

# Animal Sciences Group

Divisie Veehouderij, kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 94

## Praktijkproef covergisting van varkensmest

In opdracht van en gefinancierd door het Productschap Vee en Vlees en mede mogelijk gemaakt door ondersteuning van het programma DEN, dat wordt uitgevoerd door SenterNovem

December 2007



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](mailto: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 onderstrept 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 a study the biogas yield, composition of the biogas, emissions of the CHP, the composition of the digestate and practical management of codigestion of five coproducts with pig manure were determined in a full-scale biogas plant.

## Keywords

Codigestion, coproducts, digestion, biogas, digestate

## Referaat

ISSN 1570 - 8616

## Auteurs

M. Timmerman, P. Claessen en G. André

## Titel

Praktijkproef covergisting van varkensmest (2007)  
Rapport 94 94

## Samenvatting

In een praktijkproef zijn de biogasopbrengsten bepaald, de samenstelling van het biogas, de emissies van de WKK, de samenstelling van het digestaat en de praktische bedrijfsvoering bij covergisting van vijf coproducten met varkensmest.

## Trefwoorden:

Covergisting, coproducten, vergisting, biogas, digestaat



ANIMAL SCIENCES GROUP  
WAGENINGEN UR

Rapport 94

# Praktijkproef covergisting van varkensmest

M. Timmerman

P. Claessen

G. André

December 2007

## Samenvatting

In opdracht van en gefinancierd door het Productschap Vee en Vlees en met ondersteuning van het programma DEN, dat wordt uitgevoerd door SenterNovem is een praktijkproef uitgevoerd naar covergisting van nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie met varkensmest.

Mestvergisting is een proces waarbij micro-organismen organische stof uit dierlijke mest omzetten in biogas. Het gevormde biogas dient als brandstof voor een warmtekrachtkoppelinginstallatie (WKK) waarmee elektriciteit en warmte worden geproduceerd. De terugverdientijd van een vergistinginstallatie voor mest is voor de meeste veehouderijbedrijven te lang. Het economisch rendement van een vergistinginstallatie kan worden verbeterd door het toevoegen van coproducten. Deze coproducten kunnen afkomstig zijn van energieteelten, organische reststromen of als nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie. Mestvergisting en covergisting bieden de mogelijkheid om milieuwinst te halen door opwekking van duurzame energie, vermindering van broeikasgasemissie, vermindering van het kunstmestgebruik en recycling van organische reststromen en nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie.

De doelstelling van de uitgevoerde praktijkproef was het bepalen van de biogasopbrengst van vijf coproducten, de samenstelling van het biogas, de emissies van de WKK, de samenstelling van het digestaat en de praktische bedrijfsvoering bij covergisting. De praktijkproef is uitgevoerd met de vergistinginstallatie van Praktijkcentrum Sterksel. De volgende vijf coproducten zijn in het onderzoek gebruikt: Beukergist, aardappelzetmeel, Kwalizuivel, maïsweekwater en rodekoolconcentraat. De coproducten maakten op volumebasis 10-16% van het rantsoen uit dat aan de bacteriën werd gevoerd. Het overige deel bestond uit vleesvarkensmest. Er werd mesofiel vergist bij een temperatuur van circa 37 °C. Met behulp van een tijdreeksanalyse van de dataset met meetgegevens is via Dynamische Lineaire Modelling (DLM) de gemiddelde gasproductie berekend gedurende een volledige periode van covergisting.

De volgende specifieke methaanopbrengsten werden gerealiseerd bij covergisting met vleesvarkensmest: Beukergist 0,46 Nm<sup>3</sup>/kg os (=60 Nm<sup>3</sup> methaan/ton), aardappelzetmeelslib 0,34 Nm<sup>3</sup>/kg os (=91 Nm<sup>3</sup> methaan/ton), Kwalizuivel 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg os (=55 Nm<sup>3</sup> methaan/ton), maïsweekwater 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg os (=103 Nm<sup>3</sup> methaan/ton) en rodekoolconcentraat 0,38 Nm<sup>3</sup>/kg os (=122 Nm<sup>3</sup> methaan/ton). Bij covergisting van Kwalizuivel met vleesvarkensmest bleef het methaangehalte in het biogas constant rond de 55%, maar bij de overige coproducten daalde het methaangehalte naar rond de 50%. Daarnaast leidde covergisting van Beukergist en maïsweekwater tot een hogere zwavelwaterstofgehalte in het biogas.

Het financieel rendement van covergisting wordt in sterke mate bepaald door de kosten voor aankoop van de coproducten, samenstelling en biogasproductie van de coproducten, rendement van de WKK-installatie en afzetkosten van het digestaat. Te hoge kosten voor aankoop en afzet van het digestaat in combinatie met een slecht rendement van de WKK-installatie leiden tot een verliesgevende biogasinstallatie. Bij coproducten met een hoog drogestofgehalte is de invloed van de aankoopprijs en afzetkosten van het digestaat geringer dan bij coproducten met een laag drogestofgehalte.

Het effect van covergisting op de broeikasgasemissie van een biogasinstallatie op een varkensbedrijf is niet zonder meer eenduidig vast te stellen gezien de vele (onzekere) invloedsfactoren, uitgangspunten en aannames die meespelen.

## Summary

In order of and financed by the Product Board for Livestock and Meat and with the aid of the program DEN, which is carried out by SenterNovem, a study was conducted into codigestion of byproducts from the human food industry with pig manure.

Manure digestion is a process where micro-organisms convert organic matter in animal manure into biogas. The biogas serves as a fuel for a combined heat and power plant (CHP) which produces electricity and heat. The payback time of a manure digestion plant is for most animal farms in the Netherlands too long. The economic return of a digestion plant can be improved by adding co-products. The co-products can come from energy crops, organic waste streams or by-products from the human food industry. Manure digestion and co-digestion offer the possibility for environmental gains by producing sustainable energy, reduction of greenhouse gases, reduction of artificial fertilizer use and recycling of organic waste streams and by-products from the human food industry.

The objective of this study was to determine the methane yields under practical circumstances of five co-products, quality of the biogas, emission of the CHP, composition of the digestate and gain practical experiences with co-digestion for knowledge transfer to farmers. The study has been carried out with the full-scale biogas plant at the Centre for Innovative Pig Farming in Sterksel, The Netherlands. The following by-products from the human food processing industry were used in the research: wheat yeast concentrate, potato feed starch, a mix of rejected dairy products, maize solubles and a red cabbage concentrate. On a volume basis the co-products made 10-16% out of the input for the biogas plant. The rest of the input was slurry from finisher pigs. Mesophilic digestion took place at a temperature of 37 °C. The average gas yields were determined with Dynamic Linear Modelling (DLM) on the basis of the time series analyses of the dataset with measurements.

The following specific methane yields were realised during co-digestion with pig manure: wheat yeast concentrate 0,46 Nm<sup>3</sup>/kg VS (=60 Nm<sup>3</sup> methane/tonne), potato feed starch 0,34 Nm<sup>3</sup>/kg VS (=91 Nm<sup>3</sup> methane/tonne), rejected dairy products 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg VS (=55 Nm<sup>3</sup> methane/tonne), maize solubles 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg VS (=103 Nm<sup>3</sup> methane/tonne) and red cabbage concentrate 0,38 Nm<sup>3</sup>/kg VS (=122 Nm<sup>3</sup> methane/tonne). During co-digestion of the rejected dairy products the methane content of the biogas remained fairly constant around 55%, but with the other co-products the methane content dropped to around 50%. Furthermore co-digestion of the wheat yeast concentrate and maize solubles led to higher hydrogen sulphide concentrations in the biogas.

The economic return of co-digestion is strongly influenced by the purchase costs of the co-products, composition and gas yield of the co-products, efficiency of the CHP and disposal cost of the digestate. Too high costs for purchase and disposal of the digestate in combination with a poor efficiency of the CHP lead to a non-profitable biogas plant. The influence of the purchase cost and disposal cost is less for co-products with a high dry matter content than for co-products with a low dry matter content.

The effect of co-digestion on the emission of greenhouse gases of a biogas plant at a pig farm is difficult to determine because of the many (uncertain) influence factors, starting-points and assumptions that play a role.

# Inhoudsopgave

Voorwoord

Samenvatting

Summary

<b>1</b>	<b>Inleiding</b> .....	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Materiaal en Methode</b> .....	<b>2</b>
2.1	Vergistinginstallatie .....	2
2.2	Opslag, toe- en afvoer van mest en coproducten .....	2
2.3	Methoden .....	3
2.4	Berekening gasproductie .....	4
<b>3</b>	<b>Resultaten</b> .....	<b>5</b>
3.1	Samenstelling vleesvarkensmest .....	5
3.2	Samenstelling coproducten .....	6
3.3	Samenstelling digestaat .....	8
3.4	Methaanopbrengsten en samenstelling biogas .....	9
3.5	WKK-installatie .....	9
3.6	Praktische bedrijfsvoering .....	10
<b>4</b>	<b>Economische evaluatie</b> .....	<b>11</b>
4.1	Opbrengsten coproducten .....	11
4.2	Directe kosten coproducten .....	12
<b>5</b>	<b>Broeikasgasemissie</b> .....	<b>16</b>
5.1	Overzicht broeikasgasemissie in Nederland .....	16
5.2	Effect van covergisting op broeikasgasemissies .....	17
<b>6</b>	<b>Discussie</b> .....	<b>19</b>
<b>7</b>	<b>Conclusies en aanbevelingen</b> .....	<b>21</b>
7.1	Conclusies .....	21
7.2	Aanbevelingen .....	21
<b>Bijlagen</b>	.....	<b>22</b>
Bijlage 1	Gehalten aan zware metalen (in mg/kg) op productbasis van de eerste twee proeven .....	22
Bijlage 2	Samenstellingseisen volgens BOOM .....	23
Bijlage 3	Meetresultaten van de CO <sub>2</sub> , H <sub>2</sub> S- en NH <sub>3</sub> -concentratie in het biogas .....	24
Bijlage 4	Gebruikte afkortingen .....	26
<b>Literatuur</b>	.....	<b>27</b>

## 1 Inleiding

In opdracht van en gefinancierd door het Productschap Vee en Vlees en met ondersteuning van het programma DEN, dat wordt uitgevoerd door SenterNovem is een praktijkproef uitgevoerd naar covergisting van nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie met varkensmest.

### Achtergrond

Mestvergisting is een proces waarbij micro-organismen organische stof uit dierlijke mest omzetten in biogas. Het gevormde biogas dient als brandstof voor een warmtekrachtkoppelinginstallatie (WKK) waarmee elektriciteit en warmte wordt geproduceerd. De hoeveelheid mineralen in de mest verandert niet door het vergistingproces, maar vergiste mest heeft wel een betere stikstofverwerking. Hierdoor kan op de aanvullende kunstmestgift worden bespaard (De Boer, 2004). Verder neemt door het vergistingproces de emissie van broeikasgassen en geur af en worden in het proces onkruidzaden en ziektekiemen gedood (Schrade et al., 2003; Timmerman, 2004; Timmerman et al., 2005).

De terugverdientijd van de huidige vergistinginstallaties voor mest is voor de meeste veehouderijbedrijven te lang. Voor een bredere toepassing van mestvergisting in Nederland zal het economisch rendement van een vergistinginstallatie moeten verbeteren. Het rendement van een vergistinginstallatie kan verbeterd worden door het toevoegen van coproducten, zoals in Duitsland en Denemarken zeer gebruikelijk is. Hierdoor wordt een betere verhouding verkregen tussen micro-organismen (uit mest) en organische stof (uit coproducten), waardoor de biogasopbrengst aanzienlijk hoger is dan bij het alleen vergisten van mest. Aangezien het digestaat geheel als dierlijke meststof wordt gezien, neemt door covergisting het af te zetten mestvolume en mineralen wel toe. Maar door de hogere biogasopbrengst neemt de energieproductie toe, waardoor het rendement van de biogasinstallatie verbetert. De coproducten kunnen onder andere afkomstig zijn van energieteelten, organische reststromen (oogstresten, natuurgras, etc.) of als nevenproduct uit de levensmiddelenindustrie.

Mestvergisting en covergisting bieden dus de mogelijkheid om milieuwinst te halen door opwekking van duurzame energie, vermindering van broeikasgasemissie, vermindering van het kunstmestgebruik en recycling van organische reststromen en nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie. Echter in Nederland mogen meststoffen alleen vervoerd of verkocht worden als ze op de Lijst van meststoffen voorkomen van het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit, maar tot begin 2004 kwam covergiste mest (digestaat) niet voor op de Lijst van Meststoffen wat een belemmering vormde voor de realisatie van vergistinginstallaties op boerderijniveau. Om deze belemmering weg te nemen heeft de Minister van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit covergiste mest opgenomen in de Lijst van meststoffen. Hierin is een lijst (de zogenaamde Positieve Lijst) opgenomen van een beperkt aantal producten die samen met mest vergist kunnen worden en waarbij het digestaat onder de definitie van covergiste mest valt en dus als meststof afgezet kan worden (LNV, 2004). Via het aanmelden van producten bij het Ministerie van Landbouw, Natuur en Voedselkwaliteit en het doorlopen van een beoordelingsprocedure, wordt na een positieve beoordeling het product opgenomen in de Positieve Lijst en kan het als coproduct worden gebruikt in een vergistinginstallatie. Bij het verlenen van de milieuvergunning voor een vergistinginstallatie op boerderijniveau wordt over het algemeen door gemeenten de Positieve Lijst gehanteerd als criterium voor de coproducten die men kan vergisten en waarbij het covergisten als agrarische activiteit wordt gezien. Een Positieve Lijst met veel producten erop is een stimulans voor een bredere toepassing van mestvergisting. Het uitvoeren van proeven op praktijkschaal levert dus informatie op t.b.v. de beoordelingsprocedure voor toelating van coproducten op de Positieve Lijst, kennis op voor de praktijk over haalbare resultaten onder praktijkomstandigheden, ervaringen met covergisting en management aspecten van covergisting.

### Doelstelling

Het bepalen van de biogasopbrengst, de samenstelling van het biogas, de emissies van de WKK, de samenstelling van het digestaat en de praktische bedrijfsvoering bij covergisting van vijf verschillende coproducten met varkensmest.

### Afbakening

Vanwege de duur van de proeven is er niet gevarieerd met het percentage coproduct dat werd toegevoegd aan de mest. De beperkende factor voor het percentage coproduct dat toegevoegd kon worden was de WKK. De WKK kon maar een bepalende hoeveelheid biogas per dag verwerken om 24 uur per dag te draaien en te veel geproduceerd biogas zou via de overdrukbeveiliging naar de buitenlucht zijn afgevoerd. De vergistinginstallatie op Praktijkcentrum Sterksel kon gedurende het onderzoek alleen vloeibare coproducten verwerken en daarom zijn in het onderzoek geen vaste coproducten meegenomen.

## 2 Materiaal en Methode

Het onderzoek is uitgevoerd met de vergistinginstallatie van Praktijkcentrum Sterksel.

### 2.1 Vergistinginstallatie

De vergistinginstallatie bestond uit een vergistingsilo en een warmtekrachtkoppelinginstallatie (WKK). De vergister had een bruto inhoud van 620 m<sup>3</sup> (h=4,24 m en d=13,64 m). De wand van de vergister was aan de binnenzijde geïsoleerd en afgewerkt met een mestbestendige coating. De vergister werd op een temperatuur van circa 37 °C gehouden door een 48 kWh interne, van een speciaal kunststof coating voorziene, metalen warmtewisselaar. In de wand van de vergister zat een kijkglas voor controle op schuimvorming en drijfslagen in de vergister. De mest in de vergister werd elke drie uur gedurende 15 minuten gemixt met een 11 kW dompelmixer.

Het gevormde biogas werd opgevangen onder een rubberen gasmembraan met een capaciteit van circa 120 m<sup>3</sup>. Ontzwaveling van het biogas vond plaats door het inblazen van een kleine hoeveelheid lucht in de gasopslag zodat zwavelminnende bacteriën het zwavelwaterstof om konden zetten naar zwavel. De hoeveelheid lucht werd ingesteld aan de hand van de gemeten hoeveelheid zwavelwaterstof in het biogas. Via een overdruk- en onderdrukbeveiliging werd voorkomen dat de druk onder het gasmembraan te ver opliep of te veel vacuüm werd gezogen. Het gevormde biogas werd via een ondergrondse gasleiding en een condensput naar de WKK geleid. In de gasleiding zat een methaanmeter en een elektronische gasdoorstroommeter.

Het biogas werd verbrand in een asynchrone warmtekrachtkoppelinginstallatie. De WKK bestond uit een gasmotor en een generator. De gasmotor was een zelfaanzuigende 4-cilinder MAN gasmotor met een gasverbruik van circa 20 m<sup>3</sup> per uur (afhankelijk van het methaangehalte). De WKK had een asvermogen van 47 kW, een elektrisch vermogen van 37 kWe, warmteterugwinning via het motorblok van 39 kWth en via rookgaskoeling van 23 kWth. Via een platenwisselaar werd de warmte overgedragen naar het verwarmingcircuit van de vergister of naar de stallen of naar de noodkoeler. De gasmotor startte automatisch op na een vaste ingestelde wachtperiode en/of als de gasdruk in de gasleiding een ingestelde maximumwaarde overschreed.

### 2.2 Opslag, toe- en afvoer van mest en coproducten

Vanuit de vleesvarkensstallen werd dagelijks een vaste hoeveelheid mest via rioleringsystemen afgevoerd naar een opvangput van circa 10 m<sup>3</sup> achter de stallen. Vanuit deze opvangput werd de mest rechtstreeks naar de vergister gepompt m.b.v. een versnijdende centrifugaalpomp. Een doorstroommeter in de aanvoerleiding registreerde de hoeveelheid mest die naar de vergister werd gepompt.

De vloeibare coproducten werden vanuit de vrachtwagen gelost in een polyester opslagsilo van circa 50 m<sup>3</sup>. De opslagsilo was voorzien van een roerwerk (4,0 kW) om uitzakken van het coproduct in de silo te voorkomen. De mixfrequentie van de coproducten in de opslagsilo werd ingesteld volgens het advies van de leverancier van het coproduct. Vanuit de opslagsilo werd dagelijks een vaste hoeveelheid coproduct via een apart invoerpunt boven in de vergister rechtstreeks naar de vergistinginstallatie gepompt. Via de doorstroommeter in de aanvoerleiding werd geregistreerd hoeveel coproduct naar de vergister werd gepompt.

De inhoud van de vergistingstank werd op een constant niveau gehouden d.m.v. een niveaumeting. De niveaumeting vond plaats m.b.v. een druksensor in de overloop. Als de druk boven een bepaald niveau uitkwam dan werd de afvoerpomp ingeschakeld. De afvoerpomp draaide dan een vast ingesteld aantal minuten en voerde de (co)vergiste mest af naar een mestzak. Een vlotter in de vergistingstank voorkwam dat het niveau in de tank te ver kon dalen. Indien het niveau in de vergistingstank te ver daalde doordat te veel mest wordt weggepompt dan schakelde de vlotter de afvoerpomp uit.



### 2.3 Methoden

Gedurende het gehele onderzoek werd dagelijks gestreefd om een vaste hoeveelheid van circa 9,0 m<sup>3</sup> (mest + coproduct) naar de vergister te pompen en om zo een vast mestniveau in de vergistingstank te handhaven. Hierdoor werd gedurende het hele onderzoek een zo constant mogelijke verblijftijd in de vergister van circa 60 dagen gerealiseerd. In de perioden dat geen coproduct werd toegediend werd dagelijks circa 9,0 m<sup>3</sup> mest naar de vergister gepompt wat overeenkwam met de dagelijkse mestproductie van de aanwezige vleesvarkens. In de perioden dat wel een coproduct werd toegevoegd werd dagelijks 9,0 m<sup>3</sup> min de toegediende hoeveelheid coproduct aan mest naar de vergister gepompt. De hoeveelheid coproduct die werd toegevoegd is bepaald op basis van de berekende biogasopbrengst uit de voederwaardegegevens van het product (Keymer en Schilcher, 1999) en het gewenste aantal van circa 22 draaiuren per dag van de WKK om zo eventuele schommelingen in gasproductie te kunnen opvangen. Gedurende het onderzoek is alleen mest van vleesvarkens vergist, aangezien bij toevoer van zeugenmest geen goede en regelmatige toevoer van mest kon worden verkregen (Timmerman et al., 2005) en daardoor zou ook het aandeel coproduct omlaag zijn gegaan. De aanwezige vleesvarkens kregen brijvoer of droogvoer verstrekt. Deze twee voersoorten leiden tot mestsoorten die o.a. verschillen in het gehalte aan drogestof. Deze twee mestsoorten werden op Praktijkcentrum Sterksel ongeveer in de verhouding van 4 op 1 geproduceerd. Vanuit praktisch oogpunt werd daarom 4 dagen achtereen brijvoermest naar de vergister gepompt en dan 1 dag droogvoermest. De mest werd dagelijks in de ochtend naar de vergister gepompt. De hoeveelheid coproduct werd dagelijks in acht gelijke porties naar de vergister gepompt op dezelfde tijdstippen als er gemixt werd. Elk coproduct werd gedurende 9 weken covergist met vleesvarkensmest, waarbij in de eerste 2 weken de hoeveelheid werd opgebouwd naar de maximale hoeveelheid. Na afloop van elke periode dat een coproduct was toegevoegd werd de opslagsilo voor de coproducten goed gereinigd.

De volgende vijf coproducten zijn in het onderzoek meegenomen: Beukergist (BG), aardappelzetmeelslib (AZS), Kwalizuivel (KZ), maisweekwater (MWW) en rodekoolconcentraat (RKC). Beukergist is een product dat vrijkomt bij de winning van alcohol uit vloeibaar tarwezetmeel. Aardappelzetmeelslib is een product dat wordt gewonnen uit het proceswater van een aardappelverwerkende fabriek. Kwalizuivel is een mix van diverse afgekeurde zuivelproducten van een zuivelverwerkende fabriek. De reden van afkeur is het bereiken van de houdbaarheidsdatum of een productiefout. Het gehele assortiment (drinkyoghurt, chocomel, vla enz.) kan in de Kwalizuivel terechtkomen en daarom is het ingangsmateriaal van dit coproduct wisselend. Maisweekwater is een product wat vrijkomt bij de winning van zetmeel uit korrelmaïs. Rodekoolconcentraat is een product wat vrijkomt bij de winning van kleurstoffen uit rode kool.

Wekelijks werden alle ingaande stromen (droogvoermest, brijvoermest en coproduct) bemonsterd. Het digestaat werd tijdens de periode van covergisting in de weken 3, 6 en 9 bemonsterd. Direct na monsternamen werden de monsters in een vrieskist opgeslagen. De monsters van varkensmest die zijn genomen van de periode waarin alleen vleesvarkensmest is vergist zijn geanalyseerd door het milieulaboratorium Blgg Oosterbeek. Het milieulaboratorium van Agrotechnology and Food Sciences Group (AFSG) heeft de genomen monsters van de proeven met coproducten geanalyseerd. De monsters van de ingaande mestsoorten werden voorafgaand aan de analyse eerst in de verhouding van 4:1 (brijvoer : droogvoer) gemengd tijdens de eerste drie proeven en in de verhouding van 2:1 gemengd tijdens de laatste twee proeven omdat het aantal vleesvarkens op droogvoer was toegenomen. Van de periode met covergisting werden vervolgens van de ingaande monsters (mest en coproduct) mengmonsters per 3 weken gemaakt voor analyse. Deze monsters werden samen met de genomen monsters van het digestaat geanalyseerd op de volgende kenmerken: drogestof, organische stof, droge stof rest, stikstof, ammonium stikstof, fosfaat, kalium, magnesium, vluchtige vetzuren (VVZ), chemisch zuurstofverbruik (CVZ), C/N-verhouding, zuurgraad (pH), dichtheid en zware metalen. De droge stof rest is een maat voor de deeltjesgrootte in een product en is bepaald door circa 90 gram product te zeven over een zeef met maasgrootte van 0,5 mm. Van de zeefrest is vervolgens het drogestofgehalte bepaald. De C/N-verhouding is berekend volgens de formule 0,4 maal het organische stof gehalte gedeeld door het stikstofgehalte. Bij de proeven met Beukergist en aardappelzetmeelslib zijn de gehalten aan zware metalen door het laboratorium in het verse materiaal (in mg/kg) bepaald en bij Kwalizuivel en maisweekwater in de drogestof (in mg/kg ds).

Het biogas werd bemonsterd op koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), zwavelwaterstof (H<sub>2</sub>S) en ammoniak (NH<sub>3</sub>) m.b.v. Kitigawa buisjes. Het methaangehalte (CH<sub>4</sub>) werd online gemeten. De uitlaatgassen zijn twee keer gedurende het onderzoek geanalyseerd op NO<sub>x</sub>, CO en H<sub>2</sub> door de servicedienst van de gasmotor leverancier.

## 2.4 Berekening gasproductie

Met behulp van een tijdreeksanalyse van de dataset met meetgegevens is via Dynamische Lineaire Modelling (DLM) (West en Harrison, 1999) de gemiddelde gasproductie berekend gedurende een volledige periode van covergisting.

Het toegepaste model is een constant dynamisch model:

$$Y_t = \mu_t + \beta_{1t}X_t + \beta_{2t}X_t^2 + \sum_{j=1..5} \gamma_j C_{jt} / H_j + \varepsilon_t$$

met:

$Y_t$  is de waargenomen methaanproductie op dag t

$X_t$  is de hoeveelheid toegevoerde mest op dag t (is gemiddelde van dag t en t-1 minus 9 m<sup>3</sup>)

$C_{jt}$  is de hoeveelheid coproduct j toegevoegd op dag t

$H_j$  is de (nagestreefde/gewenste) hoeveelheid coproduct j

$\beta_{1t}, \beta_{2t}$  zijn de coëfficiënten voor het lineaire en kwadratische effect van hoeveelheid mest

$\gamma_j$  is het effect van hoeveelheid  $H_j$  coproduct j

$\varepsilon_t \sim N(0, \sigma_t^2)$  de waarnemingsvariantie

In dit model is het niveau naar *verwachting* wel constant in de tijd, maar is er stochastische (systeem)variatie:

$$\mu_t = \mu_{t-1} + \partial\mu_t$$

$$\beta_{1t} = \beta_{1t-1} + \partial\beta_{1t}$$

$$\beta_{2t} = \beta_{2t-1} + \partial\beta_{2t}$$

met:

$$\begin{pmatrix} \partial\mu \\ \partial\beta_1 \\ \partial\beta_2 \end{pmatrix}_t \sim N(0, W_t) \text{ de systeemvariantie.}$$

In deze analyse zijn de basisproductie van methaan en het effect van het coproduct beide afzonderlijk geschat. De geschatte basis methaanproductie per dag is de hoeveelheid methaan die geproduceerd is bij vergisting van 9 m<sup>3</sup> vleesvarkensmest per dag zonder toevoeging van een coproduct. Het effect van het coproduct op de methaanproductie is vervolgens omgerekend naar de methaanproductie in m<sup>3</sup> per toegevoegde kilogram organische stof. Voor de omrekening van de gasproductie naar standaardvolumes is de volgende formule gebruikt:

$$V_N = \frac{V_G \cdot P_L \cdot 0,269}{273 + T_G}$$

waarin:

$V_N$  is het standaardvolume in Nm<sup>3</sup> (P = 1.013 hPa en T = 0 °C),

$V_G$  is het gemeten gasvolume in m<sup>3</sup>,

$P_L$  is de luchtdruk min onderdruk in de gasstraat in hPa,

$T_G$  is de temperatuur van het biogas in de gasstraat in °C.

De temperatuur en de onderdruk in de gasstraat zijn niet gemeten tijdens de proef. Voor de temperatuur in de gasstraat is 25 °C aangehouden op basis van twee handmatige metingen in de gasleiding na de condensput, terwijl voor de onderdruk 13 hPa is aangehouden vanwege de zelfaanzuigende gasmotor.

### 3 Resultaten

Voorafgaand aan de proeven met de verschillende coproducten is een periode alleen vleesvarkensmest vergist.

#### 3.1 Samenstelling vleesvarkensmest

In het onderzoek is alleen gebruik gemaakt van vleesvarkensmest wat afkomstig was van varkens gevoerd met brijvoer en droogvoer. De gemiddelde samenstelling van de ingaande vleesvarkensmest voorafgaand en tijdens het onderzoek staan in tabel 1 weergegeven.

**Tabel 1** Gemiddelde samenstelling (in g/kg) en pH-waarde (-) van de vleesvarkensmest voorafgaand aan het onderzoek en tijdens de perioden van covergisting met de verschillende coproducten

Parameter	Covergistingsproef					
	0. Geen	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Drogestof	71	74	81	71	74	53
Organische stof	54	57	63	55	56	39
Organische stof (% van ds)	77%	77%	78%	78%	76%	74%
Drogestof rest > 0,5 mm	n.b.	21,7	23,5	18,5	21,0	11,2
Stikstof	5,99	5,89	6,56	5,73	6,56	5,33
Ammonium stikstof	3,67	3,64	4,19	3,71	4,27	3,62
Ammonium stikstof (% van N)	61%	62%	64%	65%	65%	68%
Fosfaat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	2,87	2,94	2,95	2,78	3,02	2,10
Kalium (K)	3,75	3,76	4,04	3,46	4,02	3,33
Magnesium (Mg)	0,86	0,09	0,08	0,87	1,26	0,58
Vluchtige vetzuren (VVZ)	n.b.	13,8	15,9	17,9	19,5	11,5
Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	n.b.	98	97	91	101	69
pH-waarde	7,6	7,4	7,2	7,0	7,2	7,2
C/N-verhouding	n.b.	3,9	3,8	3,9	3,4	3,0
Dichtheid (g/l)	n.b.	1,035	1,037	1,029	1,020	1,030

n.b. = niet bepaald

De mestsamenstelling was gedurende de gehele periode redelijk constant. Variatie in de mestsamenstelling werd onder andere veroorzaakt door het soort voer, hoeveelheid schoonmaakwater, groeistadium van de varkens en het aantal vleesvarkens dat gevoerd werd met brijvoer dan wel droogvoer.

Voorafgaand aan het onderzoek zijn monsters genomen van mest afkomstig van vleesvarkens op brijvoer en droogvoer en door Blgg Oosterbeek geanalyseerd op de gehalten aan zware metalen i.v.m. het verkrijgen van een bijzondere ontheffing voor het afvoeren van het digestaat uit de covergistingsproeven als meststof, omdat deze producten bij aanvang van het onderzoek niet op de Positieve Lijst stonden. In tabel 2 staan de analysesresultaten weergegeven.

**Tabel 2** Analysesresultaten van het drogestofgehalte (in g/kg) en de gehalten aan zware metalen (in mg/kg ds) in vleesvarkensmest voorafgaand aan het onderzoek

	DS	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Vlv-mest: droogvoer 1	89	<0,02	0,8	24	<0,01	1,0	<0,4	72	<0,05
Vlv-mest: droogvoer 2	152	<0,02	1,5	27	<0,01	1,2	0,5	128	<0,05
Vlv-mest: droogvoer 3	155	<0,02	1,5	40	<0,01	1,3	0,6	127	0,10
Vlv-mest: brijvoer 1	104	0,10	0,8	18	<0,01	0,6	<0,4	107	<0,05
Vlv-mest: brijvoer 2	60	<0,02	0,7	14	<0,01	0,5	<0,4	67	<0,05
Vlv-mest: brijvoer 3	52	<0,02	0,4	10	<0,01	0,4	<0,4	58	<0,05

Door het milieulaboratorium AFSG zijn van de monsters vleesvarkensmest van de eerste twee covergistingsproeven de gehalten aan zware metalen in het verse product bepaald en van de laatste drie covergistingsproeven in de drogestof. In tabel 3 staan de gemeten gehalten aan zware metalen in de varkensmest weergegeven, waarbij de gehalten voor de eerste twee series zijn omgerekend van gehalten op

productbasis naar gehalten in de drogestof indien het gehalte boven de detectiegrens lag. In bijlage 1 staan de gehalten op productbasis weergegeven van de vleesvarkensmest in de eerste twee proeven.

**Tabel 3** Gehalten aan zware metalen (in mg/kg ds) in de monsters vleesvarkensmest tijdens het onderzoek

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
1. BG – wkn 1-3	- <sup>*)</sup>	7	168	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	3	942	- <sup>*)</sup>
1. BG – wkn 4-6	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	191	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	907	- <sup>*)</sup>
1. BG – wkn 7-9	- <sup>*)</sup>	8	195	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	2	860	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 1-3	- <sup>*)</sup>	7	197	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	3	862	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 4-6	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	244	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	2	697	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 7-9	- <sup>*)</sup>	7	160	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	2	798	- <sup>*)</sup>
3. KZ – wkn 1-3	< 0,2	< 2	160	< 0,1	< 2	< 2	1100	< 0,5
3. KZ – wkn 4-6	< 0,2	< 2	173	< 0,1	< 2	< 2	1100	< 0,5
3. KZ – wkn 7-9	< 0,2	< 2	200	< 0,1	< 2	< 2	1100	< 0,5
4. MWW – wkn 1-3	< 0,2	3	170	< 0,1	6	< 2	1200	< 1,0
4. MWW – wkn 4-6	< 0,2	4	230	0,1	7	< 2	1000	0,8
4. MWW – wkn 7-9	< 0,2	6	270	< 0,1	7	< 2	1000	1,0
5. RKC – wkn 1-3	< 0,1	2	330	< 0,1	7	< 2	890	< 2
5. RKC – wkn 4-6	< 0,1	2	192	< 0,1	6	< 2	950	< 2
5. RKC – wkn 7-9	< 0,1	3	280	< 0,1	7	< 2	840	< 2

<sup>\*)</sup> Gehalte in het verse product onder de detectiegrens

De gemiddelde gehalten aan koper en zink in de monsters van de vijf proeven bedragen:

- kopergehalte = 211 mg/kg ds (standaarddeviatie = 50 mg/kg ds),
- zinkgehalte = 950 mg/kg ds (standaarddeviatie = 135 mg/kg ds).

Op een enkel monster na lagen de gehalten aan cadmium, kwik en arseen onder de detectiegrens. Voor nikkel lagen alleen de monsters genomen in de vierde proef boven de detectiegrens, terwijl de overige monsters onder de detectiegrens lagen. Onduidelijk is wat hier de oorzaak van kan zijn. De gehalten aan chroom en lood liggen onder of iets boven de detectiegrens. Een opmerkelijk verschijnsel bij de uitslagen is dat tussen verschillende proeven er bij de analyses verschillende detectiegrenzen werden gehanteerd. Onduidelijk is wat hier de oorzaak is van geweest. Een ander opmerkelijk verschijnsel is het grote verschil tussen de gehalten aan zware metalen in de varkensmest bepaald door Blgg en het milieulab AFSG. Navraag leverde geen duidelijke oorzaak op waarmee dit grote verschil kon worden verklaard.

### 3.2 Samenstelling coproducten

De gemiddelde samenstelling van de gebruikte coproducten in het onderzoek staan in tabel 4 weergegeven.

**Tabel 4** Gemiddelde samenstelling (in g/kg) en pH-waarde (-) van de gebruikte coproducten

Parameter	Coproduct				
	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Drogestof	166	286	141	373	356
Organische stof	134	269	136	261	324
Organische stof (% van ds)	81%	94%	97%	70%	91%
Drogestof rest > 0,5 mm	0,1	32,7	1,0	3,9	< 0,1
Stikstof	6,72	3,29	2,76	17,82	9,56
Ammonium stikstof	0,22	0,12	0,00	0,50	1,01
Ammonium stikstof (% van N)	3%	4%	0%	3%	11%
Fosfaat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	3,80	1,08	1,11	22,48	4,18
Kalium (K)	2,94	1,42	0,87	13,90	13,00
Magnesium (Mg)	0,04	0,01	0,08	5,33	0,28
Vluchtige vetzuren (VVZ)	4,6	7,2	5,2	3,0	2,8
Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	204	335	256	409	454
pH-waarde	3,6	3,6	3,6	4,3	3,4
C/N-verhouding	8,0	35,8	21,0	5,9	13,6
Dichtheid (g/l)	1,043	1,117	1,002	1,156	1,217

De variatie in Beukergist en maïsweekwater was gering. Beide producten lieten een constante samenstelling zien waardoor gedurende beide proeven geen aanpassingen zijn gedaan in de toegevoerde hoeveelheden naar de vergistinginstallatie. De samenstelling van de tweede en derde levering van aardappelzetmeelslib verschilde aanzienlijk van de eerste levering. Dit werd veroorzaakt doordat de eerste levering aardappelzetmeelslib van een andere fabriek afkomstig was dan de tweede en derde levering. Doordat het organisch stofgehalte ongeveer twee keer zo hoog was, is de hoeveelheid toegevoerd aardappelzetmeelslib naar de vergister omlaag bijgesteld. De toegevoerde hoeveelheid drogestof vanuit aardappelzetmeelslib bleef hierdoor vrijwel constant. De variatie in Kwalizuivel was groter dan de variatie in Beukergist en maïsweekwater. Dit is het gevolg van de aard van het product Kwalizuivel wat ontstaat uit retour en afgekeurde zuivelproducten, terwijl Beukergist en maïsweekwater nevenstromen zijn bij een productieproces in de levensmiddelenindustrie. Het ingangsmateriaal van Kwalizuivel is dus variabler van samenstelling en dat heeft gevolgen voor de samenstelling van de Kwalizuivel.

In tabel 5 staan de gemeten gehalten aan zware metalen in de coproducten weergegeven, waarbij de gehalten voor de eerste twee covergistingproeven zijn omgerekend van gehalten in het verse product naar gehalten in de drogestof indien het gehalte boven de detectiegrens lag. In bijlage 1 staan van de coproducten de gehalten op productbasis weergegeven van de eerste twee proeven.

**Tabel 5** Gehalten aan zware metalen (in mg/kg ds) in de monsters van de coproducten tijdens het onderzoek

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
1. BG – wkn 1-3	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	22	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	0,9	54	- <sup>*)</sup>
1. BG – wkn 4-6	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	58	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	3,5	94	- <sup>*)</sup>
1. BG – wkn 7-9	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	14	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	46	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 1-3	0,9	- <sup>*)</sup>	17	- <sup>*)</sup>	- <sup>*)</sup>	3,5	49	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 4-6	- <sup>*)</sup>	30,3	10	- <sup>*)</sup>	14,8	17,8	46	- <sup>*)</sup>
2. AZS – wkn 7-9	0,1	7,7	6	- <sup>*)</sup>	5,0	3,2	32	- <sup>*)</sup>
3. KZ – wkn 1-3	< 0,02	< 0,5	2	< 0,1	< 1	< 0,1	20	< 0,5
3. KZ – wkn 4-6	< 0,02	< 0,1	3	< 0,1	< 0,1	< 0,1	26	< 0,5
3. KZ – wkn 7-9	< 0,02	< 0,1	35	< 0,1	< 0,1	4,4	580	< 0,5
4. MWW – wkn 1-3	< 0,2	< 2,0	11	< 0,1	3,0	< 2	170	< 1,0
4. MWW – wkn 4-6	< 0,2	< 2,0	13	< 0,1	3,0	< 2	160	< 1,0
4. MWW – wkn 7-9	< 0,2	< 2,0	15	< 0,1	3,0	< 2	170	< 1,0
5. RKC – wkn 1-3	< 0,1	< 2,0	3,4	< 0,01	< 2,0	< 0,5	7,8	< 0,5
5. RKC – wkn 4-6	< 0,1	< 2,0	10,8	< 0,01	< 2,0	< 0,5	10,1	< 0,5
5. RKC – wkn 7-9	< 0,1	< 2,0	6,5	< 0,01	< 2,0	< 0,5	9,0	< 0,5

<sup>\*)</sup> Gehalte in het verse product onder de detectiegrens

Bij alle coproducten lagen de gehalten aan kwik en arseen onder de detectiegrens. Ook de gehalten aan cadmium en chroom lagen onder de detectiegrens, behalve bij aardappelzetmeelslib. Voor de overige zware metalen in de coproducten is de spreiding gering te noemen. Het tweede monster Beukergist had wat hogere gehalten ten opzichte van de twee andere monsters. Alleen het derde monster Kwalizuivel had duidelijk hogere gehalten voor koper, lood en zink in vergelijking met de twee andere monsters. Een opmerkelijk verschijnsel bij de uitslagen is dat tussen verschillende proeven er bij de analyses verschillende detectiegrenzen werden gehanteerd. Onduidelijk is wat hier de oorzaak is van geweest.

### 3.3 Samenstelling digestaat

De gemiddelde samenstelling van de het digestaat voor en tijdens het onderzoek staan in tabel 6 weergegeven.

**Tabel 6** Gemiddelde samenstelling (in g/kg) en pH-waarde (-) van het digestaat na 9 weken covergisting

Parameter	Covergistingproef					
	0. Geen	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Drogestof	51	37	51	44	40	51
Organische stof	36	22	35	30	22	33
Organische stof (% van ds)	70%	60%	68%	68%	55%	64%
Drogestof rest > 0,5 mm	n.b.	1,6	4,4	9,4	6,1	10,3
Stikstof	6,30	5,51	5,58	5,36	6,34	6,50
Ammonium stikstof	4,14	4,12	4,25	4,13	4,88	4,77
Ammonium stikstof (% van N)	66%	75%	76%	77%	77%	73%
Fosfaat (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	4,32	1,84	2,30	2,30	2,81	2,87
Kalium (K)	3,70	3,74	3,61	3,42	4,43	4,37
Magnesium (Mg)	1,49	0,05	0,07	0,69	0,88	0,77
Vluchtige vetzuren (VVZ)	n.b.	0,5	0,6	0,7	0,2	0,2
Chemisch zuurstofverbruik (CZV)	n.b.	34	44	40	30	45
pH-waarde	8,3	8,3	8,4	7,0	8,5	8,1
C/N-verhouding	n.b.	1,6	2,5	2,2	1,4	2,0
Dichtheid (g/l)	n.b.	1,034	1,025	1,027	1,017	1,035

n.b. = niet bepaald

Ten opzicht van de ingaande vleesvarkensmest nam gedurende de vijf proeven het organische stofgehalte af van gemiddeld 54 g/kg naar 28 g/kg. Het aandeel ammoniumstikstof daarentegen nam toe van gemiddeld 64% naar 76%.

In tabel 7 zijn de gemiddelde gehalten aan zware metalen in de vleesvarkensmest weergegeven en de gehalten aan zware metalen in het digestaat aan het einde van elke proef, waarbij de gehalten van de eerste proef zijn omgerekend van gehalten in het verse product naar gehalten in de drogestof indien het gehalte boven de detectiegrens lag. In bijlage 1 staan de gehalten op productbasis weergegeven van het digestaat in de eerste proef.

**Tabel 7** Gemiddelde gehalten aan zware metalen in de vleesvarkensmest en de gehalten (in mg/kg ds) aan zware metalen in het digestaat aan het einde van elke proef

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Vleesvarkensmest	-	-	196	-	-	-	931	-
Digestaat Beukergist	- *)	- *)	315	- *)	- *)	- *)	1589	- *)
Digestaat Aard. zetm. slib	< 0,2	< 2	200	< 0,1	< 2	< 2	1000	< 0,5
Digestaat Kwalizuivel	< 0,2	< 2	270	< 0,1	< 2	< 2	1400	< 0,5
Digestaat Maisweekwater	< 0,2	6	240	0,2	10	< 2	1200	1,1

\*) Gehalten in het verse product onder de detectiegrens

Worden de gehalten aan zware metalen in het digestaat vergeleken met de samenstellingseisen van (zeer schoon) compost (zie bijlage 2), dan voldoet het digestaat aan deze eisen behalve voor koper en zink ondanks het feit dat door vergisting het gehalte aan drogestof sterk is gedaald. Door de relatief hoge gehalten aan koper en zink in de vleesvarkensmest worden de eisen hiervoor niet gehaald. De gehalten aan overige zware metalen lag in bijna alle gevallen onder of net boven de detectielimiet, behalve voor de gehalten aan koper en zink. Aangezien via vergisting een deel van de drogestof wordt afgebroken zijn de gehalten aan koper en zink per kilogram drogestof in het digestaat hoger dan bij onvergiste vleesvarkensmest.

### 3.4 Methaanopbrengsten en samenstelling biogas

In tabel 8 wordt een overzicht gegeven van de gemiddelde hoeveelheden mest en coproducten die in elke proef van covergisting zijn toegevoerd met de daarbij de gerealiseerde verblijftijd en organische belasting.

**Tabel 8** Overzicht toevoer mest en coproducten, verblijftijd en organische belasting tijdens de proeven met covergisting

	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Toevoer vleesvarkensmest (m <sup>3</sup> )	7,6	7,9	7,6	8,1	8,3
Toevoer coproduct (m <sup>3</sup> )	1,5	0,9	1,6	1,0	0,8
Verblijftijd (dagen)	58	60	57	58	58
Organische belasting (kg os/m <sup>3</sup> /dag)	1,25	1,50	1,24	1,45	1,23

In tabel 9 wordt een overzicht gegeven van het gerealiseerde methaangehalte en het geschatte affect van de coproducten op de methaanproductie in elke covergistingproef.

**Tabel 9** Overzicht van het methaangehalte en geschatte effect van de coproducten

	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Methaangehalte (%)	52%	49%	55%	53%	50%
Methaanopbrengst:					
- in Nm <sup>3</sup> /kg os	0,46	0,34	0,40	0,40	0,38
- in Nm <sup>3</sup> /kg CZV	0,29	0,27	0,21	0,25	0,27
- in Nm <sup>3</sup> /ton	60	91	55	103	122

Het CO<sub>2</sub>-gehalte in het geproduceerde biogas varieerde over het algemeen tussen 30 en 40%. Als gevolg van covergisting nam het H<sub>2</sub>S-gehalte aanzienlijk toe in het geproduceerde biogas van 0 ppm naar gemiddeld 200 à 300 ppm. Bij een aantal metingen lag het H<sub>2</sub>S-gehalte zelfs boven de 300 ppm. Het NH<sub>3</sub>-gehalte varieerde over het algemeen tussen 0 en 50 ppm. In bijlage 3 staan de meetresultaten weergegeven van de metingen van de CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de covergistingproeven.

### 3.5 WKK-installatie

De WKK-installatie op Praktijkcentrum Sterksel had tijdens de covergistingproeven een nominaal elektrisch vermogen van 37 kWe. In tabel 10 wordt een overzicht gegeven van de opbrengsten en het elektrisch rendement van de WKK-installatie in elke covergistingproef.

**Tabel 10** Overzicht van de gemiddelde dagelijkse opbrengsten en elektrisch rendement van de WKK-installatie

	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Aantal draaiuren	19,1	19,5	20,0	21,5	20,6
Elektriciteitsproductie (kWh)	656	693	712	756	705
Vollasturen	74%	78%	80%	85%	79%
Elektrisch rendement	27%	26%	25%	27%	23%

Het elektrische rendement schommelt wat rond de 26%. Soms is door Praktijkcentrum Sterksel de ingestelde setpoint voor elektrisch vermogen naar beneden bijgesteld om meer draaiuren per dag te kunnen draaien. Als een WKK in deellast draait, dan is het elektrische rendement wat lager dan wanneer op vollast wordt gedraaid.

In tabel 11 staat de gemeten concentratie van stikstofoxiden, koolmonoxide en waterstof in de uitlaatgassen van de WKK weergegeven.

**Tabel 11** Concentratie van stikstofoxiden, koolmonoxide en waterstof in de uitlaatgassen van de WKK

	8 maart 2005	11 november 2005
NO <sub>x</sub>	1093 ppm	546 ppm
CO	-	497 ppm
H <sub>2</sub>	-	21 ppm

Bij de eerste meting is door servicedienst van de gasmotor leverancier de concentratie aan CO en H<sub>2</sub> niet in de uitlaatgassen bepaald. Tijdens de eerste meting op 8 maart was de proef met covergisting met aardappelzetmeelslib vijf dagen afgelopen. Tijdens de tweede meting op 11 november werd er al vier weken achtereen alleen mest vergist. Bij de tweede meting was de concentratie van de stikstofoxiden in de uitlaatgassen van de WKK twee keer zo laag als bij de eerste meting. Echter het aantal metingen is te laag om enige concrete uitspraken te kunnen doen over de samenstelling van de uitlaatgassen en een eventuele relatie met de producten die vergist worden.

### 3.6 Praktische bedrijfsvoering

Covergisting van de onderzochte vloeibare industriële coproducten leidde wel tot extra arbeidsinzet maar niet tot een veel grotere arbeidsinzet aangezien de coproducten rechtstreeks vanuit de opslag naar de vergister werden gepompt. De extra arbeid werd voornamelijk veroorzaakt door:

- het invoeren van de hoeveelheden coproducten die per keer en per dag naar de vergister gepompt moesten worden,
- monsternamen en controle van het drogestofgehalte,
- vaker controleren van het zwavelwaterstofgehalte in het biogas,
- bijstellen van de ontzwaveling.

De vleesvarkensmest moest dagelijks vanuit de stallen worden afgelaten via het rioleringsysteem. Er kon wel een redelijk constante hoeveelheid per dag worden bereikt, maar er traden toch soms wat grotere afwijkingen op.

Het controleren van het drogestofgehalte bij vloeibare coproducten is noodzakelijk vanwege de wisselende samenstellingen van deze producten. Hierdoor wordt voorkomen dat te veel of te weinig organische stof naar de vergister wordt gepompt. Bij de proef met aardappelzetmeelslib bleek het drogestofgehalte van de tweede en derde vracht twee keer zo hoog als de eerste vracht, waardoor aanpassing van de gedoseerde hoeveelheid aardappelzetmeelslib noodzakelijk was. Zonder bijstelling van de toegevoerde hoeveelheid naar de vergister zou meer biogas geproduceerd worden dan de WKK verwerken kon en zou de organische belasting van het vergistingproces tijdens de proef oplopen wat niet gewenst was. Bij covergisting van de Kwalizuivel was de methaanopbrengst hoger dan verwacht en daarom is na de eerste twee weken besloten om de hoeveelheid Kwalizuivel terug te schroeven van 1.750 liter/dag naar 1.500 liter/dag. Het drogestofgehalte van de derde vracht was circa 20% lager dan van de eerste vracht en daarom is besloten om de hoeveelheid Kwalizuivel weer te verhogen.

Verder trad bij een levering van Kwalizuivel, ondanks aanzuren, schuimvorming op in de opslagsilo waardoor deze overstroomde, wat leidde tot extra arbeid voor het schoonmaken van het erf. Ook bij maïsweekwater trad enige schuimvorming op in de opslagsilo wat in de hand gehouden en verholpen kon worden door twee dagen continu te mixen. De Kwalizuivel ontmengde na verloop tijd in de opslagsilo waardoor een dikke laag boterachtig materiaal onderin de silo vormde. Deze laag zal waarschijnlijk ook een hogere methaanpotentie hebben. Extra aandacht dient daarom te worden gegeven aan mixtijden, vaker reinigen en het leegmaken van de opslagsilo bij gebruik van Kwalizuivel. Bij aardappelzetmeelslib ontstond een dikke korst in de silo wat voorkomen kan worden door voor het vullen van de silo circa 20-30 cm water in de silo te pompen. Aangezien alle vijf coproducten goed verpompbaar en mixbaar zijn, hebben er geen aanpassingen van de roertijden in de vergister plaatsgevonden. Bij de opslag van alle producten is weinig tot niets gemerkt van extra geuremissie. Het Kwalizuivel had af en toe wat een 'yoghurtgeur'.

In de aanloop naar covergistingstests werd er een dip in het methaangehalte waargenomen. De dip in het methaangehalte werd veroorzaakt doordat de WKK niet goed afsloeg op de onderdruksensor in de gasleiding, waardoor de onderdrukbeveiliging open ging en buitenlucht de gasopslag werd ingezogen.



## 4 Economische evaluatie

Voor de financiële opbrengsten uit de elektriciteitsproductie is in dit hoofdstuk uitgegaan van het conceptadvies voor het basisbedrag voor duurzame elektriciteit bij vergisting in het kader van de SDE-regeling (Tilburg et al., 2007).

### 4.1 Opbrengsten coproducten

De opbrengsten voor de coproducten bestaan bij een biogasinstallatie met een WKK-installatie uit de besparing c.q. verkoop van elektriciteit en besparing op inkoop van aardgas en eventueel warmtelevering aan derden. In tabellen 12 en 13 staat de invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de elektriciteitsopbrengsten en op de maximale warmteopbrengsten van de onderzochte coproducten.

**Tabel 12** Invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de elektriciteitsopbrengst ( $\text{kWh}_e/\text{ton}$ ) van de onderzochte coproducten en warmteproductie bij een totaal energierendement van 80%

Elektrisch rendement	Coproduct				
	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
30%	178	270	163	306	362
35%	208	315	190	356	422
40%	237	360	218	407	483

**Tabel 13** Invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de maximale warmteopbrengst ( $\text{kWh}_{th}/\text{ton}$ ) van de onderzochte coproducten bij een totaal energierendement van 80%

Warmterendement	Coproduct				
	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
50%	297	450	272	509	603
45%	267	405	245	458	543
40%	237	360	218	407	483

Uit tabellen 12 en 13 komt de sterke invloed van het elektrische rendement van de WKK-installatie op de elektriciteit- en warmteopbrengsten van de coproducten naar voren. Een WKK-installatie met 35% elektrisch rendement levert bijna 17% meer elektriciteit op bij dezelfde input als een WKK-installatie met 30% elektrisch rendement.

Elektriciteit is in tegenstelling tot warmte een product wat makkelijk af te zetten is via het openbare elektriciteitsnet, terwijl warmte alleen lokaal via warmteleidingen af te zetten is mits er een warmteafnemer aanwezig is. In tabel 14 staat de invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de omzet per ton coproduct bij een volledige benutting van het totale energierendement bij een elektriciteitsprijs (incl. subsidie) van € 0,131 per kWh en een vergoeding van € 0,30 per bespaarde kuub aardgas.

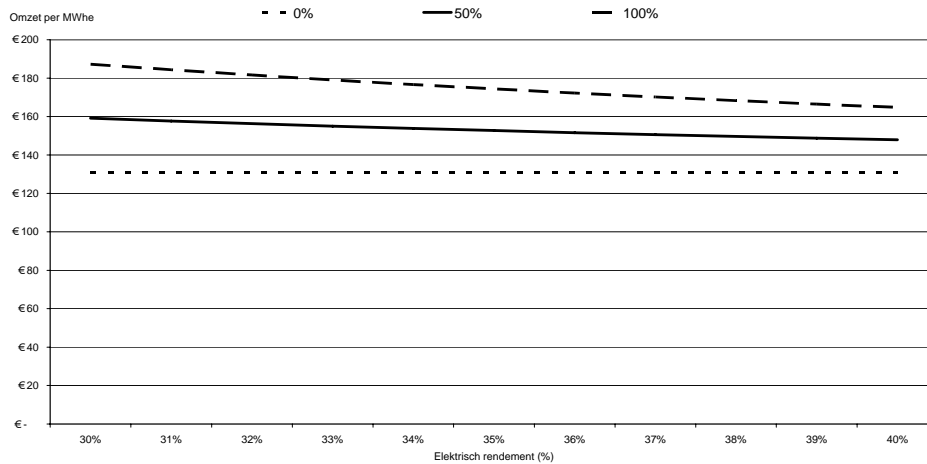
**Tabel 14** Invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de omzet per ton coproducten bij een volledige benutting van het totaal energierendement van 80% bij een elektriciteitsprijs (incl. subsidie) van € 0,131 per kWh en een vergoeding van € 0,30 per bespaarde kuub aardgas

Rendement		Coproduct				
Elektrisch	Warmte	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
30%	50%	€ 33,-	€ 51,-	€ 31,-	€ 57,-	€ 68,-
35%	45%	€ 36,-	€ 55,-	€ 33,-	€ 62,-	€ 74,-
40%	40%	€ 39,-	€ 59,-	€ 36,-	€ 67,-	€ 80,-

Uit tabel 14 komt naar voren dat een hoger elektrisch rendement meer omzet oplevert dan een hoger warmterendement. Als de elektriciteitsprijs (incl. subsidie) daalt naar € 0,0655 per kWh en de vergoeding voor vermeden aardgasgebruik stijgt naar € 0,60 per kuub aardgas dan wordt een evenwichtssituatie bereikt, maar dan dient wel de warmte volledig benut te worden.

In figuur 1 staat de invloed van het elektrisch rendement en benutting van de warmte op de omzet per geproduceerde MWh elektriciteit ( $MWh_e$ ) weergegeven.

**Figuur 1** Invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie en warmtebenutting op de omzet per geproduceerde  $MWh_e$  bij een totaal energierendement van 80%



Zoals verwacht leidt een hogere warmtebenutting tot een hogere omzet per geproduceerde  $MWh_e$ , zoals te zien is in figuur 1. Het lijkt onlogisch dat een hoger elektrisch rendement leidt tot een lagere omzet per geproduceerd  $MWh_e$ . Echter bij een gelijkblijvend totaal energierendement neemt bij een hoger elektrisch rendement de omzet uit warmte af, terwijl het aantal geproduceerde  $MWh_e$  toe neemt. Hierdoor daalt de omzet per geproduceerd  $MWh_e$ , maar neemt wel de totale omzet toe. Verder blijkt dat de elektriciteitsopbrengsten voor minimaal 70% van de totale omzet zorgen.

#### 4.2 Directe kosten coproducten

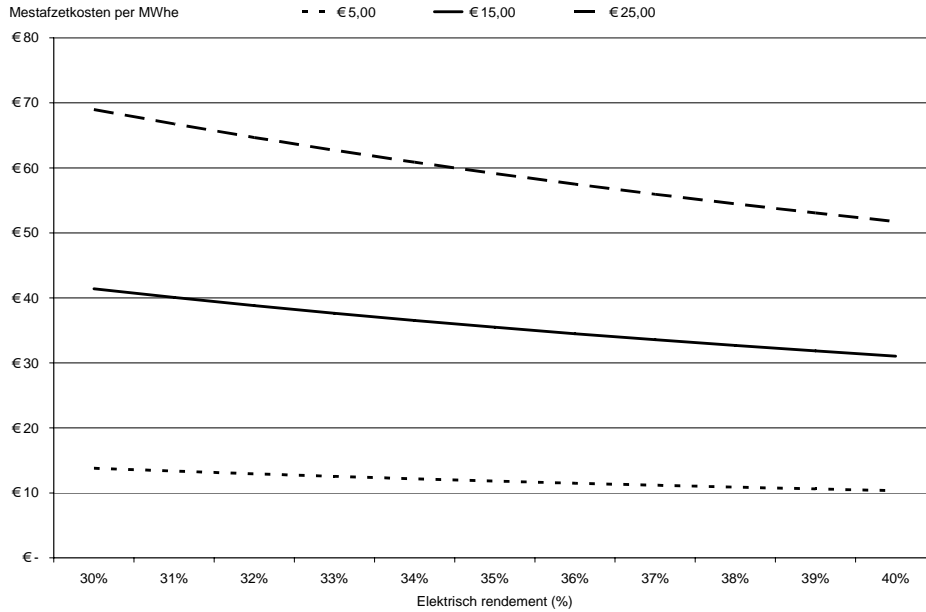
De directe kosten voor coproducten bestaan uit de aankoopkosten (negatief bedrag bij afnamevergoeding) voor de coproducten en de afzetkosten voor het digestaat wat overblijft na vergisting. De hoeveelheid digestaat afkomstig van een coproduct kan worden berekend door de hoeveelheid ingaand coproduct te verminderen met de hoeveelheid geproduceerd biogas afkomstig van het coproduct. In tabel 15 staat de berekening voor de onderzochte coproducten weergegeven, waarbij er vanuit gegaan is dat het biogas alleen bestaat uit methaan ( $CH_4$ ) en koolstofdioxide ( $CO_2$ ).

**Tabel 15** Gemiddelde samenstelling (in g/kg) van de gebruikte coproducten

Parameter	Coproduct				
	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
Vers ingaand product (kg)	1.000	1.000	1.000	1.000	1.000
Drogestofgehalte	16,6%	28,6%	14,1%	37,3%	35,6%
Biogasopbrengst					
- in $Nm^3/ton$	114	187	101	197	245
- in kg/ton	150	255	131	258	331
Digestaat (kg)	850	745	869	742	669

In figuur 2 staat de invloed van de mestafzetprijs (€ 5/10/25,- per ton digestaat) en het elektrisch rendement van de WKK-installatie weergegeven op de afzetkosten van het digestaat per geproduceerd MWh<sub>e</sub> bij gebruik van aardappelzetmeelslib als coproduct.

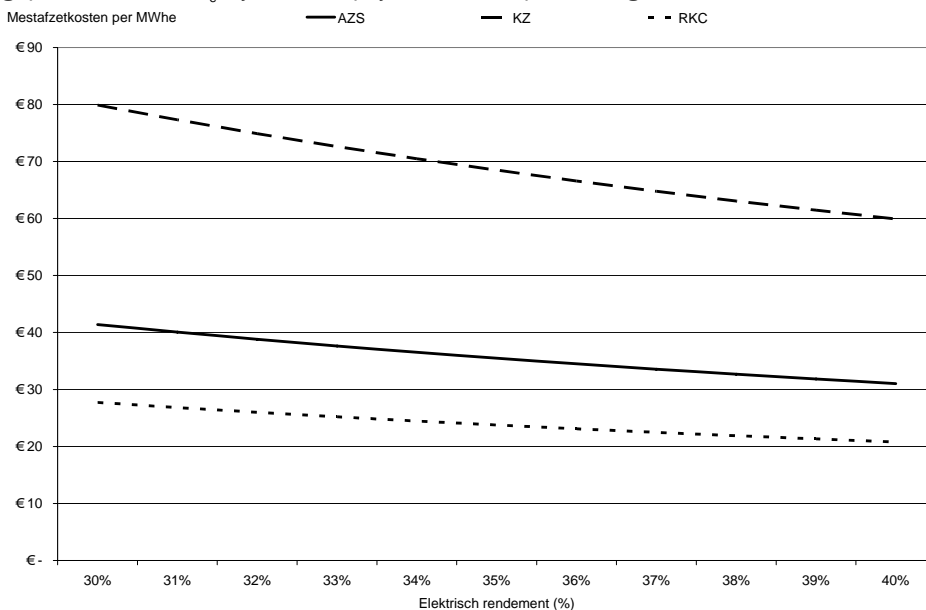
**Figuur 2** Invloed van afzetprijs van het digestaat en elektrisch rendement van de WKK-installatie op de mestafzetkosten per geproduceerd MWh<sub>e</sub> bij gebruik van aardappelzetmeelslib als coproduct



Uit figuur 2 komt de sterke invloed van de mestafzetprijs op de mestafzetkosten per MWh<sub>e</sub> duidelijk naar voren. Bij een elektrisch rendement van 30% betekent een stijging van € 10,- per ton digestaat een kostprijsstijging van € 27,- per MWh<sub>e</sub>. Het elektrisch rendement van de WKK-installatie heeft ook een grote invloed bij hoge mestafzetprijzen. Bij een mestafzetprijs van € 25,- per ton digestaat daalt de kostprijs met € 17,- per MWh<sub>e</sub> indien het elektrisch rendement 40% bedraagt i.p.v. 30%.

In figuur 3 staat de invloed van het coproduct en het elektrisch rendement van de WKK-installatie weergegeven op de inkoopkosten per MWh<sub>e</sub> voor aardappelzetmeelslib (AZS), Kwalizuivel (KZ) en rodekoolconcentraat (RKC) bij een afzetprijs van € 15,- per ton digestaat.

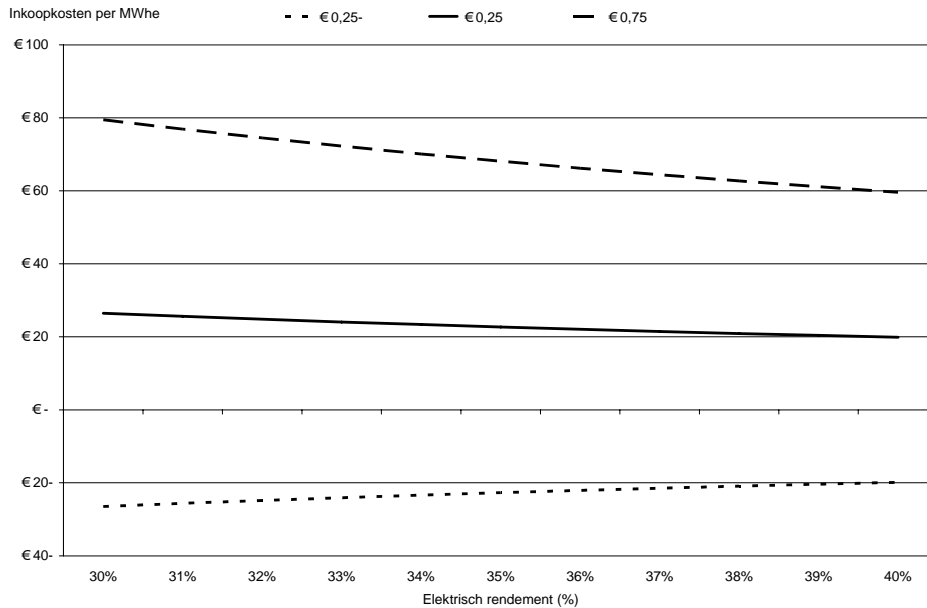
**Figuur 3** Invloed van het coproduct en elektrisch rendement van de WKK-installatie op de mestafzetkosten per geproduceerd MWh<sub>e</sub> bij een afzetprijs van € 15,- per ton digestaat



Uit figuur 3 blijkt dat het coproduct een grote invloed heeft op mestafzetkosten per MWh<sub>e</sub>. Dit wordt bepaald door het drogestofgehalte en de biogasopbrengst van het coproduct. Kwalizuivel had van de vijf onderzochte coproducten het laagste drogestofgehalte en geeft de hoogste mestafzetkosten per MWh<sub>e</sub>, terwijl rodekoolconcentraat het hoogste drogestofgehalte had met de laagste mestafzetkosten per MWh<sub>e</sub>. Tussen deze beide producten zit grofweg een factor 3 verschil tussen in de afzetkosten.

In figuur 4 staat de invloed van de inkoopprijs (€ -0,25/0,25/0,75 per procent drogestof (%ds)) en het elektrisch rendement van de WKK-installatie weergegeven op de inkoopkosten per MWh<sub>e</sub> bij gebruik van aardappelzetmeelslib als coproduct.

**Figuur 4** Invloed van de inkoopprijs (per %ds) en het elektrisch rendement van de WKK-installatie de inkoopkosten per MWh<sub>e</sub> bij gebruik van aardappelzetmeelslib als coproduct



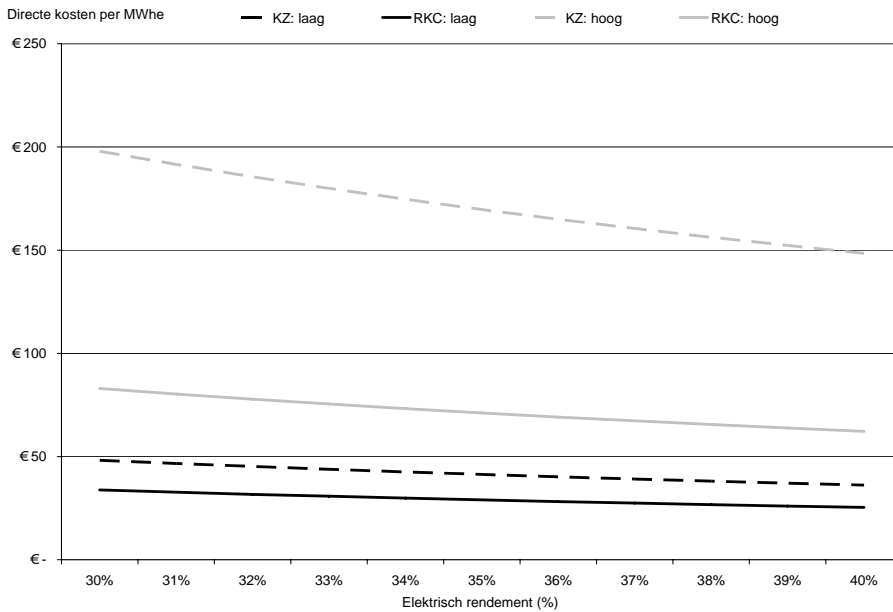
Uit figuur 4 komt de sterke invloed van de inkoopprijs van een coproduct op de inkoopkosten per MWh<sub>e</sub> duidelijk naar voren. Indien geld wordt toegegeven (gate-fee) bij een coproduct dan daalt de kostprijs per MWh<sub>e</sub>, terwijl bij de betaling de kostprijs toeneemt. Een stijging van de inkoopprijs van € 0,25 per %ds voor aardappelzetmeelslib zorgt bij een elektrisch rendement van 35% voor een stijging van de kostprijs met € 26,- per MWh<sub>e</sub>. Net zoals bij de afzetkosten voor het digestaat zorgt ook een beter elektrisch rendement voor een lagere kostprijs bij dezelfde inkoopkosten voor een coproduct.

Voor een beter inzicht in de invloed van het coproduct en de directe kosten op de kosten per MWh<sub>e</sub> zijn de volgende twee scenario's doorgerekend voor Kwalizuivel (laag drogestofgehalte) en rodekoolconcentraat (hoog drogestofgehalte):

1. Laag: Afzetkosten € 5,- per ton digestaat met een inkoopprijs voor het coproduct van €0,25 per procent drogestof,
2. Hoog: Afzetkosten € 15,- per ton digestaat met een inkoopprijs voor het coproduct van €0,75 per procent drogestof.

In figuur 5 staan de directe kosten per geproduceerd MWh<sub>e</sub> weergegeven bij verschillende elektrische rendementen van de WKK-installatie voor beide coproducten in beide scenario's.

**Figuur 5** Directe kosten per geproduceerd MWh<sub>e</sub> van twee scenario's bij verschillende elektrische rendementen van de WKK-installatie voor Kwalizuivel en rodekoolconcentraat



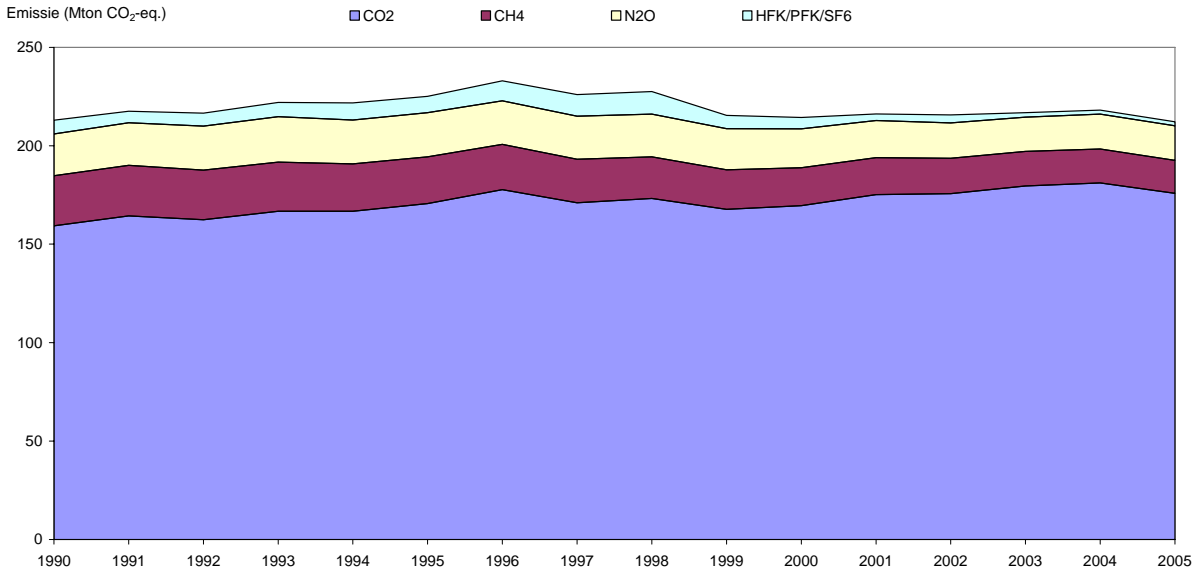
Uit figuur 5 blijkt de zeer grote invloed van het coproduct en de directe kosten op het saldo van een coproduct. Bij lage afzetkosten voor het digestaat en lage inkoopkosten voor het coproduct heeft de samenstelling van het coproduct minder invloed op het saldo van een coproduct. Voor zowel Kwalizuivel als rodekoolconcentraat liggen de directe kosten in dit 'lage' scenario onder € 50,- per MWh<sub>e</sub> en zal er voldoende saldo overblijven voor vergoeding van de overige kosten en arbeid. Het 'hoge' scenario daarentegen geeft een heel ander beeld te zien. De directe kosten van Kwalizuivel zijn zo hoog dat de opbrengsten niet of amper genoeg zijn om deze kosten te kunnen betalen. Ten opzichte van het 'lage' scenario zijn de directe kosten van Kwalizuivel een factor 4 gestegen. De directe kosten van rodekoolconcentraat zijn ook in het 'hoge' scenario sterk gestegen met een factor van bijna 2,5. Afhankelijk van het elektrisch rendement liggen de directe kosten voor rodekoolconcentraat in het 'hoge' scenario tussen € 62,- en € 83,- per MWh<sub>e</sub>, en blijft er dus nog ruimte over om (een deel van) de overige kosten en arbeid te betalen. Dit grote verschil tussen beide producten wordt veroorzaakt door het drogestofgehalte en de biogasopbrengst van het coproduct. Bij een laag drogestofgehalte zal er veel digestaat overblijven en tevens een lage biogasopbrengst zijn met als gevolg een lage elektriciteitopbrengst van het coproduct.

## 5 Broeikasgasemissie

### 5.1 Overzicht broeikasgasemissie in Nederland

Het basisjaar in het kader van het Kyoto Protocol is 1990 voor koolstofdioxide, methaan en lachgas (distikstofoxide) en 1995 voor de fluorhoudende gassen. In figuur 6 staat de totale emissie van de broeikasgassen koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>), methaan (CH<sub>4</sub>), lachgas (N<sub>2</sub>O) en fluorhoudende gassen (HFK, PFK en SF<sub>6</sub>) weergegeven voor Nederland in de periode 1990-2005 (RIVM, 2007).

**Figuur 6** Overzicht totale broeikasgasemissie in Nederland over de periode 1990-2005 (RIVM, 2007)



Uit de figuur 6 blijkt dat de emissie van alle broeikasgassen is gereduceerd in deze periode, behalve van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>). Ten opzicht van het basisjaar van het Kyoto-protocol is de emissie van koolstofdioxide met 10% toegenomen. Op basis van de cijfers van 2005 en de voorlopige cijfers over 2006 lijkt het erop dat ook de CO<sub>2</sub>-emissie aan het afnemen is in Nederland. Ten opzicht van het basisjaar van het Kyoto protocol zijn de emissies van CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O en fluorhoudende gassen met respectievelijk 34%, 17% en 76% afgenomen. De totale emissie van broeikasgassen lag in 2005 circa 1% onder het niveau van het basisjaar van het Kyoto-protocol. Het aandeel van koolstofdioxide in de totale emissie bedroeg in 2005 bijna 83%.

In tabel 16 staat de totale emissie van de broeikasgassen door de Nederlandse land- en tuinbouw in de periode 1990-2004 (RIVM, 2007).

**Tabel 16** Emissie van broeikasgassen (in Mton) door de land- en tuinbouw in Nederland in de periode 1990-2004 (RIVM, 2007)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004 <sup>1)</sup>
Koolstofdioxide	8,4	8,3	7,4	7,2	7,2	7,1	7,1
Methaan <sup>2)</sup>	10,3	10,1	9,1	9,1	8,7	8,5	8,5
Lachgas <sup>3)</sup>	11,6	12,7	10,7	10,2	9,7	9,4	9,6
<b>Totaal</b>	<b>30,2</b>	<b>31</b>	<b>27,2</b>	<b>26,5</b>	<b>25,6</b>	<b>24,9</b>	<b>25,1</b>

1) Voorlopige cijfers

2) Exclusief sethaanemissies afkomstig van de verbranding van fossiele brandstoffen

3) Inclusief onder andere achtergrondemissie en emissie uit stikstofbinding door vlinderbloemigen

Uit tabel 16 blijkt dat de verschillende broeikasgassen allemaal grofweg evenveel bijdragen aan de totale de emissie van broeikasgassen vanuit de land- en tuinbouw in Nederland. In 2004 was van de totale broeikasgasemissie 11,5% afkomstig van de Nederlandse land- en tuinbouw. Ten opzicht van het basisjaar van het Kyoto protocol is de totale broeikasgasemissie door de Nederlandse land- en tuinbouw afgenomen met bijna 17%. De emissie van koolstofdioxide (CO<sub>2</sub>) is voor circa 80% afkomstig van de verbranding van fossiele

brandstoffen in de glastuinbouw. In tabellen 17 en 18 staan voor methaan en lachgas de bijdrage van de verschillende bronnen uitgesplitst.

**Tabel 17** Methaanemissie (in miljoenen kg) door de land- en tuinbouw in Nederland in de periode 1990-2004 (RIVM, 2007)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004 <sup>1)</sup>
Pensfermentatie	349	334	307	307	293	289	288
Mestopslag	<u>141</u>	<u>145</u>	<u>127</u>	<u>126</u>	<u>120</u>	<u>115</u>	<u>116</u>
<b>Totaal <sup>1)</sup></b>	<b>491</b>	<b>480</b>	<b>435</b>	<b>434</b>	<b>414</b>	<b>405</b>	<b>404</b>

1) Exclusief methaanemissies afkomstig van de verbranding van fossiele brandstoffen

**Tabel 18** Lachgasemissie (in miljoenen kg) door de land- en tuinbouw in Nederland in de periode 1990-2004 (RIVM, 2007)

	1990	1995	2000	2001	2002	2003	2004 <sup>1)</sup>
Stal en mestopslag	2,2	2,4	2,4	2,4	2,4	1,9	2,0
Beweiding	4,2	3,8	2,7	2,7	2,2	2,2	2,1
Mestaanwending	5,5	10,7	9,3	9,4	8,9	8,7	9,0
Kunstmestgebruik	6,9	6,7	5,7	4,9	4,7	4,6	4,7
T.g.v. uit- / afspoeling N	<u>12,6</u>	<u>12,2</u>	<u>10,0</u>	<u>9,5</u>	<u>8,9</u>	<u>8,8</u>	<u>9,0</u>
<b>Totaal <sup>1)</sup></b>	<b>37,3</b>	<b>40,8</b>	<b>34,4</b>	<b>33,1</b>	<b>31,2</b>	<b>30,2</b>	<b>30,8</b>

1) Inclusief onder andere achtergrondemissie en emissie uit stikstofbinding door vlinderbloemigen

Uit tabel 17 blijkt dat ruim 71% van de methaanemissie uit de land- en tuinbouw afkomstig is van de pensfermentatie bij herkauwers en het overige deel afkomstig is uit mestopslagen. Ten opzicht van het basisjaar van het Kyoto protocol is de methaanemissie afgenomen met bijna 18%. Uit tabel 18 blijkt dat mestaanwending en uit-/afspoeling van stikstof de grootste bijdragen aan leveren aan de lachgasemissie van allebei ruim 29%. Ten opzicht van het basisjaar van het Kyoto protocol is de methaanemissie afgenomen met ruim 17%.

## 5.2 Effect van covergisting op broeikasgasemissies

Vergisting van coproducten is o.a. van invloed op de broeikasgasemissie van een biogasinstallatie. Het berekenen van de daadwerkelijke reductie in broeikasgasemissie door covergisting is een complexe materie wat van veel factoren, uitgangspunten en aannames afhangt zoals o.a. biogasproductie van het coproduct, eigen energieverbruik van de biogasinstallatie en het huidige gebruik van het coproduct. De TEWI-systematiek (Total Equivalent Warming Impact) is een gestandaardiseerde methode voor het berekenen van de emissiereductie van broeikasgassen over de levenscyclus van een project. Voor een aantal basistechnieken voor mestbewerking en mestverwerking, waaronder vergisting, is deze methode verder uitgewerkt door Os et al. (2003). Zij vergelijken de broeikasgasemissie bij een mestverwerkingstechniek (huidige situatie) met de broeikasgasemissie vóór toepassing van de techniek (referentiesituatie). Het emissie reductie potentieel van een mestverwerkingstechniek wordt dan berekend als de emissie van de mestverwerkingstechniek minus de emissie van de referentiesituatie. Echter Os et al. (2003) hebben bij de uitwerking van de methode voor vergisting geen rekening gehouden met covergisting, waardoor deze methode niet direct toepasbaar is voor een biogasinstallatie waar mest wordt covergist met coproducten.

Voor inzicht in het effect van covergisting op broeikasgasemissies van de onderzochte coproducten zijn een aantal berekeningen uitgevoerd gebaseerd op de studie door Os et al. (2003). In tabel 18 staan de emissiefactoren vermeld zoals die worden gebruikt in de TEWI-analyse van bij vergisting en vergassing (Os et al., 2003).

**Tabel 18** Emissiefactoren volgens de TEWI-analyse bij vergisting en vergassing (Os et al., 2003)

	Emissiefactor
1 kWh elektriciteit	0,37 kg CO <sub>2</sub> -eq.
1 kWh lage temperatuur warmte	0,09 kg CO <sub>2</sub> -eq.
1 ton kilometer regionaal transport	0,03 kg CO <sub>2</sub> -eq.

De biogasproductie uit varkensmest is in vergelijking tot de biogasproductie van coproducten aan de relatief lage kant. Bij mestvergisting heb je dus maar een relatief kleine WKK-installatie nodig om al het geproduceerde biogas te kunnen verwerken. Grotere WKK-installatie hebben echter een beter elektrisch rendement dan kleinere WKK-installaties. In tabel 19 is daarom voor de onderzochte coproducten de bruto emissiereductie van de energieproductie berekend bij verschillende elektrische rendementen van de WKK-installatie bij een volledige benutting van het energierendement.

**Tabel 19** Invloed van het elektrisch rendement van de WKK-installatie op de bruto emissiereductie (CO<sub>2</sub>-eq./ton) van de energieproductie als gevolg van covergisting van de onderzochte coproducten bij een volledige benutting van het totaal energierendement van 80%

Rendement		Coproduct				
Elektrisch	Warmte	1. BG	2. AZS	3. KZ	4. MWW	5. RKC
30%	50%	93	140	85	159	188
35%	45%	101	153	92	173	205
40%	40%	109	166	100	187	222

Uit tabel 19 komt naar voren dat een hoger elektrisch rendement leidt tot een hogere bruto emissiereductie als gevolg van een hogere emissiefactor voor elektriciteit. Coproducten met een hoger drogestofpercentage geven ook een hoger bruto emissiereductie per ton te zien door de hogere biogasproductie en dus energieproductie.

De referentiesituatie van de onderzochte producten is toepassing als veevoedermiddel of als coproduct in buitenlandse biogasinstallaties (Duitsland en Denemarken). Wordt de vergelijking gemaakt met toepassing als veevoedermiddel dan heeft transport in principe geen invloed, want het product wordt in beide situaties naar het bedrijf getransporteerd waar het dient als voedermiddel voor de varkens of als coproduct in een biogasinstallatie. Ook blijft er in beide gevallen een 'restproduct' over namelijk varkensmest of digestaat. Bij gebruik als coproduct in een biogasinstallatie zal een alternatief voedermiddel ingezet moeten worden in het rantsoen van de varkens. De emissiefactor hiervan zal afhangen van de keuze van het voedermiddel en diens productiewijze. Wordt echter de vergelijking gemaakt met toepassing van het coproduct in buitenlandse biogasinstallatie dan wordt alles bepaald door de transportafstanden van de productielocatie tot de biogasinstallatie, de efficiënte van de biogasinstallatie en het eindgebruik van het digestaat. Per coproduct en per bedrijf zal dus de broeigasbalans er anders uitzien.

De samenstelling en eigenschappen van digestaat wordt bepaald door een groot aantal factoren, zoals o.a. de samenstelling van het coproduct, mengverhouding, verblijftijd en temperatuur in de vergistinginstallatie. In een aanvullend onderzoek voor het ministerie van VROM is voor de onderzochte coproducten in een potproef bepaald wat de stikstofopname door gras uit de vijf covergiste varkensdrijfmesten was (De Boer en Timmerman, 2006). Uit dit onderzoek kwam naar voren dat de covergiste varkensdrijfmesten de drogestof- en N-opbrengst van gras verhoogde en dus een waardevoller stikstofmeststof was dan de onvergiste varkensmest. Covergisting is dus van invloed op het bemestingsplan van een bedrijf en daarmee ook op de hoogte van de inzet van kunstmest. Verder spelen ook de emissies mee die optreden van aanwending van mest/digestaat en bij het strooien van kunstmest. Worden deze zaken ook betrokken in de broeigasbalans van een biogasinstallatie op een varkensbedrijf dan neemt de complexiteit van de berekening verder toe.



## 6 Discussie

Er is voor zover bekend geen openbare onderzoek gedaan naar de vijf onderzochte producten bij covergisting met varkensmest. Door Karapaju en Rintala (2005) is wel onderzoek op labschaal gedaan naar de methaanopbrengsten van twee coproducten uit de aardappelverwerkende industrie (aardappelstoomschillen en aardappeldiksap) bij covergisting met varkensmest. Vergelijkbare resultaten werden bereikt als bij covergisting met aardappelzetmeelslib. De theoretische potentiële methaanopbrengst van producten ligt op  $0,35 \text{ Nm}^3 \text{ CH}_4/\text{kg CZV}$ , maar in de praktijk zal dit altijd lager zijn vanwege o.a. beperkingen in verblijftijd (Angelidaki en Sanders, 2004). De resultaten van deze praktijkproef lieten zien dat de omzetting van organische stof naar biogas varieerden tussen de 60 en 83%. Een deel van het potentieel is dus niet benut, mogelijk omdat een deel van de organische stof moeilijker tot niet afbreekbaar is. Een langere verblijftijd zou afhankelijk van het coproduct de omzetting naar biogas kunnen verhogen, maar brengt wel extra kosten met zich mee in de vorm van een grotere vergister of investering in een navergister.

De organische stofbelasting tijdens de proeven met de coproducten varieerde van  $0,89$  tot  $1,50 \text{ kg os/m}^3/\text{dag}$ . In de praktijk zal deze waarde vaak hoger liggen en over het algemeen tussen de  $0,5$  en  $5,0 \text{ kg os/m}^3/\text{dag}$  liggen. Bij hogere organische stofbelastingen neemt de specifieke methaanopbrengst af, wat in het bereik van  $1$  tot  $3 \text{ kg os/m}^3/\text{dag}$  kan op lopen tot 10% (KTBL, 2005). Echter de afname hangt af van o.a. het type materiaal. Bij mesofiele vergisting bleek dat bij makkelijker afbreekbaar producten de afname minder is dan bij moeilijk afbreekbare producten (Linke en Mähnert, 2005). Door de lage organische stofbelasting, het hoge bufferende vermogen van varkensmest en relatief lage percentages bijmenging van 10-16% mag verwacht worden dat gedurende de looptijd van negen weken er geen overbelasting van het vergistingsproces heeft plaatsgevonden en dat het procesverloop stabiel is gebleven. Mede gezien vanwege het feit dat de concentraties aan vluchtige vetzuren in het digestaat maar gering opliepen.

De gemiddelde verblijftijd van de varkensmest en het coproduct varieerde van 58 tot 63 dagen tussen de verschillende proeven. Dit werd veroorzaakt doordat het praktisch niet mogelijk was om de toegevoerde hoeveelheid vleesvarkensmest exact in te doseren. Hierdoor schommelde de dagelijks toegevoerde vleesvarkensmest ook wat. Verwacht wordt dat deze kleine variatie in verblijftijd weinig effect heeft gehad op de resultaten. Ook varieerde organische stof in toegevoerde varkensmest tussen de verschillende proeven. Bij de schatting van gasopbrengsten op basis van dynamische lineaire modellen wordt rekening gehouden met de effecten van variatie in hoeveelheid en samenstelling van de mest op de gasopbrengsten.

Covergisting van zowel Beukergist als maïsweekwater met vleesvarkensmest leidde tot een stijging van het gehalte aan zwavelwaterstof in het biogas. De hoogte van het gehalte in het biogas wordt mede bepaald door de hoeveelheid lucht die wordt bijgeblazen. Bij maïsweekwater is de hoeveelheid ingeblazen lucht eerder verhoogd als bij Beukergist en lag de hoeveelheid lucht ook op een hoger niveau. Hierdoor is het lastig om het absoluut gemeten zwavelwaterstofgehalte in het biogas bij verschillende producten onderling te vergelijken. Een nadeel van het bijblazen van lucht is dat verdunning van het biogas optreedt en dat de hoeveelheid lucht goed ingesteld dient te worden. Zowel Beukergist als maïsweekwater zijn eiwitrijke producten met een relatief hoog gehalte aan sulfaat ( $\text{SO}_4$ ). Sulfaat wordt door anaërobie bacteriën in de vergister omgezet naar  $\text{H}_2\text{S}$ , waarbij deze bacteriën ook gebruik maken van tussenproducten die ontstaan bij de omzetting van organische stof naar methaan. Er treedt dus concurrentie op om de tussenproducten met als gevolg een lagere methaanopbrengst. Daarnaast leiden te hoge  $\text{H}_2\text{S}$ -concentraties tot remming van de methanogene bacteriën en bij onvoldoende ontzwaveling tot verkorte olieversningsintervallen, schade aan de WKK en verhoogde emissies van zwaveldioxyden in de uitlaatgassen. Deze coproducten kunnen daarom maar in beperkte mate worden bijgemengd. De mate van bijmenging hangt o.a. af van de rantsoensamenstelling (welke andere coproducten en met welke samenstelling worden vergist), temperatuur, pH-waarde en wat voor type ontzwaveling toegepast wordt. Duidelijke richtlijnen ontbreken aangezien de remming van meerdere factoren afhankelijk is. FNR (2004) geeft aan dat vanaf  $50 \text{ mg/l H}_2\text{S}$  remming kan optreden, maar in aangepaste bacterieculturen kan dit oplopen tot  $1000 \text{ mg/l H}_2\text{S}$ .

Een ander punt wat speelt bij de rantsoensamenstelling is het gehalte aan ammoniumstikstof in het rantsoen. Een te hoog gehalte leidt tot zowel remming van de hydrolyse als van de methaanvorming als gevolg van ammonia. De mate waarin dit speelt hangt af van de verblijftijd, pH-waarde, de temperatuur en of de bacteriën wel/niet aangepast zijn aan hoge concentraties. Een richtlijn voor mesofiele vergisting is dat tot  $4$  à  $5 \text{ g NH}_4\text{-N/l}$  geen negatieve effecten verwacht worden (KTBL, 2005; Zeeman, 2006). De gehalten aan ammoniumstikstof in het digestaat lag bij covergisting van maïsweekwater op  $4,6 \text{ g/kg}$  en bij overige coproducten op  $4,1 \text{ g/kg}$ . Er zal daardoor naar verwachting weinig tot geen ammoniakremming zijn opgetreden in de proeven.

Het digestaat van een vergistinginstallatie waarin zowel dierlijke mest als coproducten worden vergist wordt door het ministerie van LNV volledig aangemerkt als dierlijke mest als het ingaande mengsel voor minimaal uit 50% mest bestaat. Hierdoor moet met het digestaat precies hetzelfde worden omgegaan als dierlijke mest voor wat betreft uitrijperiodes, gebruiksnormen, etc. Toevoer van coproducten vergroot dus de mestproductie op een bedrijf. Door vergisting veranderen de hoeveelheid mineralen in de mest in principe niet, waarbij alleen een beperkte hoeveelheid stikstof in de vorm van ammoniak in het biogas terecht komt. Aangezien een deel van de organische stof wordt omgezet in biogas vindt er een volumereductie plaats en de mate waarin is afhankelijk van welke producten worden vergist. Door deze volumereductie zouden de mineralengehalten in het digestaat enigszins moeten stijgen ten opzichte van het ingaande mengsel. Uit de resultaten van dit onderzoek blijkt dit niet altijd het geval te zijn. Met name het fosfaatgehalte in het digestaat blijkt lager te zijn dan van het ingaande mengsel. Dit wordt waarschijnlijk veroorzaakt doordat enige mate van bezinking optreedt in de vergister net zoals het geval is in varkensstallen (Timmerman en Smolders, 2003). In de nieuwe mestwetgeving die per 1 januari 2006 is ingegaan worden voorraden mest meegenomen bij het opmaken van de stalbalans voor een varkenshouder. Echter het is nog onduidelijk hoe omgegaan zal worden met bezinklagen die ontstaan in een vergistinginstallatie.

Vanwege het beperkt aantal metingen aan de samenstelling van de uitlaatgassen van de WKK binnen dit onderzoeksproject kunnen geen concrete uitspraken worden gedaan over deze metingen. De mest en coproducten die worden vergist bepalen samen met de procesparameters de samenstelling van het biogas. De uiteindelijke samenstelling van het biogas wat door de WKK wordt verstoekt hangt echter ook af van de technische uitvoering van de installatie zoals o.a. type ontzwaveling en ontwatering wat wordt toegepast. Daarom is het lastig om directe relaties te leggen tussen het type coproduct en de samenstelling van de uitlaatgassen van de WKK. Een belangrijke maatregel die men kan nemen is wel om een goed afgestelde WKK te hebben en te houden voor zowel een goed elektrisch rendement als schone uitlaatgassen (Ashmann et al., 2005).

Het financieel rendement van covergisting wordt in sterke mate bepaald door de kosten voor aankoop van de coproducten, samenstelling en biogasproductie van de coproducten, rendement van de WKK-installatie en afzetkosten van het digestaat. Bij coproducten met een hoog drogestofgehalte is de invloed van de aankoopprijs en afzetkosten van het digestaat geringer dan bij coproducten met een laag drogestofgehalte. Bijproducten uit de levensmiddelenindustrie kunnen zowel gebruikt worden als veevoedermiddel als coproduct in een biogasinstallatie. De prijzen voor natte bijproducten voor gebruik als veevoedermiddel liggen structureel boven de € 1,- per procent drogestof. Dergelijke prijzen zijn echter te hoog om dergelijke producten winstgevend te kunnen inzetten als coproduct in biogasinstallatie. Andere factoren zullen dus de inzet van dergelijke producten als coproduct in een biogasinstallatie bepalen bijvoorbeeld een overschot op de markt, kwaliteitsaspecten van een partij en transportkosten.

## 7 Conclusies en aanbevelingen

### 7.1 Conclusies

In de uitgevoerde praktijkproef met covergisting van industriële nevenproducten uit de levensmiddelenindustrie met vleesvarkensmest werden de volgende specifieke methaanopbrengsten gerealiseerd:

- Beukergist (17% ds) 0,46 Nm<sup>3</sup>/kg os (=60 Nm<sup>3</sup>/ton)
- Aardappelzetmeelslib (29% ds) 0,34 Nm<sup>3</sup>/kg os (=91 Nm<sup>3</sup>/ton)
- Kwalizuivel (14% ds) 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg os (=55 Nm<sup>3</sup>/ton)
- Maisweekwater (37% ds) 0,40 Nm<sup>3</sup>/kg os (=103 Nm<sup>3</sup>/ton)
- Rodekoolconcentraat (36% ds) 0,38 Nm<sup>3</sup>/kg os (=122 Nm<sup>3</sup>/ton)

Bij covergisting van Kwalizuivel met vleesvarkensmest bleef het methaangehalte in het biogas constant rond de 55%, maar bij de overige coproducten daalde het methaangehalte naar rond de 50%. Daarnaast leidde covergisting van Beukergist en maisweekwater tot hogere zwavelwaterstofgehalte in het biogas.

Het financieel rendement van covergisting wordt in sterke mate bepaald door de kosten voor aankoop van de coproducten, samenstelling en biogasproductie van de coproducten, rendement van de WKK-installatie en afzetkosten van het digestaat. Te hoge kosten voor aankoop en afzet van het digestaat in combinatie met een slecht rendement van de WKK-installatie leiden tot een verliesgevende biogasinstallatie. Bij coproducten met een hoog drogestofgehalte is de invloed van de aankooprij en afzetkosten van het digestaat geringer dan bij coproducten met een laag drogestofgehalte.

Het effect van covergisting op de broeikasgasemissie van een biogasinstallatie op een varkensbedrijf is niet zonder meer eenduidig vast te stellen gezien de vele (onzekere) invloedfactoren, uitgangspunten en aannames die meespelen.

### 7.2 Aanbevelingen

Bij covergisting van industriële coproducten dient men rekening mee te houden dat deze producten wisselende samenstellingen kunnen hebben. Bij levering van een vracht is het daarom raadzaam om het drogestofgehalte te bepalen en aan de hand daarvan het rantsoen voor de bacteriën bij te stellen. Hierdoor wordt voorkomen dat te weinig of te veel biogas wordt geproduceerd.

Bij de keuze van coproducten en het percentage van bijmenging dient men te kijken naar het totale rantsoen wat gevoerd wordt aan de bacteriën en het type installatie wat men heeft. Hierdoor kan voorkomen worden dat er negatieve effecten optreden zoals een te hoog gehalte ammoniumstikstof en daardoor het vergistingproces wordt geremd en lagere gasopbrengsten tot gevolg heeft.

Zowel variatie in productsamenstelling als variatie in omstandigheden zijn van invloed op het resultaat van het covergistingproces. Dynamisch lineaire modellen zijn geschikt om deze effecten voortdurend te schatten en kunnen online worden toegepast om het proces van covergisting te monitoren en te optimaliseren. Het verdient aanbeveling om de online toepassing van dynamische lineaire modellen nader te onderzoeken en te ontwikkelen.

Sulfaatrijke coproducten kunnen in beperkte mate worden covergist met mest, omdat door te hoge concentraties aan H<sub>2</sub>S anders de methaanproductie wordt geremd en schade aan de WKK kan optreden. Aangezien nog relatief weinig bekend is over de invloed van sulfaatrijke coproducten op het vergistingproces bij mest en optimalisatie bij covergisting van deze producten is nader onderzoek op dit punt gewenst.

## Bijlagen

### Bijlage 1 Gehalten aan zware metalen (in mg/kg) op productbasis van de eerste twee proeven

**Tabel A** Gehalten aan zware metalen (in mg/kg) op productbasis in de monsters van de vleesvarkensmest tijdens de eerste twee proeven met Beukergist en aardappelzetmeelslib

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
1. BG – wkn 1-3	< 0,02	0,58	14,1	< 0,01	< 1	0,24	79	< 0,5
1. BG – wkn 4-6	< 0,02	< 0,5	11,6	< 0,01	< 1	< 0,1	55	< 0,5
1. BG – wkn 7-9	< 0,02	0,62	15,2	< 0,01	< 1	0,15	67	< 0,5
2. AZS – wkn 1-3	< 0,02	0,54	16,2	< 0,01	< 1	0,22	71	< 0,5
2. AZS – wkn 4-6	< 0,02	< 0,5	21,0	< 0,01	< 1	0,20	60	< 0,5
2. AZS – wkn 7-9	< 0,02	0,52	11,8	< 0,01	< 1	0,18	59	< 0,5

**Tabel B** Gehalten aan zware metalen (in mg/kg) op productbasis in de monsters van Beukergist en aardappelzetmeelslib tijdens de eerste twee proeven

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
1. BG – wkn 1-3	< 0,02	< 0,5	3,8	< 0,01	< 1	0,15	9	< 0,5
1. BG – wkn 4-6	< 0,02	< 0,5	9,6	< 0,01	< 1	0,58	16	< 0,5
1. BG – wkn 7-9	< 0,02	< 0,5	2,2	< 0,01	< 1	< 0,1	8	< 0,5
2. AZS – wkn 1-3	0,15	< 0,5	2,9	< 0,01	< 1	0,61	9	< 0,5
2. AZS – wkn 4-6	< 0,02	10,4	3,3	< 0,01	5,1	0,61	16	< 0,5
2. AZS – wkn 7-9	0,04	2,6	2,1	< 0,01	1,7	1,10	11	< 0,5

**Tabel C** Gehalten aan zware metalen (in mg/kg) op productbasis in het digestaat aan het einde van de eerste proef

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	As
Digestaat Beukergist	< 0,02	< 0,5	11,5	< 0,01	< 1	< 0,1	58	< 0,5

**Bijlage 2 Samenstellingeisen volgens BOOM**

**Tabel A** Samenstellingeisen voor de gehalten aan zware metalen in zuiveringslib (LNV, 2006)

	gehalte (mg/kg ds)
Cadmium (Cd)	≤ 1,25
Chroom (Cr)	≤ 75
Koper (Cu)	≤ 75
Kwik (Hg)	≤ 0,75
Nikkel (Ni)	≤ 30
Lood (Pb)	≤ 100
Zink (Zn)	≤ 300
Arseen (As)	≤ 15

**Tabel B** Samenstellingeisen voor de gehalten aan zware metalen in compost (LNV, 2006)

	gehalte (mg/kg ds)
Cadmium (Cd)	≤ 1
Chroom (Cr)	≤ 50
Koper (Cu)	≤ 60
Kwik (Hg)	≤ 0,3
Nikkel (Ni)	≤ 20
Lood (Pb)	≤ 100
Zink (Zn)	≤ 200
Arseen (As)	≤ 15

**Tabel C** Samenstellingeisen voor de gehalten aan zware metalen in zeer schone compost (LNV, 2006)

	gehalte (mg/kg ds)
Cadmium (Cd)	≤ 0,7
Chroom (Cr)	≤ 50
Koper (Cu)	≤ 25
Kwik (Hg)	≤ 0,2
Nikkel (Ni)	≤ 10
Lood (Pb)	≤ 65
Zink (Zn)	≤ 75
Arseen (As)	≤ 5

**Bijlage 3 Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas**

**Tabel A** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van vergisting van vleesvarkensmest

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	32	0	0
2	32	0	30
3	33	120	50
4	35	200	45
5	26	150	58
6	30	0	96
7	40	0	42

**Tabel B** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van covergisting van vleesvarkensmest met beukergist

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	33	0	48
2	35	0	40
3	33	0	20
4	37	120	10
5	50	> 300	10
6	32	> 300	0
7	n.g.	n.g.	n.g.
8	35	> 300	0
9	37	250	10

n.g. = niet gemeten

**Tabel C** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van covergisting van vleesvarkensmest met aardappelzetmeelslib

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	33	250	10
2	35	200	15
3	35	230	15
4	35	230	15
5	35	200	15
6	35	200	15
7	35	180	15
8	35	180	15
9	34	190	15

**Tabel D** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van covergisting van vleesvarkensmest met Kwalizuivel

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	35	180	10
2	35	200	15
3	32	850	10
3	30	400	10
4	30	280	10
5	28	30	0
6	30	140	0
7	30	180	0
8	32	160	10
9	45	80	10
10	30	300	20
11	30	200	20

**Tabel E** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van covergisting van vleesvarkensmest met maïsweekwater

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	35	200	5
2	35	210	5
3	35	210	5
4	36	280	0
5	36	250	0
6	37	30	0
7	37	500	0
8	37	300	0
9	37	300	0

**Tabel F** Meetresultaten van de CO<sub>2</sub>-, H<sub>2</sub>S- en NH<sub>3</sub>-concentratie in het biogas gedurende de periode van covergisting van vleesvarkensmest met rodekoolconcentraat

Week	CO <sub>2</sub> (%)	H <sub>2</sub> S (ppm)	NH <sub>3</sub> (ppm)
1	35	150	0
2	35	150	5
3	42	180	0
4	40	190	0
5	38	150	5
6	40	150	0
7	40	180	0
8	n.g.	n.g.	n.g.
9	n.g.	n.g.	n.g.

n.g. = niet gemeten

#### Bijlage 4 Gebruikte afkortingen

DS =	drogestof
OS =	organische stof
C/N =	koolstof-stikstof
N =	stikstof
Ammonium-N =	ammonium-stikstof
CZV =	chemisch zuurstofverbruik
VV =	vluchtige vetzuren
Nm <sup>3</sup> =	normaal-kuub
CH <sub>4</sub> =	methaan
hPa =	hecto Pascal
No <sub>x</sub> =	stikstofoxiden
CO =	koolmonoxide
H <sub>2</sub> =	waterstof
WKK =	warmtekrachtkoppelinginstallatie



## Literatuur

- Angelidaki, I. en W. Sanders, 2004. Assessment of the anaerobic biodegradability of macropollutants. *Reviews in the Environmental Science and Biotechnology* 3: 117-129.
- Ashmann, V., R. Kissel en A. Gronauer, 2005. Effizienz und abgasverhalten von biogasbetriebenen BHKW. In: *Biogas - Nachwachsende rohstoffe – Neue wege für die landwirtschaft*. 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Nürnberg, Duitsland. Pag. 140-147.
- De Boer, H.C., 2004. Stikstoflevering uit onvergiste en vergiste runderdrijfmest na zodebemesting van grasland op zware zeeklei. *Animal Sciences Group, Wageningen UR, Lelystad. PraktijkRapport Rundvee 51*.
- De Boer, H.C. en M. Timmerman, 2006. Stikstofopname door gras uit vijf co-vergiste varkensdrijfmesten in een geconditioneerde potproef. *Animal Sciences Group, Wageningen UR, Lelystad. Rapport 19*.
- FNR, 2004. Handreichung biogasgewinnung und –nutzung. *Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V., Leipzig, Duitsland*.
- Kaparaju, P. en J. Rintala, 2005. Anaerobic co-digestion of potato tuber and its industrial by-products with pig manure. *Resources, Conservation and Recycling* 43: 175-188.
- Keymer, U. en A. Schilcher, 1999. Überlegungen zur errechnung theoretischer gasausbeuten vergärbare substraten in biogasanlagen. *Landtechnik-Bericht nr. 32. Freising, Duitsland*.
- KTBL, 2005. Gasausbeute in landwirtschaftlichen biogasanlagen. *Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt, Duitsland*.
- Linke, B. en P. Mähnert, 2005. Einfluss der raumbelastung auf die gasausbeute von gülle und nachwachsenden rohstoffen. In: *Biogas - Nachwachsende rohstoffe – Neue wege für die landwirtschaft*. 14. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V., Nürnberg, Duitsland. Pag. 33-43.
- LNv, 2004. Wijziging meststoffenbeschikking 1977. *Staatscourant* 2004, nr. 112/pag. 16.
- Os, R.J.H.L. van, J.A.G. Frijns, E.H.M. van Zundert, A.J.F. Brinkman, H.J. Croeze, J.T.W. Vroonhof, R.W. Melse, A.H.M. Veeken, H.V.M. Hamelers, 2003, TEWI-benadering mestverwerking en –verwerking, Grondmij, De Bilt.
- RIVM, 2007. Milieu & Natuur Compendium. [www.milieuennatuurcompendium.nl](http://www.milieuennatuurcompendium.nl).
- Schrade, S., H. Oechsner, C. Pekrun en W. Claupein, 2003. Influence of the biogas process on the germinability of seeds. *Landtechnik* 58 (2): 90-91.
- Tilburg, X. van, J.W. Cleijne, E.A. Pfeiffer, S.M. Lensink en M. Mozaffarian, 2007. Technische-economische parameters van duurzame elektriciteitsopties in 2008-2009. ECNE—07-069. ECN, Petten.
- Timmerman, M. en M.A.H.H. Smolders, 2003. Bezinklagen en bemonstering van varkensmest. *Animal Sciences Group, Wageningen UR, Lelystad. PraktijkRapport Varkens 21*.
- Timmerman, M., 2004. Ammoniak- en geuremissie van vergiste mest. *Animal Sciences Group, Wageningen UR, Lelystad. Rapportage Opdrachtgever*.
- Timmerman, M., H.J.C. van Dooren en G. Biewenga, 2005. Mestvergisting op boerderijschaal. *Animal Sciences Group, Wageningen UR, Lelystad. PraktijkRapport Varkens 42*.
- West, M. en J. Harrison, 1999. *Bayesian Forecasting and Dynamic Models*. Second edition. Springer. New York.
- Zeeman, G., 2006. Persoonlijke mededeling. *Sectie Milieutechnologie, Wageningen Universiteit en Researchcentrum*