

Animal Sciences Group

Kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 243

Optimaliseren van mestvergisting

Juni 2009



ANIMAL SCIENCES GROUP

WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Animal Sciences Group van Wageningen UR
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail Info.veehouderij.ASG@wur.nl
Internet <http://www.asg.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Aansprakelijkheid

Animal Sciences Group aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Liability

Animal Sciences Group does not accept any liability for damages, if any, arising from the use of the results of this study or the application of the recommendations.

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



De certificering volgens ISO 9001 door DNV onderstreept ons kwaliteitsniveau. Op al onze onderzoeksopdrachten zijn de Algemene Voorwaarden van de Animal Sciences Group van toepassing. Deze zijn gedeponeerd bij de Arrondissementsrechtbank Zwolle.

Abstract

In batch tests the biogas yield and hydrolysis constant of different types of pig manure were determined. Subsequently in four CSTR-reactors were a couple of treatments tested which could enhance the efficiency of manure digestion.

Keywords

Manure digestion, biogas, anaerobic digestion, coproduct, magnesium, pig manure

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

M. Timmerman
J.W. van Riel
I. Bisschops (LeAF)
M. van Eekert (LeAF)

Titel

Optimaliseren van mestvergisting
Rapport 243

Samenvatting

In het onderzoek is in batchtesten de biogasopbrengst en hydrolyseconstante bepaald van een aantal soorten varkensmest en van gehygiëniseerde varkensmest. Vervolgens is in vier (semi-)continu bedreven reactoren een aantal behandelingen getest waarvan verwacht werd dat deze een verhogend effect hebben op het rendement van vergisting van varkensmest.

Trefwoorden

Mestvergisting, biogas, vergisting, coproduct, magnesium, varkensmest



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR



Rapport 243

Optimaliseren van mestvergisting

In opdracht van en gefinancierd door het Productschap Vee en Vlees

M. Timmerman

J.W. van Riel

I. Bisschops (LeAF)

M. van Eekert (LeAF)

Juni 2009

Samenvatting

In de onderzoeksvisie van het PVV zal het bedrijfssysteem in de varkenshouderij in de toekomst energieneutraal zijn door een economisch verantwoorde inzet van de aanwezige energiebronnen op het bedrijf. Een deel van de varkenshouderij ziet perspectief in een mestvergistinginstallatie met een klein aandeel covergisting. Optimalisatie van een mestvergistinginstallatie is dus nodig om dit economisch mogelijk te kunnen maken. Het doel van het onderzoek is het optimaliseren van een mestvergistinginstallatie met een zo'n klein mogelijk aandeel covergisting waardoor energieproductie via vergisting voor een groter deel van de varkensbedrijven economisch interessant wordt.

In het onderzoek is een experiment opgezet bestaande uit twee onderdelen. In het eerste deel is in batchtesten de methaanproductie en hydrolyseconstante bepaald van een aantal soorten varkensmest en van gehygiëniseerde varkensmest. In het tweede deel is met varkensmest in vier (semi)continu bedreven reactoren een aantal behandelingen getest waarvan verwacht werd dat deze een verhogend effect zouden hebben op het rendement van mestvergisting. In de CSTR-proef is in vier reactoren het effect onderzocht van de volgende drie invloedsfactoren op de methaanproductie bij vergisting van varkensmest:

1. Toevoeging van magnesium om het ammoniumgehalte te verlagen zodat de invloed van ammoniakremming op de methaanproductie afneemt,
2. Toevoeging van een kleine hoeveelheid zetmeel ter verbetering van de C/N-ratio om zo optimalere procescondities te verkrijgen,
3. Verlaging van de verblijftijd ter bepaling van een optimale verblijftijd zodat met een kleiner vergistingvolume gedraaid kan worden.

Deze invloedsfactoren zullen met elkaar interacteren. Er is daarom voor gekozen om per reactor een vaste C/N-ratio t.o.v. de input aan te leggen waarbij de verblijftijd en hoeveelheid magnesiumtoevoeging per reactor werd gevarieerd. DLM (Dynamic Linear Model) heeft geschat waar per reactor de optimale verblijftijd en magnesiumtoevoeging lag.

Uit de resultaten van de batchtesten in het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De hydrolyseconstante en maximale methaanproductie zijn sterk verschillend per soort varkensmest. De hydrolyseconstante varieerde tussen de 0,07 en 0,27 d⁻¹ en de maximale methaanproductie varieerde tussen de 213 en 596 l CH₄ per kg OS.
- Gemiddeld bedraagt de maximale methaanproductie 55% van de theoretische potentiële methaanproductie, maar verschilt sterk per mestsoort. Voor de meeste onderzochte mestsoorten geldt in principe dat een groot deel van de methaanproductie niet benut wordt.
- De samenstelling van de varkensmest (mestsoort) is sterk bepalend voor welke methaanproductie haalbaar is bij een bepaalde verblijftijd. Of wel: de mestsoort bepaalt in principe welke grootte een vergistingreactor zou moeten hebben.

Uit de resultaten van de CSTR-proef in het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Verlaging van de verblijftijd bij mestvergisting van 28 naar 15 dagen is mogelijk, waarbij de methaanproductie per ton varkensmest maar relatief weinig afneemt.
- Het interval tussen de voedingen heeft bij de reactoren met covergisting een grote invloed gehad op de resultaten.
- Bij de gekozen setting van de reactoren geeft covergisting met zetmeel bij langere verblijftijd een hogere methaanproductie per ton input, maar een lagere totale methaanproductie per reactor.
- Het effect van magnesiumtoevoeging was minimaal en niet significant.

Inhoudsopgave

Samenvatting

1	Inleiding	1
2	Onderzoeksopzet	2
2.1	Batchtesten varkensmest	2
2.2	CSTR-proef varkensmest	3
2.3	Statistische analyse van het effect van magnesiumtoevoeging	4
3	Resultaten batchtesten	5
3.1	Meetresultaten.....	5
3.2	Berekening methaanproductie van een CSTR-reactor.....	7
3.3	Potentiële methaanproductie uit varkensmest	8
4	Resultaten CSTR-proef	11
4.1	Meetresultaten.....	11
4.2	Aanvullende metingen.....	14
4.3	Analyse van meetresultaten op effect van verblijftijd en zetmeel	15
4.4	Analyse van meetresultaten op effect magnesiumtoevoeging	16
5	Economische evaluatie	17
5.1	Algemene uitgangspunten.....	17
5.2	Mestvergisting	18
5.3	Maïszetmeel als coproduct	18
5.4	Magnesiumtoevoeging.....	20
6	Discussie	21
7	Conclusies en aanbevelingen	23
7.1	Conclusies	23
7.2	Aanbevelingen	23
	Praktijktoeppassing	24
	Bijlagen	25
Bijlage 1	Verloop van pH en vluchtige vetzuren gedurende de batchtesten met de varkensmestsoorten ..	25
Bijlage 2	Meetpunten en datafit t.b.v. bepaling de maximale methaanproductie (ml CH ₄ /g OS) en hydrolyseconstante k _h (d ⁻¹)	26
Bijlage 3	Input per reactor in CSTR-proef	28
Bijlage 4	Verloop van pH, ammonium en vluchtige vetzuren in de reactoren van de CSTR-proef	30
	Literatuur	32

1 Inleiding

Achtergrond

In de onderzoeksvisie van het PVW (Verdoes en Swinkels, 2003) zal het bedrijfssysteem in de varkenshouderij in 2010 energieneutraal zijn door een economisch verantwoorde inzet van de aanwezige energiebronnen op het bedrijf. Investerings in alternatieve energiebronnen vinden plaats voor zover ze binnen redelijke termijn kunnen worden terugverdiend.

De omvang van de varkenshouderij in Nederland was in 2007 (PVE, 2008):

- ruim 1,2 miljoen zeugenplaatsen
- ruim 5,5 miljoen vleesvarkenplaatsen

Het gemiddelde energieverbruik van een varkensbedrijf bedraagt aan (Wagenberg en Leeuw, 2003):

- elektriciteit: 190 kWh per zeug en 36 kWh per vleesvarken
- aardgas: 90 m³ per zeug en 7 m³ per vleesvarken

Het totale elektriciteitsverbruik van de Nederlandse varkenshouderij bedraagt ruim 440 miljoen kWh en het totale aardgasverbruik bedraagt bijna 153 miljoen m³. Omgerekend komt dit neer op een energieverbruik van 6478 MJ door de Nederlandse varkenshouderij.

Varkensmest heeft een bepaalde energie-inhoud wat op verschillende manieren ingezet kan worden als vervanging van fossiele energiebronnen. Via mestvergisting wordt biogas geproduceerd wat als brandstof kan dienen voor een WKK-installatie waarbij de restwarmte gebruikt kan worden voor stalverwarming. In 2007 bedroeg de totale dierlijke mestproductie in Nederland 69,5 miljoen ton, waarvan 12,0 miljoen varkensmest; dat komt neer op ruim 17% van de totale dierlijke mestproductie in Nederland (NMC, 2008). Op basis van de KWIN-cijfers (Vermeij et al., 2007) ligt de mestproductie iets hoger, namelijk op 12,6 miljoen ton. Hieruit zou men onder de huidige omstandigheden bijna 200 miljoen m³ aardgas equivalenten kunnen produceren. Dit komt neer op een energieproductie van 6367 MJ per jaar en zo kan in theorie in ongeveer 98% van het jaarlijkse energieverbruik van de Nederlandse varkenshouderij worden voorzien.

De leveringskosten en energiebelasting voor elektriciteit en aardgas zijn de laatste jaren sterk toegenomen. Voor een gesloten bedrijf met 300 zeugen en 2400 vleesvarkens waren de energiekosten op jaarbasis in 2006 circa € 56.000,-. Door de schaalvergroting van de bedrijven zal het energiegebruik per bedrijf verder toenemen. Ook de introductie van nieuwe automatiseringstechnieken (bijv. schoonmaakrobot), mestverwerkingsystemen en toename van luchtwassers zal het energiegebruik per bedrijf vergroten. Al deze zaken leiden ertoe dat de totale energiekosten per bedrijf toenemen.

Vanwege de schaalvergroting in de varkenshouderij, sterke toename in energiekosten, hoge kosten voor mestafzet en stijgende prijzen voor teruglevering van elektriciteit kan een mestvergistinginstallatie met een klein aandeel covergisting perspectief te bieden voor een rendabele energieproductie. Een aantal varkenshouders geeft hier ook de voorkeur aan boven covergisting met een groot aandeel coproducten. Het perspectief kan mogelijk worden gemaakt via optimalisatie van een mestvergistinginstallatie (o.a. kortere verblijftijden, verhogen biogasproductie van varkensmest) en integratie van nieuwe technieken en mestverwerking, bijvoorbeeld via absorptiekoeling zodat de warmte van een WKK in de zomermaanden ingezet kan worden voor koeling van de stallen.

Doelstelling

Het doel van het onderhavige project is het optimaliseren van een mestvergistinginstallatie met een zo'n klein mogelijk aandeel covergisting waardoor energieproductie via vergisting voor een groter deel van de varkensbedrijven economisch interessant wordt.

2 Onderzoeksopzet

In het onderzoek naar optimalisatie van mestvergisting is een experiment opgezet bestaande uit twee onderdelen. In het eerste deel is in batchtesten de biogasopbrengst en hydrolyseconstante bepaald van een aantal soorten varkensmest en van gehygiëniseerde varkensmest. In het tweede deel is met varkensmest in vier (semi)continue bedreven reactoren een aantal behandelingen getest waarvan verwacht werd dat deze een verhogend effect zouden hebben op het rendement van mestvergisting.

2.1 Batchtesten varkensmest

De mestmonsters in de batchtesten werden gebruikt zoals aangeleverd door Praktijkcentrum Sterksel, behalve voor de test met gehygiëniseerde mest. Om de mest te hygiëniseren is deze op het laboratorium gedurende één uur op 70 °C verhit.

Het gehalte aan droge stof en organische stof werd bepaald volgens de standaardmethode, met droging van de monsters bij 105 °C en verassing bij 550 °C. Het gehalte aan vluchtige vetzuren (C2-C6) van de opgeloste fractie werd gaschromatografisch bepaald. Hiervoor werden monsters genomen, die gedurende tien minuten bij 11200 rcf werden gecentrifugeerd, waarna het supernatant werd geanalyseerd. Het chemisch zuurstofverbruik is bepaald volgens de potentiometrische methode. Het volume geproduceerd biogas werd bepaald met behulp van een drukmeetsysteem. De gehalten methaan, koolstofdioxide, zuurstof en stikstof in het gas werden gaschromatografisch bepaald.

De standaardtest voor potentiële biogasproductie werd uitgevoerd in duplo bij 30°C met een hoeveelheid van 1 g substraat-OS in een volume van totaal 200 ml. Als entmateriaal werd een mengsel van korrelslib en vergiste rundveemest gebruikt. Aan alle flessen werden macronutriënten, sporenelementen en fosfaatbuffer toegevoegd. Ook werd een controletest zonder substraat met alleen entmateriaal ingezet. Van alle flessen werd bij aanvang van de test de gasfase vervangen door stikstofgas. Gedurende de test werd de gasproductie gevolgd met behulp van een drukmeetsysteem en regelmatig werden de biogassamenstelling (CH₄, CO₂, N₂, O₂), de pH en het gehalte aan vluchtige vetzuren (VZ) gemeten.

De afbraaksnelheid van organisch materiaal kan meestal worden beschreven met een eerste orde afbraak:

$$C(t) = C_{\text{afbraak}} \cdot \exp(-k_h \cdot t)$$

Waarin:

C(t)	= de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal dat na tijdstip t is overgebleven,
C _{afbraak}	= de hoeveelheid afbreekbaar organisch materiaal (% van totaal organisch materiaal),
k _h	= de eerste orde afbraakconstante (of hydrolyseconstante),
t	= de tijd.

Na afloop van de batchtest werd de hoeveelheid geproduceerd methaan en de VZ gebruikt om met dit model de afbraaksnelheid te fitten. Uit de fit volgen vervolgens de hydrolyseconstante en de theoretische maximale methaanproductie. Op basis hiervan kan vervolgens de methaanopbrengst van een continue volledige gemengde reactor (CSTR) worden berekend op basis van de volgende formule:

$$\text{CH}_4(t) = \text{CH}_{4,\text{max}} \cdot \left(1 - \frac{1}{1 + k_h \cdot t} \right)$$

Waarin:

CH _{4,max}	= de potentiële methaanopbrengst van het materiaal,
t	= de verblijftijd van het materiaal in de reactor.

2.2 CSTR-proef varkensmest

In de CSTR-proef is in vier reactoren het effect onderzocht van de volgende drie invloedsfactoren op de methaanproductie bij vergisting van varkensmest:

1. Toevoeging van magnesium om het ammoniumgehalte te verlagen zodat de invloed van ammoniakremming op de methaanproductie afneemt,
2. Toevoeging van een kleine hoeveelheid zetmeel ter verbetering van het C/N-ratio om zo optimalere procescondities te verkrijgen,
3. Verlaging van de verblijftijd ter bepaling van een optimale verblijftijd zodat met een kleiner vergistingvolume gedraaid kan worden.

Deze drie invloedsfactoren kunnen min of meer onafhankelijk van elkaar onderzocht worden in afzonderlijke reactoren, maar het is denkbaar dat deze drie invloedsfactoren interacteren. Hangt de optimale toevoeging van magnesium toevoeging bijvoorbeeld af van de C/N-ratio (in dit geval de verhouding zetmeel/mest) van de voeding? Of hangt bijvoorbeeld de optimale toevoeging van magnesium af van de verblijftijd? Bij nadere beschouwing van de drie invloedsfactoren leek met name de zetmeeltoevoeging (wel/geen covergisting toepassen) van invloed op de strategische beslissing van een bedrijf om coproducten te gebruiken en zo ja, in welke hoeveelheid. De verwachting was dat de toevoeging van een kleine hoeveelheid zetmeel naast mest al een sterke verhoging van de methaanproductie op zou leveren. Daarom is gekozen om per reactor een vaste C/N-ratio t.o.v. de input aan te leggen. Middels DLM (Dynamic Linear Model) is vervolgens geschat waar per reactor de optimale verblijftijd en magnesiumtoevoeging lag.

De uitgangspunten van de vier reactoren in de CSTR-proef waren:

- Elke reactor heeft een netto inhoud van 8 liter;
- Reactortemperatuur van 37 °C;
- Gemiddelde verblijftijd bij aanvang van 20 dagen, omdat op basis van de resultaten uit de batchtest het de verwachting was dat hierbij circa 65% van de maximale methaanproductie gehaald kon worden;
- De reactoren werden tweemaal per week gemeten en gevoed (maandagochtend en donderdagmiddag) wat neer kwam op een voeding van 1.400 ml mest per keer bij aanvang van de proef.

In het onderzoek is maïszetmeel als zetmeelbron gebruikt. Op basis van de voederwaardegegevens van maïszetmeel is het koolstofgehalte berekend als 50% van de organische stof en het stikstofgehalte door het gehalte aan ruw eiwit te delen door 6,25. Het berekende C/N-ratio van maïszetmeel bedraagt dan 390. In tabel 1 staat de berekende C/N-ratio per reactor weergegeven en de input bij een verblijftijd van 20 dagen.

Tabel 1 Het berekende C/N-ratio per reactor en input bij een verblijftijd van 20 dagen

Reactor	Covergisting	Mest (g)	Maïszetmeel (g)	C/N-ratio (-)	OS-belasting (kg/m ³ .dag)
R1	0,0%	1.400	0	5	2,35
R2	2,0%	1.372	28	13	3,18
R3	4,0%	1.344	56	20	4,00
R4	6,0%	1.316	84	28	4,83

In het onderzoek is magnesiumchloride (NedMag C; 32% MgCl₂-oplossing) als magnesiumbron gebruikt. Bij toevoeging van magnesium (Mg) kan, afhankelijk van procescondities en mestsamenstelling, in een licht basisch milieu (circa pH=8) struviet (MgNH₄PO₄) worden gevormd als vast mineraal. Hiermee wordt het opgelost ammoniumgehalte in de reactor verlaagd. De limiterende factor voor struvietvorming bij mestvergisting is de beschikbare hoeveelheid opgelost fosfaat (PO₄³⁻) aangezien deze hoeveelheid kleiner is dan de hoeveelheid opgelost ammonium. De toegevoegde hoeveelheid magnesium is daarom berekend in equivalenten Mg t.o.v. het gehalte aan fosfor (P) in de varkensmest.

De volgende analyses zijn uitgevoerd op de leveringen van varkensmest en digestaat:

- Droge en organische stof
- Totaal-stikstof en ammoniumstikstof
- Totaal-P
- CZV-totaal
- pH
- C/N-ratio

De volgende metingen en analyses zijn uitgevoerd per reactor:

- Biogasproductie en –samenstelling (elke meting)
- VVZ (elke meting)
- pH (elke meting)
- Ammoniumstikstof (wekelijks)

2.3 Statistische analyse van het effect van magnesiumtoevoeging

In een periode van ongeveer twee maanden is in elke reactor de toevoeging van de magnesiumoplossing gevarieerd in de tijd. Met behulp van tijdreeksmodellering via DLM is geëvalueerd in hoeverre magnesium een positieve invloed op het vergistingproces had. De gegevens van alle reactoren zijn geanalyseerd in één longitudinaal model, waarbij de dosis respons relatie tussen mest/coproduct met gas- of methaanproductie is gemodelleerd in het random model. Het ligt immers voor de hand dat de vier reactoren een verschillende hoeveelheid gas produceren uit één volume-eenheid input, aangezien de input per vergister verschilt in het aandeel maïszetmeel van de input. Het model is als volgt:

$$\underline{Y} = \mu + \alpha_z + \underline{\beta}_{0v} + \underline{\beta}_{1v} * I_v + \underline{\varepsilon}_{vt}$$

Met :

- \underline{Y} : resp. biogasproductie per dag, methaangehalte
- μ : constante
- α_z : effect van magnesiumtoevoeging
- $\underline{\beta}_{0v}$: random niveau van vergister v
- $\underline{\beta}_{1v}$: random effect in input-output relatie van vergister v
- I_v : input (dosis) van vergister v
- $\underline{\varepsilon}_{vt}$: random dageffect van vergister v.

De analyse is in Genstat uitgevoerd met de procedure REML. Bij de analyse is rekening gehouden met de afhankelijkheid tussen herhaalde waarnemingen per vergister door het schatten van een parameter voor de autocorrelatie.

Bij de modellering is gekozen voor het opsporen van een kwalitatief effect (d.w.z. ongeacht het niveau van de magnesiumtoevoeging, dus is magnesium wel versus niet aanwezig in de input) van magnesiumtoevoeging. Met behulp van residucontrole is naderhand geëvalueerd of de respons op magnesiumtoevoeging bovendien nog sterk afhankelijk was van de magnesiumdosis.

3 Resultaten batchtesten

3.1 Meetresultaten

De mestsoorten zijn door Praktijkcentrum Sterksel (Sterksel) aangeleverd. Vooraf aan de experimenten zijn enkele relevante eigenschappen van de mestmonsters bepaald. In tabellen 2 en 3 staat de samenstelling van de mestsoorten weergegeven.

Tabel 2 Mestsamenstelling van de gebruikte mestsoorten van Praktijkcentrum Sterksel in de batchtesten

Mestsoort	pH (-)	DS (g/kg)	OS (g/kg)	OS/DS (%)	CZV (g/kg)
Varkensmest	7,3	67	53	79%	94,9
Dunne fractie varkensmest vijzelpers	7,2	69	47	67%	101,4
Dikke fractie varkensmest vijzelpers	7,3	321	285	89%	464,6
Biggenmest	7,2	30	20	66%	19,4
Kraamzeugenmest	6,9	18	12	66%	37,4
Guste en dragende zeugenmest	7,2	60	43	71%	78,2
Vleesvarkensmest Droogvoer	6,9	47	33	70%	82,3
Vleesvarkensmest Brijvoer	7,3	20	12	58%	23,3

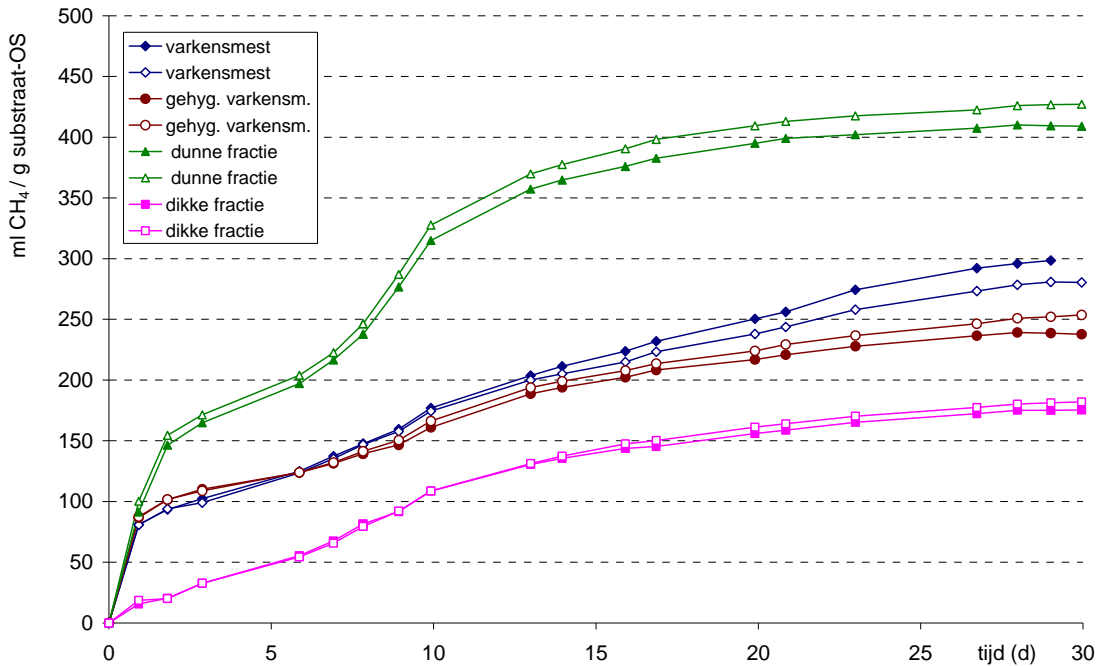
Tabel 3 Gehalten aan vluchtige vetzuren in de verschillende mestsoorten en totaal chemisch zuurstofverbruik van de vluchtige vetzuren

Mestsoort	C2 (mg/kg)	C3 (mg/kg)	C4 (mg/kg)	C5 (mg/kg)	C6 (mg/kg)	CZV _{VZ} (mg/kg)
Varkensmest	7.123	2.307	1.093	683	0	14.469
Gehygiëniseerde varkensmest	7.144	2.322	1.106	626	0	14.422
Dunne fractie varkensmest vijzelpers	8.058	4.001	2.404	656	0	20.360
Dikke fractie varkensmest vijzelpers	7.279	2.920	1.765	0	0	15.394
Biggenmest	3.871	1.666	683	909	155	10.088
Kraamzeugenmest	5.440	2.774	918	480	93	12.854
Guste en dragende zeugenmest	5.181	1.515	560	438	0	9.729
Vleesvarkensmest Droogvoer	11.457	4.475	2.474	1.183	76	26.073
Vleesvarkensmest Brijvoer	5.417	3.406	929	808	50	14.379

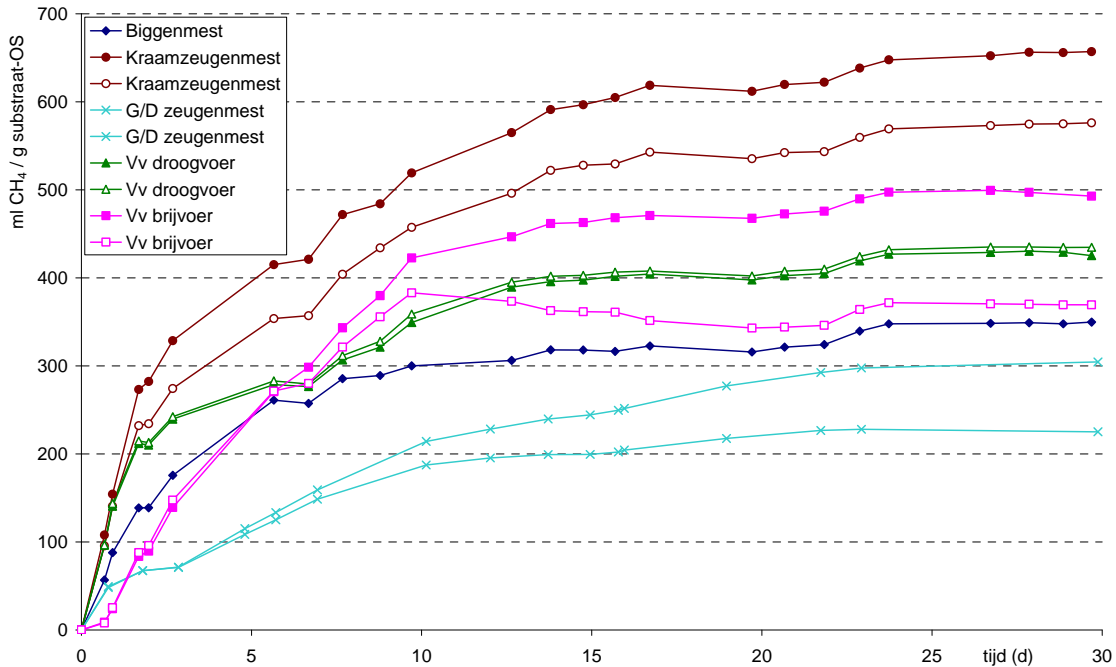
De dunne en dikke fractie zijn geproduceerd door de varkensmest te scheiden m.b.v. een vijzelpers. Zoals verwacht ligt het drogestofgehalte van de dikke fractie varkensmest aanzienlijk hoger dan van de ingaande varkensmest. Ook het drogestofgehalte van de dunne fractie ligt hoger dan het drogestofgehalte van de ingaande varkensmest wat onlogisch is. Navraag bij zowel het laboratorium als Sterksel leverde geen mogelijke verklaring op. Op basis van eerder onderzoek (Timmerman et al., 2005) met het scheiden van varkensmest met de vijzelpers op Sterksel zou het drogestofgehalte van de dunne fractie circa 48 g/kg moeten bedragen wat circa 30% lager is dan het gemeten gehalte. Ook de drogestofgehalten van beide soorten vleesvarkensmest liggen lager dan verwacht. Op basis van eerder onderzoek met vleesvarkensmest van Sterksel (Timmerman en Smolders, 2004) zouden de drogestofgehalten ongeveer een factor 2 hoger moeten liggen. Navraag leverde geen mogelijke verklaring op voor de lage drogestofgehalten.

In figuren 1 en 2 staan de resultaten weergegeven van de in duplo gemeten cumulatieve methaanproductie (ml CH₄/g OS) van de onderzochte mestsoorten.

Figuur 1 Methaanproductie in de batchtest van (gehygiëniseerde) varkensmest, dunne en dikke fractie



Figuur 2 Methaanproductie in de batchtest van biggen-, kraamzeugen- en G/D-zeugenmest en vleesvarkensmest



Bij de meeste mestsoorten waren de resultaten van de duplobepalingen vergelijkbaar, zie figuren 1 en 2. Echter bij de biggenmest bleek tijdens de proef één fles lek te zijn waardoor maar één meting in figuur 2 is opgenomen. Het verloop van de concentratie vluchtige vetzuren in de lekke fles was wel hetzelfde als in de andere fles, zie bijlage 1. Daarnaast nam bij één van de flessen met “Vleesvarkensmest - brijvoer” de druk na 10 dagen niet meer toe, dit is waarschijnlijk eveneens het gevolg van een kleine lekkage. Het verloop van de druk en de vluchtige vetzuren in de eerste 10 dagen waren gelijk aan het verloop in de duplo bepaling. De metingen van deze fles

“Vleesvarkensmest – brijvoer” (roze open vierkanten in figuur 2) zijn daarom niet meegenomen in de berekening van de maximale potentiële methaanproductie en hydrolyseconstante.

In tabel 4 staat het gemiddelde methaangehalte, maximale methaanproductie en hydrolyseconstante weergegeven van de onderzochte varkensmestsoorten in de batchtesten. In bijlage 2 staat de datafit.

Tabel 4 Gemiddeld methaangehalte, maximale methaanproductie en hydrolyseconstante

Mestsoort	CH ₄ -gehalte (%)	Maximale methaanproductie (ml CH ₄ /g OS)	(m ³ CH ₄ /ton)	k _h (d ⁻¹)
Varkensmest	71	300	15,9	0,09
Gehygiëniseerde varkensmest	73	243	12,9	0,13
Dunne fractie varkensmest vijzelpers	74	431	20,0	0,13
Dikke fractie varkensmest vijzelpers	62	213	60,7	0,07
Biggenmest	67	333	6,7	0,26
Kraamzeugenmest	67	596	7,2	0,20
Guste en dragende zeugenmest	65	276	11,9	0,12
Vleesvarkensmest Droogvoer	71	410	13,4	0,27
Vleesvarkensmest Brijvoer	67	523	6,1	0,13

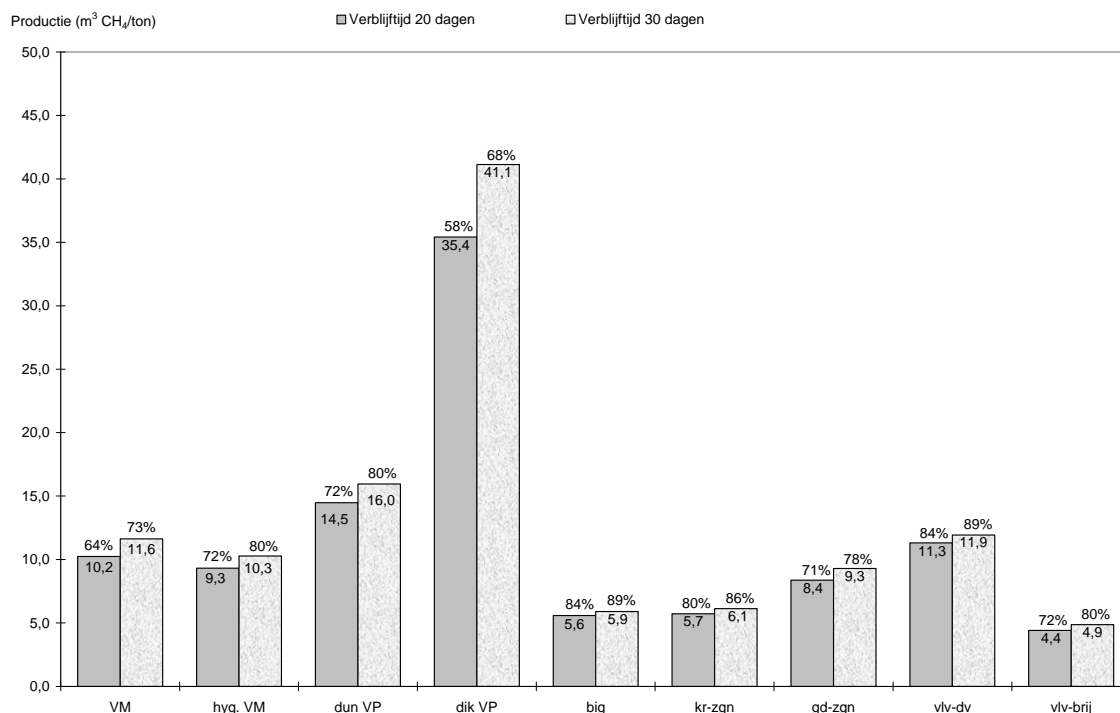
Hoe hoger de hydrolyseconstante des te sneller wordt het organisch materiaal afgebroken. De dikke fractie varkensmest van een vijzelpers had de laagste hydrolyseconstante wat een gevolg is van de afscheiding van de grotere deeltjes uit de varkensmest in de dikke fractie. Tevens zal de dikke fractie een groter aandeel moeilijker afbraakbaar materiaal bevatten. Grotere deeltjes hebben een langere verblijftijd nodig voor de afbraak. De kleinere deeltjes blijven voor het grootste deel achter in de dunne fractie. Dit resulteert in een hogere hydrolyseconstante voor de dunne mestfractie aangezien de kleinere deeltjes sneller worden omgezet. De hydrolysesnelheid is namelijk evenredig met het oppervlak van het te hydrolyseren materiaal.

Ten opzichte van varkensmest lag de maximale methaanproductie van de dikke fractie varkensmest uit de vijzelpers een factor 3,8 hoger per ton product. Echter, gerekend per kilogram organische stof heeft varkensmest een hogere methaanproductie dan de dikke fractie.

3.2 Berekening methaanproductie van een CSTR-reactor

Op basis van de hydrolyseconstante en maximale methaanproductie uit de batchtest is de methaanopbrengst berekend van de onderzochte mestsoorten bij vergisting in een continue volledige gemengde reactor (CSTR). Daarbij is berekend wat de methaanopbrengst t.o.v. van de maximale methaanproductie is of wel hoeveel van de maximale methaanproductie daadwerkelijk zou kunnen worden benut. In figuur 3 staat de berekende methaanproductie van de CSTR en het benuttingpercentage weergegeven bij een verblijftijd van 20 en 30 dagen.

Figuur 3 Berekende methaanproductie en percentage van de maximale methaanproductie van de onderzochte mestsoorten bij 20 en 30 dagen verblijftijd in een CSTR-reactor



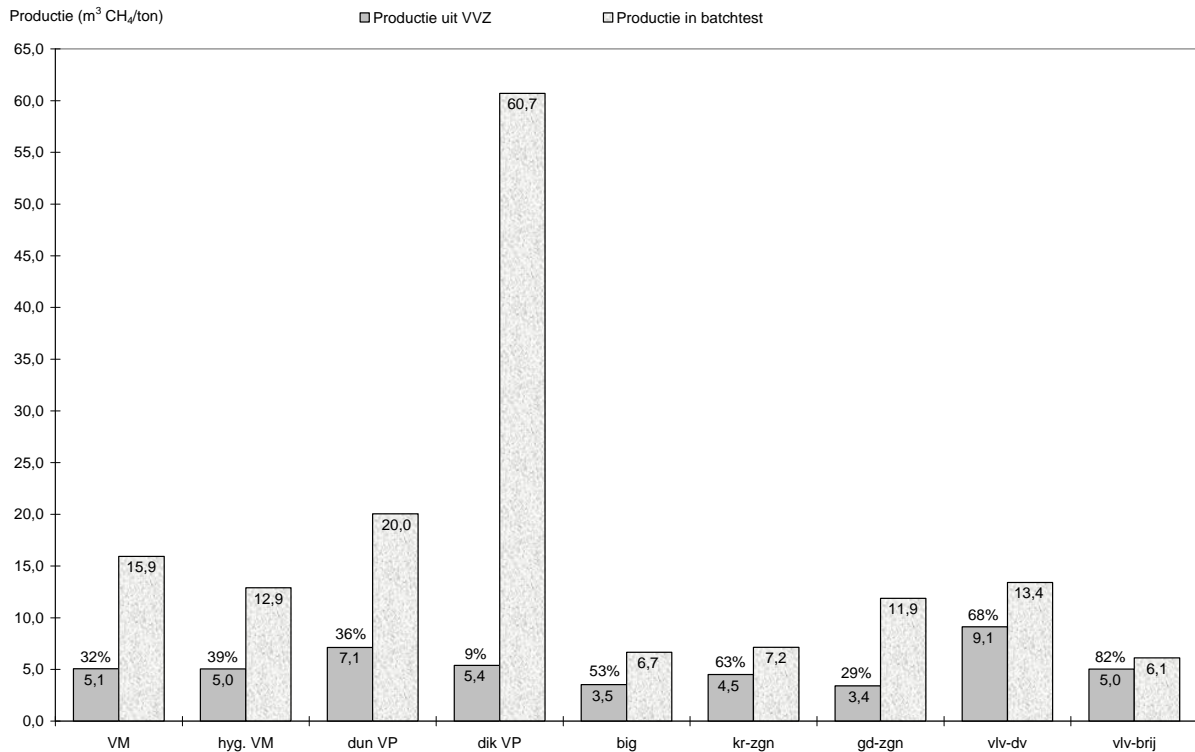
Bij een verblijftijd van 20 dagen is bij biggenmest, kraamzeugenmest en vleesvarkensmestdroogvoer al een methaanproductie bereikt van meer dan 80% van de maximale methaanproductie. Het verlengen van de verblijftijd met 10 dagen levert relatief gezien maar weinig extra methaanproductie op. Dit ligt anders voor de dikke fractie varkensmest uit de vijzelpers. Hiervan is pas 58% van de maximale methaanproductie benut na een verblijftijd van 20 dagen. Het verlengen van de verblijftijd naar 30 dagen verhoogd het benuttingpercentage met 10%. Vanwege de hoge methaanproductie per ton levert dit absoluut gezien ook een grote hoeveelheid extra methaanproductie op. De overige mestsoorten hebben na een verblijftijd van 30 dagen een methaanproductie van circa 80% of meer van de maximale methaanproductie bereikt, behalve bij de varkensmest wat een lagere berekende methaanproductie heeft.

3.3 Potentiële methaanproductie uit varkensmest

De theoretische potentiële methaanproductie van organisch materiaal ligt op $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg CZV}$, maar dit zal in de praktijk altijd lager zijn vanwege o.a. beperkingen in verblijftijd, temperatureffecten en aanwezigheid van moeilijk afbreekbaar materiaal (Angelidaki en Sanders, 2004). Op basis van de CVZ-gehalten kan wel berekend worden wat theoretisch de maximaal haalbare methaanproductie is of wel wat de potentiële methaanproductie is.

De vluchtige vetzuren worden in de voorlaatste stap (acetogenese) in het vergistingproces omgezet naar azijnzuur, waterstof en koolstofdioxide welke door de methanogenen worden gebruikt voor de productie van methaan. De vluchtige vetzuren in een product kunnen in principe dus snel worden omgezet naar methaan. Op basis van de hoeveelheid CZV van de vluchtige vetzuren is berekend wat de theoretische methaanproductie uit de vluchtige vetzuren in de onderzochte mestsoorten bedraagt wat vervolgens vergeleken is met de maximale methaanproductie in de batchtesten, zie figuur 4.

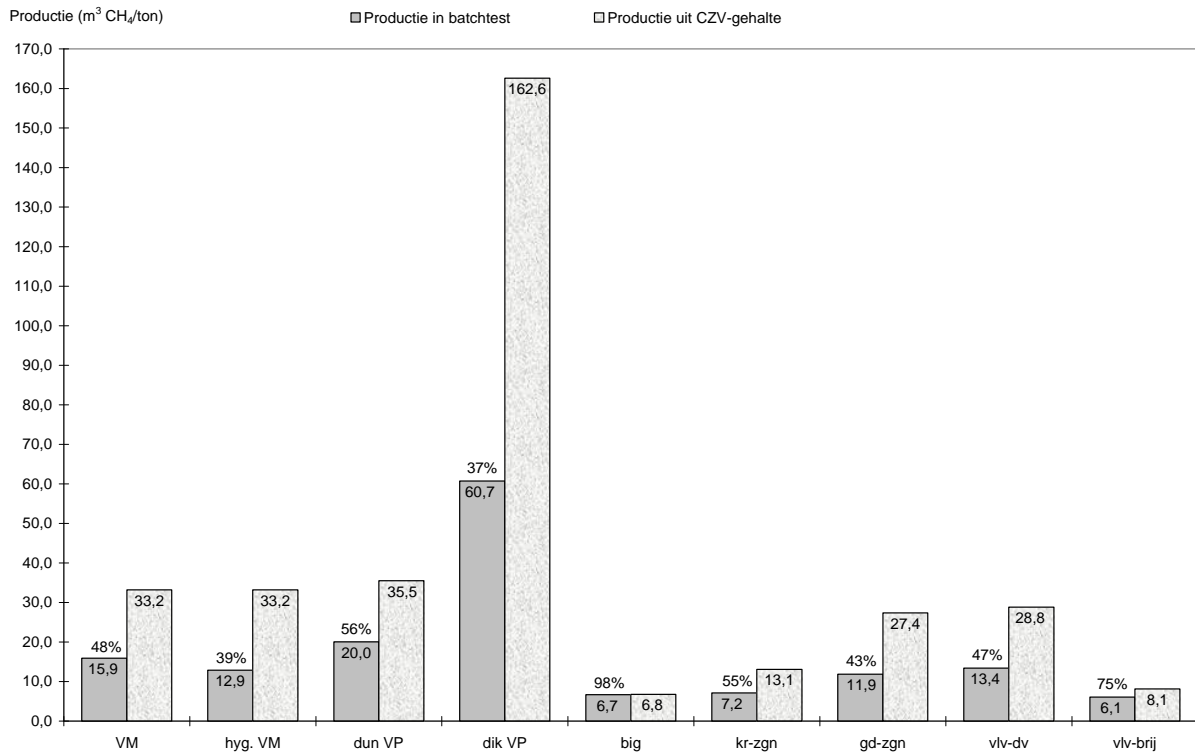
Figuur 4 Theoretische methaanproductie uit de vluchtige vetzuren in de onderzochte mestsoorten en hun aandeel in de maximale methaanproductie in de batchtesten



Het aandeel van de vluchtige vetzuren dat aan het beging van de testen aanwezig is verschilt sterk per mestsoort. Mede hierdoor varieert ook de maximale methaanproductie per mestsoort. Bij de dikke fractie bedraagt het aandeel maar 9% terwijl dit bij de vleesvarkensmestbrijvoer 82% bedraagt. Bij de biggenmest, kraamzeugenmest en vleesvarkensmestdroogvoer is het aandeel ook meer dan 50%. Dit houdt in dat voor deze mestsoorten de methaanproductie voor een aanzienlijk deel bepaald wordt door de vluchtige vetzuren en dat initiële methaanproductie dus snel kan plaatsvinden. Het zou dus in principe mogelijk moeten zijn om bij deze mestsoorten bij een korte verblijftijd toch een relatief hoge methaanproductie te halen, mits de uitspoeling van de methanogenen niet te groot is c.q. beperkt wordt. Daarnaast moeten we rekening houden met de vetzuurgehalten waaraan de methanogene bacteriën worden blootgesteld. Absolute vetzuurconcentraties die resulteren in remming van de methanogene bacteriën zijn niet bekend. De hoogte van de concentraties waarbij vetzuren toxicus worden hangt bovendien sterk af van factoren zoals pH, aanwezigheid van andere toxicus verbindingen en de buffercapaciteit van de mest. Te hoge concentraties vetzuren kunnen leiden tot een pH-verlaging en daarna (bij daling van de pH tot waarden onder pH 5,5-6,0) tot remming en zelfs complete inactivatie van de methanogene populatie. Gezien de goede bufferende werking van mest zal er niet snel verzuring van het milieu optreden, maar de vetzuurconcentratie is wel een factor waar vooralsnog voorzichtig mee dient te worden omgesprongen.

Op basis van het CZV-gehalte van de mestsoorten is berekend wat de theoretische potentiële methaanproductie van de onderzochte mestsoorten bedraagt wat vervolgens vergeleken is met de maximale methaanproductie in de batchtesten, zie figuur 5.

Figuur 5 De potentiële methaanproductie van de onderzochte mestsoorten en de maximale methaanproductie uit de batchtesten en het aandeel van de maximale t.o.v. de potentiële methaanproductie



De maximale methaanproductie van de onderzochte mestsoorten in de batchtesten bedraagt gemiddeld 55% van de theoretische methaanproductie. Onder optimale praktische omstandigheden kan in een reactor circa 90-95% worden omgezet (Angelidaki en Sanders, 2004). Mogelijke verklaringen voor de hoge omzettingsgraad van 98% bij biggenmest zijn: 1) een batchtest i.p.v. continuvergisting, 2) biggen krijgen gemakkelijk verteerbaar voer en 3) onnauwkeurigheden in de meting mede i.v.m. relatief lage totaal gasopbrengst. Dat het vleesvarkensmest-brijvoer een hogere omzettingsgraad heeft dan vleesvarkensmestdroogvoer kan mogelijk veroorzaakt zijn doordat brijvoer makkelijk verteerbaar is voor het varken en daarmee ook gemakkelijk 'verteerbare' mest laat voor de micro-organismen in de mest en/of dat de lage pH van brijvoer de organische stof beter beschikbaar maakt in de mest voor de bacteriën. De laagste omzettingsgraad (37%) wordt behaald bij de dikke fractie wat ook conform de verwachtingen is aangezien de samenstelling van dit product uit grotere en moeilijk afbreekbare organische stof bestaat. Voor de overige mestsoorten ligt de omzettingsgraad tussen de 39 en 56%. Voor de meeste onderzochte mestsoorten geldt dus nog dat de energieproductie in principe verhoogd zou kunnen worden.

4 Resultaten CSTR-proef

4.1 Meetresultaten

De mest en het maïszetmeel die gebruikt zijn voor de CSTR-proef zijn gekarakteriseerd. De resultaten van deze analyses staan weergegeven in **Tabel 5**. Elke CSTR werd bedreven bij een andere C/N ratio en magnesium dosering. Op basis van de analysesresultaten is berekend wat de werkelijke C/N-ratio's zijn geweest in de vier reactoren, zie tabel 6. In bijlage 3 staat per reactor de input aan mest, zetmeel en $MgCl_2$ -oplossing weergegeven.

Tabel 5 Droge en organische stofgehalte van de varkensmest en maïszetmeel gebruikt voor covergisting

Product ^a	pH (-)	DS (%)	OS (%)	CZV _{totaal} (g/kg)	N-totaal (g/kg)	NH ₄ -N (g/kg)	C (g/kg)	P-totaal (g/kg)
Varkensmest A	7,0	6,7	4,7	102	5,9	3,7	26	1,2
Varkensmest B	7,0	7,0	5,0	104	6,1	3,8	29	1,2
Varkensmest C	7,0	7,4	5,3	104	6,1	3,9	30	1,2
Varkensmest D	7,2	7,4	5,3	96	6,1	3,9	30	1,2
Maïszetmeel	-	81,3	77,5	-	-	-	362	-

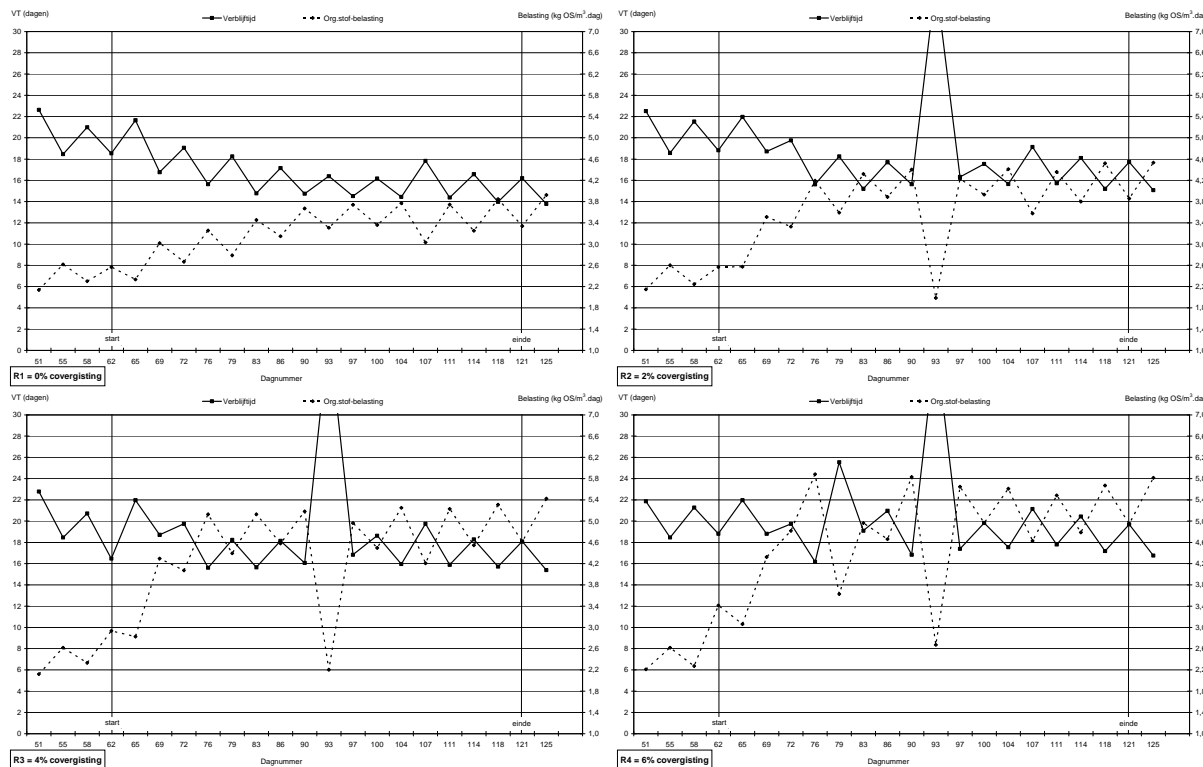
^a Varkensmest A t/m D zijn verschillende mestmonsters die na elkaar gebruikt zijn in de CSTR experimenten

Tabel 6 Het berekende en werkelijke C/N-ratio per reactor bij een verblijftijd van 20 dagen

Reactor	Covergisting	Mest (g)	Maïszetmeel (g)	C/N-berekend (-)	C/N-werkelijk (-)
R1	0,0%	1.400	0	5	5
R2	2,0%	1.372	28	13	11
R3	4,0%	1.344	56	20	17
R4	6,0%	1.316	84	28	24

In bijlage 4 staat het verloop van pH, ammonium en vluchtige vetzuren per reactor weergegeven. In figuur 6 staat de verblijftijd en organische belasting per reactor weergegeven tijdens de periode van covergisting.

Figuur 6 Verblijftijd en organische belasting per reactor tijdens de periode van covergisting

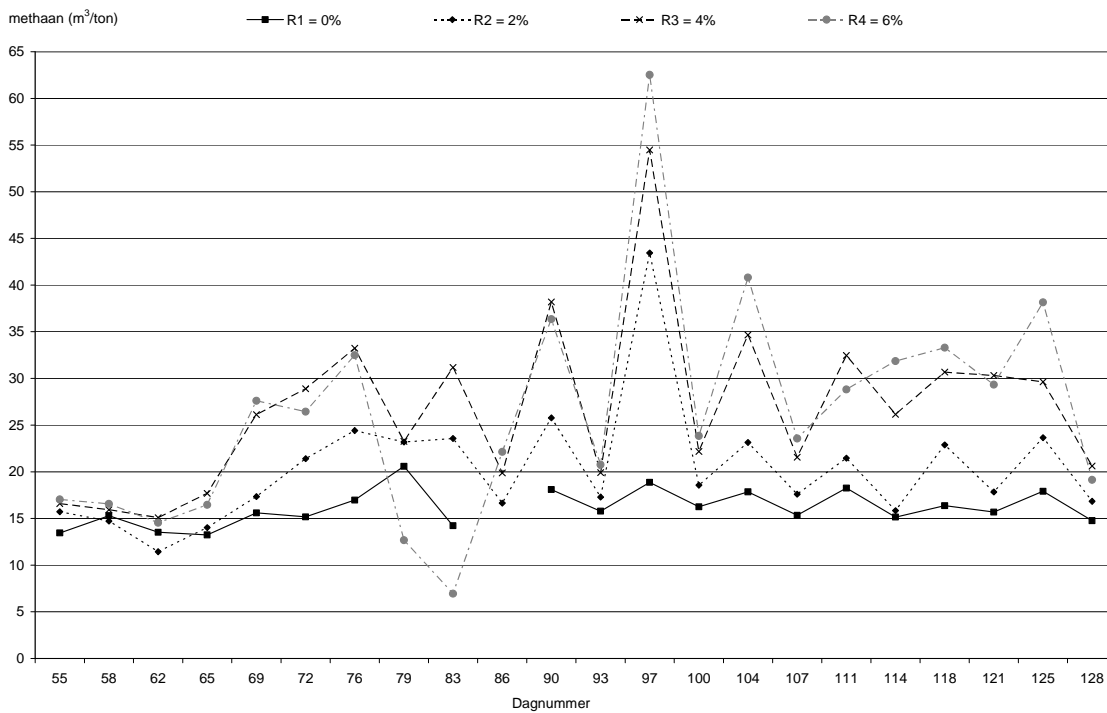


De zaagtandlijnen in figuur 6 worden veroorzaakt door het tijdsinterval tussen beide voedingen in de week. Om praktische redenen i.v.m. de handmatige voeding van de reactoren kon het tijdsinterval niet exact gelijk worden gehouden. Gemiddeld was het ene tijdsinterval 77 uur en het andere 91 uur. De uitschieters op dag 93 bij reactoren R2, R3 en R4 worden veroorzaakt doordat eenmalig de voeding werd gehalveerd vanwege het relatief hoog geachte gehalte aan vluchtige vetzuren in de reactoren R2, R3 en R4, zie bijlage 4.

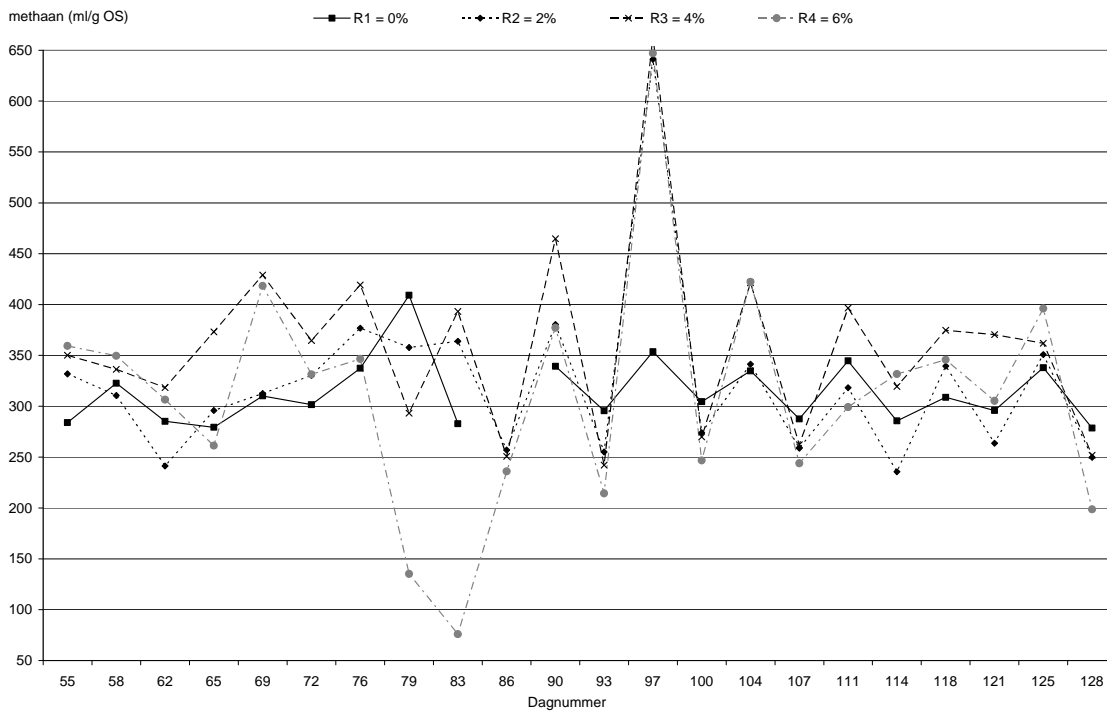
De kortste verblijftijd werd gerealiseerd in reactor R1 zonder covergisting en de langste verblijftijd in reactor R4 met het hoogste aandeel covergisting. Echter reactor R4 heeft ook de hoogste organische belasting, terwijl reactor R1 de laagste organische belasting heeft. Dit is een gevolg van het covergisten met een product wat een hoog organische stof gehalte heeft. Een kleine toevoeging zorgt hierbij voor een relatief grote toename in organische stof toevoer naar de reactor.

De methaanproductie van de verschillende CSTR's staan in figuur 7 weergegeven (per ton input (mest + zetmeel)) en in figuur 8 (per gram organische toevoer).

Figuur 7 Methaanproductie per ton input (mest + zetmeel) per reactor



Figuur 8 Methaanproductie per gram organische stof toevoer (mest + zetmeel) per reactor

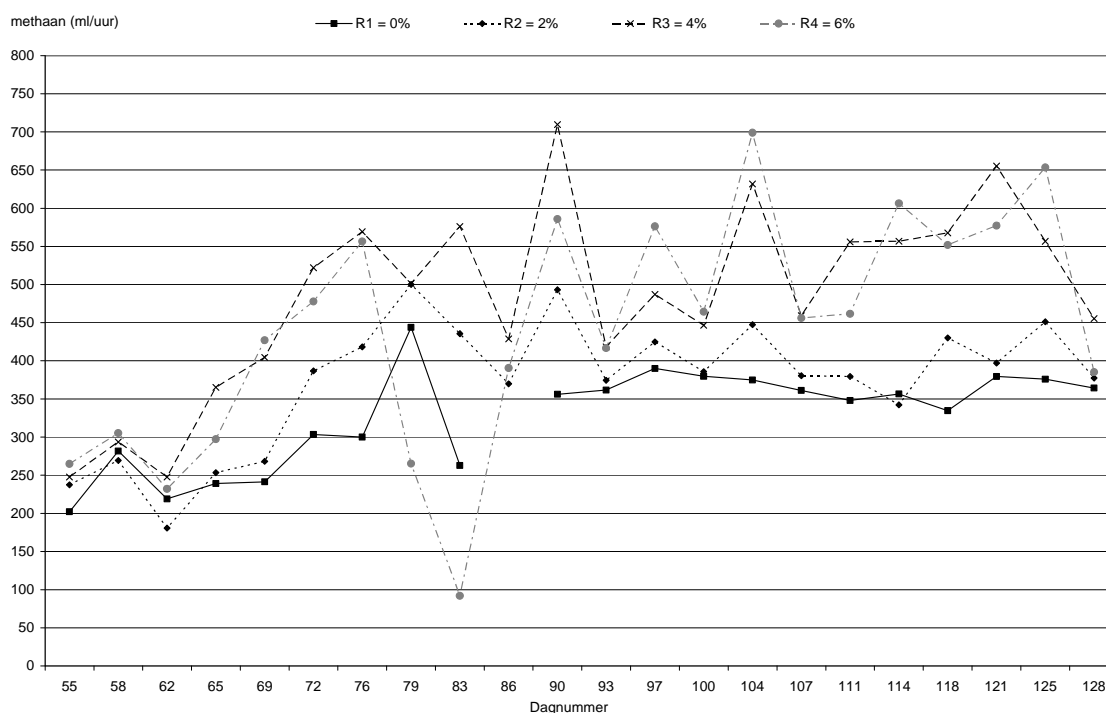


De piek in methaanproductie bij reactoren R2, R3 en R4 wordt veroorzaakt doordat eenmalig de voeding werd gehalveerd vanwege het hoge gehalte aan vluchtige vetzuren in deze reactoren. Op dag 86 is bij reactor R1 de meting van de gasproductie mislukt, waardoor op deze dag de meetwaarde ontbreekt. De (tijdelijke) verlaging in de gasproductie bij R4 werd veroorzaakt door een te volle gaszak, waardoor deze reactor overstroomde en geen goede meetwaarden werden geregistreerd.

Uit de figuren 7 en 8 blijkt dat ook het tijdsinterval tussen de voedingen van invloed is geweest op de methaanproductie, omdat bij alle reactoren ook weer zaagtandlijnen zijn ontstaan. De hoogste methaanproductie wordt behaald bij de langste verblijftijd. De hoogste methaanproductie per ton input wordt behaald in de reactor met het hoogste aandeel zetmeel en is bijna twee keer zo groot als de reactor zonder covergisting. Wordt echter naar de methaanproductie per gram organische stof gekeken dan blijken alle reactoren gemiddeld genomen op hetzelfde productieniveau uit de organische stof te liggen.

In figuur 9 staat de gemiddelde methaanproductie per uur weergegeven voor de vier reactoren.

Figuur 9 Gemiddelde methaanproductie per uur per reactor

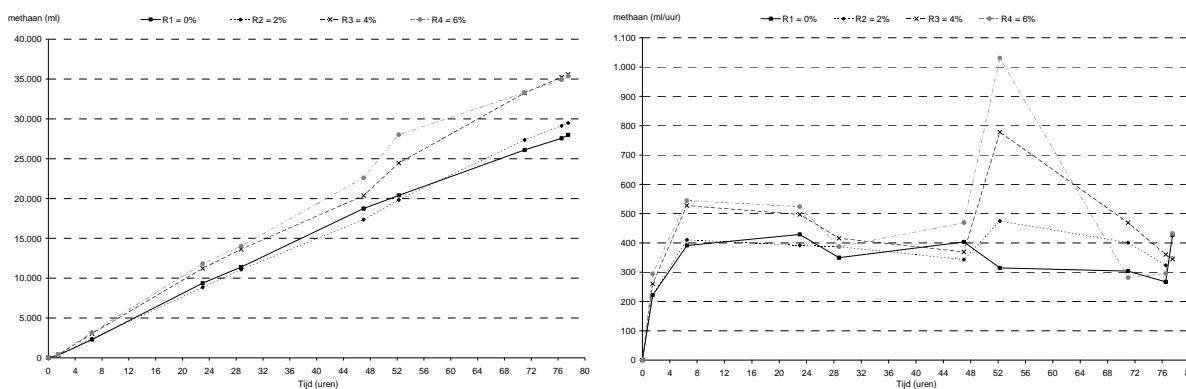


Opvallend in figuur 9 is dat niet bij alle reactoren opnieuw de zaagtandlijnen ontstaan. Bij de reactor zonder covergisting is sprake van een redelijke constante productie per uur in het tweede gedeelte van de experimentele periode (dag 90-dag 130), waardoor hier geen intervaleffect is waar te nemen. Bij de reactoren met covergisting treedt het zaagtandeffect wel weer op, wat mogelijk veroorzaakt kan worden door een (tijdelijke) overbelasting van de reactoren en onbalans tussen verschillende groepen micro-organismen die in elke fase van het vergistingproces actief zijn. Omdat maar tweemaal per week werd gevoed, krijgen de bacteriën in eerste instantie direct na het voeren een relatief grote hoeveelheid organische stof te verwerken. Bij een langer tijdsinterval kunnen de bacteriën het relatief hoge voedingsregime op het eind van het interval mogelijk (deels) compenseren.

4.2 Aanvullende metingen

Om meer inzicht te verkrijgen in de achtergronden van het zaagtandeffect zijn tussentijdse metingen verricht aan het gasvolume tussen dag 104 en dag 107 (figuur 10).

Figuur 10 Verloop methaanproductie (absolute hoeveelheid, links en vormingssnelheid, rechts) per reactor tussen dag 104 en dag 107



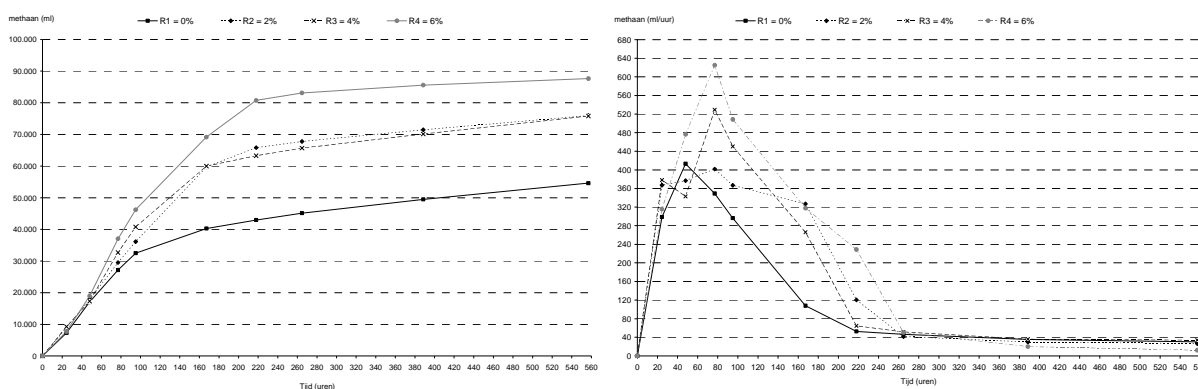
In de eerste 24 uur na de voeding ligt de methaanproductie circa 25% hoger bij de twee reactoren met het hoogste percentage covergisting. Tussen 24 en 48 uur ligt de methaanproductie op een redelijk vergelijkbaar niveau, terwijl pas na 48 uur de methaanproductie van de reactoren met covergisting duidelijk toeneemt t.o.v. de reactor zonder covergisting (R1). De methaanproductie van R1 en R2 is ook veel constanter dan van de andere reactoren. Door de relatief grote hoeveelheid organische stof die bacteriën krijgen te verwerken tijdens een voeding, wordt pas in het laatste deel van het interval de hoogste methaanproductie bereikt in R3 en R4.

Na afloop van de CSTR-proef werden de reactoren nog een tijdje operationeel gehouden om nogmaals aanvullende metingen te kunnen verrichten aan de reactoren, waarbij geen nieuw organisch materiaal meer werd toegevoegd aan de reactoren. De uiteindelijke methaanproductie in deze periode was:

- R1 (0% covergisting) = 542 ml CH₄/g OS
- R2 (2% covergisting) = 653 ml CH₄/g OS
- R3 (4% covergisting) = 545 ml CH₄/g OS
- R4 (6% covergisting) = 587 ml CH₄/g OS

In figuur 11 staat de methaanproductie weergegeven van de uitgistende reactoren.

Figuur 11 Verloop methaanproductie (absolute hoeveelheid, links en vormingssnelheid, rechts) per reactor na afloop van de CSTR-proef

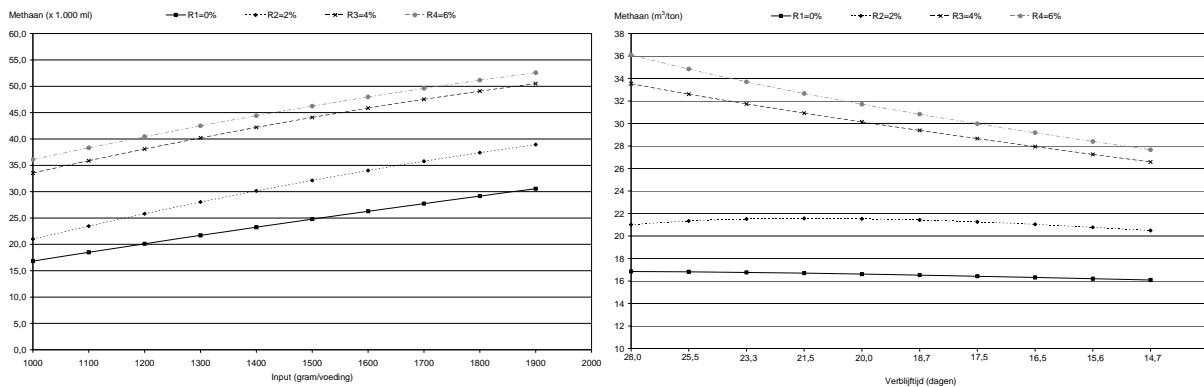


Opvallend in figuur 11 is dat R2 en R3 op dezelfde methaanproductie uitkomen, terwijl R3 een grotere hoeveelheid organische stof gevoed kreeg. Je zou daarom verwachten dat R3 een hogere methaanproductie zou hebben. Het tijdsinterval was tijdens de proef circa 77 of 91 uur, terwijl pas na 91 uur de grote verschillen in methaanproductie tussen de reactoren optreden. Na 95 uur was bij reactor R1 al 60% van het totale methaanpotentieel gevormd terwijl dit bij reactor R2 nog maar 48% bedroeg. Bij reactor R3 was dit 54% en bij reactor R4 was dit 53%. Kortom, het potentieel werd in reactor R1 het snelst benut. De andere reactoren waren waarschijnlijk tijdelijk geremd, door een snelle omzetting van beschikbare CZV en een tijdelijke ophoping van vluchtige vetzuren. Ook de aanvullende metingen na afloop van de proef lijken te wijzen op een (tijdelijke) overbelasting van de reactoren en onbalans tussen verschillende groepen micro-organismen die in elke fase van het vergistingproces actief zijn.

4.3 Analyse van meetresultaten op effect van verblijftijd en zetmeel

In figuur 12 staat het geanalyseerde effect van de verblijftijd op de totale methaanproductie per reactor en per ton input weergegeven.

Figuur 12 Invloed van verblijftijd op de totale methaanproductie per reactor en per ton input



Uit de analyse komt naar voren dat de verhoging van de input in alle reactoren tot een hogere totale methaanproductie leidt. Het valt op dat de totale methaanproductie relatief weinig toenam bij de stap van 4 naar 6% covergisting met maïszetmeel, terwijl dit bij de stappen van 0 naar 2% en van 2 naar 4% wel het geval was. Bij de vergelijking op basis van de methaanproductie per ton input komt een ander beeld naar voren. Bij de reactor R1 zonder covergisting is de methaanproductie per ton constant bij verblijftijden van 23 t/m 28 dagen. Bij kortere verblijftijden daalt de methaanproductie licht. Bij een verblijftijd van 15 dagen is de methaanproductie per ton input gedaald met 5% t.o.v. de verblijftijd van 28 dagen. Echter bij de zelfde reactorinhoud kan dan wel 90% meer input worden vergist.

Bij de reactor R2 met 2% zetmeel neemt in eerste instantie de methaanproductie per ton input toe bij kortere verblijftijden, maar bij verdere verlaging neemt de methaanproductie vervolgens weer af. De hoogste methaanproductie per ton input wordt gerealiseerd bij een verblijftijd van 21,5 dagen. De verlaging van de verblijftijd van 21,5 naar 14,7 dagen leidt tot een daling van 5% in methaanproductie per ton input.

Bij zowel reactor R3 als R4 neemt de methaanproductie per ton input af bij kortere verblijftijden. De daling in methaanproductie bij R3 bedraagt 21% en bij R4 is dit 23%. In tabel 7 staat de specifieke methaanproductie van de reactor bij een verblijftijd van 28,0 en 14,7 dagen.

Tabel 7 De specifieke methaanproductie (in m³ CH₄/kg OS) per reactor bij twee verblijftijden

Verblijftijd (dagen)	R1 (0,0%)	R2 (2,0%)	R3 (4,0%)	R4 (6,0%)
14,7	0,32	0,31	0,32	0,29
28,0	0,33	0,32	0,42	0,38

Uit tabel 7 blijkt dat bij verlaging van de verblijftijd van 28,0 naar 14,7 dagen de reactoren met de hoogste aandelen zetmeel de specifieke methaanopbrengst sterk daalt.

4.4 Analyse van meetresultaten op effect magnesiumtoevoeging

Aan reactor R1 werd gemiddeld 8,70 gram; aan R2 gemiddeld 8,85 gram; aan R3 gemiddeld 7,80 gram en aan R4 gemiddeld 6,85 gram MgC₁₂-oplossing toegevoegd. De modeluitkomsten leverden geen significante effecten van magnesiumtoevoeging op, m.a.w. we hebben in dit onderzoek niet vast kunnen stellen dat er een duidelijk positief of negatief effect was. De waargenomen effecten waren:

- Hoewel dus niet significant, werd er bij de reactoren R1 (0% zetmeel) en R2 (2% zetmeel) een licht positief effect van magnesiumtoevoeging gevonden op de biogasproductie. Deze wordt geschat voor R1 op 305 ml per dag en voor R2 op 555 ml per dag.
- Hoewel dus niet significant, werd er bij de reactoren R3 (4% zetmeel) en R4 (6% zetmeel) een licht negatief effect van magnesiumtoevoeging gevonden op de biogasproductie. Deze wordt geschat voor R3 op -431 ml per dag en voor R4 op -545 ml per dag.
- De variatie in magnesiumdosis leverde geen verschil op in de biogasproductie.
- Ten aanzien van het effect van magnesium toevoeging op het methaangehalte van het biogas was er eveneens een niet-significant effect. Dit effect was licht negatief voor alle reactoren: -0,39% voor R1; -1,15% voor R2; -1,19% voor R3 en -1,83% voor R4.

5 Economische evaluatie

5.1 Algemene uitgangspunten

De productie van duurzame elektriciteit wordt door de Nederlandse overheid gesubsidieerd via de SDE-regeling. De subsidiertarieven worden jaarlijks vastgesteld per categorie van duurzame energieproductie waarbij ook jaarlijks voor elke categorie een totaal maximaal subsidieplafond wordt vastgesteld. Er zit dus jaarlijks een limiet aan het aantal nieuwe installaties dat subsidie kan aanvragen. Het subsidiebedrag is voor 2009 afhankelijk van de warmtebenutting van de WKK-installatie. Het subsidiebedrag voor 2009 varieert tussen € 0,152 en € 0,177 per kWh elektriciteit. Bij subsidie toekenning aan een biogasinstallatie op basis van mest of covergisting van mest geldt een subsidieduur van 12 jaar onder de huidige regelgeving. Voor meer informatie over de SDE-regelgeving wordt verwezen naar www.senternovem.nl/sde.

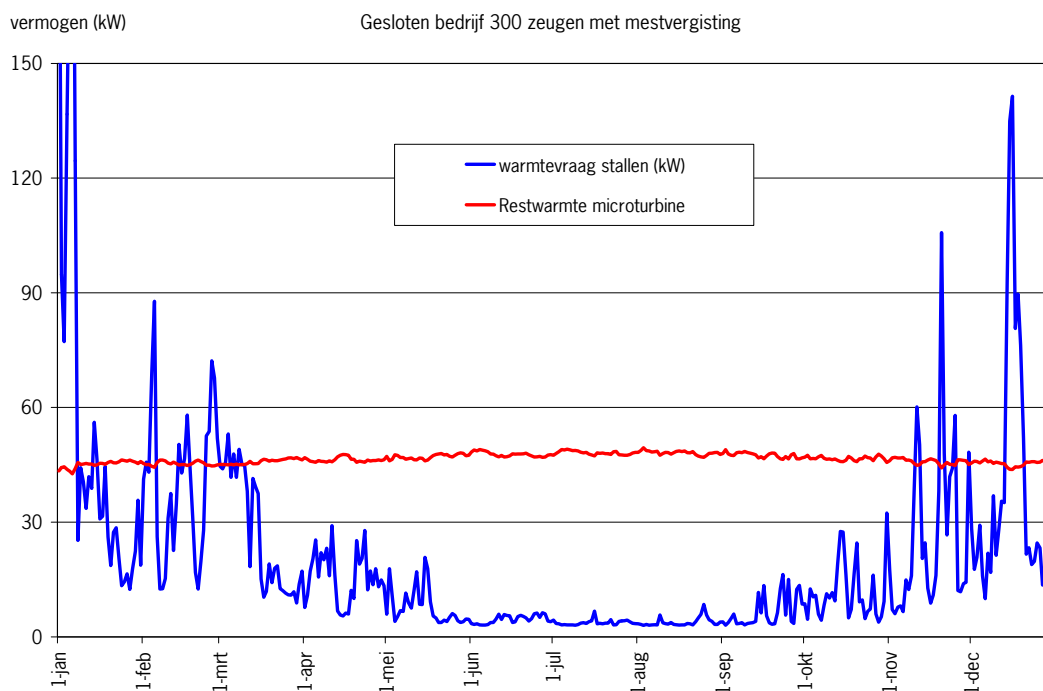
Als uitgangspunt voor de berekening is een gesloten bedrijf met 300 zeugen en 2.400 vleesvarkenplaatsen genomen met de volgende aannames:

- Gemiddelde mestproductie: 5,5 m³/zeug en 1,2 m³/vleesvarkenplaats,
- Gemiddeld elektriciteitsgebruik: 190 kWh/zeug en 36 kWh/vleesvarkenplaats,
- Gemiddeld aardgasverbruik: 90 m³/zeug en 7 m³/vleesvarkenplaats.

De totale mestproductie bedraagt 4530 m³ per jaar (=12,4 m³/dag) en het totale energiegebruik bedraagt 143.400 kWh elektriciteit en 43.800 m³ aardgas.

Via een indicatieve berekening is nagegaan wat de mogelijke besparing aan verwarmingskosten kunnen zijn dankzij mestvergistinginstallatie met een microturbine als WKK-installatie. In figuur 13 staat de warmtevraag van het bedrijf weergegeven en het restwarmte van de WKK-installatie van de vergister.

Figuur 13 Warmtevraag op een gemiddeld gesloten zeugenbedrijf met 300 zeugen en restwarmte van de WKK-installatie bij mestvergisting



Uit de figuur komt naar voren dat de warmtevraag op een gesloten zeugenbedrijf niet aansluit bij het warmteoverschot van de mestvergistinginstallatie. Het warmteoverschot is namelijk redelijk constant gedurende het jaar, terwijl de warmtevraag in de winter groot is en in de zomer klein. Uit de berekening komt naar voren dat maximaal ongeveer 80% van verwarmingsbehoefte gedekt kan worden met het warmteoverschot uit de mestvergistinginstallatie.

5.2 Mestvergisting

Voor de economische evaluatie van mestvergisting is uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

- De SDE-subsidie is alleen van toepassing op de elektriciteit die wordt teruggeleverd. Omdat de vergoeding hiervoor hoger is dan de inkooprij van elektriciteit is uitgegaan van de SDE-bedragen
- Eigen elektriciteitsverbruik biogasinstallatie van 5%
- Aardgasprijs van € 0,50 per m³
- Besparing van 60% op aardgasinkoop
- Methaanopbrengst van 16 m³ per ton varkensmest
- Elektrisch rendement WKK-installatie van 26% (Capstone CR30 Microturbine 30 kWe)
- Mestafzetkosten van € 15,- per m³

Op jaarbasis bedragen de cijfers als volgt:

- Totale methaanproductie 72.480 m³ CH₄
- Totale elektriciteitsproductie 186.354 kWh
- Aantal vollasturen WKK 6.212 uur
- Besparing aardgasinkoop 26.280 m³
- Besparing aardgas € 13.140,-
- SDE warmebenuttingscoëfficiënt > 2,0 MJ/kWh → SDE-bedrag = € 0,177 per kWh_e
- Opbrengst elektriciteit € 31.335,-
- Reductie mesthoeveelheid 145 ton
- Besparing op mestafvoer € 2.175,-

De totale omzet (=verkoop+besparing) van de mestvergistinginstallatie bedraagt op jaarbasis van € 46.650,-

Op basis van de omzet is bereken wat bij een bepaald percentage van jaarkosten de investeringskosten van biogasinstallatie maximaal mogen bedragen om zonder verlies te kunnen draaien:

- Jaarkosten 15,0% → € 311.000,-
- Jaarkosten 17,5% → € 266.571,-
- Jaarkosten 20,0% → € 233.250,-

Bij een investeringsbedrag van € 200.000,- met 17,5% jaarkosten bedraagt de winst op jaarbasis € 11.650,- wat neerkomt op een rendement op het geïnvesteerd vermogen van 5,8%.

5.3 Maiszetmeel als coproduct

Voor de economische evaluatie van maiszetmeel als coproduct is uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

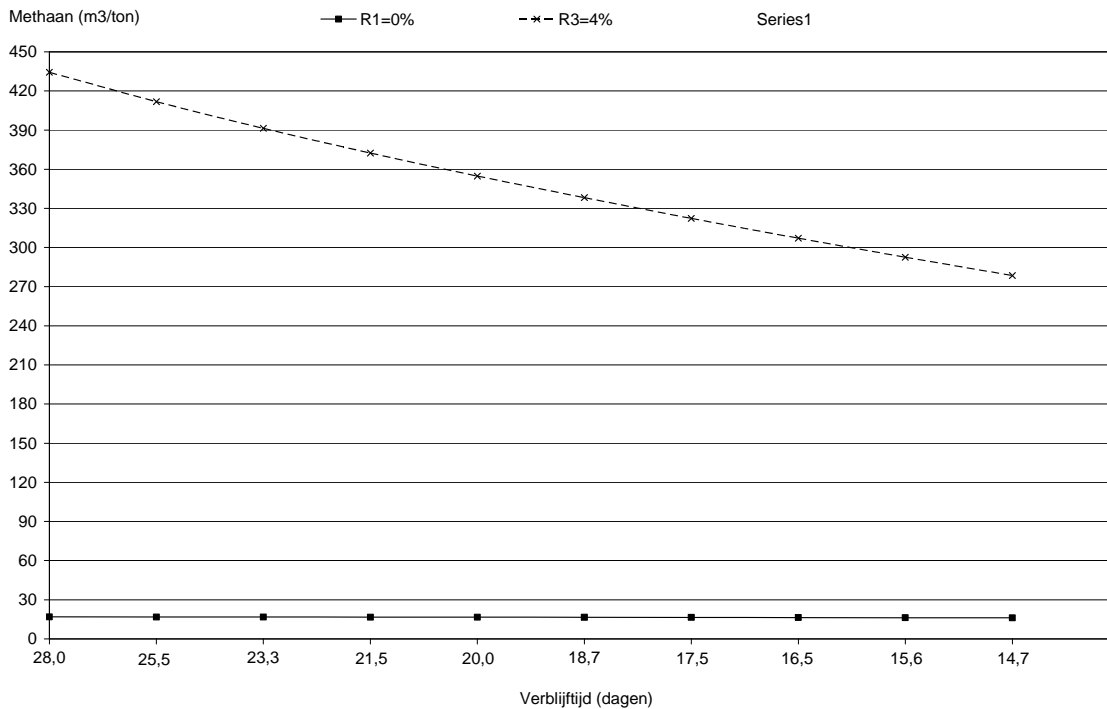
- De SDE-subsidie is alleen van toepassing op de elektriciteit die wordt teruggeleverd. Omdat de vergoeding hiervoor hoger is dan de inkooprij van elektriciteit is uitgegaan van de SDE-bedragen
- Aardgasprijs van € 0,50 per m³
- Elektrisch rendement WKK-installatie van 26% (Capstone CR30 Microturbine 30 kWe)
- Mestafzetkosten van € 15,- per m³

De opbrengst van een coproduct hangt af van de hoeveelheid biogas die een coproduct bij covergisting oplevert, het rendement van de WKK-installatie, de hoeveelheid energie die nuttig aangewend kan worden en de opbrengst c.q. besparing van benutte energie.

De directe kosten voor een coproduct bestaat uit de aankoopkosten en de afzetkosten voor het digestaat wat overblijft na vergisting. De hoeveelheid digestaat afkomstig van een coproduct kan worden berekend door de hoeveelheid ingaand coproduct te verminderen met de hoeveelheid geproduceerd biogas afkomstig van het coproduct.

In het onderzoek is gebruik gemaakt van maiszetmeel als coproduct. Voor reactor R4 met 4% covergisting van maiszetmeel is berekend wat de bijdrage van maiszetmeel aan de gasproductie was ten opzichten van reactor R1 zonder covergisting. In figuur 14 is weergegeven wat in het onderzoek de bijdrage van maiszetmeel was bij covergisting bij verschillende verblijftijden.

Figuur 14 Bijdrage (in m³ CH₄/ton) van maïszetmeel aan de methaanopbrengst van reactor R3 (4% zetmeel) in vergelijking tot reactor R1 (0% zetmeel) bij verschillende verblijftijden



Uit figuur 14 komt naar voren dat bij de gekozen opzet in het onderzoek de verkorting van de verblijftijd leidde tot lagere bijdrage van maïszetmeel aan de totale gasproductie. Of wel: de gasopbrengsten die toegerekend kunnen worden aan de maïszetmeel nam af bij de kortere verblijftijden.

In tabel 8 staan de opbrengsten berekend van maïszetmeel op basis van de resultaten uit dit onderzoek. Bij de opbrengsten is geen rekening gehouden met besparing op de inkoop van aardgas omdat de extra warmtebenutting een relatief geringe bijdrage levert aan de verwarming van de stallen, doordat alleen extra aardgasinkoop wordt bespaard bij koude winterperiodes in het jaar.

Tabel 8 Opbrengsten en mestafvoer kosten van maïszetmeel bij drie verschillende verblijftijden voor reactor R3 met 4% covergisting

Verbleeftijd (dagen)	Biogas (kg/ton)	Digestaat (kg/ton)	Elektriciteit (kWh/ton)	Omzet (€ per ton)	Mestafvoer (€ per ton)
28,0	869	131	1117	€ 198	€ 2
20,0	710	290	912	€ 161	€ 4
14,7	557	443	716	€ 127	€ 7

De toevoeging van maïszetmeel levert bij een verblijftijd van 28 dagen een saldo op van € 196,- per ton, terwijl dit bij een verblijftijd van 14,7 dagen teruggelopen is naar € 120,- per ton. Bij een aankoop prijs van € 100,- per ton maïszetmeel blijft in het eerste geval € 96,- over als vergoeding voor de installatiekosten, opslagkosten, arbeid en winst, terwijl in het tweede geval maar € 20,- overblijft.

5.4 Magnesiumtoevoeging

Voor de economische evaluatie van magnesiumtoevoeging is uitgegaan van de volgende uitgangspunten:

- Aankoop magnesiumchloride (32%-oplossing) van € 75,- per ton
- Elektrisch rendement WKK-installatie van 26% (Capstone CR30 Microturbine 30 kWe)
- SDE warmebenuttingcoëfficiënt $> 2,0$ MJ/kWh \rightarrow SDE-bedrag = € 0,177 per kWh_e

Binnen de opzet van het onderzoek leverde de toevoeging van magnesium geen significante extra hoeveelheid op. Als er 0,5% MgCl₂-oplossing wordt toegevoegd t.o.v. dagelijkse mesttoevoer, dan dient minimaal er minimaal 0,8 m³ methaan extra te worden geproduceerd om minimaal de aankoopkosten van de MgCl₂-oplossing terug te verdienen. Omgerekend betekent dit dat methaanproductie per ton mest met minimaal 5% moet stijgen.

6 Discussie

Batchtesten

De maximale methaanproductie van de onderzochte onbewerkte varkensmestsoorten varieerde in de batchtesten tussen de 0,28 – 0,60 m³ CH₄ per kg OS bij methaangehalten van 65-71%. Door Steffen et al. (1998) worden voor varkensmest gasopbrengsten van 0,18-0,40 m³ CH₄ per kg OS bij methaangehalten van 70-80% aangegeven, waarbij niet is aangegeven of het om resultaten uit batchtesten gaat of niet. Kaparaju (2003) behaalde bij batchtesten methaanopbrengsten voor zeugenmest van 0,54 m³ CH₄ per kg OS en 0,36 m³ CH₄ per kg OS voor varkensmest. KTBL (2005) rapporteert voor varkensmest een gemiddelde biogasopbrengst van 0,45 Nm³ CH₄/kg OS met een methaangehalte van 61% uit laboratoriumonderzoeken. Door Braun (2007) worden gasopbrengsten van 0,3 – 0,5 m³ biogas per kg OS bij een minimale verblijftijd van 20 dagen opgegeven, waarbij geen methaangehalten worden genoemd.

Het pasteuriseren (1 uur op 70 °C) van de varkensmest leidde niet een hogere methaanopbrengst. De methaanopbrengst van de gepasteuriseerde varkensmest was 19% lager dan de onbehandelde varkensmest in de batchtesten. Onderzoek van Bonmati et al. (2001) naar het pasteuriseren van varkensmest bij 80 °C voor 3 uur gaf een wisselend beeld. Bij varkensmest met een laag ammoniumgehalte werd een sterke toename in methaanopbrengst geconstateerd, terwijl bij varkensmest met een hoog ammoniumgehalte een afname werd geconstateerd waarschijnlijk als gevolg van ammoniakremming.

De maximale biogasproductie van de dikke fractie vijzelpers was in deze studie 0,21 m³ CH₄/kg OS. Deense resultaten lieten een maximale biogasproductie 0,16 tot 0,19 m³ CH₄/kg OS voor de dikke fractie uit een decanter. En bij gebruik maken van coagulatie en flocculatie in de decanter werd een maximale biogasproductie van 0,39 tot 0,40 m³ CH₄/kg OS gehaald uit de dikke fractie decanter (Møller et al., 2007).

Het scheiden van varkensmest in een dikke en dunne fractie is een manier om een mestproduct te produceren met hogere methaanopbrengst per ton. Door de hogere energiewaarde kan de dikke fractie interessant zijn om af te zetten bij een covergistinginstallatie. De dikke fractie heeft echter ook nog een groot onbenut potentieel aan methaanopbrengst. Het voorbehandelen van de dikke fractie kan de methaanopbrengst verhogen:

- Een thermisch voorbehandeling van een mengsel van dikke fractie rundvee- en varkensmest in de range 100 - 140 °C voor 40 minuten gaf in een batchtest een 9-24% verhoging van de methaanopbrengst in vergelijking tot het onbehandelde mengsel (Mladenovska et al., 2006).
- Een batchtest waarin dikke fractie rundveemest was voorbehandeld via natte oxidatie (170 °C, 12 bar, toevoeging van 150 ml H₂O₂, flash bij 15 bar) gaf een 98% verhoging van de methaanproductie (Hartmann et al., 2005).
- In een batchtest waarin dikke fractie vleesvarkensmest werd voorbehandeld in een snelkoker (30 min, 147 °C) en gebrande kalk gaf verhogingen van de methaanopbrengsten in de range van 20-64%. Echter de kosten van de voorbehandelingen vormen wel een beperking in de toepassingsmogelijkheden (Møller en Raju, 2005).

Echter, door alleen de dikke fractie varkensmest te vergisten, wordt het energiepotentieel in de dunne fractie varkensmest niet benut. Op basis van eerder onderzoek (Timmerman et al., 2005) werd bij de gebruikte vijzelpers 8,6% van de ingaande varkensmest omgezet in dikke fractie. Wordt de methaanproductie van een ton dikke fractie varkensmest in een CSTR bij een verblijftijd van 30 dagen nu omgerekend naar ton ingaande varkensmest dan bedraagt de methaanproductie fractie 3,5 m³ CH₄ per ton ingaande varkensmest wat neerkomt op 30% van de methaanproductie van de ongescheiden varkensmest. Er wordt in deze situatie 70% van het energiepotentieel niet benut.

Of scheiden zin heeft, hangt vooral af van de bedrijfsomstandigheden (mestsoort, eigen grond, afzetmogelijkheden, investering, grootte bouwblock, bedrijfsplan, etc.). Een optie zou kunnen zijn om op het varkensbedrijf een kleine reactor te plaatsen voor vergisten van de dunne fractie bij een korte verblijftijd voor de energievoorziening van het eigen bedrijf, waarbij de dikke fractie regionaal/centraal behandeld, vergist en verwerkt wordt.

Op basis van de vastgestelde hydrolyseconstanten en maximale methaanproductie van de onderzochte mestsoorten blijkt dat voor de meeste mestsoorten bij een verblijftijd van 20 dagen in een CSTR al meer dan 75% van de maximale methaanproductie wordt bereikt. Verhoging van de verblijftijd naar 30 dagen levert relatief gezien weinig extra methaanproductie op, terwijl het reactorvolume wel met 50% toeneemt. Economisch zal de extra methaanproductie waarschijnlijk dus niet opwegen tegen de extra kosten van een grotere reactor. Maar kortere verblijftijden kunnen, afhankelijk van de omstandigheden, wel consequenties hebben voor de kwaliteit van het digestaat.

CSTR-proef

Verblijftijd en organische belasting

Vanwege de beperkte duur van de CSTR-proef was het niet mogelijk om het effect van kortere verblijftijden dan 15 dagen en een hogere organische belasting dan 4,0 kg OS/m³.dag te onderzoeken voor vergisting van alleen mest. Er zijn echter wel resultaten van onderzoek door anderen waarbij kortere verblijftijden werden toegepast. Bij 1x daags voeden werd door Hobson en Shaw (1973) een optimale verblijftijd van 14 dagen vastgesteld bij een organische belasting van 2,6 kg OS/m³ per dag. Verdere verlaging van de verblijftijd lijkt ook mogelijk te zijn. Een 7-jaar durende studie naar vergisting van vleesvarkensmest in een 100 liter RVS reactor liet zien dat een verblijftijd van 7 à 10 dagen mogelijk was. De reactor werd continu geroerd en semicontinue gevoed met een 5 minuten interval (Summers and Bousfield, 1980). Yang et al. (1985) waren in staat bij vergisting van dunne varkensmest (2,5% DS) de verblijftijd terug te brengen van 15 dagen tot 7 dagen. Dit kon omdat slib werd teruggevoerd in de reactor (ratio 0,25). De organische belasting bedroeg 4,0 kg DS/m³.dag bij een verblijftijd van 7 dagen, maar de gasproductie bij 7 dagen was nog maar de helft van de gasproductie bij 10 dagen. Uit onderzoek van Lampel (1984) bleek echter dat terugvoering van bacteriën juist leidde tot een betere biogasproductie.

Het verder verlagen van verblijftijd en verhogen van de organische verblijftijd zou in principe mogelijk moeten zijn, indien de settings (o.a. opstartstrategie, terugvoer bacteriën, voedingsinterval en roerintensiteit en -interval) van een reactor worden geoptimaliseerd. Er dient vanuit economisch perspectief wel in de gaten te worden gehouden dat dit niet (te veel) ten koste gaat van de methaanproductie.

Gehalte vluchtige vetzuren

Bij het verlagen van de verblijftijden nam het gehalte aan vluchtige vetzuren in de reactoren toe. Het is niet bekend wat de maximale bovengrens van de concentratie vluchtige vetzuren kan zijn bij vergisting van mest en in welke mate zich de bacteriën na verloop van tijd kunnen aanpassen om toch bij verhoogde toevoer van organische stof een laag vetzuur gehalte te bewerkstelligen. Het nadeel van hoge vetzuurgehalten in digestaat is dat in de eindopslag dit alsnog kan worden omgezet naar methaan en dus ongewenste methaanemissie kan opleveren. Mogelijk kan een ander vergistingconcept perspectief bieden. Bijvoorbeeld een reactor met (zeer) korte verblijftijd waar een hoog vetzuur gehalte wordt geaccepteerd en waarbij de eindopslag dient als gasdichte opslag van het digestaat en waarin deze vetzuren alsnog worden omgezet naar biogas.

Zetmeel

Het toevoegen van maïszetmeel had als doel om de C/N-verhouding te verhogen om zo betere procesomstandigheden te creëren. De C/N-verhouding van de varkensmest was 5 en het mengsel met het hoogste aandeel maïszetmeel had een C/N-verhouding van 24. Volgens Angelidaki et al. (2003) ligt de optimale C/N-verhouding van de input tussen de 25-32. Echter de C/N-verhouding lijkt in dit onderzoek van ondergeschikt belang te zijn geweest. Het belangrijkste effect zal gelegen hebben in de relatief hoge toevoer van organische stof per voeding door het tweemaal per week voeden van de reactoren. Verwacht wordt dat betere resultaten kunnen worden behaald door de frequentie van voeding te verhogen. Wat het optimale voedingsinterval is kan op grond van deze onderzoeksresultaten niet vastgesteld worden.

Magnesium

Het toevoegen van magnesium had als doel om het ammoniumgehalte te verlagen zodat de invloed van ammoniakremming op de methaanproductie af zou nemen. Bij de reactor zonder covergisting (R1) werd een licht positief effect waargenomen net zoals bij reactor R3 (4% covergisting), terwijl bij de overige twee reactoren een licht negatief effect werd waargenomen. Bij reactoren R1 en R3 was de pH lichtelijk hoger dan in R2 en R4, wat een positief effect heeft op de struvietvorming. Echter de beperkende factor zal de hoeveelheid PO₄³⁻ die beschikbaar is om de reactie om Mg²⁺ en NH₄⁺ aan te gaan. Mogelijk kunnen betere resultaten worden verkregen als ook PO₄³⁻ extra wordt toegediend, maar dat is zowel vanuit de huidige meststoffenwet en vanuit kostenopgave ongewenst. Bij de reactoren met covergisting kan mogelijk de hogere C/N-verhouding van invloed zijn geweest op de resultaten. Ammoniakremming kan ook worden verminderd door een betere C/N-verhouding in de reactor (Kayhanian, 1999).

7 Conclusies en aanbevelingen

7.1 Conclusies

Uit de resultaten van de batchtesten in het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- De hydrolyseconstante en maximale methaanproductie zijn sterk verschillend per soort varkensmest. De hydrolyseconstante varieerde tussen de 0,07 en 0,27 d⁻¹ en de maximale methaanproductie varieerde tussen de 213 en 596 l CH₄ per kg OS.
- Gemiddeld bedraagt de maximale methaanproductie 55% van de theoretische potentiële methaanproductie, maar verschilt sterk per mestsoort. Voor de meeste onderzochte mestsoorten geldt in principe dat een groot deel van de methaanproductie niet benut wordt.
- De samenstelling van de varkensmest (mestsoort) is sterk bepalend voor welke methaanproductie haalbaar is bij een bepaalde verblijftijd. Of wel: de mestsoort bepaalt in principe welke grootte een vergistingreactor zou moeten hebben.

Uit de resultaten van de CSTR-proef in het onderzoek kunnen de volgende conclusies worden getrokken:

- Verlaging van de verblijftijd bij mestvergisting van 28 naar 15 dagen is mogelijk, waarbij de methaanproductie per ton varkensmest maar relatief weinig afneemt.
- Het interval tussen de voedingen heeft bij de reactoren met covergisting een grote invloed gehad op de resultaten.
- Bij de gekozen setting van de reactoren geeft covergisting met zetmeel bij langere verblijftijd een hogere methaanproductie per ton input, maar een lagere totale methaanproductie per reactor.
- Het effect van magnesiumtoevoeging was minimaal en niet significant.

7.2 Aanbevelingen

Op basis van de resultaten van het onderzoek kan gesteld worden dat er een verdere optimalisatie van mestvergisting (evt. met een klein aandeel covergisting) mogelijk is, zodat het rendement van een mestvergistinginstallatie wordt verhoogd door een hogere energieproductie tegen een lager kostprijs.

Vervolgonderzoek naar het optimaliseren van mestvergisting zou zich moeten richten op de volgende aspecten:

- Voedingsinterval
- Invloed van mestsoort
- Roerinterval en –intensiteit
- Invloed van de hoogte van het gehalte aan vluchtige vetzuren op het vergistingproces
- Verdere verlaging van de verblijftijd
- Terugvoer bacteriën en/of ‘vasthouden’ van de bacteriën in de reactor
- Invloed van mestsamenstelling en –soort

Praktijktoepassing

Een deel van de varkenshouders in Nederland willen hun mest vergisten zonder of met een klein aandeel covergisting, mits dit rendement oplevert voor hun bedrijf. Het optimaliseren van mestvergisting is noodzakelijk om dit mogelijk te maken.

Op basis van de resultaten van het onderzoek kan de verblijftijd van varkensmest in een mestvergistinginstallatie worden verkort van 30 naar 15 dagen, waarbij maar 2x per week werd gevoed wat in principe niet als optimaal wordt gezien. Voor een gesloten zeugenbedrijf met 300 zeugen en 2400 vleesvarkens bedraagt gemiddeld de mestproductie 4.530 m³ per jaar wat neerkomt op 12,4 m³ per dag.

- Verblijftijd 30 dagen → netto vergistingvolume 372 m³
- Verblijftijd 15 dagen → netto vergistingvolume 186 m³

Voor mestopslag tanks zijn dit maar kleine tanks en daarmee relatief duur. Mogelijk dat aangepaste geïsoleerde en verwarmde brijvoertanks ook dienst kunnen doen als vergistingtanks. In dit geval wordt de eindopslag dan gasdicht gemaakt en dient daarmee dienst als gasbuffer en tevens als eenvoudige navergister. Het zou dan ook mogelijk worden om met standaardmodules te werken van bijv. 70 m³, waardoor je bij uitbreiding één of meerdere tanks erbij zet en aansluit op de bestaande infrastructuur. De combinatie met microturbine past in dit concept ook goed, doordat deze ook modulair kan wegzetten op de meest geschikte plaats. Echter voor zover bekend zijn er geen ervaringen met een dergelijk vergistingconcept.

Al met al blijven belangrijke voorwaarden voor een goed rendement van een mestvergistinginstallatie op een varkensbedrijf:

- Voldoende mest moet al aanwezig zijn op de locatie van de mestvergistinginstallatie
- Eenvoudige afvoer en regelmatige afvoer van de geproduceerde mest, zodat relatief verse mest naar de vergistinginstallatie wordt gepompt
- Goede benutting van de warmte op het bedrijf bijvoorbeeld in de vorm van stalverwarming
- De bestaande elektriciteitsaansluiting moet geschikt zijn om de WKK-installatie op te aan te sluiten

In de toekomst zal door de schaalvergroting een mestvergistinginstallatie voor een groter deel van de varkensbedrijven rendabel worden doordat de mestproductie per bedrijf toeneemt en verder zal ook het energiegebruik per bedrijf toenemen door o.a. introductie van nieuwe automatiseringstechnieken (bijv. schoonmaakrobot), mestverwerkingsystemen en toename van luchtwassers.

Bijlagen

Bijlage 1 Verloop van pH en vluchtige vetzuren gedurende de batchtesten met de varkensmestsoorten

Biggenmest														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.2	7.2	2537	2548	978	974	421	419	175	170	230	228	32	46
1	7.7	7.7	989	901	210	253	89	32	129	116	194	182	0	0
2	7.9	8.0	489	443	31	35	10	7	85	77	140	125	0	0
6	7.6	7.6	64	24	60	22	0	0	0	0	0	0	0	0
13	7.6	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Kraamzeugenmest														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	6.9	6.9	3143	3239	1326	1375	677	700	223	233	117	121	27	19
1	7.4	7.4	1557	1117	625	434	357	215	192	181	0	0	0	0
2	7.8	7.8	226	153	17	22	63	17	62	57	0	0	0	0
6	7.5	7.6	26	29	24	27	0	0	0	0	0	0	0	0
13	7.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.5	7.4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

G/D zeugenmest														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.3	7.4	243	228	119	110	27	24	19	17	20	22	0	0
1	7.8	7.9	55	61	51	57	0	0	0	0	0	0	0	0
2	8.0	8.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	7.8	7.8	16	15	15	14	0	0	0	0	0	0	0	0
13	7.6	7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

G/D zeugenmest - herhaling														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.2	7.1	1110	1200	591	639	173	187	64	69	50	54	0	0
1	4.5	7.5	226	198	72	63	19	15	26	22	37	33	0	0
2	7.5	7.4	53	43	0	0	0	0	0	0	26	21	0	0
30	7.2	7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vv droogvoer														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	6.9	6.9	3951	3949	1743	1729	685	671	376	374	182	176	0	23
1	7.6	7.6	1812	1898	448	496	269	295	254	258	192	187	34	33
2	7.9	7.9	556	369	42	44	26	24	113	12	130	130	0	0
6	7.6	7.6	24	30	23	28	0	0	0	0	0	0	0	0
13	7.6	7.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Vv brijvoer														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.3	7.3	3528	3746	1363	1377	857	866	193	277	209	200	0	25
1	7.8	7.7	3076	2667	1353	1186	614	521	181	156	184	162	0	0
2	8.0	8.0	2515	2405	1128	1046	506	490	73	71	203	206	0	0
6	7.9	7.9	966	854	165	123	75	54	155	143	194	187	0	0
13	7.7	7.7	88	71	83	67	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.7	7.7	14	15	13	14	0	0	0	0	0	0	0	0

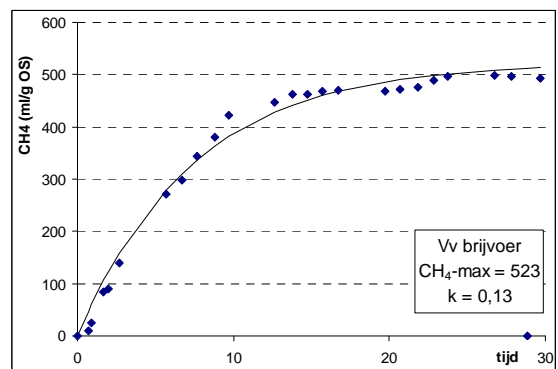
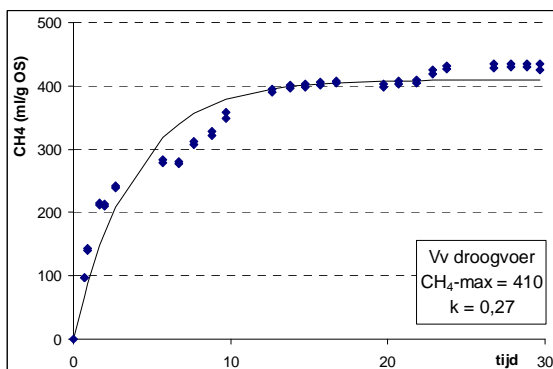
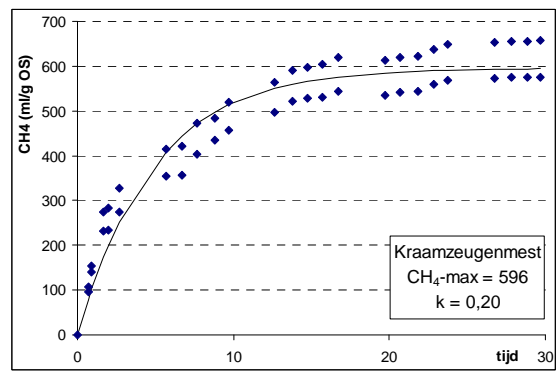
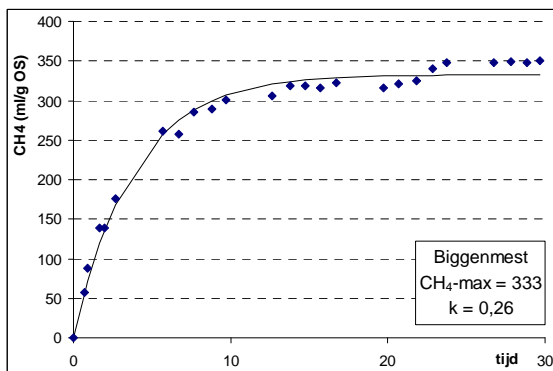
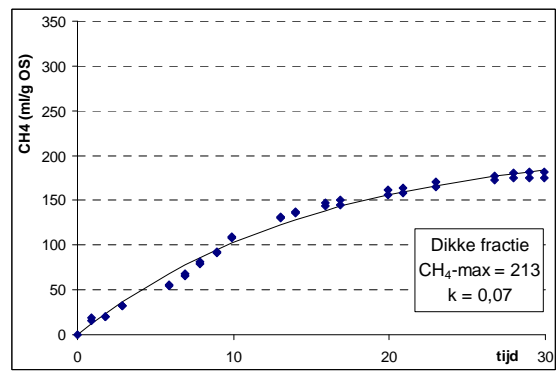
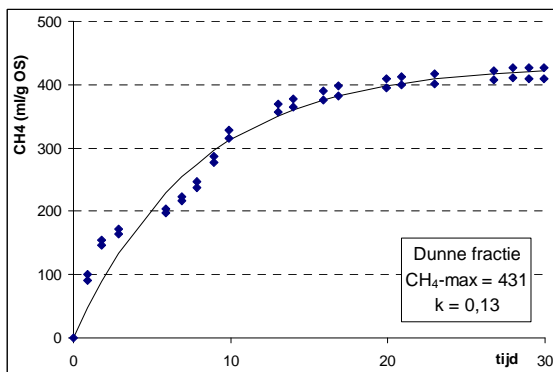
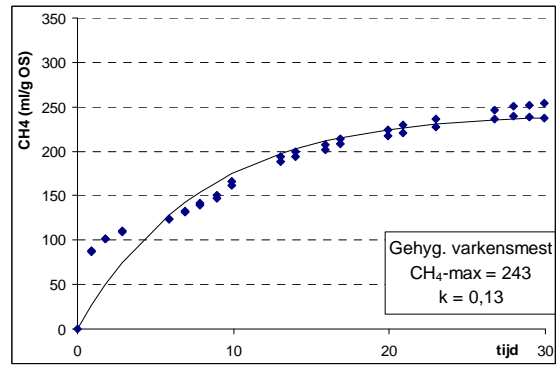
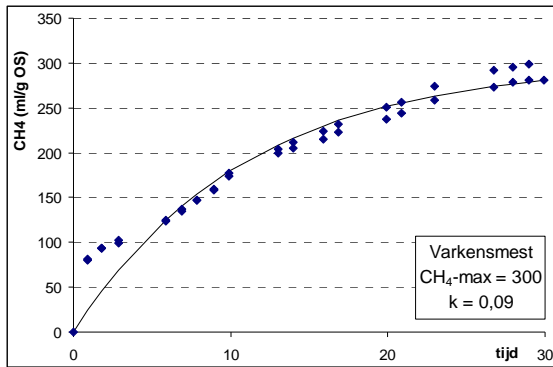
Varkensmest														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.3	7.2	1298	1393	630	694	206	223	97	106	68	60	0	0
1	7.9	7.9	246	189	55	31	18	10	36	31	46	42	0	0
2	7.8	7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	7.6	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.3	7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

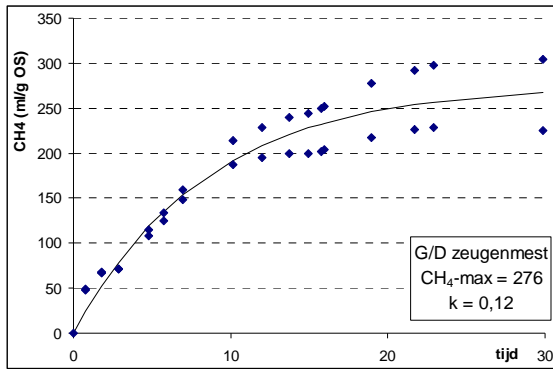
Gehyg. varkensm.														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.4	7.4	1394	1296	692	641	224	209	107	99	60	57	0	0
1	7.9	7.9	326	260	79	56	26	18	47	40	58	49	0	0
2	7.8	7.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	7.7	7.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.4	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Dunne fractie														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.2	7.2	2176	2201	861	872	427	433	257	260	71	70	0	0
1	7.9	7.9	1099	1002	224	182	225	203	146	135	125	125	0	0
2	7.8	7.8	271	249	20	19	17	14	47	43	68	64	0	0
8	7.6	7.6	41	42	38	39	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.5	7.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

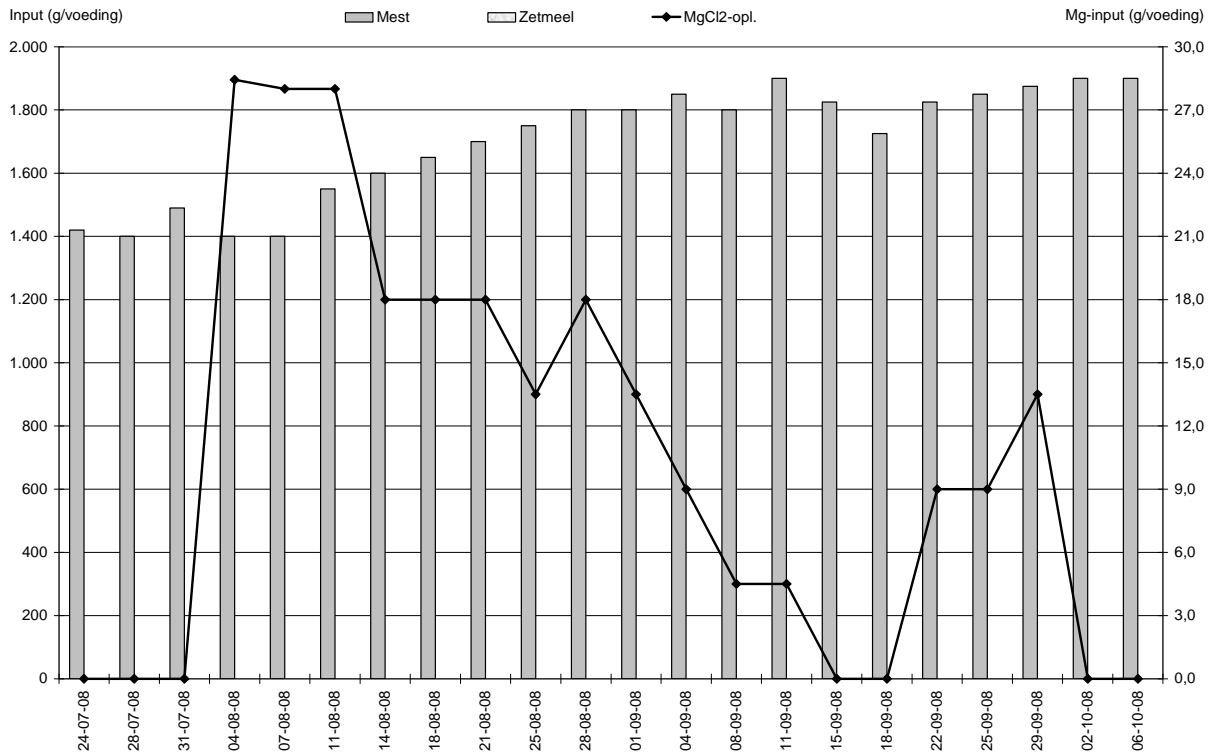
Dikke fractie														
Tijd (d)	pH		VFA-CZV (mg/l)		Acetaat (mg/l)		Propionaat (mg/l)		Butyraat (mg/l)		Valeraat (mg/l)		Capronaat (mg/l)	
0	7.3	7.3	303	253	146	117	57	49	34	30	0	0	0	0
1	7.8	7.8	48	24	28	23	12	0	0	0	0	0	0	0
2	7.6	7.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	7.3	7.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
30	7.2	7.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Bijlage 2 Meetpunten en datafit t.b.v. bepaling de maximale methaanproductie (ml CH₄/g OS) en hydrolyseconstante k_h (d⁻¹)

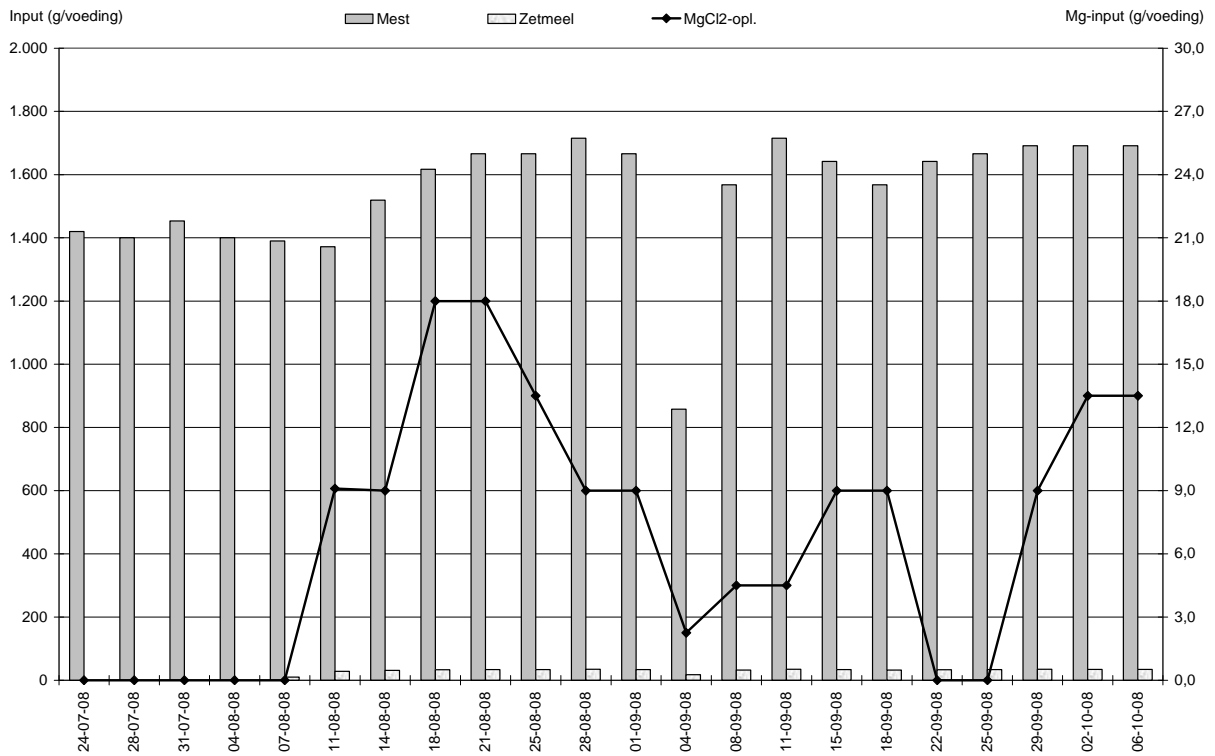




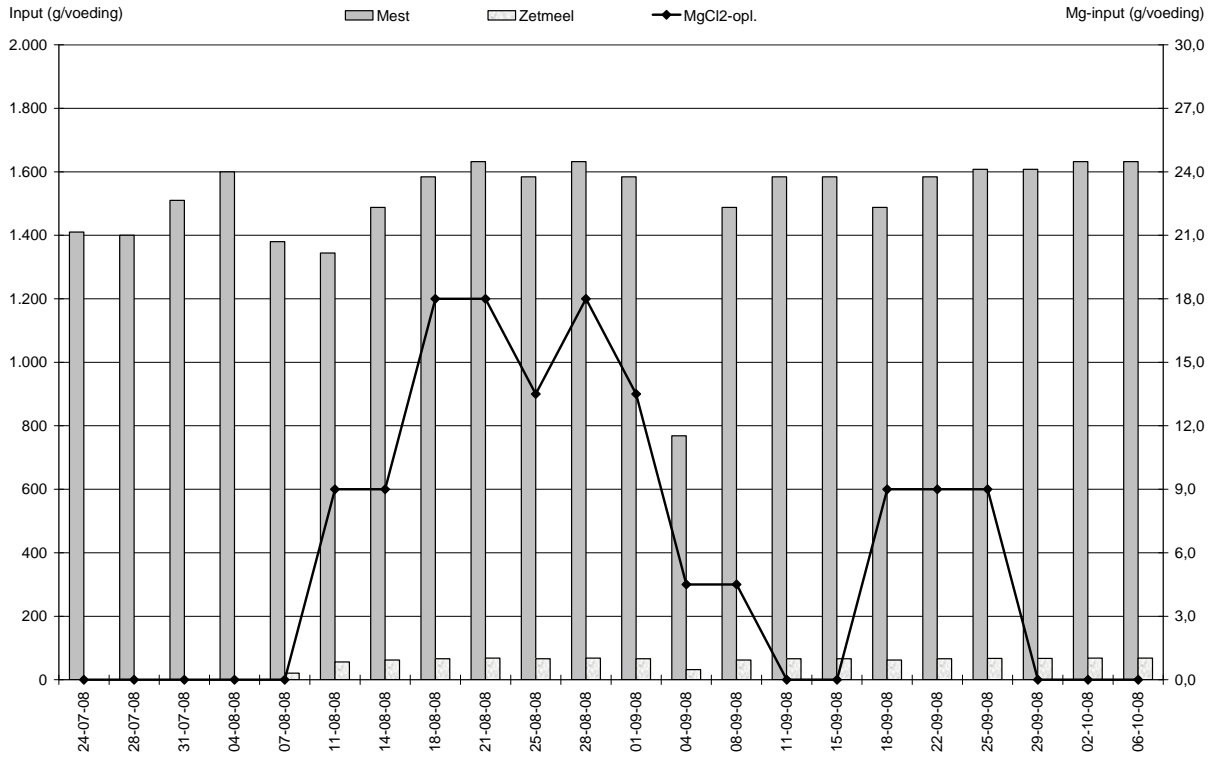
Bijlage 3 Input per reactor in CSTR-proef



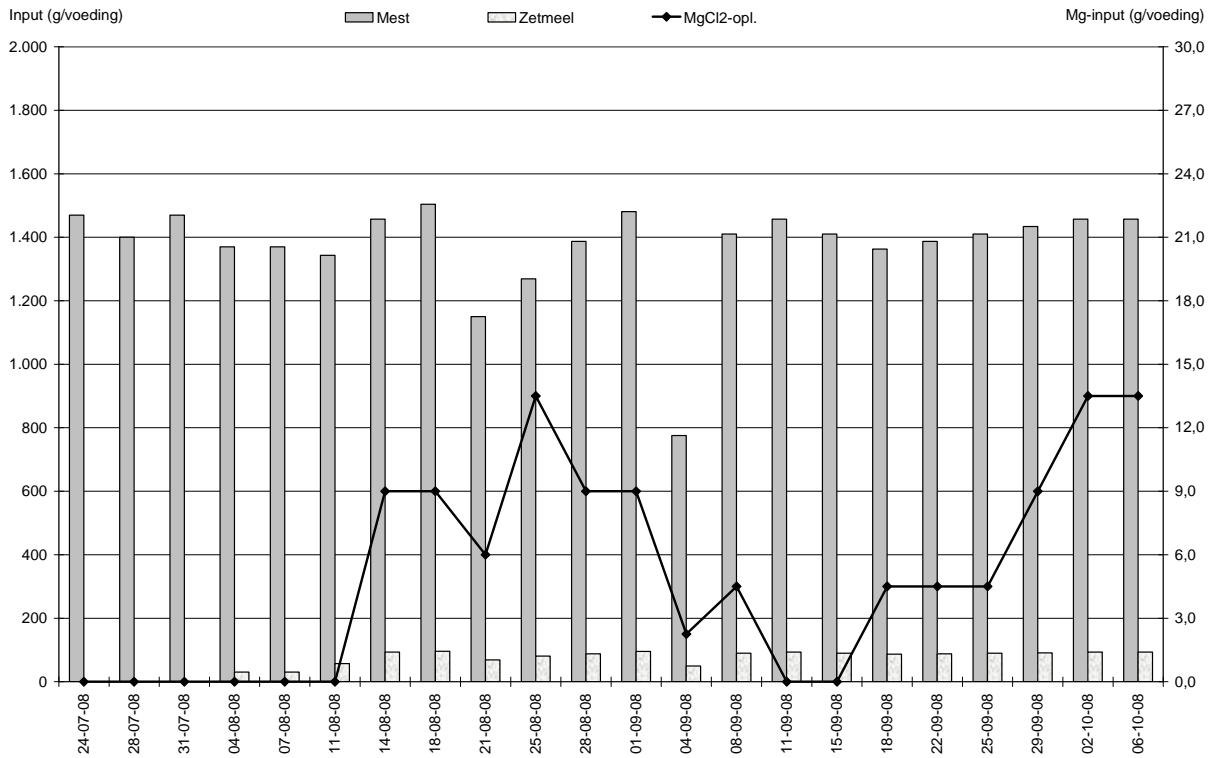
Figuur A Input van Reactor 1 met 0% covergisting



Figuur B Input van Reactor 2 met 2% covergisting



Figuur C Input van Reactor 3 met 4% covergisting



Figuur D Input van Reactor 3 met 6% covergisting

Bijlage 4 Verloop van pH, ammonium en vluchtige vetzuren in de reactoren van de CSTR-proef

Tabel A Metingen reactor R1 met 0% covergisting

Tijd (d)	pH	Ammonium (mg/l)	Azijnzuur (mg/l)	Propionzuur (mg/l)	Boterzuur (mg/l)	Valeriaanzuur (mg/l)	Capronzuur (mg/l)	CZV _{vz} (mg/l)
51	8,2	-	393	81	22	26	0	634
55	8,3	2.852	213	147	4	2	0	460
58	8,2	-	202	72	0	0	0	325
62	8,4	3.934	59	72	0	0	0	172
65	8,1	-	75	466	0	0	0	785
69	8,0	3.888	74	1.067	0	0	0	1.694
72	8,1	-	220	1.575	0	0	0	2.619
76	8,0	3.769	266	1.292	0	0	0	2.240
79	8,0	-	830	601	0	0	0	1.795
83	8,0	3.327	121	0	0	0	0	129
86	8,1	-	128	0	0	0	0	137
90	8,0	3.122	166	17	9	7	0	233
93	8,0	-	817	0	0	0	0	872
97	8,1	3.942	229	0	0	0	0	244
100	8,1	-	593	0	0	0	0	632
104	8,1	3.403	338	0	0	0	0	360
107	8,1	-	869	0	0	0	0	927
111	8,1	2.906	433	0	0	0	0	462
114	8,1	-	701	670	0	0	0	1.762
118	8,1	3.637	258	856	0	0	0	1.571
121	8,0	-	815	1.295	0	0	0	2.829
125	8,3	3.562	470	1.003	0	0	0	2.020
128	8,1	3.458	874	745	21	0	0	2.098

Tabel B Metingen reactor R2 met 2% covergisting

Tijd (d)	pH	Ammonium (mg/l)	Azijnzuur (mg/l)	Propionzuur (mg/l)	Boterzuur (mg/l)	Valeriaanzuur (mg/l)	Capronzuur (mg/l)	CZV _{vz} (mg/l)
51	8,1	-	340	43	17	5	2	470
55	8,2	2.289	305	347	5	3	0	864
58	8,1	-	155	421	0	0	0	802
62	8,4	3.530	75	994	0	0	0	1.585
65	8,2	-	200	1.140	0	0	0	1.939
69	8,1	3.565	357	1.026	0	0	0	1.934
72	8,1	-	1.474	732	0	0	0	2.680
76	8,1	3.274	1.330	91	0	0	0	1.557
79	7,9	-	2.289	157	0	0	0	2.679
83	8,0	3.386	1.409	63	0	166	0	1.936
86	7,9	-	977	66	0	71	0	1.286
90	7,9	2.546	2.455	181	33	186	0	3.331
93	7,8	-	2.999	461	0	197	0	4.298
97	8,1	3.541	559	0	0	0	0	596
100	7,9	-	1.895	140	0	0	0	2.234
104	8,0	3.270	1.829	86	0	0	0	2.081
107	7,9	-	2.635	374	0	74	0	3.528
111	8,0	2.952	2.103	1.163	0	124	0	4.256
114	7,8	-	2.460	2.200	66	121	0	6.322
118	8,0	3.575	2.165	2.570	78	160	0	6.668
121	7,8	-	2.806	2.911	105	154	0	7.906
125	8,1	3.128	2.789	2.929	170	204	0	8.134
128	7,7	3.308	2.294	2.186	150	162	0	6.360

Tabel C Metingen reactor R3 met 4% covergisting

Tijd (d)	pH	Ammonium (mg/l)	Azijnzuur (mg/l)	Propionzuur (mg/l)	Boterzuur (mg/l)	Valeriaanzuur (mg/l)	Capronzuur (mg/l)	CZV _{vz} (mg/l)
51	8,1	-	504	96	25	23	0	775
55	8,3	2.703	523	368	4	6	0	1.135
58	8,1	-	256	868	0	0	0	1.587
62	8,4	3.939	70	909	0	0	0	1.450
65	8,1	-	539	999	0	0	0	2.088
69	8,1	3.821	476	303	0	0	0	965
72	8,0	-	1.303	740	0	0	0	2.510
76	8,1	3.379	1.121	99	0	0	0	1.345
79	7,8	-	1.541	129	0	0	0	1.839
83	8,0	3.343	837	0	0	0	0	892
86	7,7	-	804	93	0	0	0	998
90	7,9	1.177	1.947	79	48	247	0	2.787
93	7,7	-	2.565	289	0	312	0	3.809
97	8,1	3.491	68	0	0	394	0	875
100	7,8	-	1.578	170	0	323	0	2.600
104	8,1	3.120	1.314	371	0	375	0	2.727
107	7,9	-	1.815	893	0	200	0	3.697
111	7,9	2.965	1.631	1.024	0	104	0	3.502
114	8,0	-	2.582	1.300	94	209	0	5.319
118	8,0	3.708	2.460	2.200	66	121	0	6.322
121	8,0	-	2.263	2.401	92	110	0	6.440
125	8,2	3.328	1.531	2.061	53	58	0	4.968
128	8,0	2.905	1.718	1.740	55	108	0	4.787

Tabel D Metingen reactor R4 met 6% covergisting

Tijd (d)	pH	Ammonium (mg/l)	Azijnzuur (mg/l)	Propionzuur (mg/l)	Boterzuur (mg/l)	Valeriaanzuur (mg/l)	Capronzuur (mg/l)	CZV _{vz} (mg/l)
51	8,1	-	371	61	15	14	0	543
55	8,2	2.959	210	45	1	1	0	297
58	8,2	-	229	61	0	0	0	337
62	8,4	3.938	68	470	0	0	0	784
65	7,9	-	487	1.461	0	0	0	2.732
69	8,0	3.627	338	1.615	0	0	0	2.807
72	8,0	-	1.742	1.595	0	0	0	4.273
76	8,0	3.327	2.798	805	0	0	0	4.202
79	7,9	-	3.567	549	0	243	0	5.131
83	7,9	3.024	220	0	0	357	0	962
86	8,0	-	572	57	0	134	0	969
90	7,9	2.458	1.166	33	10	303	0	1.929
93	7,7	-	3.028	449	0	210	0	4.338
97	8,1	3.396	207	0	0	0	0	221
100	7,8	-	2.366	300	0	0	0	2.978
104	8,0	2.746	264	166	0	228	0	997
107	7,9	-	3.715	452	0	295	0	5.248
111	7,8	2.497	3.867	280	102	448	0	5.647
114	7,9	-	4.179	1.210	165	559	0	7.729
118	7,9	3.188	2.926	1.940	132	607	0	7.535
121	7,8	-	3.294	2.973	133	707	0	9.696
125	8,2	2.912	2.049	3.694	148	763	0	9.602
128	7,8	2.909	2.318	3.022	99	598	0	8.448

Literatuur

- Angelidaki, I., L. Ellegaard en B.K. Ahring, 2003. Application of the anaerobic digestion process. In: Ahring, B.K. (ed) Biomethanation II, Springer.
- Angelidaki, I. en W. Sanders, 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in Environmental Science and Bio/Technology* (3) 117–129.
- Bonmatí, A., X. Flotats, L. Mateu and E. Campos, 2001. Study of thermal hydrolysis as a pretreatment to mesophilic anaerobic digestion of pig slurry. *Water Science and Technology* 44 (4): 109-116.
- Braun, R., 2007. Anaerobic digestion: a multi-faceted process for energy, environmental management and rural development. In: *Improvement of Crop Plants for Industrial End Uses*, pp. 335-416.
- Hartmann, H, H.B. Møller en B.K. Ahring, 2005. Optimized treatment concepts for the anaerobic digestion process of manure using solid-liquid separation. *Proceedings 4th International Symposium ADSW 2005*, Kopenhagen, Denemarken. Pp. 351-354.
- Hobson, P.N. en B.G. Shaw, 1973. Anaerobic digestion of waste from an intensive pig unit. *Water Research* 7 (3): 437-449.
- Kaparaju, P., 2003. Enhancing methane production in a farm-scale biogas production system. University of Jyväskylä. Thesis.
- Kayhanian, M., 1999. Ammonia inhibition in high-solids biogasification: an overview and practical solutions. *Environmental Technology* 20 (4): 355-365.
- KTBL, 2005. *Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.
- Lampel, H., 1984. *Energie aus Biomasse Biogastechnologie – Biogasforschungsanlage Wieselburg Teil 1*. Bundesanstalt für Landtechnik, Wieselburg. Forschungsberichte.
- Mladenovska, Z. H. Hartmann, T. Kvist, M. Sales-Cruz, R. Gani and B.K. Ahring, 2006. Thermal pretreatment of the solid fraction of manure: impact on the biogas reactor performance and microbial community. *Water Science and Technology* 53 (8): 59-67.
- MNC, 2008. *Het Milieu- en Natuurcompendium*. PBL, Bilthoven, CBS, Den Haag en WUR, Wageningen. www.milieuennatuurcompendium.nl
- Møller, H.B. en C.S. Raju, 2005. Pre-treatment of manure fibres can yield up to 60 per cent more biogas. *Bioenergy Research* 9: 5-7
- Møller, H.B., J.D. Hansen en C.A.G. Sørensen, 2007. Nutrient recovery by solid-liquid separation and methane productivity of solids. *Transactions of the ASABE* 50 (1): 193-200.
- PVE, 2008. *Varkenssector- Statisch jaarrapport 2007 definitief*. Productschappen Vee, Vlees en Eieren, Zoetermeer.
- Steffen R., O. Szolar en R. Braun, 1998. *Feedstocks for Anaerobic Digestion*, Institute for Agrobiotechnology Tulln, University of Agricultural Sciences, Wenen, Oostenrijk.
- Summers, R. and S. Bousfield, 1980. A detailed study of piggery-waste anaerobic digestion. *Agricultural Wastes* 2 (1): 61-78.
- Timmerman, M. en M.A.H.H. Smolders, 2004. *Mineralenbalansen bij vleesvarkens op droog- en brijvoer*. Praktijkrapport Varkens 35. Animal Sciences Group, Lelystad.

Timmerman, M., P.J.P.W. Claessen en A.J.J. Bosman, 2005. Scheiding van varkensmest d.m.v. TowerFilter en WEDA-vijzelpers. Praktijkrapport Varkens 41. Animal Sciences Group, Lelystad.

Verdoes, N. en J.W.G.M. Swinkels, 2003. Onderzoeksvisie Varkenshouderij 2003-2010. Praktijkonderzoek Veehouderij. Praktijkboek 27.

Vermeij, I., Bosma, B., Evers, A., H. Hemmers en I. Vink, 2007. Kwantitatieve Informatie Veehouderij 2007-2008. Handboek 2. Animal Sciences Group, Lelystad.

Wagenberg, A.V. en M. de Leeuw, 2003. Energiebesparing en duurzame energie op het varkensbedrijf. Praktijkonderzoek van de Animal Sciences Group, Lelystad. Leaflet.

Yang, P.Y., C.Y. Zhou, Y.T. Wong en M.A. Dwyer, 1985. Improved-anaerobic treatment of highly concentrated and diluted swine wastewater in the tropics. Proceedings of the 5th International Symposium on Agricultural Wastes, 16-17 December, 1985, Chicago, Illinois, USA. Pp. 116-123.