

Wageningen UR Livestock Research

Partner in livestock innovations



Rapport 549

Literatuurstudie van Miscanthus gericht op
warmte en elektriciteit op boerderijschaal

Literature review of Miscanthus focused on
heat and electricity on farm scale

Januari 2012



LIVESTOCK RESEARCH

WAGENINGEN UR



Colofon

Uitgever

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

Redactie

Communication Services

Copyright

© Wageningen UR Livestock Research, onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek, 2012

Overname van de inhoud is toegestaan, mits met duidelijke bronvermelding.

Aansprakelijkheid

Wageningen UR Livestock Research aanvaardt geen aansprakelijkheid voor eventuele schade voortvloeiend uit het gebruik van de resultaten van dit onderzoek of de toepassing van de adviezen.

Wageningen UR Livestock Research en Central Veterinary Institute, beiden onderdeel van Stichting Dienst Landbouwkundig Onderzoek vormen samen met het Departement Dierwetenschappen van Wageningen University de Animal Sciences Group van Wageningen UR (University & Research centre).

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

Literature review of Miscanthus focused on generating heat and electricity on farm scale

Keywords

Miscanthus, incineration, anaerobic digestion, residual heat, pretreatment, C3 plants, C4 plants

Referaat

ISSN 1570 - 8616

Auteur(s)

G.J. Kasper

Titel

Literatuurstudie van Miscanthus gericht op warmte en elektriciteit op boerderijschaal

Rapport 549

Samenvatting

Literatuurstudie van Miscanthus gericht op het genereren van warmte en elektriciteit op boerderijschaal

Trefwoorden

Miscanthus, verbranding, vergisting, restwarmte, voorbehandeling, C3-plant, C4-plant

Rapport 549

G.J. Kasper

Literatuurstudie van Miscanthus gericht op warmte en elektriciteit op boerderijschaal

Januari 2012

Samenvatting

In de intensieve veehouderij wordt steeds meer energie verbruikt. Vleeskalverhouders en pluimveehouders zijn al massaal overgegaan naar hernieuwbare energie in de vorm van houtsnippers en houtpellets die verbrand worden in een biomassaketel. Veehouders zoeken dan ook naar wegen om hernieuwbare energie in de vorm van warmte en elektriciteit zelf in de hand te houden. Dit kan door zelf geteelde biomassa in te zetten. Miscanthus, ook wel olifantsgras genoemd, is zo'n biomassa. In dit rapport is een literatuuronderzoek beschreven. Hierbij is vooral aandacht besteed aan het C4-gewas Miscanthus, waarmee afhankelijk van het bedrijfsdoel warmte en elektriciteit kunnen worden gegenereerd. De technieken die hiervoor worden gebruikt - verbranden, vergisten, benutting restwarmte - zijn beschreven. Met het oog op de geschiktheid van Miscanthus voor vergisting is een aantal ontsluitingstechnieken besproken. De volgende conclusies en aanbevelingen kunnen worden getrokken.

Conclusies

- C4-grassen met een hoog cellulosegehalte zijn bijzonder geschikt als leverancier voor energie. Ze produceren doorgaans meer droge stof dan C3-gewassen: de gebruikelijke grassen en akkerbouwgewassen in Nederland.
- Miscanthus en switchgrass krijgen vanuit het onderzoek veel aandacht, maar zijn binnen de C4-grassen de laagst producerende. Andere C4-grassen die meer produceren, zijn tot nu toe onder Westeuropese omstandigheden onvoldoende of niet onderzocht.
- Miscanthus heeft voor- en nadelen. Belangrijke voordelen zijn: het gewas vraagt alleen het eerste jaar onkruidbestrijding, heeft een lage mestbehoefte, vraagt erg weinig arbeid en vraagt alleen in het aanplantjaar groundbewerking, en geeft een hoge drogestofopbrengst die zonder droging is op te slaan. Een belangrijk nadeel is dat het gewas, geplant met rhizomen, 10 tot 20 jaar beslag legt op de grond. Met andere woorden: het past niet goed in het bouwplan van de akkerbouwer.
- Verbranden van miscanthus voor warmteopwekking gebeurt op enkele vleeskalverbedrijven met witvleesproductie. Een veehouder van een groot fokzeugenbedrijf heeft plannen om bij verhoging van de houtprijs tot € 0,18/kg houtsnippers (met 30% vocht) Miscanthus te gaan telen voor eigen warmteopwekking.
- Vergisting van mest met of zonder coproducten, waarbij groen gas wordt geproduceerd, is een van de technieken die een grote kans maakt op het verkrijgen van SDE-subsidie. Vergisting van Miscanthus kan dan rendabel zijn. Onderzoek naar het oogstmoment van Miscanthus – in het groene stadium of na de winter – is belangrijk voor het geval Miscanthus zou kunnen worden toegepast als coproduct in een vergister.
- Restwarmte van een biomassakachel, warmte van een zonnecollector en rookgassen van een gasmotor kunnen op boerderijschaal worden omgezet in elektriciteit m.b.v. Organic Ranking Cycle techniek. Onderzoek naar de inzet van deze techniek is gewenst.
- Miscanthus is moeilijk afbreekbaar in een vergister. Voor een rendabele vergisting is een voorbehandeling gewenst. Voorbehandelingsmethoden met zuren, natte oxidatie en m.b.v. een hakselaar (mechanisch) zijn wel effectief, maar te duur. Voorbehandeling met stoom, kalkmelk, ammonia en fungi hebben wel perspectief. Onderzoek naar de perspectiefvolle technieken is gewenst.
- Vanwege de lage dichtheid van gehakselde Miscanthus is verdichting zinvol bij transport over grotere afstanden. Technieken hiervoor zijn persen, pelletiseren en wellicht pyrolyse. Voor de bij pyrolyse ontstane producten is het van belang te letten op het juiste oogsttijdstip. Onderzoek hiernaar is gewenst.

Aanbevelingen

1. Onderzoek naar C4-grassen die meer produceren dan Miscanthus onder Westeuropese omstandigheden is gewenst.
2. Onderzoek de volgende aspecten van toepassing van Miscanthus op boerderijschaal:
 - Economische haalbaarheid.
 - Pyrolyse van Miscanthus, eerst op laboratoriumschaal.
 - Perspectiefvolle voorbehandelingstechnieken voor vergisting.
 - Restwarmtebenutting met de 'Organic Ranking Cycle techniek'.

Summary

More and more energy is used in intensive animal husbandry, because of increasing farm size, automation, more stringent rules for ammonia and greenhouse gases and the requirements placed on newly built stables. Veal and poultry farmers have introduced renewable energy in the form of wood chips and wood pellets that are burned in a biomass boiler. The expectation is that energy prices and timber prices continue to rise. Livestock farmers are therefore looking for alternatives to fossil fuels, in the form of heat and electricity to keep themselves under control. This can be realized by the use of home grown biomass, such as Miscanthus, also called elephant grass.

This report describes a literature review. It is focused on the C4 crop Miscanthus, from which heat and electricity could be generated depending on the business objective of the farm. The techniques can be applied at farm level, such as incineration, anaerobic digestion and utilization of waste heat. To ensure the suitability of Miscanthus for fermentation, a number of pretreatment techniques are discussed. The following conclusions and recommendations can be made.

Conclusions

- C4 grasses with a high cellulose content are particularly suitable for energy generation. They usually produce more than C3 plants: the usual grasses and arable crops in the Netherlands.
- Miscanthus and switchgrass get much attention from research, but within the C4 grasses these grass types produce the lowest yields. Up to now, other C4 grasses are examined insufficiently under Western European conditions.
- Miscanthus has advantages as well as disadvantages. Important advantages are the following: weed control is only necessary in the first year. Further, the crop requires a low input of manure, requires very little work and only requires tillage in the year of planting, provides a high dry matter yield and can be stored without drying. A major disadvantage is that the crop planted with rhizomes claims the soil for 10 to 20 years. In other words: it does not fit well in the rotation plan of an arable farmer.
- Combustion of Miscanthus for heat generation is introduced at some farms with veal calves. A farmer with 1.200 sows has plans to grow Miscanthus for its own heat generation if timber prices are higher than € 0.18 / kg wood chips (with 30% humidity).
- Fermentation of manure with or without co-products for producing green gas is one of the techniques with potential to obtain SDE grant. With SDE grant, fermentation can be profitable. Research on the harvest of Miscanthus - in the green stage or after winter - is important in case Miscanthus could be used as a co-product in the fermenter.
- Waste heat from a biomass stove, solar heat, and flue gasses from a gas engine on farm scale can be converted into electricity using the Organic Ranking Cycle technique. Research into the application of this technique is desirable.
- Miscanthus is persistent in a fermenter. For an economic fermentation a pretreatment is necessary. Pretreatments with acids, the wet oxidation and the use of a chopper (mechanical) are effective, but too expensive. Pretreatments with steam, milk of lime, ammonia and fungi have perspective. Research into the techniques with good prospects is desired. Because of the low density of chopped Miscanthus, compaction is useful when Miscanthus is transported over greater distances. Techniques are: pressing, pelletizing and perhaps pyrolysis. For the products resulting from pyrolysis, it is important that Miscanthus is harvested at right time. Research is desirable to determine the influence of harvesting time on the quality and quantity of the pyrolysis oil.

Recommendations

1. Research C4 grasses which produce more than Miscanthus under Western European conditions
2. Concerning the application of Miscanthus on farm scale, it is essential to examine the following aspects:
 - Study the economic feasibility of Miscanthus.
 - Study the pyrolysis of Miscanthus, starting at lab scale.
 - Study the promising pretreatment techniques for fermentation.
 - Study the use of residual heat in the Organic Ranking Cycle technique

Inhoudsopgave

Samenvatting

Summary

1	Inleiding	1
1.1	Probleemstelling.....	1
1.2	Doelstelling.....	1
1.3	Randvoorwaarden.....	1
1.4	Leeswijzer	1
2	Literatuurstudie.....	2
2.1	Keuze energiegewas.....	2
2.2	Voordelen van Miscanthus.....	3
2.3	Verbranden	3
2.4	Vergisten	4
2.4.1	Voor- en nadelen oogstijdstip	4
2.5	Omzetten restwarmte in elektriciteit.....	6
2.6	Voorbehandeling	6
2.6.1	Mechanische voorbehandeling	6
2.6.2	Voorbehandeling met zuur.....	7
2.6.3	Voorbehandeling met base	7
2.6.4	Oxidatieve voorbehandeling	7
2.6.5	Ammonia.....	7
2.6.6	Fungi	7
2.6.7	Verdichten.....	7
3	Conclusies en aanbevelingen.....	9

1 Inleiding

1.1 Probleemstelling

In de veehouderij wordt op bedrijfsniveau steeds meer energie verbruikt. Dat geldt met name voor bepaalde sectoren in de intensieve veehouderij: vleeskalveren, vleeskuikens en fokzeugen. Het stijgende verbruik per bedrijf heeft te maken met de toenemende bedrijfsgrootte, maar ook met de doorgaande automatisering, de stringentere regelgeving voor ammoniak en broeikasgassen en de eisen die gesteld worden aan stallen die nieuw gebouwd worden. In de vleeskalverhouderij en de vleeskuikenhouderij is veel warmte nodig, maar ook is in deze sectoren steeds meer behoefte om zelf elektriciteit op te wekken vanwege nieuwbouw met meer lucht per dier en mechanische ventilatie. De melkveehouderij vraagt warmte voor het schoonmaken van melkstal en melkapparatuur, maar ook steeds meer elektriciteit voor melkrobots, mestschuiven, ventilatoren, warmtewisselaars, pompen, elektromotoren en gevelventilatie.

De verwachting is dat de energieprijzen blijven stijgen. Veehouders zullen daarom steeds meer op zoek gaan naar alternatieven voor fossiele energie. Vleeskalverhouders en pluimveehouders zijn al massaal overgegaan naar hernieuwbare energie in de vorm van houtsnippers en houtpellets die verbrand worden in een biomassaketel. Een klein aantal varkenshouders met een mestoverschot heeft een mestvergistingsinstallatie of overweegt er een aan te schaffen. Met de bijbehorende gasmotor (WKK) kan warmte en elektriciteit worden geproduceerd.

Vanwege de lange terugverdientijd en de beperkte subsidiemogelijkheden voor zonne-energie in Nederland gebruiken nog maar weinig veehouders zonnecollectoren of zonnepanelen. Veehouders zoeken dan ook naar wegen om de kosten van hernieuwbare energie in de vorm van warmte en elektriciteit zelf in de hand te houden. Dit kan door zelf geteelde biomassa in te zetten.

De volgende onderzoeksvragen kunnen gesteld worden:

- Is biomassa – en in het bijzonder *Miscanthus giganteus* - te telen die een hoge productie heeft en niet concurreert met een voedselgewas, b.v. granen en maïs?
- Is het mogelijk *Miscanthus* als grondstof te gebruiken in een techniek waarmee zowel elektriciteit als warmte is te genereren?

1.2 Doelstelling

Doel is het uitvoeren van een haalbaarheidsstudie naar warmte- en elektriciteitsbenutting op vleeskalver-, fokzeugen- en pluimveebedrijven m.b.v. een verbrandings- of pyrolysetechniek of vergisting van het energiegewas *Miscanthus giganteus*, waarbij een belangrijke bijdrage aan CO₂-reductie wordt bereikt.

1.3 Randvoorwaarden

De volgende randvoorwaarden zijn op dit project van toepassing

- Alleen technische haalbaarheid wordt onderzocht. De economische haalbaarheid is niet onderzocht.
- Toepassing eindproduct van *Miscanthus giganteus* middels verbranding (warmte), pyrolyse/minigasturbine (warmte + elektriciteit) en vergisting (warmte + elektriciteit).

1.4 Leeswijzer

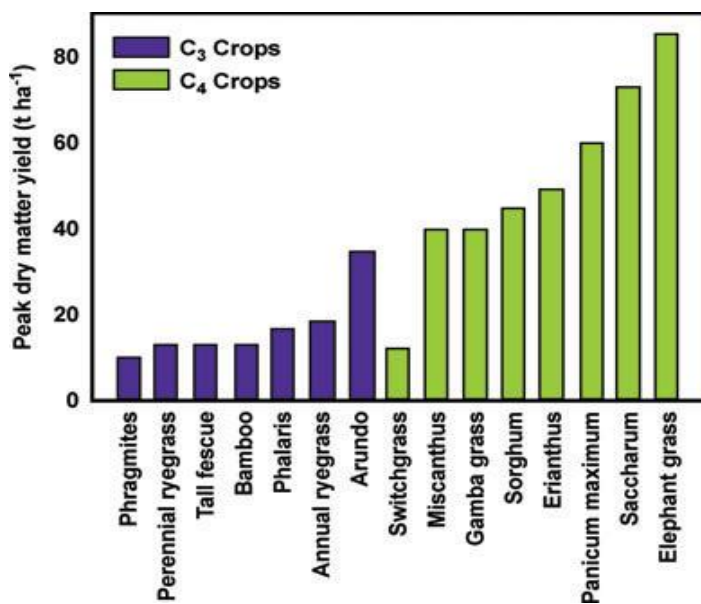
In hoofdstuk 2 komen de keuze van C3- en C4-gewassen aan de orde, de voordelen van *Miscanthus*, het verbranden en vergisten van *Miscanthus*, het omzetten van restwarmte in elektriciteit, en voorbehandelingsmethoden van *Miscanthus*. Hoofdstuk 3 handelt over de conclusies en aanbevelingen.

2 Literatuurstudie

In deze studie zal ingegaan worden op de voordelen van C4-grassen ten opzichte van C3-gewassen. Hierbij komen de keuze en de voordelen van *Miscanthus* aan de orde. Voor het gebruik van *Miscanthus* op boerderijschaal is een aantal opties mogelijk. De eerste is het verbranden in een biomassaketel voor opwekking van warmte, de tweede optie is het vergisten als coproduct in een covergister voor opwekking van warmte en elektriciteit, de derde optie is het gebruik van apparatuur die de restwarmte van gas- en dieselmotoren kan omzetten in elektriciteit en de vierde optie is het verder verdichten van de geogste biomassa, bijvoorbeeld middels pyrolyse en pelletiseren.

2.1 Keuze energiegewas

C4-grassen met een hoog gehalte aan lignocellulose kunnen geschikt zijn als brandstof of als grondstof voor de productie van bioplastics en ethanol, maar ook als coproduct voor een covergister. Belangrijk hierbij is, dat het gewas op marginale gronden geteeld kan worden. Dit zijn gronden die buiten het landbouwareaal vallen, zodat ze niet concurreren met voedselgewassen. De grondkosten voor de teelt op marginale gronden zijn laag. Wanneer een agrariër niet over marginale gronden kan beschikken, is gedeeltelijke vervanging van een voedergewas door een C4-gewas ook interessant. Hiermee wordt de duurzaamheid van de teelt verhoogd. Er is een aantal potentiële C4-gewassen voorhanden (Byrt *et al.*, 2011) die gekozen kunnen worden. Momenteel is er weinig discussie over de keuze van welk energiegewas geschikt zou kunnen zijn. De focus in het onderzoek in Europa en de Verenigde Staten ligt vooral op de gewassen *miscanthus* en *switchgrass*, terwijl deze gewassen - en met name *switchgrass* - als laagste scores op drogestofhoeveelheid binnen de C4-gewassen (figuur 1). *Alemangras* (*Echinochloa polystachya*) heeft een potentie om een tienmaal hogere biomassa-productie te realiseren dan bijvoorbeeld wilg, maar het gewas is tot nu nog niet getest (Byrt *et al.*, 2011). De belangstelling vanuit het onderzoek is een van de redenen waarom voor *miscanthus* en *switchgrass* is gekozen (Byrt *et al.*, 2011).



Figuur 1 Pieken van drogestofhoeveelheid (ton per ha) van C3- en C4-grassen (bron: Byrt *et al.*, 2011)

De hogere piek in drogestofhoeveelheid van de C4-grassen heeft niet alleen te maken met het efficiënter omgaan met zonlicht, water en mineralen, zoals eerder genoemd in paragraaf 1.1, maar ook met het langere groeiseizoen. C3-grassen en ook maïs groeien tot ongeveer eind september, terwijl de C4-grassen groeien tot eind november. C4-grassen zijn ten opzichte van C3-grassen verder interessant als het gaat om de opwarming van de aarde. In veel gebieden zullen bij opwarming vaker droogte en hogere temperaturen worden verwacht (Sheffield *et al.*, 2008). Voor de gebieden waar deze omstandigheden verwacht worden zijn C4-gewassen erg geschikt. Dit geldt ook voor zilte gronden en bij omstandigheden waarbij de fosfaatvoorziening beperkend is (Byrt *et al.*, 2011).

2.2 Voordelen van Miscanthus

Hoewel Miscanthus momenteel niet de hoogste productie oplevert, zoals beschreven in paragraaf 2.1, heeft Miscanthus wel belangrijke voordelen. Zoals de al eerder genoemde hogere efficiëntie voor zonlicht, water en mineralen. Wat de mineralen betreft, heeft recent onderzoek aangetoond dat bij een optimale oogsttijd van Miscanthus en switchgrass een minimum aan mineralen wordt afgevoerd met de bovengrondse biomassa. In het groene gewas in juni was de hoogste hoeveelheid stikstof aanwezig (187 en 379 kg N/ha voor respectievelijk switchgrass en Miscanthus x giganteus; Heaton *et al.*, 2009). Bij de oogst in februari was de stikstofhoeveelheid gedaald tot 5 kg N/ha voor switchgrass en < 17 kg N/ha voor Miscanthus x giganteus. Opmerkelijk was dat bij Miscanthus x giganteus de hoeveelheid N/ha al bijna stabiel was na het groeiseizoen: eind november (Heaton *et al.*, 2009; Amougou N. *et al.*, 2010). Onderzoek met Miscanthus x giganteus in Nederland, waarbij alleen de mineralen vanaf eind november tot de oogst op 7 april maandelijks gemeten zijn, gaf in seizoen 2008-2009 een afname van 17,3 kg N/ha naar 15,2 kg N/ha en in het seizoen van 2009-2010 een afname van 19,0 kg N/ha (meting 18 februari) naar 18,2 kg N/ha op het oogsttijdstip op 22 april (Kasper, 2011a). Uit het onderzoek van Heaton (2009) blijkt duidelijk dat Miscanthus efficiënt omgaat met N. Ook blijken C4-grassen efficiënter om te gaan met P en wel specifiek onder P-beperkende omstandigheden dan C3-grassen (Ghannoum *et al.*, 2007).

Miscanthus kan op boerderijschaal geteeld en toegepast worden. Voor het zelf telen zijn twee voorwaarden vereist: de agrariër beschikt over grond en andere gewassen levert hij in voor Miscanthus. Wanneer de agrariër niet zelf teelt, zal hij moeten aankopen. De teelt, oogst en opslag is voor Nederlandse omstandigheden al eerder uitvoerig beschreven (Kasper, 2011a). Voor het gebruik van Miscanthus op boerderijschaal is een viertal opties mogelijk. De eerste is het verbranden in een biomassaketel voor opwekking van warmte, de tweede optie is het vergisten als coproduct in een covergister voor opwekking van warmte en elektriciteit, de derde optie is het gebruik van apparatuur die de restwarmte van gas- en dieselmotoren kan omzetten in elektriciteit en een vierde optie is het verder verdichten van de geogoste biomassa, bijvoorbeeld middels pyrolyse of pelletiseren.

2.3 Verbranden

In de intensieve veehouderij in Nederland wordt steeds meer gebruik gemaakt van biomassakachels ter vervanging van gas en elektriciteit als fossiele energiebronnen. Dit betreft vooral de sectoren vleeskalveren – en dan met name de witvleesproductie -, vleeskuikens en fokzeugen. Tot nu toe worden veelal houtachtige materialen gestookt in de vorm van snippers (snoeihout) of pellets. Houtsnippers van goede kwaliteit zijn niet-verontreinigde snippers met een hoog aandeel hout ten opzichte van schors. Het vochtpercentage is belangrijk. Een verlaging van het vochtgehalte van 50% naar 30% levert 50% meer energiewaarde op. De kwaliteit van houtpellets varieert nogal, afhankelijk van welke grondstoffen gebruikt zijn. Naast A-kwaliteit hout (klassen A1 en A2) wordt ook B-kwaliteit gebruikt (verontreinigd hout). Klasse A1 wordt gegeven aan pellets met de beste kwaliteit voor gebruik in particuliere kachels en ketels. De pellets geven bij het gebruik van de houtsoorten spar en den minder dan 0,5% as en bij het gebruik van beuk, berk en eik minder dan 0,7% as. Bij pellets van klasse A2 is het minder belangrijk welke houtgrondstoffen worden gebruikt en het asgehalte mag tot 1% oplopen. Deze pellets zijn nog steeds geschikt voor particulier gebruik, in het bijzonder voor pelletketels. Klasse B-pellets laten een hoger asgehalte toe dan klasse A-pellets. Bovendien mogen de pellets een bepaald gehalte schors bevatten. Het zijn industriële houtpellets, die in (zeer) grote verbrandingsinstallaties of als bijstook in elektriciteitscentrales worden toegepast.

2.4 Vergisten

In Nederland zal duurzame energie in de komende jaren vooral komen van biogas. Windenergie en zonne-energie zullen namelijk de komende jaren niet extra gestimuleerd worden. Vergunningen voor individuele windturbines worden bijna niet meer afgegeven en de subsidie voor zonne-energie is zeer beperkt. Het geproduceerde biogas in Nederland komt voor 60% van agrarische vergisters. Subsidies voor Stimulering van Duurzame Energie (SDE) zijn nog steeds vereist, want het rendement van de vergisters is hiervan volledig afhankelijk.

De grote verandering van SDE-subsidies in 2011 ten opzichte van 2010 is dat voor alle categorieën (wind, zon en biomassa) een gezamenlijk maximum geldt. Voor deze categorieën wordt de SDE gefaseerd opengesteld in vier fases, met elk een ander maximum basisbedrag. Voor de eerste fase geldt een maximum basisbedrag van €0,09 per kWh, voor de tweede fase is dat €0,11 per kWh, voor de derde fase geldt €0,13 per kWh en voor de laatste fase €0,15 per kWh. Voor groen gas zijn de maximale basisbedragen voor de fasen 1 t/m 4 respectievelijk vastgesteld €0,62/ €0,76/ €0,90 en €1,04 per Nm³ voor respectievelijk vanaf de data 1 juli, 1 september, 1 november en 1 december 2011 (Mozaffarian, 2011). Vergisting van mest met of zonder co-producten op basis van groen gas is een van de technieken die een grote kans maakt op het verkrijgen van SDE-subsidie. De vergisting kan daarmee rendabel draaien. Wanneer co-producten worden toegepast, is het voor de hand liggend om die co-producten te gebruiken die een hoge CO₂-reductie geven voor de gehele keten. Miscanthus, ook wel olifantsgras genoemd, lijkt hiervoor geschikt. Het reduceert de CO₂-emissie ketenbreed met 90-95% ten opzichte van steenkool.

Het is gewenst dat onderzoek zal worden opgezet, waarbij Miscanthus giganteus als eindproduct vergist zal worden. Het eindproduct kan geoogst worden in het groene stadium van het gewas. Zoals beschreven in paragraaf 2.2 betekent dat het geschiktste tijdstip daarvoor het einde van de groeiperiode (ca. 15 november) is. Miscanthus is dan nog niet zo sterk verhout ofwel bevat relatief weinig lignine. In een op te zetten onderzoek kan dan voorgesteld worden om half augustus, eind september en half november te oogsten ter verificatie van het geschiktste oogstmoment. Het geoogste materiaal kan lang bewaard worden (ongeveer één jaar) door het in te kuilen.

Ook kan het eindproduct geoogst worden in het droge stadium (begin april), waarbij Miscanthus sterk verhout is. Voordeel van dit tijdstip is dat het materiaal meteen opgeslagen kan worden zonder droging of zonder in te kuilen. Verwacht wordt dat de biogas- en methaanproductie bij oogsten in april lager is dan bij oogsten in de herfst.

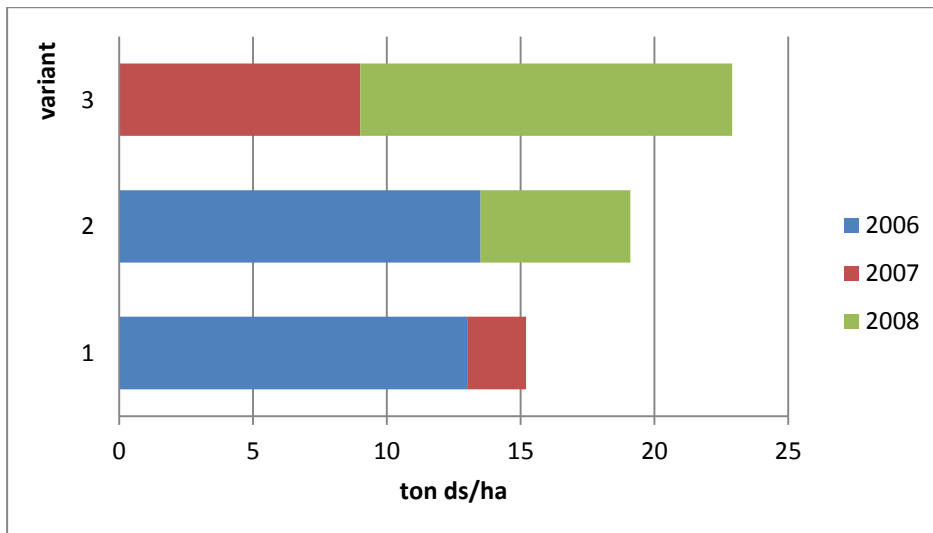
Naast onbehandelde Miscanthus zal ook behandelde Miscanthus vergist worden. Onderzocht moet worden welke volgorde van behandeling het beste kan worden aangehouden: Miscanthus, die geoogst is in de herfst, eerst inkuilen en kort voor het inbrengen in de vergister voorbehandelen of eerst voorbehandelen en daarna inkuilen. Ook zal Miscanthus, die geoogst is in maart/april met 10-15% vocht, voorbehandeld moeten worden. Methoden van voorbehandeling zijn beschreven in paragraaf 2.6. De voor- en nadelen van de genoemde oogsttijdstippen zullen hierna worden weergegeven.

2.4.1 Voor- en nadelen oogsttijdstip

De in Nederland gebruikelijke grassen worden geoogst van begin mei tot eind september. Bij de reguliere akkerbouwgewassen start de oogsttijd in juli (granen) en gaat door tot november/december (suikerbieten). Miscanthus wordt als energiegewas normaal geoogst in maart/april. Dit heeft een aantal voordelen. Het gewas heeft in de winter zijn bladeren laten vallen, die in het komende groeiseizoen dienst doen als bemesting en tevens de groei van onkruiden onderdrukken. Het gewas heeft tijdens de oogst een drogestofgehalte van 85 tot 90%, waardoor het zonder droging kan worden opgeslagen. Gehakseld materiaal heeft een laag volumegewicht (80-100 kg/m³). Dit maakt de opslag duur maar ook het transport over grotere afstanden. Verdichting van het materiaal tijdens of na de oogst kan door persen in balen, pelletiseren of pyrolyseren met dichtheden van respectievelijk 250, 600 en 1200 kg/m³.

Oogsten in oktober/november kan voordelen hebben, wanneer Miscanthus geteeld wordt voor een andere bestemming, bijvoorbeeld als coproduct voor een vergister. Een voordeel ten opzichte van oogsten in maart/april is de minder sterke verhouting van het gewas. De hogere beschikbaarheid aan suikers geeft door een goede anaërobe fermentatie een snelle verzuring met als gevolg een pH van 4 tot 4,2 (Kasper, 1997). Bij laatstgenoemd onderzoek moet vermeld worden dat Miscanthus ongeveer 20 november 1997 geoogst is met een maïshakselaar tot een deeltjesgrootte van 3 cm. Vervolgens

werd de gehakselde Miscanthus gestort op een betonplaat op het erf, waarna het geperst en geseald werd met een stationaire ronde balenpers tot een dichtheid van ca. 300 kg/m³. Ook werd Miscanthus in een rijkuil opgeslagen. Beide kuiltypen waren luchtdicht afgedekt met folie en leenden zich uitstekend voor langdurige bewaring. Bij genoemd onderzoek in 1997 was het doel van het inkullen van Miscanthus om te dienen als brandstof voor een grote energiecentrale en niet als coproduct van een mestvergister (Huisman *et al.*, 2002). Een ander voordeel van de najaarsoogst is de 30% hogere drogestofopbrengst dan oogsten in maart/april (Fritz, 2010). De bladeren zitten dan nog aan de stengel. Dit heeft wel tot gevolg dat de mineralenhoeveelheid per kg droge stof groter is. Dit hoeft geen nadeel te zijn voor vergisting, omdat de mineralen weer in het digestaat terecht komen. Bij het toedienen van het digestaat dienen ze als bemesting. Nadelen van oogsten in oktober/november zijn er ook. Een nadeel is de lage pH van het ingekuilde materiaal. Hoewel een lage pH een langdurige houdbaarheid garandeert (vaak langer dan 1 jaar), is het zure milieu niet geschikt voor het ontsluiten met geschikte fungi en de door hen geproduceerde enzymen. Mechanische ontsluiting of chemische ontsluiting met bijvoorbeeld NaOH of Ca(OH)₂ is dan wel mogelijk (de Vrije *et al.*, 2009). Een ander nadeel van oogsten van Miscanthus in de herfst is dat de overblijvende delen van de plant hierop negatief reageren door een lagere productie in het volgende groeiseizoen (Fritz, 2010). Fritz (2010) experimenteerde met drie varianten van hetzelfde gewas *Miscanthus giganteus*. Bij variant 1 is twee jaar achtereen het gewas groen geoogst (oogsttijd in augustus), bij variant 2 is het eerste jaar in augustus geoogst en de tweede oogst in het voorjaar, bij variant 3 zijn beide oogsten in het voorjaar geoogst (Figuur 1).



Figuur 1 Varianten 1 t/m 3 geven verschillende totaalopbrengsten bij een driejarig Miscanthusgewas. Variant 1: twee jaar achtereen in het augustus geoogst (groene Miscanthus); variant 2: eerste jaar in het augustus geoogst en tweede jaar in het voorjaar (= normale oogsttijd); variant 3: twee jaar achtereen in het voorjaar geoogst (bron: (Fritz, 2010))

Een reden voor de lagere opbrengst van Miscanthus in het jaar na een zomeroogst in augustus kan de lagere beschikbaarheid aan mineralen zijn. Bij een voorjaars oogst realloceren de mineralen, maar bij een oogst in augustus wordt het grootste deel van de mineralen met de oogst van de bovengrondse delen afgevoerd. Een geringe percentage mineralen zal dus realloceren.

2.5 Omzetten restwarmte in elektriciteit

Bij het verbranden van Miscanthus in een biomassaketel wordt de geproduceerde warmte gebruikt om water op te warmen, dat bij vleeskalverhouders wordt gebruikt voor het bereiden van drinkmelk voor de kalveren. Hierbij ontstaat restwarmte, die benut kan worden voor het genereren van elektriciteit. Ook kunnen rookgassen van een gasmotor (WKK) of de warmte van zonnecollectoren benut worden voor omzetting in elektriciteit. Eind 2011/begin 2012 zal op het pluimveebedrijf met 140.000 vleeskuikens van de heer Kuenen te Beltrum het eerste systeem dat restwarmte omzet, worden geïnstalleerd. De heer Kuenen gaat de 'Organic Rankine Cycle-techniek' (ORC-systeem) toepassen gekoppeld aan een biomassaketel (1 MW). Op het bedrijf van de heer Kroes te Elspeet/Uddel zal komende jaren waarschijnlijk ook een ORC-systeem worden toegepast, maar dan in combinatie met een WKK. De rookgassen van de WKK kunnen worden benut voor elektriciteitsopwekking. Het ORC-systeem is een thermodynamisch proces. Veel elektriciteitscentrales gebruiken het voor elektriciteitsopwekking. Het proces verloopt als volgt. Oververhitte stoom wordt in een stoomketel onder hoge druk geproduceerd, en expandeert vervolgens in een stoomturbine die weer een generator aandrijft. De stoom condenseert in een condensor (lucht- of watergekoeld), waarbij het condensaat wordt teruggepompt naar de stoomketel.

Voor het proces kan in plaats van water en stoom ook een organische vloeistof worden gebruikt. Doordat de organische vloeistof bij een lagere temperatuur dan water verdampt en condenseert, heeft dit voordelen ten opzichte van water:

- oververhitting is bijvoorbeeld niet nodig, omdat de stoffen in het zogenaamde superkritische gebied blijven, waarbij deze stof niet in vloeistofvorm kan zijn;
- de verdampingswarmte is lager, m.a.w. een groter percentage warmte wordt benut voor opwarming van de vloeistof en uiteindelijk wordt hierdoor de restwarmte beter benut.

2.6 Voorbehandeling

Biomassa met veel lignocellulose is moeilijk afbreekbaar. Als coproduct is het daardoor minder geschikt in een mestvergister of de verblijftijd zou moeten worden aangepast aan de afbreekbaarheid van dit type biomassa. Voor de ontsluiting van celluloserijke gewassen waartoe ook Miscanthus behoort, kunnen de volgende typen voorbehandelingen worden onderscheiden:

mechanische, thermische (met stoom en heet water (=Liquid Hot Water, LHW)), zure, basische, oxidatieve voorbehandelingen en voorbehandeling met ammoniak (Hendriks *et al.*, 2009). Verder is voorbehandeling met fungi die enzymen produceren nog een optie. Het doel is om het lignocellulosecomplex te ontsluiten waardoor cellulose en hemi-cellulose beschikbaar komen voor hydrolyse, het proces waarbij onder opneming van water polysacchariden worden gesplitst in di- en monosacchariden. Hierdoor wordt het contactoppervlak voor bacteriën vergroot, waardoor de celinhoud gemakkelijker zal vrijkomen. Verder zijn de koolstofketens korter en daardoor beter afbreekbaar.

Hierna zullen de typen voorbehandelingen worden behandeld.

2.6.1 Mechanische voorbehandeling

Mechanische voorbehandeling resulteert in verkleining van celluloserijk plantaardig materiaal en kan gebeuren met een hakselaar. Op praktijkcentrum Ny Bosma Zathe werd onderzoek met mechanische voorbehandeling van natuurgras uitgevoerd (van Dooren *et al.*, 2005). In dit onderzoek werd het gemaaide natuurgras eerst gedroogd, daarna in grote balen geperst en vervolgens vervoerd naar de plaats waar het materiaal vergist zou worden. Hier werden de balen voor een tijd opgeslagen. Wanneer materiaal voor de vergister nodig was, werden de balen mechanisch verkleind in een voermengwagen, daarna gehakseld met een zelfrijdende hakselaar en gedoseerd gevoerd aan de mixput van een mestvergister, waarin vooraf mest was aangevoerd. Thermische voorbehandeling Celluloserijke biomassa kan door verhitting tot ongeveer 150-180 °C gesplitst worden in zuren, die het hydrolyseproces verder stimuleren (Hendriks *et al.*, 2009). Twee methodes zijn bekend: de stoomvoorbehandeling/stoomexplosie en 'de liquid hot water' voorbehandeling (=LHW). Gedurende de stoombehandeling wordt de biomassa blootgesteld aan een hoge temperatuur (tot 240 °C) en druk voor een paar minuten. Het verschil tussen de voorbehandelingen met stoom en met stoomexplosie is dat bij laatstgenoemde een snelle drukverlaging optreedt gevolgd door het snel afkoelen van het

materiaal. Hierdoor explodeert het water in de biomassa. Bij een LHW is het aantal opgeloste producten hoger en de concentratie van deze producten lager ten opzichte van de stoomvoorbehandeling.

2.6.2 Voorbehandeling met zuur

Voorbehandeling van lignocellulose met zuren bij omgevingstemperatuur is bedoeld om de anaërobe verteerbaarheid te verhogen. Het doel is hemicellulose op te lossen en hierdoor cellulose beter toegankelijk te maken. Als voorbehandeling worden verdunde en sterke zuren gebruikt (Hendriks *et al.*, 2009).

2.6.3 Voorbehandeling met base

Een basische voorbehandeling geeft een gezwollen toestand van de biomassa, waardoor bacteriën en enzymen gemakkelijker de biomassa kunnen afbreken. Sterke basische oplossingen kunnen afsplitsingen geven van bepaalde groepen, waardoor hydrolyse, degradatie en ontleding van opgeloste polysacchariden optreden.

2.6.4 Oxidatieve voorbehandeling

Dit type voorbehandeling is mogelijk door het toevoegen van oxiderende stoffen zoals waterstofperoxide (H_2O_2) of perazijnzuur aan opgeloste biomassa in water. Vaak treden verscheidene reacties op, o.a. splijting van bepaalde groepen in de biomassa. Er bestaat een grote kans op het vormen van remmers voor verdere hydrolyse.

2.6.5 Ammonia

Voorbehandeling met ammonia kan gebeuren onder omgevingstemperatuur met een inwerkingstijd van 10-60 dagen of bij een temperatuur van $120\text{ }^{\circ}\text{C}$ met een inwerkingstijd van enkele minuten. Waargenomen werd dat de enzymatische hydrolyse zesmaal hoger was dan zonder voorbehandeling (Hendriks *et al.*, 2009). Hendriks *et al.* (2009) concluderen dat van de hiervoor behandelde voorbehandelingsmethoden de zuren en de natte oxidatie wel effectief zijn, maar te duur vergeleken met de waarde van glucose. Voorbehandeling met stoom, kalkmelk en ammonia hebben economisch gezien daarentegen wel perspectief.

2.6.6 Fungi

Voorbehandeling met fungi ofwel schimmels bij *Miscanthus* is nog in ontwikkeling. Onderzoek vindt plaats op de Universiteit van Illinois (Taylor, 2009). Ook in Nederland zal in 2011 of 2012 onderzoek opgestart worden (Dekkers, 2011; Cone, 2011). Voorbehandeling met fungi is van groot belang, omdat met deze methode de kosten voor ontsluiting kunnen worden verlaagd ten opzichte van de meeste andere ontsluitingsmethoden.

2.6.7 Verdichten

Miscanthus heeft in gehakselde vorm een laag volumegewicht: ongeveer $80\text{-}100\text{ kg droge stof/m}^3$ (Kasper, 2011a; Kasper, 2011b). Het lage volumegewicht geeft vrijwel geen extra kosten bij oogsten en transport op hetzelfde bedrijf, maar brengt hogere transportkosten met zich mee bij vervoer over grotere afstanden ($> 10\text{ km}$). Wanneer de biomassa voor verbranding bestemd is kan het materiaal verdicht worden door het te persen, te pelletiseren of te pyrolyseren. Persen geeft al een zekere verdichting en is daarom interessant voor vervoer over relatieve korte afstand. Over nog grotere afstand kan de biomassa gepelletiseerd worden, waarbij een nog grotere dichtheid bereikt kan worden. De dichtheden van de verdichtingstechnieken zijn weergegeven in tabel 1.

Tabel 1 Technieken om biomassa te verdichten

Techniek	Dichtheid biomassa (kg ds/m ³)	Dichtheid olie Kg olie/m ³
Hakselen	90	
Persen	150-350	
Pelletiseren	600	
Pyrolyse		1200

Pyrolyse is een proces waarbij biomassa zonder zuurstoftoevoer snel opgewarmd wordt tot ca. 650 °C of ca. 1200 °C in afwezigheid van zuurstof. Bij 650 °C verdampt biomassa in lange koolstofketens. Door condensatie toe te passen ontstaan pyrolyse-olie, gas en char (kool). Van de energie in de biomassa komt ongeveer 70% in de olie en de rest in het gas en de char. Bij 1200 °C ontstaat houtgas dat na reiniging als brandstof kan dienen voor een minigasturbine, die hiermee elektriciteit kan maken. De bij het proces ontstane warmte zou voor andere bedrijfsprocessen die warmte vragen, gebruikt kunnen worden. De olie kan worden gebruikt voor verwarming en elektriciteitsopwekking, en op niet lange termijn voor de productie van tweede generatie biobrandstoffen. Productie van warmte is de meest eenvoudige toepassing. Pyrolyse-olie is hierbij als hernieuwbare tweede generatie biobrandstof een duurzaam alternatief voor zware en lichte stookolie in industriële ketels. Via upgrading kan (groene) diesel en methanol worden gevormd. Pyrolyse-olie bevat verder bepaalde chemicaliën (o.a. furaan) die hout kunnen verduurzamen en kleur- en smaakstoffen die toegepast kunnen worden in voedsel. Voordelen van pyrolyse-olie ten opzichte van vaste biobrandstoffen zijn dat het makkelijker is te vervoeren, op te slaan en toe te passen. De toepassingen van gezuiverde pyrolyse-olie zijn:

- de vervanging van vloeibare fossiele brandstoffen als stookolie of diesel;
- de vervanging van aardgas in stadsverwarmingsnetten;
- toepassing op een gasturbine voor de efficiënte productie van elektriciteit en hoogwaardige stoom.

De pyrolysekwiteit van *Miscanthus giganteus* wordt beïnvloed door het oogsttijdstip en de hoogte van de kunstmestgift uitgedrukt in N, P en K (Hodgson *et al.*, 2010). Giften van 0 kg N/ha/jaar en 50 kg KCl/ha/jaar en 0 kg K₂SO₄/ha/jaar gaven in tegenstelling tot kunstmestgiften van 50 t/m 250 kg N/ha/jaar in combinatie met 0, 50 of 100 kg KCl/ha/jaar en 0, 50 of 100 kg K₂SO₄/ha/jaar consistent de hoogste waarden van de celwandcomponenten (lignine, hemicellulose en cellulose) van de stengel. Giften van 0 kg N/ha/jaar en 50 kg KCl/ha/jaar en 0 kg K₂SO₄/ha/jaar gaven voor cellulose ook de hoogste waarden voor het blad. Dit gold niet voor lignine en hemicellulose in het blad.

3 Conclusies en aanbevelingen

Conclusies

Het literatuuronderzoek naar energiegewassen en toepassingstechnieken op boerderijschaal bracht het volgende naar voren:

- C4-grassen met een hoog cellulosegehalte zijn bijzonder geschikt als leverancier voor energie. Ze produceren doorgaans meer dan C3-gewassen.
- Miscanthus en switchgrass krijgen vanuit het onderzoek veel aandacht, maar zijn binnen de C4-grassen de laagst producerende grassen.
- Voor het gebruik van Miscanthus op boerderijschaal is een aantal opties mogelijk: verbranden, vergisten, restwarmte van installaties (biomassakachel, WKK, etc.) benutten door omzetting in elektriciteit en verdichten.
- Verbranden van miscanthus is een efficiënte en effectieve manier van warmte-opwekking.
- Vergisting van mest met of zonder co-producten op basis van groen gas is een van de technieken die een grote kans maakt op het verkrijgen van SDE-subsidie. Bij gebruik van Miscanthus als co-product, zal onderzoek moeten uitwijzen welk oogstmoment het meest geschikt is.
- (Rest)warmte en rookgassen kunnen op boerderijschaal worden omgezet in elektriciteit m.b.v. de Organic Rankine Cycle-techniek. Voorwaarde is dat het opgesteld vermogen van WKK of biomassaketel groot genoeg moet zijn.
- Voor het goed benutten van Miscanthus in een vergister is ontsluiten essentieel. Voorbehandelingsmethoden met zuren, met natte oxidatie en m.b.v. een hakselaar (mechanisch) zijn wel effectief, maar te duur. Voorbehandeling met stoom, kalkmelk, ammonia en fungi hebben wel perspectief.
- Technieken als persen, pelletiseren en pyrolyse verhogen de dichtheid van Miscanthus. Voor de bij pyrolyse ontstane producten is het van belang te letten op het juiste oogsttijdstip.

Aanbevelingen

1. Onderzoek naar C4-grassen die meer produceren dan Miscanthus onder Westeuropese omstandigheden is gewenst.
2. Onderzoek de volgende aspecten van toepassing van Miscanthus op boerderijschaal:
 - economische haalbaarheid.
 - pyrolyse van Miscanthus, eerst op laboratoriumschaal.
 - perspectievolle voorbehandelingstechnieken voor vergisting.
 - restwarmtebenutting met de 'Organic Rankine Cycle techniek'.

Literatuur

- Amougou N., Bertrand I, J.M., M. and S., R., 2010. *Quality and decomposition in soil of rhizome, root and senescent leaf from Miscanthus x giganteus, as affected by harvest date and N fertilization*. Plant and Soil **338**,(1): 83-97.
- Byrt, C.S., Grof, C.P.L. and Furbank, R.T., 2011. *C4 Plants as Biofuel Feedstocks: Optimising Biomass Production and Feedstock Quality from a Lignocellulosic Perspective*. Journal of Integrative Plant Biology. **53**,(2): 120-135.
- Cone, J., 2011, Persoonlijke communicatie.
- de Vrije, T., Bakker, R.R., Budde, M.A.W., Lai, M.H., Mars, A.E. and Claassen, P.A.M., 2009. *Efficient hydrogen production from the lignocellulosic energy crop Miscanthus by the extreme thermophilic bacteria Caldicellulosiruptor saccharolyticus and Thermotoga neapolitana*. Biotechnology for Biofuels 2009. **2**,(12): 1-15.
- Dekkers, F., 2011, Persoonlijke communicatie.
- Fritz, M., 2010. *Eignet sich Miscanthus als Biogassubstrat?* Website: <http://www.biogas-forum-bayern.de>.
- Ghannoum, O. and Conroy, J.P., 2007. *Phosphorus deficiency inhibits growth in parallel with photosynthesis in a C3 (Panicum laxum) but not two C4 (P. coloratum and Cenchrus ciliaris) grasses*. Functional Plant Biology. **34**, 72-81.
- Heaton, E.A., Dohleman, F.G. and Long, S.P., 2009. *Seasonal nitrogen dynamics of Miscanthus x giganteus and Panicum virgatum*. GCB Bioenergy. **1**, 297-307.
- Hendriks, A.T.W.M. and Zeeman, G., 2009. *Pretreatments to enhance the digestibility of lignocellulosic biomass*. Biosource Technology. **100**, 10-18.
- Hodgson, E.M., Fahmi, R., Yates, N., Barraclough, T., Shield, I., Allison, G., Bridgwater, A.V. and Donnison, I.S., 2010. *Miscanthus as a feedstock for fast-pyrolysis: Does agronomic treatment affect quality?* Bioresource Technology. **101**, 6185–6191.
- Huisman, W. and Kikstra, J., 2002. *Mineral and moisture extraction by mechanical dehydration of ensiled Miscanthus in the energy-from-wet-biomass chain*. In: E. de Jong et al. (Eds.), Proceedings of the 3rd International Congress and Trade Show Green-Tech 2002 with the 5th European Symposium Industrial Crops and Products, 24-26 April 2002 at the World Horticultural Exhibition Floriade. Hoofddorp, The Netherlands, Elsevier.
- Kasper, G.J., 1997. *Eigen onderzoek (niet gepubliceerd)*.
- Kasper, G.J., 2011a. *Praktijkonderzoek Miscanthusteelt voor energie*. Lelystad, Animal Sciences Group. Rapport 433, 10 p.
- Kasper, G.J., 2011b. *Literatuuronderzoek Miscanthusteelt voor energie*. Lelystad, Animal Sciences Group. Rapport 434, 13 p.
- Mozaffarian, M., J.A. Wassenaar and S.M. Lensink, 2011. *Hernieuwbare warmte in de SDE+-regeling*, ECN. ECN-E-11-035, 50 pp.
- Sheffield, J. and Wood, E.F., 2008. *Projected changes in drought occurrence under future global warming from multi-model, multi-scenario, IPCC AR4 simulations*. Climate Dynamics **31**, 79-105.

Taylor, J., 2009. *Fungi and deconstruction of lignin and other components of Miscanthus cell walls.*

Website:

http://www.energybiosciencesinstitute.org/index.php?option=com_content&task=view&id=123&Itemid=20.

van Dooren, H.J.C., Biewenga, G. and Zonderland, J.L., 2005. *Vergisting van gras uit natuurgebieden in combinatie met runderdrijfmest.* PraktijkRapport Rundvee 62. Lelystad, Animal Sciences Group Wageningen UR, 29 p.



Wageningen UR Livestock Research

Edelhertweg 15, 8219 PH Lelystad T 0320 238238 F 0320 238050

E info.livestockresearch@wur.nl | www.livestockresearch.wur.nl