Biogas und Methanpotential von Zwischenfrüchten

Endbericht

April 2010

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

Dr. Alexander Bauer

DI Desanka Ilic

Mag. Christian Leonhartsberger

Ing. Günter Mair

Institut f. Landtechnik, Department Nachhaltige Agrarsysteme, Universität f. Bodenkultur Wien

universität des lebens

1. EINLEITUNG

Für das gegenständliche Projekt wurden von 18 verschiedenen Zwischenfrüchten/-fruchtmischungen die spezifische Gasausbeute, sowie die inhaltsstoffliche Zusammensetzung und die Qualität der Silageproben untersucht. Des Weiteren erfolgte eine theoretische Ermittlung der N-, P-, K-Gehalte im Gärrest über die Gehalte an N-, P- und K in den Silagen. Im folgenden Bericht sind die Methoden und Ergebnisse dargestellt.

2. VORGEHENSWEISE UND METHODEN

2.1. SUBSTRATE, SILAGEHERSTELLUNG UND PROBENLAGERUNG

Das Probenmaterial wurde vom Auftraggeber nach der Ernte ins Labor gebracht. Die Biomasse wurde mit einem handelsüblichen Feldhächsler auf eine Größe von 2 bis 5 cm zerkleinert. Das Probenmaterial wurde im Anschluß in 2 l Kunststoffbehälter gefüllt, verdichtet und luftdicht verschlossen. Die so hergestellten Silagen wurden vor Versuchsstart geöffnet und für die Untersuchungen verwendet. In Tabelle 1 sind die untersuchten Varianten angeführt.

Tabelle 1: Liste der untersuchten Zwischenfruchtvarianten

Variante	Abkürzung	Beschreibung
1	OÖ 1	Sonnenblume, Alexandrinerklee, Senf, Sommertriticale
2	OÖ 2	Pferdebohnen, Senf, Ölrettich, Alexandrinerklee, S-Triticale
3	OÖ 3	S-Triticale, W-Roggen, Alexandrinerklee, Pferdebohnen, Mungo
4	OÖ 5	Mungo, Alexandrinerklee, Senf
5	OÖ 6	S-Weizen, S-Roggen, Alexandrinerklee, Hafer, Buchweizen, Senf, Sonnenblume
6	OÖ 7	Sudangras, Sonnenblume, Senf, Alexandrinerklee
7	M 1	Phazelia, S-Wicke, Mungo, Ölrettich, Sonnenblume, Ackerbohne, Senf (gedüngt)
8	M 2	Phazelia, S-Wicke, Mungo, Ölrettich, Sonnenblume, Ackerbohne, Senf (ungedüngt)
9	M 3	Kolbenhirse
10	H 1	Mungo, Buchweizen, Alexandrinerklee
11	H 2	Sonnenblume, S-Triticale, Ausfallpeluschke
12	H 3	Mais, Sonnenblume, Hirse
13	H 4	Mungo, Senf, Hirse
14	H 5	Sonnenblume, Mais, Senf, Erbsen
15	RH 1	Pferdebohne, Senf, Ölrettich, Alexandrinerklee
16	RH 2	Rübse, Senf, Alexandrinerklee, Perserklee
17	D 4	SudanSudan
18	ENR 12	Zuckerhirse

2.2. BESTIMMUNG DER BIOGASPRODUKTION IM BATCH-FERMENTER-SYSTEMEN

Der spezifische Methanertrag der Gärrohstoffe wurde im Labor nach VDI 4630 (2006) ermittelt. Im Versuch wurde ein Impfmaterial verwendet, welches im Labor hergestellt und periodisch mit

Fermenterüberlauf von Biogasanlagen gemischt wird. Durch die periodische Zugabe von Fermenterüberlauf soll eine hohe mikrobielle Aktivität des Impfmaterials, welches für eine Vielzahl von Substraten geeignet ist, sichergestellt werden.

Jede Untersuchungsvariante wurde in 3 Wiederholungen in den Fermentern vergoren. Die untersuchten Substrate wurden in einem Verhältnis 1:3 (Bezug TS) zum Inokulum eingewogen. Jede Messzelle besteht aus einem Reaktionsgefäß (Fermenter, 1000 ml Fassungsvermögen) und einem daran anschließendem Gassammelrohr (mit Sperrflüssigkeit gefüllt). Das in den Fermentern gebildete Biogas verdrängt die Sperrflüssigkeit aus dem Gassammelrohr in das Ausgleichsgefäß. Die gebildete Biogasmenge wird an der Säulenskalierung des Gassammelrohres abgelesen. Die Fermenter werden in einem Wasserbad auf konstant 37,5°C temperiert (Gärtemperatur). Mit Hilfe eines Magnetrührers wird der Fermenterinhalt in Intervallen von 30 Minuten jeweils 10 Minuten lang durchmischt.

Im Verlauf der 40 Tage andauernden Gärung wurden die gebildete Biogasmenge und die Zusammensetzung des Biogases kontinuierlich bestimmt. Die Methankonzentration (CH_4) undKohlendioxidkonzentration (CO_2) des Biogases wurde mit dem portablen Gasanalysator „Dräger X-am 7000“ analysiert.

Zusätzlich zu den im Labor ermittelten spezifischen Gasausbeuten wurde die Umsetzbarkeit der in den Substraten gespeicherten Energie in Bezug auf maximale Methanenergie (berechnet anhand der elementaren Inhaltsstoffe nach BUSWELL & MÜLLER, 1952; sowie BOYLE, 1976), ermittelt. Die in Prozent ausgedrückte umgewandelte Methanenergie (Abbaugrad) ergibt sich aus der Division des im Labor gemessenen Methanertrags und dem berechneten potentiellen Methanertrag.

2.3. INHALTSSTOFFANALYSEN

Die Inhaltsstoffe der Silage (Rohprotein (XP), Rohfett (XL), Rohfaser (XF), N-freie Extraktstoffe (NFE), Zellulose (ZEL), Hemi-zellulose (HZEL), Lignin (ADL), Rohasche (XA), Stärke und Zucker) wurden Mithilfe nach erweiternten Weender Analyse im Futtermittellabor Rosenau (NÖ) analysiert. Vor der Analyse wurde das silierte Pflanzenmaterial bei 60°C schonend getrocknet und auf eine Partikelgröße kleiner 1mm gemahlen. Zur Abschätzung des Gehaltes an Mengenelementen in der Biogasgülle wurden die Substrate auf Calcium, Phosphor, Magnesium, Kalium und Natrium untersucht.

Die Silagequalität umfaßt eine gaschromatographische Analyse der Milch-, Essig- und Buttersäurekonzentration, sowie des Ammoniakanteils am Gesamtstickstoff, des pH-Wertes und eine Benotung nach Weißbach und Honig.

Im Mikroanalytischen Laboratorium der Universität Wien (Fakultät für Chemie) wurden die Silageproben auf die Elemente Kohlenstoff (C), Wasserstoff (H), Sauerstoff (O), Stickstoff (N) und Schwefel (S) analysiert. Die Analysen erfolgten in Doppelbestimmung.

2.4. STATISTISCHE AUSWERTUNG

In den Ergebnistabellen und grafischen Darstellungen sind die aus den Wiederholungen berechneten Mittelwerte und Standartabweichungen angegeben. Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms SPSS Version 15. Die Normalverteilung der Residuen wurde grafisch geprüft. Für den Mittelwertvergleich wurde eine einfaktorielle ANOVA mit Post-Hoc-Test (Tukey, $P < 0,05$) durchgeführt.

3. ERGEBNISSE

3.1. BESCHREIBUNG DER SILAGEQUALITÄT

In Tabelle 2 ist die Silagenqualität der untersuchten Zwischenfrüchte in Bezug auf Milch-, Essig- und Buttersäurekonzentration, sowie des Ammoniakanteils am Gesamtstickstoff, des pH-Wertes und eine Benotung nach Weißbach und Honig angeführt. Aus der Bewertung ist ersichtlich, dass mit Ausnahme der beiden ersten Varianten, eine sehr gute Qualität der Silagen vorlag. Bei den Proben OÖ 1 und OÖ 2 ergab die Analyse „nur“ eine gute Qualität. Diese beiden Proben wurden vom Auftraggeber bereits in verschlossenen Plastikbehältnissen angeliefert. Bei diesen Proben war die Silagebereitung nicht optimal (siehe auch geringe Gehalte bei der Milchsäure im Vergleich zu den übrigen Varianten) gewährleistet gewesen sein.

Tabelle 2: Silagequalität der untersuchten Zwischenfruchtproben

Variante	Abkürzung	Milchsäure [g/kg TM]	Essigsäure [g/kg TM]	Buttersäure [g/kg TM]	Gesamtsäure [g/kg TM]	NH_4-N [% von Nt]	Note
1	OÖ 1	8,0	10,7	0,4	19,1	4,6	2
2	OÖ 2	3,4	13,6	0,4	17,4	4,7	2
3	OÖ 3	16,0	5,8	0,5	22,3	4,0	1
4	OÖ 5	14,4	5,8	0,7	20,9	2,9	1
5	OÖ 6	18,1	5,0	0,1	23,3	3,8	1
6	OÖ 7	15,0	3,0	0,5	18,5	2,9	1
7	M 1	15,8	5,2	0,2	21,3	1,6	1
8	M 2	15,0	5,6	n.n.	20,6	1,6	1
9	M 3	11,9	3,7	n.n.	15,6	4,2	1
10	H 1	13,6	3,8	n.n.	17,3	2,5	1
11	H 2	22,1	6,7	n.n.	28,8	2,2	1
12	H 3	15,9	5,5	n.n.	21,5	1,6	1
13	H 4	12,5	3,4	n.n.	15,9	1,6	1
14	H 5	16,9	4,0	n.n.	21,0	1,9	1
15	RH 1	10,9	7,7	0,1	18,7	3,1	1
16	RH 2	21,1	7,1	0,2	28,4	3,4	1
17	D 4	11,9	5,1	0,6	17,6	2,8	1
18	ENR 12	8,9	7,8	0,6	17,4	3,0	1

3.2. CHARAKTERISIERUNG DER PROBEN ANHAND DER INHALTSSTOFFE

Die Ergebnisse der Weender-Inhaltsstoffanalyse der untersuchten Zwischenfruchtsilagen sind in Tabelle 3 dargestellt. Entsprechend der unterschiedlichen Zusammensetzung der Mischungen mit eiweiß- und stärkehältigen Kulturarten ergaben sich auch bei der inhaltsstofflichen Zusammensetzung zwischen den Varianten entsprechende Abweichungen. Die Varianten 6, 7, 9, 17 und 18 (Sorghumhirsen bzw. Mischungen mit geringem Leguminosenanteil) weisen einen geringeren Rohproteingehalt im Vergleich zu den übrigen Zwischenfruchtvarianten mit höherem

Leguminosenanteil auf. Jene Varianten, welche in den Mischungen in denen Sonnenblume, Senf oder Ölrettich enthalten war, zeigten entsprechend höhere Rohfettgehalte.

Tabelle 3: Inhaltsstoffe der untersuchten Zwischenfruchtsilagen (Weender)

Variante	Abkürzung	XP [% TS]	XL [% TS]	XF [% TS]	XA [% TS]	Zel [% TS]	H-Zel [% TS]	ADL [% TS]	NFE [% TS]	Stärke [g kg TS^{-1}]	Zucker [g kg TS^{-1}]
1	OÖ 1	13,8	2,6	30,0	20,0	37,8	14,4	9,1	33,6	21	4
2	OÖ 2	15,6	2,7	34,3	6,1	31,4	18,5	12,6	31,3	8	7
3	OÖ 3	18,3	3,8	27,6	9,4	28,6	11,1	6,8	40,9	7	7
4	OÖ 5	12,1	3,0	30,3	12,0	32,8	9,6	9,1	42,6	10	2
5	OÖ 6	12,6	3,1	28,7	8,6	28,8	16,9	8,0	47,0	85	9
6	OÖ 7	8,9	6,1	32,4	7,9	31,5	17,0	6,7	44,7	7	11
7	M 1	8,2	5,4	30,8	10,2	34,6	6,5	7,8	45,4	22	7
8	M 2	10,3	5,8	31,1	10,1	32,2	6,6	7,7	41,7	13	2
9	M 3	7,8	3,2	28,6	6,4	27,9	21,9	4,3	53,5	203	4
10	H 1	16,4	3,1	23,8	10,8	26,4	12,9	8,3	45,9	60	9
11	H 2	10,2	5,1	26,0	10,9	29,3	6,8	7,2	47,7	24	8
12	H 3	13,0	3,0	26,6	7,6	26,4	21,4	5,3	49,8	n.n.	8
13	H 4	13,1	2,6	32,5	10,8	32,0	13,6	7,3	41,0	9	7
14	H 5	14,7	3,0	28,1	9,8	30,9	12,3	5,3	44,4	5	9
15	RH 1	13,8	9,8	38,1	6,4	34,2	15,9	10,5	32,0	15	8
16	RH 2	21,0	6,4	23,5	11,6	26,9	4,5	5,7	37,5	n.n.	9
17	D 4	8,3	2,0	36,0	7,8	36,2	5,0	4,8	45,9	0	16
18	ENR 12	7,4	1,7	35,5	7,4	34,2	19,6	9,4	48,0	14	17

Variante 15 (RH 1), in deren Mischung ölhaltige Pflanzenarten enthalten waren, zeigte den höchsten Rohfett-, Rohfaser-, Zellulose- und Ligningehalten, sowie einem geringen NFE-Gehalt. Die Zwischenfrüchte/Zwischenfrucht mischungen die hohe Gasausbeuten erzielten, zeigten neben einer an sich ausgeglichenen Zusammensetzung, vor allem geringe Rohfett- und Ligningehalte, sowie einen hohen NFE-Gehalt.

In Tabelle 4 sind die Trockensubstanzgehalte sowie die elementare Zusammensetzung (Kohlenstoff, Wasserstoff, Stickstoff, Schwefel und Sauerstoff) der Silageproben aufgelistet. Die Trockensubstanzgehalte der Silagen spiegeln mehr oder weniger die TS-Gehalte der frischen Biomasse wider (TS-Gehalte der Frischmasse nicht angeführt). Dabei wird ersichtlich, dass mit Ausnahme der Variante 9 (27,4 % TS) bzw. der Variante RH 1 (44,4 % TS) sehr geringe TS-Gehalte gemessen wurden. Eine alleinige Silagebereitung, die idealerweise TS-Gehalte zwischen 28 – 35 % der Frischmasse erfordert, ist somit bei den untersuchten Zwischenfrüchten nicht gegeben.

Die elementare Zusammensetzung variiert ebenfalls entsprechend der unterschiedlichen Zusammensetzung der Zwischenfruchtvarianten. Leguminosenreiche Mischungen (Variante 2, 3, 10 und 16) zeigen beispielsweise höhere N-Gehalte in % der Trockenmasse im Vergleich zu den anderen Varianten.

Tabelle 4: TS-gehalte und Inhaltsstoffe (Elementaranalyse) der untersuchten Zwischenfruchtsilagen

Variante	Abkürzung	TS [% FM]	oTS [% FM]	C [% TM]	H [% TM]	N [% TM]	S [% TM]	O [% TM]
1	OÖ 1	17,4	13,9	50,7	6,9	2,7	0,2	39,5
2	OÖ 2	15,4	12,8	51,4	6,9	3,0	0,3	38,4
3	OÖ 3	15,0	13,6	49,4	7,0	3,1	0,1	40,4
4	OÖ 5	16,1	14,1	50,0	6,8	2,2	0,1	40,9
5	OÖ 6	22,4	20,4	48,1	6,8	2,2	0,1	42,8
6	OÖ 7	17,7	16,2	49,5	6,9	1,5	0,0	42,1
7	M 1	17,1	15,4	49,2	6,9	1,4	0,1	42,4
8	M 2	15,5	14,0	49,0	6,7	1,7	0,2	42,3
9	M 3	27,4	24,8	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.	n.a.
10	H 1	19,1	17,0	49,7	6,6	3,1	0,1	40,5
11	H 2	17,7	15,7	50,3	6,9	1,9	0,1	40,8
12	H 3	17,7	16,4	49,5	6,7	2,3	0,1	41,4
13	H 4	17,8	15,8	51,0	6,6	2,3	0,3	39,7
14	H 5	15,8	14,1	50,9	6,7	2,7	0,1	39,6
15	RH 1	44,4	41,7	51,0	7,1	2,3	0,5	39,1
16	RH 2	18,8	16,7	51,4	6,9	3,8	0,6	37,4
17	D 4	19,7	18,2	46,7	6,5	1,4	0,1	45,4
18	ENR 12	22,2	20,5	47,2	6,5	1,3	0,1	44,9

3.3. Ergebnisse der Gärversuche im Batch-Fermenter-System

Die Ergebnisse zu den spezifischen Biogas- und Methanausbeuten der untersuchten Varianten sind in der Tabelle 5 sowie in Abbildung 1 (spezifische Gasausbeute) dargestellt.

Wie die Ergebnisse zu den im Labor ermittelten Gasausbeuten zeigen, ergaben sich zwischen den 18 Varianten signifikante Unterschiede. Der Biogasertrag varierte zwischen 454 (Variante 15) und 720 l_N kg oTS^{-1} (Variante 18). Ebenso wichen die spezifischen Gasausbeuten zwischen der geringsten und höchsten Ausbeute um 166 l_N CH_4 kg oTS^{-1} ab. Wie auch aus der Abbildung 1 hervorgeht wurden die höchsten spezifischen Methanerträge von Variante 12 (Mais, Sonnenblume und Sorghumhirse), sowie den Varianten 17 (Sudangras) und 18 (Sorghumhirse) mit 400 l_N Methan pro kg oTS erzielt. Somit wurde das hohe Biogasbildungspotential der Sorghumhirsen(-typen), welches vor allem in den früheren Entwicklungsstadien noch ausgeschöpft werden kann, abermals demonstriert (siehe auch hohe Abbaugrade). Aktuelle Untersuchungen am Institut für Landtechnik zeigen, dass sich bei den Hirsen im weiteren Verlauf der Entwicklung (> 35 % TS-Gehalten in der Frischmasse) der Ligno-zellulose-Effekt stärker ausprägt und somit selten mehr als 350 l_N CH_4 kg oTS^{-1} erzielt werden können.

Tabelle 5: Spezifischer Biogas- und Methanertrag der untersuchten Varianten

Variante	Abkürzung	Biogasertrag [l_N kg oTS^{-1}]		Methanertrag [l_N CH_4 kg oTS^{-1}]			Abbaugrad
		Mittelwert	Staw	Mittelwert	Staw	berechnet*	[%]
1	OÖ 1	470^{a}	24,1	273^{ab}	10,4	509	53,7
2	OÖ 2	509^{ab}	22,4	316^{b}	21,8	517	61,1
3	OÖ 3	574^{bc}	37,7	324^{b}	23,4	494	65,5
4	OÖ 5	510^{abc}	34,9	290^{ab}	23,6	498	58,3
5	OÖ 6	518^{abc}	13,1	288^{ab}	7,7	475	60,6
6	OÖ 7	600^{c}	41,7	333^{b}	28,1	496	67,2
7	M 1	588^{bc}	27,5	326^{b}	22,6	493	66,1
8	M 2	538^{abc}	6,2	305^{b}	2,6	484	62,9
9	M 3	585^{bc}	41,8	332^{b}	26,1	n.b.	n.b.
10	H 1	570^{bc}	29,8	324^{b}	16,2	486	66,8
11	H 2	601^{c}	24,5	332^{b}	17,4	507	65,4
12	H 3	703^{d}	2,6	400^{c}	7,0	490	81,7
13	H 4	573^{bc}	17,6	310^{b}	8,7	506	61,3
14	H 5	660^{*}	n.d.	368^{b}	n.d.	505	72,8
15	RH 1	454^{a}	3,5	250^{a}	3,8	521	48,0
16	RH 2	579^{bc}	10,7	327^{b}	4,6	517	63,2
17	D 4	717^{d}	48,6	406^{c}	32,0	448	90,7
18	ENR 12	720^{d}	12,3	416^{c}	9,2	456	91,3

*unterschiedliche Buchstaben a,b,c kennzeichnen signifikante ($p < 0,05$; Tukey) Unterschiede beim Biogas- bzw. Methanertrag zwischen den untersuchten Varianten; * anhand der BUSWELL-Formel aus der elementaren Zusammensetzung berechnet (= theoretisch möglicher spezifischer Methanertrag)*

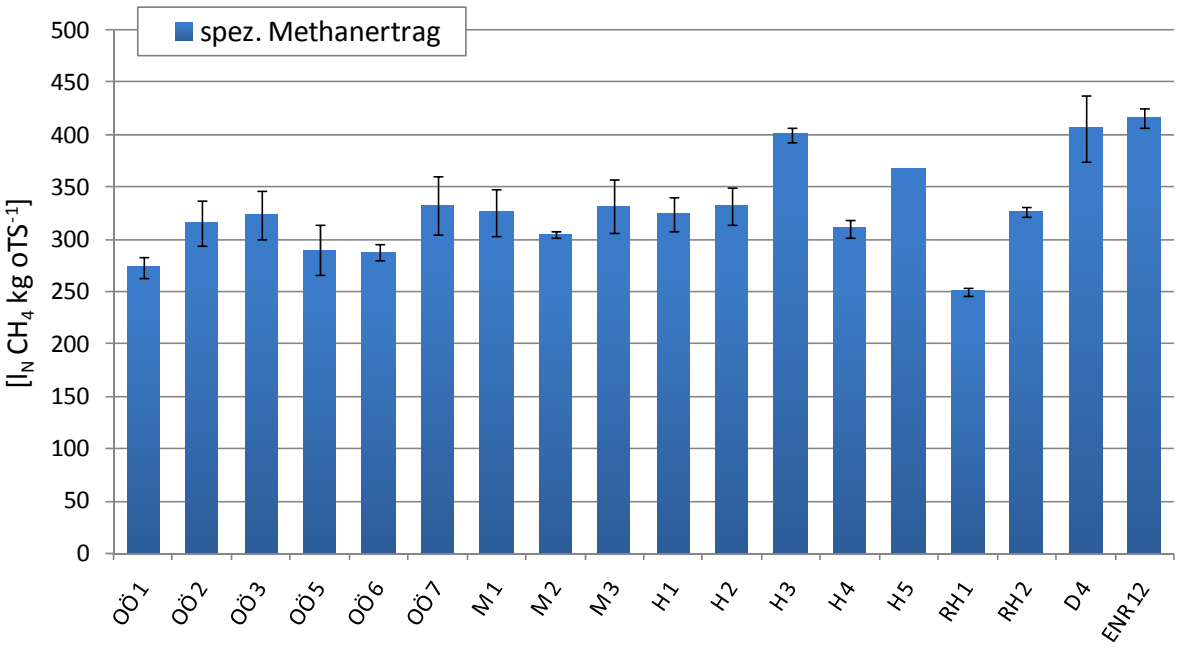

Abbildung 1: Spezifische Methanausbeuten der untersuchten Zwischenfruchtvarianten

Die Varianten 1 (OÖ 1), 4 (OÖ 5), 5 (OÖ 6) und 15 (RH 1) kamen über eine spezifische Methanausbeute von 300 l_N kg oTS^{-1}, sowie über Abbaugrade (der theoretisch möglichen Methanenergie) von 60 % nicht hinaus. Die geringere Ausbeute bei Variante 1 könnte mit der geringeren Silagequalität in Verbindung gebracht werden. Bei den übrigen Varianten könnten Hemmstoffe, die in bestimmten Zwischenfrüchten enthalten sind, zu verminderten Gasausbeuten führen.

3.4. Abschätzung der Nährstoffgehalte (N, P, K) in der Biogasgülle

In Tabelle 6 sind die Nährstoffgehalte aus der Mengenelementeanalyse (in Gramm pro kg Trockenmasse) der Silageproben sowie die im Gärrest zu erwarteten N-, P_2O_5- und K_2O-Gehalte (in Kilogramm pro Kubikmeter Gärrest) für alle Zwischenfruchtvarianten angeführt. Entsprechend der pflanzlichen Zusammensetzung der Substratmischungen ergab die Analyse der Mengenelemente Unterschiede in den N-, P- und K-Gehalten. Die Variante 16, die sich aus einer Mischung von Rübse, Senf, Alexandrinerklee und Perserklee zusammensetzte, verzeichnete beispielsweise den höchsten Stickstoffgehalt (33,6 g kg^{-1} TM) in der silierten Probe.

Unter berücksichtigung der TS-Gehalte der Silagen und dem Abbau der organischen Substanz wurden die zu erwartenden Nährwerte im Gärrest ermittelt. Dabei schwankten die Stickstoffgehalte der untersuchten Varianten zwischen 2,0 (Variante 7) und 7,4 (Variante 15) kg pro m^3 Gärrest. Die mittleren P_2O_5- und K_2O-Gehalte im Gärrest der untersuchten Zwischenfrüchte betrugen 1,3 und 5,1 kg m^{-3}. Aus der Zwischenfruchtmischung 15 lassen sich somit, trotz des geringsten spezifischen Methanertrages, die höchsten Stickstoff- und Phosphorgehalte im Gärrest erwarten.

Tabelle 6: Nährstoffgehalte im Substrat und im Gärrest

Variante	Abkürzung	im Substrat [g/kg TM]			im Gärrest [kg/m^3]		
		N	P	K	N	P_2O_5	K_2O
1	OÖ 1	22,1	3,9	27,2	3,5	1,4	5,2
2	OÖ 2	25,0	4,7	34,4	3,5	1,5	5,9
3	OÖ 3	29,3	4,3	32,4	4,0	1,3	5,3
4	OÖ 5	19,4	5,0	26,0	2,8	1,7	4,6
5	OÖ 6	20,2	4,6	24,1	3,9	2,0	5,6
6	OÖ 7	14,2	3,8	24,3	2,2	1,4	4,6
7	M 1	13,1	3,2	28,2	2,0	1,1	5,1
8	M 2	16,5	2,7	30,0	2,3	0,9	5,1
9	M 3	12,5	2,1	22,6	2,8	1,1	6,1
10	H 1	26,2	2,7	28,2	4,4	1,0	5,7
11	H 2	16,3	2,2	36,5	2,5	0,8	6,8
12	H 3	20,8	2,7	21,9	3,2	0,9	4,0
13	H 4	21,0	3,4	28,9	3,3	1,2	5,5
14	H 5	23,5	3,0	28,0	3,3	1,0	4,7
15	RH 1	22,1	2,8	9,3	7,4	2,2	3,8
16	RH 2	33,6	3,7	26,1	5,6	1,4	5,2
17	D 4	13,3	2,1	20,0	2,2	0,8	4,0
18	ENR 12	11,8	2,2	17,8	2,1	0,9	3,9