

**Universität für Bodenkultur Wien**

University of Natural Resources and Applied Life Sciences, Vienna



H93 Department für nachhaltige Agrarsysteme

H931 Institut für Landtechnik

**Diplomarbeit**

**Eignung verschiedener Energiemaissortentypen zur  
Biogaserzeugung unter den Standortbedingungen des  
nordöstlichen Hausruckviertels**

verfasst von:

**Johannes Minihuber**

Matrikelnummer: 0140158

Studienrichtung Landwirtschaft (H890)

Betreuer:

**Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing Dr.agr. Thomas Amon**

Wien, Dezember 2007

## **Vorwort**

Die vorliegende Diplomarbeit stellt den Abschluss meines Studiums an der Universität für Bodenkultur dar. Es ist mir ein großes Anliegen, an dieser Stelle all jenen Personen zu danken, die mich während meiner Studienzeit begleitet haben.

Ein besonderer Dank gilt:

- Herrn Ao.Univ.Prof. Dipl.-Ing Dr.agr. Thomas Amon, der durch fachliche Anregungen und die freundliche Betreuung wesentlich zum Gelingen dieser Diplomarbeit beigetragen hat.
- Allen Kolleginnen und Kollegen des Landtechnikinstitutes, die mich bei meinen Untersuchungen sehr freundschaftlich unterstützt haben.
- Der Familie Mayr für die Betreuung und Unterstützung bei der Durchführung des Maissortenversuches.
- Meiner Familie für deren Hilfe und Unterstützung während meines Studiums.
- Meinen Freunden, die mich durch eine schöne Studienzeit begleiteten und mit denen ich viele lustige Stunden verbringen durfte.
- Meiner Freundin Ulrike, die mir stets zur Seite steht und mich immer wieder unterstützt.

Wien, im Dezember 2007

Johannes Minihuber

## Kurzfassung

Erneuerbare Energiequellen gewinnen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Steigende Energiepreise infolge des weltweit zunehmenden Energiebedarfes, wachsendes Bewusstsein über die begrenzte Nutzbarkeit fossiler Energieressourcen sowie die zunehmende Klima- und Umweltproblematik forcieren die Forderungen nach erneuerbaren Energiequellen. Speziell die Energiegewinnung durch die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen hat in Österreich stark zugenommen.

Unter den eingesetzten Energiepflanzen hat der Mais als Rohstoff die größte Bedeutung, da er als C4- Pflanze das höchste Ertragspotential unter den heimischen Kulturarten besitzt. Energiemais soll möglichst viel Biomasse über die Gesamtpflanze bilden und dabei ein hohes spezifisches Methanbildungsvermögen erreichen. Die Diplomarbeit zeigt auf, welche Maissortentypen sich unter den Standortbedingungen des nordöstlichen Hausruckviertels besonders zur Biogasproduktion eignen. Als Beurteilungskriterien werden die Merkmale Biomasseertrag, spezifisches Methanbildungsvermögen sowie der Methanhektarertrag und der Erntezeitpunkt herangezogen, wobei das spezifische Methanbildungsvermögen der Maissorten anhand der Inhaltsstoffe mithilfe des Methanenergiewertmodells berechnet wird.

Wie die Ergebnisse zeigen, eignen sich vor allem mittelspäte (FAO 320 bis 350) und spätreife (FAO > 350) Sorten am besten zur Biogaserzeugung. Diese Sorten, die Methanhektarerträge von über  $8.000 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erreichen, sind vor allem durch hohe Biomasseerträge (bis zu 25 t Trockenmasse je Hektar) gekennzeichnet. Die spezifischen Methanausbeuten sind speziell bei den mittelspäten Sorten (FAO 320 bis 350) am höchsten (bis zu  $350 \text{ l}_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ ). Der optimale Erntezeitpunkt ist dann gegeben, wenn der maximale Methanhektarertrag erreicht wird und der Mais gut silierfähig ist.

Für eine gekoppelte Nutzung von Maispflanzen eignen sich spätreife Sorten (FAO > 350) am besten, da diese infolge einer verlängerten Ausnutzung der Vegetationszeit höhere Restpflanzentrockenmasseerträge (bis zu 10,5 t) und somit auch höhere Methanerträge aus den Restpflanzen (über  $3.000 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4$  je Hektar) erzielen.

## Abstract

Renewable energy sources have been being of rising importance in the last few years. Rising energy prices due to the world wide increasing energy demand, combined with the growing awareness of the limited availability of fossil energy resources and the increasing climatic and environmental problems have forced considerations about renewable energy sources. In Austria, especially the energy supply through the biogas production out of agrarian biomass has become of major importance.

Among the energy crops, maize is the most commonly used one, because maize has the highest yields potential among the local cultivated crops. Energy-maize achieves high biomass yields and high specific methane yields. On the basis of this diploma thesis has been shown, which varieties of maize are suitable for the biogas production under the local climatic conditions of the northeast “Hausruckviertel”, located in “Upper Austria”. The varieties are analysed on the criteria biomass yield, specific methane yield, methane yield per hectare and optimum harvesting time. The specific methane yield is estimated from the nutrient composition of the maize plants by means of the methane energy value model.

The results show, that the medium ripening varieties (FAO 320-350) and the late ripening variety (FAO 370) are the most suitable ones for the biogas production. These varieties, which are characterised through high biomass yields (up to 25 t dry matter), achieve methane yields beyond 8.000 m<sup>3</sup><sub>N</sub> CH<sub>4</sub> per hectare. The time of harvesting has a key influence on the methane yield per hectare.

In case of a dual utilisation of maize plants, the late ripening variety (FAO 370) is also the best performing one. The late ripening varieties stay longer in the vegetative period and achieve so higher yields (up to 10,5 t dry matter and beyond 3.000 m<sup>3</sup><sub>N</sub> CH<sub>4</sub> per hectare) out of the remaining plants (plants without the maize- cobs).

# Inhaltsverzeichnis

<b>TABELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>IV</b>
<b>ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....</b>	<b>V</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS I.....</b>	<b>VII</b>
<b>ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS II.....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. EINLEITUNG .....</b>	<b>1</b>
1.1. ENTWICKLUNGEN UND POTENTIALE AUF DEM BIOGASSEKTOR.....	2
1.1.1. <i>Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich</i> .....	3
1.1.2. <i>Biomassepotentiale in Österreich bzw. in Europa</i> .....	5
1.2. PROBLEMSTELLUNG.....	7
1.3. ZIELSETZUNG.....	8
<hr/>	
<b>A. STAND DES WISSENS</b>	
<b>2. BEGRIFFSDEFINITIONEN.....</b>	<b>11</b>
<b>3. GRUNDLAGEN DER METHANGÄRUNG .....</b>	<b>12</b>
3.1. DIE METHANGÄRUNG.....	12
3.2. ZUSAMMENSETZUNG UND EIGENSCHAFTEN VON BIOGAS.....	15
3.3. BIOGAS- UND METHANBILDUNGSPOTENTIALE VON ENERGIEPFLANZEN .....	16
<b>4. BIOGASERZEUGUNG AUS MAIS .....</b>	<b>19</b>
4.1. STANDORT- UND NATÜRLICHE PRODUKTIONSBEDINGUNGEN FÜR DEN MAISANBAU .	19
4.2. BEDEUTUNG VON MAIS ALS ENERGIEPFLANZE.....	19
4.2.1. <i>Anforderungen an den Mais bei der Gesamtpflanzennutzung</i> .....	20
4.2.2. <i>Anforderungen an den Mais bei der Koppelnutzung von Pflanzenteilen</i> .....	21
4.3. NEUE ZÜCHTUNGSSTRATEGIEN BEI MAIS .....	23
4.4. MAIS ALS GÄRROHSTOFF.....	26
4.4.1. <i>Bestandteile und Inhaltstoffe des Maises</i> .....	26
4.4.2. <i>Einflüsse der Inhaltsstoffe auf die Methanbildung und die Biogasqualität</i> .....	28
4.4.3. <i>Modelle zur Schätzung der Methanbildung aus Gärrohstoffen</i> .....	30
4.5. BIOMASSEERTRÄGE BEI MAIS .....	33

4.6. METHANBILDUNGSPOTENTIAL VON MAIS.....	34
4.7. METHANHEKTARERTRAG VON MAIS .....	37
4.8. WIRTSCHAFTLICHKEIT DER ENERGIEMAISPRODUKTION .....	39

---

## B. MATERIAL UND METHODEN

<b>5. VERSUCHSSTANDORT UND VERSUCHSDURCHFÜHRUNG .....</b>	<b>41</b>
5.1. STANDORTBEDINGUNGEN (BODEN, KLIMA) IM NORDÖSTLICHEN HAUSRUCKVIERTEL .....	41
5.2. ANBAU, ERNTE UND PROBENGEWINNUNG .....	43
5.3. AUFBEREITUNG DER MAISPROBEN .....	46
<b>6. ANALYSE UND AUSWERTUNG.....</b>	<b>47</b>
6.1. METHODEN ZUR INHALTSSTOFFANALYSE.....	47
6.1.1. <i>Inhaltstoffanalyse nach Weender (nasschemische Analyse)</i> .....	47
6.1.2. <i>Analyse nach der NIRS- Methode</i> .....	48
6.2. BESTIMMUNG DES METHANERTRAGES MIT DEM METHANENERGIEWERTMODELL (MEWM) .....	48
6.3. STATISTISCHE AUSWERTUNG.....	51

---

## C. ERGEBNISSE UND DISKUSSION

<b>7. KORRELATIVE ZUSAMMENHÄNGE IN DEN ERGEBNISSEN DER INHALTSSTOFFANALYSEN NACH NIRS UND NACH WEENDER .....</b>	<b>52</b>
<b>8. ERTRAGSPOTENTIALE DER EINZELNEN MAISSORTEN.....</b>	<b>58</b>
8.1. EINORDNUNG DER MAISSORTEN NACH DEM BIOMASSEBILDUNGSVERMÖGEN.....	58
8.2. EINORDNUNG DER MAISSORTEN NACH DEM KRITERIUM DER METHAN AUSBEUTE.....	63
8.2.1. <i>C:N- Verhältnis der Maispflanzen</i> .....	65
8.2.2. <i>Energetischer Wirkungsgrad (<math>\eta</math>)</i> .....	67
8.3. EINORDNUNG DER MAISSORTEN NACH DEM METHANHEKTARERTRAG.....	68
8.4. BESTANDTEILE DER MAISPFLANZEN UND DEREN EIGNUNG FÜR DIE BIOGASGEWINNUNG (KOPPELNUTZUNG VON MAIS).....	71
8.4.1. <i>Biomasseerträge der Maispflanzenteile</i> .....	72
8.4.2. <i>Spezifisches Methanbildungsvermögen einzelner Maispflanzenteile</i> .....	74
8.4.3. <i>Methanertragspotentiale einzelner Maispflanzenteile</i> .....	76
8.5. BETRACHTUNG DER ERTRAGSPOTENTIALE DER RESTPFLANZE UND DES KOLBENS ...	77

<b>9. EINFLUSS DES ERNTEZEITPUNKTES.....</b>	<b>81</b>
--	-----------

---

**D. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUSAMMENFASSUNG**

<b>10. SCHLUSSFOLGERUNGEN .....</b>	<b>83</b>
<b>11. WEITERFÜHRENDE ARBEITEN .....</b>	<b>85</b>
<b>12. ZUSAMMENFASSUNG .....</b>	<b>87</b>
<b>13. LITERATUR- UND QUELLENVERZEICHNIS .....</b>	<b>91</b>
<b>14. ANHANG .....</b>	<b>98</b>

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einspeisetarife der Ökostromverordnung 2006 im Vergleich zur Ökostromverordnung 2002.....	4
Tabelle 2: Biomasseeinsatz in Österreich gemäß den Entwicklungsprognosen für Wärme-, Ökostrom- und Biokraftstofferzeugung: .....	6
Tabelle 3: Anforderungen an das Milieu im Fermenter bei der Vergärung: .....	14
Tabelle 4: Zusammensetzung und Wirkungen von Biogas .....	15
Tabelle 5: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen .....	17
Tabelle 6: Durchschnittliche Zusammensetzung der Biomasse von Mais im Verlauf der Vegetation .....	28
Tabelle 7: Theoretische Gasausbeute und Gaszusammensetzung bei der Vergärung von Kohlehydraten, Fetten und Proteinen .....	29
Tabelle 8: Trockensubstanzgehalte der Maissorten zu den verschiedenen Ernteterminen .	46
Tabelle 9: Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Maissilage anhand seiner Rohnährstoffe:.....	50
Tabelle 10: Inhaltsstoffzusammensetzung der Maispflanzen (Ergebnisse nach der Weender- bzw. nach der NIRS- Methode) .....	53
Tabelle 11: Korrelationen zwischen den Inhaltsstofffraktionen beim Mais.....	55
Tabelle 12: Korrelative Zusammenhänge zwischen den Nährstoffanalyseergebnissen nach NIRS und Weender .....	57
Tabelle 13: Regressionsmodelle der Ertragsentwicklung der Maissorten in Abhängigkeit von den Trockensubstanzgehalten in den Gesamtpflanzen; Parameterschätzung und Signifikanztest .....	62
Tabelle 14: Spezifisches Methanbildungsvermögen der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntetermin .....	63
Tabelle 15: Vergleich der C:N- Verhältnisse im Verlauf der Vegetation (nach dem Erntezeitpunkt); (Mittelwertsvergleich nach der Scheffé- Prozedur).....	66
Tabelle 16: Maispflanzenteile sowie deren durchschnittliche Nährstoffzusammensetzungen.....	72
Tabelle 17: Vergleich der C:N- Verhältnisse der einzelnen Maispflanzenteile (Einfaktorielle ANOVA: Post- Hoc- Test nach Duncan).....	76



## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Verteilung der Biogasanlagen in Österreich .....	2
Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich .....	3
Abbildung 3: Schematisierter Ablauf der anaeroben Vergärung .....	12
Abbildung 4: Gesamttrockenmassebildung (GTM) bei einer Silomais- (SM) und einer Energimaissorte (EM).....	24
Abbildung 5: Bestandteile einer Maispflanze bei 30% TS in der Gesamtpflanze .....	27
Abbildung 6: Trockenmasseanteile der Stoffgruppen einer typischen Silomaisprobe.....	27
Abbildung 7: Spezifischer Methanertrag in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt der Maissilage.....	35
Abbildung 8: Geographische Lage des Standortes Gaspoltshofen im nordöstlichen Hausruckviertel.....	41
Abbildung 9: Niederschlag und Sonnenscheindauer am Standort Gaspoltshofen im Jahr 2006 .....	42
Abbildung 10: Durchschnittliche Temperatur und Temperatursumme am Standort Gaspoltshofen im Jahr 2006 .....	43
Abbildung 11: Maissorten im Teigreifstadium am Standort Gaspoltshofen.....	45
Abbildung 12: Bilanzstufen des anaeroben Energiestoffwechsels.....	49
Abbildung 13: Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf die Nährstoffzusammensetzung der Maispflanzen .....	54
Abbildung 14: Frischmasseerträge der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt..	59
Abbildung 15: Trockenmasseentwicklung der Maissorten in Abhängigkeit von Erntezeitpunkt .....	60
Abbildung 16: Biomasseerträge der Maissorten in Abhängigkeit vom TS- Gehalt in der Gesamtpflanze (dargestellt sind die gemessenen Werte mit deren Standardabweichung sowie die Kurvenverläufe der sortenspezifischen Regressionsmodelle) .....	61
Abbildung 17: Spezifisches Methanbildungsvermögen in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt der Maissorten .....	65
Abbildung 18: Abhängigkeit des energetischen Wirkungsgrades ( $\eta$ ) vom TS- Gehalt in der Gesamtpflanze.....	67

Abbildung 19: Einfluss der Vegetationslänge (Anzahl der Wuchstage) bzw. des Erntezeittermins auf den Methanhektarertrag der Maissorten .....	69
Abbildung 20: Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt der Maissorten .....	70
Abbildung 21: Absolute bzw. relativer Anteile der einzelnen Pflanzenteile an der Maispflanzenbiomasse .....	73
Abbildung 22: Spezifisches Methanbildungsvermögen der Maispflanzenbestandteile .....	74
Abbildung 23: Methanertragspotentiale der Pflanzenteile je Hektar .....	77
Abbildung 24: Biomassertrag und spezifisches Methanbildungsvermögen der Restpflanzen und der Kolben .....	78
Abbildung 25: Methanhektarerträge aus den Restpflanzen und dem Kolben der Maissorten .....	80
Abbildung 26: Methanhektarertrag der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt.	82

## Abkürzungsverzeichnis I

AWI	Bundesanstalt für Agrarwirtschaft	FM	Frischmasse
		FW	Fermentationswärme
ADM 1	Anaerobic Digestion Model No. 1	g	Gramm
		GE	Bruttoenergie
BAP	Biomasseaktionsplan	GWh	Gigawattstunde
BGBL	Bundesgesetzblatt	ha	Hektar
BMLFUW	Bundministerium für Land-, Forst-, Umwelt- und Wasserwirtschaft	H <sub>2</sub>	Wasserstoff
		H <sub>2</sub> O	Wasser, Wasserdampf
		H <sub>2</sub> S	Schwefelwasserstoff
°C	Grad Celsius	i.d.	in der
ca.	zirka	k.A.	keine Angaben
CCM	Corn- Cob- Mix	kg	Kilogramm
chem.	chemisch	KW	Kilowatt
CH <sub>4</sub>	Methan	KW <sub>el</sub>	Kilowatt elektrische
CH <sub>4</sub> -E	Methanenergie		Energie
cm	Zentimeter	KWh	Kilowattstunde
C:N	Kohlenstoff-Stickstoff Verhältnis	KTBL	Kuratorium für Technik und Bauwesen
CO <sub>2</sub>	Kohlendioxid	l	Liter
DE	Anaerob abbaubare Energie	l <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> * kg	Normliter Methan je
DLG	Deutsche Landwirtschaftsgesellschaft	oTS <sup>-1</sup>	Kilogramm organische Trockensubstanz
DMK	Deutsches Maiskomitee	m	Meter
€	Euro	mm	Millimeter
EGR	Energie im Gärrückstand	m <sup>2</sup>	Quadratmeter
EM	Energiemais	m <sup>3</sup>	Kubikmeter
et al.	und andere	m <sup>3</sup> <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> * ha <sup>-1</sup>	Normkubikmeter Methan
EU	Europäische Union		je Hektar
evt.	eventuell	MEW	Methanenergiewert
f	folgend	MEWM	Methanenergiewertmodell
ff	fortfolgende	Mio.	Million
FAO- Zahl	Reifezahl	Mrd.	Milliarde

## Abkürzungsverzeichnis II

Mtoe	Millionen Tonnen Öl Äquivalent	STMUGV	Bayrisches Staatsministerium für
MW	Mittelwert		Umwelt, Gesundheit und
MW <sub>el</sub>	Megawatt elektrische Energie		Verbraucherschutz
η	Wirkungsgrad	t	Tonne
N <sub>2</sub>	Stickstoff	TM	Trockenmasse
NDF	Neutral verdauliche Fasern	TS	Trockensubstanz
Nfe	Stickstoff- freie Extraktstoffe	TWh	Terawattstunde
NH <sub>4</sub>	Ammoniak	VDI	Verein Deutscher
NIRS	Nah- Infrarot- Reflexions- Spektroskopie		Ingenieure
Nr.	Nummer	Vol.-%	Volumsprozents (volumetrischer
O <sub>2</sub>	Sauerstoff		Raumanteil)
oTS	organische Trockensubstanz	vgl.	vergleich
physiol.	physiologisch	W.T.	Wuchstag
PJ	Petajoule	XA	Rohasche
ppm	parts per million	XF	Rohfaser
%	Prozent	XL	Rohfett
ROE	Rohöleinheiten	XP	Rohprotein
SM	Silomais	XX	Stickstoff- freie
s.p.	sine pagina (ohne Seitenzahl)		Extraktstoffe
STABW	Standardabweichung	z.B.	zum Beispiel

## 1. Einleitung

Die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen gewinnt zunehmend an Bedeutung. Ständig steigende Energiepreise zusammen mit wachsendem Bewusstsein über die Endlichkeit der fossilen Energiequellen und den von ihnen verursachten Umweltprobleme haben in den letzten Jahren die Überlegungen nach erneuerbaren Energiequellen forciert. Durch politische Rahmenbedingungen begünstigt, insbesondere durch die verstärkte Förderung der erneuerbaren Energien, hat auch der Umfang der nachwachsenden Energieträger in neuerer Zeit deutlich zugenommen (vgl. BMLFUW, 2006, 127). Nicht zuletzt durch die gesetzlich festgesetzten Einspeisetarife für Ökostrom ist das Interesse der Landwirtschaft an der energetischen Verwertung von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen stark angestiegen. Für (viele) Landwirte wurde dadurch eine alternative Einkommensmöglichkeit geschaffen. Neben der Nahrungs- und Futtermittelproduktion setzen in den letzten Jahren immer mehr Landwirte auch auf umwelt- und ressourcenschonende Energieerzeugung in Form von Biogas.

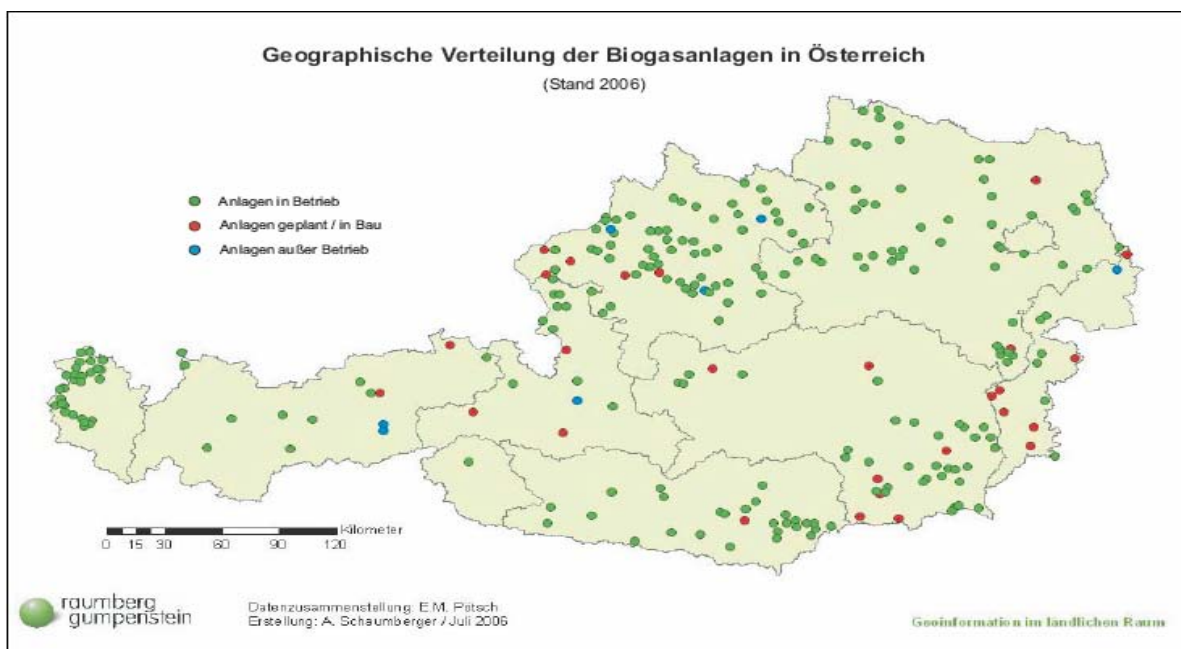
Biogas ist keine Erfindung des modernen Menschen, sondern das Produkt natürlicher Abbauprozesse von Bakterien in sauerstoffarmen (anaeroben) Milieus, seit es Leben auf unserer Erde gibt. In der Natur vollziehen sich diese Prozesse beispielsweise im Verdauungstrakt von Wiederkäuern (z.B. rülpt eine Kuh rund 200 Liter Methan am Tag), in Sümpfen, Ozeanen, Seen, Reisfeldern oder auch Wirtschaftsdüngerlagern (vgl. STMUGV, 2004, 6; WELLINGER et al., 1984, 4).

In der Geschichte der Menschheit dauerte es allerdings lange, bis erstmals erkannt wurde, dass Biogas (Methan) ständig neu gebildet wird. Erstmals wies der Italiener Alessandro Volta im Jahr 1776 die Anwesenheit von Methan im Sumpfgas nach. Rund 100 Jahre später erkannten Bechamp (1868) und Popoff (1873) den mikrobiellen Ursprung der Methangärung. Um 1920 setzte dann der Deutsche Imhoff die vorhandenen Kenntnisse in die Praxis um, indem er ein kontinuierliches Gärverfahren vorschlug, bei welchem ein luftdichter Gastank regelmäßig mit vergärbarem Ausgangsmaterialien beschickt wird unter gleichzeitiger Entnahme derselben Menge vergorenen Substrates (vgl. WELLINGER et al., 1984, 5f).

Während des Zweiten Weltkrieges und in der Nachkriegszeit wurde die Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Abfällen weiter erforscht. Aufgrund der niedrigen Erdölpreise kam die Entwicklung in Europa während der sechziger Jahre jedoch zum Stillstand. Erst durch die Entwicklung neuer Werkstoffe und Verfahren sowie durch die verschärfte Lage auf dem Energiesektor durch die Erdölkrise 1973 formierte sich eine neue Biogas-Bewegung in den industrialisierten Ländern. Intensive Forschungsanstrengungen führten zu Fortschritten in den Verfahrenstechniken, welche heute entsprechend den unterschiedlichen Substraten jeweils adäquate Gärmethoden ermöglichen (vgl. WELLINGER et al., 1984, 5f).

### 1.1. Entwicklungen und Potentiale auf dem Biogassektor

Mit dem Ökostromgesetz 2002 wurde erstmals in der österreichischen Energiepolitik ein rechtlicher Rahmen für eine zukunftsweisende Biogaserzeugung aus Wirtschaftsdüngern, nachwachsenden Rohstoffen (Energiepflanzen) und organischen Abfällen geschaffen. In Folge des Ökostromgesetzes 2002 ist es zu einem rasanten Anstieg in der Anzahl der Biogasanlagen gekommen, wobei die Verteilungsdichte innerhalb Österreich (siehe Abbildung 1) relativ unterschiedlich ist (vgl. BMLFUW, 2006b, 126).



**Abbildung 1: Verteilung der Biogasanlagen in Österreich** (Quelle: BMLFUW, 2006b, 126)

Die meisten Biogasanlagen sind in Niederösterreich (95 Anlagen), Oberösterreich (75) und in der Steiermark (45) vorzufinden, gefolgt von Kärnten und Vorarlberg mit jeweils

knapp über 30 Anlagen (vgl. E- CONTROL, 2006, 146). In den verbleibenden Bundesländern sind nur vereinzelt Biogasanlagen vorhanden.

### 1.1.1. Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich

Die Anzahl der Biogasanlagen nimmt laufend zu. In der Periode von 1999 bis 2003 verdoppelte sich die Anzahl auf 150 Biogasanlagen (vgl. AMON et al., 2003a, 1). Der intensive Ausbau des geförderten Ökostroms setzte sich in Österreich von 2003 bis 2006 in unverminderter Intensität fort. Mit Stand 31.03.2006 waren in Österreich 325 Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 81,06 MW<sub>el</sub> genehmigt – in Betrieb davon waren bis Ende Juni 2006, Biogasanlagen mit einer installierten Leistung von 57,06 MW<sub>el</sub> (vgl. E- CONTROL, 2006, 14). Die Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich seit dem Jahr 1990 ist in Abbildung 2 dargestellt.

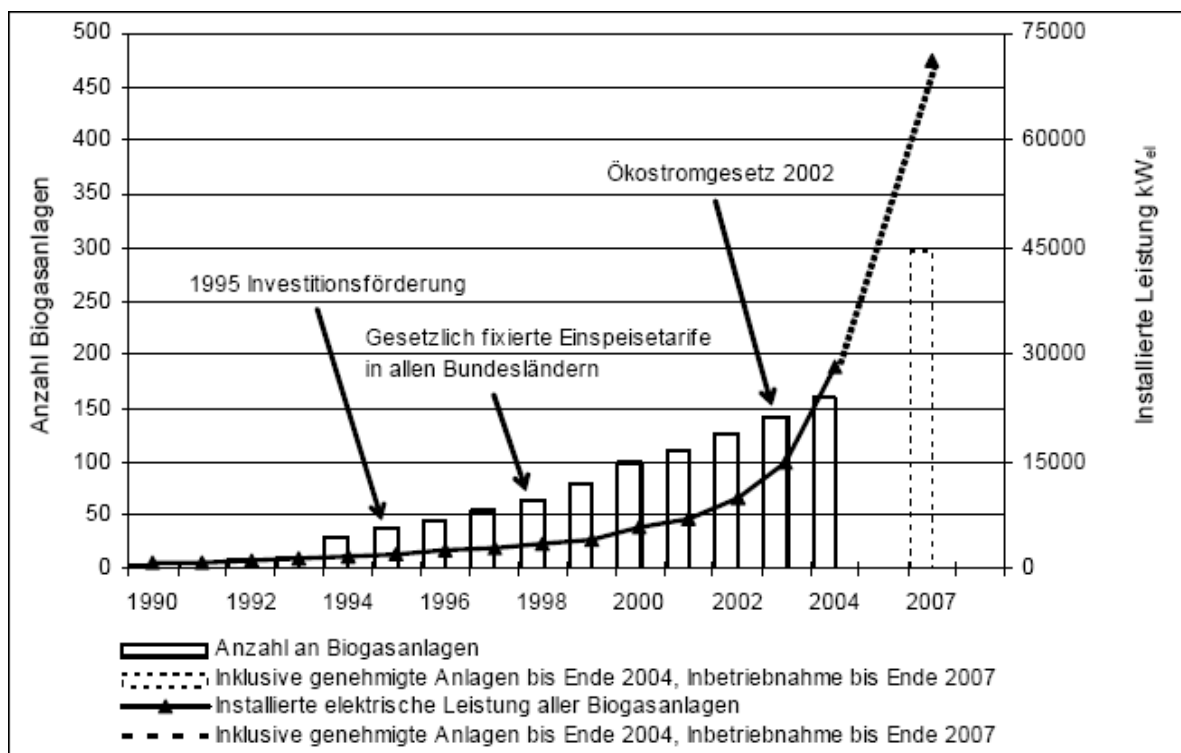


Abbildung 2: Entwicklung der Anzahl der Biogasanlagen in Österreich (Quelle: WALLA, 2006,6)

Neben der Anzahl nimmt auch die Größe der Biogasanlagen zu. Die durchschnittliche Anlagenkapazität stieg von rund 80 KW<sub>el</sub> im Jahr 2002 auf ca. 180 KW<sub>el</sub> im Jahr 2004 (vgl. WALLA, 2006, 6). Werden die bis März 2006 genehmigten Anlagen zusätzlich

einkalkuliert, so ergibt sich für das Jahr 2006 nochmals ein Anstieg in der durchschnittlichen Anlagenkapazität auf rund 250 KW<sub>el</sub> je Anlage.

Durch das Ökostromgesetz 2002 (umgesetzt in der Ökostromverordnung 2002) wurden die Öko- Bilanzgruppen verpflichtet, die von den Anlagenbetreibern angebotenen Ökostrommengen zu festgesetzten Preisen abzunehmen und anschließend die Ökoenergie anteilig an die Stromhändler aufzuteilen. Für die ab Anfang 2003 genehmigten Anlagen sind also die Tarife in der Ökostromverordnung festgelegt (vgl. WALLA, 2006, 2; E-CONTROL, 2006, 23ff). Für „Altanlagen“, die bereits vor Ende 2002 genehmigt waren, gelten die von den Ländern festgelegten und zum jeweiligen Genehmigungszeitpunkt gültigen Preise bis zum Ende des rechtlich vorgesehenen Unterstützungszeitraumes (meist 10 Jahre ab Inbetriebnahme, sofern keine andere Festlegung durch die Länder vorliegt) (vgl. E-CONTROL, 2006, 81).

Durch die Ökostromgesetznovelle 2006 wurden die im Rahmen des Ökostromgesetzes 2002 vereinbarten Förderungsverbindlichkeiten von 3 Milliarden Euro nochmals um 1 Milliarde Euro aufgestockt für die Unterstützung weiterer neuer Ökostromanlagen. Diese zusätzlichen Mittel sind zweckgewidmet, wobei 30% für Biogas vorgesehen sind (vgl. E-CONTROL, 2006, 29). Tabelle 1 zeigt die neuen Einspeisetarife im Vergleich zu den früheren Werten aus 2002.

**Tabelle 1: Einspeisetarife der Ökostromverordnung 2006 im Vergleich zur Ökostromverordnung 2002**

Einspeisetarife für Ökostromanlagen		Neu (Tarif in Cent/KWh) gemäß BGBl II Nr.401/2006 10 + 2 (reduzierte) Jahre	Alt (Tarif in Cent/KWh) gemäß BGBl II Nr.508/2002 13 Jahre
Biogas aus landwirtschaftlichen Produkten (wie Gülle, Mais,...)	bis 100 kW	17,00 (16,95)	16,50
	100 - 250 kW	15,20 (15,15)	14,50
	250 - 500 kW	14,10 (14,00)	14,50
	500 – 1000 kW	12,60 (12,40)	12,50
	über 1000 kW	11,50 (11,30)	10,30
Biogas bei Kofermentation von Abfallstoffen		minus 30%	minus 25%

Quelle: E-CONTROL, 2006, 31.



Strom aus Biogas durch Kofermentation von Abfallstoffen (wie Magen und Darminhalte, verdorbene Lebensmittel, Speisereste aus Küchen und Gastronomie, Fettabscheider) hat einen um 30% bzw. 25% niedrigeren Einspeisetarif, da bei den Abfallprodukten kaum Erzeugungskosten entstehen und teilweise sogar Entsorgungsgebühren eingehoben werden (vgl. HOPFNER- SIXT, 2005, 7).

### ***1.1.2. Biomassepotentiale in Österreich bzw. in Europa***

Der Biomasseaktionsplan (BAP) der Europäischen Kommission zielt auf eine Steigerung des Anteils der erneuerbaren Energieträger am Primär- Energieverbrauch von derzeit rund 6% auf 12% bis zum Jahr 2010 ab (vgl. AMON et al., 2006a, 1). Zu den erneuerbaren Energieträgern zählen Wind, Sonne, Wasserkraft, Biomasse, Biogas, Klärgas, Erdwärme, Wellenenergie und Gezeitenenergie.

Insbesondere soll Biomasse – so das politische Ziel in vielen Ländern der Europäischen Union – zukünftig einen deutlich größeren Beitrag zu einer umwelt- und klimaverträglichen Deckung der Energienachfrage leisten. Dabei strebt die Europäische Kommission laut ihrem im Dezember 2005 vorgelegten BAP eine EU-weite Erhöhung der energetischen Biomassenutzung von 69 Mtoe (Millionen Tonnen Öl Äquivalent) im Jahr 2003 auf ca. 150 Mtoe bis etwa 2010 an (vgl. BMLFUW, 2006a, 6). In Folge gesteigerter energetischer Biomassenutzung können höhere Beimischungssätze von alternativen Kraftstoffen eingeführt werden, wie beispielsweise aufbereitetes Biogas, welches sich in der chemischen Zusammensetzung nicht von Erdgas unterscheidet. Nach AMON et al. (2006a, 1) können mit Biogas aus integrierten Systemen 4.782.924 t ROE (Rohöleinheiten) erreicht werden, im Vergleich zum derzeitigen Ergasbedarf von 7.222.699 t ROE.

Im Bereich des Strommarktes fordert die EU von den Mitgliedstaaten eine Anhebung des Anteils der erneuerbaren Energieträger am Bruttoelektrizitätsverbrauch von 14% (1997) auf 22% im Jahr 2010. Für die Erreichung der Ziele am Strommarkt wurde die Richtlinie 2001/77/EG des Europäischen Parlamentes und Rates im Jahr 2001 zur Förderung der Stromerzeugung aus erneuerbaren Energieträger erlassen, in der die Richtziele jedes Mitgliedstaates festgelegt sind, unter anderem auch die Einhaltung der Kyoto-Vereinigungen, wie die Reduktion der Treibhausgasemissionen (vgl. WALLA, 2004, 1f).

Auf nationaler Ebene hat sich die österreichische Regierung im Regierungsprogramm 2003 das Ziel gesetzt, den energetischen Biomasseeinsatz bis 2010 um 75% zu erhöhen. Als langfristiges Ziel wird die Verdoppelung des Anteils der erneuerbaren Energieträger am Gesamtenergieverbrauch von 23% im Jahr 2004 auf 45% im Jahr 2020 angestrebt (vgl. BMLFUW, 2006a, Vorwort).

Laut dem Nationalen Biomasseaktionsplan für Österreich (2006) wurden 2004 rund 99,8 Petajoule (PJ) – das entspricht etwas mehr als 7% des Bruttoinlandsverbrauches an Energie - aus Biomasse bereitgestellt. Bei einer nachhaltigen Nutzung des Biomassepotentials könnte der Biomasseeinsatz bis 2010 auf 193 PJ beinahe verdoppelt werden. Bis 2020 ist sogar eine Steigerung auf 256 PJ möglich, was einem Zuwachs um das 2,5- fache gegenüber 2004 entsprechen würde (siehe Tabelle 2). Die größte theoretisch machbare Steigerung gibt es bei den Biokraftstoffen: von 1,2 PJ (2004) auf 34 PJ (2010) bzw. 72 PJ (2020) (vgl. BMLFUW, 2006a, 7).

**Tabelle 2: Biomasseeinsatz in Österreich gemäß den Entwicklungsprognosen für Wärme-, Ökostrom- und Biokraftstofferzeugung:**

<b>PJ</b>	<b>2000</b>	<b>2004</b>	<b>2010 (Prognose)</b>	<b>2020 (Prognose)</b>
<b>Wärme</b>	81,3	93,6	115,3	130,0
<b>Strom</b>	3,2	4,9	43,8	53,7
<b>Biokraftstoffe</b>	1,0	1,2	34,1	72,3
<b>Gesamtsumme</b>	<b>85,5</b>	<b>99,7</b>	<b>193,3</b>	<b>256,0</b>

Quelle: BMLFUW, 2006a, 7.

Durch diese prognostizierte Darstellung der Biomassenutzung von 2004 bis 2010 bzw. 2020 ist eine Senkung der Treibhausemissionen um 7 Mio. Tonnen bis 2010 bzw. 12 Mio. Tonnen bis 2020 zu erwarten. Als gesamtwirtschaftlicher positiver Effekt sei eine zusätzliche Wertschöpfung von 7 Mrd. Euro (2005 - 2010) bzw. 20 Mrd. Euro (2005 - 2020) durch Investitionen und die Schaffung von Arbeitsplätzen genannt (vgl. BMLFUW, 2006a, 7).

Mithilfe der genehmigten Ökostromanlagen lässt sich auch eine realistische Ökostromproduktion aus Biomasse abschätzen. Berechnungen zufolge ergibt sich für 2010

eine Ökostromproduktion von 3,2 TWh, wovon knapp 700 GWh auf Strom aus Biogas entfallen. Im Vergleich dazu waren es im Jahr 2004 nur 102 GWh (vgl. E- CONTROL, 2004, zitiert in BMLFUW, 2006a, 10). Weiteren Berechnungen zufolge dürfte die Stromproduktion aus Biogas bis 2020 auf rund 900 GWh steigen. Laut Schätzungen der EU- Kommission sind für Österreich noch höhere Potentiale für die Ökostromproduktion aus Biomasse möglich: am konkreten Beispiel etwa 2.000 GWh aus Biogas (vgl. BMLFUW, 2006a, 10).

Um die Prognosen (Strom und Wärme) auf dem Sektor der gasförmigen Biomasse (Biogas) erreichen zu können, steigt der Biogasbedarf bis 2010 auf 6,8 PJ (= ein Methanbedarf von knapp 190 Mio. m<sup>3</sup>), bis 2020 auf 9 PJ (~ 250 Mio. m<sup>3</sup> Methan) (vgl. BMLFUW, 2006a, 11).

Bei den Biokraftstoffen wird im Verkehrsbereich bis 2010 ein Biokraftstoffanteil von 10,3% angestrebt. Von diesem 10%igen Biokraftstoffanteil sollen ca. 83% aus Biodiesel, 9% aus Bioethanol und 8% aus Biomethan stammen. Umgerechnet auf den gesamten Kraftstoffeinsatz im Verkehr wird der Biomethananteil im Jahr 2010 nur ca. 0,8% betragen. Bis 2020 soll der Biomethananteil am Gesamtkraftstoffverbrauch aber schon an die 10% erreichen (vgl. BMLFUW, 2006a, 12f).

## **1.2. Problemstellung**

Für die Vergärung in Biogasanlagen eignen sich eine Vielzahl von Substraten: Wirtschaftsdünger, Restpflanzen, Nebenprodukte der Lebensmittel- und Rohstoffherzeugung und besonders Energiepflanzen.

In der Vergangenheit war meist Wirtschaftsdünger das Hauptsubstrat in Biogasanlagen. Nach DÖHLER et al. (2004, 102f) betrug bis zum Jahr 2004 bei über 80% der Biogasanlagen der Massenanteil der Wirtschaftsdünger zumindest 50%.

Speziell in den letzten Jahren haben aber nachwachsende Rohstoffe in der Biogasgewinnung mehr und mehr an Bedeutung gewonnen. In jüngster Zeit errichtete Anlagen vergären schon überwiegend Silomais, Grassilage und Futterleguminosen. Durch verfahrenstechnische Verbesserungen wurde es möglich, Biogasanlagen ausschließlich mit

Energiepflanzen zu betreiben. Silomais, Grassilage und Futterleguminosen sind sowohl alleine als auch in unterschiedlichen Mischungen vergärbar (vgl. AMON et al., 2004b, 32ff). Auf vielen Standorten werden zurzeit spezielle Energiemaissorten angebaut, die anschließend in Form von Maissilage als Gärsubstrat in Biogasanlagen zur Energieerzeugung eingesetzt werden.

Die Entwicklungen am Biogassektor sind eine große Herausforderung für den Pflanzenbau und die Pflanzenzüchtung: einerseits müssen die Pflanzenbauer optimale Energiepflanzen-Fruchtfolgen entwickeln und andererseits sind die Pflanzenzüchter gefordert, die für den Energiepflanzenbau in Frage kommenden Kulturarten auf eine hohe Energieertragsleistung hin zu optimieren. Bisher sind Zuchtbemühungen bei den landwirtschaftlichen Kulturarten ausschließlich auf den Fortschritt in der Nahrungs- und Futtermittelproduktion hin ausgerichtet gewesen. Die maximale Energieproduktion in umwelt- und ressourcenschonenden Anbauverfahren ist nun ein neues Zuchtziel, das aber schon in relativ kurzer Zeit bei vielen Kulturarten beeindruckende Erfolge erwarten lässt (vgl. SCHMIDT, 2005,1).

Viele der neueren Biogasanlagen verwenden Energiemais als Hauptsubstrat für die Vergärung. Um optimale Energieerträge pro Hektar Kulturfläche erreichen zu können, ist es wichtig, dass die Landwirte dem Standort bzw. den natürlichen Produktionsbedingungen (Boden, Klima) angepasste Sorten verwenden.

### **1.3. Zielsetzung**

Ziel dieser Diplomarbeit ist es, die Ertragspotentiale verschiedener Maissortentypen zur Biogaserzeugung zu erheben, und damit einen Beitrag zu einer weiteren Optimierung der Biogasgewinnung aus dem Rohstoff Mais zu leisten. Um eine optimale Methanproduktion zu erreichen, müssen diejenigen Genotypen gefunden werden, die eine hohe Methanernte je Hektar erbringen.

Es soll festgestellt werden, welche Maissortentypen sich am besten für die Biogaserzeugung eignen. Zur Analyse und Bewertung werden dabei die Ergebnisse eines Feldversuches in Gaspoltshofen, einem guten Maisbaustandort im nordöstlichen Hausruckviertel (Oberösterreich), herangezogen. Anhand von den Untersuchungen soll

gezeigt werden, welche Maissorten unter guten Standortbedingungen hohe Biogas- bzw. Methanerträge erbringen.

Der Methanertrag je Hektar Mais soll also optimiert werden. Dieser Methanhektarertrag ergibt sich aus den beiden Ertragsfaktoren

- Biomasseertrag (oTS- Ertrag je Hektar) und
- spezifisches Methanbildungsvermögen (Methanausbeute je kg oTS Mais).

Die Untersuchungen bezüglich der Ertragsfähigkeit der einzelnen Maissorten werden unter folgenden Teilzielen durchgeführt:

- Bestimmung des Biomassebildungsvermögens der Maissorten: Durch Probenahmen an sechs Ernteterminen ist es möglich, den Wachstumsverlauf und damit den Ertragsverlauf der Maispflanzen festzustellen. Das Biomassepotential der Sorten soll anhand der Hektarerträge an Trockensubstanz (TS) bzw. organischer Trockensubstanz (oTS) beurteilt werden.
- Bestimmung des spezifischen Methanertrages der Maissorten: Sortenspezifische Unterschiede in der spezifischen Methanausbeute sollen mittels dem Methanenergiewertmodell (MEWM) aufgezeigt werden. Berechnet wird dabei die Methanausbeute über die Nährstoffzusammensetzung der Maispflanzen, die mittels der Weender- und auch nach der NIRS- Analysemethode ermittelt werden. Etwaige Unterschiede zwischen den Analyseergebnissen der beiden Untersuchungsvarianten sollen ebenfalls aufgezeigt und interpretiert werden.
- Schließlich soll der Methanhektarertrag der verschiedenen Maissorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt bestimmt werden. Daraus lässt sich der Einfluss der Reifeentwicklung von früh- bis spätreifen Sorten auf den flächenbezogenen Methanertrag ermitteln.

Infolge einer mehrmaligen Beprobung bei verschiedenen Reifestadien soll für die Maissorten die Zeitspanne des maximalen Methanhektarertrages und somit der optimale Erntetermin gefunden werden. Es soll gezeigt werden, in welchem Wachstums- bzw. Reifestadium die Maissorten die höchsten Methanerträge erbringen.

Da zukünftig auch eine Koppelnutzung von Maispflanzen mehr an Bedeutung gewinnen könnte, soll in weiterer Folge untersucht werden, wie sich die verschiedenen Pflanzenteile

der einzelnen Maissorten bezüglich der Biomassebildung unterscheiden. Dabei soll sowohl die Quantität (Biomasse) als auch die Qualität (Nährstoffzusammensetzung) der einzelnen Pflanzenteile betrachtet werden. Infolge dieser Untersuchungen soll ersichtlich werden, ob sich bestimmte Sorten besonders für eine Koppelnutzung eignen.

## A. STAND DES WISSENS

### 2. Begriffsdefinitionen

Begriffe, die im Bereich der Biogasproduktion und -nutzung eine wesentliche Rolle spielen und daher oft verwendet werden, sind hier kurz definiert:

**Abbaugrad in %:** bezieht sich auf die Verminderung der organischen Substanz des Substrates durch den anaeroben Abbau (vgl. VDI, 2006, 6).

**Batch- Versuch:** = ein diskontinuierlicher Gärtest, bei dem Substrate unter definierten anaeroben Bedingungen einer Vergärung unterzogen werden (vgl. VDI, 2006, 7). Mittels Batch- Versuchen können die maximalen Methanausbeuten von Substraten ermittelt werden, sowie die Abbaugeschwindigkeiten bzw. Hemmwirkungen der untersuchten Stoffe beurteilt werden (vgl. KTBL, 2005, 7f).

**Biogas:** Biogas ist ein gasförmiges Produkt der Vergärung, das hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) besteht und je nach Substrat außerdem Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ), Schwefelwasserstoff ( $\text{H}_2\text{S}$ ), Wasserdampf und andere gasförmige oder verdampfbare Bestandteile enthalten kann (vgl. VDI, 2006, 6).

**Biogasausbeute** [ $\text{l}_\text{N} \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ ]: Biogasmenge je eingesetzter Substratmenge.

**FAO- Zahl:** Die FAO- Zahl entspricht der Reifezahl, mit der das Abreifeverhalten von Mais beschrieben wird. Unter mitteleuropäischen Verhältnissen entspricht eine Differenz von 10 FAO- Einheiten einem Reifeunterschied von 1-2 Tagen bzw. 1-2% Trockensubstanzgehalt der Körner zum Zeitpunkt der Reife. Die Maissorten werden dabei in frühe (FAO < 220), mittelfrühe (FAO 230 bis 250), mittelspäte (FAO 260 bis 290) und späte (FAO > 300) Sorten eingestuft (vgl. DMK, 2007, s.p.). Die FAO- Zahlen dürfen aber nicht als absolute Werte gesehen werden. Diese Zahlen charakterisieren Sorten auf bestimmten definierten Standorten.

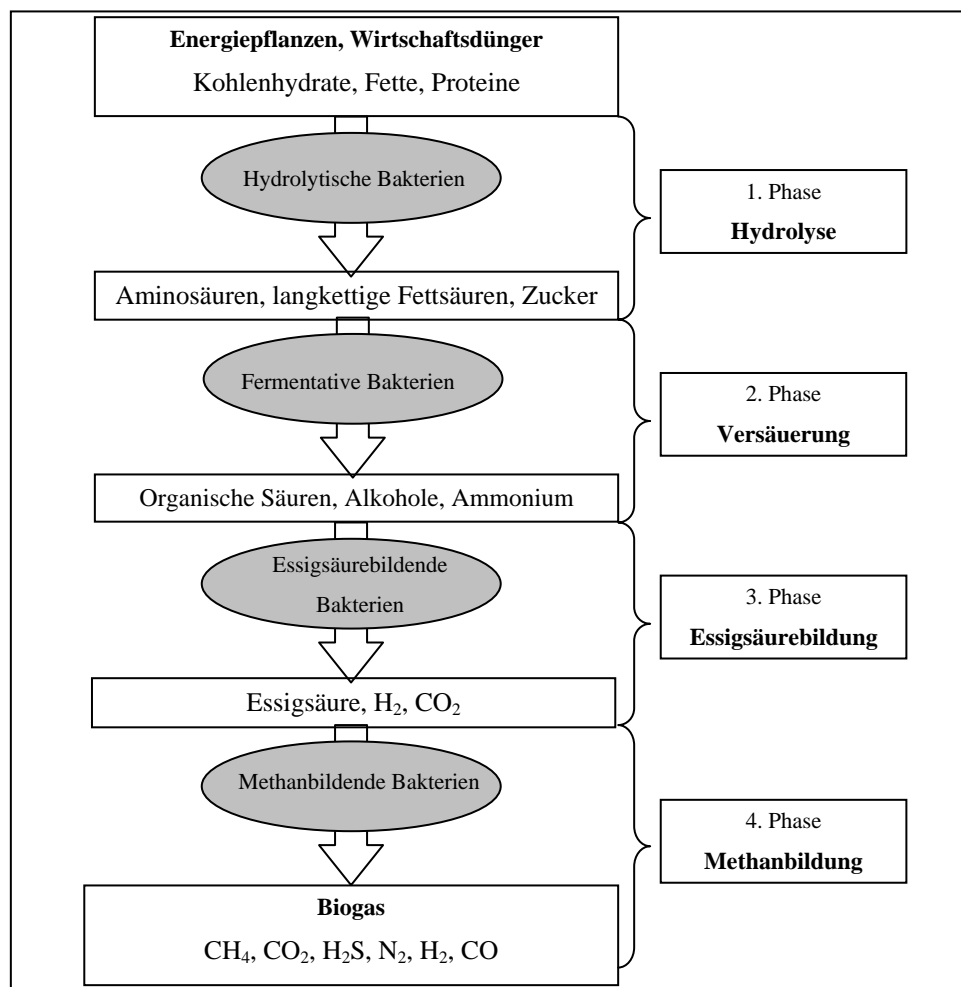
**Wirkungsgrad der Methanbildung:** ergibt sich aus dem Verhältnis von Methanenergie im Biogas ( $\text{CH}_4\text{-E}$ ) zur Bruttoenergie im Gärgut (GE).

### 3. Grundlagen der Methangärung

Die Biogaserzeugung nutzt einen natürlichen, biologischen Zersetzungsprozess, bei dem in einem sauerstofffreien System Methan entsteht. In der Natur vollzieht sich dieser Prozess beispielsweise im Verdauungstrakt von Wiederkäuern, in Sümpfen, Ozeanen, Seen, Reisfeldern oder auch Wirtschaftsdüngerlagern (vgl. STMUGV, 2004, 6).

#### 3.1. Die Methangärung

Der anaerobe Abbau von organischem Material durch verschiedene Bakteriengruppen lässt sich in vier Teilschritte (Stufen) untergliedern. Abbildung 3 zeigt schematisch den mehrstufigen anaeroben Abbau, die beteiligten Mikroorganismen sowie den entstehenden Abbaugruppen.



**Abbildung 3: Schematisierter Ablauf der anaeroben Vergärung** (Quelle: in Anlehnung an KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 27)



### 1. Hydrolytische Phase:

In der ersten Stufe, der Hydrolyse, bauen hydrolytische Bakterien polymere organische Verbindungen mit Hilfe von Exoenzymen in niedermolekulare Verbindungen wie Einfachzucker, Aminosäuren, Fettsäuren und Wasser um (vgl. HOPFNER- SIXT, 2005, 26). Während die Hydrolyse von Bipolymeren nur wenige Stunden (Kohlehydrate) bis zu wenigen Tagen (Fette, Lipide) dauert, ist die Hydrolyse von komplexen organischen Verbindungen ein langsamer Prozess, der von der Aktivität der extrazellulären Enzyme wie Cellulasen, Amylasen, Proteasen und Lipasen abhängig ist (vgl. HOPFNER- SIXT, 2005, 26f; LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN – WESTFALEN, 2004, 23). Materialien mit einem hohen Anteil an Lignocellulose und Lignin sind nur langsam und unvollständig abbaubar. Während sich Cellulose mit Cellulasen und Xylanasen aus der Lignocellulose herauslösen lässt, beschreibt SCHERER (2001, 47) anaerober Ligninabbau als „zweifelhaft“.

### 2. Acidogene Phase (Versäuerung):

Bei der Acidogenese (Versäuerung) werden die monomeren und oligomeren Verbindungen von fermentativen Bakterien aufgenommen und zu organischen Säuren (Essigsäure, Propionsäure, Buttersäure) und Alkoholen sowie zu Wasserstoff und Kohlendioxid vergoren (vgl. HOPFNER- SIXT, 2005, 27).

### 3. Acetogene Phase (Essigsäuregärung):

In der dritten Phase, der Acetogenese, erfolgt die Umsetzung der organischen Säuren und Alkohole zu Essigsäure (Acetat), Wasserstoff und Kohlendioxid.

### 4. Methanogene Phase (Methangärung):

Die vierte Phase, die Methanogenese, benötigt streng anaerobe Bedingungen für die Methanbakterien, da sie zu den sauerstoffempfindlichsten Mikroorganismen gehören und daher nur unter anaeroben Bedingungen aus den methanogenen Verbindungen Biogas erzeugen können. Das entstehende Methan wird zu rund 70% aus Essigsäure produziert, die verbleibenden 30% entstehen durch die Verbindung (Reduktion) von Kohlendioxid mit Wasserstoff (vgl. LANDWIRTSCHAFTSKAMMER NORDRHEIN – WESTFALEN, 2004, 24f; HOPFNER- SIXT, 2005, 27f).

Die Mikroorganismen, die an den Abbauschritten im Fermenter beteiligt sind, stellen bestimmte Anforderungen an das Milieu (siehe Tabelle 3). Die versäuernden Bakterien finden bei rund 30°C optimale Bedingungen vor, während die Methanbakterien bei 32 – 37°C im mesophilen Bereich bzw. bei 50 – 58°C im thermophilen Bereich optimal arbeiten (vgl. KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 28f).

**Tabelle 3: Anforderungen an das Milieu im Fermenter bei der Vergärung:**

Einflussgröße	Hydrolyse/ Versäuerung	Methangärung
Temperatur	25 – 30°C	mesophil: 32 – 42°C thermophil: 50 – 58°C
pH- Wert	5,2 – 6,3	6,7 – 7,5
C:N – Verhältnis	10 – 45	20 – 30
Feststoffgehalt	< 40% TS	< 30% TS

Quelle: KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 28.

Die meisten Anlagen werden im mesophilen Bereich betrieben. Bei thermophiler Prozessführung wird bereits erwärmtes Material (z.B. nach Hygienisierung) vergoren. Es werden zwar höhere Gasbildungsrate erreicht, jedoch reagieren die thermophilen Bakterien wesentlich empfindlicher auf Unregelmäßigkeiten (vgl. KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 28f).

Neben einem Temperaturoptimum haben die beteiligten Bakterienstämme auch unterschiedliche Ansprüche an den pH-Wert im Fermenter. Die hydrolysierenden und säurebildenden Bakterien gedeihen bei pH-Werten zwischen 4,5 und 6,3 am besten, während die methanbildenden Bakterien zwingend einen pH- Wert im neutralen Bereich bei 6,8 bis 7,5 benötigen (vgl. KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 29). Bei einstufigen Verfahren (Gärprozess findet nur in einem Behälter statt) ist eine kontinuierliche Verarbeitung der Zwischenprodukte erforderlich, um einer Versäuerung des Milieus entgegenzuwirken. Einstufige Verfahren sind meist vorrangig auf die Milieuanforderungen der methanogenen Bakterien abgestimmt, da diese aufgrund ihrer geringeren Wachstumsgeschwindigkeit und höheren Empfindlichkeit in einer gemischten Bakterienkultur benachteiligt sind (WEILAND zitiert in KARPENSTEIN- MACHAN, 2005, 28).

### 3.2. Zusammensetzung und Eigenschaften von Biogas

Die Qualität des Biogases wird durch den Gehalt an Methan, Kohlendioxid, Schwefelwasserstoff und weiteren Spurengasen sowie Wasserdampf bestimmt. Die Zusammensetzung und die Eigenschaften des Biogases hängen im Wesentlichen mit den bei der Erzeugung eingesetzten Rohstoffen zusammen (vgl. SIMON und SCHWANHÄUSER, 2004, 78). WALLA (2001, 6) sieht neben den unterschiedlichen Substraten bzw. Substratzusammensetzungen auch die verschiedenen Fermentertypen als Ursache für unterschiedliche Zusammensetzungen von Biogas. In Tabelle 4 sind die relevanten Biogasbestandteile entsprechend ihren durchschnittlichen Anteilen am Biogasvolumen aufgelistet. Nach SCHERER (2001, 48) haben alle in der Natur ablaufenden Faulungsprozesse die Gemeinsamkeit, dass das dabei entstehende Biogas etwa zu 50-70% aus Methan sowie zu 30-50% aus Kohlendioxid besteht.

**Tabelle 4: Zusammensetzung und Wirkungen von Biogas**

Bestandteil	Chem. Formel	Anteil am Biogas (Vol.-%)	Wirkung(en)
Methan	CH <sub>4</sub>	50 – 75	Brennbare Biogaskomponente
Kohlendioxid	CO <sub>2</sub>	25 – 50	Vermindert Brennwert, fördert Korrosion (schwache Kohlensäure)
Wasserdampf	H <sub>2</sub> O	1 – 10	Korrosion
Stickstoff	N <sub>2</sub>	0 – 5	Vermindert Brennwert
Sauerstoff	O <sub>2</sub>	0 – 2	Explosionsgefahr
Wasserstoff	H <sub>2</sub>	0 – 1	
Ammoniak	NH <sub>3</sub>	0 – 1	Korrosion, NO <sub>x</sub> -Emissionen, giftig
Schwefelwasserstoff	H <sub>2</sub> S	0 – 1	SO <sub>2</sub> -Emissionen, giftig

Quelle: SIMON und SCHWANHÄUSER, 2004, 78; BMVIT, 2005, 22.

Der Heizwert wird im Wesentlichen vom Methangehalt bestimmt. Biogas mit einem Methangehalt von 50% hat einen Heizwert von 5 KWh/m<sup>3</sup>, bei einem Methananteil von 75% liegt dieser bei 7,5 KWh/m<sup>3</sup> (vgl. SIMON und SCHWANHÄUSER, 2004, 79).

Für die Verwertung sind die Eigenschaften der einzelnen Gase von Bedeutung. Hier sind vor allem die Spurengase zu beachten, insbesondere Schwefelwasserstoff, Ammoniak und

Wasserdampf. Ammoniak und Schwefelwasserstoff sind Abbauprodukte beim Eiweißabbau und gelten als Hemmstoffe bei der anaeroben Vergärung (vgl. SCHERER, 2001, 65). Die Ursache für hohe Schwefelwasserstoffgehaltswerte ist in proteinreichen Gärsubstraten mit niedrigen pH- Werten und einem engen C:N- Verhältnis zu finden. Nach EDER und SCHULZ (2006, 29) liegt im Fermenter die Toxizitätsgrenze bei 2.000 ppm Schwefelwasserstoff im Biogas. Das heißt, dass ab diesem Gehalt mit einer Hemmung der Bakterien im Fermenter gerechnet werden muss. Bei der Verwertung von Biogas in Blockheizkraftwerken sind geringere Schwefelwasserstoffwerte gefordert, um Korrosionsprobleme und Emissionen zu vermeiden. SIMON und SCHWANHÄUSER (2004, 78f) empfehlen bei einer hohen Schwefelwasserstoffkonzentration eine Entschwefelung des Biogases bzw. bei einem hohen Anteil an Wasserdampf eine Trocknung des Biogases, um die Verwertbarkeit des Biogases zu erhöhen. Nach Weiland (2003, zitiert in HOPFNER-SIXT, 2005, 44) ist bei der Verwendung von Biogas in Blockheizkraftwerken ein Schwefelwasserstoff- Grenzwert von 200 bis 250 ppm im Biogas einzuhalten.

### **3.3. Biogas- und Methanbildungspotentiale von Energiepflanzen**

Verschiedene Energiepflanzen werden als Rohstoffe zur Biogaserzeugung in landwirtschaftlichen Biogasanlagen eingesetzt. Anhand von Praxis- und Laborversuchen wird das Biogasbildungsvermögen damit die Eignung der einzelnen Rohstoffe zur Biogas- bzw. Methangewinnung ermittelt. In Tabelle 5 sind die Biogas- und Methanbildungspotentiale häufig verwendeter Energiepflanzen aufgelistet. Da den Untersuchungen zum Teil verschiedene methodische Rahmenbedingungen zugrunde liegen, sind die Biogas- und Methanerträge in Tabelle 5 nur eingeschränkt vergleichbar und nicht ohne weiteres auf praktische Verhältnisse übertragbar (vgl. AMON et al., 2007c, 7f).

Entscheidend für die Energiegewinnung ist der Methangehalt im Biogas und somit der Methanertrag, der aber je nach Gärbedingungen stärkeren Schwankungen unterliegen kann (vgl. AMON et al., 2003a, 7).

**Tabelle 5: Spezifischer Biogas- und Methanertrag von Energiepflanzen**

Energiepflanze	Biogasertrag [l <sub>N</sub> * kg oTS <sup>-1</sup> ]	Methanertrag [l <sub>N</sub> * kg oTS <sup>-1</sup> ]	Methode	Quelle
Grassilage	500 - 600	-	k. A.	BASERGA (2000, s.p.)
Grassilage	627 (52,9*)	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Grassilage	-	219 - 436	Batch- Versuch	KAISER et al. (2004, s.p.)
Grassilage	-	128 - 392	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 5)
Kleegrassilage	482 (69,4*)	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Kleegrassilage	-	~ 326	Batch- Versuch	AMON et al. (2003a, 40)
Maissilage (Milchreife)	578 (51,9*)	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Maissilage (Teigreife)	642 (54,0*)	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Maissilage (Vollreife)	593 (54,0*)	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Maissilage	-	250 - 360	Batch- Versuch	KAISER et al. (2004, s.p.)
Maissilage	-	359 - 422	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 3)
Roggen -	664	-	k. A.	KTBL (2005, 11)
Ganzpflanzensilage	-	140 - 275	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 4)
Sonnenblumensilage	-	154 - 454	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 4)
Sudangrassilage	531	-	k. A.	KTBL (2005, s.p.)
	-	213 - 239	Batch- Versuch	Amon et al. (2002, s.p.)
Triticale- Ganzpflanzensilage	-	212 - 286	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 4)
Weizen- Ganzpflanzensilage	-	228 - 243	Batch- Versuch	AMON et al. (2006c, 4)

\*= Methangehalt im Biogas [%]; k. A.= keine Angabe

Quelle: verschiedene Autoren zitiert in Amon et al. (2007c, 5ff).

Die Methanausbeute aus der Biomasse wird maßgeblich von den Gehaltswerten an Inhaltsstoffen (Eiweiß, Fett, Rohfaser und N- freie Extraktstoffe) bestimmt. Da sich die Konzentrationen der Inhaltstoffe mit dem Alter der Pflanzen ändern, kommt dem Zeitpunkt, an dem die zu vergärenden, pflanzlichen Rohstoffe geerntet werden, in Bezug auf die Methanausbeute aus der Biomasse und auf die Methanmenge, die pro Hektar geerntet werden kann, eine wesentliche Bedeutung zu (vgl. AMON et al., 2003a, 8). Auch sortenspezifische Unterschiede in der Nährstoffzusammensetzung haben einen Einfluss auf das Methanbildungsvermögen von Energiepflanzen (vgl. MUKENGELE et al., 2006, zitiert in AMON et al., 2003a, 7).

In Biogasanlagen werden Energiepflanzen meist in Kombination mit Wirtschaftsdüngern vergoren. Ergänzend zu den Methanbildungspotentialen der Energiepflanzen (siehe

Tabelle 5) soll auch das Potential der Wirtschaftsdünger erwähnt sein. Nach KTBL (2005, 15) hat Schweinegülle einen spezifischen Biogasertrag von ca.  $400 \text{ l}_N * \text{kg oTS}^{-1}$  bei rund 60% Methangehalt, während der Biogasertrag von Rindergülle bei ca.  $280 \text{ l}_N * \text{kg oTS}^{-1}$  und rund 55% Methangehalt liegt. Im Vergleich dazu erreichte KRYVORUCHKO (2004, 144ff) bei Untersuchungen von Milchviehkotproben Biogasausbeuten zwischen 208 und  $268 \text{ l}_N * \text{kg oTS}^{-1}$  sowie Methanausbeuten zwischen 125 bis  $166 \text{ l}_N * \text{kg oTS}^{-1}$ .

## **4. Biogaserzeugung aus Mais**

### **4.1. Standort- und natürliche Produktionsbedingungen für den**

#### **Maisanbau**

Mais, eine der ältesten Kulturpflanzen der Menschheit, wurde vor rund 5.000 Jahren in Mittel- und Südamerika aus Wildformen gezüchtet. Nach der Entdeckung Amerikas im Jahre 1492 gelangte der Mais nach Europa. Durch die Züchtung von Hybridsorten setzte sich Mitte des 20. Jahrhunderts der Maisanbau mehr und mehr durch und ist nun ein entscheidender Bestandteil in vielen Fruchtfolgen.

Mais (*Zea mays*), zugehörig zur Familie der Echten Gräser, ist eine wärmebedürftige Kurztagspflanze. Da der Mais aus warmfeuchten Gebieten stammt, stellt er gewisse Anforderungen an Wärme, Sonnenscheindauer und -intensität sowie an die Wasserversorgung. Optimale Keimungsbedingungen findet der Mais bei 8 bis 10 °C Bodentemperatur; das entspricht einem Aussattermin zwischen Mitte April und Mitte Mai (vgl. KWS, 2006). Für eine gute Ausreifung während der Wachstumszeit braucht der Mais eine Durchschnittstemperatur von mindestens 14,5 °C und eine Sonnenscheindauer von ca. 950 Stunden (vgl. BERGER et al., 1996, 57). Mais benötigt zwischen Mai und September mindestens 250 mm Niederschlag je m<sup>2</sup>. Vor allem ist aber die Niederschlagsverteilung entscheidend: am meisten Wasser (rund 100 bis 150 mm) ist in der Zeit vom Rispschieben bis ca. 2 Wochen nach der Blüte erforderlich (vgl. KTBL, 2006, 95). Mais gedeiht auf den meisten Bodenarten und stellt nur geringe Ansprüche an den Boden. Am günstigsten sind mittlere bis schwere Böden, die sich leicht erwärmen, genügend Wasserspeichervermögen besitzen und nicht zur Verkrustung neigen (vgl. KTBL, 2006, 95; BERGER et al., 1996, 57).

### **4.2. Bedeutung von Mais als Energiepflanze**

Viele tropische Gräser, unter anderem auch Mais, werden aufgrund ihrer besonderen Art der CO<sub>2</sub>-Assimilation als C<sub>4</sub>- Pflanzen bezeichnet. C<sub>4</sub>- Pflanzen (im Unterschied zu C<sub>3</sub>- Pflanzen, wie die meisten heimischen Getreidearten) erreichen wegen ihres speziellen Blattaufbaus eine effizientere Verwertung von Nährstoffen und Wasser in Verbindung mit höheren Syntheseraten, die zwei bis drei mal so hoch liegen wie bei C<sub>3</sub>- Pflanzen (vgl.

KWS, 2006, Anbauplaner Mais). Bei großer Hitze untermittags kann der Mais die Blattöffnungen schließen und nachts bei angenehmeren Temperaturen wieder öffnen. Dadurch spart sich die Pflanze sehr viel Energie und erreicht auch bei heißen Temperaturen hohe Zuwachsrleistungen (vgl. AMID, 2004, 25).

Unter den Energiepflanzen hat derzeit Mais als Rohstoff für die Biogaserzeugung die größte Bedeutung. Einerseits hat Mais als C<sub>4</sub>- Pflanze das höchste Ertragspotential unter den heimischen Kulturpflanzenarten, andererseits sind die verfahrenstechnischen Abläufe bei Anbau, Ernte, Konservierung, Entnahme sowie die Beschickung des Fermenters weitgehend optimiert (vgl. AMON et al., 2006a, 13f). Derzeit beträgt der Energiepflanzenanteil bereits 63% des Substratinputs in Biogasanlagen, wobei der Mais in Form von Maissilage mit 85,5% die am häufigsten eingesetzte Energiepflanze ist (vgl. HOPFNER- SIXT, 2007, s.p.).

#### ***4.2.1. Anforderungen an den Mais bei der Gesamtpflanzennutzung***

Verwenden Biogasanlagen Mais als Substrat für die Vergärung, so kann in den meisten Fällen davon ausgegangen werden, dass dabei der Mais als Gesamtpflanze (Stängel, Blätter und Kolben) genutzt wird. Da die üblichen Maissorten anfangs primär auf einen hohen Kolbenanteil mit optimaler Nährstoffzusammensetzung für die Tierfütterung gezüchtet wurden, sind diese Sorten nicht unmittelbar am ertragreichsten im Hinblick auf Biomasse-/ Methanproduktion. Mittlerweile wird aber schon von nahezu allen Züchtern eine entsprechende Anzahl spezieller Maissorten (zur Biogaserzeugung) angeboten.

Bei der Energiemaissnutzung lassen sich drei verschiedenen Nutzungsformen unterscheiden (vgl. AMON et al., 2006a, 14):

- Energiemaiss als einzige Hauptkultur im Vegetationsjahr
- Energiemaiss als Hauptkultur nach einer Vorfrucht (z.B. Winterroggen)
- Energiemaiss in Kombination mit anderen Kulturarten (z.B. Sonnenblumen)

Unabhängig von der Nutzungsform werden gewisse Anforderungen an die Energiemaissorten gestellt. Bei der Gesamtpflanzennutzung sind vor allem ein hohes Biomassepotential der Maissorte (Quantität und Qualität) und ein hohes spezifisches Methanbildungsvermögen aus der Biomasse von entscheidender Bedeutung. Am besten



eignen sich höherwüchsige, spätere Sorten, die durch ausreichend Standfestigkeit, hoher Masseleistung und einem sicheren Erreichen eines Trockensubstanzgehaltes von 30% gekennzeichnet sind (vgl. KTBL, 2006, 96). Spätreifere Energiemaissorten treten später in die generative Phase ein als herkömmliche Futtermaissorten. Die Pflanzen investieren dabei mehr Zeit in die Bildung vegetativer Blattbiomasse und weniger für die Stärkebildung im Kolben. Die Reifegruppe von Energiemais kann im Vergleich zu Futtermais um 30 bis 50 FAO- Punkte höher liegen (vgl. AMON et al., 2007b, 32).

Als wichtigstes Zuchtziel für Energiemaissorten sieht OECHSNER (2006, s.p.) die maximale Methanproduktion je Flächeneinheit. Bei der Nutzung der gesamten Pflanze als Maissilage geht OECHSNER (2006, s.p.) davon aus, dass bei derzeitigen durchschnittlichen Silomaiserträgen von 17,5 t Trockenmasse mit rund 6.000 m<sup>3</sup> Methan je Hektar gerechnet werden kann. Durch züchterische Maßnahmen können Energiemaissorten nun die verfügbare Vegetationszeit am jeweiligen Standort besser ausnutzen und einen höheren Ertrag produzieren. Bei Versuchen auf Standorten mit optimalen Bedingungen (Wasser- und Wärmeversorgung) konnte OECHSNER (2006 s.p.) bereits Biomasseerträge von bis zu 25 t pro Hektar und damit Methanhektarerträge von rund 10.000 m<sup>3</sup> erreichen. Die Leistungsfähigkeit der einzelnen Sorten muss jedoch immer in Abhängigkeit von den Standort- und Witterungsverhältnissen genau hinterfragt werden. Weitere Autoren und Pflanzenzüchter haben bei Untersuchungen mit Energiemaissorten bereits Biomasseerträge von bis zu 30 t Trockenmasse (und darüber) aus der Gesamtpflanze erzielt.

Neben dem Biomassebildungsvermögen ist auch die Ertragssicherheit ein weiteres Qualitätskriterium von Energiemaissorten. Sorten, die nur unter Optimalbedingungen hohe Erträge erbringen, stellen für den Pflanzenbauer ein gewisses Risiko dar, da in witterungsbedingt schlechten Jahren (Frost, Trockenheit) mit zum Teil erheblichen Ausfällen gerechnet werden muss. Daher sind solche Sorten zu bevorzugen, die auch unter schlechten Bedingungen relativ gute Erträge bringen.

#### ***4.2.2. Anforderungen an den Mais bei der Koppelnutzung von Pflanzenteilen***

Bei der Koppelnutzung von Mais werden einzelne Maispflanzenteile unterschiedlich genutzt. Auf der einen Seite werden die energiereichen (stärkereichen) Teile der Maispflanzen (Körner und evt. auch Spindelanteile) als Tierfutter (wie z.B. Corn-Cob-Mix

in der Schweinemast) oder als Ausgangsmaterial für die industrielle Verwertung (wie z.B. Lebensmittelindustrie, Stärkeindustrie, Ethanolproduktion) verwendet. Auf der anderen Seite verbleiben dann die energieärmeren Pflanzenteile (=Restpflanze), bestehend aus Stängel, Blätter und dem Kolbenrest (Lieschen und Spindeln).

Bei der Nutzung von Körnermais war es bisher üblich, dass nur die stärkereichen Körner (und teilweise Spindelanteile bei CCM) vom Feld abtransportiert wurden. Die „energiearme“ Restpflanze war von weniger Bedeutung und wurde meist am Feld zurückgelassen und anschließend in den Boden eingearbeitet. In jüngerer Zeit gibt es aber verstärkte Überlegungen, ob es nicht auch sinnvoll wäre, die Maisrestpflanzen zur Energiegewinnung in Biogasanlagen heranzuziehen. AMID (2004, 63f) konnte bei Gärversuchen feststellen, dass in der Milch- und Teigreife (100. bzw. 143. Wachstumstag) die Maisrestpflanzen rund  $3.300 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erzeugen können. Dieses Ergebnis unterstreicht, dass das energetische Potential der Maisrestpflanze oft unterschätzt wird. Der technische Aufwand bei der Nutzung der Restpflanze ist aber relativ groß, da weitere Überfahrten zum Abtransport der Restpflanze erfolgen müssen. Weiters ist zu bedenken, dass die Restpflanze als Siliergut einen Trockensubstanzgehalt von mindestens 28% zu erreichen hat, um eine optimale Silierbarkeit ohne Sickersaftverluste zu gewährleisten.

Da an die Strukturwirksamkeit der Maisrestpflanze bei der Biogasproduktion (im Gegensatz zur Rinderfütterung) keine Anforderungen gestellt werden, sind sehr kurze Häcksellängen anzustreben, da dadurch die Oberfläche vergrößert wird und somit die Abbaurate und -geschwindigkeit erheblich erhöht werden kann (vgl. MICHEL, 2007, s.p.).

Bei der Biogaserzeugung aus Maispflanzen ist die Nutzung der Restpflanze im Vergleich zur Ganzpflanzennutzung weniger effizient, da einerseits ein höherer technischer Aufwand bei der Ernte erforderlich ist und andererseits geringere Methanerträge erzielt werden. Bei Verwendung entsprechend leistungsfähiger Sorten kann aber eine Koppelnutzung der Maispflanzen durchaus Sinn machen. Diese Sorten müssen einen hohen Kornertrag (Tierfutter oder Ware zum Verkauf) und gleichzeitig auch ein entsprechend hohes Biomassepotential der Restpflanzen aufweisen, damit ein Abtransport zur Silierung sinnvoll ist. Bei der Vergärung der Maisrestpflanzen wäre von es Vorteil, die Restpflanzen zusammen mit anderen Substraten zu vergären, da bei Substratmischungen bessere

Abbauraten und höhere Methanerträge durch Synergieeffekte erzielt werden können (vgl. MUKENGELE et al., 2006, 27).

### **4.3. Neue Züchtungsstrategien bei Mais**

Durch die energetische Nutzung von Mais gelten auch neue Zuchtziele. „Energienmais soll möglichst viel Biomasse über die Gesamtpflanze bilden und dabei ein hohes spezifisches Methanbildungsvermögen aus der Biomasse erreichen. Darüber hinaus sollen die Maispflanzen bis zur Ernte einen Trockensubstanzgehalt von mindestens 28% erreichen, um einen sicheren Silierprozess ohne Sickersaftbildung zu ermöglichen“ (AMON et al., 2006a, 15).

Für die Erreichung dieser Zuchtziele werden zwei Züchtungsstrategien verstärkt diskutiert:

#### **➤ Strategie 1: Der herkömmliche Züchtungsweg:**

Die herkömmliche Züchtungsstrategie geht davon aus, dass aus klimatischen Gründen (Spätfröste im Frühjahr, Fröste im Herbst, Photosyntheseperiode, Tagesdurchschnittstemperatur) das Reifespektrum für Silomais bereits weitgehend ausgeschöpft ist (vgl. DEGENHARDT, 2005, zitiert in AMON et al., 2006a, 15). Neben hohen Biomasserträgen soll bei dieser Züchtungsstrategie vor allem das Spektrum der Inhaltsstoffe an die Methangärung angepasst werden und damit die Gasausbeute verbessert werden. Durch züchterische Methoden sollen die derzeit im Minimum vorhandenen Inhaltstoffe wie Proteine und Fette, die durch hohe Gasausbeuten gekennzeichnet sind, angehoben werden. Für den Anbau kommen bei dieser „herkömmlichen“ Strategie nur geringfügig später abreifende Sorten in Frage, da sehr spätreife Sorten das Anbaurisiko erhöhen würden (vgl. AMON et al., 2006a, 15).

#### **➤ Strategie 2: Neue Züchtungswege:**

SCHMIDT (2005, 2) geht davon aus, dass durch neue Züchtungswege innerhalb kurzer Zeit die Trockenmasseproduktion je Hektar von derzeit ca. 15 – 18 t auf ca. 30 t anzuheben ist. Dabei wird auf Basis bewährter Silomaislinien versucht, leistungsstärkere Hybriden zu züchten und damit die Biomasse- und Methanertragsleistung von Mais zu steigern. Um die Zuchtziele zu erreichen, werden die jeweils positiven Merkmale von deutschen,

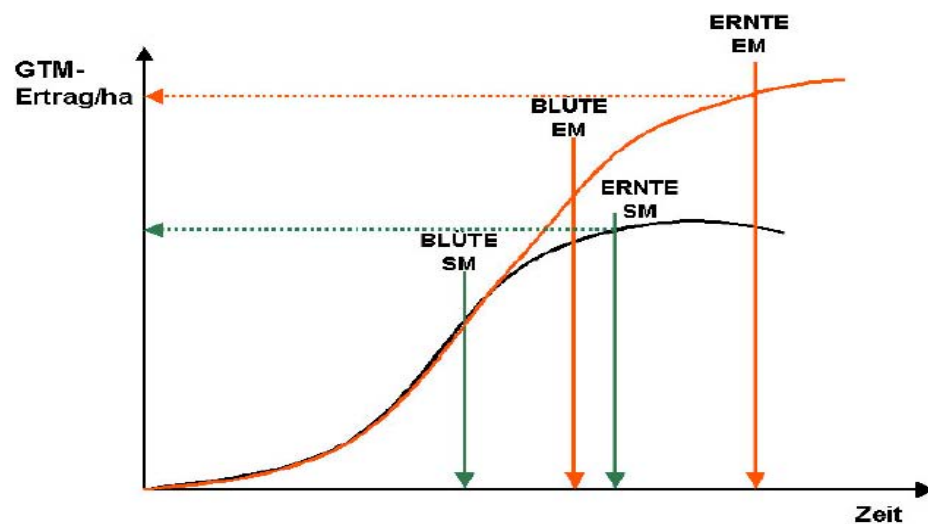
südeuropäischen, mexikanischen und peruanischen Zuchtmaterialgruppen auf züchterischem Wege zusammengeführt.

SCHMIDT (2005, 2ff) verfolgt seit einigen Jahren folgende züchterische Ansätze:

1) Verlängerung der vegetativen Wachstumsphase (Einkreuzung spätreiferer Linien)

Durch eine verlängerte vegetative Phase wird die gesamte Assimilationsleistung bei den Energiemaissorten länger in vegetative Blattmasse investiert.

In Abbildung 4 ist anhand der schwarzen Kurve der Verlauf der Trockenmassebildung einer durchschnittlichen Silomaisorte (SM) dargestellt. Im Vergleich dazu stellt die orange Kurve den Entwicklungsverlauf einer für die Energieproduktion züchterisch optimierten Energiemaissorte (EM) dar.



**Abbildung 4: Gesamttrockenmassebildung (GTM) bei einer Silomais- (SM) und einer Energiemaissorte (EM)** (Quelle: SCHMIDT, 2005, 3)

Bis zur Blüte der Silomaisorte haben beide Sorten annähernd denselben Wachstumsverlauf mit exponentiell steigender vegetativer Trockenmasse. Nach der Blüte der Silomaiskurve laufen die beiden Wachstumskurven immer mehr auseinander. Die Kurve der Silomaisorte steigt zunächst nur mehr linear an und flacht dann schnell ab, während die Kurve der Energiemaissorte durch den späteren Eintritt in die generative Phase weiterhin exponentiell anwächst. Diese Überlegenheit der Energiemaissorte kommt dadurch zustande, dass die Energiemaissorte längere Zeit die gesamte

Assimilationsleistung weiterhin in Blattmasse investiert. Die Energiemaissorte hat daher mehr Blätter und dadurch auch mehr Assimilationsfläche als eine „normale“ Silomaissorte, die schon früher ihre Assimilationsleistung in die Kolbenbildung investiert. Die eingelagerten Kohlehydrate im Kolben der Silomaissorte können im Gegensatz zu den zusätzlich gebildeten Blättern der Energiemaissorte nichts mehr zur Assimilationsleistung beisteuern, woraus sich die Ertragsüberlegenheit der Energiemaissorte leicht erklären lässt. Die Überlegenheit der Energiemaissorte wird umso größer, je später die Ernte durchgeführt wird (vgl. SCHMIDT, 2005, 3f).

#### 2) Züchterische Kombination von Spätreife und Kältetoleranz

Hier werden spätreife südländische (meist italienische) Maissorten mit extrem kältetoleranten deutschen Maissorten gekreuzt. Die daraus entwickelten neuen Inzuchtlinien werden an kühlen Standorten angebaut. Danach werden diejenigen Linien herausselektiert, die sowohl spätreif als auch kältetolerant sind. Diese werden anschließend in einem Zuchtprogramm weitergeführt, wobei eine immer stärkere Einengung auf die besten Sortentypen erfolgt.

#### 3) Integration von Kurztagsgenen aus exotischen Populationen

Wenn man an den tropischen Kurztag angepasste süd- und mittelamerikanische Maispopulationen im mitteleuropäischen Langtag anbaut, dann reagiert dieser Mais mit einem verstärkten vegetativen Wachstum (Längenwachstum + Dickenwachstum des Stängels). In Zuchtprogrammen werden Kurztagsgene aus mexikanischen und peruanischen Populationen in Energiemaishybriden eingelagert, die das vegetative Wachstum stimulieren können.

#### 4) Verbesserung der Trockenstresstoleranz

Obwohl Mais eine sehr wassereffiziente Pflanze (250 – 350 l/kg oTS) ist, wird in sehr trockenen Jahren auch das Wasser zum ertragsbegrenzenden Faktor. Bei diesem züchterischen Ansatz wird auf Hybriden mit „Low-Input-Eignung“ geachtet, da festgestellt wurde, dass Sorten, die mit temporärem Stickstoffmangel gut zurechtkommen meist auch weniger anfällig bei Trockenstresssituationen sind.

#### 5) Adaption des Maises an eine C3/C4- Energiepflanzenfruchtfolge

Das Leistungspotential von Mais ist nur auf die warme Jahreszeit beschränkt. Da eine Biomasseproduktion in den kühleren Monaten aber nur mit C<sub>3</sub>- Pflanzen sinnvoll ist, gilt es standortangepasste Fruchtfolgesysteme zu entwickeln.

#### 6) Adaption des Energiemais auch an die Bedingungen des ökologischen Landbaus

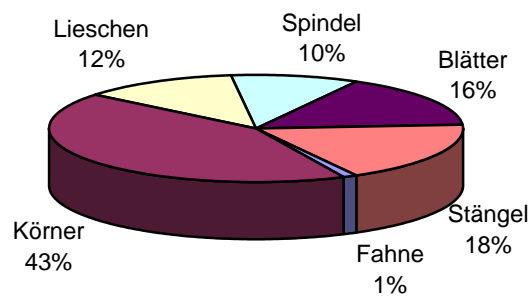
Für den ökologischen Anbau optimierte Sorten müssen neben einer guten Konkurrenzkraft gegen Unkräuter vor allem eine exzellente Keimfähigkeit und Triebkraft (genetisch verankert) besitzen und auch temporären Stickstoffstress tolerieren können, da im ökologischen Landbau schnell verfügbare mineralische Dünger nicht eingesetzt werden dürfen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass beide Züchtungsstrategien auf eine Optimierung der Biomassequantität und -qualität abzielen, wobei die 1. Strategie verstärkt auf eine Verbesserung der Inhaltsstoffzusammensetzung setzt während die 2. Strategie stärker auf eine Erhöhung des Biomassertrages ausgerichtet ist.

## **4.4. Mais als Gärrohstoff**

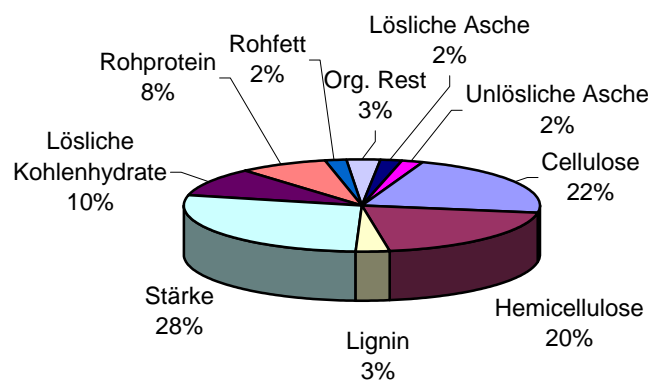
### ***4.4.1. Bestandteile und Inhaltstoffe des Maises***

In Abbildung 5 sind die Bestandteile einer durchschnittlichen Maispflanze ihren Anteilen entsprechend bei rund 30% Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze aufgegliedert. Die Wichtigkeit des Kolbens (~2/3 der Gesamtpflanze) im Hinblick auf einen entsprechend hohen Energieertrag wird durch den hohen Körneranteil von rund 43% eindeutig unterstrichen. Die verbleibenden Maispflanzenteile (Stängel, Blätter, Fahne, Lieschen und Spindel) weisen gemeinsam einen Anteil von ungefähr 57% auf, wobei abzüglich der Kolbenreste (Lieschen und Spindel) für die Restpflanze (Maispflanze ohne Kolben) nur mehr einen Anteil von ca. 35% verbleibt.



**Abbildung 5: Bestandteile einer Maispflanze bei 30% TS in der Gesamtpflanze** (Quelle: KWS, 2007a, s.p.)

Die Biomasse des Maises besteht zum größten Teil aus Kohlehydraten und weniger aus Fetten und Proteinen. Im Laufe der Vegetation ändert sich die Zusammensetzung der Maispflanzen und ebenso variieren auch die Konzentrationen der einzelnen Inhaltsstoffe mit dem Alter der Pflanzen. In Abbildung 6 sind die Inhaltsstoffe einer typischen Maisprobe (~30% TS) graphisch dargestellt. Für die Biogaserzeugung ist vor allem eine hohe Abbaubarkeit der Stoffgruppen bzw. der Inhaltsstoffe von Bedeutung. Lignin bzw. Lignincellulose (Teile der Rohfaserfraktion) sind unter anaeroben Bedingungen kaum abbaubar. Aus Rohasche (XA) ist sowieso keine Biogasbildung möglich, wobei die Rohasche aber wichtig für die Mineralstoffversorgung der Mikroorganismen ist.



**Abbildung 6: Trockenmasseanteile der Stoffgruppen einer typischen Silomaisprobe** (Quelle: KWS, 2007a, s.p.)

#### 4.4.2. Einflüsse der Inhaltsstoffe auf die Methanbildung und die Biogasqualität

Die Biomasse von Mais besteht zum überwiegenden Teil aus Kohlehydraten. Die Maispflanzen bilden durch Photosynthese zunächst Einfachzucker, die zu Mehrfachzuckern, Stärke und Gerüstsubstanzen wie Cellulose und Hemicellulose aufgebaut werden (Zellaufbau und Speicherung). Lignin wird in der Stängelrohlfaser gebildet und sorgt damit für die Standfestigkeit der Maispflanzen. Lignin kann durch anaerobe Mikroorganismen in Biogasanlagen nicht abgebaut werden. Obwohl der Ligningehalt mit Eintritt der generativen Wachstumsphase des Mais nahezu unverändert bleibt, vermindert sich die anaerobe Abbaubarkeit der Maisbiomasse mit zunehmendem Alter der Pflanzen. Grund dafür ist die komplexer werdende Ligninmolekülstruktur. Mit zunehmendem Alter der Pflanzen verzweigen und verästeln sich die Ligninmoleküle mehr und mehr und inkrustieren zunehmend Nährstoffe, und verringern dadurch die anaerobe Abbaubarkeit der Maisbiomasse (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.).

Auch die Nährstoffzusammensetzung der Maispflanzen ändert sich im Laufe der Vegetation (siehe Tabelle 6). Vergleicht man das Verhältnis von Protein-: Fett-: Kohlenhydratfraktion, so ist erkennbar, dass sich im Verlauf der Vegetation eine leichte Verschiebung zugunsten der Kohlenhydrate ergibt (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.). Innerhalb der Kohlenhydratfraktion wird der Rohfaseranteil zwar geringer, dafür steigt der Gehalt an N-freien Extraktstoffen (besonders Stärke) deutlich an. Während der Rohproteingehalt leicht sinkt, bleibt der Fettgehalt im Laufe der Vegetation nahezu konstant, da Fett in geringem Umfang in die Maiskörner eingelagert wird.

**Tabelle 6: Durchschnittliche Zusammensetzung der Biomasse von Mais im Verlauf der Vegetation**

Entwicklungsstadium	Trocken- masse g/kg FM	Roh- protein g/kg TM	Rohfett g/kg TM	Roh- faser g/kg TM	NfE g/kg TM	Stärke g/kg TM	Zucker g/kg TM
Beginn Kolbenbildung	170	104	22	258	543	43	172
Milchreife	210	90	21	223	611	120	137
Beginn Teigreife	270	86	27	205	634	187	142
Ende Teigreife	350	81	29	198	646	277	88

Quelle: AMON et al., 2007a, s.p.



Die Vergärung der Substrate ist in starkem Maße von deren Gehalt an schwer verdaulichen Faserbestandteilen abhängig. Die erschwerende Wirkung des Rohfasergehaltes wird nicht nur durch geringere Methanerträge erkennbar, sondern hat auch einen deutlichen Einfluss auf die Abbaugeschwindigkeit. Pflanzen mit einem hohen Rohfaseranteil (Cellulose + Lignin) bzw. Pflanzen mit einem hohen Anteil an neutral verdaulichen Fasern (NDF setzt sich zusammen aus Hemicellulose, Cellulose und Lignin) zeigen deutliche flachere Methanbildungskurven, also einen langsameren biologischen Umsatz der Inhaltsstoffe als vergleichsweise weniger faserreiche Pflanzen (vgl. MUKENGELE et al., 2006, 27).

Bei Bekanntsein der Inhaltsstoffzusammensetzung des Substrates kann anhand der theoretischen Gasbildungsraten (siehe Tabelle 7) der jeweiligen Inhaltsstoffe auch die maximal mögliche Gasmenge des Substrates berechnet werden. Allerdings sind diese Ergebnisse mit großer Vorsicht zu betrachten, da davon ausgegangen wird, dass das Substrat vollständig in Biogas umgewandelt wird und daher Wirkungen des Ligninkomplexes bzw. Wechselwirkungen zwischen Substraten vernachlässigt werden. Weiters können die Protein- und Kohlehydratstrukturen sehr unterschiedlich sein, auch die Kettenlänge und die Bindungsformen von Fetten können variieren. Nicht zuletzt können die am anaeroben Umbau beteiligten Mikroorganismenpopulationen unterschiedlich ausgeprägt sein (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.). Deshalb dürfen die in Tabelle 7 angeführten Werte nur als vereinfachte Anhaltswerte gesehen werden.

**Tabelle 7: Theoretische Gasausbeute und Gaszusammensetzung bei der Vergärung von Kohlehydraten, Fetten und Proteinen**

Substrattyp	Theoretische Biogasausbeute [ $l_N^* \text{ kg oTS}^{-1}$ ]	Theoretische $\text{CH}_4/\text{CO}_2$ – Zusammensetzung [Vol. -%]	
Kohlenhydrate	750	50% $\text{CH}_4$	50% $\text{CO}_2$
Fette	1390	72% $\text{CH}_4$	28% $\text{CO}_2$
Proteine	800	60% $\text{CH}_4$	40% $\text{CO}_2$

Quelle: VDI, 2006,52.

Auch die Silagebereitung nimmt einen positiven Einfluss auf das Methanbildungsvermögen von Mais. Bei Versuchen mit der Sorte Riberia (FAO 390) stellten AMON et al. (2003b, 3) fest, dass das spezifische Methanbildungsvermögen von

siliertem Mais ( $289 \text{ l}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ ) um ca. 25% höher ist als das spezifische Methanbildungsvermögen von grünem, nicht siliertem Mais ( $225 \text{ l}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ ). Es ist wahrscheinlich, dass die bei der Silagebereitung gebildeten Fettsäuren das Methanbildungsvermögen von Silagen steigern (vgl. AMON et al., 2004b, 6). Vermutlich werden durch die Milchsäuregärung in der Silage bereits wichtige Vorläufersubstanzen (wie z.B. Milchsäure oder Essigsäure) für die Methanogenese gebildet. Andererseits kann es auch sein, dass die Rohfaserfraktion durch den Siliervorgang bereits voraufgeschlossen wird und sich dadurch die Nährstoffverfügbarkeit deutlich verbessert (vgl. AMON et al., 2003b, 3).

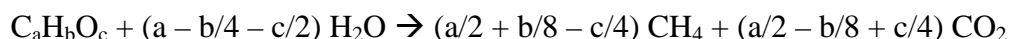
Die Vergärung von Silomais hat zusätzlich den Vorteil, dass das daraus entstehende Biogas meist nur vergleichsweise geringe Schwefelwasserstoff- und Ammoniakgehalte aufweist. Somit ist die Biogasqualität bei Silomaissilage meist besser als bei unvergorenen grünen Mais (vgl. AMON et al., 2003b, 5).

#### ***4.4.3. Modelle zur Schätzung der Methanbildung aus Gärrohstoffen***

Die Feststellung des Methanbildungsvermögens von Maissilage im Labor ist arbeits- und zeitaufwendig und auch kostspielig in Bezug auf die Analyseapparaturen. Um das Methanbildungsvermögen auch anhand der Inhaltstoffe abschätzen zu können, gelang es einigen Wissenschaftlern, näherungsweise Gleichungen für das Methanbildungsvermögen von Substraten aufzustellen.

##### Gleichung nach Buswell und Müller (1952):

Nach Buswell und Müller ergibt sich beim anaeroben Abbau von Biomasse mit bekannter chemischer Zusammensetzung näherungsweise folgende Umwandlung:

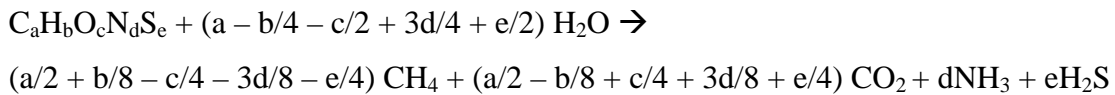


Mit dieser Formel lässt sich die Gaszusammensetzung aufgrund der chemischen Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien berechnen. Die Biomasse der Pflanzen (Proteine, Fette, Kohlenhydrate) besteht hauptsächlich aus den Baustoffen Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H) und Sauerstoff (O). Aus den Molanteilen der Baustoffe C, H und O kann der Methanertrag entsprechend abgeschätzt werden und anschließend für eine durchschnittliche Gesamtpflanze hochgerechnet werden (vgl. VDI, 2006, 53). Dieses

Modell eignet sich jedoch besser zur Bewertung der Biogasqualität als zur Berechnung der Methanmenge aus der Biomasse (vgl. AMON et al. 2003a, 10).

Gleichung nach Boyle (1976):

Boyle erweiterte die Gleichung von Buswell um die stickstoff- (N) und schwefelhaltigen (S) Substanzen, um proteinreiche Substrate besser bewerten zu können. Er unterstellte dabei folgende Beziehung (vgl. VDI, 2006, 53):



Im Allgemeinen eignen sich die beiden Gleichungen nach Buswell und Boyle zur Berechnung der Biogasqualität und der theoretischen Biogas- und Methanerträge. Wie bereits oben dargestellt wird die Gaszusammensetzung (CH<sub>4</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S und NH<sub>3</sub>) aus der chemischen Grundstruktur der Biomasse (Kohlenstoff, Wasserstoff, Sauerstoff, Stickstoff und Schwefel) berechnet. Diese Modelle überschätzen aber die tatsächlich realisierbaren Gaserträge, da die Berechnungsmodelle von einem vollständigem Abbau der Gärsubstrate ausgehen und den verzögernden und hemmenden Einfluss von Gerüstsubstanzen, wie Cellulose, Hemicellulose oder Lignin nicht berücksichtigen (vgl. AMON et al., 2007c, 9). Durch den „Cellulose- Lignin- Komplex“ (= die Lignin- Inkrustierung von Cellulose) wird der Zugang der Mikroorganismen reduziert und somit verringert sich der anaerobe Abbau sowie die Biogaserzeugung (vgl. WEILAND, 2001, zitiert in AMON et al., 2007, 8).

Modell nach Keymer und Schilcher (1999)

Keymer und Schilcher entwickelten in Anlehnung an Baserga (1998) ein Rechenmodell zur Abschätzung des Gasbildungspotenzials von Substraten, welches auf folgenden Annahmen beruht:

- der Gasertrag wird unter gleich bleibenden Bedingungen durch den Gehalt an Proteinen, Fetten und Kohlenhydraten sowie deren Verdaulichkeit bestimmt;
- die Stoffumwandlung ist mit Prozessen wie in Rindermägen vergleichbar;

Gasbildungspotential = verdauliches Rohprotein \* theoretische Biogasausbeute  
 + verdauliches Fett \* theoretische Biogasausbeute  
 + verdauliche Kohlenhydrate \* theoretische Biogasausbeute

Mit Hilfe des Verdauungsquotienten für das jeweilige Substrat lassen sich die verdaulichen Mengen der Inhaltstoffe ermitteln und diese dann anschließend mit dem jeweiligen Gasbildungspotential der Inhaltstoffe verrechnen. Die erhaltenen einzelnen Gaserträge werden dann aufsummiert und auf die organische Trockensubstanz umgerechnet.

#### ADM 1 (Anaerobic Digestion Model No.1)

Das ADM 1 (von der IWA- Task Group for Mathematical Modelling) ist ein allgemein gültiges Modell zur Beschreibung von anaeroben Abbauprozessen. Mit Hilfe dieses Ausgangsmodells können Simulationen vom anaeroben Abbau landwirtschaftlicher Substrate durchgeführt werden. Dieses Modell ist primär für Gülle entwickelt worden. Daher waren die vorgeschlagenen Modellparameter nicht vollständig auf Energiepflanzen, wie z.B. Mais, übertragbar. Aus diesem Grund sind die Parameter des ADM 1 durch Laborexperimente und Literaturangaben auch auf Energiepflanzen abgestimmt worden und somit ist ein optimiertes Modell geschaffen worden (vgl. WOLFSBERGER et al., 2005, 1243ff).

#### Bemessungsmodell von Linke:

Linke entwickelte ein Modell, mit dem die Methanausbeute in Abhängigkeit von der Raumbelastung prognostiziert werden kann. Mit zunehmender Raumbelastung sinkt die Gasausbeute, wobei sich die einzelnen Substrate in der Intensität der Abnahme unterscheiden.

Die oben angeführten Modelle zur Schätzung der Methanbildung aus Gärrohstoffen sind meist sehr spezifisch und beziehen sich hauptsächlich auf die Modellierung des Gärvorganges. Diese Modelle sind in der Praxis nur begrenzt verwendbar, da z.B. der Einfluss der Gerüstsubstanzen (Lignin, Cellulose) auf die Verfügbarkeit von Nährstoffen nicht berücksichtigt wird. Weiters setzen diese Modelle eine vollständige Umsetzung der Biomasse voraus und gehen davon aus, dass die Inhaltstoffe in reiner Form vergoren werden und nicht als komplexe Nährstoffgemische, wie es aber die meisten Gärrohstoffe sind.

Um eine möglichst genaue und wirklichkeitsgetreue Berechnung des spezifischen Methanbildungsvermögens sicherzustellen, wird daher im Rahmen dieser Diplomarbeit das Methanenergiewertmodell (MEWM) verwendet, das vom Institut für Landtechnik des

Departments für nachhaltige Agrarsysteme der Universität für Bodenkultur in Wien entwickelt wurde.

#### Methanenergiewertmodell (MEWM):

Mit dem Methanenergiewertmodell kann das spezifische Methanbildungsvermögen von Biomasse anhand der Nährstoffzusammensetzung bestimmt werden. Mit diesem Bewertungssystem wird eine energetische Bewertung (Methanenergiewert) der Gärrohstoffe anhand ihrer Inhaltstoffe möglich. Dieses MEWM ermöglicht die optimale Versorgung der Mikroorganismen in Biogasanlagen, und gibt Auskunft darüber, welche Energiemaissorten sich für die Vergärung besonders eignen, zu welchem Reifestadium geerntet werden soll und welche Konservierungsform anzustreben ist (vgl. AMID, 2004, 27).

Eine genauere Beschreibung dieses Modells wird in Kapitel 6.2. gegeben.

### **4.5. Biomasseerträge bei Mais**

Der Trockenmasseertrag pro Hektar entwickelt sich im Verlauf der Vegetation mit abnehmendem Ertragszuwachs. Als Energiemaissortentypen eignen sich vor allem solche, die bis zu einem Trockensubstanzgehalt von 35% ihr Ertragsmaximum über die Gesamtpflanze erreichen (vgl. AMON et al., 2006a, 17). Verschiedene Untersuchungen von Maissorten zeigen, dass der Trockenmasseertrag in der Teigreife meist das Maximum erreicht hat.

Entgegen den ursprünglichen Erkenntnissen ergaben neuere Untersuchungen von AMON et al. (2007d, s.p.) ein etwas verändertes Ertragsbild. Diesen Auswertungen zufolge verzeichnen die Maispflanzen sogar bis zur Vollreife Trockenmasseertragszuwächse. Das heißt, dass bis zu einem Trockensubstanzgehalt von ca. 45% mit Ertragszuwächsen zu rechnen ist (vgl. AMON et al., 2007d, s.p.). Die vollreifen Pflanzen haben dann meist keine nennenswerten Ertragszuwächse mehr. Oft nehmen die Trockenmasseerträge in der Vollreife der Maispflanzen durch Bruch- und Atmungsverluste sogar wieder ab (vgl. AMID, 2004, 64; AMON et al., 2003b, 3). Daher ist die Nutzung der Maispflanzen im optimalen Reifestadium von großer Wichtigkeit, da nur so das genetische Potential der Maissorten ausgeschöpft werden kann.

Bei Versuchen mit Energiemaissorten in Gunstlagen von AMON et al. (2006a, 17) in den Jahren 2004/2005 konnte im Durchschnitt ein Trockenmasseertrag von 25 t bei einem Trockensubstanzgehalt von bis zu 35% in der Ganzpflanze erreicht werden. Einzelne Sorten (z.B. Baxter, FAO 380) erreichten sogar Trockenmasseerträge bis zu 30 t je Hektar. Nach AMON et al. (2007b, 32) werden der Biomasse- und Methanhektarertrag bei spätreifen Sorten (FAO 380 bis FAO 600) vom Reifegrad der Maissorten beeinflusst. Die Untersuchungen ergaben, dass sehr spätreife Sorten (ab FAO 500) weniger Biomasseertrag haben, da sie zum Zeitpunkt der Ernte (Anfang Oktober = ortsüblicher Siliertermin) die Silierreife noch nicht erreicht haben. Aus diesen Versuchen ging hervor, dass mittelspäte Maissorten (bis FAO 380) den sehr spätreifen Maissorten ertraglich überlegen sind. Diesen Erfahrungen zufolge kann bei der Wahl der Reifegruppe der Energiemaissorten im Vergleich zu Futtermaissorten eine um 30 bis 50 FAO Punkte höhere Reifegruppe empfohlen werden (vgl. AMON et al., 2007b, 32).

#### 4.6. Methanbildungspotential von Mais

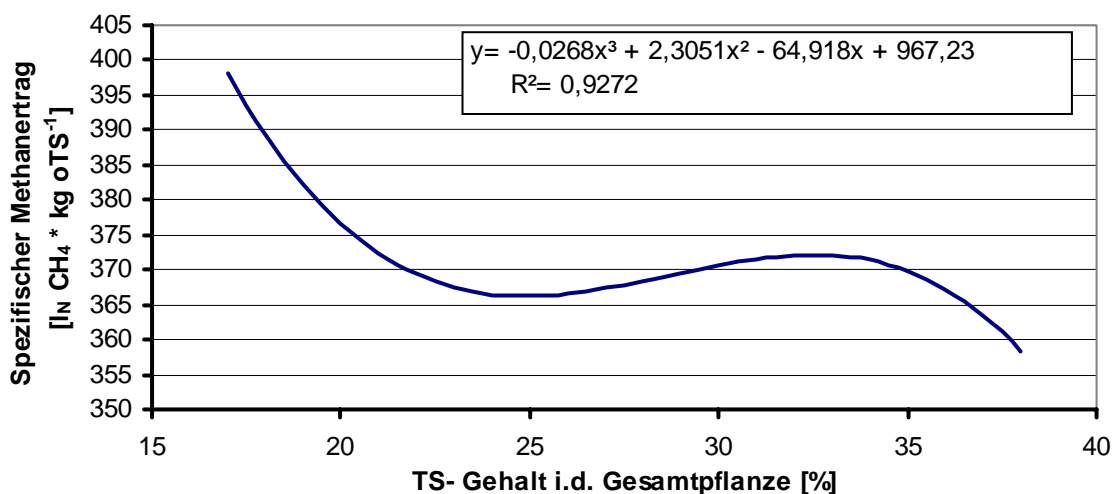
Nach den Richtwerten von KTBL (2005, 15) lassen sich bei Maissilagen (in der Teigreife geerntet) durchschnittliche Gasausbeuten von  $600 \text{ l}_N \text{ Biogas} * \text{kg oTS}^{-1}$  erzielen bei einem Methangehalt von ca. 52% (im Biogas). Bei Laboruntersuchungen von Maissilage (Teigreife) konnten sogar höhere Gaserträge ( $642 \text{ l}_N \text{ Biogas} * \text{kg oTS}^{-1}$ ) und auch höhere Methangehalte (54%) erzielt werden (vgl. KTBL, 2005, 10f). Untersuchungen in der Praxis zeigen aber, dass in Biogasanlagen meist etwas geringere Methangehalte als im Labor erzielt werden.

Bei vereinfachten Berechnungen nach der Buswell- Formel (siehe Kapitel 4.4.3.), bei der von einem 100% Abbau der organischen Substanz ausgegangen wird, würde bei Gesamtpflanzen der theoretisch maximal erreichbare Methanertrag bei  $470 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  liegen (vgl. LUCKE, 2002, 24). Berechnungen nach der Buswell- Formel wurden auch von AMON et al. (2007d, s.p.) durchgeführt: im Durchschnitt lag der theoretisch maximal erreichbare Methanertrag von Mais bei  $418 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ , wobei als absoluter Maximalwert ein Methanertrag von  $459 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  errechnet wurde.

Die durchschnittlichen Methanausbeuten von Maispflanzensilagen liegen je nach Reifestadium zwischen  $300$  bis  $380 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  (vgl. EDER und SCHULZ, 2006, 49).

Nach Untersuchungen von AMON et al. (2006b, 87) nimmt das spezifische Methanbildungsvermögen der Maispflanzen mit zunehmender Reife ab (siehe Abbildung 7). Das spezifische Methanbildungsvermögen von „unreifer“ Maissilage (TS- Gehalt unter 20%) ist höher als jenes von silierreifer Maissilage (TS- Gehalt bei 30- 35%). Die Zusammensetzung der Inhaltstoffe Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N- freie Extraktstoffe liegt bei „unreifen“ Mais scheinbar in einem günstigen Verhältnis für die anaerobe Vergärung. Ab einem TS- Gehalt von ca. 22% bewegt sich das Methanbildungsvermögen auf einem Niveau von etwa  $370 \text{ l}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ . Im Stadium der optimalen Silierreife, also bei einem TS- Gehalt von ca. 30 bis 35%, hat die spezifische Methanausbeute ein zweites Optimum. Mit zunehmender Abreife der Maispflanzen (ab 35% TS- Gehalt) nimmt dann aber die spezifische Methanausbeute deutlich ab.

Daher wird bei Mais sowie bei allen anderen Energiepflanzen, die als Ganzpflanzensilage genutzt werden, die Vollreife der Pflanzen nicht abgewartet, sondern bereits in der Milchreife oder spätestens in der Teigreife die Ernte durchgeführt (vgl. KARPENSTEIN-MACHAN, 2005, 61).



**Abbildung 7: Spezifischer Methanertrag in Abhängigkeit vom Trockenmassegehalt der Maissilage** (Quelle: AMON et al. 2006b, 87)

Abbildung 7 zufolge liegt silierreifer Mais bei 31 und 34% TM in einer offenbar günstigen Nährstoffzusammensetzung für die Methanbildung ( $\sim 370 \text{ l}_N \text{ CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ ). Als Beispiel für sehr ein sehr hohes spezifisches Methanbildungsvermögen sei die Sorte Baxter (FAO 380) aus den bereits oben erwähnten Untersuchungen von AMON et al. erwähnt. Diese

mittelspäte Energiemaissorten erreichte bei einem Trockensubstanzgehalt von 30% in der Gesamtpflanze einen spezifischen Methanertrag von  $412 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  (vgl. AMON et al., 2006a, 20). Dieses Ergebnis unterstreicht, dass auf guten Standorten bei richtiger Genotypenwahl spezifische Methanerträge von über  $400 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  erreicht werden können.

Im Vergleich dazu ergaben Untersuchungen von OECHSNER et al. (2003, s.p.) durchschnittliche Methanerträge von  $375 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ , wobei der Mais weitgehend reif bei Trockensubstanzgehalten zwischen 30 und 42% geerntet wurde. Bei weiteren Beprobungen erzielten SCHUMACHER et al. (2006, 85) spezifische Methanerträge zwischen  $308$  und  $352 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ , wobei neun Maissorten jeweils viermal in Abständen von zwei Wochen beerntet wurden. EDER et al. (2004, 1) erreichten bei der Sortenversuchen 2004 im Durchschnitt Methanausbeuten von  $340 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  (Schwankungsbreite zwischen  $330$  und  $350 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ ).

AMID (2004) untersuchte speziell das Methanbildungsvermögen von Restpflanzen und Kolbenteilen. Er erhielt dabei folgende Methanerträge:  $218$  bis  $274 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  aus der Restpflanzesilage,  $209$  bis  $316 \text{ l}_N * \text{ kg oTS}^{-1}$  aus der CCM- Silage und  $171$  bis  $309 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  aus der Körnersilage. Die spezifische Methanausbeute nahm dabei bei allen drei Varianten im Verlauf der Vegetation ab. Das heißt, die höchsten Werte wurden im Stadium der Milchreife erreicht, die geringsten Ausbeuten im Stadium der Vollreife (vgl. AMID, 2004, 53ff).

Auch OECHSNER (2006, 1) hat in Untersuchungen festgestellt, dass eine Ernte zur Zeit der späten Milchreife bis frühen Teigreife vorteilhaft für die Methanerzeugung ist. Seinen Erhebungen zufolge wird bei einer zu frühen oder zu späten Ernte das spezifische Methanbildungsvermögen je kg organischer Trockensubstanz um bis zu 10% reduziert.

In Bezug auf den Methanertrag sei auch der Vorteil von gemischten Substraten (zwei oder mehrere Substrate) erwähnt. Nach MUKENGELE et al. (2006, 27) werden bei Substratmischungen um bis zu 8% höhere Methanerträge erzielt als bei der alleinigen Verwendung eines einzigen Substrates, was auf Synergieeffekte durch bessere Vergärbarkeit von Mischungen schließen lässt. Untersuchungen von HOPFNER- SIXT et al. (2006b, 149) zeigen ebenfalls, dass Biogasanlagen, die Energiepflanzen und



Wirtschaftsdünger gemeinsam vergären, im Durchschnitt um 9% höhere Gasbildungsraten erzielen. Biogasanlagen, die mit Substratmischungen aus Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern betrieben werden, erzielen im Durchschnitt  $360 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ , während reine Energiepflanzenanlagen durchschnittlich nur  $330 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  erreichen (vgl. HOPFNER- SIXT et al., 2006b, 149).

#### 4.7. Methanhektarertrag von Mais

Der Methanhektarertrag wird aus den Ertragsfaktoren

- Biomasseertrag (organische Trockensubstanzertrag pro Hektar) und
- spezifische Methanausbeute aus der Biomasse

ermittelt.

Genauer aufgeschlüsselt, ergibt sich der Methanhektarertrag aus den Kriterien Biomassepotential der Sorte (organische Trockensubstanzertrag), Alter und Reifegrad der Pflanzen, Erntezeitpunkt, Düngung, Niederschlag bzw. Bewässerung, Qualität des Häckselgutes (einheitliche Häcksellänge), Konservierungsform des Erntegutes, Verweildauer im Fermenter und Abbaugrad der organischen Substanz (vgl. KARPENSTEIN-MACHAN, 2005, 41). Letztendlich resultieren Unterschiede in den Methanhektarerträgen aus den beiden Ertragsfaktoren Biomasseertrag und spezifisches Methanbildungsvermögen, die sich aber im Verlauf der Vegetation (speziell ab der Milchreife) gegenläufig entwickeln. Daher ist der Zeitpunkt der Ernte des Mais von wesentlicher Bedeutung für den erzielbaren Methanhektarertrag. Bei einer zu frühen Ernte wird das Biomassepotential der Sorte nicht ausgeschöpft. Aber auch eine zu späte Ernte führt durch die Minderung der spezifischen Methanausbeute und durch Bruchverluste zu geringeren Methanerträgen. Der optimale Erntezeitpunkt von Energiemais ist also dann gegeben, wenn der Methanhektarertrag am höchsten ist und auch eine gute Silierfähigkeit der Biomasse gegeben ist.

AMID (2004, 63f) konnte bei Versuchen mit der Sorte Benicia (FAO 300) in der Teigreife (143 Wuchstage) folgende Methanhektarerträge erzielen. Durch den sehr hohen Biomasseertrag von  $33.424 \text{ kg oTS}$  in der Teigreife wurde bei der Gesamtpflanzennutzung ein Methanhektarertrag von  $8.954 \text{ m}^3_N \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erreicht. Aufgeschlüsselt nach verschiedenen Nutzungsvarianten von Maispflanzenteilen ergaben die Versuche von AMID

folgende Ergebnisse: die Restpflanzen (Pflanzen ohne Kolben) erzeugten  $3.291 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ , die Körnervariante erreichte  $2.625 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  und die CCM- Variante erzielte  $5.069 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ . Der Methanhektarertrag war bei den verschiedenen Varianten durchwegs in der Teigreife (143 Wuchstage) am höchsten, lediglich bei der Körner- und Restpflanzenvariante waren die Methanhektarerträge in der Milchreife (100 Wuchstage) geringfügig höher. In der Vollreife (190 Wuchstage) waren bei diesem Versuch die Methanhektarerträge sogar deutlich geringer als in der Teigreife, da sowohl die Biomasseerträge als auch die spezifischen Methanerträge abgenommen haben (vgl. AMID, 2004, 63f).

Bei umfassenden Untersuchungen von AMON et al. (2006a, 22) erreichten die Maissorten im Mittel aller Versuche das Methanhektar- Ertragsmaximum im Bereich von 33% Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze. Im Durchschnitt wurde ein Methanhektarertrag von rund  $8.600 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erzielt (vgl. AMON et al., 2006a, 22). Mit der Sorte Baxter (FAO 380) wurde der höchste Methanhektarertrag mit  $12.390 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erzielt (vgl. AMON et al., 2006c, 3).

Nach OECHSNER (2006, 1) können Energiemaissorten bei Biomasseerträgen von rund 25 t Trockenmasse Methanerträge von bis zu  $10.000 \text{ m}^3$  je Hektar erreichen. Bei den derzeitigen Silomaissorten werden im Durchschnitt nur rund 17,5 t Trockenmasse erreicht, was einem Methanhektarertrag von ca.  $6.000 \text{ m}^3$  Methan entspricht.

Unter sehr guten Bedingungen haben EDER et al. (2006, 1) bei Versuchen mit bestimmten Energiemaissorten Trockenmasseerträge von 25 bis 27 t erreicht, was einer Gasmenge von bis zu  $15.000 \text{ m}^3$  je Hektar entspricht. Von diesem Ergebnis sind allerdings noch 10 – 20% abzuschlagen, um den Verhältnissen in der Praxis zu entsprechen.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass die Gasertragswerte erheblich von der Art, der Qualität und der Menge des eingesetzten Substrates bestimmt werden bzw. von dessen Eigenschaften und Inhaltsstoffen (vgl. DÖHLER et al., 2004, 61).

## 4.8. Wirtschaftlichkeit der Energiemaisproduktion

Für den wirtschaftlichen Erfolg der Biogaserzeugung sind neben den Kosten für Investitionen und Anlagen vor allem das Biogas- und Methanbildungsvermögen der eingesetzten Gärsubstrate von wesentlicher Bedeutung (vgl. AMON et al., 2004, 61). Mais hat ein sehr hohes Biomasse- und Methanbildungspotential und wird unter den Energiepflanzen am häufigsten für die Biogasgewinnung eingesetzt. Durch die hohen Ertragspotentiale ist der Einsatz von Mais auch in wirtschaftlicher Hinsicht meist am interessantesten.

Die Rohstoffpreise bei Ankauf von Silomais für Biogasanlagen sind teilweise sehr unterschiedlich. Der Preis von Energie- bzw. Silomais richtet sich vielfach nach den erzielbaren Erlösen aus Körnermais (BÄCK, 2007a). Auf das Hektar aufgerechnet muss der Erlös aus dem Energie- bzw. Silomaisverkauf höher sein als beim Körnermaisverkauf, da neben den Körnern auch die Restpflanzen abtransportiert werden (Humuszehrung).

Nach WALLA et al. (2006, 9) wurden im Jahr 2005 bei Silomais für die t Frischmasse im Durchschnitt 26 € (ohne Mehrwertsteuer) bezahlt, wobei die Preise zwischen 17 und 58 € je t Frischmasse relativ stark variierten. Meist wird der Mais aber über die t Trockenmasse verrechnet. In Oberösterreich wurde im Jahr 2005 für Silomais im Durchschnitt rund 55 € je t Trockenmasse gezahlt (BÄCK, 2007a). Wie bereits erwähnt, unterliegen die Rohstoffpreise für Mais je nach Angebotslage oft großen Schwankungen. 2006 befanden sich die durchschnittlichen Silomaispreise bereits bei rund 70 €/je t Trockenmasse (BÄCK, 2007b). In Folge der Rohstoffverknappung bei Getreide und Mais durch Ernteaufschläge in anderen Ländern stiegen die Preise für Silomais im Jahr 2007 bereits schon auf 90 bis knapp über 100 €/je t Trockenmasse (BÄCK, 2007b). Umgerechnet auf die Fläche ergibt das einen Silomaispreis zwischen 1.700 und 2.500 €/je Hektar (im Jahr 2007).

Nach Berechnungen der KTBL (2006, 103) betragen bei „mittlerem“ Ertragsniveau (44 t Frischmasse; 35% TS-Gehalt; 15,4 t Trockenmasse) die Produktionskosten für Mais (variable + fixe Kosten) 1.530,12 €/je Hektar unter der Annahme, dass 20 ha Silomais angebaut werden. Bei weniger Anbaufläche würden sich die Produktionskosten entsprechend erhöhen. Bezogen auf die t Maisfrischmasse ergeben sich somit Produktionskosten in der Höhe von 34,79 €/je t (vgl. KTBL, 2006, 105).

Bei der Kalkulation der Substratkosten geht KARPENSTEIN- MACHAN (2005, 147f) von einem Maisbiomasseertrag von 16 t Trockenmasse (rund 50 t Frischmasse) und einem Methanhektarertrag von  $5.530 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1}$  aus. Die Produktionskosten werden einschließlich des Transportes und der Silierung, also frei Biogasanlage, kalkuliert. Neben den Kosten für Saatgut, Dünger und Pflanzenschutzmittel sind die Maschinenkosten, der Lohnanspruch und die Nutzungskosten der Flächen berücksichtigt. Zusammengerechnet ergeben sich Kosten je Hektar Mais in der Höhe von 1.149 €. Werden diese Produktionskosten je Hektar Mais auf das erzeugbare Methan umgerechnet, so ergeben sich spezifische Substratkosten in der Höhe von 0,208 €/je  $\text{m}^3$  Methan (vgl. KARPENSTEIN-MACHAN, 2005, 147f).

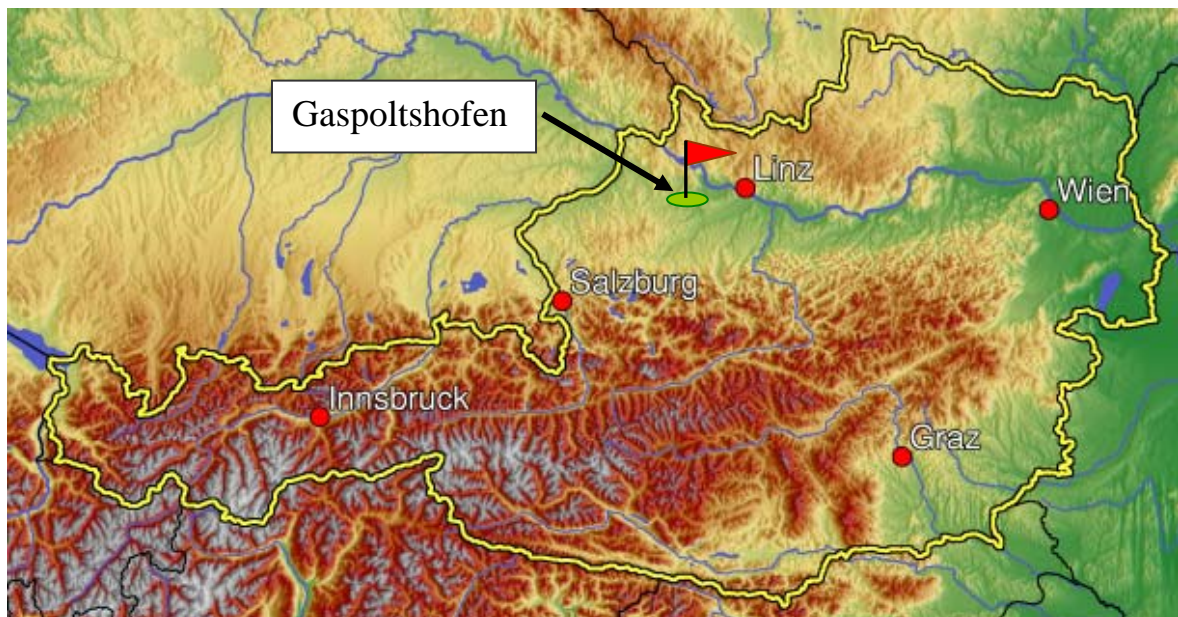
Zur Beurteilung der Wirtschaftlichkeit der Energiemaisnutzung in Biogasanlagen wird meist ein Vergleichsdeckungsbeitrag berechnet. Im Konkreten werden die Produktionskosten erhoben und dann anschließend den Erlösen aus Gasverkauf oder Strom- und Wärmeverkauf gegenübergestellt. Die meisten Biogasanlagen verstromen das gewonnene Biogas in Blockheizkraftwerken und speisen zu gesetzlich festgelegten Tarifen ins Stromnetz ein. Eine direkte Einspeisung von Biogas ins Erdgasnetz ist nicht möglich, da der Methangehalt im Biogas „nur“ bei rund 60% liegt und daher der Mindestbrennwert von Erdgas nicht gegeben wäre. Daher muss das Biogas gereinigt und auf einen Methangehalt von 96% aufbereitet werden, damit eine Einspeisung ins Gasnetz möglich ist. Zurzeit laufen in Pucking (Oberösterreich) und in Bruck an der Leitha zwei Pilotprojekte, die aufbereitetes Methan aus Biogasanlagen ins Erdgasnetz einspeisen. Nach WALLA (2001, 55) zahlten 2001 die Gasnetzbetreiber EVN und Ferngas rund 0,253 €/je  $\text{m}^3$  „gereinigtes Ökogas“ (Methan) – in etwa dem damaligen Marktpreis von Erdgas frei Grenze entsprechend. Nach STEINMÜLLER (2007) liegt der derzeitige Marktpreis von Erdgas frei einem österreichischen Haushalt ohne Berücksichtigung der Leitungskosten bei 2,9 Cent je kWh. Die Erzeugungskosten von Methan aus Biogas liegen je nach Größe der Anlage und Gärrohstoff bei 6,5 bis 10 Cent je kWh aufbereitetes Biogas, wobei der Brennwert bei 10 bis 11 kWh je  $\text{m}^3$  Methan liegt (STEINMÜLLER, 2007). Die Erzeugungskosten für aufbereitetes Methan betragen somit derzeit zwischen 0,7 und 1,1 €/je  $\text{m}^3$ .

## **B. MATERIAL UND METHODEN**

### **5. Versuchsstandort und Versuchsdurchführung**

#### **5.1. Standortbedingungen (Boden, Klima) im nordöstlichen Hausruckviertel**

Der Feldversuch wurde am Standort Gaspoltshofen im nordöstlichen Hausruckviertel (Oberösterreich) durchgeführt (siehe Abbildung 8). Der Standort befindet sich auf einer Seehöhe von 452 m und liegt in einer sehr guten Maisbauregion. Der Versuchsstandort ist durch gute, fruchtbare Böden gekennzeichnet (bonitiert mit 76 Bodenpunkten), wobei sandiger Lehm die vorherrschende Bodenart ist.



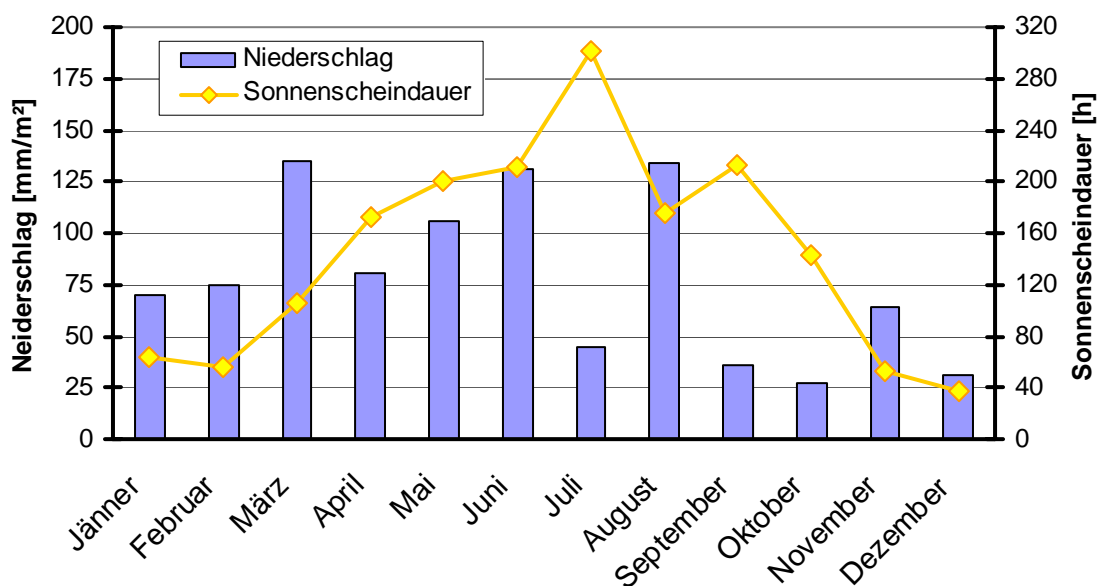
**Abbildung 8: Geographische Lage des Standortes Gaspoltshofen im nordöstlichen Hausruckviertel (Quelle: AWI, 2007, s.p.; eigene Darstellung)**

Neben den Bodeneigenschaften sind vor allem auch die klimatischen Bedingungen eines Standortes von entscheidender Bedeutung im Hinblick auf die Vegetation. Gaspoltshofen liegt im Hauptproduktionsgebiet „Alpenvorland“ (vgl. AWI, 2007, s.p.).

Nach den von der ZAMG (2007b, s.p.) erhobenen langjährigen Klimadaten liegt der durchschnittliche Jahresniederschlag am Versuchsstandort bei 889 mm/m<sup>2</sup> und die

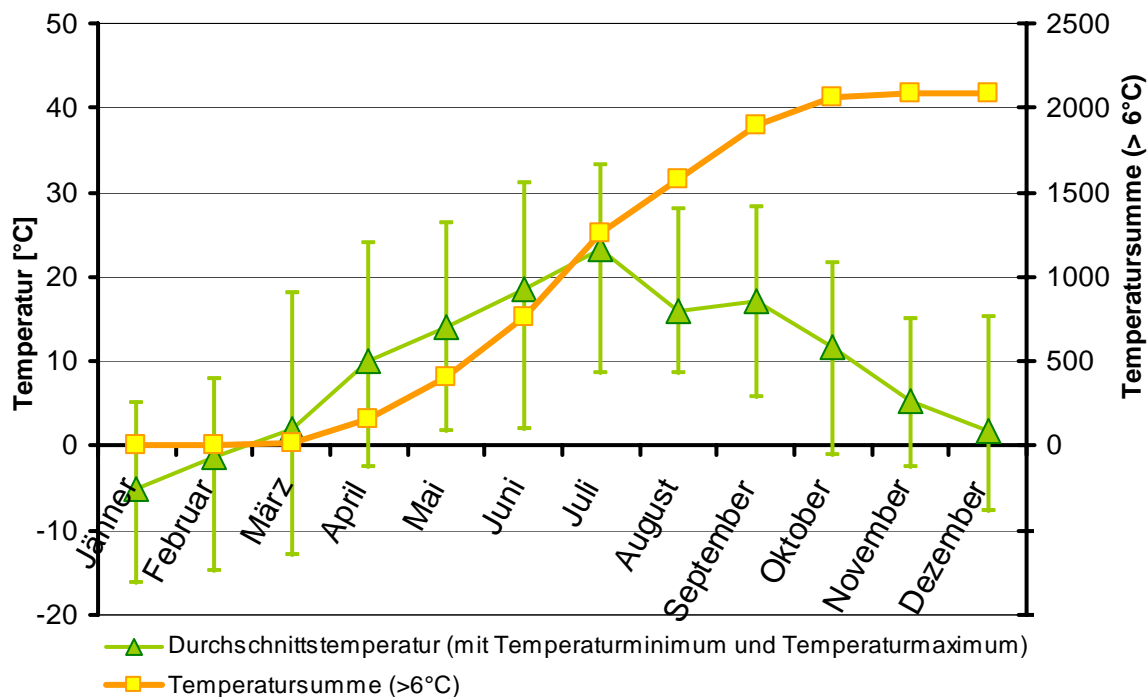
Durchschnittstemperatur auf einem Niveau von 8,4°C bei 1.531 Sonnenstunden. (Alle Daten der ZAMG wurden in einer ca. 10 km entfernten Messstation erhoben.)

In Abbildung 9 und Abbildung 10 sind die Klimafaktoren des Standorts Gaspoltshofen im Versuchsjahr 2006 abgebildet. Abbildung 9 zeigt die Niederschlagsverteilung sowie die durchschnittlichen Sonnenstunden je Monat. Im Versuchszeitraum zwischen 24. April und 08. Oktober 2006 fielen insgesamt 498 mm Niederschlag bei 1.160 Sonnenstunden (vgl. ZAMG, 2007a, s.p.). Im gesamten Jahr 2006 fielen 932 mm Niederschlag und die Sonnenscheindauer betrug 1.732 Stunden (vgl. ZAMG, 2007a, s.p.).



**Abbildung 9: Niederschlag und Sonnenscheindauer am Standort Gaspoltshofen im Jahr 2006**  
(Quelle: eigene Darstellung nach Werten der ZAMG (2007a,s.p.)

Abbildung 10 zeigt den Temperaturverlauf im Jahr 2006. Die Durchschnittstemperatur im Jahr 2006 lag bei 9,2°C und im Versuchszeitraum von 24. April bis 08. Oktober 2006 bei 17°C (vgl. ZAMG, 2007a, s.p.). Die Temperatursumme als Indikator für die Entwicklung der Vegetation errechnet sich beim Mais aus den durchschnittlichen Temperaturen pro Tag, abzüglich der Basistemperatur von 6°C (vgl. DEKALB, 2007, s.p.). Die Temperatursumme im Versuchszeitraum betrug 1.844 Temperatursummengrade (bzw. 2.089 Summengrade im gesamten Jahr 2006) (vgl. ZAMG, 2007a, s.p.).



**Abbildung 10: Durchschnittliche Temperatur und Temperatursumme am Standort Gaspoltshofen im Jahr 2006** (Quelle: eigene Darstellung nach Werten der ZAMG, 2007a, s.p.)

Anhand des Wetterservices der ÖSTERREICHISCHEN HAGELVERSICHERUNG (2007) konnten speziell die Klimadaten des Versuchsfeldstückes ermittelt werden. Für das Versuchsfeldstück ergaben sich im Jahr 2006 870 mm Niederschlag je m<sup>2</sup> und eine durchschnittliche Lufttemperatur von 9,5°C (bzw. während der Vegetationszeit 574 mm Niederschlag und 17,4°C Durchschnittstemperatur).

## 5.2. Anbau, Ernte und Probengewinnung

Der Maissortenversuch umfasste folgende Energiemaissorten: PR39R86 (FAO 260), Benicia (FAO 300), PR39F58 (FAO 320), PR38V12 (FAO 330), PR37H20 (FAO 350) und PR37D25 (FAO 370). Die Aussaat erfolgte am 24. April 2006 nach vorhergehender Saatbeetbereitung (Pflug und Sattbeetkombination). Die Vorfrucht war ebenfalls Mais. Die Sorten wurden jeweils in 4 Reihen auf einer Parzellengröße von 600 m<sup>2</sup> angebaut. Der Reihenabstand betrug 70 cm, der Abstand der Körner innerhalb einer Reihe 18,3 cm. Gedüngt wurden 200 kg/ha Diamonphosphat und 300 kg/ha Harnstoff (geteilt in 2 Teilgaben). Die Beikrautregulierung erfolgte im Nachauflauf mit dem Pflanzenschutzmittel Vesuv (Kombipack).

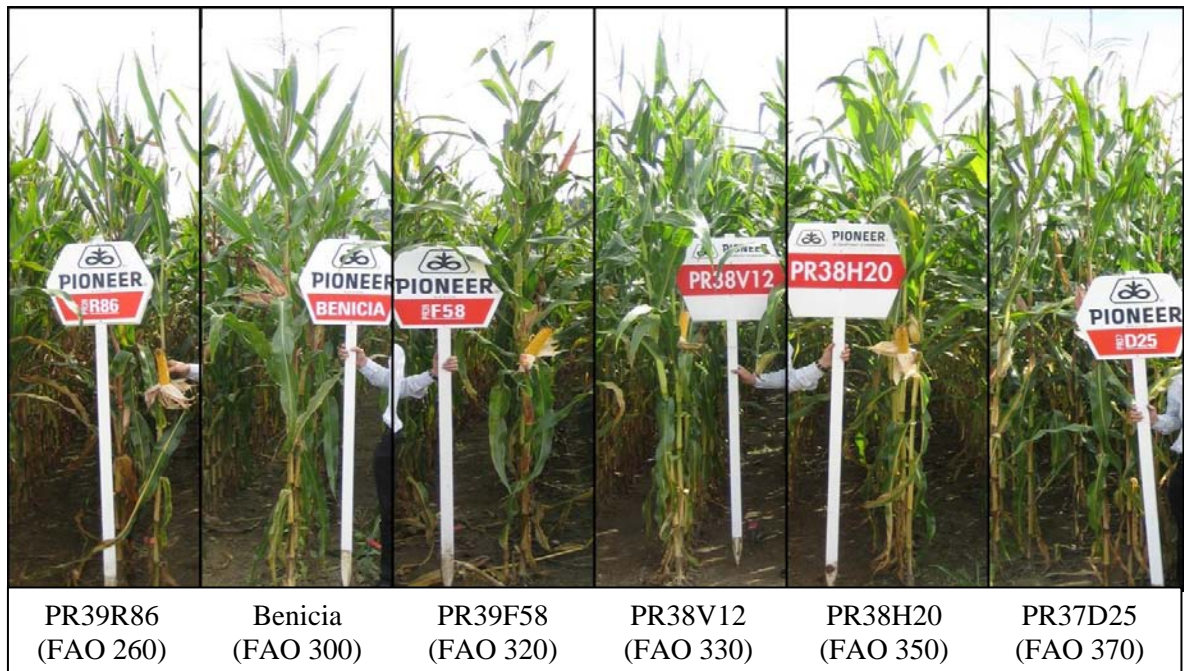
Die Einteilung der sechs Maissortentypen in Reifekategorien erfolgte entsprechend der Reifezahl sowie dem Wachstums- und Reifeverhalten unter den gegebenen Standortbedingungen. Daraus ergab sich folgende Einteilung:

PR39R86 (FAO 260) → frühreife Sorte;      PR38V12 (FAO 330) → mittelspäte Sorte;  
Benicia (FAO 300) → mittelfrühe Sorte;      PR38H20 (FAO 350) → mittelspäte Sorte;  
PR39F58 (FAO 320) → mittelspäte Sorte;      PR37D25 (FAO 370) → spätreife Sorte;

Die Beprobung der Maissorten erfolgte an sechs Ernteterminen. An den ersten beiden Ernteterminen wurden nur drei bzw. vier Sorten untersucht, an den folgenden vier Ernteterminen wurden alle sechs Maissorten beprobt. Die Maispflanzen wurden dabei mit einem Messer in einer üblichen Häckselhöhe von ca. 10 bis 12 cm abgeschnitten. Von jeder einzelnen Maissorte wurden bei jedem Erntetermin insgesamt 10 Maispflanzen geerntet, wobei innerhalb einer Reihe systematisch jede zwanzigste Maispflanze entnommen wurde. Dieser Vorgang erfolgte in dreifacher Wiederholung.

Die erste Ernte des Maises erfolgte nach 98 Wuchstagen, am 01. August 2006 am Ende des Fahnenschiebestadiums. Der zweite Erntetermin war nach 118 Wuchstagen am 21. August 2006 im Kornbildungsstadium der Milchreife. Ab dem dritten Erntetermin wurden dann alle Sorten beprobt. Der dritte Erntetermin wurde nach 133 Wuchstagen am 5. September 2006 in der Milchreife durchgeführt. Die vierte Ernte erfolgte nach 150 Wuchstagen am 22. September 2006 im Stadium der Teigreife. Das fünfte Mal wurde nach 159 Wuchstagen am 01. Oktober 2006 geerntet, im Stadium Ende der Teigreife. Die letzte Ernte erfolgte schließlich nach 166 Wuchstagen am 08. Oktober 2006, im Stadium Beginn der physiologischen Reife. Die Entwicklungsstadien der einzelnen Maissorten bei den Ernteterminen waren je nach Reifezahl erwartungsgemäß etwas unterschiedlich. Die Bezeichnung der Reifestadien richtete sich bei diesen Untersuchungen nach der mittelspäten Sorte PR39F58 (FAO 320), die im Wachstums- und Reifeverhalten ungefähr dem Durchschnitt der Sorten entsprach. In Abbildung 11 sind die einzelnen Maissorten im Stadium der Teigreife abgebildet.





**Abbildung 11: Maissorten im Teigreifestadium am Standort Gaspoltshofen** (Quelle: eigene Bilder)

Unmittelbar nach der Ernte wurde der Frischmasseertrag der Maispflanzen bestimmt. Dabei wurden jeweils 10 Maispflanzen je Sorte gewogen und anschließend anhand der Saatstärke (Kornzahl je Hektar bereinigt um die Keimfähigkeit) auf die Frischmasse je Hektar hochgerechnet. Die Ermittlung der Frischmasse erfolgte ebenfalls in dreifacher Wiederholung. Beim letzten Erntetermin (08. Oktober 2006) wurden auch die Gewichtsanteile der einzelnen Maispflanzenteile an der Gesamtpflanze erhoben.

Die Trockensubstanzgehalte der untersuchten Maissorten bei den verschiedenen Ernteterminen sind in Tabelle 8 aufgelistet. Bedingt durch die unterschiedlichen Reifezahlen traten vor allem bei den späteren Ernteterminen doch schon größere Unterschiede in den Trockensubstanzgehalten der Maispflanzen auf. Speziell bei den letzten beiden Ernteterminen wurden die sortenbedingten Unterschiede in der Abreife erkennbar. Die Maispflanzen der frühreifen Sorten wiesen schon einige dürre Pflanzenteile (besonders Blätter) auf, während die spätreifen Maissorten auch bei den späten Ernteterminen noch überwiegend durch grüne Pflanzenteile gekennzeichnet waren.

**Tabelle 8: Trockensubstanzgehalte der Maissorten zu den verschiedenen Ernteterminen**

Sorte	FAO-Zahl	1. Ernte 01.08.2006	2. Ernte 21.08.2006	3. Ernte 05.09.2006	4. Ernte 22.09.2006	5. Ernte 01.10.2006	6. Ernte 08.10.2006
		TS- Gehalt in % der Frischmasse					
<b>PR39R86</b>	(260)	-	-	28,08	31,11	34,54	34,31
<b>Benicia</b>	(300)	18,00	20,28	27,18	31,31	34,30	35,20
<b>PR39F58</b>	(320)	18,14	23,26	29,86	31,93	33,31	36,11
<b>PR38V12</b>	(330)	17,46	-	28,61	30,90	31,01	32,22
<b>PR37H20</b>	(350)	-	-	29,07	30,07	34,50	32,82
<b>PR37D25</b>	(370)	18,60	21,31	28,64	30,47	33,37	33,50

Quelle: eigene Erhebungen

### 5.3. Aufbereitung der Maisproben

Nach der Ernte wurden die frische Maispflanzenbiomasse in die Versuchsstation der Universität für Bodenkultur nach Groß- Enzersdorf (nahe Wien) gebracht, wo die Maispflanzen nach Standardverfahren für die weiteren Analyseschritte aufbereitet wurden. Zuerst wurden die Maispflanzen mit einem Häcksler zerkleinert. Die gehäckselten Maisproben wurden anschließend in den Trockenschrank gegeben und bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Durch Differenzwägung nach der Trocknung konnte dann der Trockensubstanzgehalt der Maissorten ermittelt und anschließend auf den Trockenmasseertrag je Hektar hochgerechnet werden. Nach der Trocknung wurden von jeder Maissorte die einzelnen Wiederholungen mit Hilfe einer Mühle zu einer Mischprobe fein vermahlen, und somit für die weiteren Analyseschritte (Inhaltsstoffanalyse, Bruttoenergiebestimmung, C:N- Analyse) vorbereitet.

## 6. Analyse und Auswertung

Für die Bestimmung des Methanbildungspotentials der Maissorten wurde bei diesen Untersuchungen das Methanenergiewertmodell (MEWM) für Mais verwendet. Die Berechnung des Methanenergiewertes setzt die vorhergehende Bestimmung der Inhaltstoffzusammensetzung der Maispflanzenbiomasse voraus.

### 6.1. Methoden zur Inhaltsstoffanalyse

Zur Bestimmung der Inhaltsstoffe von Futtermittelproben wird meist die Weender-Analyse angewendet. In den letzten Jahren gewinnt aber auch die NIRS- Methode (Nah-Infrarot- Reflexions- Spektroskopie) verstärkt an Bedeutung. Bei dieser Versuchsanordnung wurden die Maisproben nach beiden Analysemethoden untersucht. Anhand der Analyseergebnisse werden die beiden Methoden miteinander verglichen und es können etwaige methodisch bedingte Unterschiede besser aufgezeigt werden. Die Weender- Analyse wurde im Futtermittellabor Rosenau (Landwirtschaftskammer Niederösterreich) durchgeführt. Die Analyse nach der NIRS- Methode erfolgte im Labor der Fa. Pioneer Hi- Bred Northern Europe (Buxtehude, Deutschland).

#### 6.1.1. Inhaltsstoffanalyse nach Weender (*nasschemische Analyse*)

Bei der Weender- Analyse werden die Futtermittel in die großen Nährstoffgruppen (Rohasche, Rohprotein, Rohfett, Rohfaser und N- freie Extraktstoffe) aufgeteilt, die dann als Rohnährstoffe bezeichnet werden. Benannt ist diese Untersuchungsmethode nach der von Henneberg und Strohmam im Jahre 1860 in Weende bei Göttingen entwickelten Methode, Futtermittel einzuschätzen bzw. zu analysieren. Grundsätzlich ist die Weender-Analyse ein standardisiertes „Kochrezept“, in dem die zu analysierende Probe einer Serie von Analyseprozeduren (Kochprozessen) unterzogen wird. Bei der Weender- Analyse werden einige Stoffgruppen analytisch ermittelt, andere werden aus der Differenz errechnet (z.B. Kohlenhydrate) (vgl. BLV- VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 1994, 21).

### **6.1.2. Analyse nach der NIRS- Methode**

Anfang der 90ziger Jahre wurde neben der Weender- Analyse eine zusätzliche Schätzmethode entwickelt, bei der mit Hilfe von Lichtreflexion der Wert von Futtermitteln erfasst werden kann. Durch diese NIRS- (Nah- Infrarot- Reflexions- Spektroskopie) Methode kann unter bestimmten Voraussetzungen durch die unterschiedliche Reflexion des Lichtes bei verschiedener Futterzusammensetzung der Futterwert bzw. die inhaltsstoffliche Zusammensetzung des Futtermittels ermittelt werden. Das Verfahren ist geeicht an einen Probensatz, wobei für Futtermittel charakteristische Eichkurven aus der Weender- Analyse abgeleitet werden. Werden nun unbekannte Futtermittelproben mittels NIRS analysiert, so können aus den Reflexionsspektren der Proben Schätzwerte für einen oder mehrere Inhaltsstoffe gleichzeitig abgeleitet werden. Einheitlich zusammengesetzte Futtermittel sind relativ einfach zu messen. Hingegen schwieriger ist die Untersuchung von heterogenen Futtermitteln (z.B. Grünlandaufwüchse), da in diesen Fällen Analysegeräte mit einer hohen Filteranzahl Voraussetzung für eine entsprechende Genauigkeit der Ergebnisse sind. Das bedeutet, dass von vielen Futtermitteln ein Probensatz vorhanden sein muss, um heterogene Futtermittel entsprechend genau zu analysieren. Nichtsdestotrotz ist die NIRS- Methode eine anerkannte und gern genutzte Schätzmethode zur Bestimmung des Futterwertes. Niedrige Kosten, ein minimaler Arbeitsaufwand sowie eine hohe Arbeitssicherheit zeichnen diese Methode besonders aus. Voraussetzung für eine zuverlässige Genauigkeit der Ergebnisse sind allerdings eine korrekte Probennahme und eine sorgfältige Aufbereitung des Materials. Als Referenzmethode für die NIRS- Analyse wird zurzeit auch häufig die Cellulasemethode verwendet (vgl. KWS SAAT AG, 2007b; BLV- VERLAGSGESELLSCHAFT MBH, 1994, 21f).

Nach der Bestimmung der Nährstoffzusammensetzungen der Maisproben werden die Inhaltsstoffgehaltswerte nun zur Berechnung des spezifischen Methanertrages herangezogen.

### **6.2. Bestimmung des Methanertrages mit dem Methanenergiewertmodell (MEWM)**

Das Methanenergiewertmodell (MEWM) berechnet das spezifische Methanbildungsvermögen von Biomasse aus den Inhaltsstoffen Rohprotein, Rohfett,

Rohfaser und N- freie Extraktstoffe. Mit diesem Bewertungssystem ist die energetische Bewertung von Mais sowie einer Vielzahl anderer Gärrohstoffe anhand der Inhaltsstoffe möglich (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.). Das MEWM ermöglicht somit unter Verwendung der Summe der Rohnährstoffe eine optimale Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage (vgl. AMON et al., 2003a, 28). Weiters gibt das MEWM Auskunft darüber, welche Sorten sich besonders für die Vergärung eignen, zu welchem Erntestadium geerntet werden soll bzw. welche Konservierungsform anzustreben ist.

Bei diesem Modell wird der Energiestoffwechsel bei der anaeroben Umsetzung betrachtet bzw. kalkuliert. Dabei wird die mit dem Gärgut zugeführte Energie (Bruttoenergie) durch einen mehrstufigen Abbau der Mikroorganismen in Methanenergie (im Biogas) umgewandelt. Infolge der Umsetzungsvorgänge treten an verschiedenen Stellen Verluste auf (siehe Abbildung 12).

<b>Bruttoenergie (GE)</b>	<i>(die in Biomasse enthaltene chemische Energie)</i>
- Energie im Gärrückstand (EGR)	<i>(nicht abbaubarer Anteil der org. Substanz + fixierter Energieanteil in Bakterienbiomasse)</i>
<b>= anaerob abbaubare Energie (DE)</b>	
- Fermentationswärme (FW)	<i>(beim Gärvorgang entstehende Wärme)</i>
<b>= Methanenergie im Biogas (CH<sub>4</sub>-E)</b>	

**Abbildung 12: Bilanzstufen des anaeroben Energiestoffwechsels** (Quelle: in Anlehnung an AMON et al., 2003, 27f)

Die Bruttoenergie (GE) ist die in der Biomasse enthaltene chemische Energie und wird im Bobenkalorimeter durch die bei der Verbrennung freigesetzte Wärme erfasst. Nach EDELMANN (2001, zitiert in AMON et al., 2003, 27) verbleiben ca. 7% des Energiegehaltes der abbaubaren Biomasse im Gärrückstand und es wird weniger als 5% der Energie durch die Bakterien in Fermentationswärme umgewandelt.

Die Kalkulation des Energiestoffwechsels bei der anaeroben Umsetzung von der Bruttoenergie in der Biomasse der Energiepflanzen in die Methanenergie des Biogases wird erst durch Messungen der Energieverwertung in Stoffwechselversuchen möglich. Aus den Ergebnissen der Stoffwechselversuche lässt sich eine Schätzgleichung zur Kalkulation

des Methanenergiewertes von Energiepflanzen, im konkreten Beispiel von Energiemais, ableiten. Der Schätzgleichung des Methanenergiewertes liegt ein multiples lineares Regressionsmodell zugrunde und sieht folgendermaßen aus (vgl. AMON et al., 2006a, 18):

$$\begin{aligned} \text{MEW [l}_N \text{ CH}_4 \text{ * kg oTS}^{-1}] = & x_1 * \text{Rohprotein (XP) (Gehalt in \% der Trockenmasse)} \\ & + x_2 * \text{Rohfett (XL)} \\ & + x_3 * \text{Rohfaser (XF)} \\ & + x_4 * \text{N- freie Extraktstoffe (XX)} \end{aligned}$$

Dieses spezielle Regressionsmodell mit seinen Koeffizienten wird nun dazu verwendet, das spezifische Methanbildungsvermögen von Mais anhand seiner Rohnährstoffzusammensetzung, die z.B. auch in den DLG- Futterwerttabellen für Wiederkäuer tabelliert sind, berechnen zu können. Die Regressionskoeffizienten der Schätzgleichung sind in Tabelle 9 dargestellt. Sie geben den Beitrag der einzelnen Rohnährstoffe zur Methanbildung der Maissilage an und sind höchst signifikant (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.).

**Tabelle 9: Parameter der Regressionsgleichung zur Berechnung des Methanenergiewertes von Maissilage anhand seiner Rohnährstoffe:**

Inhaltsstoff	Regressionskoeffizient (x)	Signifikanz
Rohprotein	15,27	0,000
Rohfett	28,38	0,001
Rohfaser	4,54	0,000
N- freie Extraktstoffe	1,12	0,008
Qualitätsparameter der Gesamtgleichung: R <sup>2</sup> =0,968 ; F-Wert = 1583,027 ; Durbin- Watson- Wert = 1,176 ; Signifikanzniveau = 0,000 ; n = 95;		

Quelle: AMON et al., 2007a, s.p.

Die Energieausnutzung bei der Biogasgewinnung lässt sich durch den Wirkungsgrad der Methanbildung ( $\eta$ ) ausdrücken. Der energetische Wirkungsgrad ist ein Maß dafür, wie viel der im Substrat vorhandenen Energie (Bruttoenergie) in Methanenergie umgewandelt wird. Er lässt sich aus dem Quotienten Methanenergie im Biogas ( $\text{CH}_4\text{- E}$ ) / Bruttoenergie des

Gärgutes (GE) errechnen. Nach Untersuchungen von AMON et al. (2007c, 42) bewegt sich der energetische Wirkungsgrad von Maissilage bei ca. 66%.

### **6.3. Statistische Auswertung**

Die Mittelwerte und Standardabweichungen, sofern vorhanden (je nach Datenbasis), sind in den Ergebnistabellen und -abbildungen angegeben. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 11.5.1.

Die Zusammenhänge zwischen den Inhaltsstoffen (nach beiden Analysemethoden) wurden anhand der Korrelationsanalyse nach Pearson untersucht. Die Biomassebildungspotentiale der einzelnen Maissorten wurden mittels einer Kurvenanpassung beschrieben. Unterschiede zwischen den Regressionsfunktionen wurden anhand der Regressionskoeffizienten und deren Standardabweichungen analysiert. Um etwaige sortenbedingte Unterschiede in der Ertragsbildung feststellen zu können, wurden die einzelnen Regressionskoeffizienten der Maissorten nach dem Mittelwertsvergleich nach Sachs gegenübergestellt.

Das spezifische Methanbildungsvermögen und der Methanhektarertrag der Maissorten wurden ebenfalls anhand von Regressionsgleichungen ermittelt. Die Güte der Regressionsmodelle wird durch den Regressionskoeffizienten (b) mit der Konstante (a) sowie durch das Bestimmtheitsmaß ( $R^2$ ) und durch das Signifikanzniveau (p) des Gesamtmodells angegeben. Die Mittelwerte wurden anhand einer einfaktoriellen ANOVA (Varianzanalyse) mit Post-Hoc-Test (Duncan-Test bzw. Scheffé-Prozedur) verglichen.

## **C. ERGEBNISSE UND DISKUSSION**

Ausgehend von den beprobten Maissorten werden zunächst die Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen nach der NIRS- bzw. nach der Weender- Methode verglichen und diskutiert. Nachfolgend werden dann die Leistungspotenziale der verschiedenen Maissorten im Hinblick auf das Biomassebildungsvermögen, das spezifische Methanbildungsvermögen und den Methanhektarertrag dargestellt und bewertet. Weiters werden der Einfluss des Erntezeitpunktes und der Einfluss des Ernteverfahrens auf den Methanhektarertrag dargestellt und diskutiert.

Bei allen nachfolgenden Tabellen und Abbildungen handelt es sich um eigene Erhebungen und Darstellungen.

### **7. Korrelative Zusammenhänge in den Ergebnissen der Inhaltsstoffanalysen nach NIRS und nach Weender**

Zur Bestimmung der Inhaltsstoffe von pflanzlicher Biomasse gibt es mehrere Methoden. Um etwaige Unterschiede in den Analyseergebnissen unterschiedlicher Methoden feststellen zu können, wurden sämtliche Ganzpflanzenproben der Maissorten sowohl nach der Weender- als auch nach der NIRS- Methode untersucht.

In Tabelle 10 sind die Ergebnisse der Inhaltsstoffanalysen nach beiden Untersuchungsvarianten dargestellt. Der Rohaschegehalt der Maissorten verringert sich im Verlauf der Vegetation im Durchschnitt um ein Drittel, von ca. 6% in der Trockenmasse bei der ersten Ernte (98. Wuchstag) auf rund 4% bei der letzten Ernte (166. Wuchstag). Bei der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) reduzierte sich der Rohaschegehalt sogar um die Hälfte auf knapp unter 3% in der Trockenmasse. Auch der Rohfasergehalt nimmt im Verlauf der Vegetation von ca. 30 bis 33% (98. Wuchstag) auf 16 bis 21% (166. Wuchstag) ab. Der Rohproteingehalt in den Maispflanzen nimmt ebenfalls leicht ab und verringert sich von durchschnittlich 9% auf 7% in der Trockenmasse. Der Rohfettgehalt in der Maistrockenmasse ist eher gering und unterliegt keinen allzu großen Schwankungen. Nur im letzten Vegetationsdrittel ist ein geringer Anstieg im Rohfettgehalt zu erkennen, der aufgrund von zunehmender Fetteinlagerung in der Kornfraktion zustande kommt. Die

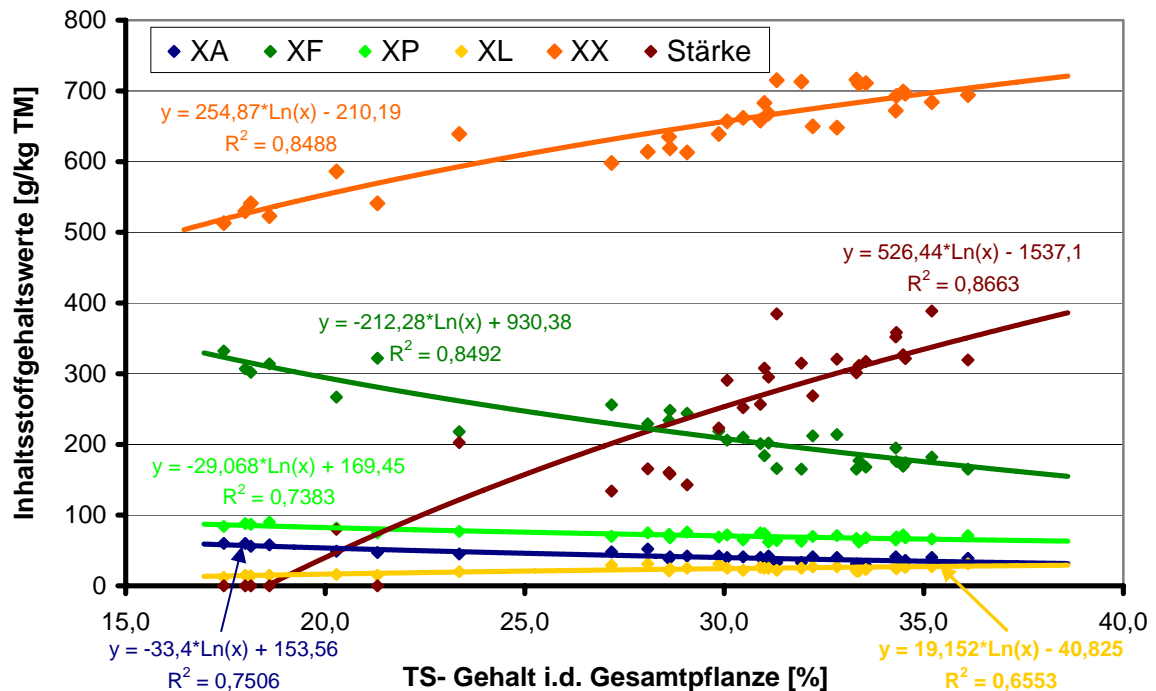


Maissorten wiesen bei der letzten Ernte Rohfettgehalte von 2,3 bis 2,7% in der Trockenmasse auf, einzig die Sorte PR39F58 (FAO 320) konnte einen Rohfettgehalt von über 3% erreichen, der sich vor allem positiv auf das Methanbildungsvermögen auswirkt. Der Gehalt an N- freien Extraktstoffen steigt im Verlauf der Vegetation relativ stark an. Mit einem Anteil von bis zu 70% in der Trockenmasse gegen Ende der Wuchszeit werden die N- freien Extraktstoffe zum dominierenden Rohnährstoff in der Maispflanze, wobei die Stärke einen erheblichen Anteil davon einnimmt (rund 30% in der Trockenmasse).

**Tabelle 10: Inhaltsstoffzusammensetzung der Maispflanzen (Ergebnisse nach der Weender- bzw. nach der NIRS- Methode)**

Sorte	Weender- Analyse					NIRS- Methode					
	XA (% TM)	XF (% TM)	XP (% TM)	XL (% TM)	XX (% TM)	XA (% TM)	XF (% TM)	XP (% TM)	XX (% TM)	Stärke (% TM)	
<b>PR39R86</b>	3. Ernte	5,2	22,9	7,5	3,1	61,4	5,2	25,0	6,7	60,0	16,5
FAO 260	4. Ernte	4,2	20,2	6,2	2,5	66,8	4,7	21,2	6,8	64,8	29,5
	5. Ernte	3,6	17,4	6,8	2,6	69,6	4,2	19,3	6,9	67,0	32,1
	6. Ernte	3,7	17,6	6,9	2,4	69,3	4,2	19,2	7,1	67,1	35,8
<b>Benicia</b>	1. Ernte	6	30,7	8,8	1,5	53	7,0	32,1	8,5	50,9	0,0
FAO 300	2. Ernte	4,9	26,7	8,2	1,6	58,6	5,8	29,6	8,1	54,9	8,0
	3. Ernte	4,8	25,6	7	2,9	59,8	4,8	27,9	6,2	58,2	13,4
	4. Ernte	3,3	16,6	6,4	2,2	71,5	4,0	18,6	6,9	68,3	38,5
	5. Ernte	4,1	19,5	6,5	2,7	67,2	4,1	18,9	6,8	67,4	35,2
	6. Ernte	4	18,2	6,6	2,7	68,4	3,6	18,2	6,9	68,6	38,9
<b>PR39F58</b>	1. Ernte	5,6	30,2	8,7	1,4	54,1	6,9	29,8	8,8	53,0	0,0
FAO 320	2. Ernte	4,5	21,8	7,7	2	63,9	5,4	25,0	7,7	59,9	20,2
	3. Ernte	4,2	21,9	6,9	3,1	63,9	4,1	23,5	6,6	62,7	22,3
	4. Ernte	3,3	16,5	6,3	2,5	71,3	4,2	20,2	6,6	66,5	31,5
	5. Ernte	3,1	16,5	6,7	2,1	71,6	4,0	20,5	6,7	66,7	30,1
	6. Ernte	3,9	16,5	7,1	3,1	69,4	4,0	20,4	6,5	66,1	31,9
<b>PR38V12</b>	1. Ernte	6	33,2	8,4	1,2	51,3	6,7	32,4	7,4	52,3	0,0
FAO 330	3. Ernte	3,8	23,4	7,3	2,1	63,5	4,5	25,5	6,8	61,1	16,0
	4. Ernte	4	20,1	7,5	2,6	65,8	4,3	23,4	6,9	62,8	25,7
	5. Ernte	3,4	18,4	7,4	2,5	68,3	3,7	19,7	7,6	66,5	30,8
	6. Ernte	4,1	21,2	7	2,7	65	4,4	22,9	6,7	63,3	26,9
<b>PR38H20</b>	3. Ernte	4,2	24,4	7,6	2,5	61,3	4,7	26,4	6,7	59,7	14,3
FAO 350	4. Ernte	4	20,6	7,2	2,5	65,7	4,6	22,3	7,0	63,6	29,1
	5. Ernte	3,2	16,9	7,2	2,9	69,9	4,3	19,6	6,9	66,3	32,7
	6. Ernte	4	21,4	7,1	2,7	64,8	3,7	21,7	6,9	65,0	32,1
<b>PR37D25</b>	1. Ernte	5,8	31,4	9	1,5	52,3	6,7	31,8	8,7	51,3	0,0
FAO 370	2. Ernte	4,7	32,2	7,5	1,5	54,1	6,0	32,9	7,5	52,1	0,0
	3. Ernte	4,1	24,8	6,8	2,4	61,9	4,2	26,0	6,1	61,3	15,8
	4. Ernte	4,1	21	6,5	2,2	66,2	4,3	23,6	6,4	63,5	25,2
	5. Ernte	2,9	17,7	6,2	2,1	71	3,5	21,5	6,1	66,8	31,2
	6. Ernte	2,9	16,8	6,8	2,3	71,1	3,4	20,4	6,6	67,3	31,7

In Abbildung 13 ist der Einfluss der zunehmenden Vegetationsdauer (steigender Trockensubstanzgehalt) auf die Inhaltstoffzusammensetzung der Maispflanzen graphisch dargestellt. Wie bereits oben erwähnt, verringert sich vor allem der Rohfasergehalt im Verlauf der Vegetation, während die N- freien Extraktstoffe (speziell der Stärkegehalt) deutlich ansteigen. Ab einem Trockensubstanzgehalt von ca. 35% steigen die N- freien Extraktstoffe auch nur mehr geringfügig an (hier kommt es vor allem zu einer Verschiebung innerhalb dieser Nährstofffraktion).



**Abbildung 13: Einfluss des Trockensubstanzgehaltes auf die Nährstoffzusammensetzung der Maispflanzen**

Grundsätzlich sind die Inhaltsstoffgehaltswerte nach beiden Analysevarianten sehr ähnlich. Beim Rohproteingehalt gibt es kaum Differenzen zwischen den Analysemethoden. Auch der Rohaschewert variiert nur geringfügig. Nach der NIRS- Methode liegen die Rohaschegehalte um durchschnittlich 0,5 Prozentpunkte höher als bei der Weender-Analyse. Etwas größere Differenzen gab es beim Rohfasergehalt. Die Rohfaserergebnisse nach NIRS sind durchschnittlich um rund 1,5 Prozentpunkte höher als nach Weender, wobei vor allem bei den letzten Ernteterminen die deutlicheren Unterschiede vorzufinden sind. Im Gegenzug sind dafür die Gehalte an N- freien Extraktstoffen bei den Weender-Analysen entsprechend höher als bei den NIRS- Analysen. Diese Verschiebungen innerhalb der Kohlenhydratfraktion können eventuell durch geringe Abweichungen im

Referenzprobensatz der NIRS- Methode hervorgerufen worden sein. Keine Vergleiche gibt es beim Rohfett- und beim Stärkegehalt der Maispflanzen, da der Rohfettgehalt bei der NIRS- Methode nicht erhoben wurde. Da die Rohfettwerte im Mais sowieso eher gering sind (unter 3% in der Trockenmasse), wären grundsätzlich auch nur geringe Differenzen zwischen den beiden Analyseverfahren zu erwarten gewesen. Beim Stärkegehalt ist auch kein Vergleich möglich, da dieser nur nach der NIRS- Methode bestimmt wurde und keine eigenen Erhebungen nach der Weender- Methode vorliegen.

Wie oben aus Tabelle 10 zu ersehen ist, verschieben sich im Verlauf der Vegetation die relativen Anteile der Rohnährstoffe in den Maispflanzen. Um die Beziehungen der Rohnährstoffe zueinander besser zu veranschaulichen, sind in Tabelle 11 die korrelativen Zusammenhänge zwischen den einzelnen Inhaltsstofffraktionen beim Mais abgebildet. In den färbig hinterlegten Feldern sind die Rohnährstoffgehalte nach der NIRS- Analysemethode jeweils mit den Gehaltswerten nach der Weender- Methode verglichen. Alle Ergebnisse sind dabei hochsignifikant ( $\alpha < 0,01$ ).

Die Gehaltswerte an Rohprotein, Rohfaser und Rohasche verringern sich im Verlauf der Vegetation und korrelieren daher je nach Intensität der Abnahme mehr oder weniger stark positiv. Im Gegensatz dazu steigen im Verlauf der Vegetation die Gehaltswerte an Rohfett (in geringem Umfang) und an N- freien Extraktstoffen (in verstärktem Umfang). Daher weisen diese beiden Inhaltsstofffraktionen negativ korrelierende Beziehungen zu den Rohprotein-, Rohfaser- und Rohaschewerten auf. Besonders auffällig ist die stark negativ korrelierende Beziehung zwischen der Rohfaser und den N- freien Extraktstoffen, da der Rohfasergehalt im Verlauf der Vegetation deutlich abnimmt, während die N- freien Extraktstoffe erheblich steigen. Aber auch Rohasche (stark negativ) und Rohprotein stehen in negativer Korrelation zu den N- freien Extraktstoffen.

**Tabelle 11: Korrelationen zwischen den Inhaltsstofffraktionen beim Mais**

(siehe folgende Seite)

Korrelation		XA (% TM) Weender	XF (% TM) Weender	XP (% TM) Weender	XL (% TM) Weender	XX (% TM) Weender	XA (% TM) NIRS	XF (% TM) NIRS	XP (% TM) NIRS	XX (% TM) NIRS	Stärke (% TM) NIRS
<i>XA (% TM)</i> <i>nach Weender</i>	Korrelation nach Pearson	1	,892(**)	,805(**)	-,506(**)	-,933(**)	,901(**)	,842(**)	,645(**)	-,890(**)	-,846(**)
	Signifikanz (2-seitig)		,000	,000	,004	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XF (% TM)</i> <i>nach Weender</i>	Korrelation nach Pearson	,892(**)	1	,789(**)	-,680(**)	-,991(**)	,885(**)	,968(**)	,602(**)	-,969(**)	-,960(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XP (% TM)</i> <i>nach Weender</i>	Korrelation nach Pearson	,805(**)	,789(**)	1	-,611(**)	-,836(**)	,854(**)	,792(**)	,839(**)	-,855(**)	-,821(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XL (% TM)</i> <i>nach Weender</i>	Korrelation nach Pearson	-,506(**)	-,680(**)	-,611(**)	1	,626(**)	-,725(**)	-,688(**)	-,690(**)	,690(**)	,682(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,004	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XX (% TM)</i> <i>nach Weender</i>	Korrelation nach Pearson	-,933(**)	-,991(**)	-,836(**)	,626(**)	1	-,902(**)	-,958(**)	-,635(**)	,972(**)	,956(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XA (% TM)</i> <i>nach NIRS</i>	Korrelation nach Pearson	,901(**)	,885(**)	,854(**)	-,725(**)	-,902(**)	1	,879(**)	,779(**)	-,935(**)	-,897(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000		,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XF (% TM)</i> <i>nach NIRS</i>	Korrelation nach Pearson	,842(**)	,968(**)	,792(**)	-,688(**)	-,958(**)	,879(**)	1	,558(**)	-,987(**)	-,987(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,001	,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XP (% TM)</i> <i>nach NIRS</i>	Korrelation nach Pearson	,645(**)	,602(**)	,839(**)	-,690(**)	-,635(**)	,779(**)	,558(**)	1	-,663(**)	-,598(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,001		,000	,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>XX (% TM)</i> <i>nach NIRS</i>	Korrelation nach Pearson	-,890(**)	-,969(**)	-,855(**)	,690(**)	,972(**)	-,935(**)	-,987(**)	-,663(**)	1	,985(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000		,000
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31
<i>Stärke (% TM)</i> <i>nach NIRS</i>	Korrelation nach Pearson	-,846(**)	-,960(**)	-,821(**)	,682(**)	,956(**)	-,897(**)	-,987(**)	-,598(**)	,985(**)	1
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	,000	
	N	31	31	31	31	31	31	31	31	31	31

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

In Tabelle 12 sind die korrelativen Beziehungen (Korrelation nach Pearson) zwischen den beiden Analyseverfahren nochmals separat dargestellt. Dabei sind Ergebnisse nach der NIRS- Methode den Werten nach Weender gegenübergestellt und statistisch ausgewertet. Die farbige hinterlegte Felder kennzeichnen den direkten Vergleich der Inhaltsstoffe beider Analyseverfahren. Je weniger sich die Ergebnisse nach beiden Verfahren unterscheiden bzw. je genauer sie übereinstimmen, desto näher liegt der Korrelationskoeffizient bei 1.

**Tabelle 12: Korrelative Zusammenhänge zwischen den Nährstoffanalyseergebnissen nach NIRS und Weender**

Korrelationen		XA (% TM) nach NIRS	XF (% TM) nach NIRS	XP (% TM) nach NIRS	XX (% TM) nach NIRS	Stärke (% TM) nach NIRS
XA (% TM) nach Weender	Korrelation nach Pearson	,901**	,842**	,645**	-,890**	-,846**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31
XF (% TM) nach Weender	Korrelation nach Pearson	,885**	,968**	,602**	-,969**	-,960**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31
XP (% TM) nach Weender	Korrelation nach Pearson	,854**	,792**	,839**	-,855**	-,821**
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31
XX (% TM) nach Weender	Korrelation nach Pearson	-,902(**)	-,958(**)	-,635(**)	,972(**)	,956(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31
XL (% TM) nach Weender	Korrelation nach Pearson	-,725(**)	-,688(**)	-,690(**)	,690(**)	,682(**)
	Signifikanz (2-seitig)	,000	,000	,000	,000	,000
	N	31	31	31	31	31

\*\* Die Korrelation ist auf dem Niveau von 0,01 (2-seitig) signifikant.

Die Werte korrelieren hoch signifikant ( $\lambda < 0,01$ ). Das heißt, es gibt keine signifikanten Unterschiede zwischen den Analyseergebnissen nach der NIRS- bzw. der Weender-Methode. Die Korrelationskoeffizienten beim direkten Vergleich sind durchwegs nahe eins und beschreiben daher eine relativ große Übereinstimmung der Werte. Etwas größere korrelative Abweichungen gibt es lediglich beim Rohproteingehalt mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,839.

## 8. Ertragspotentiale der einzelnen Maissorten

Wie bereits in Kapitel 5 „Versuchstandort und Versuchsdurchführung“ beschrieben, wurden die Maissorten an 6 verschiedenen Terminen geerntet: nach 98, 118, 133, 150, 159 und 166 Wuchstagen. Bei diesen Ernteterminen wurden die Frisch- und Trockenmasseerträge bestimmt sowie das Probenmaterial für die Laboranalysen gewonnen.

### 8.1. Einordnung der Maissorten nach dem Biomassebildungsvermögen

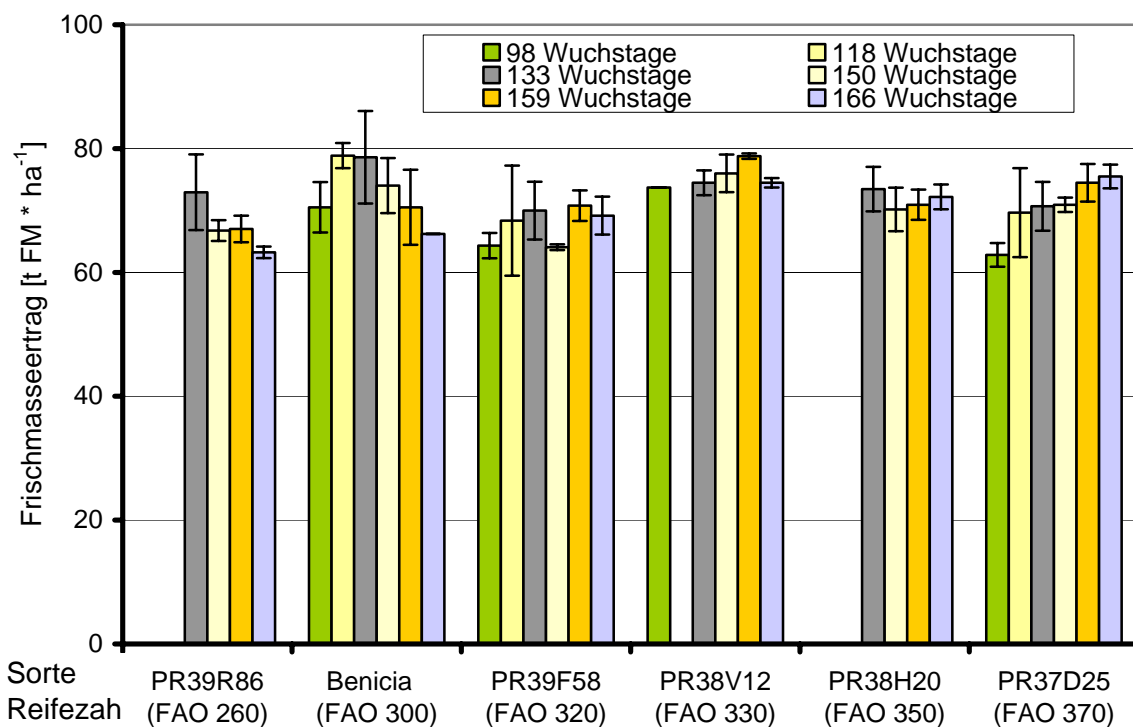
Abbildung 14 und Abbildung 15 zeigen die Erträge an Frischmasse und Trockenmasse der Maissorten zum jeweiligen Erntezeitpunkt (gerechnet ab dem Tag der Aussaat): nach 98 Wuchstagen im Vegetationsstadium „Ende des Fahnenschiebens“, nach 118 Wuchstagen im „Kornbildungsstadium“, nach 133 Wuchstagen im „Milchreifstadium der Körner“, nach 150 Wuchstagen im „Teigreifstadium der Körner“, nach 159 Wuchstagen am Ende des „Teigreifstadiums“ und schließlich nach 166 Wuchstagen im Stadium „Beginn der physiologischen Reife“.

Bei den Frischmasseerträgen waren in Abhängigkeit von der jeweiligen Reifezahl der Maissorten deutlich unterschiedliche Entwicklungstendenzen festzustellen:

Die frühreifen Sorten zeigten mit zunehmender Wachstumsdauer (speziell ab dem dritten Erntetermin) deutlich abnehmende Frischmasseerträge. Beispielsweise verringerte sich bei der frühreifen Sorte PR39R86 (FAO 260) der Frischmasseertrag je Hektar von knapp 73 t beim dritten Erntetermin (133 Wuchstage) auf rund 63 t Frischmasse beim letzten Erntetermin (166 Wuchstage), was zugleich dem niedrigsten während Versuchsdauer gemessenen Frischmasseertrag entsprach. Auch bei der mittelfrühen Sorte Benicia (FAO 300) nahm der Frischmasseertrag gegen Ende der Vegetationsdauer ab. Wurden nach 118 Wuchstagen (zweiter Erntetermin) bei dieser mittelfrühen Sorte noch rund 78 t Frischmasse je Hektar erzielt, so sank der Frischmasseertrag nach 166 Wuchstagen (sechster Erntetermin) auf rund 66 t je Hektar. Die abnehmenden Frischmasseerträge lassen sich einerseits auf den steigenden Trockensubstanzgehalt durch die zunehmende Abreife der Maispflanzen (weniger Wassergehalt) und andererseits auf steigende Atmungs- und Bröckelverluste zurückführen.

Die mittelspät abreifenden Sorten wiesen in den Frischmasseerträgen meist nur geringfügige Schwankungen zwischen den einzelnen Ernteterminen auf. Diese Sorten erzielten durchschnittliche Frischmasseerträge von knapp über 70 t je Hektar. Meist hatten diese Sorten ihr Frischmassemaximum beim fünften Erntetermin erreicht. Im Gegensatz zu den frühen Sorten zeigten diese mittelspäten Sorten aber nur mehr geringe Ertragsabfälle beim letzten Erntetermin.

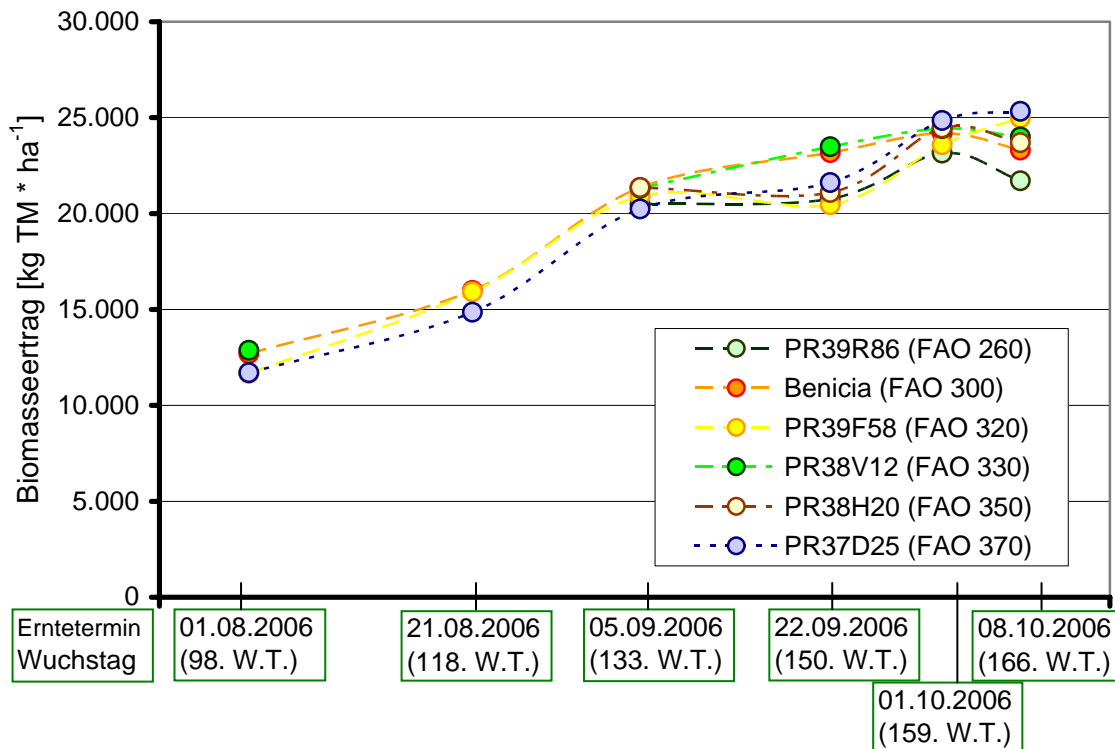
Die höchsten Frischmasseerträge wurden von der mittelspäten Sorte PR38V12 (FAO 330) und der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) erreicht, wobei die spätreife Sorte PR37D25 sogar bis zum Ende der Versuchslaufzeit durch steigende Frischmasseerträge gekennzeichnet war. Bei der ersten Ernte lag der Biomasseertrag dieser Sorte noch knapp unter 70 t Frischmasse. Bei den folgenden Ernten nahm der Frischmasseertrag ständig zu und erreichte beim sechsten Erntetermin mit 75,5 t Frischmasse den höchsten Wert. Abbildung 14 zufolge ist daher die spätreife Sorte PR37D25 speziell gegen Ende der Vegetationszeit den anderen Sorten im Biomassepotenzial überlegen.



**Abbildung 14: Frischmasseerträge der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt**

Da der Frischmasseertrag maßgeblich von der Abreife und daher vom Trockensubstanzgehalt der Maispflanzen beeinflusst wird, ist die Betrachtung der Trockenmasseerträge zum jeweiligen Erntezeitpunkt besser geeignet, um das

Biomassebildungsvermögen der Maissorte beurteilen zu können. In Abbildung 15 sind die Trockenmasseerträge der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt dargestellt.

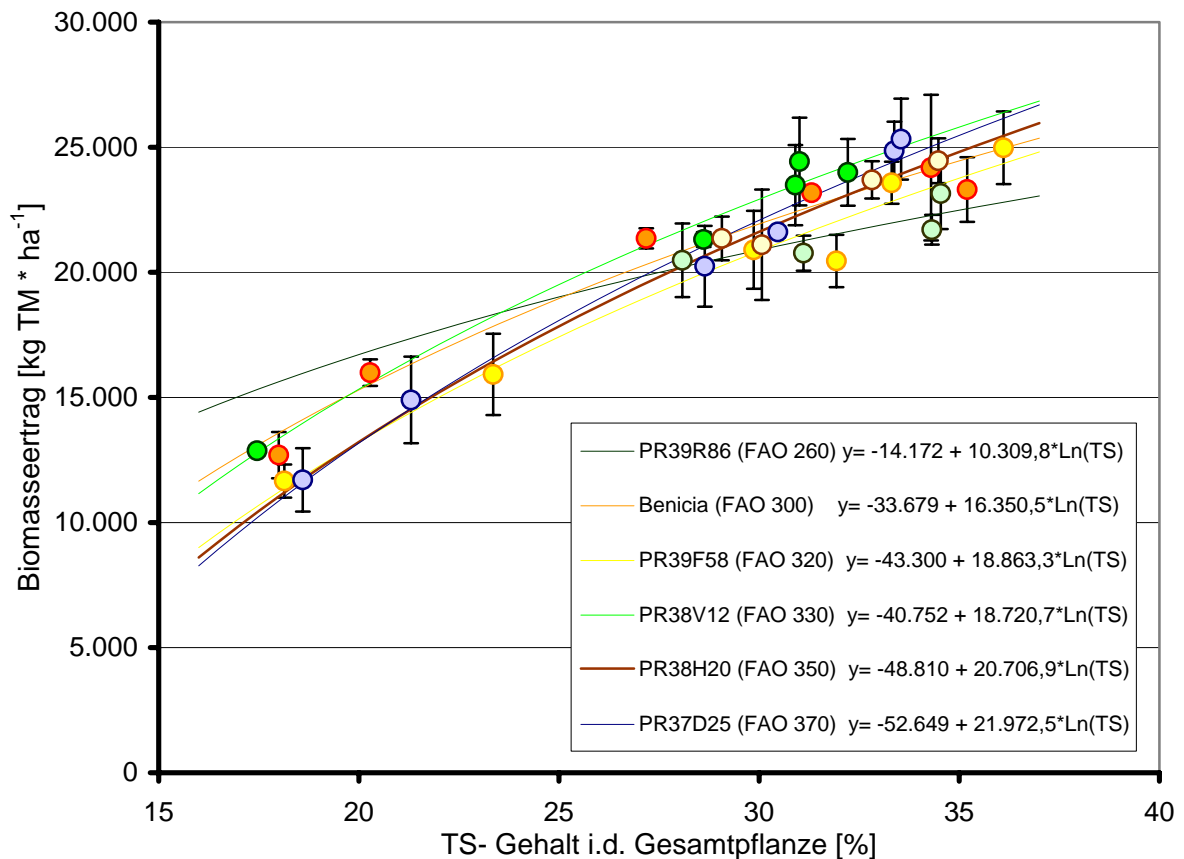


**Abbildung 15: Trockenmasseentwicklung der Maissorten in Abhängigkeit von Erntezeitpunkt**

Die höchsten Trockenmasseerträge (im Bereich von 25 t TM) erreichten die meisten Maissorten beim 5. Erntetermin, im Stadium Ende der Teigreife. Im Vergleich dazu, wird in der Literatur (nach mehreren Autoren) auch meist das Teigreifstadium als am ertragreichsten beschrieben. Trotzdem gab es zwischen den einzelnen Maissorten doch teilweise beachtliche Unterschiede. Zum Beispiel nahm der Trockenmasseertrag der frühreifen Sorte PR39R86 (FAO 260) beim letzten Erntetermin bereits merklich ab und reduzierte sich um ca. 1,5 t auf 21,7 t Trockenmasse je Hektar. Bei den anderen Sorten blieb der Trockenmasseertrag bei den letzten Ernteterminen in etwa konstant zwischen 23 und 24 t Trockenmasse je Hektar. Die Sorten PR39F58 (FAO 320) und PR37D25 (FAO 370) konnten die Trockenmasseerträge bis zum letzten Erntetermin sogar noch steigern und erreichten knapp über 25 t Trockenmasse je Hektar. Daraus lässt sich schließen, dass diese beiden Sorten den maximalen Biomasseertrag erst beim letzten Erntetermin erreicht haben oder im Falle der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) vielleicht sogar erst später erreichen werden.



Um den Wachstumsverlauf der Maissorten besser abschätzen zu können, ist in Abbildung 16 die Biomasseertragsbildung der Maissorten in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt in den Gesamtpflanzen dargestellt. Die Ertragsentwicklungen in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze sind durch die sortenspezifischen Regressionskurven dargestellt. Die Ertragkurven der Maissorten sind mittels logarithmischer Modelle mit der allgemeinen Formel  $y = a + b \cdot \ln(x)$  berechnet (a entspricht der Konstanten; b bezieht den Regressionskoeffizienten).



**Abbildung 16: Biomasseerträge der Maissorten in Abhängigkeit vom TS- Gehalt in der Gesamtpflanze (dargestellt sind die gemessenen Werte mit deren Standardabweichung sowie die Kurvenverläufe der sortenspezifischen Regressionsmodelle)**

Wie aus Abbildung 16 ersichtlich ist, weisen die einzelnen Maissorten zum Teil deutlich unterschiedliche Ertragskurven auf. Die mittelfrühe Sorte Benicia (FAO 300) und vor allem die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260) weisen im Vergleich zu den mittelspäten und spätreifen Sorten deutlich flachere Ertragsverläufe auf. Zwar erzielten die frühen Sorten in den früheren Vegetationsstadien (bei noch geringen Trockensubstanzgehalten) höhere Trockenmasseerträge, mit zunehmender Wachstumsdauer konnten sie aber mit den Ertragszuwächsen der spätreiferen Sorten nicht mehr mithalten. Da die frühreifen Sorten

ihr Maximum im Trockenmasseertrag schon relativ früh erreichen, flachen die Ertragskurven dieser Sorten schon relativ bald ab. In Tabelle 13 sind Regressionskoeffizienten und die Regressionsparametern der Ertragskurven aufgelistet.

**Tabelle 13: Regressionsmodelle der Ertragsentwicklung der Maissorten in Abhängigkeit von den Trockensubstanzgehalten in den Gesamtpflanzen; Parameterschätzung und Signifikanztest**

Logarithmisches Modell: Trockenmasseertrag [kg TM * ha <sup>-1</sup> ] = a + b * Ln (TS- Gehalt i.d. Gesamtpflanze)					
Sorte	a	b	R <sup>2</sup>	F- Wert	Signifikanz
PR39R86 (FAO 260)	-14.172	10.309,8	0,700	4,67	0,163
Benicia (FAO 300)	-33.679	16.350,5	0,964	108,08	0,000
PR39F58 (FAO 320)	-43.300	18.863,3	0,971	133,77	0,000
PR38V12 (FAO 330)	-40.752	18.720,7	0,985	197,16	0,001
PR38H20 (FAO 350)	-48.810	20.706,9	0,938	30,36	0,031
PR37D25 (FAO 370)	-52.649	21.972,5	0,985	263,02	0,000

Die Ertragskurven aller Sorten weisen einen signifikanten Kurvenverlauf auf. Davon ausgenommen ist die der frühreifen Sorte PR39R86 (FAO 260), deren Ertragskurve aufgrund von stärker variierenden Ertragswerten (und einer eher geringen Probenanzahl) nicht signifikant ist.

Weiters wurde anhand einer Varianzanalyse (Mittelwertvergleich nach Sachs) getestet, ob sich die Maissorten in der Ertragsbildung (in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt) unterscheiden. Dabei sind die sortenspezifischen Regressionskurven anhand der Parameter Konstante, Regressionskoeffizient sowie deren Standardabweichungen miteinander verglichen worden. Das Ergebnis zeigte, dass sich nur die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370) in ihrer Ertragsbildung signifikant von der frühreifen Sorte PR39R86 (FAO 260) und der mittelfrühen Sorte Benicia (FAO 300) unterscheidet. Zwischen allen anderen Sorten bzw. Sortenkombinationen gibt es keine signifikanten Unterschiede in der Biomasseertragsbildung.

## 8.2. Einordnung der Maissorten nach dem Kriterium der Methanausbeute

Eine gute Methanausbeute mit einem hohen energetischen Wirkungsgrad setzt die richtige Nährstoffversorgung der Mikroorganismen im Fermenter der Biogasanlage voraus.

Je nach Vegetationsstadium verändert sich auch beim Mais die Zusammensetzung der Inhaltsstoffe und damit auch das spezifische Methanbildungsvermögen der Maispflanzen. In Tabelle 14 sind die mittels Methanenergiewertmodell berechneten spezifischen Methanausbeuten der Maissorten bei den jeweiligen Ernteterminen aufgelistet. Wie die Berechnungsergebnisse zeigen, wurden beim ersten Erntetermin nach 98 Wuchstagen die höchsten durchschnittlichen Methanausbeuten mit 370 bis knapp über 380 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup> erreicht. Mit zunehmender Vegetationsdauer nimmt das spezifische Methanbildungsvermögen bei allen Maissorten ab. Bei den späteren Ernteterminen bewegt sich das spezifische Methanbildungsvermögen bei Werten zwischen 330 und 350 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup>.

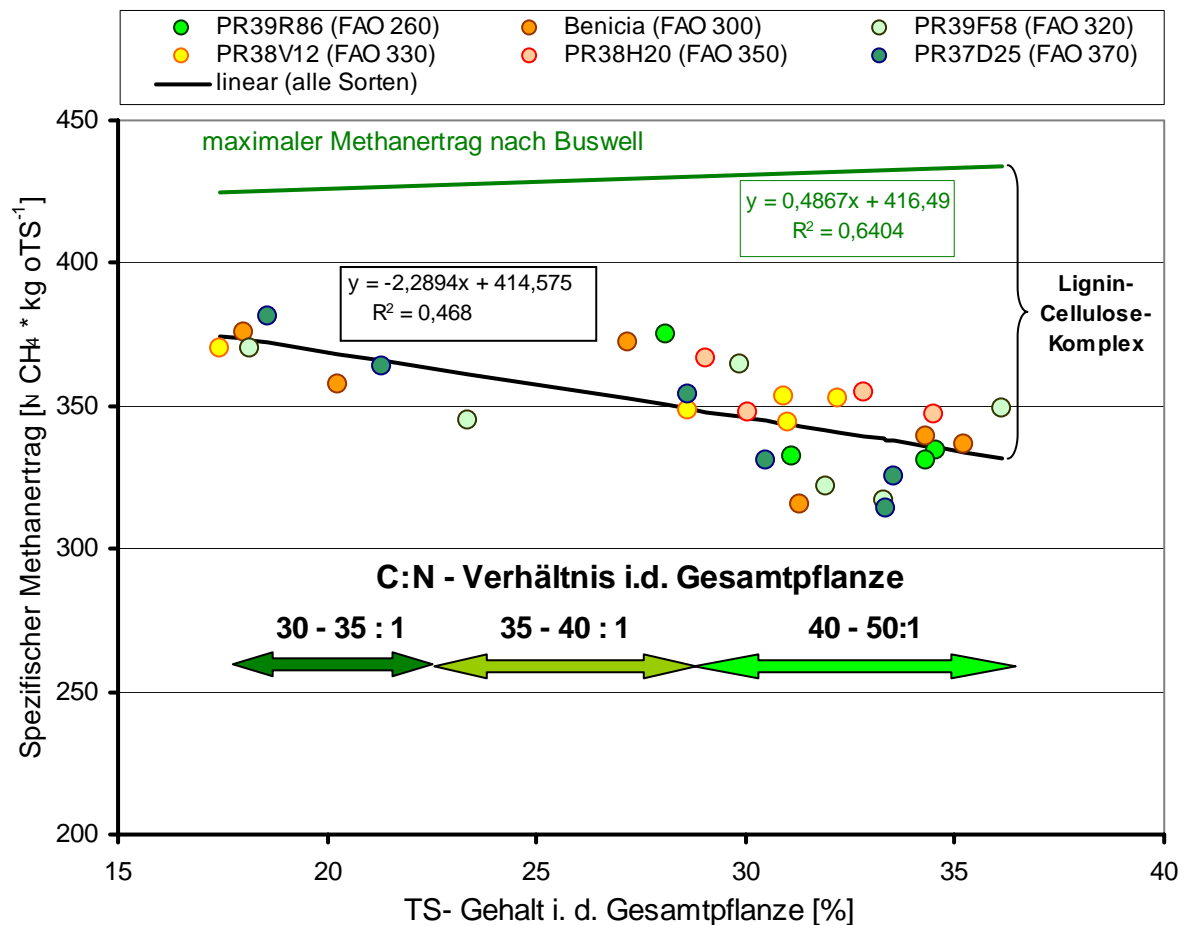
**Tabelle 14: Spezifisches Methanbildungsvermögen der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntetermin**

Sorte	Spezifisches Methanbildungsvermögen [l <sub>N</sub> CH <sub>4</sub> * kg oTS <sup>-1</sup> ]					
	1. Ernte (98. W.T.)	2. Ernte (118. W.T.)	3. Ernte (133. W.T.)	4. Ernte (150. W.T.)	5. Ernte (159. W.T.)	6. Ernte (166. W.T.)
<b>PR39R86</b> (FAO 260)	-	-	375	332	335	331
<b>Benicia</b> (FAO 300)	376	357	372	316	340	332
<b>PR39F58</b> (FAO 320)	370	345	364	322	317	349
<b>PR38V12</b> (FAO 330)	371	-	348	353	344	353
<b>PR38H20</b> (FAO 350)	-	-	366	348	347	355
<b>PR37D25</b> (FAO 370)	381	364	354	331	314	325

Die in Tabelle 14 aufgelisteten spezifischen Methanerträge der Maissorten sind in Abbildung 17 in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze dargestellt. Wie bereits oben erwähnt, war das spezifische Methanbildungsvermögen bei geringen Trockensubstanzgehalten in der Gesamtpflanze (also bei den frühen Ernteterminen) am höchsten. Das heißt, dass das spezifische Methanbildungsvermögen

von „unreifem“ Mais (TS- Gehalt 18 - 25%) höher ist als von Mais in der Silierreife (TS- Gehalt 30 – 35%). Offensichtlich nimmt mit zunehmender Reife der Pflanzen das spezifische Methanbildungsvermögen ab (siehe Regressionsgerade in Abbildung 17). Die hohen Methanerträge der Maispflanzen bei der ersten Ernte (TS- Gehalt ca. 18%) lassen sich auf ein offenbar sehr günstiges Nährstoffmuster für die Methangärung zurückzuführen. In der Praxis kommt eine Ernte in diesem Vegetationsstadium aber kaum in Frage, da zum einem das Biomassebildungspotential der Maispflanzen noch nicht ausgeschöpft ist (geringerer Trockenmasseertrag) und zum anderen noch keine gute Silierfähigkeit des Häckselgutes (zu geringer Trockensubstanzgehalt in der Frischmasse) gegeben ist.

Mit zunehmender Vegetationsdauer bzw. mit steigendem Trockensubstanzgehalt nimmt das spezifische Methanbildungsvermögen der Maispflanzen also deutlich ab. Während sich die Maissorten beim ersten Erntetermin im spezifischen Methanertrag nur gering unterscheiden, werden mit zunehmender Reife doch sortenspezifische Unterschiede im Methanbildungspotential erkennbar. Die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370), die zwar den höchsten Biomasseertrag erzielt hat (siehe Kapitel 8.1.), weist mit zunehmender Reife deutlich geringere Methanausbeuten (ca.  $320 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ ) als der Durchschnitt auf. Die frühen Sorten PR39R86 (FAO 320) und Benicia (FAO 300) erzielten durchschnittliche Methanerträge, während die Sorten PR38V12 (FAO 330) und PR38H20 (FAO 350) bei den späteren Ernteterminen sogar überdurchschnittliche Methanausbeuten erreichten (rund  $350 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ ). Es sei jedoch angemerkt, dass diese „späteren“ Sorten (PR38V12, PR38H20 und PR37D25) etwas geringere Trockensubstanzwerte aufwiesen, die das spezifische Methanbildungsvermögen positiv beeinflussen haben könnten. Schließlich sei noch die Sorte PR39F58 (FAO 320) erwähnt, die zwar bei der vierten und fünften Ernte unterdurchschnittliche Methanerträge erzielt hat, dafür aber beim letzten Erntetermin bei einem Trockensubstanzgehalt von 36,11% einen deutlich überdurchschnittlichen Methanertrag erreicht hat. Diese bemerkenswerte Steigerung beim letzten Erntetermin dürfte vor allem auf eine erhöhte Einlagerung von Stärke und Rohfett (hauptsächlich in der Kornfraktion) zurückzuführen sein. Diese Sorte (PR39F58) konnte den Rohfettgehalt in der Gesamtpflanzentrockenmasse von 2,1% bei der vorletzten Ernte auf 3,1% bei der letzten Ernte steigern. Im Vergleich dazu erreichten die anderen Sorten nur Rohfettwerte zwischen 2,3% und 2,7% (in der Trockenmasse).



**Abbildung 17: Spezifisches Methanbildungsvermögen in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt der Maissorten**

Der theoretisch maximale erzielbare Methanertrag aus den Maispflanzen (berechnet nach der Buswell- Formel) ist in Abbildung 17 anhand der grünen Regressionsgeraden dargestellt und liegt zwischen 423 und 436  $\text{N CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ . Diese maximalen Methanausbeuten können aber aufgrund des Lignin- Cellulose- Komplexes nicht erreicht werden.

### 8.2.1. C:N- Verhältnis der Maispflanzen

Das C:N- Verhältnis der Maispflanzen nimmt auch einen Einfluss auf das spezifische Methanbildungsvermögen. Das C:N- Verhältnis der Maispflanzen wird im Verlauf der Vegetation weiter (siehe Abbildung 17). Durch die verstärkte Lignifizierung mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt und durch das weiterwerdende C:N- Verhältnis verringert sich das spezifische Methanbildungsvermögen der Maispflanzen. Bei der ersten

Ernte nach 98 Wuchstagen lag das C:N- Verhältnis noch bei durchschnittlich 34:1. Ab dem dritten Erntetermin (nach 133 Wuchstagen) lagen die C:N- Werte bereits schon bei über 40:1 und pendelten sich bei den letzten drei Ernteterminen bei durchschnittlich 44 bis 45:1 ein (siehe Tabelle 15).

**Tabelle 15: Vergleich der C:N- Verhältnisse im Verlauf der Vegetation (nach dem Erntezeitpunkt); (Mittelwertsvergleich nach der Scheffé- Prozedur)**

Pflanzenteil	C:N- Verhältnisse bei den Ernteterminen		
	MW (C:N)	n	STABW (C)
1. Erntetermin	34,0 : 1 <sup>a</sup>	4	0,9
2. Erntetermin	37,8 : 1 <sup>a,b</sup>	3	2,6
3. Erntetermin	41,8 : 1 <sup>b,c</sup>	6	2,6
4. Erntetermin	45,6 : 1 <sup>c</sup>	6	4,8
5. Erntetermin	44,2 : 1 <sup>b,c</sup>	6	3,2
6. Erntetermin	44,1 : 1 <sup>b,c</sup>	6	1,7

MW= Mittelwert (Untergruppen für  $\alpha= 0,05$ ); n= Anzahl der Proben (Sorten);

STABW= Standardabweichung;

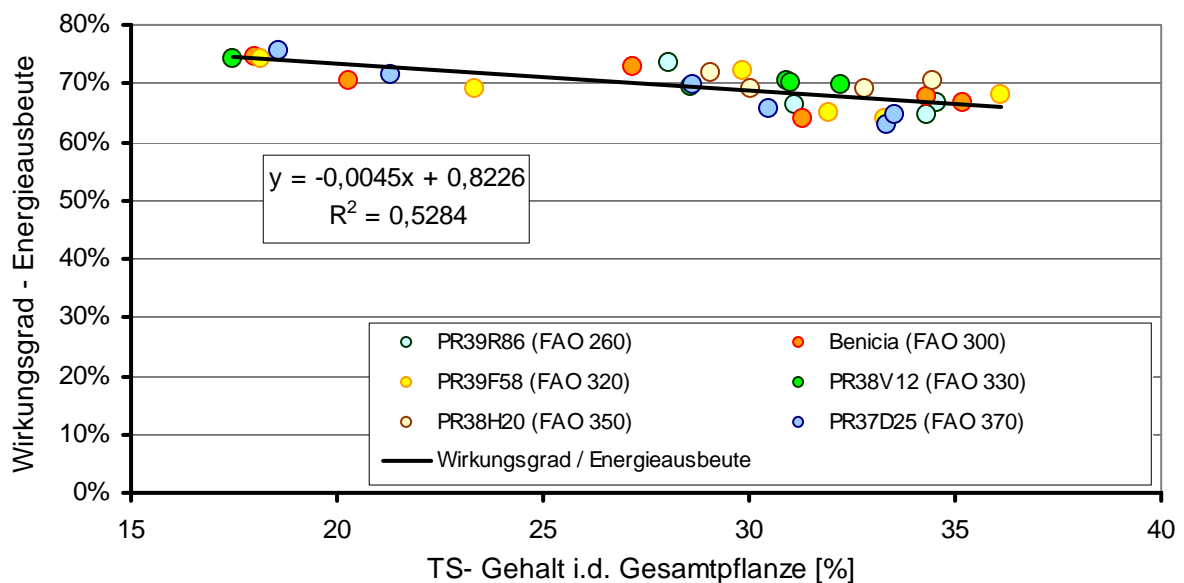
<sup>a,b,c</sup>= Mittelwerte innerhalb einer Spalte (Untergruppe) mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander (Scheffé- Prozedur: Signifikanz = 0,000; F-Wert = 33,895)

Bei der Analyse der C:N- Verhältnisse in den Maispflanzen bei den sechs Ernteterminen ergeben sich nach der Scheffé- Prozedur drei homogene Untergruppen, die sich signifikant von einander unterscheiden (siehe Tabelle 15). Dabei bilden der erste und der zweite Erntetermin eine Untergruppe; der zweite und der dritte Erntetermin eine weitere Untergruppe und schließlich der dritte, vierte, fünfte und sechste Erntetermin die dritte Untergruppe. Diese Untergruppen, in denen die jeweiligen Erntetermine zusammengefasst sind, unterscheiden sich signifikant von einander. Innerhalb einer Untergruppe gibt es keine signifikanten Unterschiede.

Weiters wurde getestet, ob es Unterschiede im C:N- Verhältnis zwischen den Sorten gibt. Laut der statistischen Analyse nach der Scheffé- Prozedur gibt es zwischen den sechs Maissorten keine signifikanten Unterschiede im C:N- Verhältnis.

### 8.2.2. Energetischer Wirkungsgrad ( $\eta$ )

Die Energieausnutzung bei der Methanbildung lässt sich anhand des energetischen Wirkungsgrades ( $\eta$ ) beurteilen. Das heißt, es wird gemessen, wie viel von der Bruttoenergie tatsächlich in Methanenergie umgewandelt wird. Die in den Maisproben enthaltene Bruttoenergie liegt im Bereich zwischen 19,525 und 20,454 MJ pro kg organischer Trockenmasse. Abbildung 18 zeigt den Zusammenhang zwischen dem Wirkungsgrad der Methangärung (Bruttoenergie/ Methanenergie) und dem Trockensubstanzgehalt der Maispflanzen.



**Abbildung 18: Abhängigkeit des energetischen Wirkungsgrades ( $\eta$ ) vom TS- Gehalt in der Gesamtpflanze**

Der Wirkungsgrad der Methangärung nimmt mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt ab. Die beste Energieausbeute erreichte die Sorte PR37D25 (FAO370) beim ersten Erntetermin (18,6% TS-Gehalt) mit einem energetischen Wirkungsgrad von 76%. Der niedrigste Wirkungsgrad wurde ebenfalls bei der Sorte PR37D25 gemessen (energetischer Wirkungsgrad von 63% bei der fünften Ernte (33,4% TS- Gehalt)). Alle anderen Sorten zeigten ähnliche Energieausbeuten im Verlauf der Vegetation, wobei bei den Sorten PR38V12 (FAO 330) und PR38H20 (FAO 350) der Wirkungsgrad mit zunehmender Trockensubstanzgehalt weniger stark absank (nicht unter 69%).

### 8.3. Einordnung der Maissorten nach dem Methanhektarertrag

Zur Beurteilung der Leistungsfähigkeit einer Maissorte eignet sich der Methanhektarertrag am besten, da hier sowohl das Biomassebildungsvermögen als auch das spezifische Methanbildungsvermögen der Maissorte einfließt.

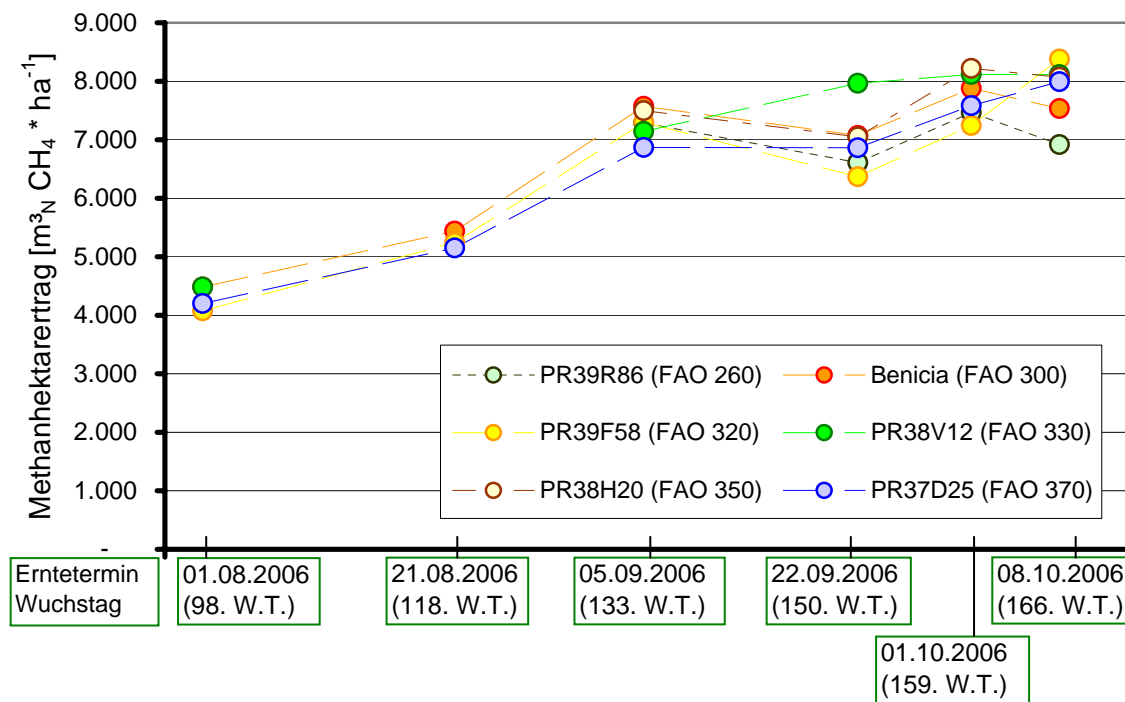
In Abbildung 19 sind die sortenspezifischen Entwicklungen in den Methanhektarerträgen in Abhängigkeit von den Wuchstagen dargestellt. Bei den ersten beiden Ernteterminen (01. und 21.08.2006) lagen die beprobten Sorten in den Methanerträgen je Hektar noch relativ knapp beieinander. Bei der erste Ernte reichten die Werte von 4.078 bis 4483  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  und bei der zweiten Ernte von 5.152 bis 5.437  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Ab dem dritten Erntetermin (05.09.2006) wurden dann alle Sorten geerntet und beprobt. Bei diesem Erntetermin erzielten alle Sorten Methanhektarerträge zwischen 7.300 und 7.570  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Nur die späteren Sorten PR38V12 (FAO 330) mit 7.143  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  und PR37D25 (FAO 370) mit 6.870  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  erreichten etwas geringere Methanhektarerträge.

Interessanterweise brachte die vierte Ernte (22.09.2006) bei fast allen Sorten geringere Methanerträge je Hektar. Begründen lassen sich die geringeren Methanerträge damit, dass die spezifischen Methanausbeuten bei diesem Erntetermin relativ niedrig waren (zwischen 316 und 332  $\text{l}_\text{N} \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ ). Auch das C:N- Verhältnis war bei dieser Ernte mit durchschnittlich 46:1 am weitesten. Die einzige Ausnahme war die Sorte PR38V12 (FAO 330), die bei einem C:N- Verhältnis von 38:1 noch eine gute spezifische Methanausbeute von 353  $\text{l}_\text{N} \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  erzielte und zusammen mit einem überdurchschnittlichen Trockenmasseertrag (knapp 23,5 t TM) den Methanhektarertrag auf 7.965  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  steigern konnte. Somit war die Sorte PR38V12 (FAO 330) beim vierten Erntetermin den anderen Sorten deutlich überlegen.

Bei der fünften Ernte (01.10.2006) konnten sich alle Sorten im Methanhektarertrag wieder steigern. Für die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260) war bereits beim diesem fünften Erntetermin der maximale Methanhektarertrag mit 7.466  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  erreicht. Auch die mittelfrühe Sorte Benicia (FAO 300) erzielte bereits beim diesem Erntetermin ihren höchsten Methanhektarertrag mit 7.879  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Bei beiden Sorten wurden beim sechsten Erntetermin (08.10.2006) sogar beachtliche Einbußen im Methanhektarertrag festgestellt, die auf verminderte Biomasseerträge infolge von Bruch- und

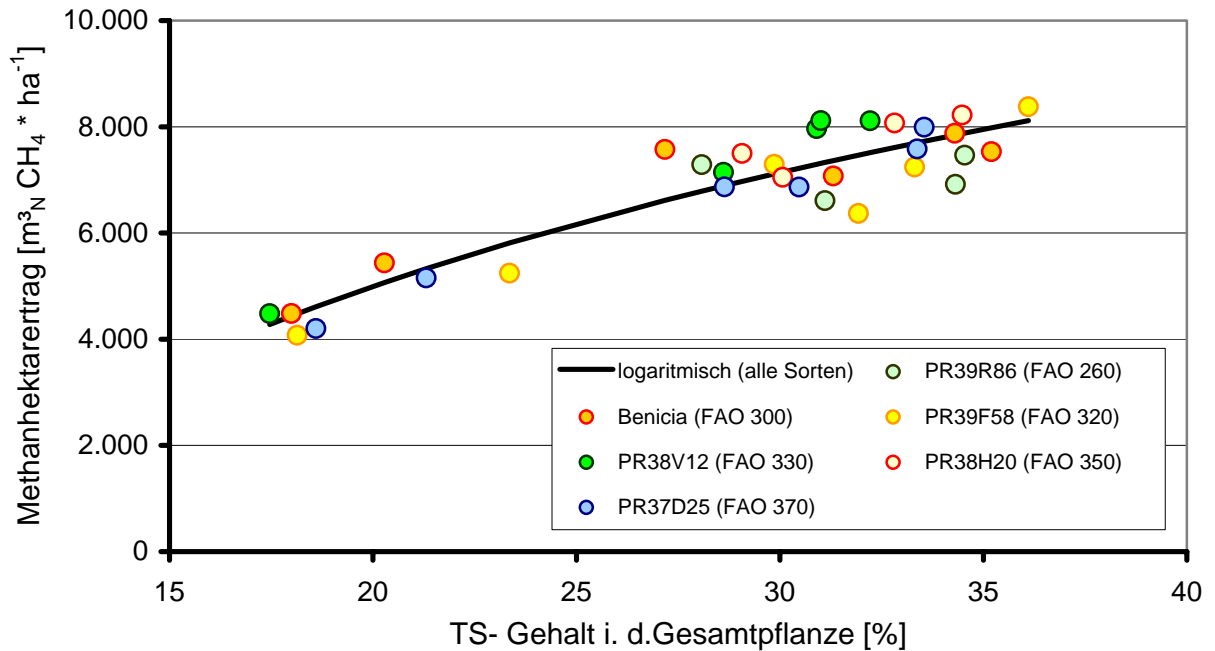


Atmungsverlusten zurückzuführen sind (das spezifische Methanbildungsvermögen blieb nahezu unverändert gegenüber dem fünften Erntetermin). Die mittelspäten und spätreifen Sorten blieben beim letzten Erntetermin im Methanhektarertrag relativ konstant oder konnten sogar noch Zuwächse verzeichnen. Am stärksten fiel die Steigerung erstaunlicherweise bei der Sorte PR39F58 (FAO 320) aus, die beim letzten Erntetermin noch einen starken Ertragszuwachs erzielen konnte. Mit  $8.378 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erzielte diese Sorte den höchsten Methanhektarertrag. Die Sorte PR38V12 (FAO 330) blieb im Methanhektarertrag nahezu unverändert und erreichte beim letzten Erntetermin  $8.113 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ . Entgegen den Erwartungen konnte die Sorte PR38H20 (FAO 350) beim letzten Erntetermin keine Zuwächse im Methanhektarertrag mehr erreichen. Gegenüber dem fünften Erntetermin ( $8.221 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ ) verminderte sich der Methanertrag bei dieser Sorte sogar geringfügig (um  $151 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ ). Bei der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) wirkte sich der späte Erntetermin positiv auf das Methanertragspotential aus. Nach kontinuierlich steigenden Methanerträgen erzielte diese Sorte beim abschließenden sechsten Erntetermin einen Methanhektarertrag von  $7.992 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ . Dem Entwicklungsverlauf dieser spätreifen Sorte zufolge, wäre bei einem noch späteren Erntetermin noch eine Steigerung des Methanhektarertrages möglich, da das Biomassebildungsvermögen noch nicht vollständig ausgereizt war.



**Abbildung 19: Einfluss der Vegetationslänge (Anzahl der Wuchstage) bzw. des Erntezeittermins auf den Methanhektarertrag der Maissorten**

Der Methanhektarertrag wird hauptsächlich vom Reifegrad der Maispflanzen beeinflusst. In Abbildung 20 ist der Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze mit dem Methanhektarertrag der Maissorten in Beziehung gesetzt.



**Abbildung 20: Methanhektarertrag in Abhängigkeit vom Trockensubstanzgehalt der Maissorten**

Nach AMON et al. (2006a, 21) liegt das Methanhektarertrags- Maximum im Bereich von 33% Trockensubstanzgehalt in der Ganzpflanze. Dies entspricht auch den Ergebnissen dieser Untersuchungen. Da die Maissorten aber nur bis zu einem Trockensubstanzgehalt von ca. 35% beprobt wurden, ist bis zum Ende ein Anstieg der Regressionskurve zu beobachten. Verantwortlich dafür sind vor allem die mittelspäten und spätreifen Sorten (PR39F58, PR38V12, PR38H20 und PR37D25), die auch beim letzten Erntetermin kaum über einen Trockensubstanzgehalt von 32 bis 34% hinauskamen und daher nach wie vor durch steigende oder zumindest konstant bleibende Methanhektarerträge gekennzeichnet waren.

Dem gegenüber stehen die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260) und die mittelfrühe Sorte Benicia (FAO 300), die beim letzten Erntetermin bereits verminderte Methanhektarerträge aufwiesen. Ab einem Trockensubstanzgehalt von ca. 35% sanken die Methanhektarerträge dieser beiden Sorten schon recht deutlich unter die Regressionskurve ab. Ähnlich dem

Methanertragsverlauf dieser beiden Sorten würden sich auch die Methanhektarerträge der mittelspäten und spätreifen Sorten bei einer länger andauernden Vegetationszeit bzw. einer später durchgeführten Ernte (steigende Trockensubstanzgehalte von über 35%) entwickeln. Daraus folgend würde die Regressionskurve mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze weiter abflachen.

#### **8.4. Bestandteile der Maispflanzen und deren Eignung für die Biogasgewinnung (Koppelnutzung von Mais)**

Der Mais bzw. einzelne Teile der Maispflanzen können verschiedenartig genutzt werden. Je nach Verwendungszweck stehen für die Ernte der Gesamtpflanzen bzw. von Maispflanzenteilen entsprechende Ernteverfahren zur Verfügung. Die Vergärung einzelner Maispflanzenteile in Biogasanlagen ist auch möglich. Um die Eignung der einzelnen Pflanzenteile für die Vergärung beurteilen zu können, wurden beim letzten Erntetermin die Maispflanzen in die Pflanzenteile (Stängel, Blätter, Lieschen, Spindel und Körner) zerlegt, gewogen und anschließend analysiert. Die Ergebnisse der Inhaltsstoffanalyse zeigen, dass es bei den Pflanzenteilen kaum größere sortenbedingte Unterschiede in den Inhaltsstoffen gibt (siehe Tabelle 16).

**Tabelle 16: Maispflanzenteile sowie deren durchschnittliche Nährstoffzusammensetzungen**

Sorte	Pflanzenteile	Biomasse (kg TM/ha)	TS (% FM)	oTS (%FM)	XA (% TM)	XF (% TM)	XP (% TM)	XL (% TM)	XX (% TM)
PR39R86 (FAO 260)	Stängel	4.413	16,69	15,84	5,1	35,1	2,9	0,4	56,4
	Blätter	2.593	27,42	24,29	11,4	31,6	8,1	1,7	47,2
	Lieschen	1.046	33,63	32,65	2,9	35,7	3,5	0,8	57,1
	Spindel	1.979	46,36	46,03	0,7	34,4	1,7	0,3	62,9
	Körner	11.119	64,95	64,04	1,4	1,7	9,4	4,2	83,3
Benicia (FAO 300)	Stängel	4.599	18,29	17,36	5,1	40,3	2,1	0,3	52,2
	Blätter	2.652	21,99	19,39	11,8	29,8	8,6	1,8	48,1
	Lieschen	916	26,08	25,04	4,0	34,0	3,7	0,7	57,5
	Spindel	1.666	32,94	32,38	1,7	30,1	2,8	0,7	64,7
	Körner	11.566	61,29	60,31	1,6	2,2	9,5	4,6	82,2
PR39F58 (FAO 320)	Stängel	5.390	18,52	17,65	4,7	37,4	2,6	0,4	54,9
	Blätter	2.076	25,71	22,34	13,1	28,5	8,8	2,0	47,6
	Lieschen	977	30,17	29,26	3,0	34,6	4,2	0,8	57,3
	Spindel	1.494	38,10	37,68	1,1	31,2	2,3	0,4	65,0
	Körner	12.144	61,48	60,62	1,4	1,7	9,7	4,3	82,8
PR38V12 (FAO 330)	Stängel	6.065	19,42	18,59	4,3	39,2	2,7	0,4	53,3
	Blätter	3.029	22,48	19,78	12,0	29,9	8,7	1,9	47,5
	Lieschen	629	34,86	33,95	2,6	36,8	3,7	0,7	56,2
	Spindel	1.977	43,54	43,19	0,8	33,3	1,3	0,3	64,3
	Körner	12.055	61,03	60,11	1,5	2,5	10,3	5,0	80,8
PR38H20 (FAO 350)	Stängel	5.373	18,23	17,48	4,1	39,0	2,5	0,3	54,1
	Blätter	3.069	22,75	20,30	10,8	31,9	8,8	1,6	46,9
	Lieschen	690	30,77	29,94	2,7	36,2	3,4	0,7	57,0
	Spindel	2.183	43,15	42,67	1,1	33,6	2,0	0,4	62,8
	Körner	11.703	59,86	58,91	1,6	2,5	9,8	4,8	81,3
PR37D25 (FAO 370)	Stängel	7.115	22,53	21,65	3,9	37,9	2,1	0,4	55,7
	Blätter	3.347	26,22	23,65	9,8	30,8	8,8	2,3	48,3
	Lieschen	1.044	29,75	28,86	3,0	33,2	3,8	0,7	59,3
	Spindel	1.791	35,64	35,07	1,6	28,4	3,6	0,9	65,4
	Körner	12.286	56,90	56,10	1,4	1,9	9,8	3,3	83,6

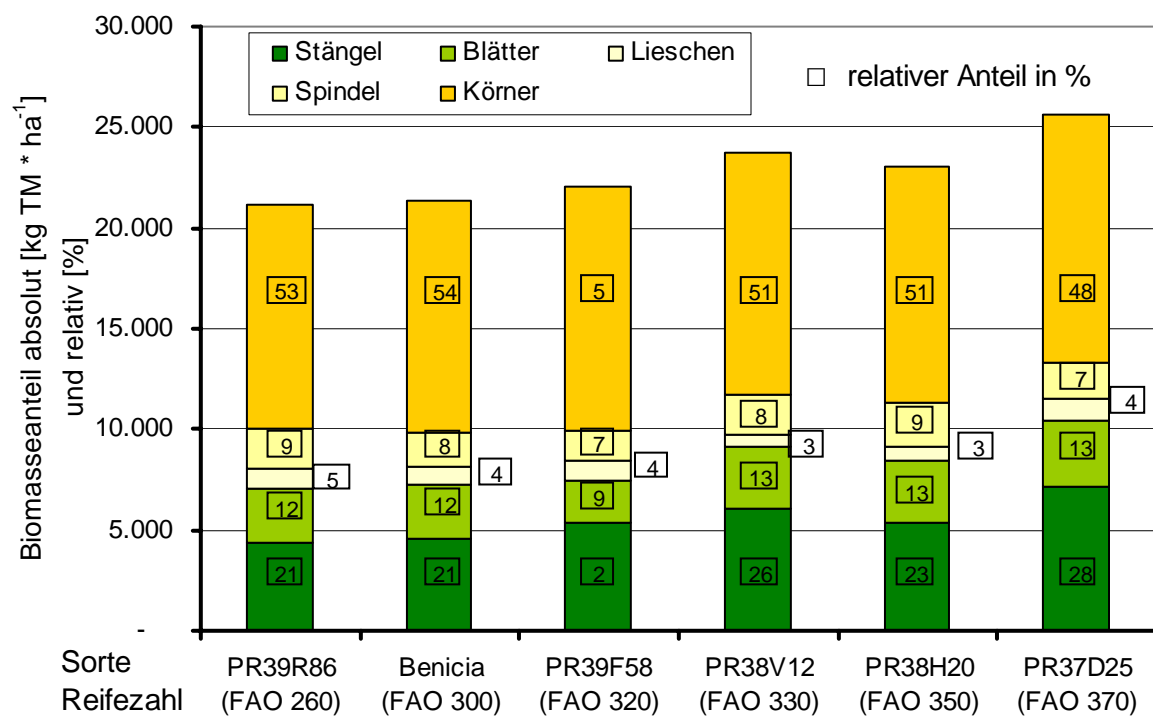
Entsprechend den unterschiedlichen Reifezahlen weisen die früheren Sorten natürlich etwas höhere TS- Gehalte in den Pflanzenteilen auf als die späteren Sorten, speziell in der Kornfraktion.

In den folgenden drei Unterkapiteln werden die Potentiale der einzelnen Maispflanzenteile im Hinblick auf das Biomasse- und Methanbildungsvermögen aufgezeigt.

#### **8.4.1. Biomasserträge der Maispflanzenteile**

In Abbildung 21 sind die Pflanzenbestandteile der Maissorten entsprechend ihren Anteilen an der Maispflanzenbiomasse aufgeschlüsselt. Die relativen Anteile der einzelnen

Pflanzenteile an den Gesamtpflanzen sind bei allen Sorten relativ ähnlich. Der Anteil der Kornfraktion liegt bei den meisten Sorten über 50% in der Trockenmasse. Einzig die Sorte PR37D25 (FAO 370) hat prozentuell gesehen einen etwas geringeren Kornanteil an der Maispflanzenbiomasse. Dafür ist aber der relative Anteil der Restpflanze (Stängel und Blätter) bei der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) deutlich höher als bei den anderen Sorten. Vor allem der Stängel mit einem relativen Anteil von 28% an der Maispflanzentrockenmasse zeichnet besonders das vegetative Biomassebildungsvermögen dieser Maissorte aus.



**Abbildung 21: Absolute bzw. relativer Anteile der einzelnen Pflanzenteile an der Maispflanzenbiomasse**

Vergleicht man die absoluten Erträge der Maispflanzenteile, so bewegt sich der Kornanteil zwischen 11,1 t Trockenmasse bei der Sorte PR39R86 (FAO 260) und 12,3 t Trockenmasse bei der Sorte PR37D25 (FAO 370). Das bedeutet, dass die Sorte PR37D25 relativ gesehen zwar einen eher geringen Kornanteil an der Pflanzenbiomasse hat, absolut betrachtet aber trotzdem den anderen Sorten auch im Kornertrag überlegen ist.

Bei Betrachtung der Restpflanze (Stängel und Blätter zusammen) sind noch deutlichere Unterschiede zwischen den Sorten festzustellen. Während die Sorten mit Reifezahlen bis

FAO 320 (PR39R86, Benicia, PR39F58) eine Restpflanzentrockenmasse zwischen 7 und 7,5 t erreichten, erzielten die Sorten PR38V12 (FAO 330) und PR38H20 (FAO 350) schon rund 8,5 bis 9 t Trockenmasse aus der Restpflanze. Eindeutig am ertragreichsten war aber die Restpflanze der Sorte PR37D25 (FAO 370) mit knapp 10,5 t Trockenmasse je Hektar.

#### 8.4.2. Spezifisches Methanbildungsvermögen einzelner Maispflanzenteile

In Abbildung 22 ist das spezifische Methanbildungsvermögen der einzelnen Maispflanzenteile dargestellt. Betrachtet man dieselben Maispflanzenteile der sechs Maissorten jeweils als eigene Kategorien, so sind innerhalb einer Kategorie kaum größere Unterschiede zwischen den Maissorten festzustellen. Bei den Maisstängeln wurden sehr einheitliche Methanausbeuten (zwischen 278 und 290  $\text{I}_N \text{CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ ) festgestellt. Die Methanausbeuten aus den Blättern waren sortenbedingt etwas unterschiedlicher und bewegten sich zwischen 368 und 394  $\text{I}_N \text{CH}_4 \cdot \text{kg oTS}^{-1}$ . Bei den Blättern war ein Einfluss der Reifezahlen (FAO-Zahlen) erkennbar. Die Maissorten mit höheren Reifezahlen erzielten höhere spezifische Methanerträge, da die Blätter der spätreiferen Sorten weniger welk und daher noch besser versorgt waren.

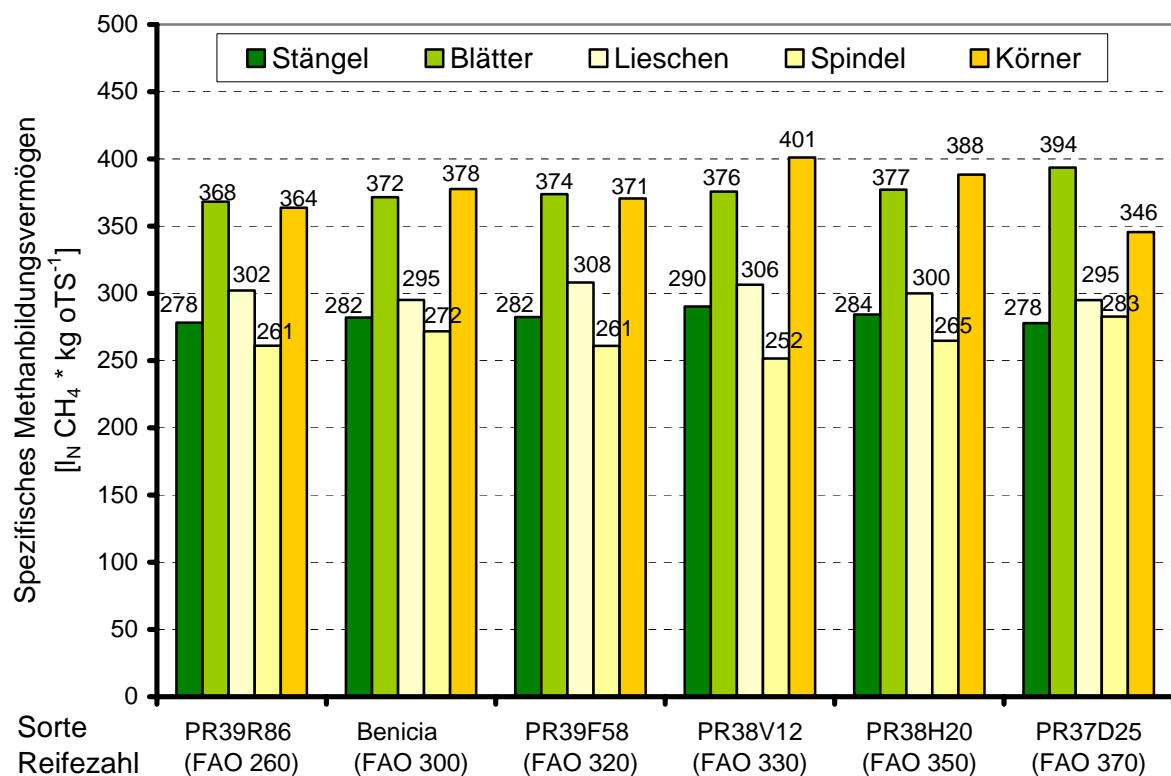


Abbildung 22: Spezifisches Methanbildungsvermögen der Maispflanzenbestandteile

Das Methanbildungsvermögen der Lieschen variierte kaum zwischen den Sorten und lag bei 295 bis 308 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup>. Bei den Maisspindeln ergaben sich sortenbedingt wieder etwas größere Unterschiede. Die Methanausbeute bei den Spindeln lag zwischen 252 und 283 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup>.

Die größeren sortenbedingten Unterschiede in der Methanausbeute ergaben sich bei der Kornfraktion, was auf unterschiedliche Nährstoffzusammensetzungen in den Körnern zurückzuführen ist. Beispielsweise hatten die Körner der Sorte PR38V12 (FAO 330) einen relativ hohen Fett- und Rohproteingehalt (5% bzw. 10,3% in der Trockenmasse) und somit einen relativ hohen spezifischen Methanertrag von 401 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup>. Im Vergleich dazu hatten die Körner der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) einen relativ geringen Fettgehalt (3,3% in der Trockenmasse) und dadurch auch einen niedrigeren spezifischen Methanertrag von 346 l<sub>N</sub> CH<sub>4</sub> \* kg oTS<sup>-1</sup>. Der geringere Fettgehalt in den Körnern der spätreifen Sorte (PR37D25) kann einerseits genetisch bedingt sein, andererseits könnte der Grund auch in der späteren Abreife durch die höhere Reifezahl liegen. Im Laufe der Abreife steigt der Trockensubstanzgehalt in den Maiskörnern und es wird vermehrt Stärke und auch Fett in den Körnern eingelagert. Das heißt, mit zunehmendem Trockenmassegehalt steigt der Stärke- und Fettgehalt in den Körnern. Daraus lässt sich begründen, warum die Körner der Sorte PR37D25 (FAO 370) bei einem Trockensubstanzgehalt von knapp 57% einen deutlich geringeren Fettgehalt aufweisen als die Körner der anderen Sorten, die immerhin einen Trockensubstanzgehalt von 60 bis 65% in der Kornfraktion erreicht haben. Die Differenzen in den Methanausbeuten der Körner können daher zu einem nicht unerheblichen Teil vom Reifegrad der Körner abhängen.

Nicht nur anhand der Inhaltsstoffzusammensetzungen, sondern auch aus den C:N-Verhältnissen (siehe Tabelle 17) können Rückschlüsse auf das spezifische Methanbildungsvermögen der Maispflanzenteile gezogen werden.

**Tabelle 17: Vergleich der C:N- Verhältnisse der einzelnen Maispflanzenteile (Einfaktorielle ANOVA: Post- Hoc- Test nach Duncan)**

Pflanzenteil	C:N- Verhältnis		
	MW (C:N)	n	STABW (C)
Stängel	134,8 : 1 <sup>c</sup>	6	22,41
Blätter	31,7 : 1 <sup>a</sup>	6	1,51
Lieschen	84,3 : 1 <sup>b</sup>	6	5,15
Spindel	151,0 : 1 <sup>c</sup>	6	47,48
Körner	30,9 : 1 <sup>a</sup>	6	1,04

MW= Mittelwert (Untergruppen für  $\alpha = 0,05$ ); n= Anzahl der Proben (Sorten);

STABW= Standardabweichung;

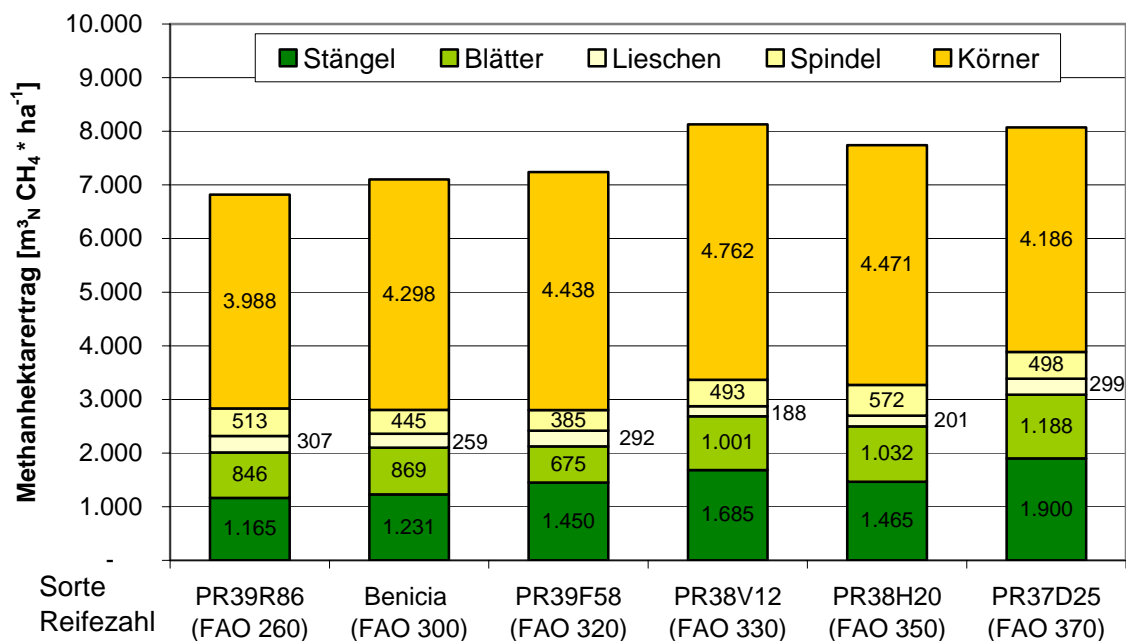
<sup>a,b,c</sup> = Mittelwerte innerhalb einer Spalte (Untergruppe) mit unterschiedlichen Hochbuchstaben sind signifikant verschieden voneinander (Duncan: Signifikanz = 0,000; F-Wert = 33,895)

Beim Vergleich der mittleren C:N- Werte der Pflanzenteile ergaben sich drei Untergruppen, die sich signifikant von einander unterscheiden. Die erste Untergruppe bildeten die Blatt- und Kornfraktionen, die die engsten C:N- Verhältnisse (rund 31:1 bei geringer Streuung) aufwiesen und auch die höchsten spezifischen Methanerträge erzielten (siehe Abbildung 22). Die zweite Untergruppe bildeten die Lieschen der Maispflanzen, die einen mittleren C:N- Wert von knapp 85:1 aufwiesen. Am weitesten waren die C:N- Verhältnisse beim Stängel und bei der Spindel, bei denen signifikant weitere C:N- Verhältnisse festgestellt werden konnten. Die Standardabweichung bei der Spindel lässt aber erkennen, dass die C:N- Werte sortenspezifisch stark variieren. Das weiteste C:N- Verhältnis weist die Spindel der Sorte PR38V12 (FAO 330) mit 219:1 auf, das engste Verhältnis die Sorte PR37D25 (FAO 370) mit 81:1. Das weite bzw. enge C:N- Verhältnis macht sich auch in der Methanausbeute der Spindeln bemerkbar. Aus der Spindel der Sorte PR38V12 (FAO 330) mit dem weitesten C:N- Verhältnis lässt sich ein spezifischer Methanertrag von  $252 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  erzielen, während die Spindel der Sorte PR37D25 (FAO 370) immerhin schon  $283 \text{ l}_N \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$  erreichen.

#### **8.4.3. Methanertragspotentiale einzelner Maispflanzenteile**

In Abbildung 23 sind die Methanerträge der Maissorten entsprechend den Anteilen der einzelnen Pflanzenteile dargestellt. Die vegetativen Pflanzenteile bringen bei der spätreifen Sorte PR37D25 (FAO 370) mit Abstand am meisten Methanertrag.





Anmerkung: Im Vergleich zu den Methanhektarerträgen in Kapitel 8.3. treten hier teilweise gewisse Abweichungen auf. Die unterschiedlichen Methanhektarerträge kommen aufgrund der separaten Erfassung der einzelnen Pflanzenteile zustande (eventuelle Bruchverluste bei der Trennung in die Einzelteile und auch etwaige Rundungsfehler bei den Wiegungen).

### Abbildung 23: Methanertragspotentiale der Pflanzenteile je Hektar

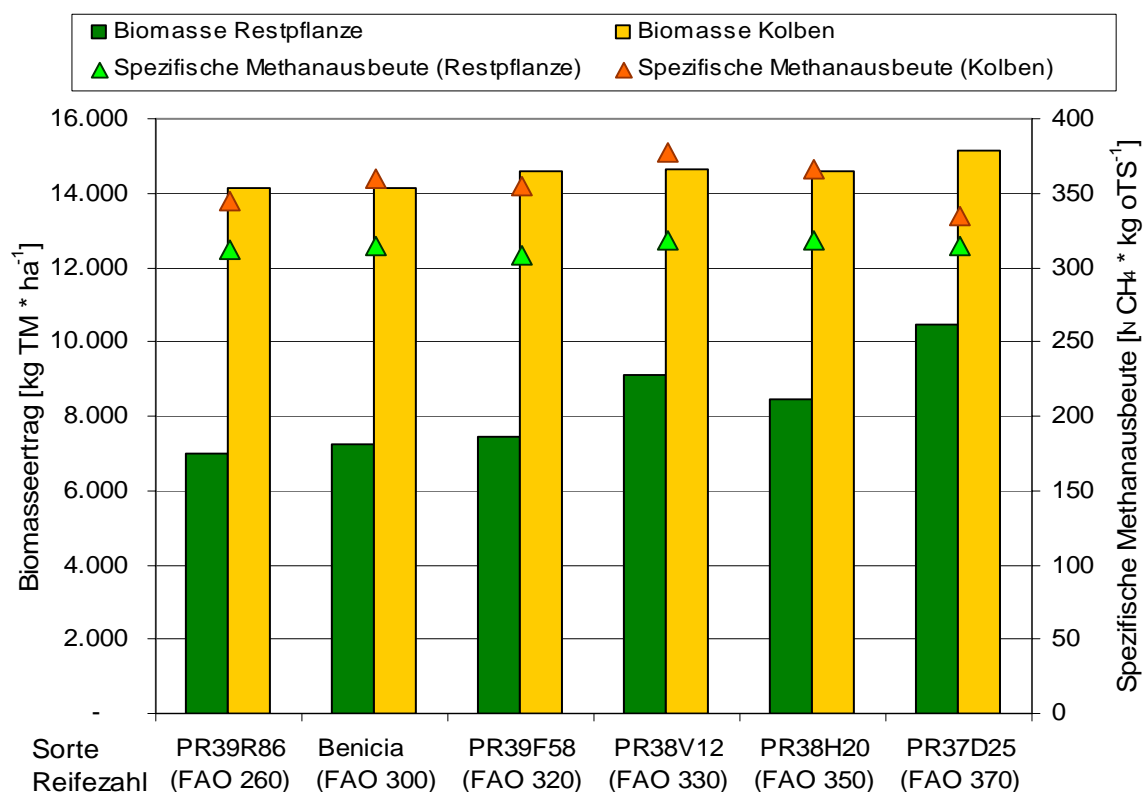
Entsprechend den jeweiligen Energiegehalten in den Pflanzenteilen erbringen die Körner am meisten Methanertrag je Hektar (zwischen knapp 4.000 bis 4.762  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ ). Die anderen Teile des Kolbens erbringen dagegen nur geringe Methanerträge. Während der Methanertrag aus der Spindel immerhin noch bei 400 bis knapp 600  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  liegt, beträgt der Methanertrag aus den Lieschen nur rund 200 bis  $\text{m}^3_{\text{N}} \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Auf den Methanertrag aus der Restpflanze (Stängel und Blätter) wird im folgenden Kapitel separat hingewiesen.

## 8.5. Betrachtung der Ertragspotentiale der Restpflanze und des Kolbens

In den Kapiteln 8.4.1. bis 8.4.3. wurden die Ertragspotentiale der Pflanzenteile der einzelnen Sorten bereits dargestellt und beschrieben. In der Praxis hat aber eine getrennte Ernte der fünf Teilfraktionen keine Bedeutung, da diese nur mit stark erhöhtem technischem Aufwand möglich wäre. In letzter Zeit gibt es aber verstärkte Überlegungen bezüglich einer Koppelnutzung von Maispflanzen. Dabei wird die Restpflanze (vegetative

Pflanzenteile = Stängel und Blätter) getrennt vom Kolben (generativer Pflanzenteil) genutzt.

In Abbildung 24 und Abbildung 25 sind die Biomasse- und Methanertragspotentiale der Maisrestpflanzen und der Maiskolben dargestellt. Wie in Abbildung 24 erkennbar ist, sind die spätreifen Sorten den frühreifen Sorten im Restpflanzen- Biomasseertrag deutlich überlegen. Den geringsten Ertrag aus der Restpflanze erzielte die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260) mit 7.006 kg Trockenmasse je Hektar, den höchsten Ertrag aus der Restpflanze erreichte die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370) mit 10.462 kg Trockenmasse je Hektar.



**Abbildung 24: Biomasseertrag und spezifisches Methanbildungsvermögen der Restpflanzen und der Kolben**

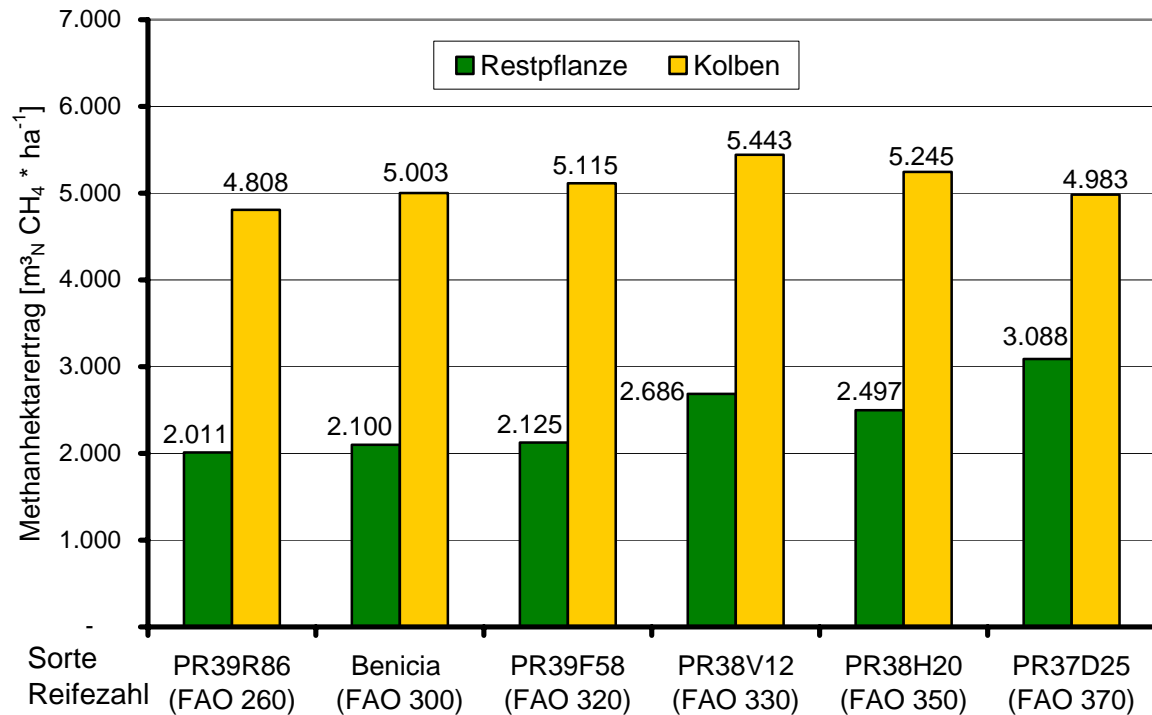
Auch im Kolbenertrag erreichten die spätreiferen Sorten durchwegs höhere Trockenmasseerträge je Hektar. Die Ergebnisse reichten von 14.144 kg Trockenmasse bei der Sorte PR39R86 (FAO 260) bis zu 15.121 kg Trockenmasse bei der Sorte PR37D25 (FAO 370).

Das spezifische Methanbildungsvermögen der Restpflanzen war bei allen Sorten sehr ähnlich und schwankte nur zwischen 312 und 319  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ . Im spezifischen Methansbildungsvermögen der Kolben gab es je nach Inhaltsstoffzusammensetzung doch etwas größere Unterschiede zwischen den Sorten. Entscheidend für die Methanausbeute des Kolbens ist natürlich das spezifische Methanbildungsvermögen der Körner (vgl. Kapitel 8.4.2). Daher erzielten auch die Kolben der Sorte PR38V12 (FAO 330) mit 377  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  die höchste spezifische Methanausbeute, die geringste Methanausbeute erreichten die Kolben der Sorte PR39D25 (FAO 370) mit 335  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ .

Wie in Abbildung 25 ersichtlich ist, erzeugten die Restpflanzen der frühreifen Sorten weniger Methan je Hektar als die der spätreifen Sorten. Diese Überlegenheit der spätreifen Sorten ist darauf zurückzuführen, dass diese bei ähnlichen spezifischen Methanausbeuten deutlich höhere Restpflanzen- Biomasseerträge erzielten. Den höchsten Methanhektarertrag aus der Restpflanze erreichte die Sorte PR37D25 (FAO 370) mit 3.088  $\text{m}^3_N \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Im Vergleich dazu erreichte AMID (2004, 67ff) bei seinen Untersuchungen Methanhektarerträge aus der Restpflanze von ca. 3.300  $\text{m}^3_N \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ .

Bei Betrachtung der Methanertragsfähigkeit der Kolben je Hektar ist erkennbar, dass hier vor allem die mittelspäten Sorten höhere Methanhektarerträge erreichen konnten. Am ertragreichsten erwiesen sich die Kolben der Sorte PR38V12 (FAO 330) mit 5.443  $\text{m}^3_N \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Im Allgemeinen sind die Kolben der mittelspäten Sorten durch eine hohe spezifische Methanausbeute und durch eine optimale Abreife gekennzeichnet.

Die früheren Sorten (PR39R86 und Benica) konnten bei den Methanhektarerträgen aus dem Kolben nicht ganz mit den mittelspäten Sorten mithalten, da die Kolben der früheren Sorten einen geringeren Biomasseertrag erbrachten. Im Gegensatz dazu lieferte die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370) eine sehr hohe Kolbenbiomasse, konnte aber aufgrund der verhältnismäßig niedrigen spezifischen Methanausbeute den Methanhektarertrag der mittelspäten Sorten auch nicht erreichen.



**Abbildung 25: Methanhektarerträge aus den Restpflanzen und dem Kolben der Maissorten**

Im Großen und Ganzen waren aber die sortenbedingten Unterschiede im Methanertrag der Kolben nicht allzu groß (siehe Abbildung 25). Die Methanerträge aus dem Kolben liegen im Bereich zwischen 4.808 und 5.443  $\text{m}^3 \text{N CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1}$ . Im Vergleich dazu erzielte AMID (2004, 67ff) bei Untersuchungen einer CCM- Variante einen Methanhektarertrag von 5.069  $\text{m}^3 \text{N CH}_4 \cdot \text{ha}^{-1}$ , welcher auch in etwa dem durchschnittlichen Kolbenertrag dieser Untersuchungen entspricht.

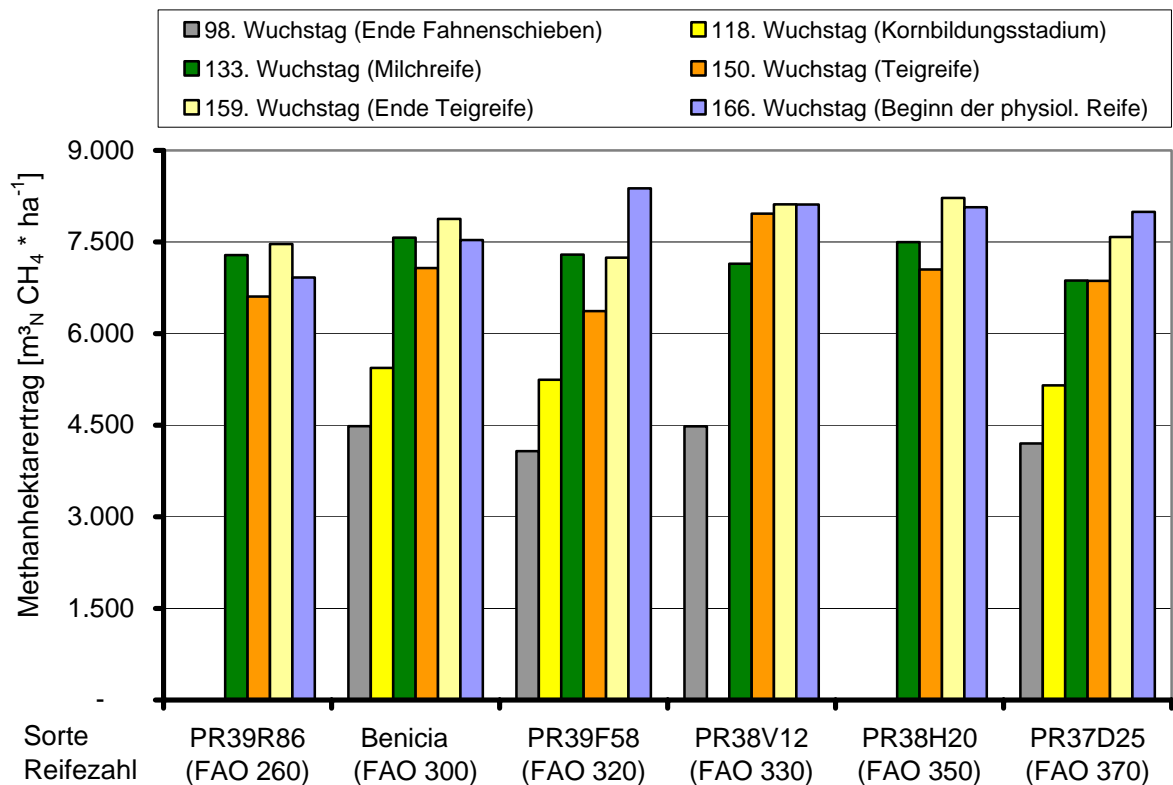
## 9. Einfluss des Erntezeitpunktes

Neben der Maissorte und dem Standort nimmt der Zeitpunkt der Ernte des Mais eine wesentliche Bedeutung für den erzielbaren Methanhektarertrag ein. Wie bereits in Kapitel 8.1 und 8.2 dargestellt ist, entwickeln sich die beiden Ertragsfaktoren für Methan im Verlauf der Vegetation gegenläufig. Während der Biomasseertrag steigt, nimmt das spezifische Methanbildungsvermögen mit zunehmender Vegetationsdauer ab. Der richtige Zeitpunkt für die Ernte des Energiemaisses ist also dann gegeben, wenn der Methanhektarertrag am höchsten ist und eine gute Silierbarkeit der Biomasse gegeben ist.

Wie Abbildung 26 zeigt, ist neben dem Ertragspotential auch der optimale Erntetermin beim Mais sortenspezifisch unterschiedlich. Beispielsweise erreichten die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260) mit  $7.466 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  und die mittelfrühe Sorte Benicia (FAO 300) mit  $7.879 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  bereits bei der fünften Ernte nach 159 Wuchstagen den höchsten Methanhektarertrag. Diese beiden „früheren“ Sorten zeigten beim später durchgeführten Erntetermin (nach 166 Wuchstagen) bereits Einbußen im Methanhektarertrag:  $548 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4$  (7,3%) bei der Sorte PR39R86 und  $346 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4$  (4,4%) bei der Sorte Benicia.

Auch die beiden mittelspäten Sorten PR38V12 (FAO 330) und PR38H20 (FAO 350) erzielten bereits beim fünften Erntetermin ihre höchsten Methanerträge. Im Gegensatz zu den „frühen“ Sorten verminderte sich der Methanertrag der mittelspäten Sorten beim letzten Erntetermin aber kaum. Für die Sorten PR39F58 (FAO 320) und PR37D25 (FAO370) erwies sich der letzte Erntetermin als optimal, da sich beide Sorten gegenüber den vorhergehenden Ernten im Methanhektarertrag noch deutlich steigern konnten.

In Abbildung 26 sind die sortenspezifischen Entwicklungsverläufe im Methanhektarertrag dargestellt. Anhand der unterschiedlichen Ertragsniveaus im Verlauf der Vegetation lässt sich sehr gut ableiten, dass dem richtigen Erntezeitpunkt eine wesentliche Rolle im Hinblick auf den maximal realisierbaren Methanertrag (je Hektar und Sorte) zukommt.



**Abbildung 26: Methanhektarertrag der Maissorten in Abhängigkeit vom Erntezeitpunkt**

Der optimale Erntezeitpunkt wird also maßgeblich von der Sorte und vom Standort bestimmt. Die Ergebnisse zeigen, dass am Versuchsstandort Gaspoltshofen die späten Sorten die höheren Methanerträge erbrachten und das bei späten Ernteterminen. Das heißt, dass sich unter guten Standortbedingungen, wie es im nordöstlichen Hausruckviertel der Fall ist, spätere Sorten besser eignen, da diese ihr Biomassebildungsvermögen durch eine entsprechend lange Wuchsdauer (>160 Tage) besser ausnutzen können. Im Falle einer zu frühen Ernte können aber auch die spätreifen Sorten (speziell die Sorte PR37D25) ihr Biomassebildungspotential nicht ausschöpfen. Im Gegensatz dazu zeigten die frühen Sorten (speziell PR39R86) in Kombination mit einem späten Erntetermin schon Ertragseinbußen infolge einer verminderter spezifischer Methanausbeute oder möglichen Bruch- und Bröckelverlusten der Maispflanzen. Die Ertragsminderungen hielten sich zwar in Grenzen, was darauf zurückzuführen ist, dass der letzte Erntetermin nach 167 Wuchstagen noch relativ knapp nach den vorhergehenden Ernteterminen lag. Eine noch spätere Ernte (z.B. nach 190 Wuchstagen) hätte schon eine deutlichere Minderung des Methanertrages erwarten lassen.

## **D. SCHLUSSFOLGERUNGEN UND ZUSAMMENFASSUNG**

### **10. Schlussfolgerungen**

Auf Basis der Angaben in der Literatur und den nun vorliegenden Untersuchungsergebnissen können nun folgende Empfehlungen für die Biogaserzeugung aus Mais abgeleitet werden:

Auf guten Maisbaustandorten, wie es in Gaspolthofen (nordöstliches Hausruckviertel) der Fall ist, eignen sich mittelspäte und spätreife Maissorten am besten für die Energiegewinnung in Form von Biogas. Diese späteren Sorten mit höheren Reifezahlen (FAO 320 bis 370) nutzen im Vergleich zu den frühen Sorten die Vegetationszeit besser für die Ertragsbildung aus. Unter den Standort- und Wachstumsbedingungen im Hausruckviertel können die späteren Sorten Trockenmasseerträge von über 25 t je Hektar erreichen.

Für den Methanertrag je Hektar ist neben dem Biomasseertrag auch das spezifische Methanbildungsvermögen der Maissorten entscheidend. Die Methanausbeute je kg oTS wird maßgeblich von den Inhaltsstoffgehaltswerten bestimmt. Vor allem Sorten mit einem vergleichsweise hohen Rohprotein- und Rohfettgehalt sind durch hohe spezifische Methanausbeuten gekennzeichnet, die mithilfe des Methanenergiewertmodells berechnet werden können. Da das spezifische Methanbildungsvermögen mit zunehmendem Trockensubstanzgehalt in der Gesamtpflanze sinkt, ist Zeitpunkt der Ernte von entscheidender Bedeutung. Der optimale Erntezeitpunkt ist dann gegeben, wenn der maximale Methanhektarertrag erreicht wird und der Mais gut silierfähig ist. Bezogen auf den Standort in Oberösterreich liegt der optimale Erntezeitpunkt bei Ende September/Anfang Oktober, nach ca. 160 Wuchstagen im Stadium „Ende der Teigreife“. Die frühreifen bzw. mittelfrühen Sorten erreichen das Methanhektarertragsmaximum durch eine fortgeschrittene Abreife etwas früher, die mittelspäten und vor allem spätreifen Sorten entsprechend einer verzögerten Abreife erst etwas später. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Ernte bei einem Trockensubstanzgehalt von 35% optimal ist, da hier sowohl die Silierfähigkeit gewährleistet ist und auch hohe Methanerträge je Hektar erzielt werden. Da die untersuchten Maissorten nur bis zu einem durchschnittlichen Trockensubstanzgehalt von knapp über 35% beprobt wurden, ist es schwierig zu

beurteilen, wann der maximale Methanertrag erreicht wird. Entsprechend dem Verlauf der Regressionskurve wird der maximale Methanertrag je Hektar erst bei höheren Trockensubstanzgehalten erreicht werden (vgl. auch aktuelle Untersuchungen von AMON et al. (2007d, s.p.)). Im Allgemeinen sind die späteren Sorten ertragreicher und erreichen dabei Methanerträge von über  $8.300 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$ .

Bei der Nutzung von Energiemais wird in den meisten Fällen die gesamte Pflanze geerntet und zur Biogasgewinnung herangezogen. Aber auch eine separate Nutzung der einzelnen Maispflanzenteile ist möglich. Speziell der Maiskolben bzw. die Körner eignen sich für mehrere unterschiedliche Verwendungszwecke.

Die Untersuchungen bezüglich des Methanbildungsvermögens einzelner Pflanzenteile zeigen, dass die Methanerträge aus der Restpflanze bei den spätreifen Sorten deutlich höher sind als bei den frühreifen Sorten. Die spätreifen Sorten nutzen die Vegetationszeit besser für die Ertragbildung aus und können so Restpflanzentrockenmasseerträge von rund 10,5 t pro Hektar sowie Methanhektarerträge von über  $3.000 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  aus den Restpflanzen erreichen. Diese Ergebnisse zeigen, dass eine Koppelnutzung von Mais unter der Voraussetzung geeigneter Ernteverfahren interessant sein kann. Auf der einen Seite können die „wertvollen“ Maispflanzenteile (Kolben bzw. Körner) als Nahrungs- bzw. Futtermittel, oder als industrieller Rohstoff (z.B. Stärke- oder Ethanolgewinnung) eingesetzt werden. Auf der anderen Seite können die „weniger wertvollen“ Maisrestpflanzen in Biogasanlagen vergoren werden und dabei beachtliche Methanerträge erzielen.

Eine alleinige Vergärung von Maiskolben (Maiskörner) ohne die Restpflanzen ist wenig sinnvoll und findet in der Praxis auch kaum Anwendung. Wie die Untersuchungen zeigen, können bei der Vergärung von Maiskolben zwar Methanerträge bis knapp  $5.500 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erreicht werden, die aber im Vergleich zur Gesamtpflanzennutzung doch deutlich geringer sind. Die höheren Methanerträge aus dem Kolben werden von mittelspäten Sorten erreicht, da diese sowohl durch eine hohe Kolbenbiomasse wie auch durch eine gute Inhaltsstoffzusammensetzung (gute Abreife) gekennzeichnet sind.



## 11. Weiterführende Arbeiten

Der Energiepflanzenanbau ist ein noch relativ neues Thema in der Landwirtschaft, das bis vor wenigen Jahren noch wenig erforscht und kaum in die Praxis umgesetzt wurde. Erst durch das Ökostromgesetz 2002 wurden neue Perspektiven für die Biogasgewinnung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen geschaffen.

Der Energiepflanzenanbau stellt neue Anforderungen an Pflanzenzüchter, Landwirte und Biogasanlagenbetreiber. Nachfolgend sind einige Themenbereiche kurz beschrieben, die zukünftig noch weiteren Untersuchungen bedürfen, damit die Ertragsfaktoren in der Biogasproduktion optimiert werden können.

Die meisten Biogasanlagen vergären Rohstoffe landwirtschaftlicher Herkunft, wie Wirtschaftsdünger und Energiepflanzen. Mais ist die am häufigsten eingesetzte Energiepflanze. Infolge der zunehmenden Bedeutung der energetischen Nutzung von Mais haben Pflanzenzüchter verschiedener Zuchtorganisationen in den vergangenen Jahren verschiedene Zuchtstrategien für spezialisierten Energiemais entwickelt. Diese neuen „Maishybriden“ mit hohem genetischem Ertragspotential müssen nun auf verschiedenen Standorten unter unterschiedlichen Produktionsbedingungen (mehrere Jahre, unterschiedliche Bestandesdichten und Düngung, usw.) erprobt werden, damit die Ertragssicherheit dieser Sorten unter variierenden natürlichen Gegebenheiten besser abgeschätzt werden kann. Für Standorte mit ungleichen Produktionsbedingungen werden sich verschiedene Maissortentypen als optimal erweisen.

Energiemais sowie andere Energiepflanzen können am besten zur Energiegewinnung genutzt werden, wenn sie in nachhaltige, standortangepasste und ökologisch ausgewogene Fruchtfolgen integriert werden (vgl. AMON et al., 2007a, s.p.). Eine nachhaltige Fruchtfolge bzw. Pflanzenkombination richtet sich nach den klimatischen Bedingungen und den Eigenschaften des Bodens. Da die Pflanzenstandorte sehr verschieden sind, ist es wichtig, dass Untersuchungen bezüglich der Gestaltung optimaler Energiepflanzenfruchtfolgen in mehreren Produktionsgebieten durchgeführt werden, damit Empfehlungen für regional angepasste Fruchtfolgen gegeben werden können.

Die Pflanzenzüchter sind aber auch weiterhin gefordert, die geeigneten Energiepflanzenarten hinsichtlich des Biomassertrages und der Inhaltsstoffzusammensetzung zu optimieren. Vor allem im Bereich der Inhaltsstoffzusammensetzung ist es wichtig, ein möglichst „Bakterien- adäquates“ Nährstoffverhältnis zu schaffen, um hohe Methanausbeuten gewährleisten zu können.

Bei einer gekoppelten Nutzung von vegetativen und generativen Maispflanzenteilen muss das Ziel sein, dass einerseits die Maiskolben/ Maiskörner gut ausreifen können (wichtig für Stärke- bzw. Futterenergieerträge), und andererseits auch die Restpflanzen noch in gut vergärbarem Zustand (mit entsprechendem Energiegehalt) erhalten sind. Auch hier gilt es, Sorten zu züchten, die zu entsprechenden Erntezeiten die Voraussetzungen für beide Nutzungsschienen erfüllen können. Optimierungsbedarf bei der Koppelnutzung gibt es auch noch in den Bereichen Ernte, Konservierung (und Aufbereitung) der Restpflanzenbiomasse.

Energiepflanzensubstrate enthalten auch einen mehr oder weniger hohen Anteil an schwer- bzw. kaum löslichen Strukturkohlenhydraten (Rohfaserbestandteile, vor allem Lignin). Neben einer züchterischen Optimierung der Sorten sind hier vor allem auch verfahrenstechnische Aspekte in Betracht zu ziehen. Es gilt dabei festzustellen, ob sich eine Vorbehandlung bzw. Aufbereitung des Substrates positiv auf die Methanausbeuten der Energiepflanzen auswirkt und ob diese zusätzlichen Aufwendungen betriebswirtschaftlich auch sinnvoll sind.

Eine funktionierende Biogaserzeugung muss sich natürlich auch aus ökonomischer Sicht als nachhaltig erweisen. Zur Feststellung der Wirtschaftlichkeit bedarf es an vielseitig angelegten betriebswirtschaftlichen Kalkulationen, bei denen die Erlöse bzw. Erträge erhoben und den Kosten bzw. Aufwendungen gegenübergestellt werden. Durch Kostenkalkulationen sowie Deckungsbeitragsberechnungen (sowohl von einzelnen Kulturen wie auch von Fruchtfolgen) kann die Wirtschaftlichkeit einzelner Substrate sowie ganzer Biogasanlagen beurteilt werden. In Anschluss an derartige Berechnungen kann mittels Sensitivitätsanalysen gezeigt werden, wie sich die Wirtschaftlichkeitsparameter (z.B. Deckungsbeiträge, Erzeugungskosten je m<sup>3</sup> Methan) unter variierenden Bedingungen (wie z.B. steigende oder sinkende Rohstoffkosten) verändern würden.

## 12. Zusammenfassung

Erneuerbare Energiequellen gewinnen in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung. Steigende Energiepreise infolge des weltweit zunehmenden Energiebedarfes, wachsendes Bewusstsein über die begrenzte Nutzbarkeit fossiler Energieressourcen sowie die zunehmende Klima- und Umweltproblematik forcieren die Forderungen nach erneuerbaren Energiequellen. Vor allem die Energiegewinnung durch die Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen hat in Österreich (und auch in anderen europäischen Ländern) besonders stark an Bedeutung gewonnen. In Österreich wurden durch das Ökostromgesetz 2002 bzw. durch die Ökostromgesetznovelle 2006 neue Perspektiven für eine zukunftsorientierte Biogaserzeugung aus landwirtschaftlichen Rohstoffen geschaffen.

Während Biogasanlagen in den Anfangsstadien der „Biogasrevolution“ hauptsächlich mit Wirtschaftsdüngern betrieben wurden, werden mittlerweile schon überwiegend Energiepflanzen zur Biogasgewinnung eingesetzt. Derzeit beträgt der Energiepflanzenanteil bereits 63% des Substratinputs, wobei der Mais in Form von Maissilage mit 85,5% die am häufigsten eingesetzte Energiepflanze ist (vgl. HOPFNER-SIXT, 2007, s.p.). Mais hat als Rohstoff deshalb die größte Bedeutung, da er als C<sub>4</sub>-Pflanze das höchste Ertragspotential unter den heimischen Kulturarten besitzt. Energiemais soll möglichst viel Biomasse über die Gesamtpflanze bilden und dabei ein hohes spezifisches Methanbildungsvermögen erreichen.

Das wesentliche Ziel dieser Arbeit war es, festzustellen, welche Maissortentypen sich besonders zur Biogasproduktion eignen. Die Eignung der einzelnen Maissorten zur Biogaserzeugung wurde anhand der Kriterien Biomasseertrag und spezifisches Methanbildungsvermögen ermittelt, die zusammen im erzielbaren Methanhektarertrag resultierten. Da neben der Sorte und dem Standort auch dem Zeitpunkt der Ernte eine wesentliche Rolle zukommt, wurde weiters untersucht, in welchem Reifestadium bzw. zu welchem Erntetermin die Maissorten am meisten Methanertrag erbringen. Neben der Erhebung der Gesamtpflanzenpotentiale der Sorten war es ein weiteres Ziel, die Methanertragspotentiale der einzelnen Maispflanzenteile festzustellen, da eine gekoppelte Nutzung vegetativer und generativer Teile von ein und derselben Maispflanze zukünftig an Bedeutung für eine nachhaltige Biogaserzeugung gewinnen wird (z.B. Nutzung der

Maiskörner für Lebensmittel, zur Stärkegewinnung, zur Biotreibstoffherzeugung, oder als Tierfutter und Verwendung der Restpflanze für die Biogaserzeugung).

Die Untersuchungen wurden am Standort Gaspoltshofen, einem guten Maisbaustandort im nordöstlichen Hausruckviertel (Oberösterreich), durchgeführt und umfasste sechs Maissorten mit unterschiedlichem Abreifeverhalten: die frühreife Sorte PR39R86 (FAO 260), die mittelfrühe Sorte Benicia (FAO 300), die mittelspäten Sorten PR39F58 (FAO 320), PR38V12 (FAO 330), PR38H20 (FAO 350) und die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370). Zwischen dem 98. Wuchstag (Ende des Fahnenschiebestadiums) und dem 166. Wuchstag (Beginn der physiologischen Reife) wurde an sechs Ernteterminen das Biomassebildungspotential der Sorten erhoben sowie die Inhaltsstoffzusammensetzung der Maispflanzen analysiert, die anhand der Analysemethoden nach Weender und NIRS bestimmt wurden.

Beim Vergleich der Ergebnisse der beiden Inhaltsstoffanalysemethoden ergaben sich gute Übereinstimmungen und keine signifikanten Unterschiede. Im Verlauf der Vegetation verringern sich in den Maispflanzen die Gehaltswerte an Rohprotein, Rohfaser und Rohasche, im Gegensatz zu den steigenden Anteilen der Inhaltsstofffraktionen Rohfett und N-freie Extraktstoffe.

Eine wichtige Voraussetzung für einen hohen Methanertrag ist ein entsprechend hohes Biomassebildungspotential der Maissorten. Im Verlauf der Vegetation steigen die Biomasseerträge. Unter den gegebenen Standort- und Wachstumsbedingungen im Hausruckviertel nutzen die mittelspäten und spätreifen Sorten die Vegetationslänge besser für die Ertragsbildung aus. Den höchsten Biomasseertrag erreichte die Sorte PR37D25 (FAO 370) mit über 25 t Trockenmasse je Hektar, während die mittelspäten Sorten (FAO 320 bis 350) immerhin Trockenmasseerträge zwischen 23 und 24 t je Hektar erzielten. Die frühreiferen Sorten hingegen konnten sich gegen Ende der Vegetationszeit im Biomasseertrag nicht mehr steigern. Im Gegenteil sogar, infolge der zunehmender Abreife wurden fallende Biomasseerträge festgestellt, hervorgerufen durch Bruch- bzw. Atmungsverluste. Bei der Sorte PR39R86 (FAO 260) reduzierte sich bei der letzten Ernte der Trockenmasseertrag bereits um ca. 1,5 t auf rund 21,7 t je Hektar.

Neben dem Biomassebildungspotential ist vor allem auch ein hohes spezifisches Methanbildungsvermögen wichtig. Das spezifische Methanbildungsvermögen wurde mit dem Methanenergiewertmodell anhand der Inhaltsstoffzusammensetzungen der Maisproben berechnet. Mit zunehmender Vegetationsentwicklung nehmen die spezifischen Methanausbeuten der Maispflanzen ab, resultierend aus den variierenden Gehaltswerten der Inhaltsstofffraktionen und den komplexer werdenden Rohfaserstrukturen („Lignin-Cellulose-Komplex“). Bei der ersten Ernte nach 98 Wuchstagen lag das spezifische Methanbildungsvermögen noch bei rund 370 bis 380  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ , während bei den späteren Ernten nur mehr Werte zwischen 325 und 350  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$  erreicht wurden. Die besseren Methanausbeuten gegen Ende der Vegetation erzielten die mittelspäten Sorten (FAO 320 bis 350) mit rund 350  $\text{l}_N \text{CH}_4 * \text{kg oTS}^{-1}$ . Einen nicht unerheblichen Einfluss auf die sinkenden Methanausbeuten hat auch das weiter- werdende C:N-Verhältnis. Lag das C:N-Verhältnis in den Maispflanzen bei der ersten Ernte noch bei rund 34:1, so erweiterte sich das C:N-Verhältnis mit zunehmender Abreife auf durchschnittlich 44:1 (beim letzten Erntetermin).

Der Biomasseertrag in Kombination mit dem spezifischen Methanbildungsvermögen ergibt den Methanhektarertrag. Der optimale Erntezeitpunkt von Energiemais ist dann gegeben, wenn der maximale Methanhektarertrag erreicht wird und die Biomasse silierfähig ist. Die höchsten Methanerträge erreichten die mittelspäten und spätreifen Maissorten (FAO 320 bis 370) mit Werten von über 8.000  $\text{m}^3_N \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$ . Am ertragreichsten war die Sorte PR39F58 (FAO 320) mit einem Methanhektarertrag 8.378  $\text{m}^3_N \text{CH}_4 * \text{ha}^{-1}$  beim letzten Erntetermin. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass eine Ernte bei einem Trockensubstanzgehalt von 35% optimal ist, da hier sowohl die Silierfähigkeit gewährleistet ist und auch hohe Methanerträge je Hektar erzielt werden. Entsprechend dem Verlauf der Regressionskurve wird der maximale Methanertrag je Hektar erst bei etwas höheren Trockensubstanzgehalten erreicht werden (vgl. aktuelle Untersuchungsergebnisse von AMON et al., 2007d, s.p.).

Im Zusammenhang mit den Entwicklungsverläufen der Methanhektarerträge lag 2006 der optimale Erntezeitpunkt am Standort Oberösterreich bei Ende September/ Anfang Oktober, nach ca. 160 Wuchstagen im Stadium „Ende der Teigreife“. Im Fall der frühreifen bzw. mittelfrühen Sorten wird das Methanhektarertragsmaximum schon etwas früher erreicht. Bei den spätreifen Sorten wird der maximale Methanhektarertrag erst später erreicht.

Beispielsweise zeigte die spätreife Sorte PR37D25 (FAO 370) bis zur letzten durchgeführten Ernte laufend steigende Methanhektarerträge. Daraus lässt sich schließen, dass bei spätreifen Sorten der optimale Erntetermin sogar weiter in Richtung physiologische Reife der Maispflanzen liegt.

Die Untersuchungen bezüglich des Methanbildungsvermögens einzelner Pflanzenteile zeigten, dass die Methanerträge aus den Restpflanzen spätreifer Sorten deutlich höher waren als die der frühreifen Sorten. Die spätreifen Sorten nutzen offensichtlich die Vegetationszeit länger für die Ertragbildung aus und können somit Restpflanzentrockenmasseerträge bis zu 10,5 t pro Hektar sowie Methanhektarerträge von über  $3.000 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  aus den Restpflanzen erreichen (am Beispiel der Sorte PR37D25 (FAO 370)). Frühreife Sorten, wie die Sorte PR39R86 (FAO 260), eignen sich weniger zur Restpflanzennutzung, da sie nur rund 7 t Restpflanzentrockenmasse und auch nur knapp über  $2.000 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erreichen. Die spezifischen Methanausbeuten aus den Restpflanzen liegen zwischen 312 bis 319  $\text{l}_\text{N} \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ . Die Ergebnisse zeigen, dass die Restpflanzenpotentiale speziell bei den spätreifen Sorten beachtlich sind, und dass unter der Voraussetzung geeigneter Ernteverfahren die Biogasgewinnung aus Restpflanzen an Bedeutung gewinnen wird.

Neben den Gaserträgen aus der Restpflanze wurde auch das Potential der Maiskolben ermittelt. Bei der Vergärung von Maiskolben können zwar Methanerträge bis knapp  $5.500 \text{ m}^3_{\text{N}} \text{ CH}_4 * \text{ ha}^{-1}$  erreicht werden, die aber im Vergleich zur Gesamtpflanzennutzung doch deutlich geringer sind. Die höheren Methanerträge aus dem Kolben werden von mittelspäten Sorten (FAO 320 bis 350) erreicht, da diese sowohl durch eine hohe Kolbenbiomasse wie auch durch eine gute Inhaltstoffzusammensetzung (gute Abreife) gekennzeichnet sind. Die Methanausbeuten aus Maiskolben schwanken je nach Sorte zwischen 335 und 377  $\text{l}_\text{N} \text{ CH}_4 * \text{ kg oTS}^{-1}$ .

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass unter den guten Standort- und Wachstumsbedingungen Oberösterreichs vor allem mittelspäte und spätreife Maissorten am ertragreichsten sind, und sich daher vor allem diese Sorten auch am besten zur Biogaserzeugung eignen. Eine nachhaltige Energieerzeugung aus Mais ist aber nur dann sichergestellt, wenn Energiemais in standortangepasste und ökologisch ausgewogene Fruchtfolgesysteme integriert wird. Solche Systeme zielen nicht nur auf die Maximierung einzelner Kulturarten, sondern auf die Optimierung aller integrierten Pflanzenarten ab.

### 13. Literatur- und Quellenverzeichnis

AMID, A. (2004): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss des Ernteverfahrens und des Erntezeitpunktes auf den Methanertrag. Wien: Diplomarbeit Universität für Bodenkultur Wien.

AMON, TH., BAUER, A., KRYOVORUCHKO, V., LYSON, D., AMON, B., MACHMÜLLER, A., BODIROZA, V. (2007a): Biogaserzeugung aus Energiemais. Wien.

AMON, TH., HOPFNER-SIXT, K., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BODIROZA, V., RAMUSCH, M., HREBEK, R., FRIEDEL, J.K., ZOLLITSCH, W., MAYER K. (2007b): Energiepflanzen: Erntezeitpunkt bestimmt Gasausbeute. In: top agrar 2007 – Jahrbuch neue Energie- Für Investoren und Betreiber. Hrsg.: top agrar – Das Magazin für moderne Landwirtschaft. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH. 28 – 32.

AMON, TH., MACHMÜLLER, A., KRYOVORUCHKO, V., MILOVANOVIC, D., HREBEK, R., EDER, M. STÜRMER, B. (2007c): Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrübe, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark. Forschungsprojekt Nr. 1421. Universität für Bodenkultur. Wien.

AMON, TH., LEONHARTSBERGER, CH., BAUER, A., HOPFNER-SIXT, K., LYSEN, D., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BODIROZA, V., MILOVANOVIC, D., SIMIC, V., HREBEK, R., WAGENTRISTL., H. (2007d): Methanertragspotential verschiedener Energiepflanzen – Aktueller Stand. Vortrag anlässlich des 2. Einbecker Energie Kolloquiums, 6.11.2007, Einbeck. In: [http://forschung.boku.ac.at/fis/suche.person\\_publicationen](http://forschung.boku.ac.at/fis/suche.person_publicationen) (29.11.2007).

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., HOPFNER-SIXT, K., AMON, B., BODIROZA, V., RAMUSCH, M., HREBEK, R., FRIEDEL, J.K., ZOLLITSCH, W., BOXBERGER, J. (2006a): Biogaserzeugung aus Energiepflanzen. In: Ländlicher Raum, 2006, 1-25. In: <http://www.laendlicher-raum.at/article/articleview/47327/1/10407> (Oktober 2006).

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BODIROZA, V., ZOLLITSCH, W., BOXBERGER, J. (2006b): Biogaserzeugung aus Energiemais. In: Landtechnik Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 2, 86-87.

AMON, TH., AMON, B., KRYOVORUCHKO, V., MACHMÜLLER, A., HOPFNER-SIXT, K., BODIROZA, V., HREBEK, R., FRIEDEL, J.K., PÖTSCH, E., WAGENTRISTL, H., SCHREINER, M., ZOLLITSCH, W. (2006c): Methane production through anaerobic digestion of various energy crops grown in sustainable crop rotations. In: Bioresource Technology, (98/2007), 3204 – 3212.

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BODIROZA, V., ZOLLITSCH, W., BOXBERGER, J. (2005): Biogaserzeugung aus Grünlandbiomasse im Alpenraum. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 60, (6/2005), 336 – 337.

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., REINHOLD, G., OECHSNER, H., SCHWAB, M., WEILAND, P., LINKE B. (2004a): Biogaserträge von Energiepflanzen und Wirtschaftsdüngern – Laborergebnisse. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. KTBL- Schrift 420. Darmstadt: KTBL. 46-61.

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BUGA, S., AMID, A., ZOLLITSCH, W., MAYER, K., PÖTSCH, E. (2004b): Biogaserträge aus landwirtschaftlichen Gärgütern. Tagungsbericht: 10. Alpenländisches Expertenforum, 18. – 19. März 2004, Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein.

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., BUGA, S., AMID, A., ZOLLITSCH, W., MAYER, K., PÖTSCH, E. (2003a): Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Klee gras. Endbericht Juli 2003. Wien.

AMON, TH., KRYOVORUCHKO, V., AMON, B., ZOLLITSCH, W., MAYER, K., BUGA, S., AMID, A. (2003b): Biogaserzeugung aus Mais – Einfluss der Inhaltsstoffe auf das spezifische Methanbildungsvermögen von früh- und spätreifen Maissorten. Bericht über die 54. Tagung der Vereinigung der Pflanzenzüchter und Saatgutkaufleute Österreichs. Bundesanstalt für alpenländische Landwirtschaft Gumpenstein . 25. – 27 November 2003.

AWI – BUNDESANSTALT FÜR AGRARWIRTSCHAFT (2007): Landwirtschaftliche Produktionsgebiete. In: [http://www.awi.bmlf.gv.at/datenpool/haupt\\_und\\_klein\\_karte.html](http://www.awi.bmlf.gv.at/datenpool/haupt_und_klein_karte.html) (26.11.2007).

BÄCK, M. (2007a): Mündliche Mitteilung vom 26.04.2007. Landwirtschaftskammer Oberösterreich.



BÄCK, M. (2007b): Mündliche Mitteilung vom 07.11.2007. Landwirtschaftskammer Oberösterreich.

BERGER, L., GRUBER, P., HUBER, E., PANZENBÖCK, J., REHM, F., SCHNABEL, A. (1996): Pflanzenbau 2 – Acker – Grünland. 2. korrigierte Auflage. Graz: Leopold Stocker Verlag.

BLV VERLAGSGESELLSCHAFT MBH (1994): Tierische Erzeugung. Die Landwirtschaft Band 2. Zehnte völlig neu- bearbeitete Auflage. Landwirtschaftsverlag Münster- Hilstrup. 21- 23.

BMLFUW - BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2006a): Nationaler Biomasseaktionsplan für Österreich. Begutachtungsentwurf. Wien: Selbstverlag.

BMLFUW - BUNDESMINISTERIUM FÜR LAND- UND FORSTWIRTSCHAFT, UMWELT UND WASSERWIRTSCHAFT (2006b): Grüner Bericht 2005 – Bericht über die Situation der österreichischen Land- und Forstwirtschaft im Jahr 2005. Wien: Selbstverlag.

CZEPUCK, K., OECHSNER, H., SCHUHMACHER, B., LEMMER, A. (2006): Biogasausbeuten im Labor im Vergleich zur rechnerischen Abschätzung. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 2, 82-83.

DEKALB (2007): Saatbeet, Bodenbearbeitung, Aussattermin und Temperaturansprüche von Mais. In: [http://www.dekalb.de/mais/mais\\_saatbett.html](http://www.dekalb.de/mais/mais_saatbett.html) (03.12.2007).

DMK- Deutsches Maiskomitee e.V. (2007): Reifebestimmung. In: [http://www.maiskomitee.de/fb\\_fachinfo/02\\_03\\_01.htm](http://www.maiskomitee.de/fb_fachinfo/02_03_01.htm) (10.04.2007).

DÖHLER, H., NIEBAUM, A., JÄGER, P., KEYMER, U. (2004): Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. KTBL- Schrift 420. Darmstadt: KTBL. 101- 120.

E-CONTROL (2006): Bericht über die Ökostromentwicklung und die fossile Kraft- Wärme- Kopplung in Österreich. Wien.

EDER, B., EDER, J., PAPST, CH. (2004): Produktionstechnik: Mais für Biogasanlagen. In: <http://www.lfl.bayern.de/ipz/mais/11480/Biogas2004.pdf> (24.04.2007).

EDER, B. und SCHULZ H (2006): Biogas- Praxis; Grundlagen, Planung, Anlagenbau, Beispiele, Wirtschaftlichkeit. 3. vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Staufen bei Freiburg: ökobuch- Verlag.

EDER, J., PAPST, CH., EDER, B., KRÜTZFELDT, B., OECHSNER, H., MUKENGELE, M. (2006): Aktuelle Ergebnisse aus dem Energiepflanzenanbau – Leistungspotentiale, Pflanzenbau und Fruchtfolgen. Kurzfassung Referate. In: [http://www.kws-energie.de/media/downloads/22/aktuelle\\_ergebnisse.pdf](http://www.kws-energie.de/media/downloads/22/aktuelle_ergebnisse.pdf) (12.10.2006).

HOPFNER-SIXT, K., AMON, TH., BAUER, A., BODIROZA, V., MILOVANOVIC, D., AMON, B. (2007): Analyse und Optimierung neuer Biogasanlagen – ausgewählte Ergebnisse. Unveröffentlichte Präsentation. Universität für Bodenkultur Wien.

HOPFNER-SIXT, K (2005): Analyse von Leistungsfähigkeit, Wirtschaftlichkeit und Entwicklungsperspektiven landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Dissertation Universität für Bodenkultur Wien.

HOPFNER-SIXT, K., AMON, T., BODIROZA, V., KRYVORUCHKO, V., MILOVANOVIC, D., ZOLLITSCH, W., BOXBERGER, J. (2006a): Stand der Technik österreichischer Biogasanlagen. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 1, 30 - 31.

HOPFNER-SIXT, K., AMON, T., BODIROZA, V., KRYVORUCHKO, V., MILOVANOVIC, D., ZOLLITSCH, W., BOXBERGER, J. (2006b): Biogaserzeugung aus agrarischen Rohstoffen. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 3, 148-149.

KARPENSTEIN- MACHAN M. (2005): Energiepflanzenbau für Biogasanlagenbetreiber. Frankfurt am Main: DLG-Verlag.

KLOSTERMANN, I. (2006): Einfluss von produktionstechnischen Maßnahmen auf das Biomasse- und Biogaspotential von Energiemais. In: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenwissenschaften, Band 18. Kiel: Verlag Schmidt & Klaunig KG. 206-207.

KRUSE, S. (2006): Charakterisierung von Silomaisgenotypen anhand futterwertbestimmender Parameter und deren Modellierung. In: Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenwissenschaften, Band 18. Kiel: Verlag Schmidt & Klaunig KG. 138-141.

KRYVORUCHKO, V. (2004): Minderung klimarelevanter Emissionen aus der landwirtschaftlichen Milchviehhaltung. Dissertation Universität für Bodenkultur. Wien.

KTBL – KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN (2006): Energiepflanzen. Darmstadt: Selbstverlag. 95 – 119.

KTBL – KURATORIUM FÜR TECHNIK UND BAUWESEN (2005): Gasausbeute in landwirtschaftlichen Biogasanlagen. Darmstadt: Selbstverlag.

KUSCH, S., OECHSNER, H., JUNGBLUTH, T. (2005): Vergärung landwirtschaftlicher Substrate in diskontinuierlichen Feststofffermentern. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 60, 4, 214-215.

KWS SAAT AG (2007a): Bestandteile einer Maispflanze. In: <http://www.kws.de/go/id/bgg/b/> (06.03.2007).

KWS SAAT AG (2007b): Die NIRS Methode. In: <http://www.kws.de/go/id/bgip/> (06.03.2007).

KWS SAAT AG (2006): Anbauplaner Mais. In: <http://www.kws.de> (06.03.2007).

LUCKE, I. (2002): Biogas – Die regenerative Energie in Zukunft? Diplomarbeit: Hochschule Vechta. Oldenburg. In: <http://www.carmen-ev.de/dt/hintergrund/biogas/DiplomarbeitBiogas.pdf> (30.10.2007).

MICHEL, V. (2007): Silomais für Biogasanlagen (Energimais) - Sortenwahl. In: [http://www.agrarnet-mv.de/var/plain\\_site/storage/original/application/1d98fe630ad45d408b92078ed53d6f4e.pdf](http://www.agrarnet-mv.de/var/plain_site/storage/original/application/1d98fe630ad45d408b92078ed53d6f4e.pdf) (17.04.2006).

MUKENGELE, M., BRULE, M., OECHSNER, H. (2006): Einfluss der Substratmischung aus Energiepflanzen auf Abbaukinetik und Methanertrag. In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 1, 26-27.

OECHSNER, H. (2006): Wie lässt sich die Biogasausbeute optimieren. Kurzfassung Referat. In: <http://www.kws-energie.de/media/downloads/22/biogas.pdf> (12.10.2006).

ÖSTERREICHISCHE HAGELVERSICHERUNG (2007): Wetterservice. In: <http://www.hagel.at/site/index.cfm> (03.12.2007).

SCHERER, P.A. (2001): Mikrobiologie der Vergärung von festen Abfallstoffen. In: Biologische Behandlung organischer Abfälle. Hrsg.: KÄMPFER, P und WEIBENFELS, W.D. Berlin: Springer-Verlag Berlin Heidelberg New York. 45-48.

SCHMIDT, W. (2005): Maiszüchtung für die Energieerzeugung. Vortrag anlässlich der Wissenschaftlichen Tagung des Dachverbandes Agrarforschung (DAF). Braunschweig: 26.-27.10.2005.

SCHUHMACHER, B., BÖHMEL, C., OECHSNER, H. (2006): Welchen Energiemais wann ernten für die Biogasgewinnung? In: Landtechnik, Fachzeitschrift für Agrartechnik und ländliches Bauen, 61, 2, 84-85.

SIMON, R. UND SCHWANHÄUSER, M. (2004): Trends bei Biogasblockheizkraftwerken – neue Verfahren und Techniken der Gasverwertung. In: Die Landwirtschaft als Energieerzeuger. KTBL- Schrift 420. Darmstadt: KTBL. 78-87.

STEINMÜLLER, H. (2007): Mündliche Mitteilung vom 31.10.2007. Energieinstitut an der Johannes Kepler Universität Linz

STMUGV – BAYERISCHES STAATMINISTERIUM FÜR UMWELT, GESUNDHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ (2004): Biogashandbuch Bayern. München: Offsetdruck – Christian Gerber GmbH.

VDI – Verein deutsche Ingenieure (2006): VDI- Richtlinien: Vergärung organischer Stoffe – Stoffcharakterisierung, Probenahme, Stoffdatenerhebung, Gärversuche.

WALLA, CH. (2001): Wirtschaftlichkeit der Biogasproduktion auf Stilllegungsflächen. Diplomarbeit Universität für Bodenkultur. Wien.

WALLA, CH. (2006): Wirtschaftlichkeit von Biogasanlagen. Dissertation Universität für Bodenkultur. Wien.

Walla, Ch., Hopfner- Sixt K., Amon, Th., Schneeberger, W. (2006): Ökonomisches Monitoring von Biogasanlagen in Österreich. Agrarische Rundschau 6/2006. In: [http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/\\_/H73/H733/pub/Biogas/2006\\_Kosten\\_Biogasanlagen\\_Walla\\_et\\_al.pdf](http://www.wiso.boku.ac.at/fileadmin/_/H73/H733/pub/Biogas/2006_Kosten_Biogasanlagen_Walla_et_al.pdf) (12.01.2006).

WELLINGER, A., EDELMANN, W., FAVRE, R., SEILER, B., WOSCHITZ, D. (1984): Biogas Handbuch, Grundlagen – Planung – Betrieb landwirtschaftlicher Biogasanlagen. Aarau: Verlag Wirz AG.

WOLFSBERGER, A., BEISTEINER, S., HOLUBAR, P. (2005): Modelling the decomposition of energy crops in anaerobic digestion. Bericht über die 14<sup>th</sup> European Biomass Conference, 17.-21.10.2005, Paris, France. 1243 - 1246.

ZAMG – ZENTRALE ANSTALT FÜR METEROLOGIE UND GEODYNAMIK (2007a): Klimadaten vom Standort Gallspach aus dem Jahr 2006. Schriftliche Mitteilung (05.12.2007).

ZAMG – ZENTRALE ANSTALT FÜR METEROLOGIE UND GEODYNAMIK (2007b): Klimadaten von Österreich 1971 – 2000. In: [http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten\\_oesterreich\\_1971\\_frame1.htm](http://www.zamg.ac.at/fix/klima/oe71-00/klima2000/klimadaten_oesterreich_1971_frame1.htm)(05.12.2007).

## 14. Anhang

Auswertungsergebnisse im Gesamtüberblick																	
Sorte	Ernte-termin	TS (% FM)	oTS (%FM)	XA (% TM)	XF (% TM)	XP (% TM)	XL (% TM)	XX (% TM)	Stärke (% TM)	GE (MJ/kg TS)	GE (MJ/kg oTS)	CH <sub>4</sub> - Ausbeute [l <sub>N</sub> *kg oTS <sup>-1</sup> ]	Wirkungs-grad [%]	Biomasse-ertrag [kg TM*ha <sup>-1</sup> ]	Org. Biomasse [kg oTS*ha <sup>-1</sup> ]	Methan-hekarertrag [m <sub>N</sub> <sup>3</sup> CH <sub>4</sub> *ha <sup>-1</sup> ]	
PR39R86 (FAO 260)	3	28,1	26,62	5,2	22,9	7,5	3,1	61,4	16,5	19,225	20,279	375	0,74	20.483	19.418	7.286	
	4	31,11	29,80	4,2	20,2	6,2	2,5	66,8	29,5	19,112	19,950	332	0,66	20.767	19.895	6.608	
	5	34,54	33,30	3,6	17,4	6,8	2,6	69,6	32,1	19,274	19,994	335	0,67	23.150	22.316	7.466	
	6	34,31	33,04	3,7	17,6	6,9	2,4	69,3	35,8	19,674	20,430	331	0,64	21.705	20.902	6.918	
Benicia (FAO 300)	1	18,00	16,92	6	30,7	8,8	1,5	53	0,0	18,868	20,072	376	0,74	12.695	11.934	4.483	
	2	20,3	19,29	4,9	26,7	8,2	1,6	58,6	8,0	19,244	20,235	357	0,70	15.993	15.210	5.437	
	3	27,2	25,87	4,8	25,6	7	2,9	59,8	13,4	19,382	20,360	372	0,73	21.360	20.335	7.572	
	4	31,31	30,28	3,3	16,6	6,4	2,2	71,5	38,5	19,042	19,692	316	0,64	23.178	22.414	7.074	
	5	34,30	32,89	4,1	19,5	6,5	2,7	67,2	35,2	19,110	19,927	340	0,68	24.187	23.195	7.879	
	6	35,20	33,79	4	18,2	6,6	2,7	68,4	38,9	19,275	20,078	337	0,67	23.308	22.375	7.533	
PR39F58 (FAO 320)	1	18,14	17,12	5,6	30,2	8,7	1,4	54,1	0,0	18,716	19,826	370	0,74	11.660	11.007	4.076	
	2	23,4	22,31	4,5	21,8	7,7	2	63,9	20,2	19,009	19,905	345	0,69	15.922	15.205	5.244	
	3	29,9	28,61	4,2	21,9	6,9	3,1	63,9	22,3	19,277	20,123	364	0,72	20.899	20.022	7.295	
	4	31,93	30,88	3,3	16,5	6,3	2,5	71,3	31,5	19,073	19,724	322	0,65	20.455	19.780	6.367	
	5	33,31	32,28	3,1	16,5	6,7	2,1	71,6	30,1	19,117	19,728	317	0,64	23.580	22.849	7.243	
	6	36,11	34,70	3,9	16,5	7,1	3,1	69,4	31,9	19,656	20,454	349	0,68	24.977	24.003	8.378	
PR38V12 (FAO 330)	1	17,46	16,41	6	33,2	8,4	1,2	51,3	0,0	18,644	19,834	371	0,74	12.872	12.099	4.483	
	3	28,6	27,53	3,8	23,4	7,3	2,1	63,5	16,0	19,261	20,022	348	0,69	21.311	20.501	7.143	
	4	30,90	29,67	4	20,1	7,5	2,6	65,8	25,7	19,167	19,965	353	0,70	23.487	22.547	7.965	
	5	31,01	29,95	3,4	18,4	7,4	2,5	68,3	30,8	18,861	19,525	344	0,70	24.429	23.599	8.117	
	6	32,22	30,90	4,1	21,2	7	2,7	65	26,9	19,328	20,154	353	0,70	23.995	23.011	8.113	
PR38H20 (FAO 350)	3	29,1	27,85	4,2	24,4	7,6	2,5	61,3	14,3	19,419	20,270	366	0,72	21.357	20.460	7.497	
	4	30,07	28,87	4	20,6	7,2	2,5	65,7	29,1	19,239	20,040	348	0,69	21.101	20.257	7.050	
	5	34,48	33,38	3,2	16,9	7,2	2,9	69,9	32,7	18,949	19,576	347	0,71	24.458	23.675	8.221	
	6	32,82	31,51	4	21,4	7,1	2,7	64,8	32,1	19,624	20,441	355	0,69	23.696	22.748	8.070	
PR37D25 (FAO 370)	1	18,60	17,52	5,8	31,4	9	1,5	52,3	0,0	18,902	20,066	381	0,76	11.704	11.025	4.202	
	2	21,3	20,31	4,7	32,2	7,5	1,5	54,1	0,0	19,327	20,280	364	0,71	14.858	14.160	5.152	
	3	28,6	27,47	4,1	24,8	6,8	2,4	61,9	15,8	19,361	20,188	354	0,70	20.243	19.413	6.870	
	4	30,47	29,22	4,1	21	6,5	2,2	66,2	25,2	19,226	20,048	331	0,66	21.613	20.727	6.864	
	5	33,37	32,41	2,9	17,7	6,2	2,1	71	31,2	19,282	19,858	314	0,63	24.856	24.136	7.582	
	6	33,55	32,57	2,9	16,8	6,8	2,3	71,1	31,7	19,477	20,059	325	0,64	25.325	24.591	7.992	

