

Animal Sciences Group

Kennispartner voor de toekomst



process for progress

Rapport 184

Ontwikkeling duurzaamheidsmaatlat

Covergisting van dierlijke mest met bijproducten

December 2008



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR

Colofon

Uitgever

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

Redactie

Communication Services

Aansprakelijkheid

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

Liability

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

Losse nummers zijn te verkrijgen via de website.



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

Abstract

In this research an existing sustainability index was supplemented by assessing the climate change and energy production of various combinations of co-digestion of animal manure with by-products.

Keywords

Codigestion, pig manure, byproducts, green house gases, renewable energy production

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteurs

M.A. Thomassen
K.B. Zwart

Titel

Ontwikkeling duurzaamheidsmaatlat
Covergisting van dierlijke mest met bijproducten

Samenvatting

In dit onderzoek is de duurzaamheidsmaatlat voor covergisting van dierlijke mest ontwikkeld door ESG-WUR, uitgebreid met de combinaties van covergisting met de bijproducten: aardappelpersvezels, aardappelzetmeelslib, glycerine en bietenstaartjes.

Trefwoorden

Covergisting, varkensmest, bijproducten, broeikasgassen, hernieuwbare energieproductie



ANIMAL SCIENCES GROUP
WAGENINGEN UR

Rapport 184

Ontwikkeling duurzaamheidsmaatlat

Development sustainability index
Co-digestion animal manure with byproducts

M.A. Thomassen

K.B. Zwart

December 2008

Samenvatting

Energieopwekking door middel van biogasproductie door covergisting van mest is geïnitieerd als gevolg van een toekomstig tekort aan fossiele energie en daaruit voortvloeiende stimuleringsmaatregelen van de overheid. De opgewekte energie door mestvergisting wordt aangeduid als duurzame of hernieuwbare energie, naast zonne- en waterenergie. Covergisting van mest draagt hiermee bij aan de nationale en Europese doelstelling om een aandeel van 20% hernieuwbare energie te bereiken in 2020. In het licht van het algemeen streven naar een duurzame landbouw en veehouderij is er behoefte aan kennis over de duurzaamheid van energieopwekking door covergisting van mest met bijproducten als cosubstraat. Een ketenbenadering kan hiervoor goede handvaten geven.

Binnen ESG-WUR is een duurzaamheidsmaatlat in ontwikkeling, die gericht is op covergisting met producten van energieteelt. Dit onderzoek vult deze maatlat aan met covergisting van dierlijke mest met bijproducten. Dit onderzoek richt zich op energieproductie en de milieuaspecten broeikaseffect, ammoniak en mineralenoverschotten. Hierbij relateert dit onderzoek aan de twee Cramer-criteria: 1) reductie van broeikasgassen en 2) behoud van milieukwaliteit. Het doel van het onderzoek was om inzicht te krijgen in de milieubelasting, met de nadruk op het broeikaseffect, van verschillende combinaties van covergisting van mest met bijproducten in vergelijking tot het gebruik van energiegewassen als cosubstraat.

Bij de berekeningen is uitgegaan van een vergister op boerderijschaal met een totaal volume van 36.000 m³. De combinaties vergisting van varkensdrijfmest met een aandeel snijmaïs en de bijproducten aardappelzetmeelslib, aardappelpersvezels, bietenstaartjes of glycerine zijn onderzocht op basis van de levenscyclusanalyse (LCA) methodiek. Hiervoor zijn de teeltgegevens van het hoofdproduct in kaart gebracht, naast het verwerkingsproces van het hoofdproduct (zetmeelaardappels, koolzaad en suikerbieten), transport, aanwending digestaat, en de biogasproductie van de bijproducten is bepaald.

De energieopbrengst blijkt het hoogst bij glycerine als bijproduct, gevolgd door aardappelzetmeelslib en bietenstaartjes, en was het laagst bij aardappelpersvezels.

Volgens Cramer-criteria moet de netto emissiereductie ten opzichte van fossiele energie, inclusief toepassing, ten minste 30% zijn. Alle combinaties van covergisting met bietenstaartjes en glycerine voldoen aan dit criterium. Covergisting van aardappelzetmeelslib voldoet ook aan dit criterium bij een aandeel van 10% en 25%, terwijl covergisting van aardappelpersvezel alleen hieraan voldoet bij een aandeel van 10%. In 2011 is deze emissiereductie gesteld op 50%. Het blijkt dat covergisting van varkensmest in combinatie met een groot aandeel (40%) bietenstaartjes kan voldoen aan dit criterium in 2011. Voor de andere bijproducten geldt dat alleen covergisting van varkensmest in combinatie met ten hoogste 10% glycerine, aardappelpersvezel of aardappelzetmeelslib naast een cosubstraat met een lage broeikasgasemissie en hoge biogasproductie, zoals snijmaïs, kan voldoen aan dit criterium in 2011.

Covergisting van het energiegewas snijmaïs heeft een hogere emissiereductie van broeikasgassen ten opzichte van fossiele energie bij een aandeel van 50%, in vergelijking tot alle onderzochte combinaties van covergisting met bijproducten. Echter, het gebruik van energiegewassen concurreert meer met voedselvoorziening in vergelijking tot het gebruik van bijproducten als cosubstraat.

In dit onderzoek is massa-allocatie toegepast en is uitgegaan van vaste waarden voor biogasproductie. Het wordt aanbevolen om het vervolgonderzoek uit te breiden met de toepassing van economische allocatie en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse, naast de kwantificering van meerdere milieuaspecten.

Summary

Bio-energy production by means of co digestion of animal manure was initiated as one solution to the future shortage of fossil energy. Co digestion contributes to the national and European goal to reach a share of 20% renewable energy in 2020. The question is, how sustainable is renewable energy? A need exists to gain insight into the sustainability of co-digestion of animal manure. Various combinations of co-digestion are possible, with a growing focus on use of by-products. The environmental impact of these combinations of co-digestion, however, is unknown. The environmental impact can be assessed by means of an integral chain analysis.

A sustainability index of different ways of co-digestion of manure is developed by ESG-WUR. In this study, the existing sustainability index was supplemented by assessing the climate change and energy production of various combinations of co-digestion of animal manure with by-products. This study, therefore, relates to the two Cramer-criteria: 1) reduction of greenhouse gas emissions 2) maintenance of environmental quality. The goal of this study was to gain insight into the environmental impact, with a focus on climate change, of different ways of co digestion of manure with by products, compared to co digestion of energy crops.

All calculations were based on a farm scale digester with a total size of 36.000 m³. A Life Cycle Analysis (LCA) was performed of co digestion combinations of pig manure with maize and potato press fibres, potato starch mud, beet tails or glycerine. Data were collected of the different steps in the chain, e.g.; cultivation data of the main product, energy requirements of the processing industry, transport, biogas production.

Results showed co digestion of glycerine had the highest energy production, followed by potato starch mud and beet tails, whereas co digestion of potato press fibres had the lowest. According to the Cramer criteria, netto emission reduction of bio energy with respect to fossil energy must be at least 30%. All analysed combinations of co digestion with beet tails and glycerine complied with this requirement. Co digestion of potato starch mud only complied with this requirement when the share was 10% or 25%, whereas co digestion of potato press fibres only complied with a share of 10%. In 2011 this Cramer criterion will be changed to 50%. Results show co digestion of a big share of beet tails (40%) can comply with this new requirement. Only co digestion of a small share of the other by products (10%) combined with a co substrate with a low emission of greenhouse gases and a high biogas production, such as maize, can comply with this new criterion in 2011.

Co digestion of the energy crop maize (share of 50%) resulted in a higher reduction of greenhouse gas emission with respect to fossil energy compared to all combinations of co digestion with by products. Co digestion of energy crops, however, compete more with food supply compared to by products of processing industries.

In this study, mass allocation was applied, and no variable biogas productions were taken into account. It is recommended to expand the calculations to include economic allocation and perform sensitivity and uncertainty analyses in future research.

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
2	Materiaal en Methode	2
2.1	Uitgangspunten mestvergisting.....	2
2.2	Systeemanalyse	2
2.3	Bijproducten	2
2.3.1	<i>Aardappelzetmeelslib</i>	2
2.3.2	<i>Aardappelpersvezels</i>	3
2.3.3	<i>Bietenstaartjes</i>	3
2.3.4	<i>Glycerine</i>	4
2.4	Biogasproductie	4
2.5	Combinaties van mest en cosubstraat	5
3	Resultaten	6
3.1	Energieopbrengst.....	6
3.2	Besparing broeikasgassen	6
3.3	Uitstoot broeikasgassen ten opzichte van fossiele energie	8
3.4	Mineralenbalans en ammoniak	8
4	Discussie en conclusies	10
	Literatuur	12

1 Inleiding

Achtergrond

Energieopwekking door middel van biogasproductie door covergisting van mest is geïnitieerd als gevolg van een toekomstig tekort aan fossiele energie en daaruit voortvloeiende stimuleringsmaatregelen van de overheid. De belangrijkste stimuleringsmaatregel was de MEP-regeling. Anno 2007 waren er ruim 60 mestvergisters, en 45 in aanbouw, samen verantwoordelijk voor een vermogen van 45 megawatt. De nieuwe Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie (SDE) voor groene stroom uit covergisting van mest valt aanzienlijk lager uit dan de voorgaande MEP-regeling, waardoor in 2008/2009 een kleine toename aan mestvergisters wordt verwacht [1].

De opgewekte energie door mestvergisting wordt aangeduid als duurzame of hernieuwbare energie, naast zonne- en waterenergie. Verschillende milieuorganisaties geven energieopwekking uit mest echter het label 'niet-duurzaam', doordat ze de veehouderij als onduurzaam aanduiden [2]. De milieubelasting van de veehouderij staat inderdaad onder vuur. Het FAO-rapport 'Livestock's long shadow' in 2006 geeft aan dat de veehouderij veel bijdraagt aan het broeikas effect [3]. Het wereldwijde energievraagstuk initieert een competitie tussen het gebruik van diverse biomassaströmen voor energieproductie of vlees-, melk- en eiproduktie. Daarnaast stelt het mondiale voedselvraagstuk de toepassing van energiegewassen voor de energieproductie, naast toepassing van akkerbouwgewassen voor diervoer, ter discussie.

In het licht van het algemeen streven naar een duurzame landbouw en veehouderij is er behoefte aan kennis over de duurzaamheid van energieopwekking door covergisting van mest.

Duurzaamheid is opgebouwd uit de drie pijlers 'people', 'planet' en 'profit'. De pijler 'planet' is kwantificeerbaar door met milieu-indicatoren de milieubelasting te bepalen. Eerder onderzoek laat zien dat de netto energieopbrengst van covergisting van mest wordt vergroot, naarmate meer cosubstraat wordt toegevoegd [4]. Hetzelfde onderzoek toont echter ook aan dat de emissie van broeikasgassen toeneemt, naarmate meer mais als cosubstraat wordt toegevoegd. Recente ontwikkelingen laten zien dat steeds meer gebruik wordt gemaakt van bijproducten uit de (voedingsmiddelen)verwerkende industrie als cosubstraat, in plaats van energiegewassen [5].

Inzicht is nodig in duurzaamheid van covergisting van mest met deze bijproducten als cosubstraat.

Een ketenbenadering kan hiervoor goede handvaten geven. Dit onderzoek richt zich op energieproductie en de milieuaspecten broeikas effect, ammoniak en mineralenoverschotten. Hierbij relateert dit onderzoek aan de twee Cramer-criteria 1) reductie van broeikasgassen en 2) behoud van milieukwaliteit [17].

Binnen ESG-WUR is een duurzaamheidsmaatlat in ontwikkeling, die gericht is op covergisting met producten van energieteelt. Dit onderzoek vult deze maatlat aan met covergisting van dierlijke mest met bijproducten.

Doelstelling van het project

De volgende doelstellingen zijn geformuleerd:

1. Uitbreiding van de bestaande duurzaamheidsmaatlat met covergisting van dierlijke mest met bijproducten.
2. Inzicht in de energieproductie en milieubelasting, met de nadruk op het broeikas effect, van verschillende combinaties van covergisting van mest met bijproducten.
3. Inzicht in verschillen in energieproductie en milieubelasting tussen gebruik van bijproducten of energiegewassen als cosubstraat bij covergisting van mest.

De opgedane kennis kan dienen om toekomstig beleid bij duurzame energie vorm te geven en is voor gebruikers een middel om afwegingen te maken voor covergisting van dierlijke mest.

2 Materiaal en Methode

2.1 Uitgangspunten mestvergisting

We gaan uit van een vergister op boerderijschaal met een totaal volume van 36.000 m³. Het eigen energieverbruik van de installatie is vastgesteld op 180 MJ per ton te vergisten mest en vloeibaar cosubstraat en 213 MJ per ton te vergisten overig materiaal. Er wordt uitgegaan van covergisting van varkensdrijfmest met de bijproducten. Voor meer details over technische kengetallen en uitgangspunten van de vergistinginstallatie, gebruikte mest en geteelde snijmais verwijzen we naar het Alterra-rapport 1437 [4].

2.2 Systemanalyse

De gebruikte methode is gebaseerd op de levenscyclusanalysemethodiek (LCA). LCA is een analysemethode die de milieubelasting van producten en diensten over hun levensloop kwantificeert. Hierbij worden de verschillende stadia (grondstofwinning, productie, transport, gebruik, en afvalverwerking) nauwkeurig in kaart gebracht. Voor elk stadium wordt een inventarisatie gemaakt van het energie- en materiaalverbruik en van de emissies naar de omgeving. De systeemgrenzen zijn binnen dit project dusdanig gekozen, dat de milieubelasting van de teelt van het hoofdgewas, het productieproces van het hoofdproduct waarbij de bijproducten worden geproduceerd, de energieproductie zelf en de toediening van het digestaat zijn meegenomen. Er is uitgegaan van massa-allocatie. Dit betekent dat de milieubelasting van multifunctionele processen is verdeeld naar het hoofdproduct en bijproduct, naar ratio op basis van hoeveelheden.

2.3 Bijproducten

Verschiede bijproducten, ook wel reststromen genoemd, worden tegenwoordig als cosubstraat met dierlijke mest vergist. Uit een inventarisatie van ASG praktijkcentra Sterksel (varkensbedrijf) en Nij Bosma Zathe (melkveebedrijf) bleek, dat de bijproducten aardappelproducten, graanresten, bietenstaartjes, glycerine naast koekmix in de praktijk worden gebruikt. In dit onderzoek is ervoor gekozen om aardappelzetmeelslib, aardappelpersvezels, bietenstaartjes en glycerine te kiezen als bijproduct, omdat hiervoor de benodigde gegevens beter in kaart konden worden gebracht.

Het probleem met graanresten was dat het een algemene benaming is voor allerlei restproducten. Het kan gaan om graanstof bij schoning, restanten van graan bij het lossen van zeeschepen of resten van de verwerking van verschillende granen (tarwe, gerst, rogge, haver). De mate van verontreiniging kan hierdoor sterk variëren, waardoor het asgehalte niet constant is. Het probleem met koekmix was dat het verschillende producten betreft, met verschillende verwerkingsstappen en verschillende akkerbouwgewassen als hoofdproduct. Voor beide producten geldt dat eerst een nadere karakterisatie nodig is om de biogasproductie te bepalen. Hieronder wordt per gekozen bijproduct de teeltgegevens en productiegegevens weergegeven.

2.3.1 Aardappelzetmeelslib

Aardappelzetmeel is een product dat ontstaat na het raffinageproces zetmeelwinning waarbij de aardappel wordt gesplitst in componenten. De voornaamste componenten van de aardappel zijn zetmeel, vezels en eiwit. De aardappel bestaat voor 80% uit vruchtwater; dit is water met daarin de opgeloste bestanddelen zoals eiwitten, suikers, organische zuren en mineralen. De volgende processtappen worden gevolgd, na de aanvoer van aardappelen, waar op basis van aardappelmonsters het zetmeelgehalte wordt bepaald (zie figuur 1):

Wasserij. De aardappelen worden met schoon water gewassen om het zand, de stenen en het loof te verwijderen. De aardappelen worden niet geschild.

Malerij. De aardappelen worden gemalen met aardappelraspen totdat een brij ontstaat. In deze stap komt het zetmeel, tot dan toe aanwezig in de plantencel, vrij.

Vezelwinning. De vezels worden van het zetmeel afgezeefd met een centrifuge, iets verder ontwaterd met een dekanter en nat aan de boeren afgeleverd (Natte vezels). Een gedeelte wordt niet direct afgezet. Om de houdbaarheid van deze vezels te verhogen worden deze verder ingedroogd (Vezel drogerij en Gedroogde vezels). Het filtraat is *vruchtwater* met zetmeelkorrels.

Zetmeel winning. In de zetmeelraffinage wordt het zetmeel uit het vruchtwater met het eiwit gescheiden door hydrocyclonen. Tevens worden de laatste fijne vezels die door de zeven gekomen zijn, verwijderd. Dit gebeurt door met schoon water het vruchtwater en het eiwit te verdringen. Zodoende ontstaat na drogen (drogerij) het schone eindproduct zetmeel.

Aardappelzetmeelslib is zetmeelbevattend proceswater dat vrijkomt tijdens dit proces.

Tabel 1 laat de teeltgegevens en gegevens van de zetmeelwinning zien. De gemiddelde aardappelopbrengst van zetmeelaardappelen was 40000 kg/ha in Nederland; dit betekent 14000 kg ds/ha bij een drogestofgehalte van 35% [6]. 1 ton aardappels verwerkt in de zetmeelindustrie geeft 0,23 ton zetmeel, 0,14 ton persvezels en 0,015 ton aardappeleiwit [7]. Er wordt aangenomen dat 5% van het gewonnen zetmeel in het afvalwater terecht komt. Hierdoor is de opbrengst van aardappelzetmeelslib 460 kg ds/ha ($0,23 \times 40000 \times 0,05$).

Tabel 1 Teeltgegevens aardappelen en gegevens productieproces zetmeelwinning

Teeltgegevens		Zetmeelwinning			
Opbrengst aardappelen	kg ds/ha	14000	Electriciteit /kg aardappelzetmeelslib	MJ	1,6
Opbrengst zetmeelslib	kg ds/ha	460	Aardgas /kg aardappelzetmeelslib	MJ	3,4
Opbrengst persvezels	kg ds/ha	5600	Electriciteit /kg aardappelpersvezel	MJ	2,6
Dieserverbruik	l/ha	252	Aardgas /kg aardappelpersvezel	MJ	5,6
Kunstmestverbruik	kg N/ha	240			
Kunstmestverbruik	kg P ₂ O ₅ /ha	95			

De totale massaproductie van hoofd- en bijproducten is 0,385 ton product. De massa-allocationfactoren zijn:

- Zetmeel = $0,2185/0,385 = 57\%$
- Aardappelzetmeelslib = $0,0115/0,385 = 3\%$
- Aardappelpersvezels = $0,1400/0,385 = 36\%$
- Aardappeleiwit = $0,015/0,385 = 4\%$

De massa-allocationfactor is vastgesteld op 3% voor aardappelzetmeelslib.

Het transport per vrachtwagen is geschat op 75 km enkele reis aanvoer aardappelen en 150 km bij distributie van het eindproduct. Het energieverbruik voor de zetmeelwinning was gegeven per kg geproduceerde zetmeel en bedroeg 1,6 MJ elektriciteit en 3,4 MJ aardgas per kg geproduceerd aardappelzetmeel [8].

2.3.2 Aardappelpersvezels

Aardappelpersvezels is een product dat ontstaat bij de winning van zetmeel uit aardappelen (zoals hierboven beschreven). De aardappelen worden bij binnenkomst gewassen en daarna geraspt. Door het raspen wordt de celwandstructuur kapotgemaakt en kan het zetmeel beter worden gewonnen. Het sap wordt vervolgens afgescheiden. Wat overblijft wordt hierna gescheiden in vezels en zetmeel. De vezels worden geperst tot een drogestof van circa 16%.

1 ton aardappels verwerkt in de zetmeelindustrie geeft 0,23 ton zetmeel en 0,14 ton persvezels. Hierdoor is een opbrengst van aardappelzetmeel van 5600 kg ds/ha aangehouden ($0,14 \times 40000$). Het energieverbruik voor de zetmeelwinning is bekend per kg geproduceerde zetmeel. Dit is omgerekend naar kg geproduceerde aardappelpersvezels, zie tabel 1:

$$(1,6 \times 0,23)/0,14 = 2,6 \text{ MJ electriciteit}$$

$$(3,4 \times 0,23)/0,14 = 5,6 \text{ MJ aardgas}$$

De massa-allocationfactor is vastgesteld op 36% voor aardappelpersvezels.

2.3.3 Bietenstaartjes

Bietenstaartjes zijn de bladeren, bladstelen, puntjes en stukken van suikerbieten. Bietenstaartjes komen vrij in de eerste fase van het productieproces van suiker. De gemiddelde opbrengst van suikerbieten in Nederland is 74000 kg/ha, dit is 19240 kg ds/ha bij een drogestofgehalte van 26% [6]. Uit 1 ton suikerbieten komt ongeveer 15 kg bietenstaartjes, dit komt neer op 1110 kg ds/ha. Tabel 2 toont de teeltgegevens van suikerbieten.

Tabel 2 Teeltgegevens suikerbieten [6]

Teeltgegevens		
Opbrengst suikerbieten	kg ds/ha	19240
Opbrengst bietenstaartjes	kg ds/ha	1110
Dieserverbruik	l/ha	62
Kunstmestverbruik	kg N/ha	150
Kunstmestverbruik	kg P ₂ O ₅ /ha	90

Uit 1 ton suikerbieten wordt verder 140 kg suiker, 58 kg gedroogde bietenpulp, 40 kg melasse en 60 kg betacal (koolzure kalk gemengd met enige organische stof die ontstaat bij de zuivering van ruwsap uit bieten) geproduceerd. De totale massaproductie van hoofd- en bijproducten is 0,313 ton product. De massa-allocatiefactor voor bietenstaartjes is vastgesteld op 5% (0,015/0,313). Het transport per vrachtwagen is totaal geschat op 100 km aanvoer suikerbieten en bij distributie van het eindproduct.

2.3.4 Glycerine

Glycerine is een product dat ontstaat bij de winning van biodiesel uit koolzaad. Biodiesel wordt gemaakt door de koolzaad warm te persen en daarna te veresteren. In Europa is Duitsland de grootste biodieselproducent. In 2005 was Duitsland verantwoordelijk voor ruim 50% van alle koolzaadteelt (1669 Megaton) in de EU-25. Daarom hebben we ervoor gekozen om uit te gaan van Duitse teelt- en productiegegevens [9]. Tabel 3 laat de teeltgegevens van koolzaad en de gegevens van de biodiesel productie zien.

Tabel 3 Teeltgegevens koolzaad en gegevens productieproces biodiesel

Teeltgegevens		Biodieselproductie	
Opbrengst koolzaad kg ds/ha	2867	Oliepersing electriciteit kWh/ton koolzaad	42
Opbrengst glycerine kg ds/ha	143	Oliepersing aardgas MJ/ton koolzaad	708
Dieselvebruik l/ha	83	Verestering electriciteit kWh/ton koolzaadolie	41
Kunstmestverbruik kg N/ha	239	Verestering aardgas MJ/ton koolzaadolie	899
Kunstmestverbruik kg P ₂ O ₅ /ha	128		

De gemiddelde opbrengst van koolzaad tussen 2001-2005 was 3413 kg per jaar (uitgaande van een drogestofgehalte van 84% komt dit op 2867 kg ds/ha). 1 ton koolzaad resulteert in 395,6 kilo koolzaadolie en 604,4 ton koolzaadschroot. Vervolgens resulteert 1 ton koolzaadolie in 106,1 kg glycerine, 972,7 kg koolzaadmethylester en 16,4 kg kaliumfosfaat. Uit 1 ton koolzaad wordt dus ongeveer 42 kg glycerine geproduceerd. De opbrengst van glycerine komt hiermee op 143 kg ds/ha (3,4 x 42). Het dieselvebruik, waarbij ploegen en oogsten de meeste energie kost, is vastgesteld op 83 liter/ha (zie tabel 3).

Het energieverbruik bij de oliepersing bedraagt 42 kWh elektriciteit en 708 MJ aardgas per ton koolzaad.

De massa-allocatiefactor om de milieubelasting van de oliepersing en koolzaadteelt toe te schrijven aan glycerine is 3%. Het energieverbruik van de verestering bedraagt ruim 41 kWh en 899 MJ aardgas per ton geproduceerde olie. De massa-allocatiefactor om de milieubelasting van het veresteringsproces toe te schrijven aan glycerine is 9,7% (106,1 / (106,1 + 972,7 + 16,4)). Het totale transport van glycerine is vastgesteld op 150 km, gebaseerd op rendabele transportafstanden voor een mestvergister in Nederland.

2.4 Biogasproductie

De biogasproductie is berekend op basis van CVB voederwaarde veevoerders aan de hand van het organische stofgehalte [11,12]. Tabel 4 geeft de uitkomsten per bijproduct van biogasproductie, gebaseerd op het drogestofgehalte, organische stofgehalte en methaangehalte. De berekende waarde van 0,31 m³ CH₄/kg os van bietenstaartjes ligt iets lager dan gevonden literatuurwaarden van 0,34-0,37 m³ CH₄/kg os [13,14].

Tabel 4 Biogasproductie bijproducten

Biogasproductie	m ³ CH ₄ /kg os	Aardappelzetmeel	Aardappelpersvezels	Bietenstaartjes	Glycerine
		0,37	0,34	0,31	0,43

Voor glycerine is een richtwaarde van 0,850 m³ biogas/kg os gehanteerd, waarbij aangenomen is dat het os-gehalte 95% van het drogestofgehalte bedraagt [15].

2.5 Combinaties van mest en cosubstraat

Er is voor gekozen om varkensdrijfmest (van vleesvarkens) te combineren met snijmais en een bijproduct als cosubstraat. Het aandeel bijproduct is gevarieerd van 10%, 25% tot 40%. Tabel 5 geeft een overzicht van de verschillende combinaties die zijn onderzocht. Hierbij is uitgegaan van 18000 m³ varkensdrijfmest en 18000 ton cosubstraat variërend van 14400-3600 ton snijmais en 3600-14400 ton bijproduct. De warmtebenutting is in alle situaties op 100% gesteld.

Tabel 5 Verschillende combinaties van covergisting van mest met snijmais en bijproducten

Scenario	Mest	%	Mais	%	Bijproduct ¹	%
1	Varkensmest	50		50		
2		50		40		10
3		50		25		25
4		50		10		40

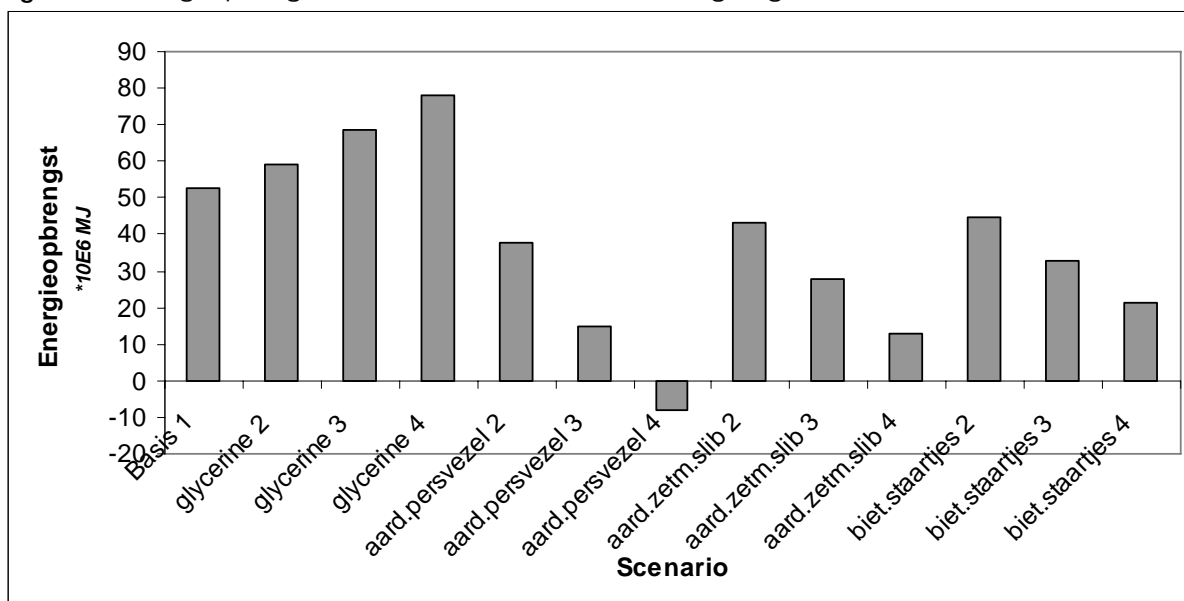
¹ Scenario's 2, 3 en 4 zijn onderzocht voor alle vier de bijproducten: aardappelzetmeelslib, aardappelpersvezels, bietenstaartjes en glycerine

3 Resultaten

3.1 Energieopbrengst

De netto energieopbrengst is gedefinieerd als de energieproductie van de vergister minus het energieverbruik van de vergistinginstallatie, tijdens de teelt, het verwerkingsproces van het hoofdproduct, en het gebruik van digestaat (transport en aanwending). Figuur 1 laat deze netto energieopbrengst zien voor de verschillende combinaties.

Figuur 1 Energieopbrengst van verschillende combinaties covergisting van mest



De basisreferentie van covergisting van 50% varkensmest en 50% snijmais geeft een energieopbrengst van 53×10^6 MJ. Deze is vrij gunstig door een combinatie van factoren, waaronder een vrij lage energieconsumptie voor de teelt en een betrekkelijk hoge opbrengst snijmais per hectare. De energieopbrengst van glycerine is hoger voor de drie de gekozen scenario's, en varieert van 59×10^6 MJ (10% glycerine) tot 78×10^6 MJ (40% glycerine). Dit wordt veroorzaakt door de relatief hoge biogasproductie (zie tabel 5).

De hoge energieproductie lijkt hierdoor op te wegen tegen het energieverbruik van de biodieselproductie, gerelateerd aan de glycerineopbrengst door het toepassen van de massa-allocatie. De energieopbrengst van de overige bijproducten laat een dalend verloop zien, naarmate het aandeel bijproduct hoger wordt.

De energieopbrengst van aardappelpersvezel is zelfs negatief (-8×10^6 MJ) bij de combinatie 40% aardappelpersvezel en 10% varkensmest. Dit komt deels doordat een groot aandeel van het energieverbruik wordt toegewezen aan aardappelpersvezel als gevolg van de relatief hoge massa-allocatiefactor van 36%.

3.2 Besparing broeikasgassen

In de verschillende stadia van het proces covergisting van mest vindt uitstoot van broeikasgassen plaats. Daarnaast wordt uitstoot van broeikasgassen bespaard, o.a. door de vervanging van fossiele brandstoffen. Tabel 6 laat de verschillende stadia zien en geeft aan of er uitstoot (U) of besparing (B) plaatsvindt van broeikasgassen.

Tijdens de teelt worden pesticiden en kunstmest gebruikt. De broeikasgassen die bij de productie en toediening hiervan vrijkomen, zijn meegenomen in de analyse. Het lekverlies, in de vorm van methaanemissie, uit de vergistinginstallatie is gesteld op 1%. De methaanemissie van vergiste mest is gesteld op 5% van onvergiste mest. De methaan en lachgasemissies van (kort) opgeslagen bijproducten en gebruik van verse mest is gesteld op 5% van die van lang opgeslagen mest. De vermeden CO₂-emissie door de besparing op het gebruik van fossiele brandstoffen is gesplitst in een deel elektriciteit en een deel warmte, uitgaande van 0,0694 kg CO₂-equivalenten/MJ elektriciteit en 0,056 kg CO₂-equivalenten/MJ aardgas.

Deze emissiefactoren zijn ook aangehouden voor het elektriciteit- en aardgasverbruik tijdens de verwerkingsprocessen zetmeelwinning en biodieselproductie. De uitstoot van methaan, lachgas en koolstofdioxide is uitgedrukt in CO₂-equivalenten met behulp van de omrekeningsfactoren 21 voor methaan en 310 voor lachgas.

Tabel 6 Verschillende stadia van covergisting van mest waarbij uitstoot (U) of besparing (B) van broeikasgassen plaatsvindt

Onderdeel	Subonderdeel	Uitstoot of Besparing	
Teelt	Productie gewas	U	
	Transport	U	
	Opslag mest en co-substraat	B ¹	
Verwerking hoofdproduct	Energieverbruik	U	
	Vergister	Opslag mest en co-substraat	U
		Lekverlies	U
		Energieverbruik ²	U
Gebruik digestaat	Energieproductie	B	
	Transport	U	
	Aanwending	U	

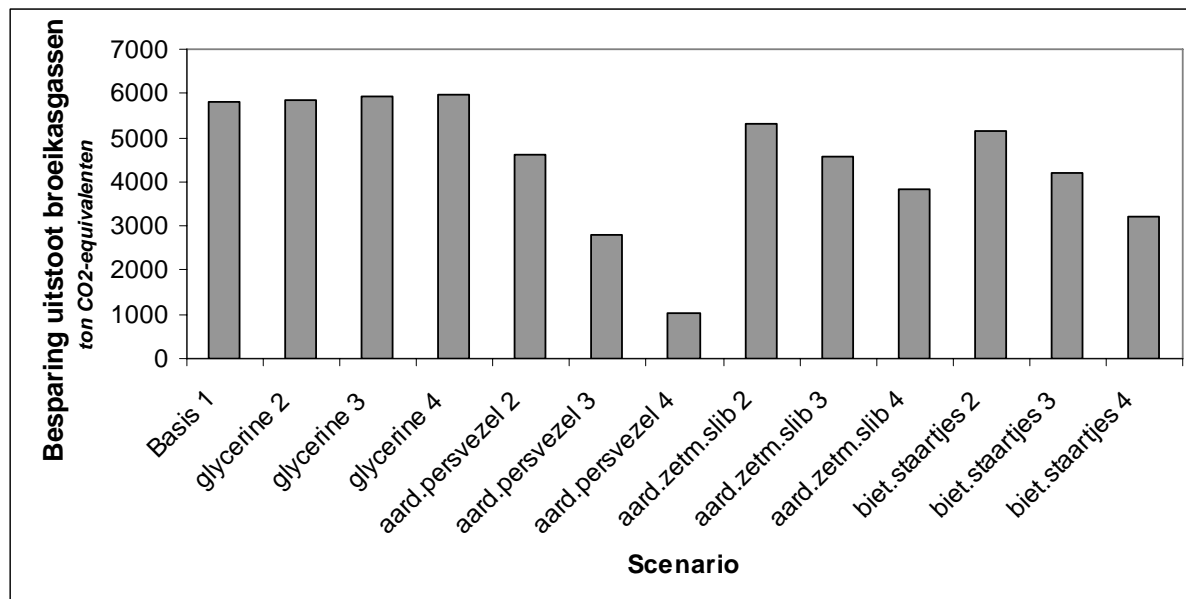
¹ In de eerste plaats is dit uitstoot van broeikasgassen, maar deze is aanzienlijk lager (95%) dan in een normale situatie waar mest lang wordt opgeslagen, waardoor deze toegerekend wordt aan besparing.

² Hierbij is de warmte die nodig is tijdens het gebruik van de vergister verondersteld als klimaatneutraal (korte koolstofkringloop), terwijl is aangenomen dat de elektriciteit voor het gebruik van de vergister wordt onttrokken uit fossiele energiebronnen, en deze CO₂-emissie is toegerekend aan de covergisting.

De netto besparing van broeikasgassen is berekend met de volgende formule: $\Sigma B - \Sigma U$.

Figuur 2 laat deze netto CO₂-besparing per combinatie zien.

Figuur 2 Netto CO₂-besparing per combinatie



Covergisting van 50% varkensmest en 50% snijmaïs geeft een besparing van 5795 ton CO₂-equivalenten. Dit komt voornamelijk door de relatief lage uitstoot van broeikasgassen per kg product tijdens de teelt. De uitstoot van broeikasgassen tijdens teelt en verwerking van de combinaties met glycerine is hoger, met name door de lage opbrengst glycerine per kg geteelde en verwerkte koolzaad. De besparing als gevolg van de hoge energieproductie van de vergister compenseert echter deze uitstoot, waardoor de besparing van de verschillende combinaties met glycerine oploopt van 5854 naar 5970 ton CO₂-equivalenten. De besparing van de verschillende combinaties met aardappelpersvezel is het laagst: 1028 ton CO₂-equivalenten bij een vergisting van 40% aardappelpersvezel. Dit wordt veroorzaakt door een combinatie van een relatief lage biogasproductie en een relatief hoge uitstoot van broeikasgassen tijdens de teelt en het verwerkingsproces en door de massa-allocatiefactor van ruim 36%.

De besparing aan broeikasgassen van aardappelzetmeelslib en bietenstaartjes laat een vergelijkbaar verloop zien. Bij aardappelzetmeelslib wordt dit voornamelijk veroorzaakt door de relatief lage biogasproductie en de relatief lage opbrengst aardappelzetmeelslib per kg geteelde en verwerkte zetmeelaardappel. Bij bietenstaartjes wordt de relatief lage biogasproductie gecompenseerd door de relatief lage uitstoot van broeikasgassen tijdens de teelt en het verwerkingsproces en door de massa-allocatiefactor van 5%.

3.3 Uitstoot broeikasgassen ten opzichte van fossiele energie

De broeikasgasbalans is gemaakt over de hele keten. Broeikasgasemissiereductie is één van de aanleidingen om duurzame energie uit biomassa te stimuleren. De uitstoot van broeikasgassen (zie tabel 6 voor de processen waar uitstoot plaatsvindt) is daarom gerelateerd aan de uitstoot van broeikasgassen tijdens de inzet van fossiele energie. De gekozen referentiewaarde is eenzelfde hoeveelheid geproduceerde elektriciteit en warmte uit fossiele energiebronnen [16]. Tabel 7 laat de uitstoot van broeikasgassen ten opzichte van deze fossiele referentie zien.

Tabel 7 Uitstoot van broeikasgassen van de verschillende combinaties covergisting (A) ten opzichte van de fossiele referentie (B), waarbij Cramer criteria $\leq 70\%$

Scenario		A/B x 100 %
Basis	1	39
	2	49
	3	59
	4	66
Aardappelpersvezel	2	50
	3	71
	4	104
Aardappelzetmeelslib	2	49
	3	62
	4	72
Bietenstaartjes	2	40
	3	41
	4	43

Tabel 7 laat zien dat de netto uitstoot van broeikasgassen van het basisscenario (50% varkensmest met 50% snijmaïs) 39% is ten opzichte van de fossiele referentie. De netto emissiereductie is hiermee 61%. Het aandeel aardappelpersvezel neemt toe, en de uitstoot van broeikasgassen neemt ook aanzienlijk toe ten opzichte van de fossiele referentie. Dit resulteert zodanig in een *toename* van broeikasgasemissie van 4% bij een aandeel van 40% aardappelpersvezel (scenario 4), in plaats van een reductie, ten opzichte van de fossiele referentie. Het bijproduct bietenstaartjes komt het meest gunstig uit. Hierbij is de netto emissiereductie 57% bij een aandeel van 40% bietenstaartjes (scenario 4).

3.4 Mineralenbalans en ammoniak

De nitraat- en fosfaatuitspoeling zijn berekend voor de teelt van de hoofdproducten met behulp van een perceelsbalans (input output). Hierbij wordt uitgegaan van de nutriënteninputs dierlijke mest, kunstmest (en stikstoffixatie en -depositie) op het perceel. Bij nitraatuitspoeling wordt hier de stikstofvervluchtiging als gevolg van lachgas en ammoniakemissie van afgetrokken. Vervolgens wordt de nutriëntenextractie (output) aan de hand van de stikstof- en fosforgehalten van de gewassen berekend. Tabel 8 laat de uitkomsten zien.

De ammoniakemissie is berekend uitgaande van een emissiefactor van 2,6% van de toegediende stikstof uit kunstmest en 13% van toegediende stikstof uit dierlijke mest, op basis van gemiddelde toedieningstechnieken voor de Nederlandse situatie.

Tabel 8 Ammoniakemissie en nitraat- en fosfaatuitspoeling tijdens teelt hoofdproduct [9,10]

	Aardappels	Suikerbieten	Koolzaad
Ammoniakemissie kg NH ₃ -N/ha	6,1	5,3	7,7
Nitraatuitspoeling kg NO ₃ -N/ha	0	29,9	22,4
Fosfaatuitspoeling kg P/ha	2	20,9	0,4

Bij de koolzaadteelt in Duitsland zijn verschillende emissiefactoren gehanteerd gebaseerd op de toegediende kunstmestsoorten, zoals 15% voor ureum en 2% voor ammonium nitraat [9].

Tabel 8 laat zien dat de zetmeelaardappelen de laagste mineralenuitspoeling heeft per hectare. De ammoniakemissie is het laagst voor suikerbieten, uitgedrukt per hectare. Echter, de milieubelasting die uiteindelijk wordt toegerekend aan het bijproduct, is afhankelijk van de opbrengst per hectare en massa-allocatie. Tabel 9 toont de ammoniakemissie en nitraat- en fosfaatuitspoeling per hoeveelheid bijproduct.

Tabel 9 Ammoniakemissie en nitraat- en fosfaatuitspoeling per hoeveelheid bijproduct

	Aardappels- persvezel	Aardappel- zetmeelslib	Bieten- staartjes	Glycerine
Ammoniakemissie ¹ kg NH ₃ -N/ton ds	0,52	0,42	0,42	1,6
Nitraatuitspoeling kg NO ₃ -N/ton ds	0	0	1,36	4,6
Fosfaatuitspoeling kg P/ton ds	0,13	0,13	0,95	0,08

¹ Dit is inclusief de ammoniakemissie tijdens de opslag van het cosubstraat (1% van totale hoeveelheid opgeslagen N). De ammoniakemissie uit de opslag van vleesvarkensdrijfmest is voor alle scenario's gelijk (2% van totale hoeveelheid opgeslagen N), en hier niet weergegeven.

Glycerine heeft de hoogste nitraatuitspoeling en ammoniakemissie per ton product, mede door de lage opbrengst van 143 kg droge stof per hectare en de intensieve koolzaadteelt door een veelvuldig gebruik aan kunstmest (zie tabel 3). De aardappelbijproducten hebben de laagste nitraat- en fosfaatuitspoeling, als gevolg van de hoge opbrengsten per hectare. Product bietenstaartjes heeft de hoogste fosfaatuitspoeling.

4 Discussie en conclusies

Discussie

Covergisting van mest is een energieproductiewijze die bijdraagt aan de lokale en nationale energievoorziening, naast de nationale en Europese doelstelling om een aandeel van 20% hernieuwbare energie te bereiken in 2020. Duurzaamheid is een breed begrip. In dit onderzoek zijn alleen de energieproductie en de milieubelasting in kaart gebracht, met een nadruk op het broeikaseffect.

De energieopbrengst is het hoogst bij glycerine als bijproduct en het laagst bij aardappelpersvezels, gevolgd door aardappelzetmeelslib en bietenstaartjes. Hoe meer van deze laatste drie bijproducten wordt toegediend, hoe lager de energieproductie wordt. De energieproductie is waarschijnlijk enigszins overschat doordat de warmtebenutting op 100% is gesteld. In de praktijk is dit vaak veel lager.

Volgens Cramer-criteria moet de netto emissiereductie ten opzichte van fossiele energie, inclusief toepassing, ten minste 30% zijn. De inzet van biomassa moet de broeikasgasemissie dus terugbrengen tot ten hoogste 70% van de broeikasgasemissie van de fossiele referentie [17]. Alle combinaties van covergisting met bietenstaartjes voldoen aan dit criterium. Daarnaast voldoen alle combinaties van covergisting met glycerine aan dit criterium, met een emissiereductie van 34% bij een aandeel van 40% glycerine. Covergisting van aardappelzetmeelslib voldoet ook aan dit criterium bij een aandeel van 10% en 25%, met een emissiereductie van respectievelijk 51 en 38%. In 2011 is deze emissiereductie gesteld op 50% [17].

Dit onderzoek toont aan dat covergisting van varkensmest in combinatie met een groot aandeel (40%) bietenstaartjes kan voldoen aan dit Cramer-criterium in 2011. Voor de andere bijproducten geldt dat alleen covergisting van varkensmest in combinatie met ten hoogste 10% glycerine, aardappelpersvezel of aardappelzetmeelslib naast een cosubstraat met een lage broeikasgasemissie en hoge biogasproductie (zoals snijmais) kan voldoen aan dit criterium in 2011.

Een ander Cramer-criterium is dat er inzicht moet zijn in de kwaliteit van het oppervlakte- en grondwater en emissies naar de lucht en dat voldaan moet worden aan de lokale wettelijke eisen [17]. In dit onderzoek is inzicht gegeven in de milieukwaliteit door nitraat- en fosfaatuitspoeling en de ammoniakemissie per bijproduct te kwantificeren. Hieruit bleek dat glycerine door de lage opbrengst een relatief hoge ammoniakemissie en nitraatuitspoeling heeft. Bietenstaartjes hebben de hoogste fosfaatuitspoeling. Deze uitkomst laat zien dat meerdere milieuaspecten in kaart moeten worden gebracht, omdat afwentelingen binnen de keten of tussen milieuaspecten plaats kunnen vinden: een gunstig effect op het ene duurzaamheidscriterium kan een negatief effect hebben op het andere.

In dit onderzoek is geen aandacht besteedt aan de overige Cramer-criteria: beschikbaarheid van biomassa voor andere doeleinden zoals bouwmaterialen en medicijnen, biodiversiteit, welvaart en welzijn. We kunnen stellen dat door bijproducten van de verwerkingsindustrie als cosubstraat te gebruiken, covergisting van mest minder concurreert met voedselvoorziening in vergelijking tot het gebruik van energiegewassen als cosubstraat. Covergisting van het energiegewas snijmais (met een aandeel van 50%) heeft daarentegen een hogere emissiereductie van broeikasgassen ten opzichte van fossiele energie, in vergelijking tot alle onderzochte combinaties van covergisting met bijproducten.

De netto energieopbrengst en de berekende besparing aan broeikasgassen van glycerine was hoger dan covergisting van het energiegewas snijmais. Deze positieve uitkomsten zijn grotendeels een gevolg van de relatief hoge biogasproductie van glycerine. In dit onderzoek is uitgegaan van vaste waarden voor biogasproductie. Literatuur laat echter zien dat de biogasproductie erg varieert, voornamelijk bij bijproducten uit de verwerkingsindustrie waar het drogestof- en het organische stofgehalte variabel zijn. Het wordt daarom aanbevolen om in vervolgonderzoek een gevoeligheidsanalyse uit te voeren, om de invloed van deze variaties in kaart te brengen.

In dit onderzoek is ervoor gekozen om massa-allocatie te gebruiken, om voort te bouwen op de gebruikte uitgangspunten van het bestaande ESG model. Binnen LCA-onderzoek kan ook gekozen worden voor economische allocatie, omdat economie de drijfveer is dat het productieproces in eerste instantie bestaat [18]. Thomassen *et al.* (2008) laten zien dat het gebruik van economische of massa-allocatie voor de einduitkomsten van LCA van de melkketen niet veel verschil maakt [19]. Tijdens dit onderzoek bleek dat de verwerkingsprocessen waaruit de bijproducten worden geproduceerd, een marktafhankelijke hoofdtaak hadden: zetmeelwinning, biodieselproductie en suikerproductie. Inzicht is nodig in het effect van de allocatie keuze op de

milieubelasting bepaling van verschillende manieren van covergisting van dierlijke mest. Het wordt daarom aanbevolen om in vervolgonderzoek naast massa-allocatie economische allocatie toe te passen.

Conclusies

De volgende conclusies kunnen getrokken worden op basis van en binnen de grenzen van het beschreven onderzoek:

- Een ketenanalyse geeft een compleet beeld van de milieubelasting van covergisting van mest met bijproducten uit de verwerkingsindustrie.
- Covergisting van aardappelpersvezel bleek de laagste energieopbrengst, laagste besparing aan broeikasgassen en de laagste netto emissiereductie ten opzichte van de fossiele referentie op te leveren in vergelijking met de andere combinaties.
- Covergisting van glycerine resulteert in een hoge energieopbrengst, hoge besparing aan broeikasgassen, en een relatief hoge netto emissiereductie ten opzichte van de fossiele referentie in vergelijking met de andere combinaties.
- Covergisting van bietenstaartjes resulteert in een redelijke energieopbrengst, matige besparing aan broeikasgassen, maar een relatief hoge netto emissiereductie ten opzichte van de fossiele referentie.
- Covergisting van 10-40% aandeel bietenstaartjes resulteert in een netto emissiereductie van 60-57%, en voldoet hiermee aan de toekomstige Cramer-criteria van een minimale emissiereductie van 50% in 2011 ten opzichte van de fossiele referentie.
- Covergisting van het energiegewas snijmais resulteert in een hoge energieopbrengst, hoge besparing aan broeikasgassen, en de hoogste netto emissiereductie ten opzichte van de fossiele referentie, maar deze vorm van energieproductie concurreert meer met voedselvoorziening in vergelijking met covergisting van bijproducten.
- Het wordt aanbevolen om in vervolgonderzoek meerdere milieuaspecten te onderzoeken (bij voorkeur kwantitatief), en om het onderzoek uit te breiden met de toepassing van economische allocatie en het uitvoeren van een gevoeligheidsanalyse.

Literatuur

1. Senternovem, Stimuleringsregeling Duurzame Energieproductie, www.senternovem.nl/sde, Zwolle
2. Mierlo, T. van, Wit, R., Hofstad, A., Jager, H., Atkins, R., Bakker, B., Belgers, T., Berg, M. van den, Berkepas, S., Bosch, R. uit de, Buijs, C., Gloudemans, M., Jansen, J., Langedijk, R., Lodder, A., Luitwieler, M., Teule, C., Verstegen, G., Visschers, M., Bergsma, G., Meijer, J. 2008. Helder groene biomassa. De Provinciale Milieufederaties & Stichting Natuur en Milieu, Utrecht.
3. Steinfeld, H., Gerber, P., Wassenaar, T., Castel, V., Rosales, M., de Haan, C., 2006. Livestock's long shadow; environmental issues and options. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italië.
4. Zwart, K. B., Oudendag, D. A., Ehlert, P.A.I., Kuikman, P.J. 2006. Duurzaamheid co-vergisting dierlijke mest. Alterra-rapport 1437, Wageningen.
5. Biewenga, G., Wiersma, T., Kooistra, K., Dooren, H.J.C. van, 2008. Monitoring mestvergisting in de provincie Fryslân. ASG-rapport 104, Lelystad.
6. KWIN 2008. Akkerbouw en vollegrondsgroenten. Praktijkonderzoek voor de akkerbouw en vollegrondsgroenteteelt, Lelystad.
7. Entwistle, G. et al., 1998, Economics of starch production in the UK. *Industrial crops and products* 7 (2), 175-186
8. Cederberg, C. 1998, Life cycle assessment of milk production- a comparison of conventional and organic farming. SIK-Report No. 643. The Swedish Institute for Food and Biotechnology, Göteborg, Zweden.
9. Ecoinvent data v2.0. Final Reports Ecoinvent 2007 nr. 17, Bioenergy. Swiss Centre for Life Cycle Inventories. Duebendorf, Switzerland, CD-ROM
10. Thomassen, M.A., Van Calster, K.J., Smits, M.C.J., Iepema, G.L., De Boer, I.J.M., 2008. Life Cycle Assessment of conventional and organic milk production in The Netherlands. *Agricultural Systems* 96, 95-107.
11. Keymer, U. en A. Schilcher, 1999. Überlegungen zur errechnung theoretischer gasausbeuten vergärbare substrate in biogasanlagen. *Landtechnik-Bericht* Nr. 32. Freising.
12. CVB, 2007. Tabellenboek Veevoeding 2007. Voedernormen landbouwhuisdieren en voederwaarde veevoerders. CVB-reeks nr. 22 Augustus 2007.
13. Keymer, Y., 2002. Wie rechnet sich biogas? In: *Biogas – Strom aus gülle und biomasse*. Top Agrar Fachbuch, Münster, Duitsland. pp. 40-45.
14. Gruber, W., 2005. Monitoring biogas yields for different input materials on farm biogas plants. *Bau, Technik und Umwelt in der Landwirtschaftlichen Nutztierhaltung 2005*, Braunschweig, Germany. pp. 349-354.
15. KTBL, 2005. Gasausbeute in landwirtschaftlichen biogasanlagen. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt, Duitsland.
16. IPCC, 1996. Intergovernmental Panel on Climate Change. Revised 1996 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Reference Manuals. Available at: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/gl/invs6.htm>.
17. Commissie Cramer, 2006. Criteria voor duurzame biomassaproductie. Eindrapport van de projectgroep "duurzame productie van biomassa". Taskforce Energietransitie, Den Haag.
18. Guinée, J.B., Heijungs, R., Huppes, G., 2004. Economic allocation: Examples and derived decision tree. *International Journal of Life Cycle Assessment* 9, 23-33.
19. Thomassen, M.A., Dalgaard, R., Heijungs, R., De Boer, I.J.M., 2008. Attributional and consequential LCA of milk production. *International Journal of LCA* 13 (4), 339-349.