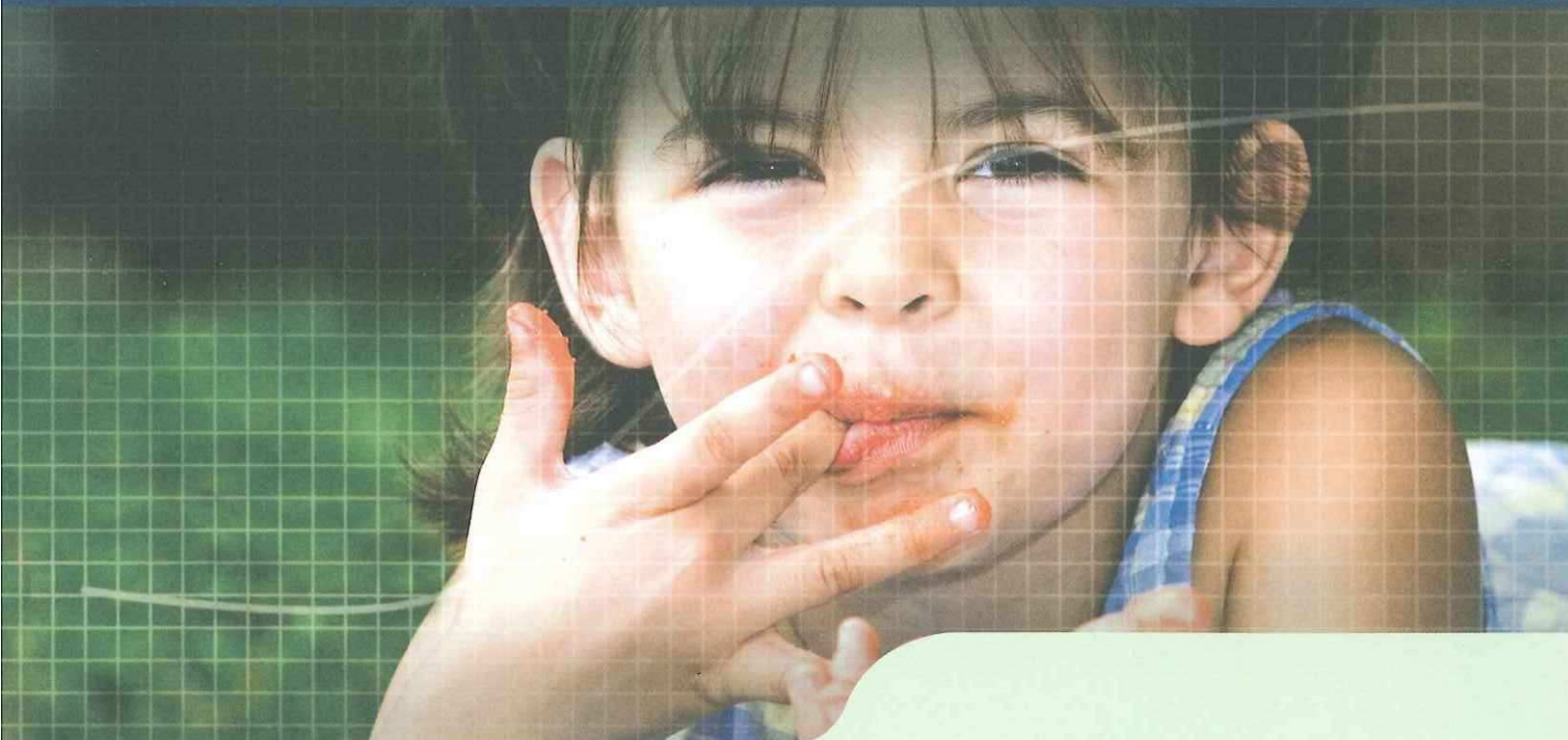


Wageningen UR Livestock Research

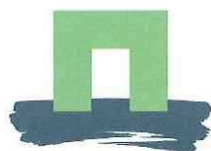
Partner in livestock innovations



Rapport 287

Korte inventarisatie naar voorbehandeling van mest t.b.v. hogere biogasproductie

November 2009



LIVESTOCK RESEARCH

WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

Wageningen UR Livestock Research
Postbus 65, 8200 AB Lelystad
Telefoon 0320 - 238238
Fax 0320 - 238050
E-mail info.livestockresearch@wur.nl
Internet <http://www.livestockresearch.wur.nl>

Redactie

Communication Services

Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, 2009
Overname van de inhoud is toegestaan,
mits met duidelijke bronvermelding.

Aansprakelijkheid

Wageningen UR Livestock Research (formeel ASG Veehouderij BV) aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen UR Livestock Research, formeel 'ASG Veehouderij BV', vormt samen met het Centraal Veterinair Instituut en het Departement Dierwetenschappen van Wageningen Universiteit de Animal Sciences Group van Wageningen UR.

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

A short survey has been done into the effect of several pretreatment technologies for sludge and manure on the biogas production. This survey gave a global overview of the prospect of different methods for the pretreatment of manure to increase the biogas production.

Keywords

Manure, biogas, pretreatment, energy

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

M. Timmerman
W. Rulkens (zelfstandig adviseur)

Titel

Korte inventarisatie naar voorbehandeling van mest t.b.v. hogere biogasproductie

Rapport 287

Samenvatting

Er heeft een korte inventarisatie plaatsgevonden naar het effect van verschillende technieken van ontsluiting van slib en mest op de biogasproductie. Hierdoor is een globaal inzicht verkregen in het perspectief van verschillende methoden van voorbehandeling/ontsluiting van drijfmest om de biogasproductie te verhogen.

Trefwoorden

Mest, biogas, voorbehandeling, ontsluiting, energie



Rapport 287

Korte inventarisatie naar voorbehandeling van mest t.b.v. hogere biogasproductie

Dit onderzoek is uitgevoerd in opdracht van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit (BO-05-006-025)

M. Timmerman

W. Rulkens (zelfstandig adviseur)

November 2009

Samenvatting

De hoeveelheid biogas die via anaerobe vergisting uit rundvee- en varkensdrijfmest wordt geproduceerd is per kuub relatief gering. Dit wordt enerzijds veroorzaakt doordat drijfmest voor het overgrote deel (> 90%) uit water bestaat en anderzijds doordat het energiepotentieel in de organische stof maar deels wordt benut. Door een korte inventarisatie naar het effect van verschillende ontsluitingstechnieken voor slib en mest op de biogasproductie is een globaal overzicht verkregen van het perspectief van verschillende methoden van voorbehandeling/ontsluiting van drijfmest om de biogasproductie te verhogen.

De biogasproductie van rundvee- en varkensdrijfmest bedraagt circa 20 à 30 m³ biogas per ton drijfmest. Als door toepassing van een ontsluitingstechniek de biogasproductie met 50% zou toenemen, stijgt de biogasproductie nog maar met circa 10 à 15 m³ biogas per ton drijfmest. Bij omzetting door een WKK-installatie bedraagt de meeropbrengst dan grofweg € 3,20 à € 4,80 per ton drijfmest. Ofwel, de kosten van de ontsluitingstechnieken voor drijfmest moeten laag zijn, wil het economisch haalbaar zijn. Een scenario waarbij de dikke fractie op het eigen bedrijf apart wordt ontsloten, zal onder de huidige omstandigheden naar verwachting niet rendabel zijn door de kleine hoeveelheid dikke fractie, extra kosten en arbeid. Mogelijke neveneffecten van ontsluitingstechnieken kunnen van grote invloed zijn op het perspectief van een bepaalde ontsluitingstechnieken. Er is echter hierover onvoldoende bekend. Er zijn voor zover bekend nog geen praktijkervaringen met toepassing van ontsluitingstechnieken voor drijfmest, maar alleen onderzoekservaringen.

Op basis van deze studie lijken de volgende ontsluitingstechnieken perspectief te bieden voor mestvergisting:

- 1) thermische ontsluiting indien een goedkope warmtebron beschikbaar is
- 2) aerobe voorbehandeling en
- 3) hydrolyseren van mest.

De overige genoemde technieken lijken nog onvoldoende perspectief te bieden voor mestvergisting door complexiteit, kosten en/of verwacht effect op de biogasproductie. Als alleen de dikke fractie wordt ontsloten, zal dit vanwege schaalgrootte centraal of regionaal gebeuren bij een covergistinginstallatie. Daarom dienen perspectiefvolle technieken voor ontsluiting van de dikke mestfractie in combinatie met het ontsluiten van coproducten beoordeeld te worden.

Summary

Anaerobic digestion of cattle and pig manure produces a relative low amount of biogas per cubic meter. This is on the one hand caused by a high amount of water (>90%) in the manure and on the other hand on the partial utilization of the energy potential in the organic matter. A short survey has been done into the effect of several pretreatment technologies for sludge and manure on the biogas production. This survey gave a global overview of the prospect of different methods for the pretreatment of manure to increase the biogas production.

The biogas production of cattle and pig manure is around 20 to 30 m³ biogas per ton. If by pretreatment the biogas production would rise with 50% then the total biogas production would only rise with 10 to 15 m³ biogas per ton of manure. In a CHP-installation this would lead to an extra revenue of roughly €3,20 to € 4,80 per ton of slurry. Therefore the cost of the pretreatment need to be low in order to be economical feasible. A scenario where the thick fraction of manure will be separately pretreated on a farm is under the current circumstances is expected to be not economical feasible due the small amount of the thick fraction, extra costs and labour requirements. Possible side-effects of pretreatment technologies can have a great influence on the prospect of certain pretreatment technologies. But at the moment there is insufficient known about these side-effects. As far is known there are no practical experiences with pretreatment technologies for slurry, but only research experiences.

On the basis of this study the following technologies could be promising for anaerobic digestion of manure: 1) thermal pretreatment if a cheap heat source is available, 2) aerobic pretreatment and 3) hydrolysis of manure. The other technologies mentioned in the study seem to offer an insufficient prospect for anaerobic digestion for the time being due complexity, cost and/or expected effect on the biogas production. If only the thick fraction is being pretreated then this shall be done in a central or regional co-digestion plant due scale sizes. Therefore promising technologies for the pretreatment of the thick fraction need to be assessed in conjunction with the pretreatment of coproducts.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	Ontsluitingstechnieken	2
2.1	Algemeen	2
2.2	Fysische ontsluiting	2
2.3	Chemische ontsluiting	5
2.4	Biologische ontsluiting	6
2.5	Combinaties van ontsluitingstechnieken	7
3	Perspectief van technieken voor ontsluiting van mest.....	8
3.1	Globale evaluatie van ontsluitingstechnieken voor drijfmest	8
3.2	Perspectief van ontsluitingstechnieken voor rundvee- en varkensdrijfmest	9
4	Conclusies en aanbevelingen.....	11
4.1	Conclusies	11
4.2	Aanbevelingen	11
	Literatuur	12

1 Inleiding

Achtergrond

Bijna alle draaiende biogasinstallaties op Nederlandse landbouwbedrijven passen covergisting toe, waarbij mest samen met coproducten wordt vergist. Men past covergisting toe om de energieproductie uit een biogasinstallatie financieel rendabel te maken. Voor zover bekend is de biogasinstallatie op Praktijkcentrum De Marke op dit moment de enige biogasinstallatie in Nederland die volledig op drijfmest draait en geen gebruik maakt van coproducten. Onder de huidige mestwetgeving wordt het digestaat uit een covergistinginstallatie gezien als 'dierlijke' mest. Dit betekent dat de mineralen (N en P_2O_5) in het digestaat die afkomstig zijn van de coproducten ook vallen onder de gebruiksnormen voor dierlijke mest. Het gevolg van covergisting is dus dat de 'dierlijke' mestproductie in Nederland toeneemt.

Het afgesloten Convenant Schone en Zuinige Agrosectoren tussen de rijksoverheid en verschillende partijen uit de agrosector heeft o.a. als streefdoel dat de veehouderijsector in 2020 een biogasproductie zal hebben van circa 1.500 miljoen m^3 aardgasequivalenten (LNV, 2008). Een grove berekening van de maximale biogasproductie uit alle beschikbare Nederlandse mest in Nederland geeft bij de huidige stand van de techniek een maximaal haalbare biogasproductie van maximaal 1.052 miljoen m^3 aardgasequivalenten. Echter, niet alle mest zal vergist worden, dus is covergisting noodzakelijk om de doelstelling te halen. Indicatieve berekeningen laten zien dat hierdoor de mestproductie met grofweg 12% toeneemt als gevolg van extra digestaat uit de coproducten (Timmerman et al., 2009a). Maar (co)vergisting biedt ook kansen op het gebied van mestbe- en verwerking.

Zo kan door gebruik te maken van de geproduceerde warmte van de WKK-installatie het digestaat worden gepasteuriseerd en geëxporteerd naar België en Duitsland. Ook kan na scheiding van het digestaat de warmte worden ingezet om de dikke fractie te drogen tot een exportwaardige meststof wat over langere afstand kan worden getransporteerd.

Onder de huidige omstandigheden is de hoeveelheid biogas die via anaerobe vergisting uit rundvee- en varkensdrijfmest wordt geproduceerd per ton relatief gering. Dit wordt enerzijds veroorzaakt doordat drijfmest voor het overgrote deel (>90%) uit water bestaat en anderzijds omdat maar een deel van de organische stof wordt omgezet in biogas (Møller et al., 2004; Timmerman et al., 2009b). Een deel van de potentiële energie in mest wordt dus niet benut. Een mogelijkheid om de hoeveelheid biogas uit drijfmest te vergroten is door de mest voor te behandelen en te ontsluiten zodat de biogasproductie van mest toeneemt. Hierdoor wordt het financieel perspectief van mestvergisting verbeterd en is er minder behoefte aan coproducten om dezelfde hoeveelheid biogas te produceren, met als gevolg een afname van de hoeveelheid extra digestaat die wordt geproduceerd bij covergisting.

Doelstelling

Via een korte inventarisatie naar het effect van verschillende ontsluitingstechnieken voor slib en mest op de biogasproductie wordt een globaal overzicht gegeven van het perspectief van verschillende methoden van voorbehandeling/ontsluiting van drijfmest om de biogasproductie te verhogen.

Afbakening

Deze korte inventarisatie richt zich alleen op rundvee- en varkensdrijfmest en niet op coproducten en covergisting. Verder valt het uitvoeren van een volledige integrale evaluatie van de diverse ontsluitingstechnieken buiten de strekking van dit onderzoek.

2 Ontsluitingstechnieken

2.1 Algemeen

Bij ontsluiting worden deeltjes verkleind en/of opengebrouwen met als doel om de organische stof beter beschikbaar te maken voor de bacteriën. Er zijn in feite vijf mogelijkheden om de hoeveelheid biogas uit drijfmest te vergroten door voorbehandeling/ontsluiting:

- Voorbehandeling van de drijfmest voordat deze vergist wordt.
- Afscheiding van de grotere deeltjes uit de meststroom (die zijn in het algemeen moeilijker vergistbaar dan de kleine en opgeloste deeltjes), deze ontsluiten en vervolgens weer aan de resterende, onbehandelde mestvloeistof toevoegen om vergist te worden.
- Afscheiding van de grotere deeltjes uit de meststroom, de dikke fractie ontsluiten en separaat (regionaal) vergisten en de dunne fractie separaat (op locatie) vergisten in een reactor met een korte hydraulische verblijftijd.
- Afscheiding van de grotere mestdeeltjes uit het digestaat, deze ontsluiten en toevoegen aan de te vergisten verse meststroom. De ontsluiting is dan specifiek gericht op het vergisten van die fractie deeltjes in de mest die in een eerste vergistingstap niet/weinig bijdragen aan de winning van biogas.
- Behandeling van het digestaat in de vergistingstank door een deel van het digestaat te pompen naar een kleine behandelingsunit van waaruit het na behandeling weer retour naar de vergistingstank wordt gepompt.

De ontsluitingstechnieken zijn onder te verdelen in drie groepen: fysisch, chemisch en biologisch (Camacho et al., 2002; Müller, 2000; Odegaard, 2004).

2.2 Fysische ontsluiting

Fysische ontsluiting van materiaal kan plaatsvinden via verschillende methoden, zoals mechanische ontsluiting (o.a. snijden, malen en/of druk) of ultrasoon.

Mechanische ontsluiting

Technieken voor mechanische verkleining van deeltjes zijn o.a.:

- Snijmolens en versnijders welke grotere deeltjes in kleinere stukjes versnijden.
- Industriële kogelmolens die in het algemeen bestaan uit een roterende trommel met maalkogels. De desintegratie van de deeltjes vindt plaats door drukkrachten en afschuifkrachten.
- Hoge druk homogenisatoren (HPH). Hierbij wordt het materiaal onder hoge druk gebracht en met zeer hoge snelheid (300 m/s) door een nauwe opening (homogenisator) gevoerd. Door cavitatie en hoge afschuifkrachten wordt het organisch materiaal gedesintegreerd.
- Decompressie explosie. Hierbij wordt het materiaal onder hoge druk (tot 100 atm.) gebracht waarbij het materiaal vervolgens door een nauwe opening geforceerd wordt teruggebracht naar atmosferische druk.
- Toepassing van Mechanical Jet Smash Technology (MJS). Hierbij laat men een vloeistof (slibslurry), die onder hoge snelheid (30 tot 100 m/s) een nozzle verlaat, botsen met een inert oppervlak. Als gevolg van deze botsing vindt desintegratie van de deeltjes in de vloeistof plaats.
- Er zijn verder meerdere mogelijkheden om op basis van zeer hoge afschuifkrachten en cavitatie deeltjes te desintegreren, met name in een centrifugaalveld. Met dergelijke centrifuges wordt een verhoging van de biogasproductie van meer dan 30% verkregen (Dohanyos et al., 2000; Zabranska et al., 2009).

Verscheidende onderzoekers hebben het effect van specifieke mechanische ontsluitingsmethoden op de extra biogasproductie in detail onderzocht. Onderzoek naar het effect van mechanische ontsluitingsmethoden op de desintegratie van zuiveringsslib is onder ander uitgevoerd door Camacho et al. (2002), Müller (2000) en Odegaard (2004). Hierbij is ook gekeken naar de energie die nodig is voor de ontsluiting.

Resultaten van versnijding van deeltjes in rundveemest naar minder dan 2 mm gaf in batchtesten een toename van circa 16-20% in de potentiële methaanproductie uit de rundveemest. Verkleining van deeltjes tot 5 mm gaf geen verhoging te zien (Angelidaki en Ahring, 2000). Onderzoek naar het effect van versnijden op de biogasopbrengst bij commerciële covergistinginstallaties in Denemarken gaf een

verhoging van -5% tot +25% te zien. Uit de resultaten kwam naar voren dat het effect vooral samenhangt met het aandeel vezels in de input. Hoe meer vezels (bij groter en moeilijk afbreekbaar materiaal), hoe meer effect we mogen verwachten van het toepassen van een versnijder. De versnijders in het onderzoek hadden een energieverbruik van 0,1-1,3 kWh/m³ mest (Hartmann et al., 2000). Versnijden tot < 1 mm van dikke fractie vergiste rundveemest (> 2 mm) leidde bij navergisting op zowel 35 °C als 55 °C niet tot hogere methaanopbrengsten in vergelijking met navergisting van de onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).

Decompressie explosie van rundveemest gaf een verhoging van circa 17%. Bij continu vergisting in een lab-CSTR werd circa 17% meer biogas geproduceerd als de rundveemest was versneden in vergelijking met de reactor waarin onbehandelde mest werd vergist (Angelidaki en Ahring, 2000). Een gecombineerde behandeling van versnijden en decompressie explosie (12 bar → 1 bar) van digestaat uit een covergistinginstallatie leidde tot mindere drijfslagen in de vergister en een lagere viscositeit van het digestaat waardoor het energieverbruik voor roeren duidelijk verminderd werd. De eerste trends van dit nieuw ontwikkelde systeem zijn een hogere biogasopbrengst van circa 15% en een lager drogestofgehalte in het digestaat (Gruber, 2008).

Thermische ontsluiting

Bij thermische ontsluiting ondergaat het organisch materiaal een hittebehandeling in een afgesloten reactor. In het algemeen ligt de behandelingstemperatuur ergens tussen de 100 en 200 °C en varieert de behandelingsduur van circa 15 minuten tot enkele uren.

Veel ervaring bestaat er met het ontsluiten van zuiveringsslib. De concentratie aan droge stof in het te behandelen slib varieert van 5 tot 20%. Bij thermisch ontsluiting wordt het zuiveringsslib gehydrolyseerd waarbij de celwanden van de micro-organismen worden opengebroken. Ook andere verbindingen worden gedeeltelijk gehydrolyseerd. Het resultaat is dat een belangrijk deel van de colloïdale en gesuspendeerde deeltjes in oplossing gaat en gemakkelijker beschikbaar komt voor anaerobe biologische omzetting. In het algemeen resulteert een hogere temperatuur in een verdergaande hydrolyse. Bij te hoge temperaturen kunnen echter ook recalcitrante verbindingen ontstaan, als gevolg van Maillardachtige reacties, die kunnen leiden tot humusachtige biologisch moeilijk degradeerbare verbindingen. Er bestaan verschillende modificaties van dit proces. Een van de modificaties is het CAMBI-proces. In dit proces wordt het zuiveringsslib met 15 tot 20% droge stof verhit tot een temperatuur van 180 °C door stoomtoevoeging. Het gehydrolyseerde zuiveringsslib wordt vervolgens vergist bij een drogestofgehalte van 10 tot 12%. De hoeveelheid biogas die uit het gehydrolyseerde zuiveringsslib wordt verkregen is meer dan 30% groter dan de hoeveelheid biogas die uit niet gehydrolyseerd zuiveringsslib wordt verkregen. Ook wordt een duidelijke verbetering van de ontwateringeigenschappen geconstateerd en is de uiteindelijke hoeveelheid zuiveringsslib geringer (Kepp et al., 2000). Een thermisch behandeling van slib bij temperaturen beneden 100 °C geeft in het algemeen slechts een geringe toename in de hoeveelheid COD die beschikbaar is voor de productie van biogas (Camacho et al., 2002). Thermische behandeling vindt meer en meer toepassing voor slibdesintegratie, gericht op de productie van extra hoeveelheid biogas. Onder de meest gunstige omstandigheden, onderzocht op laboratoriumschaal, kan de productie aan biogas verdubbeld worden. Een dergelijke verdubbeling resulteert in een totale omzetting van, zeer globaal geschat, 50% van de COD van het slib (Dunnebeil et al., 2002). Thermisch hydrolyse van zuiveringsslib wordt op praktijkschaal toegepast (Odegaard, 2004).

Resultaten van onderzoek naar het pasteuriseren van varkensmest bij 80 °C gedurende 3 uur gaf een wisselend beeld. Bij verse varkensmest met een laag ammoniumgehalte werd een sterke toename in methaanopbrengst geconstateerd, terwijl bij niet-verse varkensmest met een hoog ammoniumgehalte een afname werd geconstateerd waarschijnlijk als gevolg van ammoniakremming (Bonmati et al., 2001). In een ander onderzoek leidde het pasteuriseren (1 uur op 70 °C) van de varkensmest niet tot een hogere methaanopbrengst. In batchtesten was de methaanopbrengst van de gepasteuriseerde varkensmest 19% lager dan de onbehandelde varkensmest (Timmerman et al., 2009). Ook Zweeds onderzoek (Hagelberg et al., 1984) gaf wisselende resultaten te zien. Een hittebehandeling bij 80 °C had een sterk positief effect, terwijl hittebehandelingen bij 70 en 90 °C een negatief effect hadden. Volgens Hagelberg et al. (1984) hangt het effect van de hittebehandeling af van verschillende factoren. Naast temperatuur en tijdsduur zullen dat de chemische en fysische eigenschappen van de mest zijn. Recent onderzoek naar thermische ontsluiting van de dikke fractie van varkensdrijfmest liet een verhoging van de biogasproductie zien van 30 tot 50% (Rulkens et al., 2009).

Hittebehandeling van de dikke fractie van een mengsel van varkens- en rundveemest gaf bij hoge temperaturen (100-140 °C) gedurende 20-40 minuten een duidelijke verhoging (9-24%) van de methaanopbrengst bij zowel batch- als CSTR-testen (Mladenovska et al., 2006). Ook ander onderzoek gaf een verhoging te zien van meer dan 26% in methaanopbrengsten van dikke fractie varkensmest door een hittebehandeling (127-167 °C) (Møller en Raju, 2005). Een hittebehandeling (80 °C gedurende 3 uur) of bevroren (-20 °C gedurende 24 uur) in combinatie met ontdooien (bij 20 °C gedurende 4 uur) van dikke fractie vergiste rundveemest (> 2mm) leidde bij navergisting op zowel 35 °C als 55 °C niet tot hogere methaanopbrengsten in vergelijking met navergisting van de onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).

Elektroporatie

Bij elektroporatie (EP) of High Performance Pulse Technique (HPP) worden korte en intensieve elektrische pulsen op een hoog voltage afgegeven waarbij een pulserend elektrisch veld (10 tot 30 kV) ontstaat wat schokgolven veroorzaakt. Deze behandeling zorgt voor porievorming in celmembranen. Afhankelijk van de intensiteit zijn deze poriën tijdelijk of blijvend. De benodigde sterkte van het elektrisch veld hangt af van de structuur van het te behandelen materiaal. Naast de veldsterkte is ook de frequentie van de pulsen van invloed op het effect van de behandeling (Carlsson et al., 2008).

Voor zuiveringsslib gaf de toepassing van gepulseerde velden een toename van de opgeloste hoeveelheid COD van 20%. Gesteld wordt dat de benodigde hoeveelheid elektrische energie voor het opwekken van deze schokgolven gering is in vergelijking met de hoeveelheid energie die wordt verkregen door de productie van extra biogas (Kopplow et al., 2000). Een variant van het High Performance Pulse Technique is de Focused-Pulsed Technology die elektrische veldsterktes produceert van 20-30 kV. Deze is efficiënter dan de standaard HPP technologie. Het systeem is uitgetest op praktijkschaal bij slibvergisting. We verkrijgen een toename in biogasproductie van 60% door deze methode verkregen. De benodigde energie voor het opwekken van deze pulsen is hier maar een fractie van (Rittmann et al., 2008).

Ultrasonische ontsluiting

Hierbij wordt het materiaal gedesintegreerd met behulp van ultrasoon geluid. Het gaat daarbij om de toepassing van een laag frequent, hoog intensief elektrisch veld waarmee deze geluidsgolven worden opgewekt.

Desintegratie van zuiveringsslib vindt plaats door cavitatie. De mate van desintegratie is sterk afhankelijk van de totale energie-input en is in het algemeen groter naarmate de energie-input groter is. Het ontsluitingsproces is efficiënter bij hogere drogestofgehalten. Er bestaan verschillende modificaties van het ultrasoon behandelingsproces. Zeer in het algemeen kunnen we stellen dat de benodigde energie bij ultrasonische behandeling iets groter is dan bij het gebruik van kogelmolens of hoge druk homogenisatoren (Lehne en Muller, 1999). Er bestaat relatief veel informatie over het effect van een ultrasonische behandeling van zuiveringsslib op de toename van de concentratie aan vluchtige vetzuren in het zuiveringsslib, een indirecte mate maat voor de toename in potentiële biogasproductie of, direct, op de toename in biogasproductie (Chimochowicz-Rebeicka et al., 2009; Jiang et al., 2009; Kim et al., 2009; Neis, 2000; Neis et al., 2000; Zhang et al., 2009). Het betreft hier onderzoek op laboratoriumschaal, uitgevoerd onder zeer verschillende condities, zodat onderlinge vergelijking van resultaten vaak moeilijk is.

Uit deze literatuur kunnen we wel een aantal algemene conclusies trekken. De toename in concentratie aan vluchtige vetzuren ligt in het algemeen tussen 20 en 50%. Voor zover gemeten, ligt de biogasproductie circa 20 tot 30% hoger. De hoeveelheid energie die aan het slib moet worden toegevoerd om een redelijk effect te bereiken, bedraagt zeer globaal 20.000 tot 30.000 kJ/kg drogestof. De hoeveelheid via ultrasonische behandeling toegevoerde energie per volume eenheid ligt in de orde grootte van 1 à 2 W/ml gedurende een periode van 10 tot 30 minuten.

Verder wordt waargenomen dat een te intensieve en langdurige ultrasoonbehandeling een minder groot effect heeft dan een milde ultrasoonbehandeling. We constateren dat bij een ultrasoonbehandeling uiteindelijk een verzadigingseffect optreedt. Nickel (1999) onderzocht het effect van een ultrasoonbehandeling van zuiveringsslib op de snelheid van biogasproductie. Het blijkt dat de fermentatiesnelheid aanzienlijk kan worden vergroot, resulterend in een reductie van de hydraulische verblijftijd van 16 naar 4 dagen. Onderzoek naar de ultrasonische behandeling van slib dat reeds anaeroob was (voor)vergist, liet zien dat ultrasonische voorbehandeling gevolgd door een tweede vergistingstap de biogasproductie kan vergroten met 50 tot 100% (Gruning en Orth, 1999).

Verscheidende parameters zijn inmiddels onderzocht, waarbij de volgende zaken werden vastgesteld: (1) hoe lager de ultrasoonfrequentie des te beter de ontsluiting, (2) de ontsluiting van cellen is een functie van de ingebrachte energie en (3) alle slib- en biomassasoorten (incl. vergist materiaal) laten zich via ultrasoon hydrolyseren. Het is mogelijk om door ultrasone behandeling de verblijftijd te verkorten en afbraak van organisch materiaal te verhogen. Hierdoor is het mogelijk om een grotere doorzet van materiaal te hebben of met een kleinere reactor te werken (Neis, 2002). Het proces wordt toegepast in de praktijk bij slibvergisting, o.a. op circa 12 installaties in Duitsland en Oostenrijk en als pilot in Nederland (Herzberg en Houy, 2007; Neis, 2004; Stam, 2004).

Voor (sterk verdunde) varkensdrijfmest (COD=12.000 mg/l) is de toepassing van een ultrasone behandeling nog slechts in zeer beperkte mate onderzocht. Uit onderzoek, dat primair tot doel had om de hoeveelheid opgelost organisch materiaal in de mest te vergroten, bleek dat een toename van de oplosbare COD met meer 100% mogelijk is. De energie-input bij de uitgevoerde experimenten bedroeg ongeveer 180 W/l gedurende 30 tot 60 minuten. Doorleiden van een zuurstof bevattend gasstroom tijdens de ultrasone behandeling had een positief effect op de ontsluiting, waarschijnlijk als gevolg van de vorming van radicalen die reageerden met de diverse organische verbindingen in de mest. Ook werd een duidelijke verkleining van de deeltjes geconstateerd, met name ook wat betreft de kleinere deeltjes (Lee et al., 2009).

De ultrasone techniek is ook geïntroduceerd bij covergistinginstallaties in Duitsland (Rinck, 2008). Nadelen van de huidige technieken van ultrasoonbehandeling zijn de grote slijtagegevoeligheid, hoge investeringskosten en lage capaciteit (Gruber, 2008).

Liquefactie

Liquefactie is een transformatie proces waarbij vaste biomassa wordt omgezet naar vloeibare producten. Het proces verloopt onder hoge druk (60-250 bar) en een temperatuur van 300-360 °C. Geliqeficeerde rundveemest wordt het meest effectief afgebroken als lage concentraties (1-5%) worden toegevoegd aan rundveemest, maar bij hoge concentraties (>25%) treden significante remmingen in het vergistingproces op (Jungersen en Ahring, 1994). In Denemarken wordt onderzoek gedaan naar het liqueficeren van dikke fractie mest d.m.v. enzymen zodat de dikke fractie als vloeistof naar regionale biogasinstallaties vervoerd kan worden (Anonymous, 2008).

Aerobe voorbehandeling

Aerobe voorbehandeling bestaat uit het beluchten van de mest in een reactor waarbij warmte vrijkomt wat zorgt voor een temperatuurstijging in de reactor. Proeven met aerobe voorbehandeling van melkveemest lieten een temperatuurstijging zien tot 65 °C binnen 40 uur beluchten. Ondanks dat organisch materiaal werd verbruikt in het aerobe proces bleek vergisting van aeroob voorbehandelde melkveemest een betere balans van het vergistingproces te geven met een hogere methaanproductie (>20%) in vergelijking tot vergisting van melkveemest die niet aeroob was voorbehandeld. De warmteproductie van de aerobe behandeling bleek voldoende te zijn om het vergistingproces op temperatuur te kunnen houden (Achkari-Begdouri, 1989). Hierdoor kan men de warmte van een WKK-installatie inzetten voor andere doeleinden, zoals bijvoorbeeld droging van een dikke mestfractie.

2.3 Chemische ontsluiting

Chemische voorbehandeling van materiaal kan plaatsvinden via verschillende methoden, zoals toevoeging van zuren en/of basen.

Zuur/basen

Chemische behandeling met NaOH, NH₄OH of een combinatie van basen NaOH:KOH:Ca(OH)₂ voor een periode van 24 tot 48 uur gaf in batchtesten een verhoging van circa 13-23% in de potentiële methaanproductie uit dikke fractie rundveemest, mits voldoende basen en zuren werden toegevoegd (Angelidaki en Ahring, 2000). Voorbehandeling van een dikke fractie varkensmest (DS 9,3%) met zuur (HCl) en base (NaOH) liet respectievelijk een verlaging en een verhoging zien van de methaanproductie (González-Fernández et al., 2008). Chemische behandeling met NaOH van de dikke fractie vergiste rundveemest (> 2 mm) leidde bij navergisting op zowel 35 °C als 55 °C niet tot hogere methaanopbrengsten in vergelijking tot navergisting van de onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005).

Ozon

Ozonbehandeling maakt het mogelijk om de celwanden van micro-organismen af te breken waardoor celmateriaal in oplossing gaat en beschikbaar komt voor anaerobe omzetting tot biogas. Gebruik van ozon veroorzaakt echter ook een oxidatie van organisch materiaal. In het algemeen kunnen we stellen dat een ozonbehandeling weliswaar resulteert in een sterke toename van de hoeveelheid opgelost materiaal, maar slechts in een beperkte toename in de biogasproductie (Camacho et al., 2002; Goel et al., 2002; Weemaes et al., 2000). Ook merken we op dat de toegepaste hoeveelheden ozon in verhouding tot de hoeveelheid slib materiaal relatief groot waren.

Natte oxidatie

Toevoeging van een geringe hoeveelheid waterstofperoxide (H_2O_2) resulteert in partiële oxidatie. De partiële oxidatie veroorzaakt een openbreking van celwanden, waardoor de celinhoud vrijkomt, maar heeft ook een partiële oxidatie van moeilijk biologisch afbreekbare componenten tot gevolg waardoor deze beter beschikbaar komen voor biogasproductie.

Een batchtest waarin rundveedrijfmest en dikke fractie rundveemest waren voorbehandeld door natte oxidatie (170 °C, 12 bar, toevoeging van 150 ml H_2O_2 , flash bij 15 bar) gaf bij rundveedrijfmest een 23% hogere methaanopbrengst en bij de dikke fractie rundveedrijfmest een 98% hogere methaanopbrengst (Hartmann et al., 2005).

Hydrolysetank

Het toepassen van een hydrolysetank voor een vergistingreactor biedt de mogelijkheid om zonder gebruik te maken van zuurtoevoeging organisch materiaal te ontsluiten. In de hydrolysetank heeft het organisch materiaal een verblijftijd van hoogstens enkele dagen en heerst er een pH <4,5. Door de lage pH in de hydrolysetank wordt organisch materiaal ontsloten.

Een Duits 3-trapsvergistingssysteem werkt met twee hydrolysetanks waarvan de een gevuld wordt binnen een tijdsbestek van 2-3 dagen en de andere tank met verzuurd materiaal gedurende 2-3 dagen. Dit wordt vervolgens aan de vergister gevoerd. Het digestaat wordt in dit systeem gescheiden in een dikke en dunne fractie waarbij de dunne fractie deels retour wordt gevoerd naar de hydrolysetank. De leverancier geeft aan dat een 30% hogere biogasproductie mogelijk is bij vergisting van cellulosehoudend materiaal zoals maïs en mest. Tevens wordt aangegeven dat een 50% kortere verblijftijd mogelijk is (Danner, 2007). Resultaten uit Duitsland laten zien dat door een hydrolysetank het mogelijk is om in bepaalde situaties de biogasproductie te verhogen bij covergistinginstallaties (Rabe, 2008). Bij een aantal Deense biogasinstallaties wordt ook gebruik gemaakt van hydrolysetanks (Jensen, 2008; Skøtt, 2009).

2.4 Biologische ontsluiting

Biologische ontsluiting is een methodiek waarbij organisch materiaal wordt ontsloten door gebruik te maken van biologische processen zoals bijvoorbeeld door toevoeging van enzymen.

Ontsluiting met behulp van enzymen

Voor zuiveringsslib wordt in het algemeen geen of slechts een zeer beperkt effect van een voorbehandeling met enzymen zoals protease, amylase, cellulase en lipase gevonden op de biogasproductie en de kosten van deze ontsluiting zijn relatief hoog. Wel verbeteren de ontwateringeigenschappen van het slib (Drake et al, 2009). Voor zuiveringsslib wordt deze methode, voor zover bekend, niet toegepast in de praktijk.

Biologische behandeling met het hemicelluloseafbreekende bacterium B4 gaf in batchtesten een verhoging van circa 30% in de potentiële methaanproductie uit dikke fractie rundveemest (Angelidaki en Ahring, 2000). Er zijn covergistinginstallaties die enzymen en enzympreparaten gebruiken (Danner, 2004; Gerhadt en Bäuml, 2003).

2.5 Combinaties van ontsluitingstechnieken

Thermische ontsluiting in combinatie met een chemische ontsluiting

Thermische ontsluiting van de slibdeeltjes in de vloeistoffase bij hoge of zeer hoge temperatuur in combinatie met een chemische ontsluiting. Toevoeging van chemicaliën aan het zuiverings-slib kan het effect van de thermisch hydrolyse vergroten.

Verlagen van de pH van het slib met bijv. zwavelzuur of zoutzuur, gevolgd door een thermische hydrolyse. Een modificatie hiervan is het KREPRO-proces waarbij een lage pH wordt toegepast door toevoeging van zwavelzuur. Dit heeft als voordeel dat de aanwezige P in oplossing gaat en later uit de vloeistof fase kan worden teruggewonnen (Odegaard, 2004). Verhogen van de pH van het slib met behulp van natronloog (NaOH) of calciumhydroxide ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) gevolgd door een thermische hydrolyse is ook een mogelijkheid om meer biogas te produceren. Sibbehandeling met NaOH en een hittebehandeling van 50 °C en 175 °C verhoogden de methaanopbrengst in batchtesten met respectievelijk 22 en 52% (DiStefano en Ambulkar, 2006).

Onderzoek naar hittebehandeling (127-167 °C) in combinatie met toevoeging van ongebluste kalk (CaO) gaf verhoging (>26%) in methaanopbrengsten van dikke fractie varkensmest (Møller en Raju, 2005). Chemische behandeling met NaOH van de dikke fractie vergiste rundveemest (> 2mm) in combinatie met een hittebehandeling (80 °C gedurende 3 uur) leidde bij navergisting op zowel 35 °C als 55 °C tot licht hogere methaanopbrengsten in vergelijking tot navergisting van de onbehandelde dikke fractie (Kaparaju en Rintala, 2005). Een alternatief voor de thermisch/chemische ontsluiting van mest bij verhoogde pH met behulp van natronloog of kalk is gebruik van ammoniak. Hiermee kan de pH van mest ook worden verhoogd. De ammoniak kan uit de hete meststroom worden teruggewonnen voor hergebruik. Op deze wijze bespaart men op chemicaliënverbruik. Voor zover bekend is de methode ammoniak vroeger ook al eens onderzocht voor toepassing op varkensdrijfmest. Detailgegevens ontbreken echter.

Chemische in combinatie met mechanische ontsluiting

Een speciale uitvoering is de het MicroSludge-proces, een combinatie van een chemische ontsluiting gevolgd door een behandeling met hoge druk homogenisatoren is. Er wordt eerst een alkalische voorbehandeling van het slib toegepast, waarna het slib wordt gehomogeniseerd. Met dit proces wordt een toename in de biogasproductie van meer dan 30% verkregen (Stephenson, 2002).

Ultrasoon i.c.m. chemische ontsluiting

Een ultrasone behandeling als eerste desintegratiestap gevolgd door een alkalische behandeling bleek elkaar te versterken (Jiang et al., 2009). Deze versterking wordt ook waargenomen als eerst de alkalische ontsluiting plaatsvindt en daarna de ultrasone (Kim et al., 2009).

Thermodruk hydrolyse

Bij een covergistinginstallatie in Nederland worden de mest en coproducten ontsloten met een thermodruk hydrolyseinstallatie (Anonymous, 2009).

3 Perspectief van technieken voor ontsluiting van mest

Het uitvoeren van een volledige integrale evaluatie van de diverse ontsluitingstechnieken valt buiten de strekking van dit onderzoek.

3.1 Globale evaluatie van ontsluitingstechnieken voor drijfmest

De verschillende methoden voor ontsluiting kunnen worden geëvalueerd op basis van:

- extra opbrengst aan biogas
- benodigde hoeveelheid energie voor de ontsluiting
- benodigde chemicaliën voor de ontsluiting
- complexiteit van toegepaste techniek
- arbeid
- investering - en operationele kosten apparatuur
- effect van de ontsluiting op de eventuele verdere verwerking van het digestaat
- praktijkervaring
- mogelijke neveneffecten van een techniek

Een globale evaluatie van de diverse ontsluitingstechnieken is lastig door gebrek aan voldoende kwantitatieve gegevens, verschillende gebruikte methodieken, van elke ontsluitingsmethode bestaan verschillende modificaties, de procescondities die bij een ontsluitingsmethode worden toegepast kunnen vaak sterk verschillen en de aard en samenstelling van mest verschilt ook vaak.

Een belangrijk punt in de beoordeling van een ontsluitingstechniek zijn de kosten en opbrengsten. De huidige biogasproductie van rundvee- en varkensdrijfmest bedraagt circa 20 à 30 m³ biogas per ton drijfmest. Als door toepassing van een ontsluitingstechniek de biogasproductie met 50% zou toenemen dan stijgt de biogasproductie nog maar met circa 10 à 15 m³ biogas per ton drijfmest. Ofwel: bij omzetting via een WKK-installatie levert dit grofweg 20 à 30 kWh extra elektriciteit op. Bij een opbrengstprijs van circa € 0,16 per kWh bedraagt de meeropbrengst dan grofweg € 3,20 à € 4,80 per ton drijfmest. De kosten van de ontsluitingstechnieken voor drijfmest moeten laag zijn, wil het economisch haalbaar zijn.

Bij ontsluiting van de dikke fractie is in principe het potentieel aan extra biogasproductie groter dan bij drijfmest. Er moeten dan echter wel eerst kosten gemaakt worden voor het scheiden van de drijfmest/digestaat in een dikke en dunne fractie; vervolgens moet de ontsloten dikke fractie ook weer worden toegevoerd aan de vergistingreactor wat extra handelingen met zich meebrengt. Daarbij is de hoeveelheid dikke fractie die geproduceerd wordt op een bedrijf aan de lage kant. Een scenario waarbij de dikke fractie op het eigen bedrijf apart wordt ontsloten, zal onder de huidige omstandigheden naar verwachting niet rendabel zijn.

Het toepassen van een ontsluitingstechniek met als doel om extra biogas (energie) te kunnen produceren moet wel netto extra energie opleveren. Ofwel: het energiegebruik moet (aanzienlijk) lager zijn dan de extra energieproductie. Ook het gebruik van chemicaliën zoals ozon en waterstofperoxide betekent in feite dat extra energie (voor de productie van deze chemicaliën) nodig is.

Neveneffecten van ontsluitingstechnieken kunnen zijn:

- Een snellere afbraak van het organische materiaal waardoor de productiesnelheid van methaan hoger ligt.
- Het vergistingproces bedrijven bij een hogere organische belasting.
- Het vergistingproces bedrijven bij een kortere verblijftijd.
- Lager energieverbruik voor het mengen van de vergister.

Deze neveneffecten zijn van invloed op de investerings- en operationele kosten van een mestvergistinginstallatie en kunnen dus van grote invloed zijn op het perspectief van een bepaalde ontsluitingstechnieken.

Er zijn voor zover bekend nog geen praktijkervaringen met toepassing van ontsluitingstechnieken voor drijfmest, maar alleen onderzoekservaringen.

3.2 Perspectief van ontsluitingstechnieken voor rundvee- en varkensdrijfmest

Het perspectief van verschillende ontsluitingstechnieken voor mestvergisting wordt in belangrijke mate bepaald door de investering- en operationele kosten van de techniek en de hoeveelheid mest die behandeld wordt. Voor situaties met een relatief kleine hoeveelheid mest (< 10.000 ton per jaar) moet de techniek eenvoudig en goedkoop zijn. In deze situaties zal het met name gaan om drijfmest op bedrijfsniveau. Voor situaties met grote hoeveelheden mest kunnen andere technieken mogelijk ook perspectiefvol zijn. Deze situaties zullen betrekking hebben op grote bedrijven en/of vaak gepaard gaan met mesttransporten waarbij vooral drijfmestsoorten met een hoog drogestofgehalte wordt vergist en/of dikke mestfracties die een relatief hoge biogasproductie per ton hebben. Dit zullen in veel gevallen covergistinginstallaties betreffen. Het perspectief van de verschillende ontsluitingstechnieken wordt hieronder kort per techniek weergegeven.

Fysische ontsluiting

- *Mechanisch*: Bij het verpompen van drijfmest worden ook versnijders toegepast. Aangezien een effect eigenlijk alleen is te verwachten bij een vergaande versnijding, is het aannemelijk dat deze versnijders weinig/geen verhogend effect hebben op de biogasproductie uit drijfmest. Het meeste effect van versnijden is te verwachten bij toepassing op 'vezelrijke' drijfmest, maar het is maar zeer de vraag of het elektriciteitsverbruik en de kosten opwegen tegen de extra biogasproductie. Overige mechanische technieken lijken nog weinig perspectiefvol voor drijfmest. Voor dikke fracties komen mogelijk de technieken in aanmerking die voor zuiveringslib ook werken en toegepast worden in de praktijk.
- *Thermisch*: Bij temperaturen < 100 °C is het effect wisselend, terwijl boven > 100 °C er wel een duidelijke verhoging van de biogasproductie blijkt te zijn. Deze techniek is alleen interessant als er gebruik wordt gemaakt van restwarmte. Bij gebruik van een WKK-installatie kan de warmte van het koelcircuit en de rookgassen worden ingezet als goedkope warmtebron. Voordeel van thermische ontsluitingstechnieken is dat de mest exportwaardig wordt als de techniek en biogasinstallatie erkend zijn door de VWA.
- *Elektroporatie*: Hoewel een redelijk effect te verwachten is, wordt voor zover bekend dit systeem nog niet of nauwelijks toegepast in de praktijk bij slibgisting en bevindt het zich nog in een onderzoekstadium. Daarmee lijkt de techniek nog niet interessant voor het ontsluiten van mest of mestfracties.
- *Ultrasoon*: De techniek wordt in de praktijk toegepast bij slibgisting en sinds kort ook bij covergistinginstallaties. Hoewel qua biogasproductie de techniek ook interessant lijkt te zijn voor drijfmest zullen de huidige kosten te hoog zijn voor toepassing bij mestvergisting. Bij regionale vergisting van dikke mestfracties kan de techniek mogelijk wel uit. Bij grootschaligere toepassing en verdere doorontwikkeling zullen naar verwachting de kosten dalen.
- *Liquefactie*: Gezien de hoge druk en hoge temperatuur zal deze techniek niet interessant zijn voor toepassing bij mestvergisting.
- *Aerobe voorbehandeling*: Dit proces lijkt perspectieven te bieden voor een hogere biogasproductie en lager eigen warmteverbruik ondanks dat een deel van de organische stof is verbruikt bij de aerobe voorbehandeling. Hierbij dienen we ook in ogenschouw te nemen dat er ook kansen liggen om mest op een goedkope manier exportwaardig te maken als gevolg van de hoge temperatuurstijging.

Chemische ontsluiting

- *Zuur/basen*: Mest heeft al een relatief hoog zoutgehalte en bij verdere verhoging door de toevoeging van chemicaliën kan mogelijk een negatieve werking hebben op het vergistingproces. Door de sterk bufferende werking van mest is een relatief hoog chemicaliënverbruik nodig om de pH te verhogen of verlagen. Verder vereist het werken met chemicaliën extra opslagen, doseringsapparatuur en een mengvat. Daarnaast kan het toevoegen van chemicaliën aan de mest gevolgen hebben voor de kwaliteit van het digestaat (o.a. bemesting en verwerking) en of het digestaat vanuit wetgeving nog wel gezien kan worden als meststof. Vooralsnog lijkt een ontsluiting met zuren en/of basen niet interessant voor mestvergisting.

- *Ozon*: Gezien het relatieve hoge ozonverbruik lijkt een ontsluiting met ozon (nog) niet interessant voor mestvergisting.
- *Natte oxidatie*: Natte oxidatie geeft een verhoging van de biogasproductie, maar door een complex en duur proces lijkt het nog niet interessant voor mestvergisting.
- *Hydrolysetank*: Het gebruik van een hydrolysetank voor mestvergisting waarin de mest wordt verzuurd met een korte verblijftijd, kan mogelijk perspectief bieden op een hogere biogasproductie uit mest. In combinatie met een eindopslag wat tevens dienst doet als methaanreactor en gasopslag, kan mogelijk tegen lage kosten biogas uit mest worden geproduceerd. Vraag is in hoeverre de pH verlaagd moet worden voor een goede ontsluiting, aangezien mest een grote bufferende werking heeft wat de verlaging van de pH tegenwerkt.

Biologische ontsluiting

Bij de slibgisting wordt voor zover bekend geen gebruik gemaakt van enzymen voor een betere ontsluiting. Afhankelijk van de mestsoort/dikke fractie bevat mest weliswaar meer cellulosehoudend materiaal dan slib waar enzymen iets mee kunnen doen, maar op basis van de beschikbare informatie is onduidelijk wat het perspectief hiervan is.

Combinaties van ontsluiting

Combinaties van verschillende technieken voor ontsluiten van mest zal een gecompliceerder proces betekenen met hogere kosten. Naast de eerder genoemde aspecten bij de afzonderlijke technieken bieden combinaties van technieken nog weinig perspectief voor mestvergisting.

4 Conclusies en aanbevelingen

4.1 Conclusies

Door een korte inventarisatie naar het effect van verschillende ontsluitingstechnieken voor slib en mest op de biogasproductie is een globaal inzicht verkregen in het perspectief van verschillende methoden van voorbehandeling/ontsluiting van drijfmest om de biogasproductie te verhogen. De volgende technieken lijken perspectief te bieden voor vergisting van drijfmest:

- Thermische ontsluiting indien een goedkope warmtebron beschikbaar is
- Aerobe voorbehandeling
- Hydrolysetank voor mest

De overige genoemde technieken lijken nog onvoldoende perspectief te bieden voor mestvergisting door complexiteit, kosten en/of verwacht effect op de biogasproductie.

Als alleen de dikke fractie wordt ontsloten zal dit vanwege schaalgrootte centraal of regionaal gebeuren bij een covergistinginstallatie, want op bedrijfsniveau zal de hoeveelheid dikke fractie te klein zijn om rendabel te kunnen voorbehandelen. Daarom dienen perspectiefvolle technieken voor ontsluiting van de dikke mestfractie in combinatie met het ontsluiten van coproducten beoordeeld te worden.

4.2 Aanbevelingen

Het huidige onderzoek was beperkt van aard. Nader onderzoek naar de voor- en nadelen van de ontsluitingstechnieken die perspectief lijken te bieden zal inzicht geven of het toepassen van deze technieken voldoende rendement opleveren voor toepassing op mest in de praktijk. Aanbevolen onderzoek:

- 1) Het effect van een thermische ontsluiting is wisselend bij temperaturen onder de 100 °C, terwijl boven de 100 °C er wel een duidelijke verhoging van de biogasproductie blijkt te zijn. Onderzoek naar de parameters die van invloed zijn op de biogasproductie kunnen duidelijkheid verschaffen onder welke omstandigheden een thermische behandeling zinvol is om toe passen.
- 2) Er lijken kansen te liggen op het gebied van een aerobe voorbehandeling door middel van een (beperkte) beluchting van de mest. Een hogere biogasproductie met een lager eigen energieverbruik van de installatie lijkt mogelijk, waarbij tevens exportwaardige mest geproduceerd kan worden. Onderzoek naar de (on)mogelijkheden van een nieuw concept op dit gebied moet duidelijkheid verschaffen over het toekomstperspectief van deze techniek.
- 3) Het hydrolyseren en (spontaan) verzuren van mest in combinatie met een gasdichte naopslag voor de methaanwinning biedt uitzicht op een nieuw vergistingconcept wat mogelijk een lagere kostprijs per energie-eenheid heeft. Onderzoek naar de (on)mogelijkheden van dit nieuwe concept moet duidelijkheid verschaffen over het toekomstperspectief van deze techniek.

Bijna alle biogasinstallaties op praktijkbedrijven in Nederland passen covergisting toe. Het inzetten van dikke mestfracties als (gedeeltelijke) vervanging van coproducten zal ertoe leiden dat meer mest wordt vergist en minder gebruik hoeft te worden gemaakt van coproducten. Tevens is het de verwachting dat dit het rendement van de huidige covergistinginstallaties verbetert. Het verdient daarom aanbeveling om onderzoek uit te voeren naar perspectiefvolle ontsluitingstechnieken voor dikke mestfracties die ook perspectief bieden voor gezamenlijke ontsluiting van mest met coproducten.

Literatuur

- Achkari-Begdouri, A., 1989. Anaerobic digestion of dairy cattle manure autoheated by aerobic pretreatment. University of Minnesota, USA. PhD-thesis.
- Angelidaki, I and B.K. Ahring, 2000. Methods for increasing the biogas potential from the recalcitrant organic matter contained in manure. *Water Science and Technology* 41 (3): 189-194.
- Anonymous, 2008. DKK 8 million form EUDP for biogas. *BioEnergy Research* 5 (26): 3.
- Anonymous, 2009. Bewerking vergistingsproducten en mestbewerking middels thermo-druk hydrolyse. Varkensfokbedrijf Oude Lenferink B.V., Fleringen.
- 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.
- Camacho P., S. Deleris, V. Geaugey, P. Ginestet en E. Paul, 2002. A comparative study between mechanical, thermal and oxidative disintegration techniques of waste activated sludge. *Water Science and Technology* 46 (10): 79-87.
- Carlsson, M., A. Lagerkvist en H. Ecke, 2008. Electroporation for enhanced methane yield from municipal solid waste. Proceedings of the 6th International conference ORBIT 2008 - Moving Organic Waste Recycling Towards Resource Management and Biobased Economy, 12-15 October, 2008, Wageningen, Nederland.
- Cimochowicz-Rybicka, M., B. Tal-Figiel en S.M. Rybicki, 2009. The effect of sonification parameters on methanogenic sludge activity. The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges, 8-10 August, 2009, Harbin, China.
- Danner, W., 2004. Cellulasen zur Steigerung der Biogasausbeute beim Einsatz von cellulose- und hemicellulosehaltigen Substraten wie Silomais und Gras – Ein Erfahrungsbericht. 3. Rottaler Biomasse Fachgespräch "Prozessbiologie in Biogasanlagen", Malgersdorf, Duitsland, 2 April 2004.
- Danner, W., 2007. 3-Stufen-Biogasanlage (Hydrolyse, Versauerung, Methanisierung) – Aufschluss wie bei einer Hochleistungskuh. 6. Rottaler Biomassefachgespräch Biomasse – Kostenfaktor Nr.1 in der Biogasanlage. Rottersdorf bei Landau, Duitsland, 30 maart 2007. Pp. 27-37.
- DiStefano, T. D. en A. Ambulkar, 2006. Methane production and solids destruction in an anaerobic solid waste reactor due to post-reactor caustic and heat treatment. *Water Science and Technology* 53 (8): 33-41.
- Dohanyos, M., J. Zabranska, P. Jenicek, J. Stepova, V. Kutil en J. Horejs, 2000. The intensification of sludge digestion by the disintegration of activated sludge and the thermal conditioning of digested sludge. *Water Science and Technology*, 42 (9): 57-64.
- Drake, S., B. Ormeci en J. Diak, 2009. Do enzymes work? Effect of enzymes on sludge dewaterability and anaerobic digestion. The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges 2009. 8-10 August, 2009, Harbin, China.
- Dunnebeil, A., G. Elbing, G. Engel, B. Heinzmann en C. Stieker, 2002. Thermal and Thermal/Chemical Disintegration of Sewage Sludge. In: *Enviro 2002 & IWA 3rd World Water Congress*, Melbourne, Australia. Paper e20886a.
- Gerhardt, M. en M. Bäuml, 2003. Biogasanlagen sind keine Müllkippen. *BIOGAS Journal* 6 (2): 32-33.
- Goel, R., T. Tokutomi and H. Yasui, 2002. Anaerobic Digestion Of Excess Activated Sludge With Ozone Pretreatment. *IWA World Water Congress 2002*, Melbourne, Australia. Paper nr. e21393a.

González-Fernández, C., C. León-Cofreces en P.A. García-Encina, 2008. Different pretreatments for increasing the anaerobic biodegradability in swine manure. *Bioresource Technology* 99 (18): 8710-8714.

Gruber, W., 2008. Zerrissene Zellstrukturen. *BIOGAS Journal* 11 (4): 34-39.

Gruning, H. en H. Orth, 1999. Disintegration of digested sludge and its influence on the residual gas production capacity. *TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering* 25. Thiem A., Neiss U. (ed) *Ultrasound in Environmental Engineering*, pp 233-234.

Hagelberg, M., B. Mathisen en A. Sandkvist, 1984. Increased rate of biogas production from piggery waste by heat treatment. *Proceedings of the conference Bioenergy* 84, 15-21 June, 1984, Goteborg, Sweden. Vol-III-Biomass-conversion, pp. 409-412.

Hartmann, H., I. Angelidaki en B.K. Ahring, 2000. Increase of anaerobic degradation of particulate organic matter in full-scale biogas plants by mechanical maceration. *Water Science and Technology* 41 (3): 145-153.

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, Denmark. Pp. 351-354.

Herzberg, W. en A. Houy, 2007. Schaumbekämpfung in Kläranlagen durch Ultraschall-Disintegration - Erfahrungsbericht der Kläranlage 25704 Meldorf mit dem UltraCracker. *Abwasserbeseitigung der Stadt Meldorf*, Deutschland.

Jensen, P., 2008. Hydrolysis and sanitation technology for biogas plants – A BioCircuit Technology. *Eurotec West A/S*, Denmark.

Jiang, J. Q., Q. L. Zhao, K. Wang, L.L. Wei, G. D. Zhang en J.N. Zhang, 2009. Effect of Ultrasonic and Alkaline Pretreatment on Sludge Degradation and Electricity Generation by Microbial Fuel Cell. *Harbin The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges*, 8-10 August, 2009, Harbin, China.

Jungersen, G. en B.K. Ahring, 1994. Anaerobic digestion of liquefied cow manure pretreated by catalytic liquefaction. *Water Science and Technology* 30 (12): 385-394.

Kaparaju, P.L.N. en J.A. Rintala, 2005. The effects of post-treatments and temperature on recovering the methane potential of >2 mm solid fraction of digested cow manure. *Environmental Technology* 26 (6): 625-631.

Kepp, U., I. Machenbach, N. Weisz en O.E. Solheim, 2000. Enhanced stabilisation of sewage sludge through thermal hydrolysis-three years of experience with full scale plant. *Water Science and Technology* 42 (9): 89-96.

Kim, D. H., E. Jeong en H.S. Shin, 2009. Synergetic Disintegration of Sewage Sludge by Combining Alkaline en Ultrasonic Pretreatment. *The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges*, 8-10 August, 2009, Harbin, China.

Kopplow, O., M. Barjenbruch en V. Heinz, 2000. Sludge pre-treatment with pulsed electric fields. *Water Science and Technology* 49 (10): 123-129.

Lee, Y.H., S.-M. Kim, S. Na, K.-H. So en J.-J. Nam, 2009. Effect of ultrasonic treatment on swine water solubilization. *Water Science and Technology* 59 (3): 603-608.

Lehne, G. en J. Muller, 1999. The influence of the energy consumption on the sewage sludge disintegration. *TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering* 25. Thiem A., Neiss U. (eds.) *Ultrasound in Environmental Engineering*. pp 215-215.

LNV, 2008. Convenant Schone en Zuinige Agrosectoren (versie 1.0). Ministerie van LNV. 10 juni 2008.

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.

Møller, H.B., S.G. Sommer en B.K. Ahring, 2004. Methane productivity of manure, straw and solid fractions of manure. *Biomass and Bioenergy* 26: 485-495.

Møller, H.B. en C.S. Raju, 2005. Pre-treatment of manure fibres can yield up to 60 per cent more biogas. *Bioenergy Research* 2 (9): 5-7.

Müller, J., 2000. Disintegration as a key step in sewage sludge treatment. *Water Science and Technology* 41 (8): 123-130.

Neis, U., 2000. Ultrasound in water, wastewater and sludge treatment. *Water21* (April): 36-39.

Neis, U., K. Nickel and A. Tiehm, 2000. Enhancement of anaerobic sludge digestion by ultrasonic disintegration. *Water Science and Technology* 42 (9): 73-80.

Neis, U., 2002. Steigerung der biogasproduktion durch ultraschallbehandlung. *BIOGAS Journal* 5 (1): 30-32.

Neis, U., 2004. Schlammdesintegration zur Intensivierung der Schlammbehandlung. 18. Karlsruher Flockungstage, Germany, 27-27 Oktober, 2004.

Nickel, K., 1999. Improving anaerobic degradation by ultrasonic disintegration of sewage sludge. *TU Hamburg-Harburg Reports on Sanitary Engineering* 25. Thiem A., Neiss U. (ed) *Ultrasound in Environmental Engineering*. (217-232). ISSN 0724-0783; ISBN 3-930400-23-5.

Odegaard, H., 2004. Sludge minimization technologies - an overview. *Water Science and Technology* 49 (10): 31-40.

Rabe, P., 2009. Untersuchungen zur Hydrolyse bei Biogasanlagen. Fachtagung Biogas 2008, Postdam, Duitsland, 23 oktober 2008.

Rinck, M., 2008. Schallwellen knacken Biomasse. *BIOGAS Journal* 11 (3): 28-30.

Rittmann, B.E., H.-S. Lee, H.Zhang, J. Alder, J.E. Banaszak en R. Lopez, 2008. Full-scale application of focused-pulsed pre-treatment for improving biosolids digestion and conversion to methane. *Water Science and Technology* 58 (10): 1895-1901.

Rulkens, W.H., L. van Dijk, B.G. Temmink en A.W.A. de Man, 2009. Innovative sludge treatment scenarios to optimize energy, phosphate and ammonia recovery. The 12th IWA-Sludge Conference--- Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges, 8-10 August, 2009, Harbin, China.

Skøtt, T., 2009. Biogasanlæg: Markant større gasproduktion med hydrolyse. *Nyhedsbrev om Forskning i Bioenergi* 2: 2-3.

Stam, B., 2004. Ultrasoongeluid breekt rioolslib af. *Technisch Weekblad*. 9 juli 2004.

Stephenson, R., 2002. Homogeniser delivers digester efficiency. *Water21*, December 2002, 26-28.

Timmerman, M., J.B. van de Fels en H.J.C. van Dooren, 2009a. Knelpunten covergisting. *Animal Sciences Group, Lelystad. Rapport*.

Timmerman, M., J.W. van Riel, I. Bisschops en M. van Eekert, 2009b. Optimaliseren van mestvergisting. *Animal Sciences Group, Lelystad. Rapport* 243.

Weemaes, M., Grootaerd, H., Simoens, F., A. Huysmans and W. Verstraete, 2000. Ozonation of sewage sludge prior to anaerobic digestion. *Water Science and Technology* 42 (9): 175–178.

Zabranska, J., P. Jenicek, J. Kutil en M. Dohanyos, 2009. Intensification of Anaerobic Digestion towards the Energy Self-Sufficiency of Large Municipal Wastewater Treatment. The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges, 8-10 August, 2009, Harbin, China.

Zhang, G., P. Zhang, X. Kang en F. Gao, 2009. Ultrasonic lysis of biological sludge: a three-stage process. Harbin The 12th IWA-Sludge Conference---Sustainable Management of Water & Wastewater Sludges, August 8-10, 2009, Harbin, China.