A. Duine
 opdrachtgever: Sanovations
 contactpersoon: Johan Sanders
 soort monster: verpompbaar
 datum monster: 19-05-25
 datum rapportage: 08-10-25
 rapportnummer: 250663

Aangezuurde Mest 19/05	eenheid	gemiddeld	1	Steekmonster 2	3
CZV-gehalte	kg/ton	129			
pH	-	6,0			
geleidbaarheid	mS/cm	21,6			
droge stofgehalte:	gew. %	8,2	8,2	8,3	8,2
organische stofgehalte:	% van ds	74,1	74,1	74,2	74,0
Aangezuurde Mest 19/05					
biogasvorming:	nm ³ /ton materiaal	41,7	41,5	41,6	42,0
biogaskwaliteit:	vol. % CH ₄	69,7	69,8	70,2	69,2
spec. biogasproductie	nm ³ /kg org. stof	0,684	0,681	0,682	0,689
afbraak org. stof:	% van os	75,3	74,2	74,0	77,5
niet vergistbaar (netto!)	kg ds/ton materiaal	36	37	37	35
H ₂ S	ppm	221	195	237	231

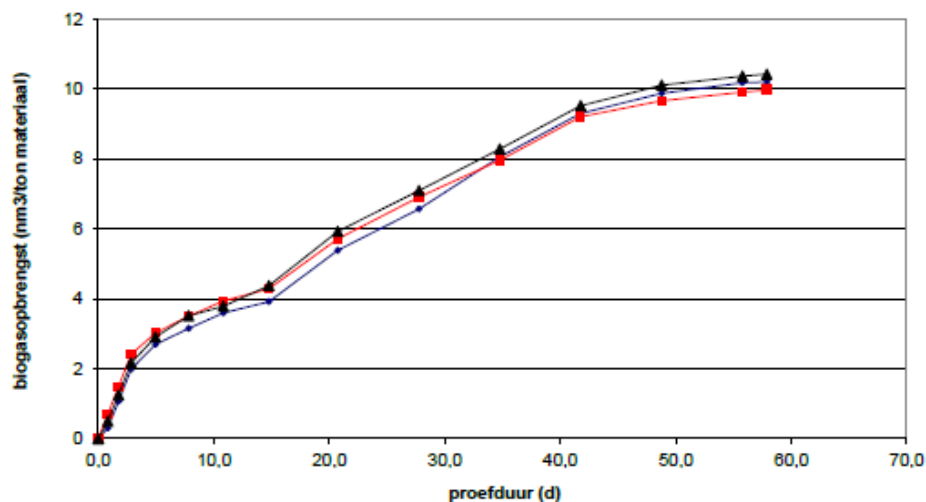


figuur 1. verloop gasproductie met Aangezuurde Mest 19/05

Analysebericht: Onderzoek vergistbaarheid Digestaat HV 06/07

projectnr: p.025383
 auteur: A. Duine
 opdrachtgever: Sanovations
 contactpersoon: Johan Sanders
 soort monster: verpompbaar
 datum monster: 06-07-25
 datum rapportage: 8-10-2025
 rapportnummer: 250665

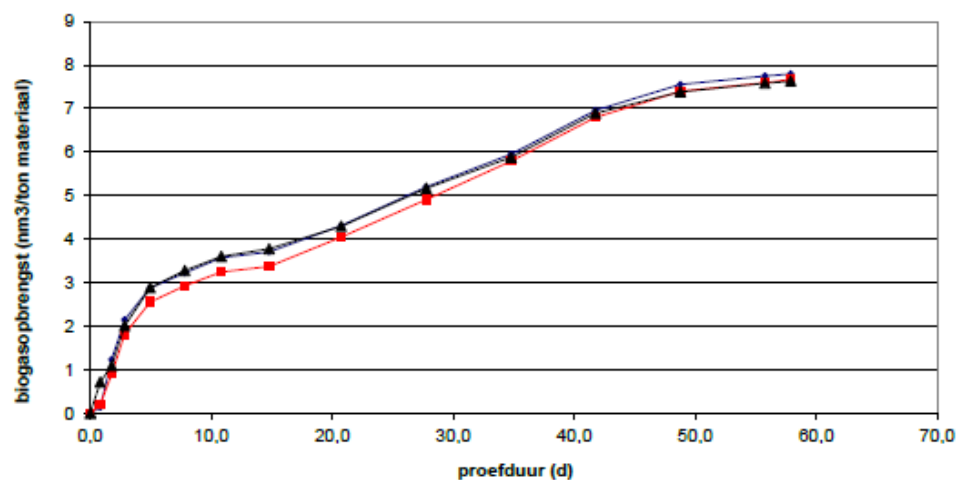
Digestaat HV 06/07	eenheid	gemiddeld	1	Steekmonster 2	3
CZV-gehalte	kg/ton	63			
pH	-	8,1			
geleidbaarheid	mS/cm	27,8			
droge stofgehalte:	gew. %	7,8	7,9	7,7	7,8
organische stofgehalte:	% van ds	62,9	62,9	62,7	63,0
Digestaat HV 06/07					
biogasvorming:	nm ³ /ton materiaal	10,2	10,2	10,0	10,4
biogaskwaliteit:	vol. % CH ₄	57,0	57,5	56,7	56,8
spec. biogasproductie	nm ³ /kg org. stof	0,208	0,208	0,204	0,213
afbraak org. stof:	% van os	26,1	25,9	25,6	26,7
niet vergistbaar (netto!)	kg ds/ton materiaal	65	66	65	65
H ₂ S	ppm	180	175	178	187



figuur 1. verloop gasproductie met Digestaat HV 06/07

projectnr: p.025383
 auteur: A. Duine
 opdrachtgever: Sanovations
 contactpersoon: Johan Sanders
 soort monster: verpompbaar
 datum monster: 22-06-25
 datum rapportage: 08-10-25
 rapportnummer: 250664

Digestaat HV 22/06	eenheid	gemiddeld	Steekmonster		
			1	2	3
CZV-gehalte	kg/ton	69			
pH	-	8,1			
geleidbaarheid	mS/cm	27,2			
droge stofgehalte:	gew. %	6,8	6,7	6,8	6,9
organische stofgehalte:	% van ds	63,7	63,3	63,8	64,0
Digestaat HV 22/06					
biogasvorming:	nm ³ /ton materiaal	7,7	7,8	7,7	7,6
biogaskwaliteit:	vol. % CH ₄	58,9	59,4	58,9	58,4
spec. biogasproductie	nm ³ /kg org. stof	0,178	0,180	0,177	0,176
afbraak org. stof:	% van os	21,8	22,0	21,7	21,7
niet vergistbaar (netto!)	kg ds/ton materiaal	59	58	58	59
H ₂ S	ppm	162	166	166	154



figuur 1. verloop gasproductie met Digestaat HV 22/06

