

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Pflanzenernährung

# **Bewertung und Optimierung der Nährstoff- und Umweltwirkung von Gärrückständen aus der Biogasgewinnung**

**Fabian Heribert Lichti**

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

**Doktors der Agrarwissenschaften**

genehmigten Dissertation.

Vorsitz: Univ.-Prof. Dr. H. Bernhardt  
1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. U. Schmidhalter  
2. Prüfer: Univ.-Prof. Dr. K.-J. Hülsbergen

Die Dissertation wurde am 17.08.2012 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt am 29.04.2013 angenommen.



## Zusammenfassung

Der Düngung mit Biogasgärresten (BGR) kommt aufgrund des dynamischen Zuwachses an landwirtschaftlichen Biogasanlagen in Deutschland eine wichtige Rolle im Hinblick auf die Rezirkulation von Nährstoffen zu. Durch die verpflichtende Untersuchung der Nährstoffgehalte von Biogasgärresten steht der Landwirtschaft zudem eine Datengrundlage zur optimierten Pflanzenernährung zur Verfügung. Zur Beurteilung der Stickstoffwirkung von Biogasgärresten wurden in einem dreijährigen Versuch im Freiland an vier Standorten in Bayern unter praxisnahen Bedingungen verschiedene Varianten der Düngung mit Biogasgärresten geprüft. Die verwendeten unbehandelten Biogasgärreste unterschieden sich in deren Nährstoffzusammensetzung ohne nähere Differenzierung kaum von den Rindergüllen. Die Biogasgärreste erreichten Mineraldüngeräquivalente ( $MD\ddot{A}_{NUP}$ ) von 45 % zu Wintertriticale Ganzpflanzensilage, 32 % zu Winterweizen und 44 % zu Silomais auf schluffigem Lehm bzw. 30 % bei Silomais und 30 % zu Winterweizen auf stark lehmigem Sand. Die entsprechend geprüfte Rindergülle wies nur an einem der vier geprüften Standorte bei niedrigerem TS-Gehalt gegenüber dem eingesetzten Biogasgärrest ein höheres  $MD\ddot{A}_{NUP}$  zum BGR auf und war sonst auf einem leicht niedrigeren Niveau als BGR. Die ebenfalls eingesetzten separierten Biogasgärreste unterschieden sich von dem unbehandelten BGR entscheidend durch deren Trockensubstanzgehalte. Die feste Phase kennzeichneten zusätzlich höhere pH-Werte und  $P_2O_5$ -Gehalte. Das  $MD\ddot{A}_{NUP}$  der separiert festen Phase war deutlich niedriger zwischen 5 – 27 % je nach Standort und Kulturart. Die separiert flüssige Phase des BGR hingegen wies ein  $MD\ddot{A}_{NUP}$  zwischen 36 – 55 % auf und übertraf somit den unbehandelten BGR. Durch eine Verdünnung des unbehandelten Biogasgärrests zu Wintergetreide konnte ein ähnliches  $MD\ddot{A}_{NUP}$  wie durch separiert flüssigen BGR erreicht werden. Dies bekräftigt den Effekt des durch die Verringerung des TS-Gehaltes erhöhten Infiltrationspotentials bei gleichem C/N-Verhältnis. Das  $E\ddot{A}M_{DM}$  der organischen Düngung des ortsfesten Versuchs zeigte deutliche standortbedingte Unterschiede sowie Einzeljahreseffekte die Gegenstand weiterer Untersuchungen sind. (Das  $E\ddot{A}M_{DM}$  gibt an bei welcher Menge mineralischem Dünger bereits der TM-Ertrag des organischen Düngers erreicht wurde.) Ein Vergleich der Applikationstechniken Breitverteilung über ein Leitblech, Schleppschlauch und Schleppschuh im Frühjahr zu Wintergetreide zeigte, dass lediglich durch den Schleppschuh eine Erhöhung des N-Entzuges sowie TM-Ertrags gegenüber der Breitverteilung erreicht werden konnte. Wurde BGR vor Silomais mit Schleppschuh ohne Einarbeitung appliziert, konnte im Vergleich dazu durch eine sofortige Einarbeitung nach Breitverteilung der N-Entzug und TM-Ertrag gegenüber der Schleppschuhapplikation nochmals leicht

gesteigert werden. Die Erhebungen des N-Entzugs der geprüften Kulturarten zeigten bei einem berechneten Anfall von ca. 220 kg N/ha aus einer Biogasfruchtfolge, dass die vollständige Rückführung dieser Stickstoffmenge bei gleichzeitiger Erzielung von Höchstträgen zur Produktion der Biogassubstrate Wintertriticale GPS und Silomais nach Ermittlung des einfachen Stickstoffsaldos prinzipiell möglich ist. Durch die Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren (NI) in Wintergetreide zu im Frühjahr applizierten BGR konnte keine positive Ertragsreaktion festgestellt werden, der N-Entzug war teilweise signifikant vermindert. Wurde der NI zu im Herbst appliziertem BGR zugegeben, konnten tendenziell höhere N-Entzüge gegenüber BGR ohne NI festgestellt werden. Wurde Biogasgärrest mit NI ca. vier Wochen vor der Saat von Silomais appliziert, wurden keine Unterschiede im TM-Ertrag oder N-Entzug gegenüber einer Düngung direkt vor der Saat mit BGR gemessen. Insgesamt zeigten die unbehandelten BGR eine gegenüber Rindergülle leicht gesteigerte N-Effizienz, während besonders standortabhängige Unterschiede zu großen Differenzen in der N-Effizienz der BGR führten.

Schlagwörter:

Biogasgärrest, Stickstoff, Ausbringungstechnik, Nitrifikationsinhibitor

Keywords:

biogas residues, nitrogen, application technique, nitrification inhibitor

## Abstract

On the basis of the dynamic growth of biogas plants in Germany the fertilization with biogas residues (BGR) has obtained an important role for recirculation of plant nutrients, particularly with regard to nitrogen (N). Due to the compulsory analysis of the nutrient content of BGR in Germany, a data base for optimized plant nutrition is already given on a single-farm scale. In this work the effect of N nutrition with BGR was assessed in a 3-year on-field trial conducted at four sites throughout Bavaria. The fertilizing effects were tested by varying rate and time of BGR application, using different application techniques and the addition of nitrification inhibitors (NI) on several crops. The BGR achieved mineral fertilizer equivalents (MFE) of 45 % when applied to winter triticale harvested as whole-plant silage, 32 % when applied to winter wheat and 44 % when applied to maize on a silty loam respectively 30 % when applied to winter wheat and 44 % when applied to maize on a sandy loam. In accordance to its dry-matter (DM) content cattle slurry showed higher and lower MFE. Additionally tested separated solid BGR was characterized by a high pH-value and P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-content. The MFE of the solid BGR was significantly lower between 5 – 27 % depending on site and crop. On the other hand the separated fluid BGR resulted in MFE of 36 – 55 %, thus exceeding the value of untreated BGR. By diluting the untreated BGR a similar MFE could be achieved. The EÄM<sub>DM</sub> of the organic fertilizers (showing the amount of mineral fertilizer needed to reach the same DM-yield as with organic fertilizer) showed significant differences between the four sites and is subject of further investigations. Comparing three different application techniques, including splash plate (constructed from a plate where the BGR slides downwards to drip off), trail hose and trail shoe, on winter cereals, showed that an increase of N-uptake and DM-yield could only be achieved with the trail shoe application technique. If BGR has been applied on bare soil prior to planting of maize, the incorporation of wide spread BGR again increased the N-uptake and DM-yield compared with trail shoe application. Regarding the N-balance, the calculation of the N-uptake of the tested crops from a biogas rotation at a calculated N-input of 220 kg N/ha showed that a complete return of nitrogen from biogas crop rotations can be made on winter triticale and maize with simultaneous high yields for biogas production. The addition of NI to BGR did not generate elevated DM-yields. In some treatments the N-uptake of *Triticosecale* was reduced significantly when using NI. If BGR was applied with NI about four weeks before planting of maize no differences in DM-yield or N-uptake could be found relative to fertilization with BGR just before planting. Overall, the untreated BGR showed a

slightly increased N efficiency compared to cattle manure, whereas particularly site-dependent differences resulted in large differences in N efficiency of BGR.

# Inhaltsverzeichnis

## Zusammenfassung

## Abstract

<b>Inhaltsverzeichnis</b>	I
<b>Abbildungsverzeichnis</b>	III
<b>Tabellenverzeichnis</b>	VIII
<b>Abkürzungsverzeichnis</b>	XII

<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	1
<b>2</b>	<b>Stand des Wissens</b>	3
2.1	Biogasgewinnung	3
2.2	Biogasgärreste	5
2.2.1	Zusammensetzung von Biogasgärresten	5
2.2.2	Stickstoff im Biogasgärrest	7
<b>3</b>	<b>Material und Methoden</b>	10
3.1	Ausbringungstechnik	10
3.2	Versuchsaufbau	12
3.2.1	Versuchsaufbau Wintertriticale (V548)	12
3.2.2	Versuchsaufbau Winterweizen (V549)	16
3.2.3	Versuchsaufbau Silomais (V551)	20
3.2.4	Versuchsaufbau Grünland Puch (V552)	23
3.2.5	Versuchsaufbau Grünland Bayreuth (V553)	25
3.2.6	Versuchsaufbau Dauerversuch (V554)	26
3.2.7	Versuchsaufbau Dauerversuch (V554S)	28
3.3	Bestimmung der Qualitätsparameter im Erntegut	30
3.4	Statistische Auswertung	34
3.5	Messungen mit N-Sensor <sup>®</sup> ALS (Fa. YARA)	35
3.6	Versuchsstandort Puch (FFB)	36
3.6.1	Standortbeschreibung	36
3.6.2	Witterung	37
3.6.3	Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Puch	38
3.7	Versuchsstandort Speichersdorf und Eckersdorf	41
3.7.1	Standortbeschreibung	41

3.7.2	Witterung	42
3.7.3	Inhaltliche Zusammensetzung Biogasgärreste in Speichersdorf und Eckersdorf	43
3.8	Versuchsstandort Landsberg am Lech	47
3.8.1	Standortbeschreibung	47
3.8.2	Witterung	48
3.8.3	Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Landsberg	48
3.9	Versuchsstandort Steinach	48
3.9.1	Standortbeschreibung	48
3.9.2	Witterung	49
3.9.3	Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Steinach	49
<b>4</b>	<b>Ergebnisse der Feldversuche</b>	<b>53</b>
4.1	Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Wintertriticale (V548)	53
4.2	Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Winterweizen (V549)	69
4.3	Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Silomais (V551)	84
4.4	Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest auf einem ortsfesten Dauerversuch (V554, V554S)	95
4.5	Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest auf Grünland (V552, V553)	101
<b>5</b>	<b>Diskussion</b>	<b>113</b>
	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>127</b>
	<b>Anhang</b>	<b>135</b>
	<b>Eidesstattliche Erklärung</b>	<b>144</b>



## Abbildungsverzeichnis

<b>Abb. 1:</b> Schematische Darstellung der Biogasgewinnung mit dem anfallenden Endprodukt Biogasgärrest .....	4
<b>Abb. 2:</b> Breitverteiler-, Schleppschlauch- und Schleppschuhtechnik am Versuchsfass .....	11
<b>Abb. 3:</b> Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh von links nach rechts auf Wintergetreide im Frühjahr mittels Versuchsfass appliziert .....	11
<b>Abb. 4:</b> Versuchsfass zur Ausbringung der flüssigen Wirtschaftsdünger im Feldversuchswesen .....	11
<b>Abb. 5:</b> Versuchsparzellenernte der Wintertriticale Ganzpflanzensilage .....	12
<b>Abb. 6:</b> Beispiel zur Berechnung von Mineraldüngeräquivalenten durch Stickstoffsteigerungsversuche.....	33
<b>Abb. 7:</b> Aktiver N-Sensor® ALS der Fa. Yara auf Fahrgestell montiert .....	35
<b>Abb. 8:</b> Verlauf der Jahreswitterung 2008 – 2009 und wichtige Versuchstermine am Standort Puch.....	38
<b>Abb. 9:</b> Gehalte an Kjeldahl-N ( $\text{kg/m}^3$ ) der am Standort Puch verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil (Stand: 25.07.2011) .....	39
<b>Abb. 10:</b> Verlauf der Jahreswitterung 2009 – 2010 und wichtige Versuchstermine am Standort Bayreuth .....	43
<b>Abb. 11:</b> Gehalte an Kjeldahl-N ( $\text{kg/m}^3$ ) der in Bayreuth (BT; Grünlandversuch) und Guttenthau (Ackerlandversuche) verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil; (Stand: 25.07.2011).....	45
<b>Abb. 12:</b> Gehalte an Kjeldahl-N ( $\text{kg/m}^3$ ) der in Steinach verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil; (Stand: 25.07.2011) .....	50
<b>Abb. 13:</b> Stickstoffentzüge ( $\text{kg/ha}$ ) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	54
<b>Abb. 14:</b> Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS .....	55
<b>Abb. 15:</b> Darstellung der TM-Erträge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS .....	56
<b>Abb. 16:</b> Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs .....	57

<b>Abb. 17:</b> Balkendiagramm der Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Wintertriticale GPS .....	58
<b>Abb. 18:</b> Stickstoffbilanz der kombinierten organischen und mineralischen Düngung zu Wintertriticale GPS. Die Zahlen kennzeichnen die Höhe der zusätzlichen mineralischen Düngung. ....	59
<b>Abb. 19:</b> Trockenmasseerträge (dt/ha) der Applikationstechniken Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	60
<b>Abb. 20:</b> Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung, inklusive der quadratischen Funktion der beiden polynomischen Kurven. Die drei Applikationstechniken sind als Punkte eingezeichnet .....	62
<b>Abb. 21:</b> Stickstoffentzüge der im Herbst gedüngten Parzellen zu Wintertriticale GPS als Balkendiagramm, sowie deren TM-Erträge in dt/ha (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	64
<b>Abb. 22:</b> Balkendiagramm der $N_{\min}$ -Bodenprobenahme im November nach Biogasgärrestdüngung. Dargestellt sind die Summe aus Ammonium- und Nitratstickstoff im Boden in 0 – 90 cm Bodentiefe; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	65
<b>Abb. 23:</b> Darstellung der Korrelation zwischen dem Quotienten aus org. Substanz und $N_t$ -Gehalt des organischen Düngers zum N-Entzug von Wintertriticale GPS.....	67
<b>Abb. 24:</b> Darstellung N-Entzüge und TM-Erträge von Nitrifikationsinhibitoren als Zugabe zu Biogasgärresten im Vergleich zu einer Düngung mit Biogasgärrest ohne NI-Zugabe bei Wintertriticale GPS; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	68
<b>Abb. 25:</b> Stickstoffentzug (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	69
<b>Abb. 26:</b> Stickstoffentzug (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der Düngungssteigerung mit Biogasgärrest im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	70
<b>Abb. 27:</b> Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Winterweizen .....	71
<b>Abb. 28:</b> Darstellung des TM-Ertrages der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Winterweizen, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs .....	72

<b>Abb. 29:</b> Darstellung der Rohproteingehalte der organischen Düngungssteigerung zu Winterweizen, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs .....	73
<b>Abb. 30:</b> Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der Düngung mit Biogasgärrest zu verschiedenen Vegetationsstadien im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	74
<b>Abb. 31:</b> Balkendiagramm der Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Winterweizen Korndrusch .....	75
<b>Abb. 32:</b> Vergleich der drei Applikationstechniken zu Vegetationsbeginn sowie BBCH 31 anhand des gemessenen N-Entzuges und Kornertrag im Korn von Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	76
<b>Abb. 33:</b> N-Entzüge als Balkendiagramm der im Herbst gedüngten Parzellen zu Winterweizen sowie deren Kornertrag in dt/ha (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	78
<b>Abb. 34:</b> Balkendiagramm der $N_{\min}$ -Bodenprobenahme im November nach Biogasgärrestdüngung. Dargestellt sind die Summe aus Ammonium- und Nitratstickstoff im Boden in 0 – 90 cm Bodentiefe; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	79
<b>Abb. 35:</b> Darstellung der Korrelation zwischen dem Quotienten aus org. Substanz und $N_{\text{Ges}}$ -Gehalt des organischen Düngers zum N-Entzug der organischen Dünger .....	80
<b>Abb. 36:</b> Darstellung der Wirkung von Nitrifikationsinhibitoren als Zugabe zu Biogasgärresten im Vergleich zu einer Düngung mit Biogasgärrest ohne NI-Zugabe zu Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	82
<b>Abb. 37:</b> Stickstoffentzüge (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt (% RP i. d. TM) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	85
<b>Abb. 38:</b> Stickstoffentzüge (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt (% RP i. d. TM) der Düngungssteigerung mit Biogasgärresten im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	87
<b>Abb. 39:</b> $N_{\min}$ -Bodengehalte der organischen Düngungssteigerung zu Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	87
<b>Abb. 40:</b> N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Silomais, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs .....	88

<b>Abb. 41:</b> Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Silomais .....	89
<b>Abb. 42:</b> N-Entzug (kg/ha) der Applikationstechnik Schleppschauch mit Einarbeitung und Schleppschuh auf Ackerland vor der Maissaat (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	90
<b>Abb. 43:</b> Einarbeitung verschiedener organischer Dünger eine Stunde sowie 24 Stunden nach der Applikation vor Maissaat (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	91
<b>Abb. 44:</b> Balkendiagramm der N-Entzüge sowie TM-Erträge der mit Nitrifikationsinhibitor ausgebrachten Biogasgärreste (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	94
<b>Abb. 45:</b> Stickstoffentzug (kg/ha) und Trockenmasseertrag (dt/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg der ortsfesten Fruchtfolge (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	96
<b>Abb. 46:</b> Stickstoffentzug der kombinierten Düngung aus Biogasgärrest und mineralischem Dünger zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 und Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg.....	98
<b>Abb. 47:</b> $N_{\min}$ -Werte der mineralischen Düngung zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach. ....	98
<b>Abb. 48:</b> $N_{\min}$ -Werte der Düngung mit Biogasgärrest (kg $NH_4$ -N/ha) zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach.....	99
<b>Abb. 49:</b> Trockenmasseertrag (dt/ha), Energieertrag (GJ NEL/ha) und Stickstoffentzüge (kg/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 auf Grünland am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	102
<b>Abb. 50:</b> Trockenmasseertrag (dt/ha), Energieertrag (GJ NEL/ha) und Stickstoffentzüge (kg/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 auf Grünland am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	102
<b>Abb. 51:</b> TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung auf Grünland in Puch und Bayreuth auf Basis des applizierten $N_t$ über Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	105
<b>Abb. 52:</b> TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung auf Grünland in Puch und Bayreuth auf Basis des applizierten $N_t$ /ha über Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	107
<b>Abb. 53:</b> N-Entzüge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung und Vergleich verschiedener organischer Dünger auf Grünland in Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	110

**Abb. 54:** TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten  
Düngungssteigerung und Vergleich verschiedener organischer Dünger auf Grünland  
in Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....111

## Tabellenverzeichnis

<b>Tab. 1:</b> Übersicht der Zusammensetzung wichtiger Gaskomponenten im Biogas .....	5
<b>Tab. 2:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V548 Wintertriticale GPS in Puch. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha .....	15
<b>Tab. 3:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V549 Winterweizen in Puch und Bayreuth. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha .....	19
<b>Tab. 4:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V551 Silomais in Bayreuth und Puch. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha .....	22
<b>Tab. 5:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V552 Grünland in Puch. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha.....	24
<b>Tab. 6:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V553 Grünland in Bayreuth. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung in kg N/ha.....	25
<b>Tab. 7:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu ortsfestem Dauerversuch V554 in Puch, Landsberg und Bayreuth. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung in kg N/ha .....	27
<b>Tab. 8:</b> Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu ortsfestem Dauerversuch V554S in Steinach. *Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung in kg N / ha.....	29
<b>Tab. 9:</b> Standardbodenuntersuchungen vor Versuchsbeginn der ortswechselnden Versuche in Puch.....	37
<b>Tab. 10:</b> Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Puch verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011) .....	40
<b>Tab. 11:</b> Ergebnisse der Standardbodenuntersuchungen vor Versuchsbeginn in Bayreuth.....	42
<b>Tab. 12:</b> Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Bayreuth verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011) .....	46
<b>Tab. 13:</b> Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Landsberg verwendeten Rindergülle (Stand: 25.07.2011).....	48
<b>Tab. 14:</b> Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Steinach verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011) .....	51
<b>Tab. 15:</b> Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_t$ je Hektar im Mittel der drei Jahre zu Wintertriticale GPS .....	55

<b>Tab. 16:</b> Stickstoff Entzüge (kg/ha) der verwendeten Ausbringungstechniken im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 zu zwei Ausbringungsterminen zweifaktoriell (VB + BBCH31) in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	61
<b>Tab. 17:</b> Auswertung der $\text{NH}_4\text{-N}$ -Äquivalente der Applikationstechnik zu Wintertriticale Ganzpflanzensilage; Mittelwert der Jahre 2009-2011 .....	63
<b>Tab. 18:</b> Darstellung der über die organischen Dünger nach Nährstoffuntersuchung tatsächlich ausgebrachten Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_t$ im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	66
<b>Tab. 19:</b> TM-Ertrag und N-Entzug organischer Dünger im Vergleich zu Wintertriticale GPS (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	66
<b>Tab. 20:</b> Mittelwerte ( $\emptyset$ 2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger zu Wintertriticale GPS.....	67
<b>Tab. 21:</b> Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_t$ je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte zu Winterweizen .....	70
<b>Tab. 22:</b> Stickstoff Entzüge (kg/ha) der verwendeten Ausbringungstechniken im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 zu zwei Ausbringungsterminen zweifaktoriell (VB + BBCH31) in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	76
<b>Tab. 23:</b> Darstellung der über die organischen Dünger nach Nährstoffuntersuchung tatsächlich ausgebrachten Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_t$ im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf .....	79
<b>Tab. 24:</b> Kornertrag (dt/ha) und Stickstoffentzug (kg/ha) der organischen Dünger im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	80
<b>Tab. 25:</b> Mittelwerte ( $\emptyset$ 2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger zu Winterweizen an den Einzelstandorten und im Mittel der Standorte.....	81
<b>Tab. 26:</b> Inhaltsstoffe in Biogasgärrest und Rindergülle nach den Untersuchungen zur Ausbringung zu VB an den Standorten Puch und Speichersdorf zu Winterweizen (Mittel der Jahre 2009 – 2011) .....	81
<b>Tab. 27:</b> Kornertrag (dt/ha) der Varianten mit bzw. ohne NI und mineralischer Düngung im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	83
<b>Tab. 28:</b> Kornertrag (dt/ha) und N-Entzug (kg/ha) der Varianten mit bzw. ohne NI und mineralischer Düngung im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	83

<b>Tab. 29:</b> Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_{\text{Ges}}$ je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte zu Silomais.....	86
<b>Tab. 30:</b> Energieertrag, Energiedichte, Rohproteingehalt und Trockenmasseertrag als Auszug der mineralischen Düngung zusätzlich zur Applikation von Biogasgärrest zu Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	89
<b>Tab. 31:</b> pH-Werte der für den Versuch zu Silomais verwendeten organischen Dünger an den Standorten Puch und Bayreuth .....	91
<b>Tab. 32:</b> Ausgebrachte Mengen an $\text{NH}_4\text{-N}$ und $\text{N}_{\text{Ges}}$ der verschiedenen organischen Dünger zu Silomais .....	92
<b>Tab. 33:</b> Trockenmasseertrag (dt/ha) und Stickstoffentzug (kg/ha) der organischen Dünger im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	92
<b>Tab. 34:</b> Mittelwerte ( $\emptyset$ 2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger bei Silomais .....	93
<b>Tab. 35:</b> TM-Erträge und N-Entzüge der mit Nitrifikationsinhibitor ausgebrachten Biogasgärreste an den beiden Standorten Bayreuth (2009 – 2011) und Puch (2010 - 2011) (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	94
<b>Tab. 36:</b> Varianten der Stickstoffsteigerung und ausgebrachte Mengen mineralischen Stickstoffs (kg N/ha) an den Standorten des ortsfesten Dauerversuches im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	95
<b>Tab. 37:</b> Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärrest zu dem ortsfesten Fruchtfolgeversuch sowie deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an $\text{N}_t$ und $\text{NH}_4\text{-N}$ je Hektar im Mittel der Jahre 2009 - 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach .....	97
<b>Tab. 38:</b> Mineraldüngeräquivalent und Ertragsäquivalent der Applikationsrate von Biogasgärrest an den Standorten der ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	97
<b>Tab. 39:</b> Inhaltsstoffe der verwendeten organischen Dünger (Probenahme an den Ausbringungsterminen) an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	100
<b>Tab. 40:</b> Mittelwerte ( $\emptyset$ 2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger des ortsfesten Fruchtfolgeversuches .....	101
<b>Tab. 41:</b> Rohprotein-, Rohasche- und Rohfasergehalte der mineralischen Stickstoffsteigerung am Standort Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011 (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	103



<b>Tab. 42:</b> Rohprotein-, Rohasche- und Rohfasergehalte der mineralischen Stickstoffsteigerung am Standort Puch im Mittel der Jahre 2009 – 2011 (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	104
<b>Tab. 43:</b> Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärrest auf Grünland und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an $N_t$ und $NH_4-N$ je Hektar im Mittel der Jahre 2009 - 2011 an den Standorten Bayreuth und Puch.....	105
<b>Tab. 44:</b> Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der Düngungssteigerung mit Biogasgärresten im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	106
<b>Tab. 45:</b> Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der mineralischen Ergänzung zu Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ).....	107
<b>Tab. 46:</b> Inhaltsstoffe der verwendeten organischen Dünger (Probenahme an den Ausbringungsterminen) an den Standorten Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011 .....	108
<b>Tab. 47:</b> Darstellung der über die organischen Dünger ausgebrachten Mengen an $N_{Ges}$ im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth .....	108
<b>Tab. 48:</b> Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge verschiedener organischer Dünger im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) ..	109
<b>Tab. 49:</b> Varianten der Herbstdüngung mit Biogasgärresten und deren ausgebrachte Mengen an $NH_4-N$ und $N_t$ je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte auf Grünland.....	111
<b>Tab. 50:</b> Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der Herbstdüngung mit Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth für die Summe der Schnitte sowie nur den 1.Schnitt (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test $p \leq 0,05$ ) .....	112
<b>Tab. 51:</b> Farbskala des $E\ddot{A}M_{DM}$ (bezogen auf die applizierte Menge $N_t$ ) in Abhängigkeit der Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg je organischem Dünger sowie der vier Biogasgärreste, Rindergülle und BGR sep. fest in Steinach. MW berechnet aus den MW der Ergebnisse der Jahre 2009 -2011 .....	119
<b>Tab. 52:</b> Farbskala des $E\ddot{A}M_{DM}$ (bezogen auf die applizierte Menge $NH_4-N$ ) in Abhängigkeit der Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg je organischem Dünger sowie der vier Biogasgärreste, Rindergülle und BGR sep. fest in Steinach. MW berechnet aus den MW der Ergebnisse der Jahre 2009 -2011 .....	119

## Abkürzungsverzeichnis

ADF	Säure-Detergenz-Faser
ADL	Roh-Lignin
BBCH	Code der Biologischen <b>B</b> undesanstalt, <b>B</b> undessortenamt und <b>C</b> hemischen Industrie zur Klassifizierung des morphologischen Entwicklungsstadiums einer Pflanze
BGR	Biogasgärrest
C <sub>org</sub>	Organischer Kohlenstoff
DüV	Düngeverordnung (Ausfertigungsdatum: 10.01.2006)
EÄM	Ertragsäquivalent für mineralischen Dünger
Elos	Enzymlösliche organische Substanz
GPS	Ganzpflanzensilage
IVDM	Invitro verdauliche organische Substanz
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Bavarian State Research Center)
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
N	Stickstoff
NawaRo	Nachwachsende Rohstoffe
NDF	Neutral-Detergenz-Faser
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> -N	Ammonium-Stickstoff
NI	Nitrifikationsinhibitor
N <sub>min</sub>	Mineralischer Stickstoff-Gehalt
N <sub>Org</sub>	Organisch gebundener Stickstoff
N <sub>t</sub>	Gesamtstickstoff
N <sub>verfügbar</sub>	Berechnet aus der Summe NH <sub>4</sub> -N zuzüglich 10 v.H. N <sub>Org</sub> des organischen Düngers (NH <sub>4</sub> -N-Gehalt des organischen Düngers + 0,1*N <sub>Org</sub> -Gehalt des organischen Düngers)
oADF	organische Säure-Detergenz-Faser (beschreibt die Menge von Zellulose und Lignin)

oNDF	organische Neutral-Detergenz-Faser (wie oADF zusätzlich die Menge an Hemizellulose)
oTM	organische Trockenmasse
TM, TS	Trockenmasse bzw. Trockensubstanz
VB	Vegetationsbeginn
XA	Rohasche
XF	Rohfaser
XL	Rohfett
XP	Rohprotein nach Kjeldahl (N-Faktor 6,25)
XS	Stärke nach Ewers
XZ	Reduzierende Zucker

# 1 Einleitung

Die anaerobe Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen, Wirtschaftsdüngern und Co-Substraten zur Erzeugung von Methangas birgt ein erfolgversprechendes Potential zur Reduzierung umweltrelevanter, anthropogener Emissionen. Besonders kann die bei der Biogas-erzeugung entstehende Energie bei schonendem und verantwortungsvollem Ressourcenumgang auch zukünftigen Entwicklungen am Energiemarkt gerecht werden. Hierbei gilt es zur Optimierung sowohl ökonomischer als auch ökologischer Ziele eine optimale Ausnutzung zur Verfügung stehender Ressourcen zu garantieren. Dazu zählt zugleich die fachgerechte Anwendung des nach dem fermentativen Abbau organischer Substanz entstandenen Biogasgärrests zur Minimierung von Nährstoffverlusten aus Biogaskreisläufen. Durch den anaeroben Gärungsprozess kann sich das entstandene vergorene Material verglichen mit dem Eingangssubstrat vor dem mikrobiologischen Abbau oder anderen Wirtschaftsdüngern deutlich unterscheiden.

In ihrer Zusammensetzung unterscheiden sich die Gärreste von dem Eingangssubstrat durch den Abbau von Trockenmasse (TM) (KORIATH, et al. 1985), vorwiegend in einem höheren  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}_\text{T}$ -Quotienten, verringerten Gehalten an organischer Trockenmasse (oTM), höheren pH Werten, engeren C/N Quotienten und reduzierter Viskosität (ASMUS, LINKE und DUNKEL 1988). Der während der fermentativen Abbauprozesse entstehende Gärrest kann anschließend durch Zentrifugalkräfte (Dekanter), Ultrafiltration, Umkehrosmose oder Ionenaustauscher aufbereitet werden. Der nun entstehende Gärrest kann in verschiedenster Weise verwertet werden. Die Verbrennung der festen Phase des Gärrestes zur energetischen Nutzung spielt in Deutschland bisher keine Rolle. Üblich hingegen ist die direkte Anwendung des Gärrestes als organischer Dünger in der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion. Dabei gilt vor allem einer Optimierung der Stickstoffausnutzung ein besonderes Augenmerk.

Stickstoff kommt in organischem Dünger in zwei Formen vor, als organisch gebundener Stickstoff und Ammonium-Stickstoff. Der meiste organische Stickstoff liegt in Form von Proteinen und Nukleinsäuren vor, während der mineralisch verfügbare Stickstoff entweder als  $\text{NH}_4$ -Ion oder freies  $\text{NH}_3$  vorliegt. Zur Optimierung der Stickstoffeffizienz des in Biogasgärresten gebundenen Stickstoffs wurden an mehreren Versuchsstandorten in Bayern Freilandversuche angelegt. Ziel war es zu prüfen wie Biogasgärreste appliziert zu den Kulturarten Wintertriticale, Winterweizen und Silomais wirken. Darüber hinaus wurde die Wirkung von Biogasgärresten auf Dauergrünland sowie einer ortsfesten Fruchtfolge mit den Fruchtfolgegliedern Wintertriticale, Silomais und Weidelgras geprüft. Zur Berechnung der Effizienz des eingesetzten Stickstoffs wurden Düngungssteigerungen mit Biogasgärrest und mineralischem

Dünger an allen Kulturarten geprüft. Die Prüfvarianten zur Düngung mit Biogasgärresten beinhalteten daneben auch variierende Ausbringungstermine, eine Gegenüberstellung der flüssigen und festen Phase eines separierten Biogasgärrests sowie einer Rindergülle und den Vergleich verschiedener Applikationstechniken.

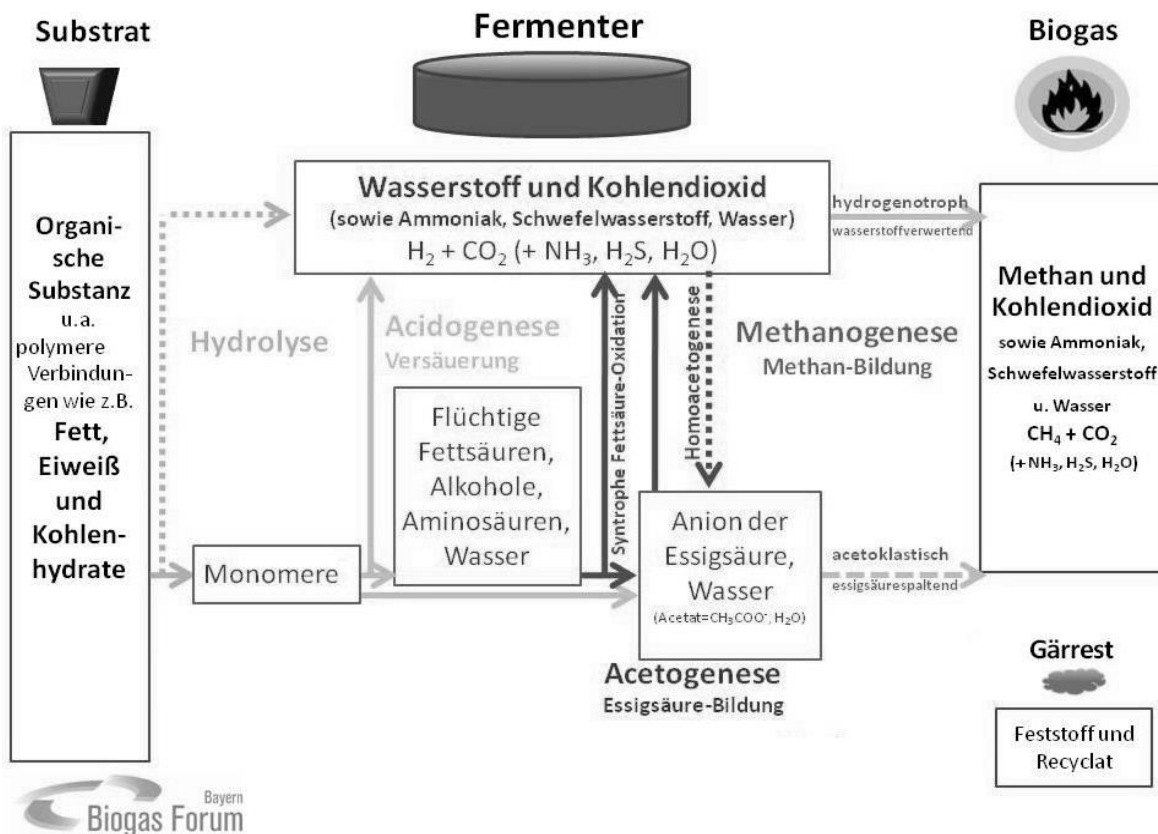
## 2 Stand des Wissens

Biogasgärreste werden in der Landwirtschaft als Nährstofflieferant zur Pflanzenernährung sowie als Humuslieferant eingesetzt. Dabei ergeben sich insbesondere durch die Nutzung von nachwachsenden Rohstoffen in Biogasanlagen Auswirkungen auf den Nährstoff- sowie Kohlenstoffkreislauf der Landwirtschaft (REINHOLD und ZORN 2008). Sich grundlegend ändernde Parameter bei der anaeroben Fermentation sind neben dem C-Abbau während der Methanogenese die Erhöhung des Ammoniumanteiles am Gesamtstickstoffgehalt des Substrates, ein Anstieg des pH-Wertes und der Salzkonzentration sowie eine Verringerung des TS-Gehaltes (WENDLAND 2009). Besonders hervorzuheben ist bei der Biogasgewinnung, dass während des Abbaus organischer Substrate pflanzenbaulich wichtige Nährstoffe nahezu verlustfrei im Biogasgärrest erhalten bleiben (MÖLLER, et al. 2006). Durch die Entnahme von Methan finden sich diese Nährstoffe indes in höheren Konzentrationen im Biogasgärrest wieder. Bisherige Untersuchungen zielten meist auf stoffliche Änderungen des Substrates während der anaeroben Fermentation bzw. der Beschreibung direkter Effekte vorwiegend in Topfversuchen (MESSNER 1988) ab. Aktuelle Forschungsvorhaben beschäftigen sich zunehmend mit der ökologischen Wirkung der Biogasgärrestapplikation insbesondere bezüglich gasförmiger, ammoniakalischer Verluste (GERICKE 2009, QUAKERNACK, et al. 2010).

### 2.1 Biogasgewinnung

Mit der Bereitstellung regenerativer Energieträger wie Biogas können fossile Energiequellen substituiert werden. Während des anaeroben Abbauprozesses fällt Biogas als Hauptprodukt sowie Gärrest als Rest- bzw.- Nebenprodukt an. Bedingung für den anaeroben Abbau von Wirtschaftsdüngern, NawaRo oder Co-Fermentaten ist der Ausschluss von Sauerstoff und Licht, Temperaturen von 20 – 55 °C, pH-Werte zwischen 7 – 8 sowie an die Fermentationstechnik angepasste Wassergehalte (JÄCKEL und MAU 1998). Grundlegend kann der Prozess der anaeroben Fermentation in vier Prozessschritte eingeteilt werden. Zunächst werden in einem ersten Schritt die in den Eingangssubstraten gebundenen hochmolekularen Stoffe wie Fette, Zellulose, Stärke und Eiweiße durch bakterielle Exoenzyme (an der Außenseite der Bakterien angereicherte Enzyme) in wasserlösliche, niedermolekulare Spaltprodukte wie Amino-, Fettsäuren und Zucker (Oligomere, Monomere) zerlegt (PESTA und MEYER-PITTROFF 2002). Dieser Schritt ist die sogenannte Hydrolyse. In einem folgenden zweiten Schritt, der Acidogenese, kommt es zu einer Versäuerung des Fermentes. Dabei werden die im ersten Abbauschritt gebildeten Kohlenstoff – Einfachverbindungen in niedere Fettsäuren (Essig-, Butter-, Propionsäure) abgebaut. Weiterhin entstehen Wasserstoff, Kohlendioxid und

Alkohole. Bei proteinhaltigen Eingangssubstraten (z.B. Raps, Klee gras) können in diesem Prozessschritt aus Schwefelverbindungen für den Prozess indessen toxische Verbindungen wie Schwefelwasserstoff und Ammoniak entstehen (BAUER, LEBUHN und GRONAUER 2009). Der dritte Prozessschritt, die Acetogenese bzw. Essigsäurebildung, führt zu einem weiteren Abbau der Carboxylsäuren und Alkohole zu Essigsäure, Wasserstoff und Kohlendioxid. Im letzten Schritt, der Methanogenese, wird aus der Spaltung von Essigsäure oder der Reduktion von Kohlendioxid mittels Wasserstoff der Hauptbestandteil des Biogases, Methan gebildet. Bedeutsam für das Endprodukt Biogasgärrest ist, dass das ausgefaulte Endsubstrat typischerweise schwer abbaubares organisches Material enthält, eben jene organischen Verbindungen (Lignocellulose-Verbindungen) welche von den Mikrobakterien nicht aufgespalten werden konnten. Zusätzlich enthält das Endprodukt noch die bei der Aufspaltung der organischen Substanz entstehenden Salze.



**Abb. 1:** Schematische Darstellung der Biogasgewinnung mit dem anfallenden Endprodukt Biogasgärrest (SCHIEDER, et al. 2010)

Entscheidendes Kriterium für die eben genannten Eigenschaften des Endproduktes ist eine insgesamt effiziente Prozesskette der anaeroben Fermentation. Da Biogas hauptsächlich aus Methan ( $\text{CH}_4$ ) und Kohlendioxid ( $\text{CO}_2$ ) sowie in geringen Spuren Restgase wie Ammoniak

(NH<sub>3</sub>) und Schwefelwasserstoff (H<sub>2</sub>S) besteht, findet sich das Gros der Nährstoffe im Nebenprodukt Biogasgärrest wieder. Im Detail gibt Tabelle 1 eine Übersicht der Zusammensetzung wichtiger Gaskomponenten im Biogas.

*Tab. 1: Übersicht der Zusammensetzung wichtiger Gaskomponenten im Biogas*

Gaskomponente	Mengenanteil in v. H.	Quelle
CH <sub>4</sub>	40 – 75	(RASI 2009), (WEILAND 2004)
CO <sub>2</sub>	25 – 55	(RASI 2009)
N (NH <sub>3</sub> , N <sub>2</sub> )	< 1	(RASI 2009), (AMON, et al. 2006)
S (H <sub>2</sub> S, Sulfide, Disulfide, Thiole)	50 - 5000 ppm	(RASI 2009), (AMON, et al. 2006)

Neben den in obiger Übersicht aufgeführten Gaskomponenten können noch weitere Stoffe im Biogas enthalten sein. Dazu gehören beispielsweise Siloxane (Si) und Halogene (Cl, Br,...) (ARNOLD 2009). Auf Anlagenebene bedeutet dies folglich einen nahezu kompletten Verbleib der pflanzenbaulich relevanten Nährstoffe in dem Biogasgärrest.

## 2.2 Biogasgärreste

In 2011 waren in Deutschland ca. 7000 Biogasanlagen in Betrieb mit einer elektrischen Leistung von ca. 2700 MW (FNR 2010). Nach eigenen Berechnungen fallen dabei deutschlandweit, moderat gerechnet, jährlich über 55 Mio. m<sup>3</sup> Biogasgärrest an. Aufgrund des voranschreitenden Ausbaues Erneuerbarer Energien insbesondere auch des Biogassektors ist mit weiteren Zunahmen in den kommenden Jahren zu rechnen. In Anbetracht der Humusersatzleistung sowie der Nährstoffgehalte dieses Düngers kann es nur zielgerichtet sein, den anfallenden Biogasgärrest mit den zur Verfügung stehenden betrieblichen Möglichkeiten so einzusetzen, dass externer Zukauf mineralischer Dünger minimiert wird und betriebliche Nährstoffkreisläufe geschlossen werden.

### 2.2.1 Zusammensetzung von Biogasgärresten

In der Literatur werden Biogasgärreste meist mit organischen Düngern wie Rindergülle verglichen. Dabei charakterisieren sich Biogasgärreste vornehmlich durch chemische und physi-



kalische Eigenschaften und deren Auswirkung auf Ausbringung und Pflanzenverfügbarkeit der Nährstoffe sowie deren Hygiene.

Ein Faktor welcher aufgrund der gesteigerten Wahrnehmung bei der Nutzung nachwachsender Rohstoffe in der Öffentlichkeit eine erhebliche Rolle spielt, ist weiterhin die Verminderung von **Geruchsemissionen** durch die Fermentation von Wirtschaftsdüngern. Während des Abbaus der organischen Masse werden geruchsaktive Substanzen sowie organische Säuren deutlich reduziert (ROSCHKE und PLÖCHL 2007) (SCHULZ und EDER 2001).

Ebenso berichten HERSENER, MEIER und DINKEL (2002) von einer **Reduktion der TS-Gehalte** zwischen 41 % und 5 % sowie einer Verminderung flüchtiger Fettsäuren um 63 % bis 92 %. Der Trockenmassegehalt von auf Rindergülle basierenden Biogasgärresten wurde im Rahmen von Untersuchungen durch PÖTSCH (2004) um 44 % erniedrigt. Diese Reduktion der Trockensubstanz hat mehrere positive Effekte zur Folge. Neben einer besseren Pumpfähigkeit (verringertes Energieaufwand) wird zudem von einem schnelleren Eindringen in den Boden sowie einer geringeren Ätzwirkung an Blattoberflächen durch ein schnelleres Abfließen berichtet (GRUBER 2007). Daraus lässt sich wiederum ein vermindertes Risiko der Bildung gasförmiger  $\text{NH}_3\text{-N}$  Verluste ableiten (JUNGBLUTH, BÜSCHER und KRAUSE 2005). Infolge der geringeren Ätzwirkung von Biogasgärresten eignen sich diese auch zur bedarfsnahen Kopfdüngung (BOXBERGER, AMON und WEBER 2002), sofern diese nicht direkt aus dem Fermenter mit den dort vorherrschenden Temperaturen entnommen werden. Die verminderte Ätzwirkung von Biogasgärresten ist neben den niedrigeren TS-Gehalten vor allem auf den Abbau niederer Fettsäuren zurückzuführen (KUHN und DÖHLER 1993).

Zusätzlicher Nutzen der Biogasvergärung ist, dass durch die anaeroben Bedingungen und insbesondere die Temperaturen im Fermenter in Kombination mit der jeweiligen Verweilzeit pathogene Keime sowie Unkrautsamen abgetötet werden können. Die Vorteile des Hygienisierungspotentials von Biogasanlagen sind beispielsweise auch in der Bioabfallverordnung verankert. Bisherige Ergebnisse zeigten für die meisten untersuchten Pathogene bei mesothermen Fermenterbedingungen eine kürzere Überdauerungszeit auf, als die meist für Praxisanlagen angegebenen theoretischen Verweilzeiten. Sofern also die Verweilzeiten ausreichend lange sind sowie eine ordnungsgemäße Prozessführung vorliegt, ist unter mesothermen Bedingungen von phytohygienisch unbedenklichen Biogasgärresten auszugehen (SEIGNER 2009).

In engem Zusammenhang damit steht die durch den Abbau organischer Säuren bedingte Zunahme des pH um ca. 0,6 (PÖTSCH 2004). Aufgrund des von Temperatur sowie **pH-Wert** beeinflussten Dissoziationsgleichgewichtes zwischen Ammonium und Ammoniak im Biogas-

gärrest kommt es bei den in Biogasgärresten üblicherweise höheren pH-Werte zu einem vergrößerten Risiko ammoniakalischer Stickstoffverluste während der Ausbringung. Diese werden jedoch maßgeblich von der vorherrschenden Umgebungstemperatur beeinflusst. Ein Temperaturanstieg von 5 °C erhöht den Gehalt an Ammoniak um ca. zehn Prozent (LOEHR 1977). Freies  $\text{NH}_3$  kommt erst ab pH-Werten von ca. 8 vor, der  $\text{NH}_3$ -Gehalt steigt dann aber überproportional an. Das Gleichgewicht von  $\text{NH}_3$  und  $\text{NH}_4^+$  in wässriger Lösung liegt je nach Temperatur zwischen pH 8,5 – 9,5 (MEISSNER 2004).

Zu beachten ist weiterhin, dass es bei einem Einsatz von schwermetallhaltigen Co-Substraten neben dem Import von Nährstoffen in betriebliche Nährstoffkreisläufe (u.a. auch Schwermetallen) aufgrund des Abbaus von Trockenmasse zu einer **Anreicherung** jener importierten Stoffe kommen (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft 2009). Aufgrund dessen ist bei einem Einsatz von möglicherweise belasteten Eingangssubstraten insbesondere bezüglich Schwermetallen sowie organischen Schadstoffen auf eine Überschreitung von Schadstoffgehalten zu achten. Handelt es sich bei dem Biogasgärrest dabei um einen Bioabfall nach Bioabfallverordnung, so sind die in Deutschland nach Bioabfallverordnung begrenzenden Mengen bei der Aufbringung in Abhängigkeit der Schadstoffgehalte zu beachten (BioAbfV).

### 2.2.2 Stickstoff im Biogasgärrest

Dem im Biogasgärrest gebundenen Stickstoff kommt aus vielerlei Hinsicht besondere Bedeutung zu. Aufgrund der negativen externen Auswirkung von Stickstoffverlusten jeglicher Form, muss der Nährstoffkreislauf Pflanze – Biogasgärrest – Boden möglichst verlustfrei gehalten werden. Die Minimierung der Verluste aus Nährstoffkreisläufen bedeutet zudem einen reduzierten Input an mineralischem Dünger.

Rindergüllen weisen beispielsweise im Mittel nach PÖTSCH (2004) absolute **Nährstoffgehalte** von 3,2 g  $\text{N}_t$  / kg FM bei  $\text{NH}_4\text{-N}$  - Gehalten von 1,4 g / kg FM (n = 1639) auf. Analog dazu enthielten Biogasgärreste, die überwiegend aus Wirtschaftsdünger mit Schwerpunkt Rindergülle fermentiert wurden,  $\text{N}_t$  - Gehalte von 2,63 und  $\text{NH}_4\text{-N}$  - Gehalte von 1,27 g / kg FM (n = 47). Dies spiegelt die leicht höheren Anteile von  $\text{NH}_4\text{-N}$  am Gesamtstickstoff wieder, wobei in diesem Fall beachtet werden muss, dass die hier vorgenommenen Vergleiche nicht den Effekt der in stark variierender Art und Menge eingesetzten Co-Substrate (z.B. NawaRo, Bioabfälle, usw.) beinhalten. Es kann dadurch zu einer Verschiebung der N – Gehalte im Biogasgärrest je nach N – Gehalt des Co-Substrates kommen. Im Vergleich zu Rindergüllen lassen sich niedrigere  $\text{N}_t$  – Gehalte in den Biogasgärresten insbesondere durch die verwendeten Eingangssubstrate beschreiben (ZETHNER, PFUNDTNER und HUMER 2002). Allerdings

kommt es aufgrund der großen Varianz an Gesamtstickstoff im Eingangssubstrat auch zu erheblichen Unterschieden im  $N_t$  - Gehalt der Biogasgärreste, sodass eine Angabe von durchschnittlichen Nährstoffgehalten nicht sinnvoll ist. Diese Schwankungen im  $N_t$ -Gehalt der Eingangssubstrate machen folglich eine präzise Düngeplanung unmöglich (MÖLLER, SCHULZ und MÜLLER 2010). Selbst bei gleichen Eingangssubstraten kann die Stickstoffkonzentration im Erntegut abhängig von den Witterungsbedingung sowie Sorteneigenschaften und dem N-Angebot während der Vegetationsperiode deutlich variieren, wie z.B. bei dem für die Biogasproduktion wichtigen nachwachsenden Rohstoff Silomais (ZIADI, et al. 2008, DWYER, et al. 1994).

Organische Dünger bergen zudem die Gefahrenquelle gasförmiger ammoniakalischer Verluste ( $NH_3^+ - N$ ). Diese Verlustquelle hat insbesondere ökosystemare Bedeutung als beachtliche Quelle atmosphärischer Stickstoffeinträge in naturnahe Ökosysteme. Mit etwa 95 % Anteil an den Ammoniakemissionen ist die Landwirtschaft Hauptemittent (UBA 2002). Aufgrund der relativ kurzen Verweilzeit des emittierten Ammoniaks in der Atmosphäre (ERISMAN und DRAAJERS 1995) können Ammoniakemissionen schon im Umkreis von wenigen Kilometern der Quelle wieder eingetragen werden. Folge können u.a. Versäuerung und Eutrophierung von Ökosystemen sein (FANGMEIER, et al. 2003). Mengemäßig können gasförmige Ammoniakemissionen einen großen Teil der Stickstoffverluste in Nährstoffkreisläufen von Biogasbetrieben ausmachen, sodass auch aus ökonomischer Sicht des Biogasbetriebes ein besonderes Augenmerk der Verminderung gasförmiger Ammoniakverluste gilt. Für die Verluste während der Ausbringung spielt der Ammoniakpartialdruck zwischen der Grenzschicht der Gülleoberfläche und Atmosphäre eine bedeutende Rolle. Technische Möglichkeiten wie sofortige Einarbeitung und Verdünnung können die Ammoniakverluste stark senken (KATZ 1996). Weiterhin kann durch Behandlung des organischen Düngers das Ammoniakverlustrisiko gesenkt werden. Dazu zählen z.B.: Ansäuern (BERG und HÖRNIG 1996), Flockung, Strippung von Ammoniak oder elektrochemische Behandlungsmethoden (HERSENER, MEIER und DINKEL 2002). Durch die während des anaeroben Abbaus zunehmenden Gehalte an Ammonium sowie die steigenden pH-Werte muss von einem erhöhten Risiko an Ammoniakemissionen ausgegangen werden. In der Literatur gibt es teils widersprüchliche Aussagen zu der Ammoniakverlustsituation von fermentierten Gülle. Diese Unterschiede sind sowohl quantitativ als auch qualitativ zumeist auf die verwendete Messmethodik zur Ermittlung der gasförmigen Verluste zurückzuführen, da hier meist in die natürlichen Umweltbedingungen eingegriffen werden muss. So berichten PAIN et al. (1990), MESSNER et al. (1988), LEICK (2003) von einer Verminderung ammoniakalischer Verluste durch Fermentation, während MANNHEIM (1994) sowie REITZ und KUTZBACH (1998) eine Zunahme gasförmiger

Ammoniakverluste messen konnten. Wurde eine erhöhte Ammoniakausgasung nach fermentativer Behandlung der Gülle festgestellt, so wurde eine im Vergleich zu anderen Versuchen geringere TS-Reduktion der Biogasgärreste gemessen, sodass die emissionsmindernden Vorteile niedriger TS-Gehalte hier nicht zu Tragen kommen konnten.

Ein zusätzlicher wichtiger Aspekt bei der Anwendung organischer Dünger ist die Nitratauswaschung ( $\text{NO}_3\text{N}$ ). Aufgrund des höheren Anteiles an sofort pflanzenverfügbarem Stickstoff wird für Biogasgärreste oft ein geringeres oder zumindest gleichbleibendes Nitrat-Verlustpotential als bei Rindergüllen postuliert (SVOBODA, et al. 2009). In einer Studie der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft konnten deutlich niedrigere N-Auswaschungsverluste von Biogasgülle gegenüber konventioneller Gülle abgeleitet werden (JÄKEL und MAU 1999). Allerdings sind bezüglich des Auswaschungspotentials in der Literatur teils widersprüchliche Aussagen zur Wirkung von Biogasgärresten zu finden. So berichten beispielsweise JORGENSEN und PETERSEN (2006) von einer leichten Erhöhung der Nitrat Auswaschung aufgrund höherer mineralischer Stickstoffgehalte.

Bezüglich der allgemeinen N-Wirkung attestieren KIRCHMANN und WITTER (1989) Biogasgärresten aufgrund einer verminderten Kationenaustauschkapazität gegenüber Rohgülle eine insgesamt bessere Stickstoffwirkung.

### 3 Material und Methoden

Zur Überprüfung der Wirkung von Biogasgärresten unter Freilandbedingungen wurden an vier Standorten in Bayern Parzellenversuche angelegt. Die Versuche wurden in den Jahren 2008 bis 2011 durchgeführt. Geprüft werden sollte die Reaktion verschiedener pflanzenbaulich und ökologisch relevanter Einflussgrößen auf die Düngung anaerob fermentierter Substrate unter praxisnahen Bedingungen. Das Hauptaugenmerk in der Versuchsanlage lag hierbei in der Aufklärung der Fragestellungen zu Ausbringungstechnik, -zeitpunkt, -menge und Verteilung des Biogasgärrests. Für die Versuchsdurchführung wurde ein speziell angefertigtes Fass verwendet, mit der Möglichkeit breitflächiger und streifenförmiger (Schleppschlauch und Schleppschuh) Applikation. Zum Einsatz kamen diese Techniken ab dem Frühjahr 2009, bis dahin erfolgte die Ausbringung in Puch mit einer Breitverteiltertechnik mit Pralltellern im Abstand von 25 cm, während in Bayreuth die organischen Dünger streifenförmig mit Gießkannen bzw. breitflächig mittels Schaufeln ausgebracht wurden. An allen Standorten wurden etwa zwei Wochen vor dem geplanten Düngetermin drei Proben des jeweiligen Substrats gezogen und auf  $\text{NH}_4\text{-N}$  - sowie  $\text{N}_t$  - Gehalt untersucht. Diese Vorproben dienten lediglich dazu, für die jeweiligen Fruchtarten mit Hilfe des festgelegten fruchtartspezifischen Düngebedarfes die auszubringenden Mengen an organischem Dünger berechnen zu können. Während der Ausbringung der Biogasgärreste wurden zudem Mischproben in dreifacher Wiederholung gezogen um die tatsächlich ausgebrachten Mengen zu quantifizieren.

#### 3.1 Ausbringungstechnik

Für die Durchführung der Feldversuche wurde ein spezielles Fass zur Ausbringung der flüssigen Wirtschaftsdünger angefertigt. Dieses ermöglichte über seitliche Ausleger mit einer Arbeitsbreite bis drei Meter eine Ausbringung der Biogasgärreste ohne Überfahren der Parzellen. Geprüft wurden die drei Ausbringungstechniken Breitverteilung über ein Verteilerblech, Schleppschlauch- sowie Schleppschuhausbringung (siehe Abb. 2). Die Breitverteilung erfolgte über ein Blech welches den flüssigen organischen Dünger breitflächig auf den Boden abtropfen lässt (Abb. 3). Die lange Flugphase der organischen Partikel, wie sie bei einer Breitverteilung mit Prallkopf und Abstrahlung nach oben gegeben ist, kommt hier nicht vor. Dieses System ist somit eher mit einer Breitverteilung mit Abstrahlung nach unten zu vergleichen.



**Abb. 2:** Breitverteiler-, Schleppschlauch- und Schleppschuhtechnik am Versuchsfass

Die Verteilung mittels Schleppschlauch erfolgte über die direkte Ablage in Streifen mit 25 cm Abstand auf den Boden. Bei der Applikationstechnik Schleppschuh kann mit den angebauten Stahlfedern Druck auf den Boden ausgeübt werden. Je nach Bodencondition kann dadurch der Boden sowie Pflanzenbestand geöffnet werden, um den flüssigen organischen Dünger in den Pflanzenbestand bzw. die Bodenfurche abzulegen. Zur Probenahme während der Ausbringung stand am Fass ein Probenahmehahn zur Verfügung.



**Abb. 3:** Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh von links nach rechts auf Wintergetreide im Frühjahr mittels Versuchsfass appliziert

Die Steuerung der Ausbringmenge erfolgte über ein Drei-Wege-Ventil am Fass. Dieses Ventil wird durch ein Rechenterminal angesteuert. Den Dateninput liefert ein an der Achse des Fasses befindlicher Geschwindigkeitssensor sowie ein magnetisch-induktives-Durchflussmessgerät mit Messumformer (IFC 100 KROHNE Messtechnik GmbH).



**Abb. 4:** Versuchsfass zur Ausbringung der flüssigen Wirtschaftsdünger im Feldversuchswesen

### 3.2 Versuchsaufbau

Sämtliche Versuche wurden vor Versuchsbeginn in Auswertungsgruppen mit jeweils unterschiedlichen Versuchsfragen aufgeteilt. Im Weiteren werden die Auswertungsgruppen der jeweiligen Versuche erläutert.

#### 3.2.1 Versuchsaufbau Wintertriticale (V548)

Als Futtergetreide, welches insbesondere in weniger günstigen Lagen konzentriert angebaut wird, bringt die eher anspruchslose Getreideart Wintertriticale (*Triticosecale*) im Verhältnis zu anderen Getreidearten überdurchschnittliche Erträge. Als Sorte wurde SW Talentro (SW Seed GmbH) gewählt. Standfestigkeit und stabiles Ertragsbildungsvermögen waren ausschlaggebend für die Sortenwahl. Der Versuch mit Wintertriticale (V548) wurde am Standort Puch auf jährlich ortswechselnden Versuchsflächen durchgeführt. Das Triticale wurde im Drillsaatverfahren mit 11 cm Reihenabstand bestellt. Die Ernte erfolgte mit einem für die Ernte von Parzellenversuchen modifizierten reihenunabhängigen Maisvorsatz (siehe Abb. 5). Beerntet wurden die 2,5 m breiten Parzellen im Kerndruschverfahren mit einer Häckselbreite von 1,5 m.



*Abb. 5: Versuchsparzellerernte der Wintertriticale Ganzpflanzensilage*

Die Versuchsanlage entspricht einem univariaten Lateinischen Rechteck. Innerhalb der randomisierten Versuchsglieder wurden Auswertungsgruppen zur gemeinsamen Verrechnung gebildet. Diese Gruppen werden im Folgenden genauer erläutert.

- i) Einfluss der Ausbringungstechnik bei der Düngung mit Biogasgärresten auf Ertragsparameter: Zu den beiden Düngungszeitpunkten bei Vegetationsbeginn und Entwicklungsstadium BBCH 31 wurde ein Pralltellertransportverfahren mit Abstrahlung nach unten, bodennahe Schleppschlauchausbringung und flache Injektion

mittels Schleppschuh auf sechs Versuchsgliedern in vierfacher Wiederholung verglichen. Zur Anwendung kam unbehandelter Biogasgärrest bei einer Aufwandmenge von 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}/\text{ha}$ .

- ii) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: Vier Versuchsglieder wurden mit einem unbehandelten Biogasgärrest mit Rindergülle und separiertem Biogasgärrest (sowohl der festen als auch der flüssigen Phase) behandelt. Die Applikationstechnik erfolgte mittels Schleppschläuchen bei einer Aufwandmenge von 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}/\text{ha}$ .
- iii) Wirkung einer Kombination aus Biogasgärrestdüngung und mineralischem Dünger auf Ertrag und Qualität sowie Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest: Insgesamt 19 Versuchsglieder bezogen sich auf die Fragestellung einer optimalen Mischernährung aus unbehandeltem Biogasgärrest und mineralischem Dünger (*Kalkammonsalpeter*). Die Aufwandmenge des Biogasgärrestes variierte zwischen 50 % und 150 % des festgelegten kulturspezifischen Düngebedarfes (130 kg  $N_{\text{verfügbar}}/\text{ha}$ ). Die 125 % Varianten wurden teilweise, die 150 % Varianten gänzlich aufgrund sonst zu hoher Frachten auf zwei Applikationen zu Vegetationsbeginn und BBCH 31 verteilt. Die Applikation erfolgte mit Schleppschläuchen. Die mineralische Ergänzungsdüngung variierte zwischen 0 – 120 kg N/ha.
- iv) Applikation von Biogasgärrest zu verschiedenen Vegetationsstadien: Es sollte geprüft werden, wie sich eine Aufteilung der Biogasgärrestgaben mit min. Ergänzungsdüngung auswirkt. Zusätzlich wurde ein Versuchsglied zu Vegetationsbeginn mineralisch angedüngt, die Düngung des Biogasgärrests erfolgte erst im 1-Knoten-Stadium jeweils mit Schleppschläuchen bei einer Gesamtaufwandmenge an Gärrest von 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}/\text{ha}$ .
- v) Einfluss einer Düngung mit Biogasgärrest im Herbst auf  $N_{\text{min}}$ -Bodengehalte sowie Ertragsparameter: Geprüft wurde, wie sich eine Düngung mit Gärresten im Herbst auf  $N_{\text{min}}$ -Gehalte im Boden und die Ertragsentwicklung auswirkt. Dies erfolgte sowohl mit unbehandeltem Biogasgärrest als auch mit der separierten festen Phase. Zusätzlich wurde der unbehandelte Biogasgärrest mit einem flüssigen Nitrifikationshemmstoff (ENTEK flüssig®, COMPO GmbH & Co. KG) versetzt. Die im Herbst ausgebrachte Menge orientierte sich an den Vorgaben der DüV mit maximal 40 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  bzw. 80 kg  $N_t$  je ha, wobei der im Herbst ausgebrachte Stickstoff bei der Frühjahrsgabe angerechnet wurde. Die insgesamt ausgebrachte Menge an Biogasgärrest bezog sich wiederum auf 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}/\text{ha}$  mittels Schleppschlauch bzw. Breitverteilung der festen Phase des separierten Gärrestes.



- vi) Wirkung der Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen zu Biogasgärrest auf TM-Ertrag und N-Entzug: Aufgrund der erhöhten Ammoniumgehalte im Biogasgärrest wurden zusätzlich zu unbehandeltem Gärrest Varianten mit PIADIN® (1H-1,2,4 Triazol und 3- Methylpyrazol; skw Stickstoffwerke Piesteritz GmbH) und ENTEC flüssig® (3,4-Dimethylpyrazolphosphat; COMPO GmbH & Co. KG), jeweils mit und ohne mineralische Ergänzungsdüngung, angelegt. Die Aufwandmengen betragen 10 l/ha ENTEC flüssig® bzw. 5 l/ha PIADIN®. Die Zugabe des Nitrifikationsinhibitors erfolgte nach Kalkulation der benötigten Menge direkt in das Fass.
- vii) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrests: Um Mineraldüngeräquivalente berechnen und die Stickstoffwirkung der organischen Dünger bestimmen und vergleichen zu können, wurde auf insgesamt sieben Versuchsgliedern mineralischer Dünger zwischen 0 – 180 kg N/ha als KAS gedüngt.

Der kulturspezifische Düngebedarf für den Standort Puch wurde auf 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}$  festgelegt. Bodenbearbeitung, Saat und Pflanzenschutz wurden nach ortsüblicher Praxis durchgeführt. Über die gesamte Versuchsfläche wurden 100 kg Kieserit/ha (25 % MgO wasserlösliches Magnesiumoxid und 20 % S wasserlöslicher Schwefel) zur Sicherstellung der Magnesium- und Schwefelernährung gedüngt. Die Grundnährstoffe Phosphor und Kalium wurden je nach Höhe der organischen Düngung und der damit einhergehenden P und K-Zufuhr in Höhe von 40 – 100 kg  $P_2O_5$ /ha und 100 – 200 kg  $K_2O$ /ha ausgeglichen. In Tabelle 2 werden die Versuchsglieder detailliert dargestellt.

**Tab. 2:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V548 Wintertriticale GPS in Puch. \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Ausbringungszeitpunkt*			Min. Düngung kg N/ha		
			Herbst	VB	BBCH 31	VB	BBCH 31	BBCH 39
Ausbringungstechnik	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	Rindergülle	0	100	0	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	100	0	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	50	50	0	0	0
org. Dünger	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	0	100	0	0	0	0
org. Dünger / Herbstgabe	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	50	50	0	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	verdünnter Gärrest (1:1)	0	100	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	30	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	45	45	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	60	60	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	75	75	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	30	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	45	45	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	60	60	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	125	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	125	0	0	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	75	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	75	30	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	30	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	30	30	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	50	40	0
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	30	0	0
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	50	15	15	0
Herbstgabe (ENTEC)	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	50	50	0	0	0	0
Herbstgabe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	50	50	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 ENTEC	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 ENTEC	0	0	30	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 PIADIN	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 PIADIN	0	0	30	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	0	0	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	55	35	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	75	45	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	90	60	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	60	90	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	100	80	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	80	60	40

### 3.2.2 Versuchsaufbau Winterweizen (V549)

Winterweizen (*Triticum aestivum L.*) ist, bezogen auf die Produktionsmenge, nach Mais und Reis die weltweit wichtigste Getreideart und nimmt den größten Anbauflächenumfang ein (faostat 2008). Die Düngungsversuche mit Biogasgärresten zu Winterweizen (V549) wurden an den beschriebenen Standorten in Puch und Bayreuth durchgeführt. Für beide Standorte wurde die Sorte Cubus (KWS LOCHOW GmbH) aufgrund dessen Anbaueignung für alle Lagen Bayerns gewählt. Der Winterweizen wurde im Drillsaatverfahren mit 11 cm Reihenabstand bestellt. Beerntet wurden die 2,5 m breiten Parzellen in Puch im Kerndruschverfahren mit einer Erntebreite von 1,5 m. In Bayreuth wurden die 1,5 m breiten Parzellen komplett beerntet. Die organisch gedüngten Parzellen wurden als Doppelparzellen (2 mal 1,5 m) auf jährlich wechselnder Fläche angelegt, wobei deren Mittelwert jeweils in eine Wiederholung einfluss.

Die Versuchsanlage entspricht einem univariaten Lateinischen Rechteck. Das Lateinische Rechteck bestand seinerseits aus mehreren Versuchsblöcken. Diese Gruppen werden im Folgenden genauer erläutert.

- i) Einfluss der Ausbringungstechnik bei der Düngung mit Biogasgärresten auf Ertragsparameter: Zu den beiden Düngungszeitpunkten bei Vegetationsbeginn und Entwicklungsstadium BBCH 31 wurde ebenso wie zu Wintertriticale ein Prallteller-ausbringungsverfahren mit Abstrahlung nach unten, bodennahe Schleppschlauchausbringung und flache Injektion mittels Schleppschuh auf sechs Versuchsgliedern in vierfacher Wiederholung verglichen. Zur Anwendung kam unbehandelter Biogasgärrest bei einer Aufwandmenge von 130 kg N<sub>verfügbar</sub>/ha.
- ii) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: An vier Versuchsgliedern kamen unbehandelter Biogasgärrest, Rindergülle, Biogasgärrest separiert flüssig und Biogasgärrest separiert fest zum Einsatz. Die Ausbringtechnik erfolgte mittels Schleppschläuchen bei einer Ausbringmenge von 130 kg N<sub>verfügbar</sub>/ha, die Ausbringung der separiert festen Phase erfolgte manuell mit Schaufeln.
- iii) Wirkung einer Kombination aus Biogasgärrestdüngung und mineralischem Dünger auf Ertrag und Qualität sowie Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest: An insgesamt 19 Versuchsgliedern wurde die Fragestellung einer optimalen Mischernährung aus unbehandeltem Biogasgärrest und mineralischem Dünger (*Kalkammonsalpeter*) erörtert. Hierbei variierte die Aufwandmenge des Biogasgärrestes zwischen 50 % und 150 % des festgelegten kulturspezifischen Düngebedarfes (130 kg N<sub>verfügbar</sub>/ha), wobei wiederum die 125 % Varianten teilweise und die 150 % Varianten gänzlich auf

die Termine Vegetationsbeginn und BBCH 31 verteilt wurden. Die mineralische Ergänzungsdüngung variierte zwischen 0 – 150 kg N/ha. Der Biogasgärrest wurde mit Schleppschläuchen appliziert.

- iv) Applikation von Biogasgärrest zu verschiedenen Vegetationsstadien: Es wurde geprüft wie sich eine Aufteilung der org. Düngung mit min. Ergänzungsdüngung zu den Biogasgärrestgaben (VB, BBCH 31) verhält. Ferner wurden zwei Versuchsglieder zu Vegetationsbeginn mineralisch gedüngt während die Düngung mit Biogasgärresten zu BBCH 31 erfolgte. Die organische Düngung erfolgte jeweils mit Schleppschläuchen bei einer Gesamtaufwandmenge an Biogasgärrest von 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}$ /ha.
- v) Einfluss einer Düngung mit Biogasgärrest im Herbst auf  $N_{\text{min}}$ -Bodengehalte sowie Ertragsparameter: Im Herbst wurden zwei Versuchsglieder nach der Aussaat des Winterweizens mit unbehandeltem Biogasgärrest als auch mit der separierten festen Phase gedüngt. Der unbehandelte Biogasgärrest wurde in einem weiteren Versuchsglied mit einem flüssigen Nitrifikationshemmstoff (ENTEC flüssig®, COMPO GmbH & Co. KG) ausgebracht. Dabei wurden im Herbst maximal 40 kg  $NH_4$ -N bzw. 80 kg  $N_t$  je ha ausgebracht, wobei der im Herbst ausgebrachte Stickstoff von der im Frühjahr applizierten Menge abgezogen wurde. Insgesamt wurden 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}$ /ha Biogasgärrest mittels Schleppschlauch bzw. Breitverteilung des separierten festen Gärrestes gedüngt.
- vi) Wirkung der Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen zu Biogasgärrest auf TM-Ertrag und N-Entzug: Neben den Versuchsgliedern mit unbehandeltem Biogasgärrest wurde bei vier Versuchsgliedern (drei in Puch) PIADIN® (1H-1,2,4 Triazol und 3- Methylpyrazol; skw Stickstoffwerke Piesteritz GmbH) oder ENTEC flüssig® (3,4-Dimethylpyrazolphosphat; COMPO GmbH & Co. KG) dem unbehandeltem Biogasgärrest zugesetzt. Zwei Varianten erhielten zusätzlich eine mineralische Düngergabe. Die Aufwandmengen der eingesetzten NI betragen jeweils 10 l/ha ENTEC flüssig® bzw. 5 l/ha PIADIN®.
- vii) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrests: Sieben Versuchsglieder wurden mit rein mineralischer Düngung (*Kalkammonsalpeter*) zwischen 0 – 240 kg N/ha angelegt. Diese dienten als Referenz zum Vergleich der Wirkung des über Biogasgärrest applizierten Stickstoffs.

Der kulturspezifische Düngebedarf für die beiden Standorte wurde auf 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}$ /ha festgelegt. Bodenbearbeitung, Saat und Pflanzenschutz wurden nach ortsüblicher Praxis

durchgeführt. Über die gesamte Versuchsfläche wurden 100 kg Kieserit/ha (25 % MgO wasserlösliches Magnesiumoxid und 20 % S wasserlöslicher Schwefel) zur Sicherstellung der Magnesium- und Schwefelernährung gedüngt. Die Grundnährstoffe Phosphor und Kalium wurden je nach Höhe der org. Düngung und der einhergehenden P bzw. K-Zufuhr zwischen 50 – 140 kg  $P_2O_5$ /ha und 80 – 200 kg  $K_2O$ /ha ausgeglichen. In Tabelle 3 werden die Versuchsglieder detailliert dargestellt.

**Tab. 3:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V549 Winterweizen in Puch und Bayreuth.  
 \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Ausbringungszeitpunkt*			Min. Düngung kg N/ha		
			Herbst	VB	BBCH 31	VB	BBCH 31	BBCH 39
Ausbringungstechnik	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	Rindergülle	0	100	0	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	100	0	0	0	0
Gabenverteilung	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	50	50	0	0	0
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	50	0	0	0
org. Dünger	Schleppschlauch	verdünnter Gärrest (1:1)	0	100	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	30	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	0	45	45
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	30	45	45
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	0	40	55	55
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	30	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	45	45
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	30	45	45
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	125	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	125	0	0	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	75	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	75	75	0	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	0	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	0	30	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	62,5	62,5	0	45	45
Herbstgabe	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	50	50	0	0	0	0
org. Dünger	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	0	100	0	0	0	0
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	30	0	30
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	60	0	30
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	50	30	0	30
Gabenverteilung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	50	30	30	30
Herbstgabe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	50 ENTEC	50	0	0	0	0
Herbstgabe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	50	50	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 ENTEC	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 ENTEC	0	0	30	30
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 PIADIN	0	0	0	0
Nitrifikationshemmstoffe	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100 PIADIN	0	0	30	30
min. Düngung	0	0	0	0	0	0	0	0
min. Düngung	0	0	0	0	0	40	30	20
min. Düngung	0	0	0	0	0	50	40	30
min. Düngung	0	0	0	0	0	55	50	45
min. Düngung	0	0	0	0	0	60	60	60
min. Düngung	0	0	0	0	0	70	70	70
min. Düngung	0	0	0	0	0	80	80	80

### 3.2.3 Versuchsaufbau Silomais (V551)

Für die Produktion von Biomasse zur Vergärung in Biogasanlagen ist der Anbau von Silomais (*Zea mays L.*) aufgrund der hohen Methanhektarerträge ein wichtiges Substrat (VETTER A. 2007, MÜLLER-LANGER F. 2009). Der Nutzung des Biogasgärrestes zu Mais kommt aufgrund der guten Verwertung der organischen Dünger durch Mais (MAIDL, STICKSEL und VALTA 1999) sowie des Ausbringungszeitraumes im Frühjahr weiterhin eine besondere Bedeutung zu. Für die jährlich ortswechselnden Parzellenversuche in Puch und Guttenthau wurden die Sorten ES Paroli (EURALIS Saaten GmbH, S 260) in Puch bzw. Ronaldinio (KWS Mais GmbH, S 240) gewählt. Auf den Parzellen wurden je vier Reihen mit 7 m Länge gesät, wobei nur die zwei inneren Reihen zur Versuchsauswertung beerntet wurden. Auch für die Silomaisversuche wurden Auswertungsgruppen vierfach wiederholt gebildet. Geprüft wurden:

- i) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: Rindergülle, festes- und flüssiges Separat eines Biogasgärrests und unbehandelter Biogasgärrest wurden jeweils sofort bzw. nach 24 h eingearbeitet. Für die Einarbeitung wurde eine Kreiselegge verwendet, im ersten Versuchsjahr wurde in Bayreuth mit einer Saattbettkombination eingearbeitet.
- ii) Einfluss des Einarbeitungszeitpunkts nach der Applikation von Biogasgärrest auf Ertrag und Qualität: Unbehandelter Biogasgärrest wurde vor der Maissaat mittels Breitverteilung ausgebracht und unmittelbar nach Applikation (innerhalb einer Stunde), 3 h und 24 h nach Ausbringung eingearbeitet.
- iii) Wirkung der Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen zu Biogasgärrest auf TM-Ertrag und N-Entzug: Auf zwei Versuchsgliedern wurde der Biogasgärrest bereits im Frühjahr ausgebracht. Verglichen wurde eine Ausbringung mit/ohne Nitrifikationsinhibitor im Frühjahr sowie mit/ohne Nitrifikationsinhibitor unmittelbar vor der Saat. Als Aufwandmengen wurden 10 l/ha ENTEC flüssig® dem Biogasgärrest zu dosiert.
- iv) Applikation von Biogasgärrest zu verschiedenen Vegetationsstadien: Sowohl unbehandelter als auch separiert flüssiger Biogasgärrest wurde unmittelbar vor der Saat als auch zu Vegetationsstadium BBCH 17 – 32 (max. Höhe des Mais ein Meter) gedüngt. Angewandt wurden bei der Düngung in den Bestand die Ausbringungstechniken Schleppschlauch sowie Schleppschuh.
- v) Wirkung einer Kombination aus Biogasgärrestdüngung und mineralischem Dünger auf Ertrag und Qualität sowie Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest: Eine Kombinationsdüngung aus Biogasgärrest und mineralischem Dünger (*Kalkammonsalpeter*), eine Variation der org. Düngermenge zwischen 50 % - 150 % des kulturspezifischen

Düngebedarfes sowie Versuchsglieder mit rein mineralischer Düngung wurden zusätzlich angelegt.

- vi) Einfluss einer Düngung mit Biogasgärrest zu einer Vorfrucht im Herbst auf  $N_{\min}$ -Bodengehalte sowie Ertragsparameter: Am Standort Puch waren ferner vier Versuchsglieder, die im Herbst mit Rübsen (*Brassica rapa*) als Zwischenfrucht begrünt wurden. Die Düngergaben erfolgten im Herbst sowie im zeitigen Frühjahr. Die Vorfrucht wurde im Frühjahr nach Applikation des Biogasgärrests mit wendender Bodenbearbeitung umgebrochen. Eine detaillierte Übersicht findet sich in Tabelle 4.
- vii) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrest: Rein mineralische Düngervarianten (*Kalkamonsalpeter*) sowie eine ungedüngte Nullvariante wurde in sieben Stufen zwischen 0 – 240 kg N/ha angelegt.

Der kulturspezifische Düngebedarf für den Silomais wurde auf 130 kg  $N_{\text{verfügbar}}$  festgelegt. Bodenbearbeitung, Saat und Pflanzenschutz wurden nach ortsüblich optimaler Praxis durchgeführt. Über die gesamte Versuchsfläche wurden 100 kg Kieserit/ha (25 % MgO wasserlösliches Magnesiumoxid und 20 % S wasserlöslicher Schwefel) zur Sicherstellung der Magnesium- und Schwefelernährung gedüngt. Die Grundnährstoffe Phosphor und Kalium wurden je nach Höhe der org. Düngung und der damit einhergehenden P- bzw. K-Zufuhr zwischen 50 – 130 kg  $P_2O_5$ /ha und 100 – 200 kg  $K_2O$ /ha ausgeglichen.



**Tab. 4:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V551 Silomais in Bayreuth und Puch.  
 \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Org. Düngung in v. H. des Bedarfs				min. Düngung kg N/ha	
			Herbst	Frühjahr	Vor Saat	BBCH 17-32	Vor Saat	BBCH 17-32
Einarbeitung nach 24 h	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Einarbeitung nach 24 h	Breitverteilung	Rindergülle	0	0	100	0	0	0
Einarbeitung nach 24 h	Breitverteilung	Gärrest separiert flüssig	0	0	100	0	0	0
Einarbeitung nach 24 h	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	0	0	100	0	0	0
sofortige Einarbeitung	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
sofortige Einarbeitung	Breitverteilung	Rindergülle	0	0	100	0	0	0
sofortige Einarbeitung	Breitverteilung	Gärrest separiert flüssig	0	0	100	0	0	0
sofortige Einarbeitung	Breitverteilung	Gärrest separiert fest	0	0	100	0	0	0
Einarbeitung nach 3 h	Breitverteilung	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Frühjahrsdüngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	50	50	50	0	0
Reihendüngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Reihendüngung	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	50	50	0	0
Reihendüngung	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Reihendüngung	Schleppschuh	unbehandelter Gärrest	0	0	50	50	0	0
Reihendüngung	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	0	100	0	0	0
Reihendüngung	Schleppschlauch	Gärrest separiert flüssig	0	0	50	50	0	0
Reihendüngung	Schleppschuh	Gärrest separiert flüssig	0	0	100	0	0	0
Reihendüngung	Schleppschuh	Gärrest separiert flüssig	0	0	50	50	0	0
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	50	0	0	0
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	75	0	0	0
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	30	0
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	30	30
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	30	60
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	125	0	0	0
BGR und min. Düngung	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	150	0	0	0
Nitrifikationsinhibitor	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	0	100 ENTEC	0	0	0
Nitrifikationsinhibitor	sof. Eingearbeitet	unbehandelter Gärrest	0	100 ENTEC	0	0	0	0
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	0	0
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	30	30
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	30	60
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	60	60
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	90	60
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	120	60
min. Düngung	-	-	0	0	0	0	150	60
Vorfrucht Rübse (Puch)	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	50	50	0	0	0
Vorfrucht Rübse (Puch)	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	0	100	0	0	0
Vorfrucht Rübse (Puch)	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	50	0	50	0	0	0
Vorfrucht Rübse (Puch)	Schleppschlauch	unbehandelter Gärrest	0	100	0	0	0	0

### 3.2.4 Versuchsaufbau Grünland Puch (V552)

Insbesondere in den voralpinen Lagen Bayerns kommt dem Grünland eine besondere Bedeutung zu. Durch den Rückgang sowie eine beständige Steigerung der Milchleistung in den letzten Jahren stehen zunehmend Grünlandflächen zur Verwertung in Biogasanlagen zur Verfügung. Der ortsfeste Grünlandversuch wurde standorttypisch mit vier Schnitten pro Jahr beerntet. Die Düngergaben erfolgten in Abhängigkeit der Variante zu Vegetationsbeginn sowie jeweils nach den Schnitten. Insgesamt wurde 220 kg N<sub>t</sub>/ha als Düngebedarf festgelegt. Alle Versuchsglieder erhielten zum ersten und dritten Aufwuchs 50 kg Kieserit/ha (25 % MgO wasserlösliches Magnesiumoxid und 20 % S wasserlöslicher Schwefel). Phosphor und Kalium wurde bei den mineralisch gedüngten Varianten ausgeglichen (50 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha und 100 kg K<sub>2</sub>O/ha). Die Versuchsglieder wurden als univariates Lateinisches Rechteck angelegt mit folgenden Varianten:

- i) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: Verglichen wurden neben dem unbehandelten Biogasgärrest ein separiert flüssiger Biogasgärrest und eine Rindergülle. Aufgeteilt wurden die insgesamt jährlich applizierten 220 kg N<sub>t</sub>/ha jeweils gleichmäßig auf eine Frühjahrsgabe sowie nach den ersten drei Schnitten mittels Breitverteilung.
- ii) Einfluss einer Düngung mit Biogasgärrest im Herbst auf Ertrag und Qualität von Grünland: Anstelle der Düngung im Frühjahr zum ersten Schnitt, wurde der Biogasgärrest im Herbst Ende Oktober appliziert. Die im Herbst applizierte Menge Biogasgärrest wurde im Frühjahr gestrichen und erst der zweite Schnitt wieder gedüngt. Als Vergleich diente ein Versuchsglied, das in selbiger Höhe, jedoch im Frühjahr mit Biogasgärrest gedüngt wurde.
- iii) Effekt einer Verdünnung des organischen Düngers mit Wasser auf Ertrag und Qualität von Grünland: Varianten mit Biogasgärrest und Rindergülle wurden im Verhältnis 1:1 mit Wasser verdünnt und im Frühjahr sowie nach den ersten drei Schnitten mit Schleppschlauchtechnik ausgebracht. Der verdünnte Biogasgärrest wurde zusätzlich mit Schleppschuhtechnik ausgebracht. Hierbei ging es darum, den Einfluss des Trockensubstanzgehalts sowie Infiltrationseigenschaften zu prüfen.
- iv) Einfluss der Ausbringungstechnik bei der Düngung mit Biogasgärresten auf Ertragsparameter: Biogasgärrest wurde mit den Ausbringungstechniken Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh im Frühjahr sowie nach den ersten drei Schnitten ausgebracht. Alle Gaben erfolgten jeweils mit derselben Technik. Insgesamt wurden die festgelegten 220 kg N<sub>t</sub>/ha appliziert.

- v) Wirkung einer Kombination aus Biogasgärrestdüngung und mineralischem Dünger auf Ertrag und Qualität sowie Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest: Die Aufwandmenge des Biogasgärrestes variierte zwischen 75 % und 150 % des festgelegten kulturspezifischen Düngebedarfes (220 kg N/ha). Ergänzend wurden zu den 100 % Varianten zwischen 60 – 180 kg KAS (*Kalkammonsalpeter*), aufgeteilt auf die vier Schnitte, ausgebracht. Die Biogasgärrestapplikation erfolgte mit Schleppschläuchen.
- vi) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrests: Auf insgesamt sechs Versuchsgliedern wurde mineralischer Dünger (*Kalkammonsalpeter*) zwischen 0 – 300 kg N/ha zu den vier Aufwüchsen gedüngt. Beinhaltet ist ein Versuchsglied ohne Stickstoffdüngung.

**Tab. 5:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V552 Grünland in Puch. \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung angegeben in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Herbst	Frühjahr		nach 1. Schnitt		nach 2. Schnitt		nach 3. Schnitt	
			Org.	Org.	Min.	Org.	Min.	Org.	Min.	Org.	Min.*
<b>Herbstdüngung</b>	Breitverteilung	unbehandelter Biogasgärrest	25	0	0	25	0	25	0	25	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	Rindergülle	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	Biogasgärrest separiert flüssig	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Verdünnung</b>	Breitverteilung	Biogasgärrest verdünnt 1:1	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Verdünnung</b>	Breitverteilung	Rindergülle verdünnt 1:1	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Ausbringungstechnik</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Ausbringungstechnik</b>	Schleppschuh	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>Verdünnung</b>	Schleppschuh	Biogasgärrest verdünnt 1:1	0	25	0	25	0	25	0	25	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	18,75	0	18,75	0	18,75	0	18,75	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	15	25	15	25	15	25	15
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	30	25	30	25	30	25	30
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	45	25	45	25	45	25	45
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	31,25	0	31,25	0	31,25	0	31,25	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	37,5	0	37,5	0	37,5	0	37,5	0
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	15	0	15	0	15	0	15
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	30	0	30	0	30	0	30
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	45	0	45	0	45	0	45
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	60	0	60	0	60	0	60
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	75	0	75	0	75	0	75

## 3.2.5 Versuchsaufbau Grünland Bayreuth (V553)

Bis auf wenige Änderungen entspricht der Versuch zur Biogasgärrestdüngung in Bayreuth demjenigen in Puch. Allerdings wurden in Bayreuth aufgrund der standorttypischen Gegebenheiten jährlich lediglich drei Aufwüchse geerntet. Die Grunddüngung mit Phosphor und Kalium wurde bei den mineralisch gedüngten Varianten mit 40 kg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/ha und 80 kg K<sub>2</sub>O/ha jeweils zum ersten und dritten Aufwuchs ausgeglichen. Als Düngbedarf wurden aufgrund der niedrigeren N-Entzüge 150 kg N<sub>t</sub>/ha als 100 % Variante festgelegt. Die Versuchsglieder können Tabelle 6 entnommen werden.

**Tab. 6:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu Versuch V553 Grünland in Bayreuth. \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngedarfes; mineralische Düngung in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Herbst	Frühjahr		nach 1. Schnitt		nach 2. Schnitt	
			Org.	Org.	Min.	Org.	Min.	Org.	Min. *
<b>Herbstdüngung</b>	Breitverteilung	unbehandelter Biogasgärrest	33	0	0	33	0	33	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	0	33	0	33	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	Rindergülle	0	33	0	33	0	33	0
<b>Org. Dünger</b>	Breitverteilung	Biogasgärrest separiert flüssig	0	33	0	33	0	33	0
<b>Verdünnung</b>	Breitverteilung	Biogasgärrest verdünnt 1:1	0	33	0	33	0	33	0
<b>Verdünnung</b>	Breitverteilung	Rindergülle verdünnt 1:1	0	33	0	33	0	33	0
<b>Ausbringungstechnik</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	0	33	0	33	0
<b>Ausbringungstechnik</b>	Schleppschuh	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	0	33	0	33	0
<b>Verdünnung</b>	Schleppschuh	Biogasgärrest verdünnt 1:1	0	33	0	33	0	33	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	25	0	25	0	25	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	15	33	15	33	15
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	30	33	30	33	30
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	33	45	33	45	33	45
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	41,6	0	41,6	0	41,6	0
<b>BGR und min. Düngung</b>	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	0	50	0	50	0	50	0
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	0	0	0	0	0
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	15	0	15	0	15
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	30	0	30	0	30
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	45	0	45	0	45
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	60	0	60	0	60
<b>Min. Düngung</b>	-	-	0	0	75	0	75	0	75

### 3.2.6 Versuchsaufbau Dauerversuch (V554)

Um Effekte der Langzeitwirkung aus der Düngung mit Biogasgärresten prüfen zu können, wurde an den beschriebenen Standorten Puch, Bayreuth und Landsberg ein ortsfester Versuch angelegt. Der ortsfeste Versuch sollte einer intensiven Biogasfruchtfolge mit dem Ziel der Gewinnung maximaler Trockenmasseerträge entsprechen. Die Fruchtfolgeglieder der zweijährigen Fruchtfolge bestanden aus Silomais (*Zea mays L.*), Wintertriticale (*Triticosecale*) und Deutschem Weidelgras (*Lolium perenne*). Es wurden dieselben Sorten wie auch in den ortswechselnden Versuchen eingesetzt. Der kulturspezifische Düngebedarf für Silomais und Wintertriticale wurde auf 130 kg N<sub>verfügbar</sub>, bzw. für das Weidelgras 100 kg N<sub>verfügbar</sub> festgelegt. Bodenbearbeitung, Saat und Pflanzenschutz wurden nach ortsüblich optimaler Praxis durchgeführt. Über die gesamte Versuchsfläche wurden 100 kg Kieserit/ha (25 % MgO wasserlösliches Magnesiumoxid und 20 % S wasserlöslicher Schwefel) zur Sicherstellung der Magnesium- und Schwefelernährung gedüngt. Die Grundnährstoffe Phosphor und Kalium wurden je nach Höhe der org. Düngung und der damit einhergehenden P bzw. K-Zufuhr ausgeglichen. Es wurden folgende Versuchsglieder geprüft:

- i) Einfluss der Ausbringungstechnik bei der Düngung mit Biogasgärresten auf Ertragsparameter: Vergleich zwischen den Ausbringungstechniken Schleppschlauch, Breitverteilung und Schleppschuh bei der Düngung mit Biogasgärrest
- ii) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: Die org. Dünger Rindergülle, Biogasgärrest separiert flüssig, Biogasgärrest separiert fest und unbehandelter Biogasgärrest wurden bei identischer Ausbringungsmenge an N<sub>verfügbar</sub> mit Schleppschläuchen appliziert. Verglichen wurde deren Wirkung auf N-Entzug, TM-Ertrag und Qualitätsparameter.
- iii) Wirkung einer Kombination aus Biogasgärrestdüngung und mineralischem Dünger auf Ertrag und Qualität sowie Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest: Der ausgebrachte Biogasgärrest wurde in einer Aufwandmenge zwischen 50 % - 150 % ausgebracht. Zusätzlich wurde mineralischer Dünger in Höhe von 30 - 120 kg N/ha gedüngt.
- iv) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrests: Insgesamt sechs Versuchsglieder wurden ausschließlich mit mineralischem Dünger bei variierender Aufwandmenge von 0 – 180 kg N/ha gedüngt. Diese beinhalten auch ein Versuchsglied ohne Stickstoffdüngung.

**Tab. 7:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu ortsfestem Dauerversuch V554 in Puch, Landsberg und Bayreuth. \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung in kg N/ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Menge org. Dünger (i. v. H.)	min. Düngung					
				Silomais		Wintertriticale		Weidelgras (Zwischenfrucht)	
				Vor Saat	BBCH 17-32	VB	BBCH 32	Vor Saat	Nach 1. Schnitt
Org. Dünger	Schleppschlauch	Rindergülle	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	Biogasgärrest separiert flüssig	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Breitverteilung	Biogasgärrest separiert fest	100	0	0	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Breitverteilung	unbehandelter Biogasgärrest	100	0	0	0	0	0	0
Ausbringungstechnik	Schleppschuh	unbehandelter Biogasgärrest	100	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	50	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	75	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	100	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	100	30	0	0	30	0	30
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	100	30	30	30	30	0	60
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	100	30	60	60	45	30	60
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	100	60	60	60	60	60	60
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	125	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	150	0	0	0	0	0	0
Min. Düngung	-	-	0	0	0	0	0	0	0
Min. Düngung	-	-	0	30	30	30	30	30	30
Min. Düngung	-	-	0	30	60	55	35	45	45
Min. Düngung	-	-	0	60	60	75	45	60	60
Min. Düngung	-	-	0	90	60	90	60	75	75
Min. Düngung	-	-	0	120	60	100	80	90	90

### 3.2.7 Versuchsaufbau Dauerversuch (V554S)

An dem Standort in Steinach wurde ebenfalls ein ortsfester Versuch angelegt. Die Fruchtfolge entspricht derjenigen in V554. Da in Steinach bereits vorhandene Versuchstechnik eingesetzt wurde, musste hier auf die Ausbringungstechnik mit Schleppschuh verzichtet werden. Stattdessen wurden zwei Nitrifikationsinhibitoren (1H-1,2,4-Triazol + 3-Methylpyrazol; 3,4-Dimethylpyrazolphosphat) eingesetzt. Zusätzlich kamen aufgrund regionaler Verfügbarkeit Biogasgärreste aus insgesamt vier Biogasanlagen zum Einsatz. Die Versuchsglieder werden im Folgenden erläutert:

- i) Stickstoffeffizienz verschiedener organischer Dünger im Vergleich: Verglichen wurden neben Rindergülle vier Biogasgärreste aus verschiedenen Biogasanlagen sowie ein separiert fester Biogasgärrest auf deren Stickstoffwirkung.
- ii) Wirkung einer Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest auf Ertrag und Qualität: Die ausgebrachte Menge eines der vier Biogasgärreste wurde in der Aufwandmenge zwischen 50 % - 150 % variiert.
- iii) Wirkung der Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen zu Biogasgärrest auf TM-Ertrag und N-Entzug: In jeweils einem Versuchsglied wurde Biogasgärrest mit PIADIN® (1H-1,2,4 Triazol und 3- Methylpyrazol; skw Stickstoffwerke Piesteritz GmbH) bzw. ENTEC flüssig® (3,4-Dimethylpyrazolphosphat; COMPO GmbH & Co. KG) appliziert. Die Aufwandmengen des den Biogasgärresten hinzu dosierten NI waren 10 l/ha ENTEC flüssig® bzw. 5 l/ha PIADIN®.
- iv) Düngungssteigerung mit ausschließlich mineralischem Dünger als Referenz zur Stickstoffwirkung des Biogasgärrests: Mineralischer Dünger wurde in einer Aufwandmenge von 0 – 180 kg N/ha gedüngt. Diese Auswertungsgruppe beinhaltet auch ein Versuchsglied ohne Stickstoffdüngung.

**Tab. 8:** Darstellung der einzelnen Versuchsglieder zu ortsfestem Dauerversuch V554S in Steinach.  
 \*Organische Düngung angegeben in v.H. des kulturspezifischen Düngebedarfes; mineralische Düngung in kg N / ha

Stufenbezeichnung	Technik	Gärrest	Menge org. Dünger (i. v. H.)	min. Düngung					
				Silomais		Wintertriticale		Weidelgras (Zwischenfrucht)	
				Vor Saat	BBCH 17-32	VB	BBCH 32	Vor Saat	Nach 1. Schnitt
Org. Dünger	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 2	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 3	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 4	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	Rindergülle	100	0	0	0	0	0	0
Org. Dünger	Schleppschlauch	Biogasgärrest separiert fest	100	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest	50	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	75	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	125	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	150	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	100 ENTEC	0	0	0	0	0	0
BGR und min. Düngung	Schleppschlauch	unbehandelter Biogasgärrest 1	100 PIADIN	0	0	0	0	0	0
Min. Düngung	-	-	0	0	0	0	0	0	0
Min. Düngung	-	-	0	30	30	30	30	30	30
Min. Düngung	-	-	0	30	60	55	35	45	45
Min. Düngung	-	-	0	60	60	75	45	60	60
Min. Düngung	-	-	0	90	60	90	60	75	72
Min. Düngung	-	-	0	120	60	100	80	90	90



### 3.3 Bestimmung der Qualitätsparameter im Erntegut

Sämtliche Untersuchungen wurden in der Abteilung Qualitätssicherung und Untersuchungs-wesen der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft Freising-Weihenstephan vorgenom-men. Die  $N_{\min}$ - sowie Standardbodenuntersuchungen des Standortes Bayreuth wurden am Fachzentrum Analytik der Bayerischen Landesanstalt für Weinbau und Gartenbau in Veits-höchheim untersucht.

#### Trockensubstanzgehalt

Zur Bestimmung der Trockensubstanz wurden die Silomais und Wintertriticale Ganzpflan-zenproben direkt nach der Ernte zunächst schonend auf einer Heizlüftung (Flachsatztrock-nung) bei ca. 40 °C mindestens 48 h vorgetrocknet. Anschließend wurden aus dem Probenma-terial vorgefertigte Referenzproben zur Ermittlung des Restwassergehaltes entnommen und in Trockenschränken bei 105 °C getrocknet. Die ermittelte Differenz zwischen vorgetrockneter und bei 105 °C getrockneter Probe wurde gemittelt und von den zur Qualitätsuntersuchung bestimmten Proben abgezogen (siehe Gleichung 1).

$$TS = \frac{\text{Nettogewicht Probe } 40\text{ °C}}{\text{Nettogewicht Probe frisch}} * 100 * \sum_1^n TS \frac{\text{Nettogewicht Referenzprobe } 105\text{ °C}}{\text{Nettogewicht Referenzprobe } 40\text{ °C}}$$

**Gleichung 1:** Ermittlung der Trockensubstanzgehalte von Silomais und Wintertriticale Ganz-pflanzensilageproben

Die Ermittlung der Trockensubstanzgehalte der Grünlandproben erfolgte anschließend an die Vortrocknung auf der Heizlüftung in Trockenschränken bei 65 °C (mind. 48 h). Die Grün-landproben wurden in Stoff-Beuteln, die Ganzpflanzenproben in Crispac-Beutel mit Super-Micro-Lochung aufbewahrt.

#### Rohprotein- bzw. Stickstoffgehalt

Als Referenzmethode für die Ermittlung des Rohprotein-Gehaltes für Wintertriticale Ganz-pflanzensilage, Winterweizen Korn sowie Weidelgras und Grünland wurde die Bestimmung des Gesamtstickstoffgehaltes nach DUMAS (Elementaranalyse; vario MAX™ bzw. vario EL™; Fa. Elementar Analysensysteme GmbH) angewandt. Der RP-Gehalt wurde nach KIRCHGEßNER durch Multiplikation des Gesamt-N-Gehaltes mit dem Faktor 6,25 ermittelt.

Die Silomaisproben wurden mittels NIRS (NIRSystems™ 5000; Fa. FOSS GmbH) untersucht. Weitere Parameter die durch NIRS ausgegeben werden sind XS, Elos, XF, XP, XL, Xz, NDF, ADF, ADL, oNDF, oADF und IVDOM. Sämtliche Qualitätsproben werden bei 80 °C mind. 24 – 48 h getrocknet. Außerdem lassen sich aus diesen durch NIRS gemessenen Parametern weitere, die Verdaulichkeit beschreibende Einflussgrößen berechnen. Dazu zählen der sich auf Basis von ELOS, oNDF und XL berechnete Energiegehalt in ME MJ/kg TM sowie der Energieertrag in NEL GJ/ha. Insbesondere der Parameter NEL wird für die weiteren Auswertungen der Energiegehalte und Energieerträge weiterhin verwendet.

### Untersuchung der organischen Dünger

Die in den Versuchen verwendeten organischen Dünger wurden laufenden Untersuchungen unterzogen, um auf inhaltliche Veränderungen reagieren zu können. Für die Untersuchungen wurden die Wirtschaftsdünger anfänglich in 1000 l IBC-Container gefüllt (am Standort Puch konnten die Wirtschaftsdünger in unterirdischen 5000 l Behältern gelagert werden). Die Befüllung erfolgte mindestens zwei Wochen vor Nutzung der organischen Dünger in den Feldversuchen, um ausreichend Zeit für die Untersuchung der Nährstoffgehalte zu gewähren. Die IBC-Container wurden anschließend bis zur Versuchsdurchführung an schattigen Standorten gelagert. Während der Ausbringung der Dünger wurden dann nochmals Proben genommen um die tatsächlich ausgebrachte Menge an Nährstoffen zu ermitteln. Somit sollte der Einfluss eventueller Veränderungen der Inhaltsstoffe während der Lagerung auf die Ausbringmengen eliminiert werden. Da die Inhaltsstoffe der verwendeten Wirtschaftsdünger ab dem zweiten Vegetationsjahr hinlänglich bekannt waren, wurde an dem Standort Bayreuth auf die Voruntersuchung mittels IBC-Container verzichtet, und Proben direkt aus den Biogasgärrestlagern entnommen. Untersucht wurden die Dünger auf pH (VDLUFA MB II.2, Methode 4.3), TS (VDLUFA MB II.2, Methode 9.1), org. Substanz (VDLUFA MB II.2, Methode 4.1), N<sub>t</sub> (VDLUFA MB II.1, Kjeldahl-Aufschluss: Methode 3.5.1.1 Einwaage bis 10 g Frischsubstanz, Destillation und Titration: Methode 3.1.1), NH<sub>4</sub>-N (VDLUFA MB II.1, Methode 3.2.1, Na<sub>2</sub>CO<sub>3</sub> statt NaOH), K<sub>2</sub>O (VDLUFA MB II.2, Methode 3.3.1.3, Königswasseraufschluss, Messung mittels ICP-OES), MgO (VDLUFA MB II.2, Methode 3.5.1.3, Königswasseraufschluss, Messung mittels ICP-OES), CaO (VDLUFA MB II.2, Methode 3.4.1.3, Königswasseraufschluss, Messung mittels ICP-OES), P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (VDLUFA MB II.2, Methode 3.2.1.3, Königswasseraufschluss, Messung mittels ICP-OES), und S (VDLUFA MB II.2, Methode 3.6.2.2).

Mineraldüngeräquivalent - MDÄ

Zur Einstufung der Wirkung des über organische Dünger applizierten Nährstoffs auf den N-Entzug kann das jeweilige Mineraldüngeräquivalent ( $MDÄ_{NUP}$ ) verwendet werden (GUTSER, et al. 2005). Dies eignet sich insbesondere für den Vergleich und eine Einordnung verschiedener organischer Dünger. Es errechnet sich aus dem Quotienten des Stickstoffentzugs der organischen Düngung und der mineralischen Düngung. Beide sind um den gegebenen Stickstoffentzug der Nullparzelle zu bereinigen.

$$MDÄ_{NUP} = \left( \frac{\text{N-Entzug des org. Düngers} - \text{N-Entzug der Nullparzelle}}{\text{N-Entzug der min. Variante} - \text{N-Entzug der Nullparzelle}} \right) * 100$$

**Gleichung 2:** Formel zur Berechnung des Mineraldüngeräquivalent von organischen Düngern

Zu Berechnung des  $MDÄ_{NUP}$  wurde für die mineralische Steigerungsdüngung deren quadratische Funktion gebildet und daraus anschließend der entsprechende N-Entzug der mineralischen Düngung bei gegebener organischer Stickstoffmenge (aus den Analysen der Stickstoffgehalte während der Ausbringung) errechnet. Grundsätzlich wurde das  $MDÄ_{NUP}$  auf Grundlage des applizierten  $N_t$  berechnet. Falls stattdessen der applizierte  $NH_4-N$  verwendet wurde wird dies im Text explizit erwähnt. Zusätzlich muss beachtet werden, dass die applizierte Menge  $N_t$  mit organischem Dünger teilweise deutlich über der des mineralischen Düngers lag. Dies war der Fall bei den Varianten mit 125 – 150 % BGR. Um Fehler durch Extrapolation der Steigerungskurven des mineralischen Düngers zu vermeiden, wurden diese beiden Varianten nicht in die Berechnung des  $MDÄ_{NUP}$  auf Basis des applizierten  $N_t$  mit einbezogen.

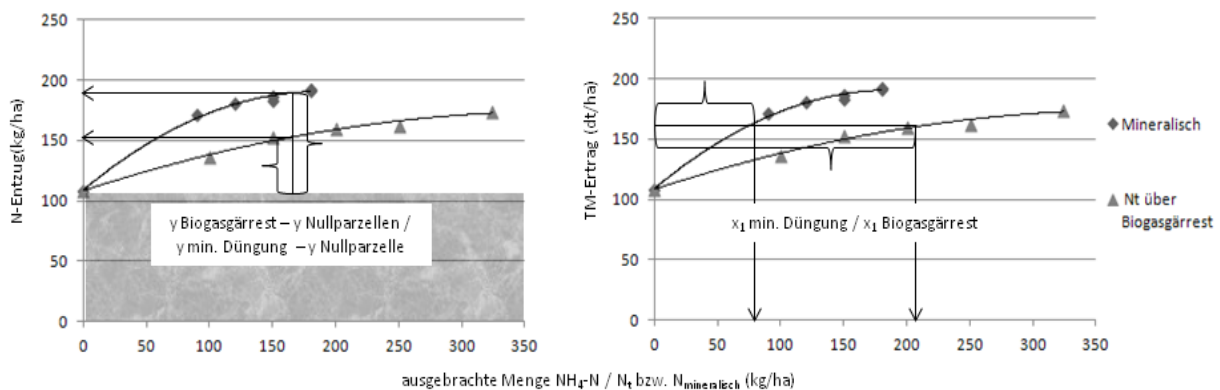
Ertragsäquivalent mineralischer Dünger - EÄM

Für eine Düngeplanung ist es zudem möglich, anstelle des N-Entzuges welcher bei gleicher Applikationsrate über mineralischen Dünger erzielt wurde (entspricht  $MDÄ_{NUP}$ ), jene Menge an Stickstoff in v. H. anzugeben, welche zur Erzielung desselben TM-Ertrages benötigt wurde (Ertragsäquivalent mineralischer Dünger). Anstelle der Beträge der Ordinate werden die Applikationsraten der Abszisse herangezogen. Aus dem Quotient der Applikationsrate der mineralischen Variante und der organischen Variante unter der Bedingung gleicher TM-Erträge errechnet sich das Ertragsäquivalent für mineralischen Dünger ( $EÄM_{DM}$ ). Da dieser Parame-

ter verdeutlicht mit welcher Menge mineralischen Stickstoffs bereits die Wirkung des organischen Stickstoffs erreicht werden konnte, eignet sich dieser Wert besonders für Ableitungen zur Effizienz des organischen Düngers in die Praxis. Folglich wird hier anstelle des N-Entzuges mit dem ökonomisch relevanteren TM-Ertrag gerechnet. Da der Vergleich der organischen zur mineralischen Düngung entlang der Ordinate erfolgt ist zwingend erforderlich, dass die mineralische Düngung mindestens den TM-Ertrag der organischen Düngung erreichen konnte. Das Ertragsmaximum muss also durch die mineralische Düngung vorgegeben sein. War dies nicht der Fall, wurde der TM-Ertrag der organischen Düngung herabgestuft bis zu dem maximalen TM-Ertrag der mineralischen Variante. Auf die Korrektur wird im Text hingewiesen.

$$E\ddot{A}M_{(TM\text{-Ertrag})} = \left( \frac{\text{N-Applikationsrate der mineralischen Variante}}{\text{N-Applikationsrate der organischen Variante}} \right) * 100$$

**Gleichung 3:** Formel zur Berechnung des Ertragsäquivalent von organischen Düngern



**Abb. 6:** Beispiel zur Berechnung von Mineraldüngeräquivalenten durch Stickstoffsteigerungsversuche

### Scheinbare Stickstoffeffizienz - ANE

Die Effizienz des eingesetzten Stickstoffs wird durch die ANE<sub>NU<sub>P</sub></sub> (Apparent Nitrogen Efficiency) für den N-Entzug beschrieben. Diese berechnet sich durch Subtraktion des N-Entzuges der ungedüngten Parzelle (bodenbürtiger N) von der gedüngten Parzelle dividiert durch die applizierte Stickstoffmenge der gedüngten Parzelle. Die ANE<sub>NU<sub>P</sub></sub> vergleicht die direkte Stickstoffaufnahme der Pflanze mit der applizierten Menge Stickstoff und ermöglicht so insbesondere Rückschlüsse auf die ökologische Effizienz eines Düngers. Beachtet werden

muss jedoch, dass die  $ANE_{NUp}$  eine Vielzahl möglicher N Verlustpfade beinhaltet. Dazu zählen neben den N-Verlusten der Dünger auch Verluste über das Pflanzengewebe und den Boden (RAUN und JOHNSON 1999) sowie Priming-Effekte (JENKINSON, FOX und RAYNER 1985). Dies kann die Aussage des  $ANE_{NUp}$  verfälschen. Eine präzise Aussage bezüglich des aus dem eingesetzten Dünger stammenden, von der Pflanze aufgenommenen Stickstoffs kann nur durch den Einsatz isotopisch markierten Düngers erfolgen.

#### Relative Stickstoffeffizienz - RNFV

Einen weiteren Parameter zur Beurteilung der relativen Effizienz organischer Dünger gegenüber mineralischer Düngung bietet der „Relative N Fertilizer Value ( $RNFV_{DM}$ )“ (SCHRÖDER, JANSEN und HILHORST 2005). Dieser wird berechnet aus dem Quotienten der  $ANE_{DM}$  des organischen Düngers und der  $ANE_{DM}$  eines mineralischen Düngers, wobei anstatt des N-Entzuges (wie bei  $ANE_{NUp}$ ) mit dem TM-Ertrag gerechnet wurde. Für die Berechnung eines repräsentativen  $ANE_{DM}$  der mineralischen Düngung wurde der Mittelwert der mineralischen Stufen gebildet. Bei einer gleichen Düngehöhe der mineralischen und organischen Düngung gleicht der  $RNFV_{DM}$  dem  $MD\ddot{A}_{DM}$  auf Basis des TM-Ertrages.

Da die verwendeten Parameter zur Beurteilung der Wirkung von organischen Düngern in der Literatur teilweise unterschiedlich interpretiert werden, wird in vorliegender Arbeit zusätzlich angegeben ob zur Berechnung der Trockenmasseertrag (DM tiefgestellt) oder die N-Aufnahme ( $NUp$  tiefgestellt) der Kultur verwendet wurde. Ob als Bezugsgröße der applizierte  $N_t$  oder  $NH_4-N$  verwendet wurde wird jeweils im Text erläutert.

### **3.4 Statistische Auswertung**

Die Auswertung der Versuche erfolgte mit dem statistischen Programmpaket SAS Enterprise Guide 4.3 (Version 4.3.0.10196, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA) und SAS 9.2 (Version 9.2, SAS Institute Inc., Cary, NC, USA). Die Auswertungsgruppen der jeweiligen Versuche wurden zunächst im Einzeljahr und anschließend als Auswertungsserie der drei Versuchsjahre verrechnet. Unterschiede in den Varianten (Versuchsgliedern) wurden mittels einfaktorieller Varianzanalyse (GLM Procedure) und anschließendem t-Test (Least Significant Difference) ermittelt. Als Anlagemethode in den Einzelversuchen wurde das Auswertungsmodell „Lateinisches Rechteck“ mit Störgrößenerfassung in zwei Richtungen (Wiederholung und Säule) formuliert. Die dreijährigen Auswertungsserien wurden als „Lateinisches Rechteck“ gerechnet, allerdings wurden die Wiederholungen und Säulen nur bei den ortsfesten Versuchen ver-

rechnet. Im Falle fehlender Werte durch bspw. Versuchsfehler wurden die Mittelwerte adjustiert, d.h. für die fehlenden Werte wurden Ersatzwerte berechnet. Als Signifikanzniveau  $\alpha$  für die Irrtumswahrscheinlichkeit wurde 0,05 gewählt. Die folgenden Angaben für das Signifikanzniveau beziehen sich auf den t-Test bei  $\alpha=0,05$ .

### 3.5 Messungen mit N-Sensor<sup>®</sup> ALS (Fa. YARA)

Zur Ableitung standortangepasster Stickstoffdüngergaben können Online-Anwendungen aktuelle Parameter in Echtzeit erzeugen, die den Ernährungszustand der Pflanzen widerspiegeln. Beispiele hierfür sind der verwendete Yara-N Sensor<sup>®</sup> oder Mini-Veg N der Fa. Fritzmeier. Durch Reflexionsmessungen werden hierbei Rückschlüsse auf den Stickstoffversorgungsstatus des gemessenen Pflanzenmaterials gezogen. Die Versuche zu Wintertriticale sowie Winterweizen wurden während der Vegetation zur Bonitur und Beurteilung des Bestandes mehrmals mit einem Stickstoffsensor gemessen. Im speziellen wurde hierfür der optoelektronische N-Sensor<sup>®</sup> ALS (Active Light Source, Fa. Yara) verwendet. Dieser bietet durch eine eigene Lichtquelle ein Messverfahren unabhängig von vorherrschenden Belichtungsbedingungen. Mittels der integrierten Xenon-Blitzlampe wird multispektrales Licht hoher Intensität ausgesendet. Durch die Messwerte des Sensors abgeleitete Schlussfolgerungen oder Reaktionsprinzipien bedürfen jedoch einer vorausgegangen Überprüfung auf Plausibilität.



*Abb. 7: Aktiver N-Sensor<sup>®</sup> ALS der Fa. Yara auf Fahrgestell montiert*

Ursachen für eine mangelnde Grünfärbung eines Pflanzenbestandes können diverse Hintergründe haben. Standort-, Witterungs-, Sortenparameter, Befall mit Pflanzenkrankheiten oder Mangelerscheinungen durch andere Nährstoffe können von dem eingesetzten System nicht

abstrahiert werden. Der vom Sensor gemessene Reflexionswert als Chlorophyllgehalt ist infolgedessen keine Abstraktion einzelner Einflussgrößen, sondern ein Kategorie ohne Unterteilung in Einzeleinflussgrößen (z.B. Entwicklungsstadium, Schwefelmangel, usw.). Der Zusammenhang zwischen Chlorophyllgehalt und Reflexionswerten des Sensors ist belegt (REUSCH und HEEGE 1995).

Weiterhin ist zu beachten, dass Reflexionsmessungen erst ab bestimmten Bodenbedeckungsgraden sinnvoll durchführbar sind, da bei zu geringen Bodenbedeckungsgraden der Boden störenden Einfluss auf das Messergebnis ausübt (GUYOT 1990).

Für die Parzellenmessung wurde der Sensorkopf auf ein fahrbares Gestell mit einer variablen Breite von 1,5 m – 2,5 m, je nach Parzellenanlage, montiert. Der Messkopf wurde in einer Höhe von 2,5 m mit einem Zenitwinkel von 60 ° aufgebaut. Gemessen wird die Reflektion der beiden Wellenlängen im Nahinfrarotbereich bei 730 nm und 780 nm, welche mittels eines Kalibrierwertes in den  $S_n$ -Wert umgerechnet wird. Die Intensität des im Nahinfrarotbereich reflektierten Lichtes wird im Wesentlichen bestimmt durch Unterschiede in der N-Konzentration des Pflanzenmaterials (MISTELE, GUTSER und SCHMIDHALTER 2004). In den Versuchen mit Winterweizen und Wintertriticale wurde der Sensor benutzt um die Reaktion des Bestandes auf Düngemaßnahmen nicht-destruktiv erfassen zu können. Die Messtermine waren üblicherweise die Entwicklungsstadien BBCH 31 und BBCH 37.

### **3.6 Versuchsstandort Puch (FFB)**

Das Gros der durchgeführten Versuche wurde auf der Versuchstation der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft in Puch bei Fürstenfeldbruck durchgeführt. Hierbei handelte es sich um die Versuche zu den Fruchtarten Wintertriticale GPS (V548), Winterweizen (V549), Silomais (V551), einen ortsfesten Versuch zu Dauergrünland (V552) und einen weiteren ortsfesten Fruchtfolgeversuch (V554).

#### **3.6.1 Standortbeschreibung**

Die Forschungsstation Puch befindet sich westlich von Fürstenfeldbruck (geographische Breite: 48°11' nördlich des Äquators, geographische Länge: 11°13' östlich von Greenwich; Höhe: ca. 550 m über dem Meeresspiegel, Niederschlag: ca. 850 mm; Temperatur: 7° C - 8° C) (LfL 2009). Puch befindet sich nach standortkundlicher Landschaftsgliederung im Gebiet der Altmoräne des Loisachgletschers, die Versuchsfläche weist keine Exposition auf. Bei dem Boden handelt es sich um einen Braunerde – Pseudogley aus Fließerde über Verwitterungsbildungen

der Altmoräne (BIS 2009). Der pH-Wert des Bodens beträgt 6,3 mit P-Gehalten von 9 - 16 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden und K-Gehalten von 14 - 22 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden. Unter Grünland wurden 5 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden und 6 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden gemessen. Der C<sub>org</sub>-Gehalt der Ackerböden lag zwischen 1,07 – 1,37 % bei Humusgehalten von 1,8 – 2,36 und N<sub>t</sub> - Gehalten von 0,08 – 0,13. Die Grünlandfläche wies typisch höhere Gehalte für C<sub>org</sub> (2,79 %), Humus (4,81 %) sowie N<sub>t</sub> (0,28 %) auf. Die Bodenzusammensetzung unterteilte sich in 18 % Sand-, 67 % Schluff- und 15 % Tonanteil. Die Bodenproben wurden jeweils vor Versuchsanlage der ortswechselnden Versuche gezogen.

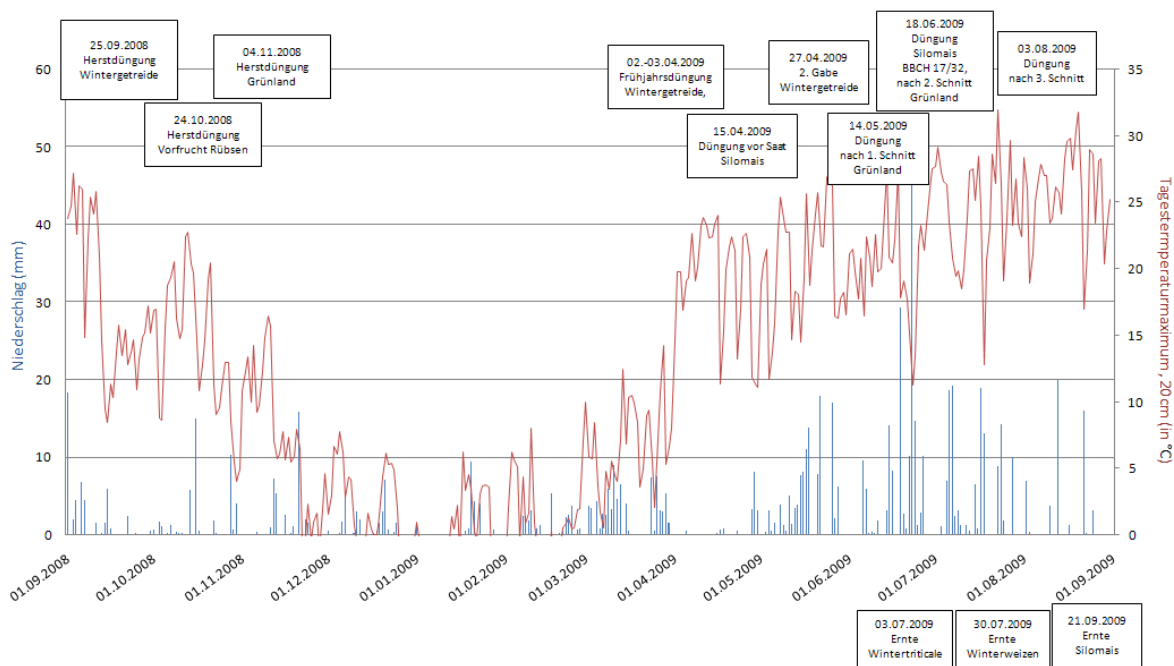
**Tab. 9:** Standardbodenuntersuchungen vor Versuchsbeginn der ortswechselnden Versuche in Puch

Versuchsjahr	2009					2010					2011				
	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>
V548	6,8	10	19	1,28	0,12	6,3	13	20	1,13	0,08	6,8	11	21	1,37	--
V549	6,6	16	18	1,36	0,12	6,3	9	17	1,18	0,09	6,6	12	18	1,1	--
V551	6,8	11	22	1,37	0,13	6,3	16	14	1,07	0,08	6,6	12	18	1,1	--
V552	5,6	5	6	2,79	0,28	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
V554	6,5	10	18	1,14	0,13	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--

### 3.6.2 Witterung

Unter milden Bedingungen in Puch im Herbst 2008 konnten die in den Versuchen angebaute Winterungen zügig auflaufen und erreichten bis zu Wintereinbruch einen guten Entwicklungsstand. Während die Temperaturen im Dezember um den Gefrierpunkt lagen, erfolgte um Neujahr ein Temperatureinbruch bis unter -10°C. Bei tiefen Temperaturen auf schneefreien Böden erfolgte eine gute Frostgare des Bodens. Auswinterungsschäden traten auf den Versuchsflächen trotz des langen und kalten Winters nicht auf. Erst mit den ersten Apriltagen wechselte die Wetterlage abrupt zu wärmeren Temperaturen, sodass um diese Tage mit den ersten Düngungsmaßnahmen begonnen werden konnte. Ausreichend Niederschläge sorgten für einen guten Auflauf der Maissaat. Das unbeständige Wetter hielt jedoch auch in den Sommermonaten an, sodass nur wenige Tage für die Ganzpflanzensilageernte blieben. In den Monaten August bis Oktober besserte sich die Wetterlage und die Versuchspartellen zu Winterweizen (Korndrusch) als auch die Maissilage konnten problemlos beerntet werden.





**Abb. 8:** Verlauf der Jahreswitterung 2008 – 2009 und wichtige Versuchstermine am Standort Puch

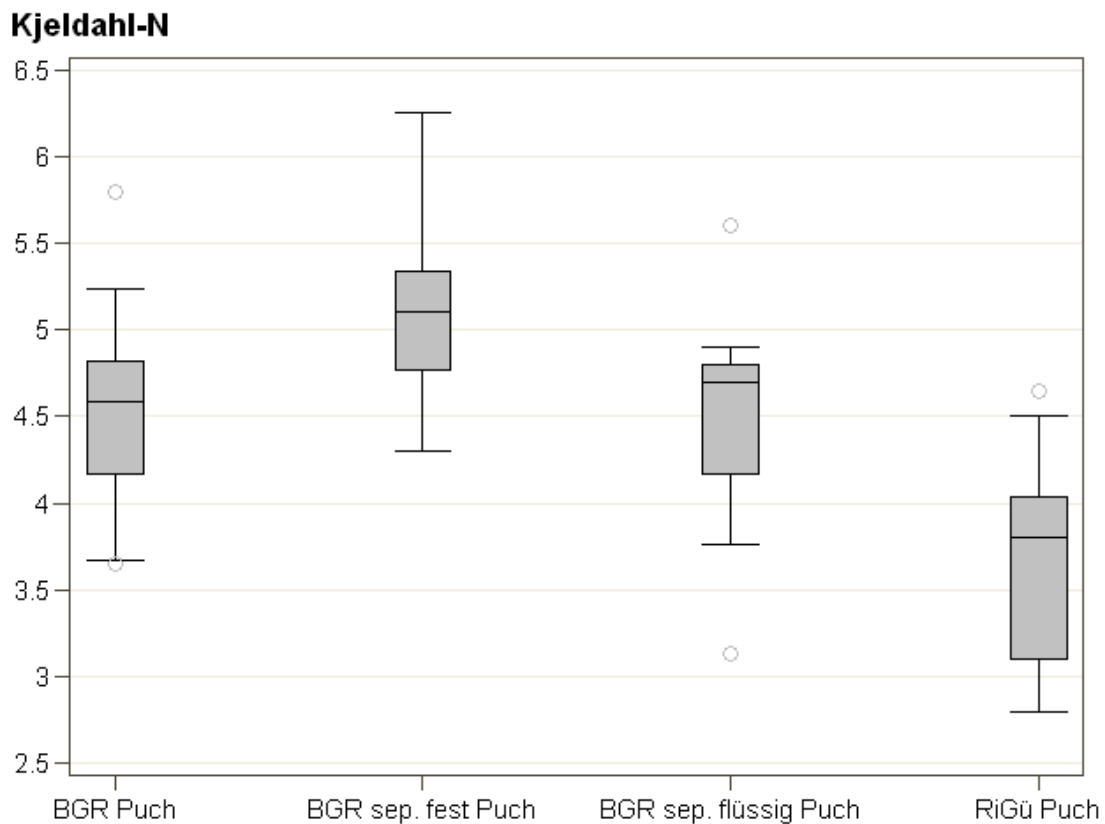
Auch zur Herbstsaat 2009 herrschten an den Versuchsstandorten optimale Bedingungen durch spätsommerliches Wetter. Die Winterungen liefen gleichmäßig auf und entwickelten zu Winter einen dichten Bestand. Während die Ernte der Wintertriticale-Ganzpflanzensilage noch problemlos verlief, traten bei der Ernte des Winterweizens erhebliche Probleme durch anhaltende Niederschläge und äußerst schlechte Befahrbarkeit der wassergesättigten Böden auf. Teilweise konnten Parzellen aufgrund der nassen Bedingungen nur hälftig beerntet werden. Die Silomaisernte verlief wieder problemlos. Das Frühjahr 2011 war geprägt durch einen frühen Vegetationsbeginn bei milden Temperaturen in den Monaten März und April. Die dennoch schwachen Bestände waren lediglich auf die nassen Aussaatbedingungen im Herbst 2010 zurückzuführen. Bereits ab Anfang April traten keine Bodenfröste mehr auf. Somit konnte bereits Anfang März mit den Düngungsmaßnahmen begonnen werden. Etwa Mitte bis Ende April gingen die Winterungen dann in die Schosspphase über, sodass die zweite Düngergabe zu BBCH 31 erfolgte. Die weitere Ernte verlief in allen Kulturen problemlos.

### 3.6.3 Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Puch

Für die am Standort Puch gelegenen Versuche wurden insgesamt vier verschiedene organische Dünger verwendet. Die Biogasgärreste stammten allesamt (unbehandelt, separiert flüssig und separiert fest) von einer Anlage. Bei der Rindergülle handelte es sich um eine Milchviehgülle. Der Biogasgärrest entstammt einer Biogasanlage, die 2005 in Betrieb genommen wurde, und

in den Jahren 2006 und 2010 von anfänglich 190 kW<sub>el</sub> auf 500 kW<sub>el</sub> installierte Leistung erweitert wurde. Die Biogasanlage besteht aus einem Fermenter und einem Nachgärbehälter sowie einem 1500 m<sup>3</sup> gasdicht abgedeckten Gärrestlager und wird bei einer Betriebstemperatur von ca. 40 °C und einer Verweilzeit von ca. 30 d betrieben. Als Eingangssubstrat werden nur nachwachsende Rohstoffe, ca. 47 % Maissilage und 53 % Klee gras, verwendet. Laut Betreiber werden ca. 80 % des anfallenden Biogasgärrestes mittels eines Pressschneckenseparators abgepresst in eine flüssige und eine feste Phase. Bezüglich der Wirkung des unbehandelten Biogasgärrestes als Stickstoffdünger wird von dem Betreiber eine schnelle Wirkung in Getreide bei ausreichender Bodenfeuchte beschrieben.

Die in den Versuchen verwendeten abgepressten Biogasgärreste wurden direkt aus dem Separator entnommen und am Versuchsstandort gelagert sowie untersucht. Der Gesamtstickstoffgehalt des unbehandelten Biogasgärrestes lag bei einem Median von 4,5 kg N<sub>t</sub>/m<sup>3</sup> und einer Standardabweichung von 0,48 kg N<sub>t</sub>/m<sup>3</sup>, sodass die tatsächlich ausgebrachte Nährstoffmenge von der geplanten, auszubringenden Nährstoffmenge teilweise abwich. Der im Mittel höchste Gesamtstickstoffgehalt wurde bei der separiert festen Phase gemessen, der niedrigste bei der Rindergülle.



**Abb. 9:** Gehalte an Kjeldahl-N (kg/m<sup>3</sup>) der am Standort Puch verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil (Stand: 25.07.2011)

Die in den Biogasgärresten untersuchten Nährstoffe können Tabelle 10 entnommen werden. Auffallend ist eine gewisse Schwankungsbreite der Nährstoffgehalte während des Untersuchungszeitraumes. Diese Variabilität ist neben Veränderungen der anaeroben Bedingungen im Fermenter vor allem Schwankungen im Eingangssubstrat zuzuschreiben. Ebenso ist trotz aller Genauigkeit eine Ungleichverteilung der Nährstoffe im Endlager nicht auszuschließen. Der pH-Wert des unbehandelten Biogasgärrestes sowie der separiert flüssigen Phase wies typisch höhere Werte im Vergleich mit der verwendeten Rindergülle auf (ca. pH 0,5 höher). Die Trockensubstanzgehalte der flüssigen organischen Dünger sind, wie auch in der Literatur beschrieben, in der Rindergülle höher als in Biogasgärrest. Auffallend sind zudem die im Mittel deutlich höheren pH-Werte der separiert festen Phase gegenüber der Rindergülle sowie der unbehandelten Biogasgärreste. Die separiert feste Phase enthält zudem nennenswerte Gehalte an  $\text{NH}_4\text{-N}$  (Mittelwert 2,3 kg  $\text{NH}_4\text{-N/t}$ ). Deutlich höhere Nährstoffgehalte gegenüber dem unbehandelten Gärrest wies die separiert feste Phase bei  $\text{CaO}$  und  $\text{P}_2\text{O}_5$  auf, wobei zur Fällung des im Biogasgärrest enthaltenen Phosphors keine Zusätze verwendet werden.

**Tab. 10:** Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Puch verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011)

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
BGR	pH-Wert	7.9	0.2	7.4	8.3
	Trockensubstanz ( $\text{kg/m}^3$ )	64.3	12.2	44.5	93.1
	org. Substanz ( $\text{kg/m}^3$ )	44.4	9.4	29.3	66.6
	Kjeldahl-N ( $\text{kg/m}^3$ )	4.5	0.5	3.5	6.4
	$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2.7	0.3	2.0	3.4
	$\text{K}_2\text{O}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	7.1	0.9	5.3	9.7
	$\text{MgO}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	0.7	0.2	0.3	1.2
	$\text{CaO}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2.6	0.6	1.4	3.6
	$\text{P}_2\text{O}_5$ ( $\text{kg/m}^3$ )	1.4	0.4	0.7	2.1
BGR sep. fest	pH-Wert	8.8	0.3	7.9	9.1
	Trockensubstanz (kg/t)	200.1	39.1	69.1	287.4
	org. Substanz (kg/t)	168.4	33.7	49.2	228.1
	Kjeldahl-N (kg/t)	5.2	0.6	4.2	6.4
	$\text{NH}_4\text{-N}$ (kg/t)	2.3	0.4	1.3	3.2
	$\text{K}_2\text{O}$ (kg/t)	7.3	1.8	5.8	12.6
	$\text{MgO}$ (kg/t)	2.4	0.7	1.7	3.8
	$\text{CaO}$ (kg/t)	5.2	2.5	3.1	12.3
	$\text{P}_2\text{O}_5$ (kg/t)	4.8	1.0	3.7	7.5
BGR sep. flüssig	pH-Wert	7.9	0.3	7.1	8.6
	Trockensubstanz ( $\text{kg/m}^3$ )	59.9	6.4	42.4	69.9
	org. Substanz ( $\text{kg/m}^3$ )	40.8	4.4	29.7	49.4
	Kjeldahl-N ( $\text{kg/m}^3$ )	4.5	0.5	3.0	5.6
	$\text{NH}_4\text{-N}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	2.6	0.4	1.6	3.9
	$\text{K}_2\text{O}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	6.9	1.0	4.1	9.8
	$\text{MgO}$ ( $\text{kg/m}^3$ )	0.7	0.2	0.4	1.2

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.5	0.5	1.2	3.4
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.6	0.5	0.6	2.8
RiGü Puch	pH-Wert	7.4	0.4	6.7	8.1
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	74.4	13.5	50.2	98.6
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	57.8	13.2	36.0	81.4
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	3.7	0.5	2.7	4.7
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.1	0.5	1.0	3.0
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	4.1	0.4	3.5	4.8
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.5	0.3	0.8	1.9
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.3	0.3	1.7	3.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.7	0.5	0.7	2.5

### 3.7 Versuchsstandort Speichersdorf und Eckersdorf

Am Amt für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten in Bayreuth wurden Versuche zu den Fruchtarten Silomais (V551) und Winterweizen (V549) sowie der ortsfeste Fruchtfolgeversuch (V554) und ein Grünlandversuch (V553) angelegt. Die Versuche teilten sich auf zwei Standorte östlich (Versuche auf Ackerland) und westlich (Grünlandversuche) von Bayreuth auf.

#### 3.7.1 Standortbeschreibung

Die Grünlandversuche wurden wie erwähnt in Oberwaiz, westlich von Bayreuth (49 ° 56' nördlicher Breite, 11 ° 28' westlicher Breite, Höhe: ca. 430 m, Niederschlag: ca. 750 mm), eingerichtet. Der Boden klassifiziert sich als Kolluvisol im Oberfränkischen Braun- und Schwarzjuragebiet. Der pH-Wert des Bodens liegt bei 5,7 bei P- und K-Gehalten von 6 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden und 12 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden. Der C<sub>org</sub>-Gehalt des Bodens in 0-30 cm beträgt 1,29 % der N<sub>t</sub>-Gehalt 0,13%. Die Fläche weist keine Exposition auf. Klassifizierung nach Bodenschätzungskarte ist LIII3 (BIS 2009).

Der Versuchsstandort für die Ackerfrüchte liegt östlich von Bayreuth in Guttenthau (49 ° 11' nördlicher Breite, 11 ° 49' westlicher Breite, Höhe: ca. 460 m, Niederschlag: ca. 750 mm). Vorherrschender Boden ist stark lehmiger Sand (Braunerde) mit einem Tongehalt von 14%. Der Boden-pH-Wert lag bei 5,7. Der mittlere C<sub>org</sub>-Gehalt in 0-30 cm beträgt 0,84%, der N<sub>t</sub>-Gehalt 0,09 %. Der P- und K-Gehalt des Bodens wurde nach der CAL-Methode (Calcium-Acetat-Laktat) bestimmt (SCHÜLLER 1969). Die P-Gehalte lagen bei 25 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden, der K-Gehalt lag bei 23 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden.

Die Versuchsfläche in Guttenthau wurde nach der Ernte der Vorfrucht Sommergerste beprobt. Hierfür wurden zwei Bodenproben gezogen, je eine auf den für den Winterweizenversuch

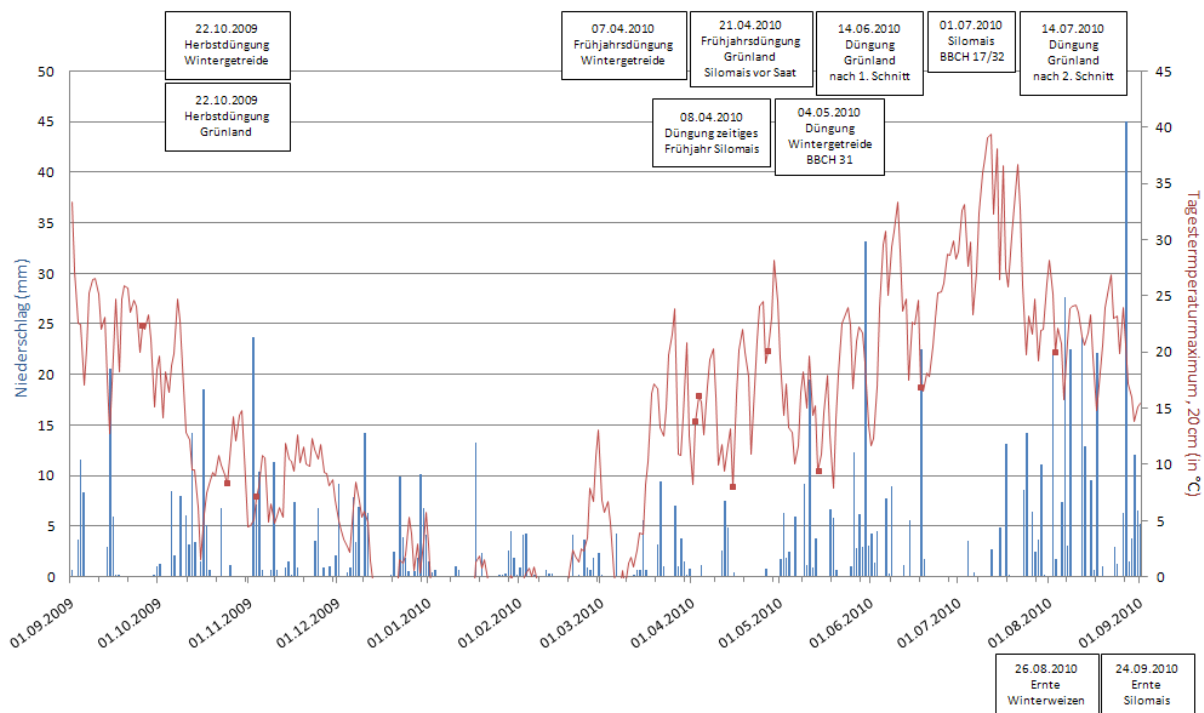
vorgesehenen Flächen und eine auf den für den Dauerversuch und Silomaisversuch vorgesehenen Flächen. Desweiteren wurde die gesamte Fläche auf  $N_{\min}$ -Bodengehalt beprobt, um bei eventuell hohen  $N_{\min}$ -Bodengehalten noch eine Zwischenfrucht zur Reduzierung des pedogenen Stickstoffes anbauen zu können. Die Klassifizierung nach Bodenschätzungskarte ist L5V. Die Versuchsfläche ist leicht nordöstlich exponiert

**Tab. 11:** Ergebnisse der Standardbodenuntersuchungen vor Versuchsbeginn in Bayreuth

Versuchsjahr	2009					2010					2011				
	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>	pH	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	C <sub>org</sub>	N <sub>t</sub>
V549	5,7	24	23	0,83	0,08	6,7	26	18	2,10	0,14	6,8	29	29	1,27	0,14
V551	5,7	26	22	0,85	0,09	6,0	26	32	0,93	0,08	6,0	23	44	1,04	0,07
V553	6,0	6	11	4,42	0,5	--	--	--	--	--	--	--	--	--	--
V554	5,7	26	22	0,85	0,09	5,4	16	21	0,97	0,07	5,4	16	21	0,97	0,07

### 3.7.2 Witterung

Überwiegend normal entwickelt gingen die Winterfrüchte 08/09 in den Winter. Langer und strenger Dauerfrost von Weihnachten bis Ende Februar ohne nennenswerte Schneeeauflage ließ die Böden tief gefrieren. Obwohl bei benachbarten Rapsflächen der Blattapparat durch die starken Kahlfröste zum Teil vollständig abgefroren war, traten auf den Versuchsflächen kaum Auswinterungsschäden auf. Die kalten Temperaturen auf schneefreien Böden führten zudem zu einer guten Frostgare des Bodens. Erst Anfang April vollzog sich der Übergang von winterlichem zu frühlingshaftem Wetter, dies jedoch in kurzer Zeit mit starken Temperaturschwankungen und hohen Tagestemperaturen. In den Folgemonaten sorgte die anhaltend wechselhafte Witterung ohne längere Trocken- und Hitzephasen sowie ausreichend Niederschlag in der sonst eher trockenen Region Bayreuth für gute Wachstumsbedingungen und eine langsame Abreife. Die Versuchspartellen zu Winterweizen (Korndrusch) und Maissilage konnten problemlos beerntet werden. Auch im Herbst 2009 herrschten optimale Bedingungen durch spätsommerliches Wetter.



**Abb. 10:** Verlauf der Jahreswitterung 2009 – 2010 und wichtige Versuchstermine am Standort Bayreuth

Vereinzelte Niederschläge sorgten für eine mittelmäßige Bestandsentwicklung im sonst äußerst trockenen Frühjahr 2010. Aufgrund der kühlen Temperaturen im Frühjahr 2010 entwickelte sich auch der Mais nur zögerlich, erst ab Ende Juni trat warme und gleichzeitig wiederum trockene Witterung ein. Die Ernte sowie die Aussaat verliefen unter niederschlagsreichem Wetter problematisch. Ein schneereicher Winter führte dann dazu, dass zur Vegetationsperiode 2010/2011 keine Auswinterungsschäden der Winterfrüchte auftraten. Zu Vegetationsbeginn 2011 herrschten milde Temperaturen. Insbesondere in Guttenthau litten die sich entwickelnden Winterungen extrem unter der ausgeprägten Frühjahrstrockenheit. Erst Ende April fielen nennenswerte Niederschläge und die Temperaturen gingen leicht zurück. Die Ernte verlief dann unproblematisch.

### 3.7.3 Inhaltliche Zusammensetzung Biogasgärreste in Speichersdorf und Eckersdorf

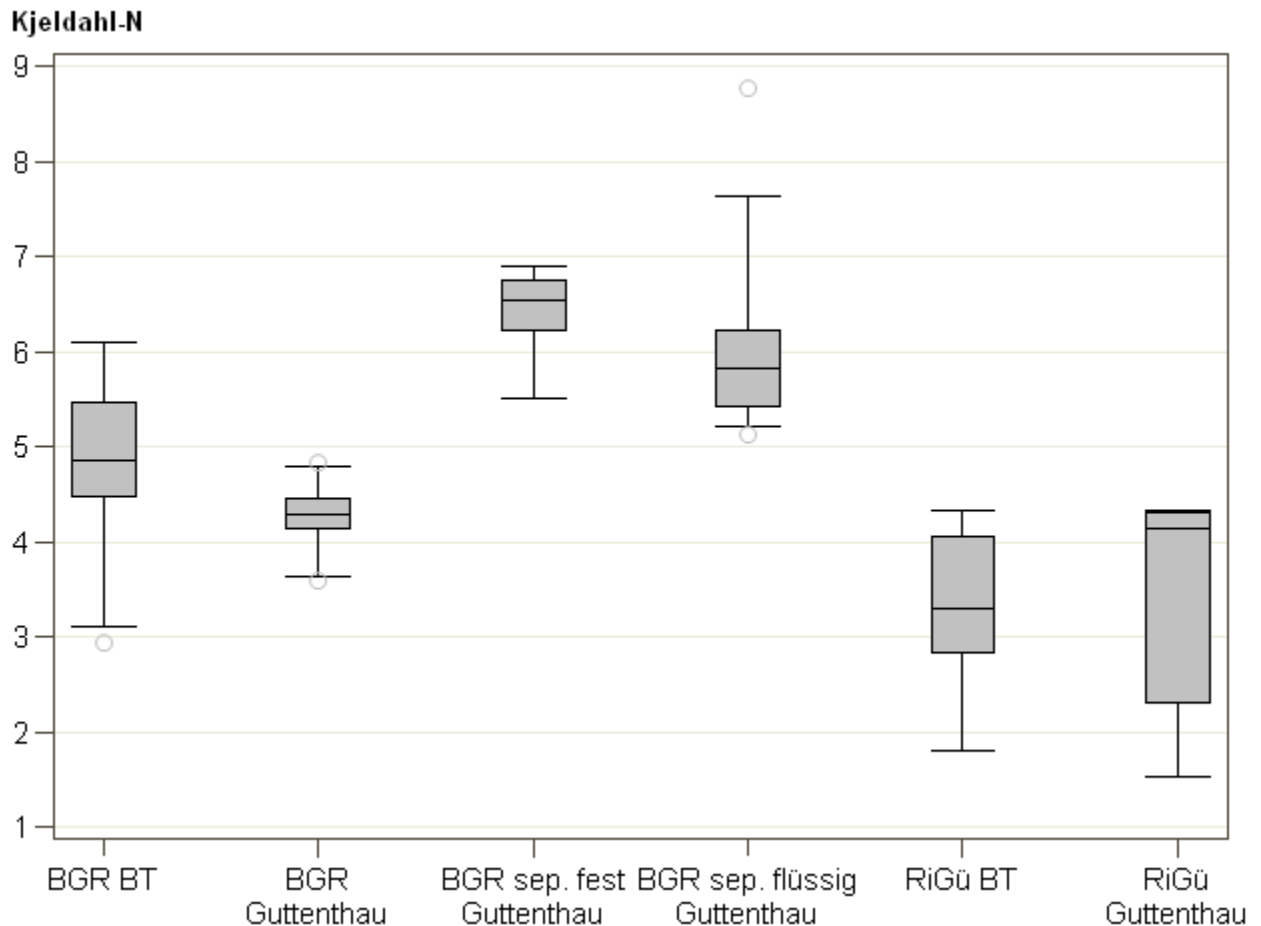
Für die Ackerbauversuche in Guttenthau (Bayreuth) wurden Biogasgärreste aus zwei verschiedenen Biogasanlagen verwendet. Aus einer Anlage stammte der unbehandelte Biogasgärrest, die separiert feste als auch die separiert flüssige Phase stammten aus einer zweiten nahegelegenen Biogasanlage. Die flüssige Phase dieser Anlage wurde auch in dem

Grünlandversuch in Oberwaiz (Bayreuth) verwendet. Die Rindergüllen für die Ackerbau- sowie Grünlandversuche stammten jeweils von Milchviehbetrieben.

Unbehandelter Biogasgärrest (Ackerland): Der unbehandelte Biogasgärrest für die Ackerbauversuche stammt aus einer Biogasanlage mit einer installierten elektrischen Leistung von ca. 200 kW<sub>el</sub>. Die Biogasanlage besteht aus einem Fermenter mit offenen ca. 2600 m<sup>3</sup> fassenden Gärrestlager. Die Betriebstemperatur beträgt laut Betreiber ca. 42 °C, zur Verweilzeit konnten keine Angaben gemacht werden. Die Entnahme der Biogasgärreste erfolgte aus dem Endlager. Als Eingangssubstrat werden Wirtschaftsdünger und NawaRo in einem Mengenverhältnis von etwa 45 % Maissilage, 36 % Rindergülle (Milchviehhaltung), 9 % Grassilage, 9 % Ganzpflanzensilage und 1 % Getreideschrot verwendet. Die Düngewirkung des Biogasgärrestes ist laut Betreiber besser als die einer Rindergülle, vor allem auf Grünland.

Unbehandelter Biogasgärrest (Grünland): Für die in Bayreuth gelegenen Grünlandversuche wurde der Biogasgärrest aus dem Bezirkslehrgut Bayreuth verwendet. Die Biogasanlage wurde 2006 in Betrieb genommen, mit einer installierten elektrischen Leistung von 185 kW<sub>el</sub>. Die Anlage besteht aus einem Pfropfenstromfermenter mit Nachgärer. Das offene Endlager fasst ca. 1200 m<sup>3</sup>. Als Substrate kommen in dieser Anlage laut Betreiber 63 % Maissilage, 23 % Grassilage, 11 % Rindermist, 2 % Getreideschrot sowie 1 % Hühnerkot zum Einsatz. Die Betriebstemperatur beträgt 42 °C bei einer durchschnittlichen Verweilzeit von 60 Tagen. Von dem anfallenden Biogasgärrest werden nach Bedarf ca. 5 % mit einem Pressschneckenseparator abgepresst. Entnommen wurde der Biogasgärrest aus dem Endlager über einen unten angebrachten Entnahmeschlauch. Mit der pflanzenbaulichen Wirkung des anfallenden Biogasgärrestes ist der Betreiber sehr zufrieden.

Biogasgärrest - Separierte Phase: Diese Biogasanlage wurde 2006 in Betrieb genommen und wurde in den Jahren 2008 sowie 2010 auf insgesamt 625 kW<sub>el</sub> Leistung erweitert. Die Fermenter werden mit einer durchschn. Betriebstemperatur von 44°C bei einer Verweilzeit von 55 – 60 d betrieben. Sämtlicher anfallender Gärrest wird mit einem Pressschneckenseparator aufbereitet. Die flüssige Phase wurde dem 2400 m<sup>3</sup> fassenden Gärrestlager entnommen, die feste Phase aus dem abgelagerten Abscheiderest. Hierbei wurde darauf geachtet, möglichst homogenes Material aus mindestens 30 cm Tiefe zu entnehmen, da es insbesondere in den äußeren Schichten des abgelagerten Materials zu ammoniakalischen Verlusten kommen kann. Die Eingangssubstrate dieser Anlage bestanden aus ca. 56 % Maissilage, 30 % Grassilage, 9 % Ganzpflanzensilage; 4 % Getreideschrot sowie 1 % Rindermist. Die Wirkung des Biogasgärrestes wird seitens der Betreiber als gut eingestuft.



**Abb. 11:** Gehalte an Kjeldahl-N ( $\text{kg}/\text{m}^3$ ) der in Bayreuth (BT; Grünlandversuch) und Guttenthau (Ackerlandversuche) verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil; (Stand: 25.07.2011)

Den höchsten Gehalt an Gesamtstickstoff wies in Bayreuth wiederum die separiert feste Phase auf (Median  $6,5 \text{ kg N}_t/\text{t}$ ). Darauf folgte die separiert flüssige Phase (Median  $5,8 \text{ kg N}_t/\text{m}^3$ ) sowie die unbehandelten Biogasgärreste mit einem Median von  $4,6$  bzw.  $4,3 \text{ kg N}_t/\text{m}^3$ . Die niedrigsten Gesamtstickstoffgehalte enthielten die Rindergüllen mit einem Median von  $3,3$  bzw.  $4,1 \text{ kg N}_t/\text{m}^3$ .

Wie bei den Analysen der Biogasgärreste in Puch zeigten sich auch in Bayreuth bei der separiert festen Phase hohe pH-Werte bei gleichzeitig beachtlichen Gehalten von  $2,8 \text{ kg NH}_4\text{-N}/\text{t}$  Frischmasse. Der höchste  $\text{NH}_4\text{-N}$  Gehalt wurde in der separiert flüssigen Phase mit  $3,7 \text{ kg NH}_4\text{-N}/\text{m}^3$  und einem  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{N}_t$ -Quotienten von  $63 \%$  gemessen. Ebenfalls fanden sich hohe Gehalte an Phosphor, Magnesium und Calcium in der festen Phase wieder. Erklärt werden kann dies für Phosphor, da Phosphate eine hohe Affinität zur Komplexbildung mit organischen Bestandteilen zeigen. Diese beruht wiederum auf der spezifischen Affinität zur funktio-



nellen Gruppe organischer Stoffe. Bei einem Abpressen mittels Pressschneckenseparatoren kommt es dadurch bei Nährstoffen mit hoher Affinität zur Komplexbildung zu einer Verschiebung der Nährstoffgehalte zugunsten des festen Separates. Relativiert werden die hohen Phosphatgehalte in der festen Phase allerdings, wenn bedacht wird das im Gegensatz zur flüssigen Phase die Trockensubstanzgehalte deutlich höher sind. Folglich sind die Nährstoffgehalte in der Trockensubstanz der separiert festen Phase sogar etwas geringer. Dies spricht wiederum dafür, dass durchaus ein Großteil des Phosphates als Dispersion in der flüssigen Phase vorkommt.

**Tab. 12:** Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Bayreuth verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011)

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
BGR BT	pH-Wert	7.6	0.2	7.3	8.0
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	89.6	38.9	30.6	235.0
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	56.6	15.2	18.7	83.9
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	4.8	0.9	2.7	6.1
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.5	0.4	1.3	3.6
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	6.9	1.3	3.9	11.5
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	0.9	0.3	0.3	1.3
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.5	0.6	1.1	3.4
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2.1	0.8	0.1	4.1
BGR Guttenthau	pH-Wert	7.5	0.2	6.9	7.9
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	69.5	11.8	52.6	105.5
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	53.7	9.6	38.7	81.9
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	4.3	0.4	3.5	5.5
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.2	0.3	1.8	2.9
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	5.2	0.4	4.5	6.4
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.1	0.1	0.9	1.5
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.0	0.6	1.5	4.4
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2.2	0.4	1.1	2.7
BGR sep. fest Guttenthau	pH-Wert	8.8	0.3	8.4	9.3
	Trockensubstanz (kg/t)	265.9	42.1	171.2	353.7
	org. Substanz (kg/t)	238.7	40.8	144.9	322.7
	Kjeldahl-N (kg/t)	6.4	0.5	4.5	7.2
	NH <sub>4</sub> -N (kg/t)	2.8	0.6	0.6	3.7
	K <sub>2</sub> O (kg/t)	7.1	0.7	5.9	8.7
	MgO (kg/t)	3.0	0.5	2.2	4.2
	CaO (kg/t)	3.0	0.9	2.0	5.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/t)	5.6	1.1	2.6	7.2
BGR sep. flüssig Guttenthau	pH-Wert	7.8	0.2	7.4	8.0
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	62.3	7.7	50.0	84.4
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	43.0	5.2	34.8	61.2
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	5.9	0.9	4.6	10.1
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	3.7	0.4	2.6	4.6
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	7.0	1.7	5.9	18.4

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
RiGü BT	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.0	0.7	0.3	2.8
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	1.8	0.4	1.3	3.1
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	2.5	1.2	0.6	5.3
	pH-Wert	7.0	0.2	6.7	7.4
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	84.5	14.9	50.9	106.9
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	66.4	13.0	40.2	87.5
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	3.4	0.6	1.8	4.4
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	1.7	0.3	0.9	2.4
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	5.0	0.9	3.0	6.9
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	0.8	0.2	0.5	1.5
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.0	0.5	1.1	3.5
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.6	0.4	0.8	2.2
	RiGü Guttenthau	pH-Wert	7.2	0.1	7.1
Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )		70.3	26.2	22.5	104.3
org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )		55.0	21.8	16.1	84.5
Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )		3.5	1.0	1.5	4.7
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )		2.0	0.6	1.0	2.9
K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )		4.6	1.3	2.5	6.4
MgO (kg/m <sup>3</sup> )		0.8	0.3	0.3	1.3
CaO (kg/m <sup>3</sup> )		1.7	0.7	0.6	3.1
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )		1.6	0.7	0.5	2.5

### 3.8 Versuchsstandort Landsberg am Lech

Am Agrarbildungszentrum in Landsberg am Lech (48 ° 03' nördlicher Breite, 10 ° 53' westlicher Breite, Höhe: ca. 630 m, Niederschlag: ca. 950 mm) wurde der Dauerversuch (V554) durchgeführt. Abweichend von der geplanten Fruchtfolge, bestehend aus den Fruchtfolgegliedern Silomais, Wintertriticale und Weidelgras, wurde im Jahr 2010 Winterweizen anstatt des Wintertriticale ausgesät. Dieser wurde auch als Ganzpflanzensilage beerntet.

#### 3.8.1 Standortbeschreibung

Die Versuchsfläche am Agrarbildungszentrum ist eine Braunerde aus Löss. Die Korngrößenzusammensetzung teilt sich in 24,2 % Sand, 61,1 % Schluff und 14,7 % Ton auf. Die Standardbodenuntersuchung ergab Gehalte für Phosphor von 22 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden und Kalium von 16 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden bei einem pH-Wert des Bodens von 7,0. Die organische Substanz des Bodens in Landsberg wies 2,0 % Humus, 1,17 % C<sub>org</sub> und 0,13 % N<sub>t</sub>-Gehalt auf.

### 3.8.2 Witterung

In Landsberg deckt sich der Verlauf der Witterung während der drei Versuchsjahre größtenteils mit dem Witterungsverlauf am Standort Puch.

### 3.8.3 Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Landsberg

Für die Feldversuche in Landsberg wurden die Biogasgärreste aus Puch verwendet (siehe Kap. 3.6.3). Die Rindergülle stammte aus einem nahe liegenden Milchviehbetrieb.

**Tab. 13:** Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Landsberg verwendeten Rindergülle (Stand: 25.07.2011)

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
RiGü	pH-Wert	7.1	0.2	6.8	7.3
Landsberg a. Lech	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	85.2	9.5	70.0	97.6
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	66.6	8.4	51.3	73.7
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	3.6	0.4	3.0	4.0
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	1.9	0.3	1.5	2.2
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	4.6	0.5	4.1	5.5
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.8	0.3	1.1	2.2
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.6	1.0	2.1	4.9
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.7	0.4	0.9	1.9

## 3.9 Versuchsstandort Steinach

An der dem AELF Deggendorf zugehörigen Versuchsstelle Steinach (48 ° 58' nördlicher Breite, 12 ° 36' westlicher Breite, Höhe: ca. 330 m, Niederschlag: ca. 800 mm) wurde der ortsfeste Dauerversuch (V554S) durchgeführt.

### 3.9.1 Standortbeschreibung

Die Versuchsstelle Steinach befindet sich am Fuße des Bayerischen Waldes. Nach BIS Bayern wird der Boden als überwiegend Pseudogley-Braunerde und verbreitet pseudovergleyte Braunerde aus Schluff bis Schluffton (Lösslehm) klassifiziert. Die Versuchsfläche hatte einen pH-Wert von 6,2. Die Grundnährstoffgehalte im Boden lagen bei 13 mg P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> je 100 g Boden und 30 mg K<sub>2</sub>O pro 100 g Boden. Die Korngrößenzusammensetzung unterteilt sich in 8 % Sand, 73,3 % Schluff und 18,7 % Ton. Aufgrund der offenen Lage war die Versuchsfläche während der Versuchsjahre Kahlfrösten ausgesetzt, welche dazu führten, dass im Frühjahr

2010 das Wintertriticale aufgrund erheblicher Auswinterungsschäden nicht ausgewertet werden konnte.

### 3.9.2 Witterung

Die versuchsrelevanten Witterungsbedingungen unterschieden sich kaum von dem Standort Puch. Lediglich zu Vegetationsbeginn 2010 wurde bei der Wintertriticale ein Auswinterungsschaden von ca. 30 – 40 % bonitiert. Dieser Ausfall führte dazu, dass Anfang Juni die Winterrichtung aufgrund der ungleichmäßigen Bestandesdichte umgebrochen werden musste. Eine Bewertung dieses Versuches war nicht zweckmäßig, sodass der Anbau der Folgefrucht Weidelgras vorgezogen wurde.

### 3.9.3 Inhaltliche Zusammensetzung der Biogasgärreste in Steinach

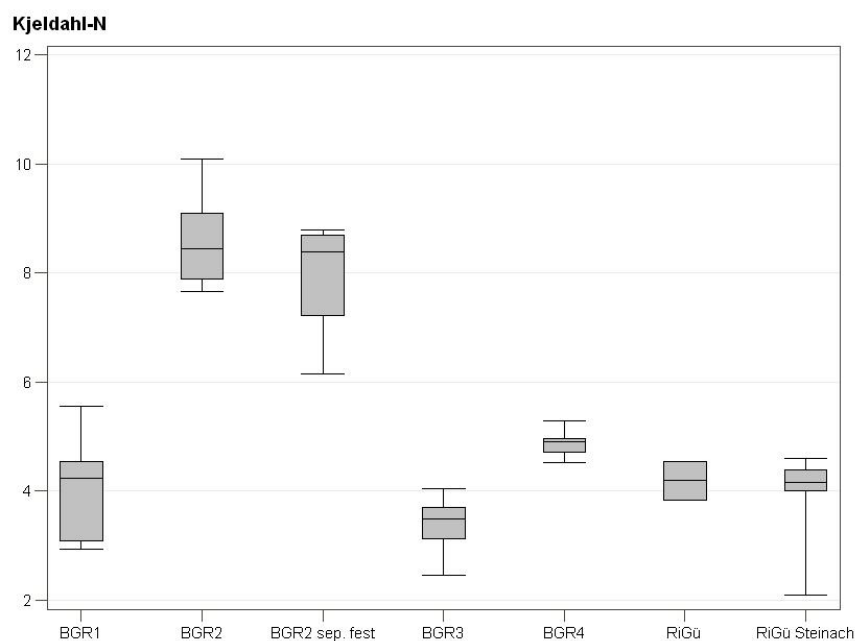
An dem ortsfesten Versuch in Steinach wurden vier Biogasgärreste, eine Milchviehgülle sowie ein separiert fester Biogasgärrest geprüft. Die flüssigen organischen Dünger wurden alleamt jeweils in 1000 l Behälter aufbewahrt und vor der geplanten Ausbringung untersucht.

Biogasgärrest Steinach 1: Dieser Biogasgärrest stammte aus einer Biogasanlage, die 2001 in Betrieb genommen wurde und seit 2004 mit einer Leistung von 347 kW<sub>el</sub> betrieben wird. Die Betriebstemperatur des Fermenters beträgt laut Betreiber 40 °C bei einer mittleren Verweilzeit von 60 d. Gelagert wird der Biogasgärrest in einem offenen Endlager. Das Eingangssubstrat setzt sich zusammen aus 43 % Maissilage, 43 % Grassilage, 10 % Corn-Cob-Mix und 4 % Getreidekorn. Nach Betreiberangaben hat der Biogasgärrest eine gute Düngewirkung speziell bei der Düngung von Mais.

Biogasgärrest Steinach 2: Ein zweiter Biogasgärrest stammt aus einer 2006 in Betrieb genommenen Biogasanlage mit 350 kW<sub>el</sub> installierter Leistung. Die Biogasanlage wird mit einer Fermentertemperatur von 41 °C und einer mittleren Verweilzeit von 60 d betrieben. Etwa die Hälfte des anfallenden Biogasgärrestes wird mittels eines Pressschneckenseparators abgepresst. Dieser abgepresste feste Biogasgärrest wird als Biogasgärrest Steinach separiert fest ebenfalls in den Versuchen geprüft. Zur Fermentation werden als Eingangssubstrate 57 % Maissilage, 22 % Geflügelmist, 14 % Roggen-Ganzpflanzensilage sowie 7 % Zuckerrübenschnitzel verwendet. Der Biogasanlagenbetreiber gibt für den flüssigen Biogasgärrest eine gute Düngewirkung vor allem bei Applikation im Frühjahr zu Wintergetreide an. Je nach Bedarf wird Eisen-II-Sulfat zur Entschwefelung des Biogases zugegeben.

**Biogasgärrest Steinach 3:** Der dritte in den Feldversuchen eingesetzte Biogasgärrest stammt aus einer Biogasanlage mit 536 kW<sub>el</sub> Leistung. Inbetriebnahme der Anlage war 2004. Die Biogasanlage wird laut Betreiber mit ca. 41,5 °C und einer mittleren Verweilzeit von 116 d betrieben. Von dem anfallenden Biogasgärrest werden etwa 20 % mit einem Pressschneckenseparator aufbereitet. Bezüglich der Düngewirkung des Biogasgärrestes berichtet der Betreiber von einer Steigerung der Erträge seit Inbetriebnahme der Biogasanlage durch eine ausgeprägte Langzeitwirkung. Als Eingangssubstrate werden 44 % Maissilage, 15 % Grassilage, 11 % Schlempe (Destillationsrückstand), 9 % Rindergülle, 6 % Biotreber (Rückstände des bei der Bierherstellung verwendeten Malzes), 4 % Pülpe (Rückstand der Kartoffelstärkegewinnung), 3 % Grünroggen-Ganzpflanzensilage, 2 % Kartoffelschnitzel, 2 % Zuckerrübenschnitzel, 2 % Getreidekorn, 1 % Zuckerschnitzel (Rückstand aus der Zuckerrübenverarbeitung) sowie 1 % Zuckerhirse verwendet. Im Mai 2009 wurde zur besseren Durchmischung des Eingangssubstrates eine neue Eintragspumpe installiert.

**Biogasgärrest Steinach 4:** Der vierte Biogasgärrest wurde einer 2005 in Betrieb genommenen Biogasanlage mit einer Leistung von 150 kW<sub>el</sub> entnommen. Die Betriebstemperatur wird mit 42 °C bei einer mittleren Verweilzeit von 70 d angegeben. In den Wintermonaten wird der anfallende Biogasgärrest mit einem Pressschneckenseparator aufbereitet. Mit der Düngewirkung des Biogasgärrestes ist der Anlagenbetreiber laut Angabe sehr zufrieden. Betrieben wird die Biogasanlage mit 37 % Rindergülle, 26 % Grassilage, 23 % Maissilage und 14 % Getreide-Ganzpflanzensilage.



**Abb. 12:** Gehalte an Kjeldahl-N (kg/m<sup>3</sup>) der in Steinach verwendeten organischen Dünger; Box-Plot-Diagramm mit 5. Perzentil niedrig und 95. Perzentil hoch Whiskerlängenperzentil; (Stand: 25.07.2011)

Bei Betrachtung der  $N_T$ -Gehalte der organischen Dünger in Steinach fällt Biogasgärrest 2 auf. Die hohen  $N_T$ -Gehalte des flüssigen Biogasgärrestes sowie der separiert festen Phase lassen sich auf den stickstoffhaltigen Geflügelmist im Eingangssubstrat zurückführen. Alle weiteren Biogasgärreste sowie die Rindergülle enthielten im Median ähnliche  $N_T$ -Gehalte. Lediglich Biogasgärrest 3 wies einen etwas niedrigeren  $N_T$ -Gehalt auf.

Neben dem hohen  $N_T$ -Gehalt fällt der Biogasgärrest 2 auch durch einen besonders engen  $NH_4-N/N_T$ -Quotienten von 76 % auf. Dieser Quotient lag für die weiteren in Steinach verwendeten Biogasgärreste (inklusive der separiert festen Phase) zwischen 53 – 59 % und in der Rindergülle bei 63 %. Der Trockensubstanzgehalt war bei den flüssigen organischen Düngern in der Rindergülle am höchsten mit 7,97 %, die Biogasgärreste enthielten zwischen 4,76 – 6,57 % TS. Der höchste pH-Wert wurde wiederum in der separiert festen Phase gemessen, während die Rindergülle den niedrigsten pH-Wert aufwies.

**Tab. 14:** Durchschnittliche Nährstoffgehalte der am Standort Steinach verwendeten org. Dünger (Stand: 25.07.2011)

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
BGR1	pH-Wert	7.9	0.2	7.6	8.2
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	47.6	13.9	28.5	70.2
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	33.8	12.6	8.2	54.0
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	4.1	0.9	2.9	5.9
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.4	0.4	1.7	3.0
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	4.3	0.6	2.9	6.4
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	0.5	0.2	0.2	0.7
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	1.2	0.3	0.6	1.7
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.3	0.4	0.6	1.9
BGR2	pH-Wert	8.2	0.2	7.9	8.4
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	65.5	14.5	49.9	96.7
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	40.9	9.0	31.0	61.9
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	8.6	1.0	7.6	10.2
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	6.5	0.7	5.7	7.8
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	8.3	0.9	7.2	9.8
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.3	0.5	0.7	2.3
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	3.4	1.1	2.3	4.9
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4.2	1.4	2.6	6.3
BGR2 sep. fest	pH-Wert	8.9	0.3	8.4	9.4
	Trockensubstanz (kg/t)	237.7	20.0	199.3	267.8
	org. Substanz (kg/t)	206.8	21.5	171.3	239.4
	Kjeldahl-N (kg/t)	8.0	0.9	6.1	8.8
	NH <sub>4</sub> -N (kg/t)	4.4	1.7	0.8	5.7
	K <sub>2</sub> O (kg/t)	9.3	2.4	7.7	13.7
	MgO (kg/t)	2.0	0.3	1.5	2.4
	CaO (kg/t)	4.1	0.8	3.3	5.5
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/t)	5.6	0.9	4.6	7.2

org. Dünger	Variable	Mittelwert	Std.abweichung	Minimum	Maximum
BGR3	pH-Wert	7.3	0.2	6.9	7.6
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	50.3	10.8	22.1	63.9
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	35.2	8.6	12.1	46.2
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	3.4	0.6	2.3	5.1
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	1.8	0.2	1.3	2.1
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	3.9	0.8	1.8	4.7
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	0.7	0.2	0.3	0.9
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.4	1.0	0.9	4.0
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	1.3	0.3	0.6	1.7
BGR4	pH-Wert	7.8	0.2	7.5	8.1
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	65.7	7.1	56.9	78.9
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	49.2	6.4	40.8	61.4
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	4.9	0.3	4.5	5.4
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.9	0.2	2.5	3.3
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	6.4	0.7	5.4	7.9
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	0.7	0.1	0.6	1.0
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	1.7	0.2	1.4	2.2
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.8	0.3	1.4	2.3
RiGü Steinach	pH-Wert	7.2	0.2	6.8	7.3
	Trockensubstanz (kg/m <sup>3</sup> )	79.7	16.5	30.8	94.3
	org. Substanz (kg/m <sup>3</sup> )	60.8	13.3	20.9	73.2
	Kjeldahl-N (kg/m <sup>3</sup> )	4.0	0.7	1.9	4.6
	NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2.5	0.4	1.4	2.8
	K <sub>2</sub> O (kg/m <sup>3</sup> )	6.0	0.3	5.5	6.5
	MgO (kg/m <sup>3</sup> )	1.3	0.2	1.0	1.6
	CaO (kg/m <sup>3</sup> )	2.2	0.2	2.0	2.5
	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	1.8	0.2	1.5	2.0

## 4 Ergebnisse der Feldversuche

Die Beurteilung der Wirkung einer Düngung mit Biogasgärresten in den Feldversuchen wurde anhand der beernteten Versuchsglieder vorgenommen. Dabei wurden veränderliche Größen wie TM-Ertrag und N-Entzug betrachtet. Zudem fließen in die Auswertungen qualitätsbestimmende Parameter wie Rohproteingehalt oder Energiegehalt mit ein. Ferner können über die zu verschiedenen Zeitpunkten gezogenen  $N_{\min}$ -Bodenproben Aussagen zum Risikopotential nitratförmiger Verluste abgeleitet werden. Ergebnisse einzelner im Kapitel 4 nicht erwähnter Versuchsglieder können im Tabellenanhang gefunden werden.

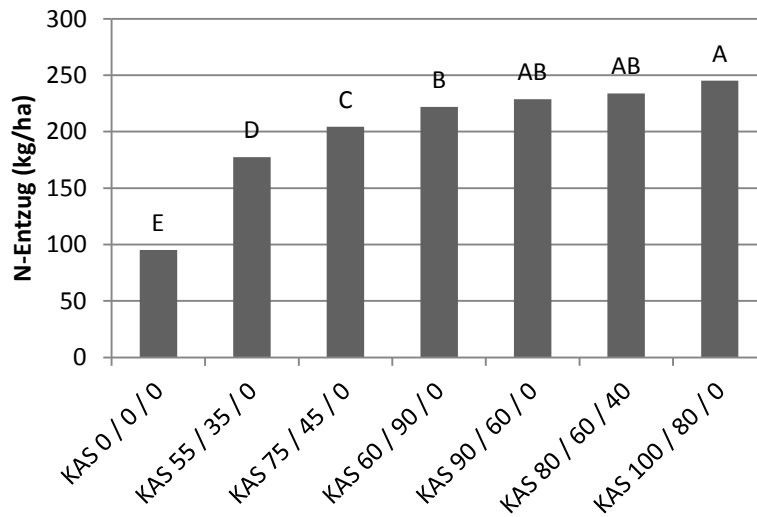
### 4.1 Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Wintertriticale (V548)

Die Versuche zu Wintertriticale als Ganzpflanzensilage wurden am Standort Puch durchgeführt und mit Abschluss des Vegetationsjahres 2011 als dreijährige Versuche verrechnet und ausgewertet. Die Verrechnung der Versuche erfolgt nach den in den Versuchen angelegten, beschriebenen Auswertungsgruppen sowie als Gesamtversuch. Insgesamt zeigte sich in Puch die Güte des Standortes durch ein bereits hohes Ertragsniveau in den ungedüngten Parzellen.

#### Mineralische Düngungssteigerung

Zur Einordnung der Wirkung der organischen Düngung wurden rein mineralisch gedüngte Parzellen mit angelegt. Die Düngung erfolgte zu Vegetationsbeginn und zu Beginn des Schossens BBCH 31. Zusätzlich wurde hier noch geprüft inwiefern eine späte Stickstoffgabe zu BBCH-Stadium 37 (Erscheinen des Fahnenblattes) noch in TM-Ertrag bzw. N-Entzug umgesetzt werden kann. Dabei zeigte sich deutlich, dass insbesondere eine frühjahrsbetonte Düngung für die Produktion von GPS vorteilhaft ist, da insbesondere die Förderung des vegetativen Apparates im Vordergrund steht. So lieferte die Variante mit moderater Düngung zu VB lediglich 180,5 dt TM/ha (entspricht 60 kg N/ha zu VB und 90 kg N/ha zu BBCH 31), während eine Betonung der Frühjahrsgabe einen signifikant höheren Ertrag von 192,0 dt TM/ha lieferte (entspricht 90 kg N/ha zu VB und 60 kg N/ha zu BBCH 31). Weiterhin zeigte sich, dass aufgrund der Verwertungsrichtung als Ganzpflanzensilage und den vorgezogenen Ernteterminen N-Spätgaben (3. Gabe zu BBCH 37) nicht sinnvoll waren (siehe Abb.13).





**Abb. 13:** Stickstoffentzüge (kg/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Statistisch konnte im N-Entzug zwischen der spätbetonten N-Gabe und der frühbetonten N-Gabe kein Unterschied festgestellt werden, indes lagen jedoch die gemessenen Nmin-Gehalte nach der Ernte in den spätbetonten Varianten tendenziell stets höher, sodass die Variante KAS 100/80/0 zu bevorzugen ist. Die Grenzdifferenz der Auswertungsgruppe mineralischer Düngung lag bei 16,8 kg N-Entzug/ha.

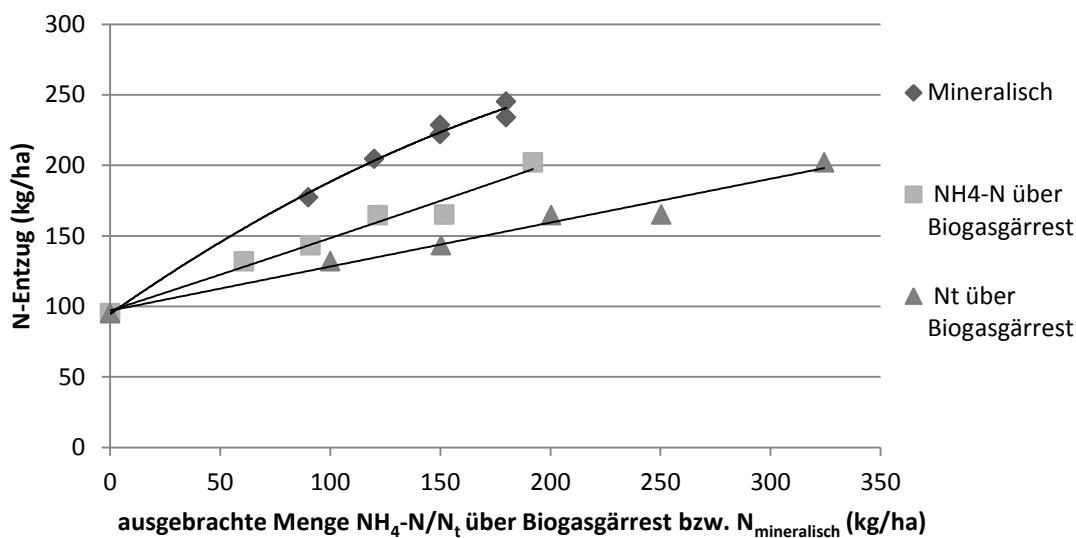
#### Organische Düngungssteigerung mit Biogasgärrest

Die organische Düngung ist generell gekennzeichnet durch eine niedrigere Ausnutzung des applizierten Stickstoffs. Dies zeigt sich typischerweise in einer flacheren Ertragskurve sowie N-Entzugskurve (folgende Abb. 14). Die Düngungssteigerung der Biogasgärreste gliederte sich in die Stufen 75 %, 100 %, 125 %, 150 % des geplanten auszubringenden  $N_{\text{verfügbar}}$ . Die Variante mit 150 % wurde aufgrund sonst zu hoher auszubringender Mengen hälftig auf VB und BBCH 31 aufgeteilt. Alle anderen Varianten wurden ausschließlich zu VB appliziert. Die nach den Untersuchungsergebnissen während der Applikation gezogenen Nährstoffproben auf  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $N_t$  und die daraus berechnete Aufwandmenge können Tabelle 15 entnommen werden.

**Tab. 15:** Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{N}_t$  je Hektar im Mittel der drei Jahre zu Wintertriticale GPS

Applikationsrate	Ø $\text{NH}_4\text{-N/ha}$	Ø $\text{N}_t/\text{ha}$
BGR 50%	61	100
BGR 75%	91	150
BGR 100%	122	200
BGR 125%	152	250
BGR 150%	192	324

Die Unterschiede in der Wirkung auf den N-Entzug der mineralischen Düngung und der Düngung mit Biogasgärresten können in Abb. 14 abgelesen werden. Diese zeigt die applizierte Menge an mineralischem Stickstoff der mineralischen Stickstoffsteigerung bzw.  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus Biogasgärresten auf, sowie den gemessenen N-Entzug. Das  $\text{MDÄ}_{\text{NUP}}$  für den applizierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  beträgt im Mittel über die Applikationsstufen 64 % und auf Grundlage des applizierten  $\text{N}_t$  41 %. Das für den über Biogasgärrest applizierten  $\text{N}_t/\text{ha}$  errechnete  $\text{MDÄ}_{\text{NUP}}$  basiert lediglich auf den Varianten 50 % – 100 % um Fehler durch Extrapolation der mineralischen Düngung ausschließen zu können.

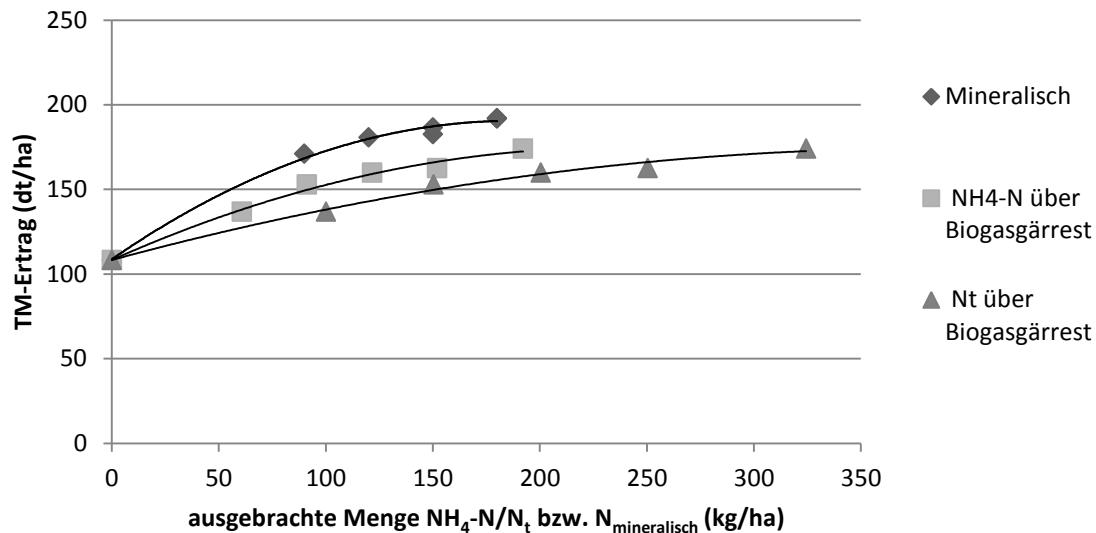


**Abb. 14:** Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS

Daraus wird ersichtlich, dass auf Basis des über Biogasgärrest applizierten  $\text{NH}_4\text{N}$  im Mittel der Jahre 2009 - 2011 etwa 82 % des Stickstoffentzuges der mineralischen Varianten erreicht werden konnten (entspricht einer scheinbaren Stickstoffausnutzung). Benutzt man als Kalkulationsgrundlage den über Biogasgärrest insgesamt applizierten  $\text{N}_t/\text{ha}$ , so konnten über alle

Stufen mit Biogaseärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 ca. 67 % des Stickstoffentzuges der mineralischen Varianten erreicht werden.

Geringfügig andere Ergebnisse werden erreicht bei einem Vergleich der erzielten Trockenmasseerträge (Abb. 15).



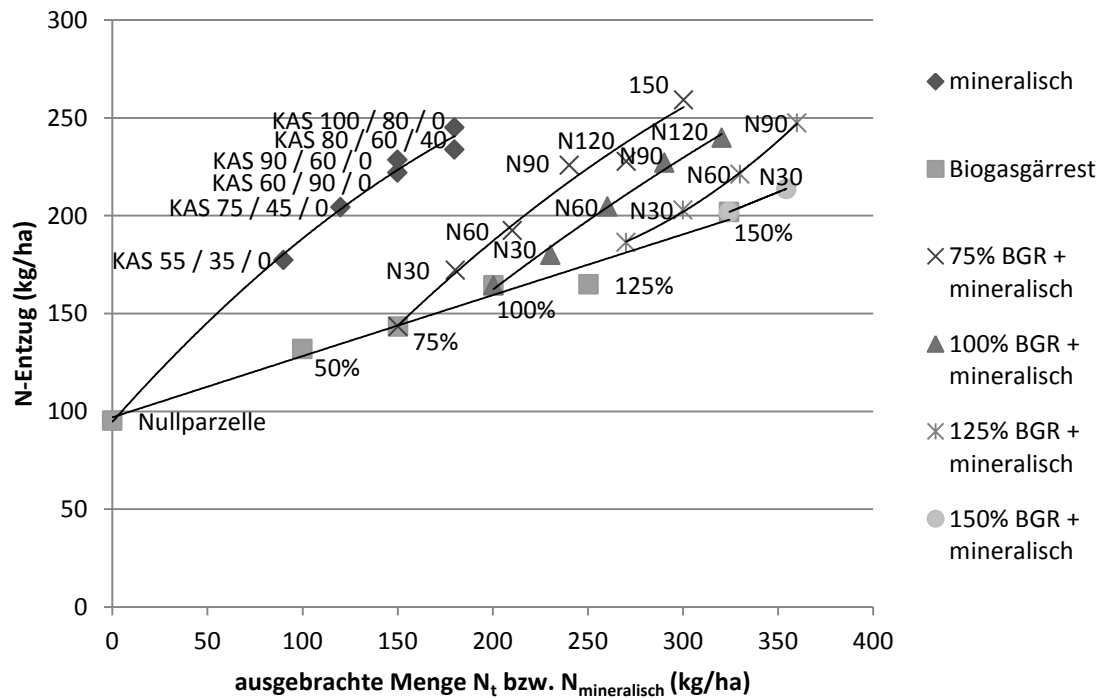
**Abb. 15:** Darstellung der TM-Erträge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS

Anstelle den N-Entzug über mineralischen Dünger bei gleicher Applikationsrate darzustellen ( $MD\ddot{A}_{NUP}$ ), kann auch jene Menge an Stickstoff (kg N/ha) mineralischer Herkunft in v. H. angegeben werden, welche zur Erzielung desselben TM-Ertrages einer organischen Düngung benötigt wurde. Dadurch kann ein TM-Ertragsäquivalent für die Mineraldüngung (EÄM) gegenüber der Düngung mit Biogaseärrest durch lösen der quadratischen Gleichung der mineralischen Stickstoffsteigerung errechnet werden. Dieses beträgt für den applizierten  $N_t$  über Biogaseärrest durchschnittlich 35 %. Verwendet man dagegen für die Kalkulation den applizierten  $NH_4-N$  so beträgt das EÄM 58 %. Folglich konnten mit ca. 58 % mineralischem Dünger, verglichen mit dem über Biogaseärrest ausgebrachten Ammoniumstickstoff, entsprechende TM-Erträge erzielt werden.

#### Mineralische Ergänzung zur Düngung mit Biogaseärresten

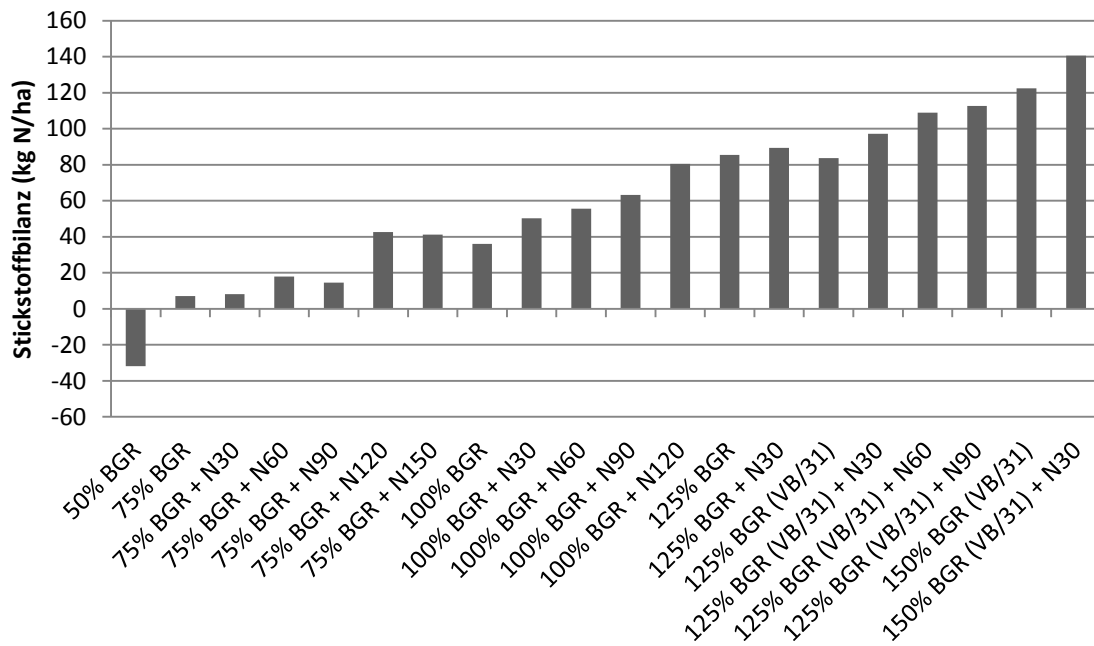
Da eine kombinierte Applikation von organischem und mineralischem Dünger synergetische Effekte aufweisen kann, wurde zusätzlich zu den Varianten der Düngungssteigerung mit Biogaseärresten (75 %, 100 %, 125 %, 150 %) noch mineralischer Dünger ausgebracht. Im Gegensatz zur Düngungssteigerung mit ausschließlich Biogaseärrest ist ferner eine Variante ent-

halten, bei welcher die 125 % Biogasgärrestdüngung ebenso wie die 150 % Variante hälftig auf VB und BBCH 31 aufgeteilt wurde. Die zusätzlich mit Biogasgärrest applizierte Menge mineralischen Stickstoffs wurde ab 30 kg N/ha jeweils hälftig auf VB und das Vegetationsstadium BBCH 31 aufgeteilt. Die tatsächlich ausgebrachten Mengen an Stickstoff ausschließlich mit Biogasgärresten sind wiederum obiger Tabelle 15 zu entnehmen.



**Abb. 16:** Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Wintertriticale GPS, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs

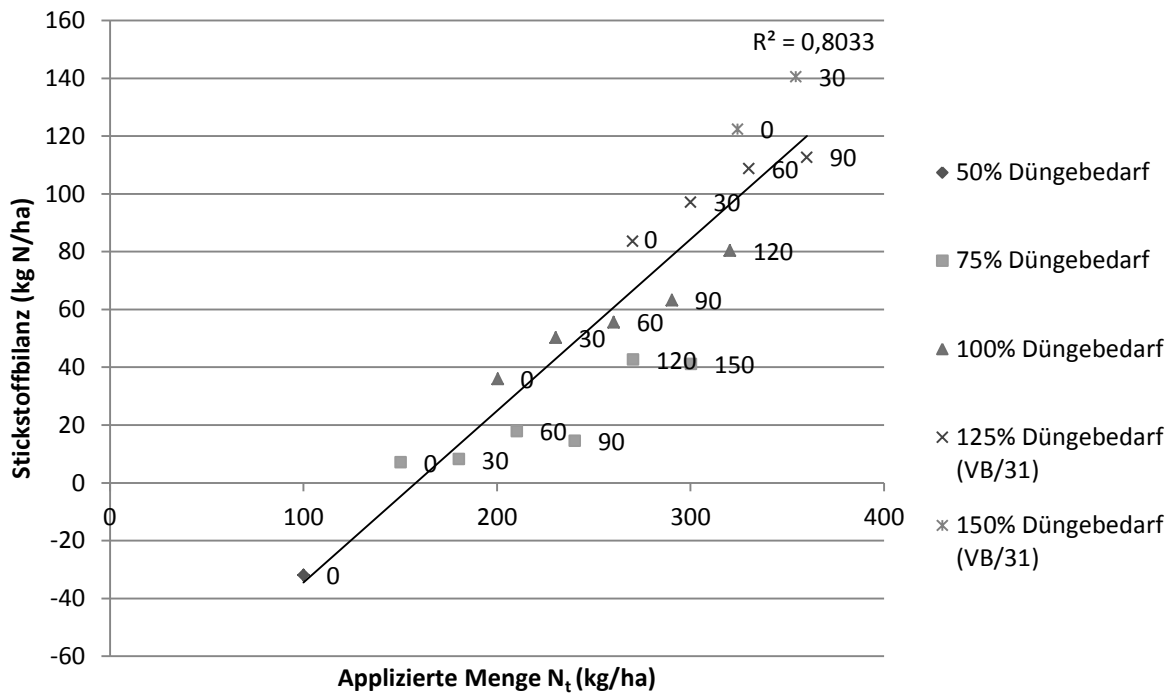
Zu erkennen ist die durch mineralische Düngung gesteigerte Effizienz des insgesamt eingesetzten Stickstoffs. Mit dem zusätzlich zu 75 % bzw. 100 % Biogasgärrest ausgebrachtem mineralischem Stickstoff konnten die N-Entzüge deutlich gesteigert werden. Ein wichtiger Indikator zur Bewertung der Nachhaltigkeit der Landwirtschaft ist der Stickstoffsaldo. Unter Beachtung von Standort- und Bewirtschaftungsfaktoren lassen sich mittels Stickstoffsalden Aussagen zur ökologischen Effizienz der Düngung ableiten sowie Umweltwirkungen abschätzen. Da es sich hier um einen Vergleich der Düngungssysteme handelt, wird lediglich die einfache Stickstoffbilanz ausgewiesen. Diese beinhaltet nicht Faktoren wie Fruchtfolge, Denitrifikationspotential,  $\text{NH}_3$ -Verluste während der Ausbringung oder trockene und nasse Deposition des Standortes. Aus der Differenz von gemessenem N-Entzug und applizierter Menge Gesamtstickstoff aus Biogasgärrest und mineralischem Dünger errechnet sich der Stickstoffsaldo.



**Abb. 17:** Balkendiagramm der Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Wintertriticale GPS

Ferner ist zu beachten, dass für die Berechnung der Stickstoffbilanz nach DüV zusätzlich 14,3 % als ammoniakalische Ausbringungsverluste bei Düngung mit Biogasgärresten derzeit für die Bilanzierung mit eingerechnet werden. Diese Ausbringungsverluste nach DüV sind hier nicht mit einbezogen.

Bezieht man die nach DüV anrechenbaren N-Verluste während der Ausbringung mit ein, so geht hervor, dass Applikationsmengen ab ca. 270 kg N/ha aus Biogasgärrest zu Stickstoffbilanzsalden führen können, welche über dem maximal tolerierbaren Stickstoffüberschuss von 60 kg N/ha liegen. Dazu zählen die Varianten mit 150 % Biogasgärrest (entspricht im dreijährigen Mittel einer Applikation von 324 kg N/ha \* a aus Biogasgärrest) sowie die Varianten mit 125 % Biogasgärrest (entspricht im dreijährigen Mittel einer Applikation von 250 kg N/ha \* a aus Biogasgärrest) inklusive einer zusätzlichen mineralischen Düngung von über 60 kg N/ha.

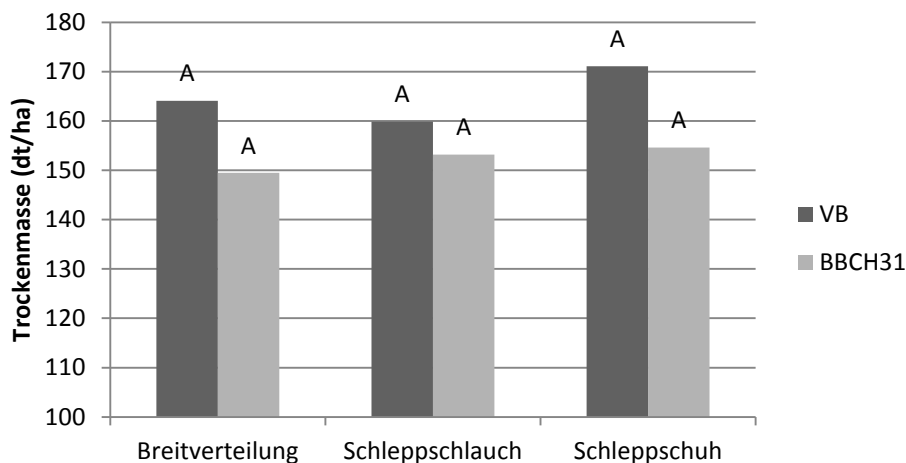


**Abb. 18:** Stickstoffbilanz der kombinierten organischen und mineralischen Düngung zu Wintertriticale GPS. Die Zahlen kennzeichnen die Höhe der zusätzlichen mineralischen Düngung

Fügt man der Darstellung der kombinierten Düngung mit Biogasgärresten und mineralischem Dünger eine Regressionsgerade hinzu, so kann daraus die ökologische Effizienz der Düngung abgelesen werden. Werte unterhalb der Regressionsgerade sind bezüglich des Stickstoffsaldos besser einzustufen als Werte oberhalb der Gerade. Die besten Ergebnisse bezüglich TM-Ertrag, unter gleichzeitiger Beachtung der Stickstoffsalden, lieferten die Varianten 100 % Biogasgärrest (entspricht 200 kg  $N_t$  aus Biogasgärrest) plus 60 kg N mineralisch sowie 75 % Biogasgärrest (entspricht 150 kg  $N_t$  aus Biogasgärrest) plus 120 kg N mineralisch. Dieses Beispiel verdeutlicht, dass um hohe Trockenmasseerträge zu gewährleisten, auch bei der Düngung mit Biogasgärresten eine mineralische Ergänzungsdüngung zweckmäßig ist. Gleichzeitig kann eine mineralische Ergänzung auch bei einer kompletten Rückführung der angefallenen Nährstoffe je Flächeneinheit in einer Biogasfruchtfolge zu Wintertriticale GPS erfolgen, ohne dabei einen kritischen N-Saldo von 60 kg/ha zu überschreiten. In der Variante 100 % Biogasgärrest plus 60 kg N/ha mineralisch wurden 204,8 kg N/ha über das Pflanzenmaterial entzogen. Die Zufuhr rein über Biogasgärrest betrug im Mittel der drei Jahre 200,4 kg  $N_t$ /ha zuzüglich den zusätzlichen 60 kg/ha mineralischen Stickstoffs. Ohne eine mineralische Ergänzungsdüngung zur Variante mit 100 % Biogasgärrest fiel der N-Entzug auf 164,5 kg N/ha sowie der TM-Ertrag von 180,8 dt TM/ha auf 159,9 dt TM/ha.

### Einfluss der Applikationstechnik auf N-Entzug und TM-Ertrag bei der Düngung mit Biogasgäresten

In den drei Vegetationsjahren wurden ebenfalls die Applikationstechniken Breitverteilung, Schleppschlauch sowie Schleppschuh zu Vegetationsbeginn des Wintertriticale sowie zu Beginn des Schossens eingesetzt. Von der geplanten Applikation von 130 kg N<sub>verfügbar</sub> betrug die Abweichung der tatsächlich applizierten Menge in allen drei Jahren maximal -1 % (2011 zu Vegetationsbeginn) bis + 12 % (2009 zu BBCH 31), ermittelt durch die Probenahme während der Ausbringung.



**Abb. 19:** Trockenmasseerträge (dt/ha) der Applikationstechniken Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; *t*-Test  $p \leq 0,05$ )

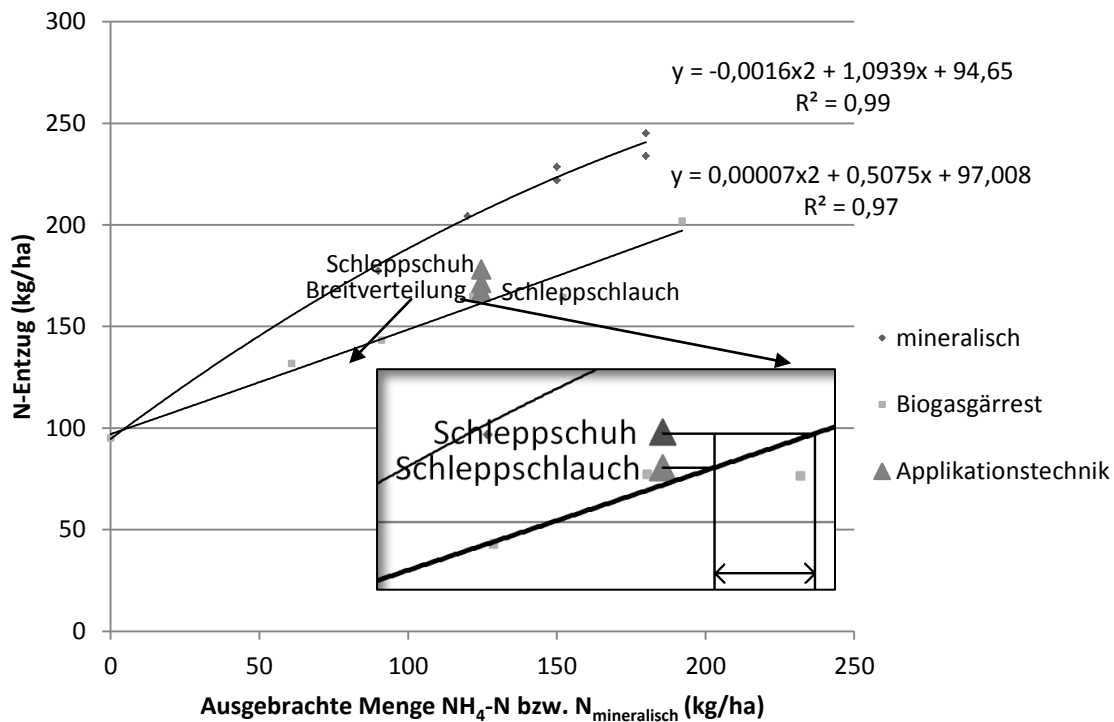
Durch den Einsatz der Applikationstechnik Schleppschuh konnte im Mittel der Jahre zwar ein Mehrertrag erzielt werden. Dieser Mehrertrag konnte statistisch aber nicht signifikant abgesichert werden. Auch im N-Entzug konnte ein Mehrertrag durch bodennahe Ausbringungstechnik auf Wintertriticale zwar tendenziell, nicht aber signifikant, weder zur Ausbringung an dem Termin zu VB noch zu BBCH 31, nachgewiesen werden. Es ist davon auszugehen, dass ammoniakalische Stickstoffverluste hier nicht in größerem Umfang auftraten. Hinweise kann hier die Betrachtung der Düngungssteigerung mit Biogasgäresten geben. Dort fielen die N-Entzüge bei einer Reduktion der 100 % Biogasgärrestvariante auf 75 % Biogasgärrest um 13,1 %, während der Unterschied in den N-Entzügen durch die Ausbringungstechniken niedriger ist (siehe Tab. 15).

**Tab. 16:** Stickstoff Entzüge (kg/ha) der verwendeten Ausbringungstechniken im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 zu zwei Ausbringungsterminen zweifaktoriell (VB + BBCH31) in Wintertriticale (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Faktor Ausbringungstechnik	N-Entzug kg/ha	t-Grouping
Breitverteilung	171,4	A
Schleppschlauch	167,1	A
Schleppschuh	178,1	A

Diese Versuchsergebnisse lassen eine genaue Quantifizierung der gasförmigen Verluste zweifelsohne nicht zu, obschon der Vergleich mit der organischen N-Entzugskurve grob potentielle Größenordnungen aufzeigen kann (Abb. 20). Über die quadratische Funktion  $f(x)=ax^2+bx+c$  der organischen N-Entzugskurve kann außerdem das  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Äquivalent der jeweiligen Technik zur Ausbringung mit Schleppschlauch berechnet werden. Das ist möglich, da die Düngungssteigerung mit Biogasgärresten mit Schleppschlauchtechnik appliziert wurde. Hierfür wird die Differenz des N-Entzuges der Applikationstechnik gleich  $f(x)=y$  gesetzt und die quadratische Funktion nach  $x_{1/2}$  aufgelöst. Folglich erhält man die  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Menge, welche nach der organischen N-Entzugskurve zu applizieren gewesen wäre, um den N-Entzug der jeweiligen Applikationstechnik (in diesem Fall wurde als Standardtechnik der Schleppschlauch gewählt) zu erreichen. Hierbei ist wiederholt darauf hinzuweisen, dass die N-Entzugskurve der organischen Düngung über alle Stufen mit Schleppschlauch appliziert wurde, somit das Äquivalent für diese Versuchsstandardtechnik berechnet wird.





**Abb. 20:** Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung, inklusive der quadratischen Funktion der beiden polynomischen Kurven. Die drei Applikationstechniken sind als Punkte eingezeichnet

Nach dieser Berechnung liegt das NH<sub>4</sub>-N-Äquivalent der Applikationstechnik Schleppschuh zur Applikationstechnik Schleppschlauch bei 115%. Die Steigerung der N-Effizienz gemäß des N-Entzuges ( $y_{\text{Schleppschuh}}/y_{\text{Schleppschlauch}}$ ) liegt zwischen diesen beiden Applikationstechniken bei + 6,6 %. Insgesamt wird der Einsatz eines kg NH<sub>4</sub>-N aus Biogasgärresten mit einer geringeren Effizienz in N-Entzug umgesetzt als der Einsatz eines kg mineralischen Düngers, was durch eine geringere Steigung der N-Entzugskurven verdeutlicht werden kann. Dies ist für organische Düngung bereits bekannt, bedeutet aber, dass Unterschiede in der N-Effizienz beispielsweise durch verschiedene Applikationstechniken nicht so deutlich im N-Entzug auffindbar sind (gleiches gilt für TM-Ertrag). Deutlicher zeigen daher die NH<sub>4</sub>-N-Äquivalente der Applikationstechnik den höheren Bedarf an Stickstoff auf. Bezogen auf den TM-Ertrag müssten mittels Schleppschlauch nach selbiger Berechnung bezogen auf Schleppschuhapplikation 21 % mehr NH<sub>4</sub>-N (19 % N<sub>t</sub>) über Biogasgärrest appliziert werden um selbigen TM-Ertrag zu erreichen. Bezieht man die im Versuch beinhaltete mineralische Stickstoffsteigerung mit ein, so entsprach dies einer Menge von 11,7 kg N/ha mineralischen Stickstoffs.

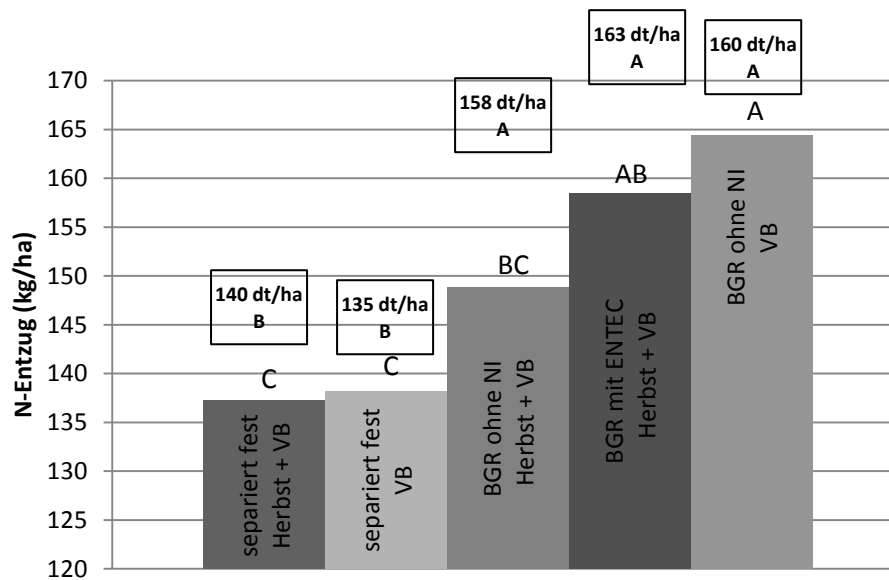
**Tab. 17:** Auswertung der  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Äquivalente der Applikationstechnik zu Wintertriticale Ganzpflanzensilage; Mittelwert der Jahre 2009-2011

Applikationstechnik	MW $\text{NH}_4\text{-N}$ -Äquivalent der Applikationstechnik
Schleppschlauch	135
Schleppschuh	158

Diese Unterschiede in der applizierten Menge an  $\text{NH}_4\text{-N}$  spiegeln sich in der dreijährigen Auswertung in einem deutlichen Unterschied zwischen Schleppschlauch und Schleppschuh wider. Das bedeutet, dass für ein Erreichen derselben N-Entzüge wie sie mit Schleppschuh-technik erreicht werden konnten, mit Schleppschlauchtechnik 22,5 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$  hätten mehr ausgebracht werden müssen. Mittels Breitverteilung konnten keine weiteren Mindererträge bzw. –entzüge festgestellt werden. Stattdessen waren die N-Entzüge bei Breitverteilung der Biogasgärreste leicht höher als mit Schleppschlauchtechnik. Lediglich im Jahr 2011 lieferten die Schleppschläuche tendenziell höhere N-Entzüge als eine Breitverteilung.

#### Herbstdüngung mit Biogasgärresten

Um die Wirkung einer Düngung mit Biogasgärresten im Herbst zu prüfen, wurde unbehandelter Biogasgärrest sowie separiert fester Biogasgärrest zwischen Ende September und Anfang Oktober appliziert. Zusätzlich wurde in einer Variante der Biogasgärrest mit ENTEC flüssig® (die Aufwandmenge des Nitrifikationsinhibitors lag bei 10 l/ha) ausgebracht. Der Nitrifikationsinhibitor wurde dazu entsprechend der Menge an Biogasgärrest im Fass zu dosiert und untergerührt. Der in ENTEC flüssig® befindliche Wirkstoff DMPP (Dimethylpyrazolphosphat) hemmt selektiv die für die Nitrifikation zuständigen Nitrosomonas-Bakterien. Diese Verzögerung der Umwandlung in Nitrat kann im Boden 4 – 10 Wochen andauern (HOFMAIR 2000). Der durch die Düngung mit Biogasgärresten erhöhte Ammonium-Pool im Boden kann durch dessen ähnlichen Ionenradius wie  $\text{K}^+$ -Ionen an Randschichten von Tonmineralen (vor allem Dreischichtminerale) fixiert werden und unterliegt somit nicht mehr der allfälligen Auswaschung. Dieses fixierte  $\text{NH}_4^+$  kann dann anschließend über Diffusionsprozesse langsam in die Bodenlösung wieder freigegeben werden.

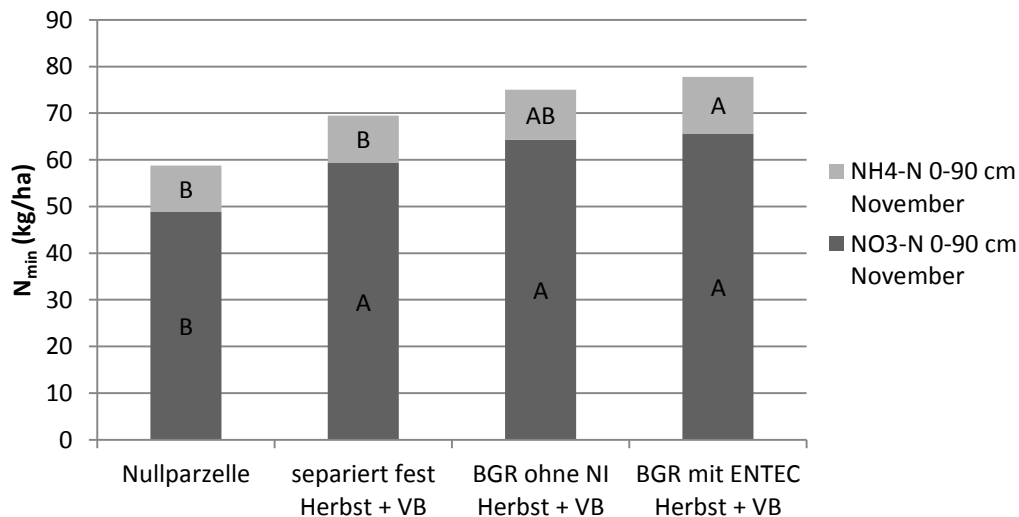


**Abb. 21:** Stickstoffentzüge der im Herbst gedüngten Parzellen zu Wintertriticale GPS als Balkendiagramm, sowie deren TM-Erträge in dt/ha (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Die Varianten mit Herbstdüngung erhielten im Herbst maximal 40 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  bzw. 80 kg  $\text{N}_t$  aus Biogasgärrest und die restliche Menge im Frühjahr. Insgesamt sollten 130 kg  $\text{N}_{\text{verfügbar}}$  ausgebracht werden. Im Mittel wurden aufgrund der Abweichungen zwischen Biogasgärrestvorprobe und der Probe während der Ausbringung bei den im Herbst gedüngten Varianten 7,2 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  aus Biogasgärrest weniger ausgebracht. Mit dem separiert festen Biogasgärrest wurden bei der im Herbst gedüngten Variante 100,9 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  und im Frühjahr 96,4 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  in der Summe der Herbst- und Frühjahrsgabe appliziert.

Die separiert festen Biogasgärreste lieferten deutlich niedrigere N-Entzüge als die unbehandelten Biogasgärreste, wiesen allerdings keine Unterschiede zwischen den im Herbst bzw. im Frühjahr gedüngten Varianten auf. Dies deutet darauf hin, dass trotz der hohen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalte in der separiert festen Phase diese nicht pflanzenverfügbar sind. Hierbei kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich ein Großteil des vorhandenen  $\text{NH}_4\text{-N}$  bereits während der Ausbringung aufgrund der hohen pH-Werte (7,9 – 9,1) als  $\text{NH}_3$  verflüchtigte. Bei dem unbehandelten Biogasgärrest konnten im Vergleich zur Herbstdüngung durch eine Düngung im Frühjahr signifikante Mehrentzüge erreicht werden.

Durch die Zugabe von Nitrifikationsinhibitor zu dem im Herbst applizierten Biogasgärrest, konnte zudem eine Steigerung der N-Entzüge festgehalten werden. Die im November gezogenen  $\text{N}_{\text{min}}$ -Bodenproben geben Hinweise auf die Wirkung des NI.



**Abb. 22:** Balkendiagramm der  $N_{min}$ -Bodenprobenahme im November nach Biogasgärrestdüngung. Dargestellt sind die Summe aus Ammonium- und Nitratstickstoff im Boden in 0 – 90 cm Bodentiefe; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Der Ammoniumgehalt in 0 – 90 cm Bodentiefe ist im November in den mit NI gedüngten Parzellen aufgrund des gehemmten Umsatzes des biogasgärrestbürtigen  $\text{NH}_4\text{-N}$  tendenziell höher (12,2 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$ ) als ohne den Einsatz von NI (10,7 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$ ). Auch in der Summe aus  $\text{NO}_3\text{-}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$  im Boden grenzen sich die im Herbst gedüngten Varianten von der ungedüngten Variante ab.

#### Vergleich der verschiedenen organischen Dünger

Zu Wintertriticale-GPS wurden neben dem unbehandelten Biogasgärrest, separiert flüssiger Phase und separiert fester Phase (diese stammen allesamt aus derselben Biogasanlage) auch eine Rindergülle und eine Verdünnung des Biogasgärrestes mit Wasser im Verhältnis 1:1 verglichen (siehe Versuchsaufbau Wintertriticale Kap. 3.2.1).

Ziel war es mit allen organischen Düngern dieselbe Menge an Stickstoff auszubringen. Allerdings erwies sich speziell die separiert feste Phase als schwer zu analysierender Dünger. Es ist demzufolge zu beachten, dass die mit separiert fester Phase ausgebrachten Mengen  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  geringer waren als mit unbehandeltem Biogasgärrest. Dies lag vor allem an der schwierigen Homogenisierung des Materials sowie der erhöhten Anfälligkeit bezüglich ammoniakalischer Verluste in Zusammenhang mit dessen  $\text{NH}_4\text{-N}$ -Gehalt und pH-Wert (siehe Nährstoffgehalte der separiert festen Phase in Kap. 3.6.3). Die separiert feste Phase wurde zur Voruntersuchung zwischengelagert und vor der Ausbringung die äußeren Schichten entfernt.

**Tab. 18:** Darstellung der über die organischen Dünger nach Nährstoffuntersuchung tatsächlich ausgebrachten Mengen an  $NH_4-N$  und  $N_t$  im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Ø 2009 - 2011	Separiert flüssig	Verdünnung 1:1	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
$NH_4-N$ appliziert	122	111	122	125	96
$N_t$ appliziert	197	182	200	218	213

Der separiert feste Biogasgärrest lieferte in den Versuchen auch die niedrigsten N-Entzüge sowie TM-Erträge. Die höchsten TM-Erträge konnten durch den separiert flüssigen Biogasgärrest erzielt werden (170 dt TM/ha) gefolgt von dem im Verhältnis 1:1 mit Wasser verdünnten Biogasgärrest (168 dt TM/ha) und dem unbehandelten Biogasgärrest (160 dt TM/ha). Durch die Düngung mit Rindergülle fiel der Ertrag auf 150 dt TM/ha und mit dem separiert festen Biogasgärrest wurden lediglich 135 dt TM/ha geerntet. Dieselben Ergebnisse liefert auch die Betrachtung der N-Entzüge der verschiedenen organischen Dünger.

**Tab. 19:** TM-Ertrag und N-Entzug organischer Dünger im Vergleich zu Wintertriticale GPS (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

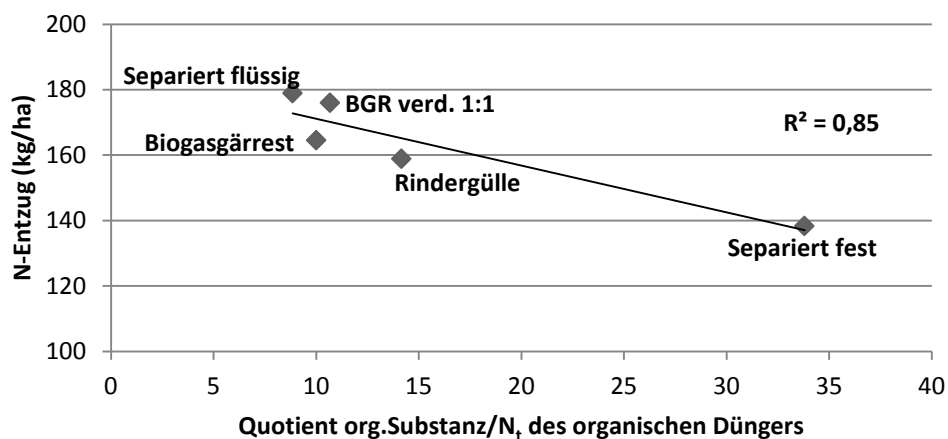
Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
<b>org. Dünger</b>				
BGR separiert flüssig	170	A	178,8	A
BGR verdünnt 1:1	168	A	175,9	AB
BGR unbehandelt	160	AB	164,5	AB
Rindergülle	150	B	158,8	B
BGR separiert fest	135	C	138,3	C

Um die organischen Dünger bezüglich deren Stickstoffwirkung einzuteilen, können diese anhand des jeweiligen Mineraldüngeräquivalent ( $MD\ddot{A}_{NUP}$ ) beschrieben werden (GUTSER, et al. 2005). Durch den Vergleich der mineralischen N-Entzugsfunktion bei gegebener organischer Stickstoffmenge (Analysen der Stickstoffgehalte während der Ausbringung) ist die niedrigere Applikation über die separiert feste Phase hier mit einberechnet.

**Tab. 20:** Mittelwerte ( $\bar{\phantom{x}}$  2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger zu Wintertriticale GPS

$\bar{\phantom{x}}$ 2009 - 2011	Separiert flüssig	Verdünnung 1:1	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
MDÄ <sub>NU<sub>p</sub></sub>	55	55	44	39	28

Die höchsten MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> konnten für die separiert flüssige Phase (55 %) sowie den verdünnten Biogasgärrest (55 %) ermittelt werden, darauf folgen der Biogasgärrest mit 44 % und deutlich dahinter die Rindergülle mit 39 %. Die separiert feste Phase des Biogasgärrestes wies erwartungsgemäß die geringsten MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> auf mit 28 %. Die MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> der verglichenen organischen Dünger zeigen außerdem hohe Korrelationen zu inhaltlichen Eigenschaften der organischen Dünger wie TS-Gehalt ( $R^2=0,78$ ), organische Substanz/ $N_{\text{Ges}}$ -Quotient ( $R^2=0,77$ ) und  $\text{NH}_4\text{-N}/N_{\text{Ges}}$ -Quotient ( $R^2=0,74$ ). Weiterhin zeigte sich eine hohe Korrelation zwischen dem N-Entzug eines organischen Düngers und dem Quotienten aus organischer Substanz und  $N_t$ -Gehalt des organischen Düngers.

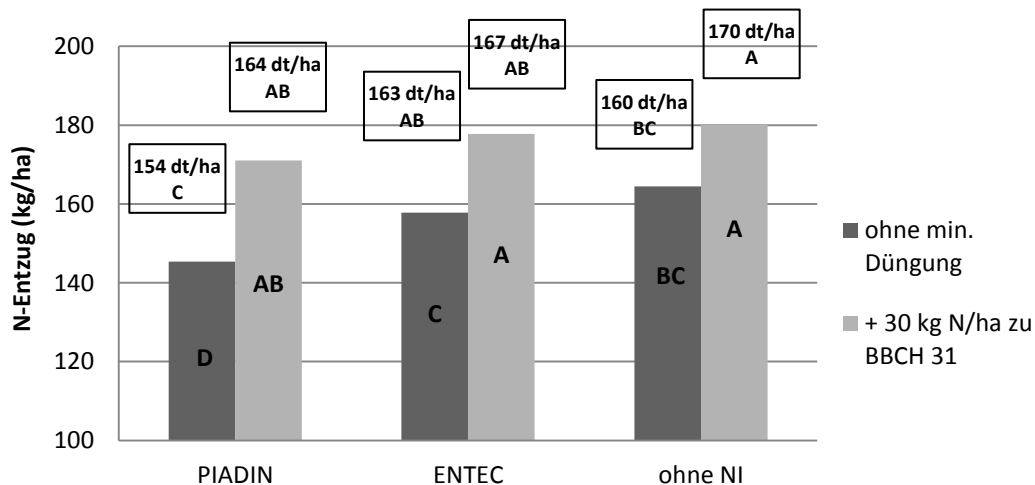


**Abb. 23:** Darstellung der Korrelation zwischen dem Quotienten aus org. Substanz und  $N_t$ -Gehalt des organischen Düngers zum N-Entzug von Wintertriticale GPS

#### Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren zu Biogasgärresten

Neben dem Einsatz im Herbst wurden die Nitrifikationsinhibitoren ENTEC flüssig® (Dimethylpyrazolphosphat) sowie PIADIN® (Triazol und Methylpyrazol) auch als Zusatz zur Düngung mit Biogasgärresten zu Vegetationsbeginn geprüft. Dabei wurden im Mittel der Jahre 122 kg  $\text{NH}_4\text{-N}/\text{ha}$  Biogasgärrest mit Schleppschauchtechnik ausgebracht. Die dem Biogasgärrest zugefügte Aufwandmenge an NI betrug für ENTEC flüssig® 10 l/ha und für PIADIN® 5 l/ha. Es zeigte sich deutlich, dass eine Hemmung der Nitrifikation bei der Düngung mit Biogasgärresten keine Ertragszuwächse im Wintertriticale brachte. Gerade bei Win-

tertriticale zur Erzeugung von Ganzpflanzensilage spielt der vegetative Apparat eine wichtige Rolle. Es sollte aufgrund dessen eine frühe Förderung der Bestockung erfolgen. Der Effekt einer geförderten Bestockung bei nitratbetonter Düngung durch eine erhöhte Wurzel-Spross-Verlagerung von Cytokininen ist bekannt (B. BAUER 2010). Im Falle ammoniumbetonter Düngung aus Biogasgärresten und zusätzlicher Hemmung der Nitrifikation des gedüngten Ammoniums durch Nitrifikationsinhibitoren ist diese Wirkung weniger stark ausgeprägt. So zeigten sich im Versuch die Unterschiede im N-Entzug zwischen den Varianten mit bzw. ohne NI besonders deutlich, wenn keine zusätzliche mineralische Stickstoffgabe zu BBCH 31 folgte, welche die Minderwirkung während der Bestockung teilweise kompensiert. Abbildung 24 zeigt die signifikant niedrigeren N-Entzüge der Nitrifikationsinhibitoren. Die TM-Erträge zeigten eine weniger starke Abstufung zwischen den Varianten.



**Abb. 24:** Darstellung N-Entzüge und TM-Erträge von Nitrifikationsinhibitoren als Zugabe zu Biogasgärresten im Vergleich zu einer Düngung mit Biogasgärrest ohne NI-Zugabe bei Wintertriticale GPS; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Auch die Messungen mittels des beschriebenen Stickstoffsensors zeigten zu Vegetationsstadium 31 höhere Werte in der ohne NI-Zugabe behandelten Variante. Die Sensorwerte der NI-Varianten wiesen ca. 5 % niedrigere Werte zu diesem Termin auf. Bei einer Betrachtung der Einzeljahre zeigte sich ein deutlicher Zusammenhang zwischen der Bodentemperatur und dem N-Entzug. Insbesondere wenn die Temperatursumme der auf die Düngung folgenden 8 Wochen niedrig war, zeigten die Varianten mit NI-Zugabe deutlich geringere N-Entzüge und TM-Erträge als bei wärmeren Temperaturen. So war die Wirkung der mit NI gedüngten Biogasgärreste auf den Stickstoffentzug im Mittel aller Varianten in 2009 bei relativ 97,3% zu Biogasgärrest ohne NI, bei einer Summe der Bodentemperatur von 721 °C (8 Wochen nach der Ausbringung in 5cm Bodentiefe). In 2010 lag der relative N-Entzug bei 93,8 % und einer

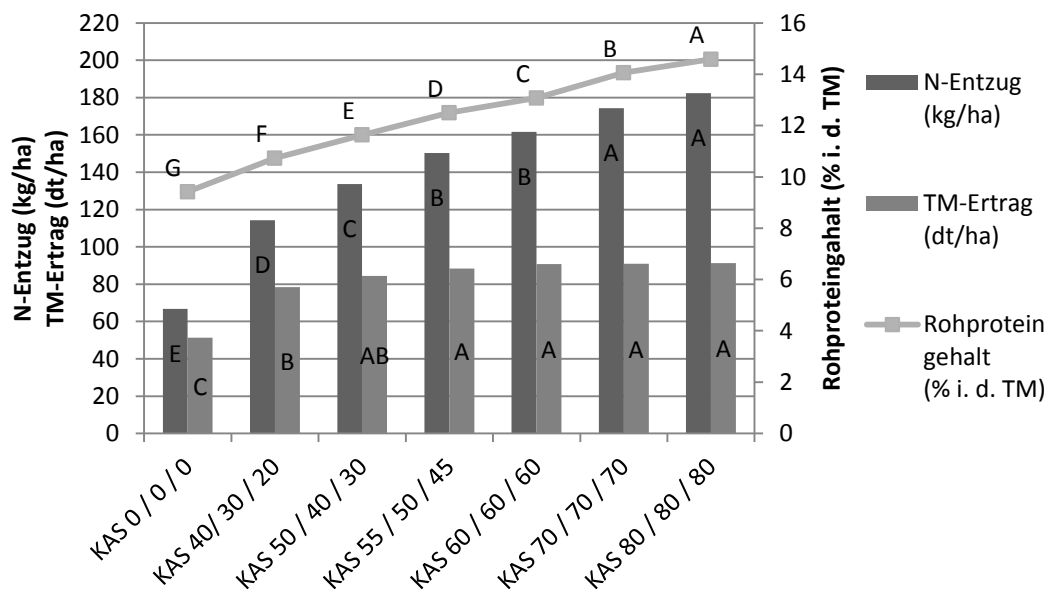
Bodentemperatursumme von 509 °C sowie in 2011 bei 92,5% und einer Bodentemperatursumme von 449 °C.

## 4.2 Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Winterweizen (V549)

Die Versuche mit Biogasgärresten zu Winterweizen wurden an den Standorten Puch und Bayreuth durchgeführt und mit Abschluss des Vegetationsjahres 2011 als mehrortiger, dreijähriger Versuch verrechnet und ausgewertet. Die Verrechnung der Versuche erfolgt ebenfalls nach den beschriebenen Auswertungsgruppen sowie als Gesamtversuch.

### Mineralische Düngungssteigerung

Ähnlich wie der Wintertriticale zeigte der Winterweizen eine deutliche Reaktion auf die rein mineralischen Varianten. Während der Kornertrag ab 150 kg N/ha keine signifikante Reaktion auf eine zusätzliche Stickstoffdüngung zeigte, konnte der N-Entzug bis 210 kg N/ha signifikant gesteigert werden (Abb. 25). Die Rohproteingehalte lagen zwischen 9,4 % in der ungedüngten Variante und 14,6 % maximalem Rohproteingehalt bei 240 kg Stickstoff und unterschieden sich in allen Stufen signifikant.



**Abb. 25:** Stickstoffentzug (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )



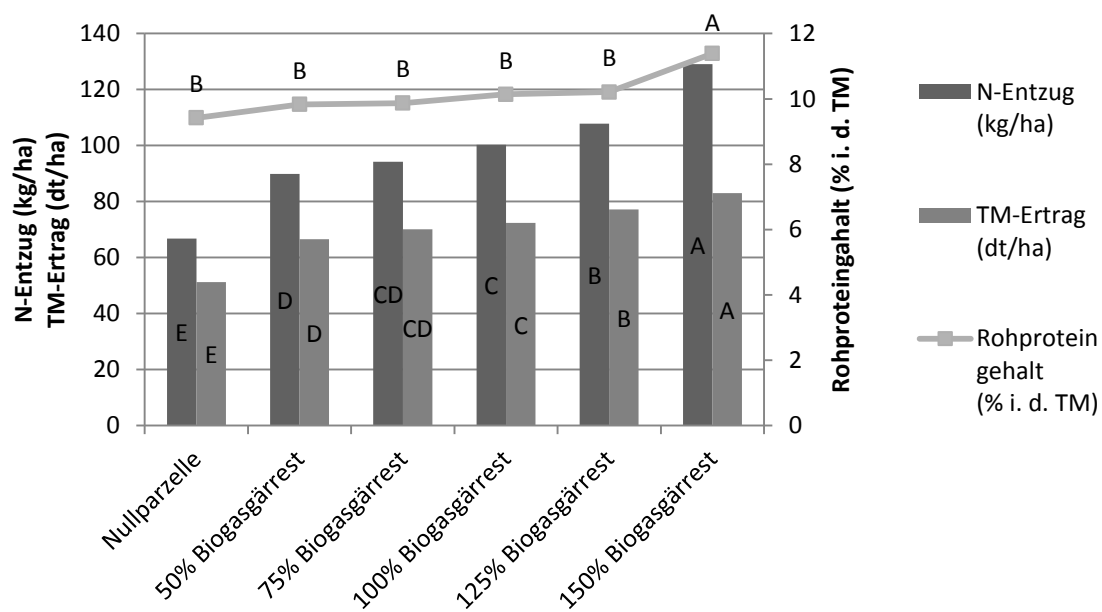
Organische Düngungssteigerung mit Biogasgärrest

Die Düngungssteigerung der Biogasgärreste gliederte sich in die Stufen 75 %, 100 %, 125 % und 150 % des geplanten auszubringenden  $N_{\text{verfügbar}}$ . Die im Durchschnitt ausgebrachten Mengen  $NH_4\text{-N/ha}$  und  $N_t\text{/ha}$  der organischen Varianten können Tab. 21 entnommen werden. Die Variante 150 % wurden erneut aufgrund sonst zu hoher Applikationsraten jeweils hälftig auf VB und BBCH 31 aufgeteilt. Sämtliche weiteren Varianten wurden ausschließlich zu VB appliziert.

**Tab. 21:** Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an  $NH_4\text{-N}$  und  $N_t$  je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte zu Winterweizen

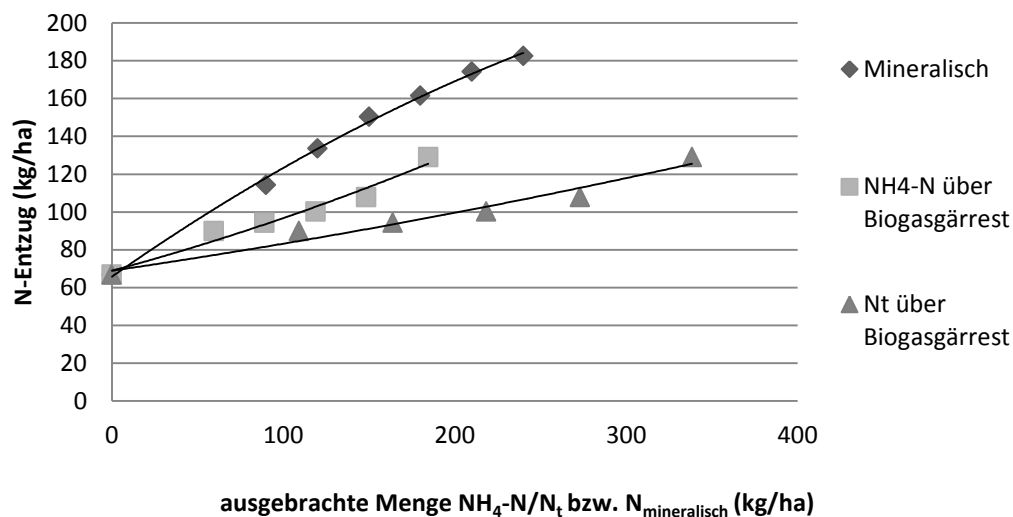
Applikationsrate	$\bar{\text{O}} NH_4\text{-N/ha}$	$\bar{\text{O}} N_t\text{/ha}$
BGR 50%	59	109
BGR 75%	89	164
BGR 100%	119	218
BGR 125%	160	296
BGR 150%	185	338

Insgesamt liegen die mit Biogasgärrest gedüngten Varianten auf einem deutlich niedrigeren Niveau als die mineralischen Varianten.



**Abb. 26:** Stickstoffentzug (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der Düngungssteigerung mit Biogasgärrest im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t\text{-Test } p \leq 0,05$ )

Während durch die mineralische Düngung durchschnittliche Kornerträge bis über 90 dt/ha bei 240 kg N/ha erreicht werden konnten, reichten die Kornerträge der Düngung ausschließlich mit Biogasgärrest lediglich bis maximal 83 dt/ha bei 338 kg N<sub>t</sub>/ha (Abb. 26). Ein ähnliches Bild zeigen die N-Entzüge der Stickstoffsteigerung. Bei Betrachtung des in Abb. 27 abgebildeten N-Entzuges kann die Wirkung des applizierten Stickstoffs aus Biogasgärrest jeweils bezogen auf N<sub>t</sub> bzw. NH<sub>4</sub>-N gegenüber der mineralischen Düngung abgelesen werden. Darüber hinaus kann auch das Mineraldüngeräquivalent von Biogasgärrest aufgezeigt werden. Für die organische Düngungssteigerung zu Winterweizen mit Biogasgärresten ergibt sich ein durchschnittliches MDÄ<sub>NU<sub>P</sub></sub> von 33 % für den applizierten N<sub>t</sub>/ha, sowie 59 % kalkuliert auf Grundlage des applizierten NH<sub>4</sub>-N. Das Ertragsäquivalent des TM-Ertrages für die Applikationsrate auf Basis des über Biogasgärrest applizierten N<sub>t</sub> beträgt im Mittel der Stufen 34 % und auf Basis des applizierten NH<sub>4</sub>-N 62 %.

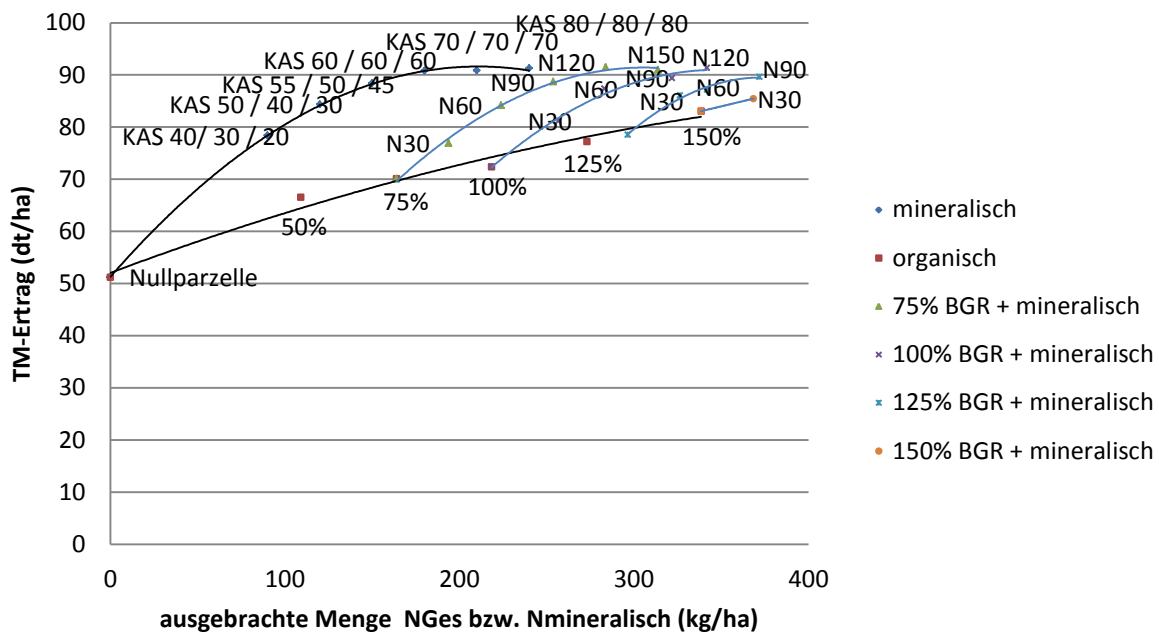


**Abb. 27:** Darstellung der N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere beiden Kurven) Düngungssteigerung zu Winterweizen

### Mineralische Ergänzung zur Düngung mit Biogasgärresten

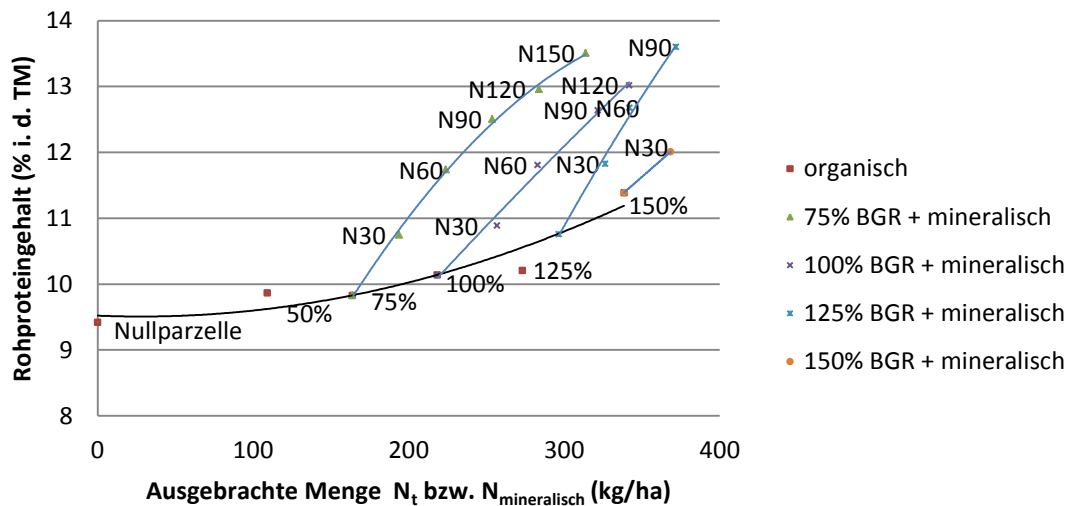
Auch zu Winterweizen wurde die kombinierte Düngung aus Biogasgärrest und mineralischem Dünger geprüft. Hierbei wurden zu den Düngungsstufen mit Biogasgärrest (75 %, 100 %, 125 %, 150 %) jeweils 30 bis maximal 150 kg N/ha mineralisch hinzugegeben. Die Varianten 125 % und 150 % mit mineralischer Ergänzung wurden hälftig auf VB und BBCH 31 aufgeteilt. Die zusätzlichen mineralischen Düngergaben wurden ab 30 kg N/ha ebenfalls jeweils hälftig auf die Gabe zu VB und BBCH 31 verteilt. So wurden z.B. bei der Variante 100 % Biogasgärrest plus 90 kg mineralischer Stickstoff 45 kg N<sub>mineralisch</sub>/ha zu VB gegeben und die restlichen 45 kg N/ha aus mineralischem Dünger zu BBCH 31. Auch zu Winterweizen konnte

durch diese Kombination aus der Düngung mit Biogasgärrest und zusätzlichem mineralischem Dünger eine deutliche Steigerung der Erträge und N-Entzüge festgestellt werden. So lag der Maximalertrag durch Düngung mit Biogasgärresten bei einer ausgebrachten Menge von maximal 185 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  bzw. 338 kg  $\text{N}_{\text{Ges}}/\text{ha}$  bei 83 dt Kornertrag/ha, während mit einer Gabe von 180 kg mineralischem Stickstoff je Hektar ein Kornertrag von 91 dt/ha erzielt werden konnte. Ab einer Düngehöhe von ca. 180 kg N/ha stieg der Kornertrag nicht weiter an, während sich der Rohproteingehalt in allen mineralischen Stufen bis zu 240 kg N/ha signifikant erhöhte.



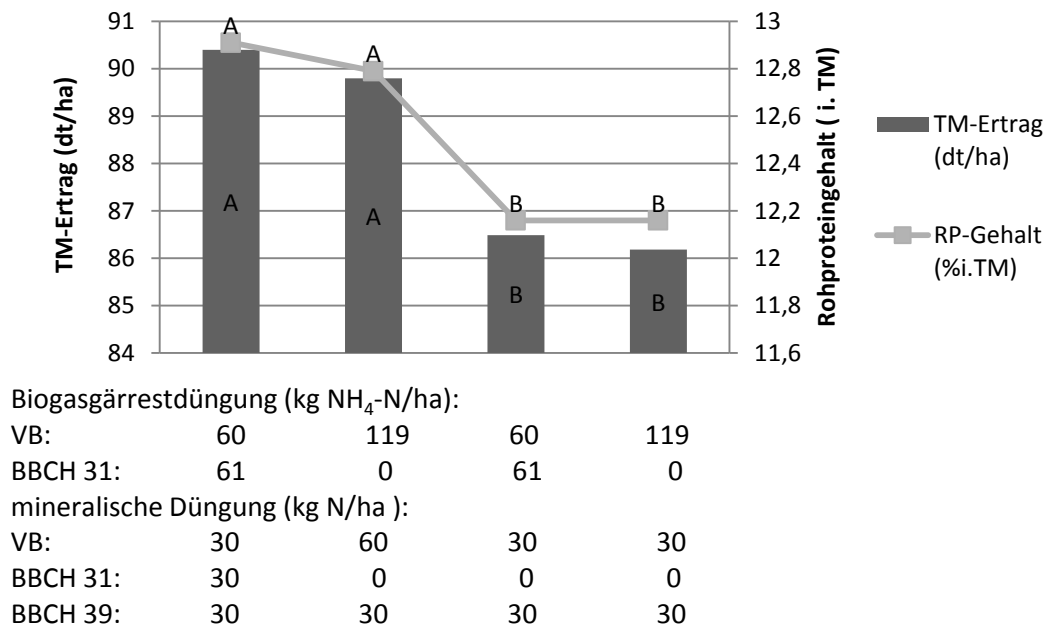
**Abb. 28:** Darstellung des TM-Ertrages der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Winterweizen, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs

Insbesondere bei der kombinierten Düngung stieg der qualitätsbestimmende Rohproteingehalt durch mineralische Düngung stark an. Mit einer Stickstoffdüngung von 338 kg  $\text{N}_{\text{Ges}}/\text{ha}$  aus Biogasgärrest konnte ein Rohproteingehalt von 11,4 % erzielt werden, während durch eine mineralische Ergänzung von je 30 kg N/ha der Rohproteingehalt um etwa 0,8 % gesteigert werden konnte.



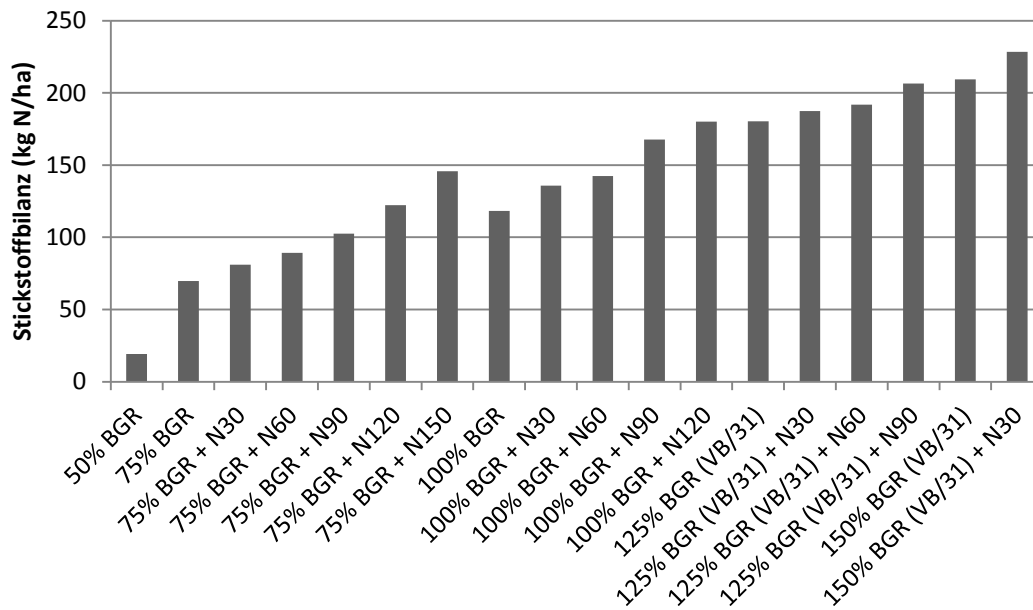
**Abb. 29:** Darstellung der Rohproteingehalte der organischen Düngungssteigerung zu Winterweizen, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs

Da bei den Versuchen zu Winterweizen lediglich das Korn abgefahren wurde, liegen die Stickstoffsalden der Varianten vergleichsweise hoch. Hinzu kommt bei den Rohproteingehalten und somit auch Stickstoffentzügen der mit Biogasgärrest gedüngten Varianten, dass die Biogasgärreste maximal auf zwei Gaben zu VB und BBCH 31 aufgeteilt wurden, während die mineralische Düngung auf die drei Termine VB, BBCH 31 und BBCH 37 aufgeteilt wurde. Somit konnte durch die spätere mineralische Düngung entscheidend auf die Kornfüllungsphase und den Rohproteingehalt eingewirkt werden. Durch eine hälftige Verteilung der Biogasgärrestgabe auf Vegetationsbeginn und BBCH 31 in Kombination mit mineralischer Düngung wurden bei zusätzlicher mineralischer Düngung von 90 kg N/ha signifikant höhere TM-Erträge und Rohproteingehalte erreicht. Durch die Aufteilung der Biogasgärrestgabe auf die genannten Termine konnten nur tendenzielle Vorteile im TM-Ertrag und Rohproteingehalt erzielt werden, jedoch keine statistischen Signifikanzen (Abb. 30).



**Abb. 30:** Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt der Düngung mit Biogasgärrest zu verschiedenen Vegetationsstadien im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte (Puch und Speichersdorf) bei Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

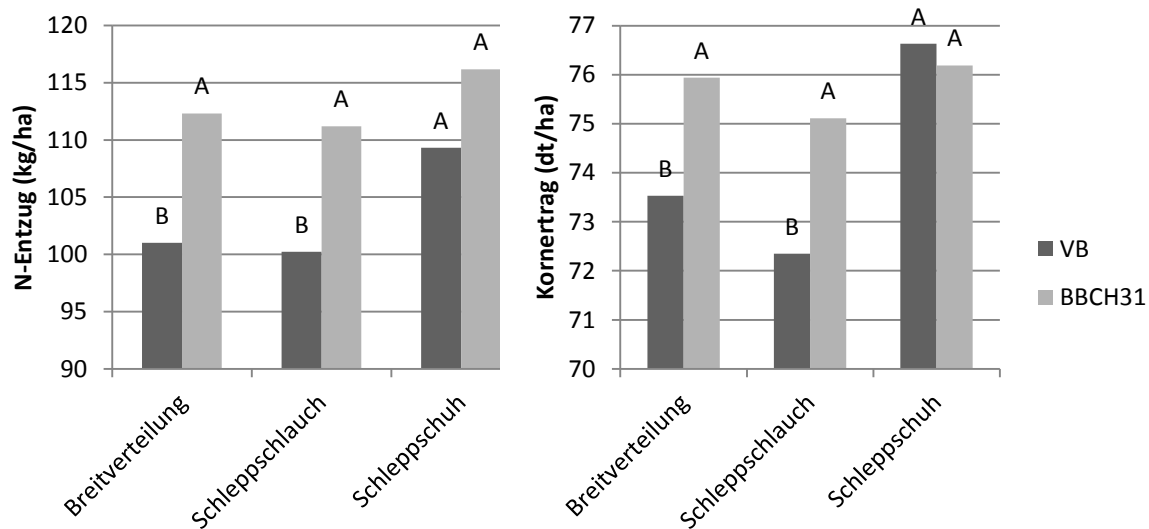
Im Vergleich mit den ausschließlich mineralisch gedüngten Varianten liegen die Stickstoffsalden der Biogasgärrestdüngung relativ hoch. Die N-Salden der Mineraldüngervarianten liegen bei den mineralisch gedüngten Stufen zwischen -24 kg N/ha bei ausgebrachten 90 kg N/ha und einem maximalen N-Überhang von +58 kg N/ha bei einer Düngung von 240 kg N/ha. Auch durch eine Aufteilung der Biogasgärrestgaben bei den Varianten mit 125 % und 150 % konnte der Stickstoffsaldo nicht klar reduziert werden. Zu beachten ist allerdings, dass wie bereits erwähnt das Weizenstroh auf der Fläche verblieb und nicht in die Stickstoffbilanz mit eingeht.



**Abb. 31:** Balkendiagramm der Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Winterweizen Korndrusch

#### Einfluss der Applikationstechnik auf N-Entzug und TM-Ertrag bei der Düngung mit Biogasgäresten

Zur Düngung des Winterweizens wurden ebenfalls die drei Applikationstechniken Breitverteilung, Schleppschlauch und Schleppschuh zu VB und BBCH 31 verglichen. Wie bei den Versuchen zu Wintertriticale zeigten sich zwischen Breitverteilung und Schleppschlauch keine statistischen Unterschiede, allerdings konnte bei der Applikation mittels Schleppschuh ein signifikant höherer N-Entzug sowie Kornertrag gegenüber den beiden anderen Applikationstechniken bei der Düngung zu VB gemessen werden. Dieser Unterschied im N-Entzug des Winterweizens konnte zu BBCH 31 statistisch nicht mehr abgesichert werden, bleibt aber tendenziell erkennbar.



**Abb. 32:** Vergleich der drei Applikationstechniken zu Vegetationsbeginn sowie BBCH 31 anhand des gemessenen N-Entzuges und Korntrag im Korn von Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Auch bei den Versuchen zu Winterweizen kann für die Applikation mittels Schleppschuh ein Schleppschauchäquivalent aus der Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest berechnet werden. Ausgebracht wurden im Mittel der drei Jahre je Technik 121 kg N<sub>4</sub>H-N/ha. Zur Berechnung der äquivalenten Menge die mittels Schleppschauchtechnik hätte ausgebracht werden müssen um den N-Entzug der Schleppschuhtechnik zu erreichen, wurden die Ergebnisse der zweifaktoriellen Auswertung verwendet (Applikationstechnik und Applikationstermin).

**Tab. 22:** Stickstoff Entzüge (kg/ha) der verwendeten Ausbringungstechniken im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 zu zwei Ausbringungsterminen zweifaktoriell (VB + BBCH31) in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Faktor Ausbringungstechnik	MW N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
Breitverteilung	106,7	B
Schleppschauch	105,7	B
Schleppschuh	112,7	A

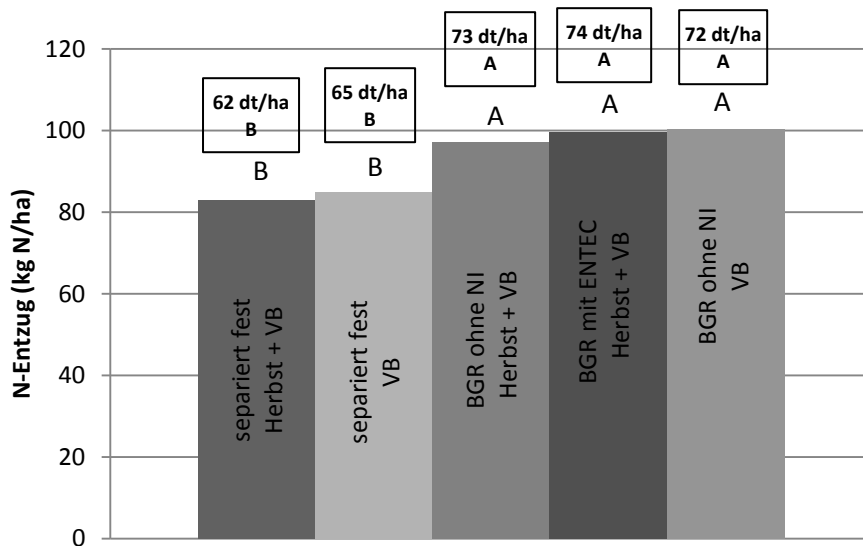
Da die Stickstoffsteigerung mit Biogasgärrest und Schleppschauchtechnik allerdings nur zu VB erfolgte und die tatsächlich ausgebrachten Mengen an den beiden Terminen nicht absolut identisch waren, muss das Mittel der beiden Applikationstermine für alle Applikationstechniken an die N-Entzüge der Steigerungsdüngung angepasst werden. Vergleicht man nun die Applikationstechnik Schleppschauch mit Schleppschuh, so zeigt sich, dass um die N-Entzüge der Schleppschuhtechnik zu erreichen mittels Schleppschauch ca. 16% mehr NH<sub>4</sub>-N

(21 kg NH<sub>4</sub>-N/ha) hätten ausgebracht werden müssen. Wird als Grundlage der TM-Ertrag gesetzt, müssten mittels Schleppschlauch nach selbiger Berechnung zu Winterweizen 18 % mehr NH<sub>4</sub>-N (16 % N<sub>i</sub>) über Biogasgärrest appliziert werden um den TM-Ertrag der Schleppschuhapplikation zu erreichen. Bezieht man die im Versuch beinhalten mineralische Stickstoffsteigerung mit ein, so entsprach dies einer Menge von 10,9 kg mineralischen Stickstoffs.

#### Herbstdüngung mit Biogasgärresten

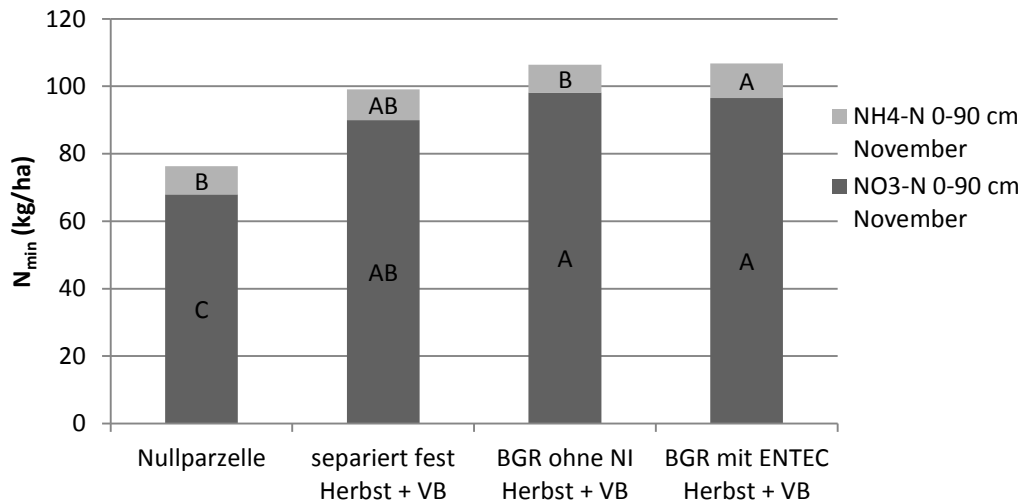
Zu Winterweizen wurden ferner drei Varianten mit einer Herbstdüngung angelegt um die Nährstoffwirkung von Biogasgärresten im Herbst erfassen zu können. Dabei wurden je eine Variante mit separiert fester Phase, unbehandeltem Biogasgärrest und Biogasgärrest mit Zugabe von ENTEC flüssig® sowohl im Herbst als auch zu VB geprüft. Die Varianten mit Herbstdüngung erhielten zwischen Ende September bis Mitte Oktober max. 40 kg NH<sub>4</sub>-N oder 80 kg N<sub>Ges</sub>-N/ha, die restliche Menge wurde zu VB gedüngt. Die Varianten ohne Herbstdüngung erhielten die gesamte Menge zu VB. Die je Variante insgesamt ausgebrachten Mengen an Stickstoff unterlagen wiederum aufgrund von Differenzen zwischen Vorprobenahme (zur Berechnung der auszubringenden Mengen) und Probenahme zum Ausbringungstermin gewissen Abweichungen. So wurden in der Herbst gedüngten Variante der separiert festen Phase insgesamt 106 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (bei 244 kg N<sub>Ges</sub>-N/ha) ausgebracht, während die Variante zu VB 110 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (bei 229 kg N<sub>Ges</sub>-N/ha) erhielt. Ähnlich bei den unbehandelten Biogasgärresten, hier wurden bei den Herbstvarianten mit bzw. ohne NI insgesamt 115 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (bei 212 kg N<sub>Ges</sub>-N/ha) und bei der Variante zu VB 109 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (bei 223 kg N<sub>Ges</sub>-N/ha) appliziert. Die Differenzen der verschiedenen Varianten im applizierten NH<sub>4</sub>-N sind jedoch bei maximalen Unterschieden von 5 % zwischen VB- und Herbstvariante als gering einzustufen.





**Abb. 33:** N-Entzüge als Balkendiagramm der im Herbst gedüngten Parzellen zu Winterweizen sowie deren Kornenertrag in dt/ha (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Durch die Düngung im Herbst wurden sowohl durch die separiert festen Biogasgärreste als auch durch den unbehandelten Biogasgärrest nur geringe tendenzielle Unterschiede im Kornenertrag oder wie in Abb. 33 zu sehen im N-Entzug gegenüber einer jeweiligen Düngung im Frühjahr festgestellt. Der Zusatz von NI zur Biogasgärrestgabe im Herbst brachte keine weitere Differenzierung. Im Rohprotein zeigten sich lediglich zwischen dem unbehandeltem Biogasgärrest (10,1 % XP i. d. TM) und der separiert festen Phase im Frühjahr (9,5 % XP i. d. TM) signifikante Unterschiede. Zwischen den VB- und Herbstvarianten war bei den mit unbehandeltem Biogasgärrest gedüngten Parzellen allerdings ein Anstieg des Rohproteingehalts von 9,8 % XP i. d. TM bei der im Herbst gedüngten Variante ohne NI über 9,9 % XP i. d. TM bei der Herbstvariante mit NI bis 10,1 % XP i. d. TM bei den im Frühjahr gedüngten Parzellen zu verzeichnen. Weitere Hinweise auf die Wirkung des Einsatzes von NI im Herbst geben die Mitte November gezogene  $N_{\min}$ -Bodenproben. Insgesamt zeigten sich durch eine Düngung im Herbst deutlich höhere  $N_{\min}$ -Werte, welche vor allem im Nitratgehalt zu sehen waren. Bei Betrachtung des Ammoniumgehaltes im November zeichnen sich die mit NI im Herbst gedüngten Parzellen durch signifikant höhere Gehalte aus (10,3 kg  $NH_4$ -N/ha) gegenüber ohne NI, welche durch die Hemmwirkung des NI zu erklären ist. Der Ammoniumgehalt im Boden der Variante ohne NI mit Biogasgärrest lag bei 8,3 kg  $NH_4$ -N/ha, während die Variante mit separiert fester Phase etwas höher lag (9,1 kg  $NH_4$ -N/ha).



**Abb. 34:** Balkendiagramm der  $N_{min}$ -Bodenprobenahme im November nach Biogasgärrestdüngung. Dargestellt sind die Summe aus Ammonium- und Nitratstickstoff im Boden in 0 – 90 cm Bodentiefe; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

#### Vergleich der verschiedenen organischen Dünger

Verglichen wurden wiederum neben dem unbehandelten Biogasgärrest ein separiert fester sowie flüssiger Biogasgärrest, welcher aus einem Pressschneckenseparator gewonnen wird, eine Rindergülle sowie eine Verdünnung des unbehandelten Biogasgärrestes mit Wasser im Verhältnis 1:1. Die tatsächlich ausgebrachten Frachten an Nährstoffen wurden ebenfalls durch Probenahmen während der Ausbringung berechnet (siehe Tab. 23). Problematisch bezüglich des applizierten  $NH_4$ -N zeigte sich abermals der separiert feste Biogasgärrest. Mit diesem wurde aufgrund starker Abweichungen zur Vorprobe der organischen Dünger deutlich weniger  $NH_4$ -N ausgebracht als geplant.

**Tab. 23:** Darstellung der über die organischen Dünger nach Nährstoffuntersuchung tatsächlich ausgebrachten Mengen an  $NH_4$ -N und  $N_t$  im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf

Ø 2009 - 2011	Separiert flüssig	Verdünnung 1:1	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
$NH_4$ -N appliziert	127	114	119	122	99
$N_t$ appliziert	194	211	218	199	221

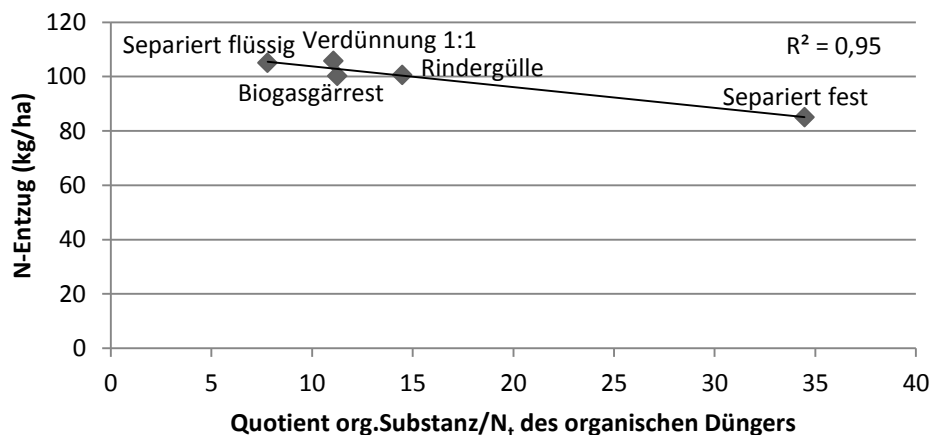
Betrachtet man die geplante auszubringende Menge an  $N_{verfügbar}$ , so wichen die tatsächlich ausgebrachten Mengen von der Zielmenge von 130 kg  $N_{verfügbar}$ /ha um - 14,7 % bei dem separiert festen Biogasgärrest, -4,7% bei dem verdünnten Biogasgärrest, - 0,3 % bei der Rindergülle, - 1 % bei dem Biogasgärrest und + 1,9 % bei dem separiert flüssigen Biogasgärrest. Bis

auf die feste Phase, entsprach die ausgebrachte Menge also verhältnismäßig gut den geplanten Vorgaben. Im Ertrag schnitt der separiert flüssige Biogasgärrest mit 76,7 dt Kornertrag/ha am besten ab, während bei den mit separiert festem Biogasgärrest gedüngten Parzellen 64,7 dt Kornertrag/ha abgefahren wurden.

**Tab. 24:** Kornertrag (dt/ha) und Stickstoffentzug (kg/ha) der organischen Dünger im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
<b>org. Dünger</b>				
BGR verdünnt 1:1	75,8	AB	105,8	A
Separiert flüssig	76,7	A	105,0	A
Rindergülle	71,9	B	100,6	A
Biogasgärrest	72,4	AB	100,2	A
Separiert fest	64,7	C	85,0	B

Eine übereinstimmende Korrelation zwischen dem Quotienten aus organischer Substanz und  $N_{Ges}$ -Gehalt der organischen Dünger wie sie bereits zu Wintertriticale GPS beschrieben wurden findet sich auch bei der Düngung von Winterweizen wieder.



**Abb. 35:** Darstellung der Korrelation zwischen dem Quotienten aus org. Substanz und  $N_{Ges}$ -Gehalt des organischen Düngers zum N-Entzug der organischen Dünger

Die höchsten N-Entzüge lieferten der separiert flüssige Biogasgärrest sowie der verdünnte Biogasgärrest. Die höheren N-Entzüge des verdünnten Biogasgärrestes weisen darauf hin, dass durch die Verringerung der Trockensubstanz bei gleichem org.S./ $N_{Ges}$ -Quotient (vergli-

chen mit dem unbehandelten Biogasgärrest) bessere physikalische Eigenschaften zu höheren N-Entzügen führten. Insbesondere da in diesem Fall der C/N-Quotient der Biogasgärreste deutlich unter 10 liegt und somit eine weitere Verringerung nicht maßgeblich ist, zeigt sich, dass vielmehr ein geringerer Trockensubstanzgehalt (wie ihn auch der separiert flüssige Biogasgärrest aufweist) für die gesteigerte N-Effizienz verantwortlich ist (siehe Kap. 3.6.3 und 3.7.3).

**Tab. 25:** Mittelwerte ( $\bar{\varnothing}$  2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger zu Winterweizen an den Einzelstandorten und im Mittel der Standorte

$\bar{\varnothing}$ 2009 - 2011	Separiert flüssig	Verdünnung 1:1	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
MDÄ <sub>NU<sub>p</sub></sub> $\bar{\varnothing}$	39	38	31	33	19
MDÄ <sub>NU<sub>p</sub></sub> Puch	36	39	32	29	21
MDÄ <sub>NU<sub>p</sub></sub> Speicher.	42	38	31	37	16

Bei Betrachtung der Standorte wird deutlich, dass in Puch die Wirkung der organischen Dünger in Winterweizen gut mit der Wirkung in Wintertriticale GPS übereinstimmt, lediglich auf einem etwas niedrigeren Niveau. Auch in Speichersdorf erbringen der separiert flüssige und verdünnte Biogasgärrest deutlich höhere N-Entzüge, während der separiert feste Biogasgärrest in dessen Wirkung drastisch abfällt. Auffallend ist aber hingegen das höhere MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> der Rindergülle gegenüber dem Biogasgärrest am Standort Speichersdorf.

**Tab. 26:** Inhaltsstoffe in Biogasgärrest und Rindergülle nach den Untersuchungen zur Ausbringung zu VB an den Standorten Puch und Speichersdorf zu Winterweizen (Mittel der Jahre 2009 – 2011)

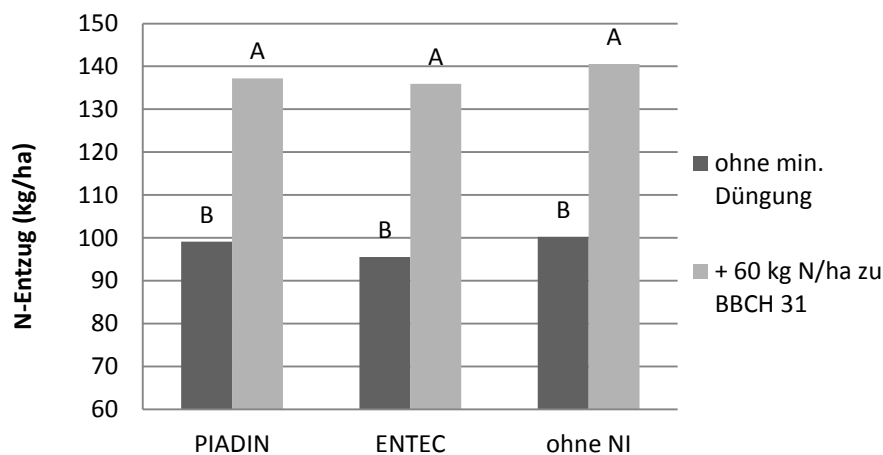
$\bar{\varnothing}$ 2009 - 2011	pH-Wert	TS	oTS	N <sub>t</sub>	NH <sub>4</sub> -N
<b>BGR Speichersorf</b>	7,4	6,5	5,1	4,2	2,1
<b>RiGü Speichersdorf</b>	7,2	5,4	4,1	3,2	2,0
<b>BGR Puch</b>	7,7	6,6	4,6	4,4	2,6
<b>RiGü Puch</b>	7,1	8,4	6,8	4,2	2,4

Dieses höhere MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> der Rindergülle gegenüber dem Biogasgärrest in Speichersdorf lag insbesondere an dem deutlich niedrigeren Trockensubstanzgehalt der Rindergülle in Speichersdorf bei gleichzeitig hohem Anteil NH<sub>4</sub>-N am N<sub>Ges</sub> von 64 %, während der Biogasgärrest in Speichersdorf lediglich 49 % aufwies (BGR Puch 60 %, Rindergülle Puch 57 %). Die MDÄ<sub>NU<sub>p</sub></sub> korrelieren mit inhaltlichen Eigenschaften der organischen Dünger wie TS-Gehalt

( $R^2=0,91$ ), organische Substanz/ $N_{Ges}$ -Quotient ( $R^2=0,90$ ) und  $NH_4-N/N_{Ges}$ -Quotient ( $R^2=0,84$ ).

### Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren zu Biogasgärresten

Die zu VB applizierten Biogasgärreste wurden mit den NI ENTEC flüssig® (10 l/ha) bzw. PIADIN® (5 l/ha) ausgebracht und im Verlauf der Vegetation in einer zusätzlichen Variante mit je 30 kg N/ha zu BBCH 31 und BBCH 37 mineralisch gedüngt. Hierbei zeigte sich im Mittel der beiden Standorte Puch und Bayreuth ein nicht so deutlicher Effekt des Ertragsrückganges als er bei Wintertriticale GPS zu verzeichnen war (Abb. 36). Dies mag zum einen an der Produktionsrichtung Kornnutzung liegen, vielmehr aber an der deutlich später einsetzenden Bestockung und dem auf diese Weise späteren Stickstoffbedarf des Winterweizens. Der Winterweizen kann während der längeren Vegetationsperiode aufgrund der späteren Ernte die Minderwirkung im Frühjahr besser kompensieren. In diesem Zusammenhang ist auch zu erwähnen, dass die an allen Standorten angebaute Winterweizensorte eher als Kornzahl- bzw. Ährentyp klassifiziert wird, wodurch eine mindere Bestockung sortenspezifisch besser ausgeglichen werden kann.



**Abb. 36:** Darstellung der Wirkung von Nitrifikationsinhibitoren als Zugabe zu Biogasgärresten im Vergleich zu einer Düngung mit Biogasgärrest ohne NI-Zugabe zu Winterweizen; (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Statistisch konnte durch die Zugabe von NI weder eine Wirkung auf den Ertrag des Winterweizens noch auf den N-Entzug festgestellt werden. Im Kornertrag ist allenfalls ein tendenzieller Rückgang ohne statistische Signifikanz bei den Varianten mit NI zu erkennen (siehe Tab. 27).

**Tab. 27:** Kornenertrag (dt/ha) der Varianten mit bzw. ohne NI und mineralischer Düngung im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping
<b>NI</b>		
PIADIN	70,6	B
ENTEC	71,6	B
BGR ohne NI	72,4	B
PIADIN + 60 kg N/ha	85,0	A
ENTEC + 60 kg N/ha	85,0	A
BGR ohne NI + 60 kg N/ha	87,3	A

Bei getrennter Betrachtung der beiden Standorte zeigt sich, dass an dem lehmigen Standort in Puch keinerlei Ertragsunterschiede auftraten. Auf dem deutlich leichteren Standort in Bayreuth hingegen konnte im N-Entzug wiederum ein Rückgang gemessen werden (Tab. 28), welcher sich auch zum Teil im TM-Ertrag widerspiegelt.

**Tab. 28.** Kornenertrag (dt/ha) und N-Entzug (kg/ha) der Varianten mit bzw. ohne NI und mineralischer Düngung im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf in Winterweizen (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

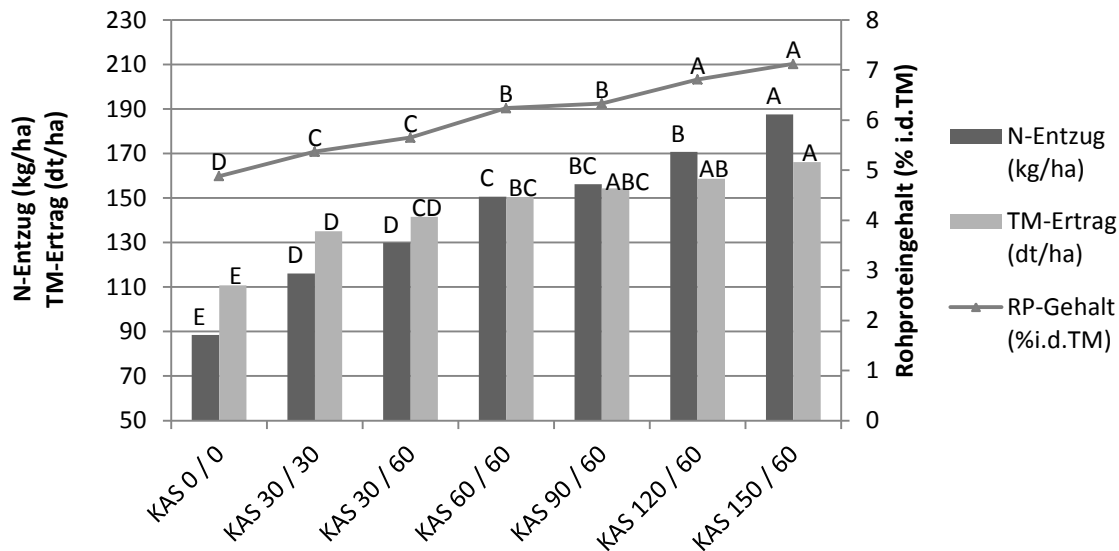
Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)			N-Entzug (kg/ha)				
	Puch			Bayreuth				
PIADIN	-	-	-	-	65,4	B	87,9	CD
ENTEC	79,7	B	107,8	B	63,6	B	83,3	D
BGR ohne NI	79,6	B	109,8	B	65,1	B	90,7	C
PIADIN + 60 kg N/ha	88,3	A	150,1	A	81,8	A	124,2	B
ENTEC + 60 kg N/ha	89,1	A	148,1	A	81,0	A	123,7	B
BGR ohne NI + 60 kg N/ha	90,5	A	149,4	A	84,2	A	131,7	A

### **4.3 Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest zu Silomais (V551)**

Silomais ist die derzeit wichtigste Kulturpflanze in der Biogasproduktion. Da dieser ferner für seine gute Verwertung organischer Dünger bekannt ist, spielt die Rückführung von Biogasgärresten eine bedeutsame Rolle (MAIDL, STICKSEL und VALTA 1999). Dies wurde auf den Standorten Puch und Speichersdorf geprüft und gemeinsam verrechnet. Aufgrund starker Abweichungen durch die Wiederholungen und Säulen hinweg über alle Versuchsglieder fließt das Versuchsjahr 2009 am Standort Puch nicht in die Auswertungen mit ein. Es wurden keine adjustierenden Werte für diesen Versuch berechnet. Es ist somit zu beachten, dass die Versuchsergebnisse des Jahres 2009 lediglich aus dem Standort Speichersdorf in die dreijährige Versuchsauswertung einfließen.

#### Mineralische Düngungssteigerung

Die rein mineralisch gedüngten Varianten wurden gestaffelt von 0 – 210 kg N/ha, aufgeteilt auf eine Gabe vor der Saat sowie zu BBCH 17 des Silomaises. Die genaue Aufteilung der mineralischen Düngergaben geht aus Abb. 37 hervor. Die N-Entzüge der mineralischen Varianten sowie die Trockenmasseerträge zeigten eine deutliche Reaktion bis zur höchsten Stufe der mineralischen Düngung von 210 kg N/ha. Bei den Trockenmasseerträgen ist jedoch ein Sättigungseffekt zu erkennen, der die drei höchsten Stufen statistisch nicht von einander absichern lässt. Im N-Entzug konnten hingegen selbst durch die Variante mit 210 kg N/ha noch signifikant höhere Entzüge gemessen werden als durch die nächst niedrigere Stickstoffgabe (180 kg N/ha).



**Abb. 37:** Stickstoffentzüge (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt (% RP i. d. TM) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Der Rohproteingehalt stieg durch die Düngungssteigerung bis auf maximal 7,12 % i. d. TM an. Die Stickstoffsteigerung hatte keinen Einfluss auf die Energiedichte. Lediglich die Rohproteingehalte wurden durch steigende N-Gaben erhöht. Die Energiedichte variierte zwischen 6,72 % MJ NEL/kg TM bei 180 kg N/ha und 6,78 % MJ NEL/kg TM bei 210 kg N/ha, alle anderen Düngungsstufen inklusive der Nullparzelle bewegten sich in ihrer Energiedichte dazwischen. Der maximale Energieertrag von 113,6 GJ NEL/ha wurde durch die Variante mit 210 kg N/ha erreicht, konnte allerdings nicht signifikant von den Stufen mit 120 – 180 kg N/ha bei Energieerträgen zwischen 102,2 – 107,0 GJ NEL/ha abgesichert werden. Erst die Düngungsstufe von 90 kg N/ha lieferte einen signifikant niedrigeren Energieertrag von 96,1 GJ NEL/ha. Nach der Ernte des Silomais wurden auf ausgesuchten Versuchsgliedern  $N_{\min}$ -Bodenproben gezogen. Bei den mineralischen Stufen wurden insgesamt vier Versuchsglieder inklusive der Nullparzellen beprobt. Dabei zeigte sich ein deutlicher Anstieg der  $N_{\min}$ -Bodengehalte (Summe aus  $\text{NO}_3\text{-N}$  und  $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha in 0 – 90 cm Bodentiefe) nach Ernte. Während in den ungedüngten Varianten 34,7 kg  $N_{\min}$  gemessen wurden, stieg der Wert bis auf 73,8 kg  $N_{\min}$  bei 210 kg N/ha an und unterschied sich signifikant von der Stufe mit 150 kg N/ha (46,8 kg  $N_{\min}$ /ha) sowie 90 kg N/ha (40,0 kg  $N_{\min}$ /ha).



Organische Düngungssteigerung mit Biogasgärrest

Die Auswertungsgruppe der Stickstoffsteigerung mit Biogasgärresten beinhaltet die Stufen 50 % - 150 % der geplanten Aufwandmenge. Die ausgebrachten Mengen  $\text{NH}_4\text{-N}$  sowie  $\text{N}_t\text{-N}$  können Tabelle 29 entnommen werden. Die Biogasgärreste wurden allesamt vor der Maissaat mit Schleppschlauchtechnik ausgebracht und sofort nach der Ausbringung mit einer Kreiselegge eingearbeitet. Im Regelfall konnte der Biogasgärrest innerhalb ca. 15 min. eingearbeitet werden, immer jedoch innerhalb einer Stunde nach der Ausbringung. Die Düngungssteigerung der Biogasgärreste zeigte den gleichen Kurvenverlauf für N-Entzug, Trockenmasseertrag und Rohproteingehalt wie die mineralische Stickstoffsteigerung. Maximale Trockenmasseerträge von 159,1 kg TM/ha konnten durch die 150 % Variante erreicht werden, was einer Applikation von etwa 180 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha entsprechend ca. 350 kg  $\text{N}_{\text{Ges}}$ /ha gleichkam (Abb. 38).

**Tab. 29:** Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärresten und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{N}_{\text{Ges}}$  je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte zu Silomais

Applikationsrate	Ø $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha	Ø $\text{N}_t$ /ha
BGR 50%	61	126
BGR 75%	92	176
BGR 100%	122	235
BGR 125%	153	293
BGR 150%	183	352

Die N-Entzüge erreichten 155,8 kg N/ha ebenfalls in der höchsten Stufe und lagen signifikant über den N-Entzügen der 100 % Variante mit applizierten 122,2 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha bzw. 234,8 kg  $\text{N}_t$ /ha. Die Rohproteingehalte stiegen insgesamt auf ein Maximum von 6,05 % i. d. TM an und lagen damit klar unter dem Rohproteingehalt der mineralischen Variante mit 210 kg N/ha, welcher bei 7,12 % i. d. TM lag. Die Energiedichte zeigte wiederum keinerlei Korrelation zur ausgebrachten Menge Biogasgärrest und lag zwischen 11,18 MJ NEL/kg TM und 11,3 MJ NEL/kg TM. Gleichzeitig stiegen die Energieerträge der Biogasgärreste durch die Stickstoffsteigerung von 74,9 GJ NEL/ha in der ungedüngten Variante mit jeder Stufe Biogasgärrest über die 50 % Variante mit 92,6 GJ NEL/ha bis zur 150 % Variante mit 108,0 GJ NEL/ha an. Das  $\text{MDÄ}_{\text{NUP}}$  des Stickstoffentzugs der Düngungssteigerung mit Biogasgärrest lag im Mittel aller Stufen auf Basis des applizierten  $\text{N}_t$  bei 45 % und auf Basis des applizierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  bei 83 %. Das für den Trockenmasseertrag berechnete EÄM lag im Mittel bei 50 % auf  $\text{N}_t$  Basis sowie 98 % auf  $\text{NH}_4\text{-N}$  Basis.

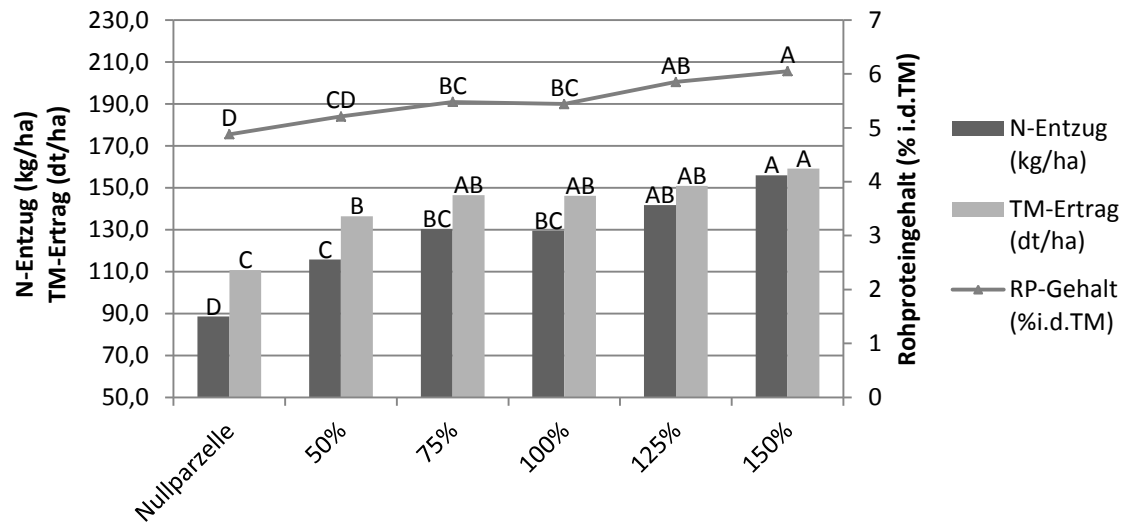


Abb. 38: Stickstoffentzüge (kg/ha), Trockenmasseertrag (dt/ha) und Rohproteingehalt (% RP i. d. TM) der Düngungssteigerung mit Biogasgärresten im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Die nach der Ernte gezogenen  $N_{\min}$ -Bodenproben zeigten im Gegensatz zu den vorangehend erwähnten mineralischen Varianten kaum Zusammenhang zwischen der Düngehöhe über Biogasgärreste und  $N_{\min}$  in 0-90 cm Bodentiefe. Dies war sowohl im Mittel der beiden Standorte als auch bei einer Einzelbetrachtung der Standorte so gegeben. Zwar fallen höhere  $N_{\min}$ -Gehalte bei der höchsten Stufe mit Biogasgärresten auf, diese unterschieden sich statistisch jedoch nicht von der niedrigsten Stufe mit Biogasgärrest.

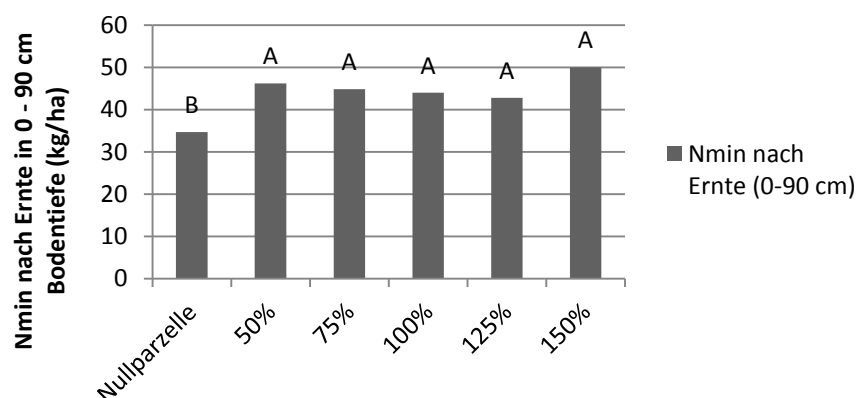
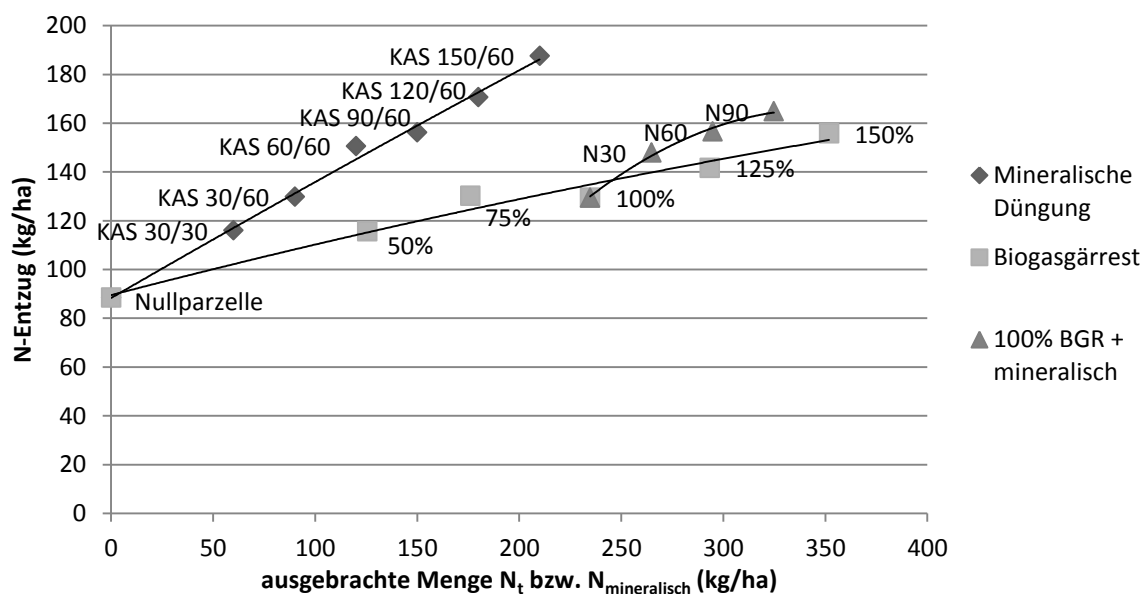


Abb. 39:  $N_{\min}$ -Bodengehalte der organischen Düngungssteigerung zu Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Auch bei einer gesonderten Betrachtung der beiden Standorte oder der Einzeljahre lässt sich kein klarer Verlauf steigender  $N_{\min}$ -Gehalte mit steigender Biogasgärrestmenge erkennen. Gleichwohl wurden aber tendenziell die höchsten  $N_{\min}$ -Gehalte an beiden Standorten jeweils in der 150 % Variante gemessen. Jedoch oftmals nur geringfügig über den restlichen Stufen der Steigerungsdüngung mit Biogasgärresten.

#### Mineralische Ergänzung zur Düngung mit Biogasgärresten

Bei der Stufe 100 % Biogasgärrest wurde in drei Höhen mineralisch zuge düngt. Der Biogasgärrest wurde vor der Saat appliziert und innerhalb einer Stunde eingearbeitet. Die zusätzliche mineralische Düngung erfolgte bis 30 kg N/ha zur Saat und die restliche Menge zu BBCH 31. Insgesamt wurden drei Stufen in zusätzlicher Höhe von 30, 60 und 90 kg N/ha ausgebracht. Durch die Kombination aus Biogasgärrest und mineralischer Düngung konnte die Stickstoffeffizienz gesteigert werden.



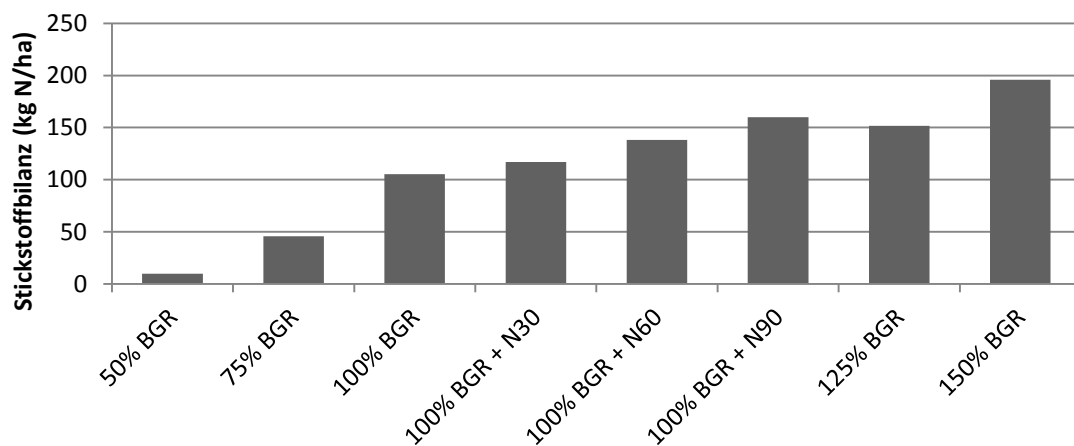
**Abb. 40:** N-Entzüge der mineralischen (obere Kurve) und organischen (untere Kurve) Düngungssteigerung zu Silomais, sowie der zusätzlich zu den Biogasgärrestvarianten applizierten Mengen mineralischen Stickstoffs

Der TM-Ertrag stieg durch die zusätzliche mineralische Düngung zunächst an, die weiteren Stufen reagierten geringfügig. Die Energiedichte im Silomais zeigte erneut keine Reaktion auf die Düngung. Im Energieertrag konnte folglich ebenfalls nur ein mäßiger Anstieg verzeichnet werden. Hingegen konnte im Rohproteingehalt eine deutliche Reaktion auf die zusätzliche mineralische Düngung gemessen werden (Tab. 30).

**Tab. 30:** Energieertrag, Energiedichte, Rohproteingehalt und Trockenmasseertrag als Auszug der mineralischen Düngung zusätzlich zur Applikation von Biogasgärrest zu Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Auswertungsgruppe	Energieertrag (GJ NEL/ha)	Energiedichte (NEL/kg TM)	RP-Gehalt (% i. TM)	TM-Ertrag (dt/ha)
<b>100% BGR</b>	99,7 AB	6,8 A	5,4 D	146,2 AB
<b>100% BGR + 30 kg N</b>	106,9 A	6,8 A	5,8 BC	157,2 A
<b>100% BGR + 60 kg N</b>	107,5 A	6,7 A	6,1 AB	158,2 A
<b>100% BGR + 90 kg N</b>	108,3 A	6,8 A	6,4 A	159,2 A

Die Stickstoffsalden zeigen einen klaren Anstieg mit zunehmender Düngung und liegen insgesamt relativ hoch (Abb. 41). Zu beachten ist, dass aus dem Versuchsjahr 2009 lediglich der im Ertrag etwas schwächere Standort Bayreuth mit in den Mittelwert einfließt und zusätzlich das Jahr 2009 sehr niedrige TM-Erträge sowie N-Entzüge lieferte. So wurden im Versuchsjahr 2009 in Bayreuth maximal 104 dt TM/ha in den mit Biogasgärrest gedüngten Parzellen geerntet, bei N-Entzügen von höchstens 83 kg N/ha. Im Versuchsjahr 2010 wurden hingegen sowohl in Bayreuth als auch in Puch deutlich höhere Erträge in den rein mit Biogasgärrest gedüngten Varianten erreicht (maximal 184 dt TM/ha) bei N-Entzügen bis 201 kg N/ha in Bayreuth. Im Versuchsjahr 2011 zeigten sich dann deutliche Unterschiede zwischen den Standorten. Während in Bayreuth maximal 118 dt TM/ha geerntet werden konnten, wurden in Puch bis zu 219 dt TM/ha geerntet. Diese Erträge lieferten in 2011 in Bayreuth N-Entzüge von höchstens 117 kg N/ha, währenddessen in Puch 197 kg N/ha entzogen wurden.

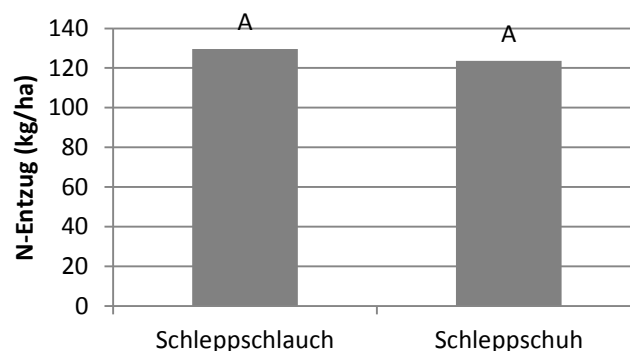


**Abb. 41:** Stickstoffbilanzen für die Auswertungsgruppe der kombinierten Düngung mit Biogasgärrest und mineralischem Dünger zu Silomais

Durch die in Bayreuth teilweise niedrigeren N-Entzüge zeigen die 100 % BGR Varianten deutliche N-Überhänge. Diese sind insbesondere auf die hohen  $N_t$ -Gaben von 272 kg  $N_t$ /ha ( $\emptyset$  2009 - 2011; entspricht 121 kg  $NH_4$ -N/ha) zurückzuführen und entsprachen somit nicht dem mittleren N-Entzug über Silomais in Bayreuth von 125 kg N/ha ( $\emptyset$  2009 – 2011 in der Variante 100 % BGR).

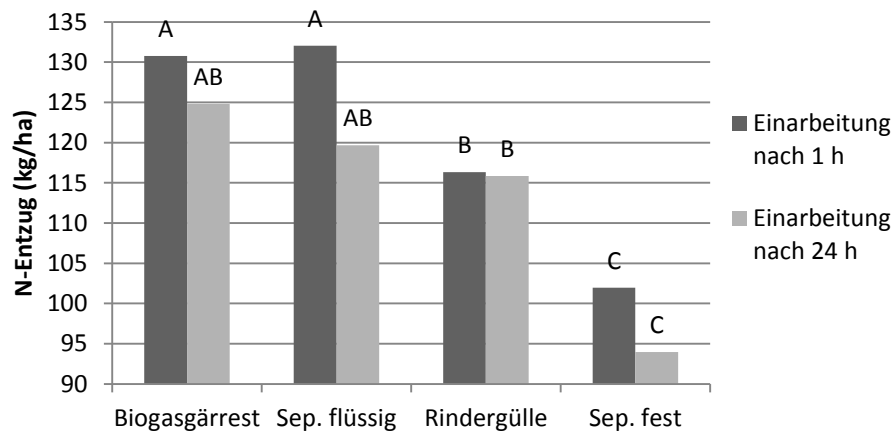
#### Einfluss der Applikationstechnik auf N-Entzug und TM-Ertrag bei der Düngung mit Biogasgärresten

Vor der Aussaat des Silomais wurden die Ausbringungstechniken Schleppschlauch sowie Schleppschuh auf gepflügtem Ackerland geprüft. Die Schleppschlauchvariante wurde innerhalb einer Stunde nach der Ausbringung mit einer Kreiselegge eingearbeitet, die Schleppschuhvariante wurde nicht eingearbeitet. Durch die Einarbeitung der Schleppschlauchvariante konnte der N-Entzug von 123,7 kg N/ha auf 129,5 kg N/ha sowie der TM-Ertrag von 143 dt/ha auf 146 dt/ha gesteigert werden (Abb. 42). Die Unterschiede in der Wirkung der beiden angewandten Applikationstechniken waren relativ gering, da auch durch die Schleppschuhvarianten ohne darauf folgende Einarbeitung ein Einsickern des Biogasgärrestes in den Boden gewährleistet werden konnte. Durch den Schleppschuh konnten oberflächige Verkrustungen gebrochen werden. Kontakt zwischen Biogasgärrest und Atmosphäre nach der Ausbringung ist aber dennoch vorhanden. Dies unterscheidet den Schleppschuh maßgeblich von injizierender Applikationstechnik.



**Abb. 42:** N-Entzug (kg/ha) der Applikationstechnik Schleppschlauch mit Einarbeitung und Schleppschuh auf Ackerland vor der Maissaat (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Auch eine Einarbeitung der organischen Dünger nach einer sowie nach 24 Stunden wurde geprüft (Abb. 43).



**Abb. 43:** Einarbeitung verschiedener organischer Dünger eine Stunde sowie 24 Stunden nach der Applikation vor Maissaat (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; *t*-Test  $p \leq 0,05$ )

Durch eine möglichst rasche Einarbeitung nach Applikation der organischen Dünger konnte eine Erhöhung der N-Entzüge sowie TM-Erträge erreicht werden. Die Ergebnisse der TM-Erträge sind denen der N-Entzüge tendenziell identisch. Relativ zur Einarbeitung nach 24 h konnten durch eine Einarbeitung nach einer Stunde die N-Entzüge durchschnittlich um 6 % gesteigert werden. Der größte Effekt wurde bei dem separiert flüssigen Biogasgärrest mit +10 % erreicht, während bei der Rindergülle der N-Entzug nur um 0,5 % anstieg. Diese geringen Unterschiede bei der Rindergülle sind insbesondere dem Standort Puch zuzuschreiben. Am Standort in Bayreuth konnten bei Einarbeitung innerhalb einer Stunde N-Mehrentzüge von etwa 6 % gemessen werden. Eine Erklärung hierfür könnte der pH-Wert der Güllen liefern.

**Tab. 31:** pH-Werte der für den Versuch zu Silomais verwendeten organischen Dünger an den Standorten Puch und Bayreuth

Ø 2009 - 2011	Separiert flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
pH-Werte Bayreuth	7,9	7,4	7,2	8,6
pH-Werte Puch	7,6	7,6	6,9	8,7

Die Rindergülle in Puch wies den geringsten pH-Wert (6,9) auf gefolgt von der Rindergülle in Bayreuth (7,2). Sämtliche weitere Biogasgärreste wiesen pH-Werte über 7,5 auf (siehe Tab. 31). Legt man den zusätzlich von der Temperatur abhängigen überproportionalen Anstieg des  $\text{NH}_3$ -Gehaltes mit steigendem pH-Wert zugrunde, so könnte dies insbesondere bei pH-Werten unter 7,0 die geringen N-Mehrentzüge erklären.

Vergleich der verschiedenen organischen Dünger

Vor der Maissaat wurden außer dem unbehandelten Biogasgärrest ein separiert flüssiger sowie separiert fester Biogasgärrest und eine Rindergülle geprüft. Diese wurden allesamt mit Schleppschläuchen ausgebracht und innerhalb einer Stunde eingearbeitet. Die ausgebrachten Mengen  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{N}_t$  zeigten sich wiederum mit Ausnahme der separiert festen Phase relativ stabil (Tab. 3).

**Tab. 32:** Ausgebrachte Mengen an  $\text{NH}_4\text{-N}$  und  $\text{N}_{\text{Ges}}$  der verschiedenen organischen Dünger zu Silomais

Ø 2009 - 2011	Separiert flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
$\text{NH}_4\text{-N}$ appliziert	121	122	111	91
$\text{N}_t$ appliziert	204	235	195	225

Durch die Düngung mit der separiert flüssigen Phase des Biogasgärrestes konnten im Vergleich die höchsten N-Entzüge erreicht werden, während die Düngung mit unbehandeltem Biogasgärrest den höchsten TM-Ertrag brachte. Etwas geringer im TM-Ertrag und N-Entzug liegt die Rindergülle und statistisch signifikant niedrige Ergebnisse lieferte die separiert feste Phase (Tab. 33). Die Energieerträge geben selbiges wider. Über die separiert feste Phase wurde zwar eine ähnlich hohe Menge  $\text{N}_t$ /ha appliziert, die ausgebrachte Menge  $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha war jedoch deutlich geringer. Der separiert flüssige sowie unbehandelte Biogasgärrest zeigte mit 99,4 bzw. 100,9 GJ NEL/ha signifikant höhere Erträge als der separiert feste Biogasgärrest mit 82,9 GJ NEL/ha. Auch die Rindergülle lag mit 62,2 GJ NEL/ha im Energieertrag signifikant über dem separiert festen Biogasgärrest. Die ungedüngte Kontrollvariante lieferte 110 dt TM-Ertrag/ha, 88,5 kg N-Entzug/ha und 74,9 GJ NEL/ha.

**Tab. 33:** Trockenmasseertrag (dt/ha) und Stickstoffentzug (kg/ha) der organischen Dünger im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Speichersdorf bei Silomais (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
<b>org. Dünger</b>				
Separiert flüssig	146,1	A	132,0	A
Biogasgärrest	147,4	A	130,8	A
Rindergülle	137,0	A	116,3	AB
Separiert fest	121,1	B	102,0	B

Eine deutliche Abgrenzung in der Wirkung des applizierten  $N_t$  zwischen den Düngern zeigen deren Mineraldüngeräquivalente auf. Das höchste  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  weist wiederum der separiert flüssige Biogasgärrest mit  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  46 % auf. In deutlicher Abstufung folgen dann der unbehandelte Biogasgärrest ( $MD\ddot{A}_{NU_p}$  37 %) und die Rindergülle ( $MD\ddot{A}_{NU_p}$  30 %). Das geringste Mineraldüngeräquivalent erbrachte der separiert feste Biogasgärrest mit einem  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  von 11 % (Tab. 33). Hohe Korrelationen zeigte das  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  zu Eigenschaften der organischen Dünger wie TS-Gehalt ( $R^2 = 0,80$ ), organische Substanz/ $N_{Ges}$ -Quotient ( $R^2 = 0,92$ ) und  $NH_4-N/N_{Ges}$ -Quotient ( $R^2 = 0,76$ ). Da die organischen Dünger allesamt nach der Ausbringung eingearbeitet wurden, zeigte sich im Gegensatz zu Wintergetreide (dort wurde im Frühjahr nicht eingearbeitet) eine bessere Korrelation zum C/N-Quotient des Düngers als zu dessen TS-Gehalt.

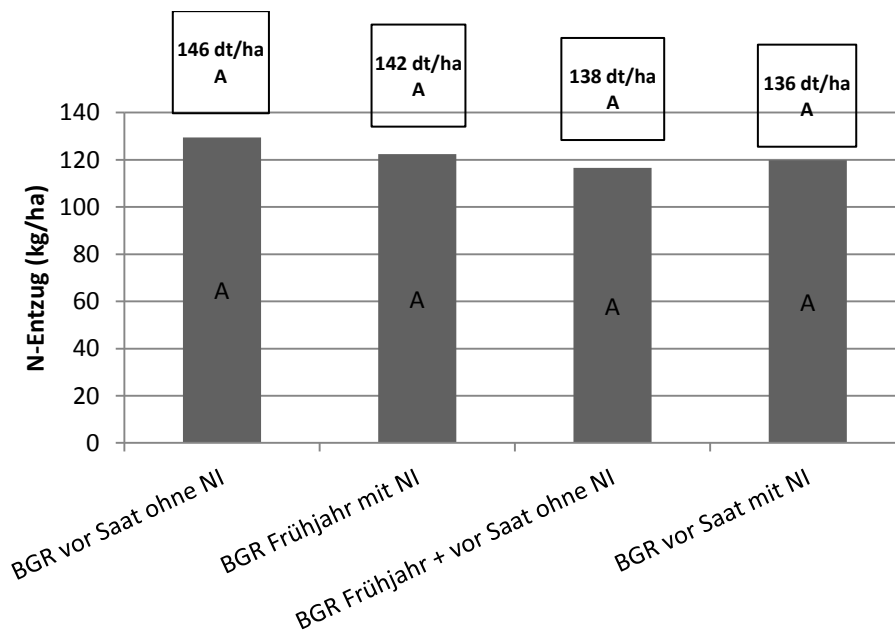
**Tab. 34:** Mittelwerte ( $\bar{\phantom{x}}$  2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger bei Silomais

$\bar{\phantom{x}}$ 2009 - 2011	Separiert flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle	Separiert fest
$MD\ddot{A}_{NU_p}$	46	37	30	11

#### Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren zu Biogasgärresten

Zu dem unbehandelten Biogasgärrest wurden zusätzlich zwei Varianten mit Zugabe eines NI (10 l/ha ENTEC flüssig®) geprüft. Der Biogasgärrest mit NI-Zugabe wurde sowohl vor Saat als auch zu einem vorgezogenen Ausbringungstermin im Frühjahr appliziert. Die frühe Applikation mit NI erfolgte zwischen Ende März bis Anfang April, während die Applikation vor Saat etwa einen Monat später erfolgte (Ende April). Die Ausbringung wurde mit Schleppschläuchen durchgeführt und die Einarbeitung erfolgte spätestens innerhalb einer Stunde. Zudem wurde in diese Auswertungsgruppe ein Versuchsglied aufgenommen, auf welchem der Biogasgärrest in geteilter Gabe jeweils hälftig im zeitigen Frühjahr und vor der Saat ohne NI Zugabe appliziert wurde.





**Abb. 44:** Balkendiagramm der N-Entzüge sowie TM-Erträge der mit Nitrifikationsinhibitor ausgebrachten Biogasgärreste (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Durch die Zugabe von NI zu Biogasgärrest konnten keine Zuwächse im TM-Ertrag oder N-Entzug gemessen werden. Gegenüber der NI-Zugabe bei der Applikation vor der Maissaat brachte die Variante der Biogasgärrestapplikation mit NI im Frühjahr zwischen Mitte März bis Anfang April leicht höhere Erträge. Insgesamt lagen die TM-Erträge in Bayreuth deutlich näher beieinander als in Puch.

**Tab. 35:** TM-Erträge und N-Entzüge der mit Nitrifikationsinhibitor ausgebrachten Biogasgärreste an den beiden Standorten Bayreuth (2009 – 2011) und Puch (2010 - 2011) (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	N-Entzug (kg/ha)
<b>Bayreuth</b>		
BGR vor Saat ohne NI	123,7 A	102,7 A
BGR Frühjahr mit NI	122,2 A	104,1 A
BGR Frühjahr und vor Saat ohne NI	120,6 A	101,4 A
BGR vor Saat mit NI	123,1 A	110,5 A
<b>Puch</b>		
BGR vor Saat ohne NI	179,9 A	169,8 A
BGR Frühjahr mit NI	171,4 A	149,9 A
BGR Frühjahr und vor Saat ohne NI	165,3 A	139,4 A
BGR vor Saat mit NI	154,7 A	133,8 A

#### 4.4 Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest auf einem ortsfesten Dauerversuch (V554, V554S)

Die Versuchsglieder sowie die Versuchsanlage des ortsfesten Versuches (V554) an den Standorten Puch, Landsberg a. Lech und Bayreuth sind absolut identisch. Daher können diese Standorte gemeinsam verrechnet werden. Auf Standort- oder Biogasgärrestspezifische Unterschiede wird im Einzelnen eingegangen. Die Versuchsanlage des ortsfesten Versuches (V554S) in Steinach ist nicht gänzlich identisch mit V554 und fließt daher in den folgenden Betrachtungen vergleichend in die Versuchsauswertung ein. Die berechneten Mittelwerte basieren jeweils auf den Gesamtergebnissen eines Versuchsjahres, z.B. dem Mittelwert des TM-Ertrags von Silomais in den Jahren 2009 und 2011 sowie dem Gesamttrockenmasseertrag im Jahr 2010 des Wintertriticale GPS und den folgenden TM-Erträgen der Weidelgrasschnitte. Da in Steinach das Wintertriticale GPS aufgrund eines Auswinterungsschadens frühzeitig umgebrochen wurde, konnte das darauffolgend ausgesäte Weidelgras hier zweimal beerntet werden. In Puch konnten aufgrund ausreichender Niederschläge und gutem Aufgang zusätzlich zur Ernte des Wintertriticale GPS zwei Weidelgrasaufwüchse geerntet werden. In Bayreuth und Landsberg wurde nach Ernte der Ganzpflanzensilage lediglich ein Weidelgrasaufwuchs beerntet. Dies lag in Bayreuth insbesondere an fehlenden Niederschlägen. In Landsberg wurde Winterweizen GPS gesät, sodass durch dessen spätere Abreife und Ernte für die Ertragsbildung des Weidelgrases weniger Vegetationszeit verblieb.

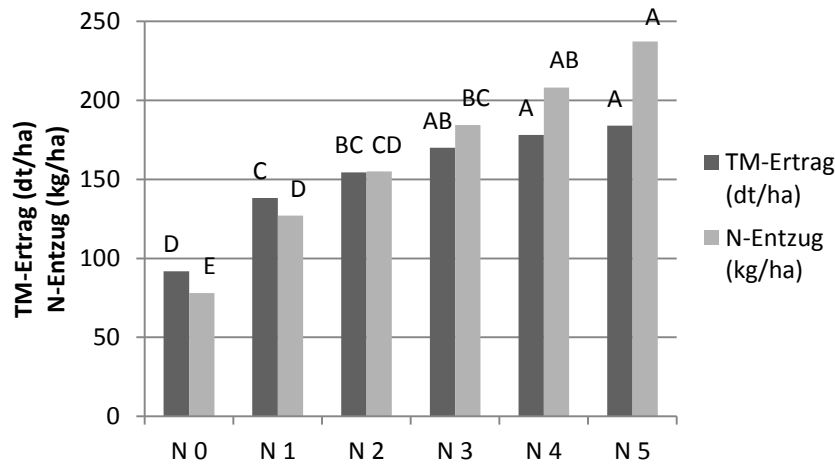
##### Mineralische Düngungssteigerung

Da die Stickstoffmenge jährlich an den Bedarf der Kulturart und Witterungsbedingungen angepasst werden musste, weicht die Höhe der N-Düngung zwischen den Standorten und Jahren leicht von der zunächst geplanten Menge ab. In Tabelle X sind die mittleren Stickstoffapplikationsraten der Jahre 2009 – 2011 dargestellt.

**Tab. 36:** Varianten der Stickstoffsteigerung und ausgebrachte Mengen mineralischen Stickstoffs (kg N/ha) an den Standorten des ortsfesten Dauerversuches im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Stufe	Puch	Bayreuth	Landsberg	Steinach
N 0	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha	0 kg N/ha
N 1	80 kg N/ha	80 kg N/ha	80 kg N/ha	70 kg N/ha
N 2	120 kg N/ha	123 kg N/ha	105 kg N/ha	105 kg N/ha
N 3	160 kg N/ha	165 kg N/ha	140 kg N/ha	140 kg N/ha
N 4	200 kg N/ha	205 kg N/ha	175 kg N/ha	175 kg N/ha
N 5	240 kg N/ha	243 kg N/ha	210 kg N/ha	210 kg N/ha

Die mittleren TM-Erträge der Standorte in den Jahren 2009 – 2011 über die mineralischen Düngungsstufen schwankten zwischen 119 dt TM/ha in Bayreuth und 187 dt TM/ha in Steinach. Alle Standorte zeigten den gleichen typischen Verlauf von TM-Ertrag und N-Entzug. Während die Ertragsfunktion der Trockenmasse bereits ab der zweithöchsten Stickstoffmenge abzuflachen beginnt, stiegen die Stickstoffentzüge bis zur höchstdüngten Variante an.



**Abb. 45:** Stickstoffentzug (kg/ha) und Trockenmasseertrag (dt/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 und Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg der ortsfesten Fruchtfolge (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

#### Organische Düngungssteigerung mit Biogasgärrest

An jedem Standort wurde eine Steigerung der Applikationsrate mit Biogasgärrest in den Stufen 50 %, 75 %, 100 %, 125 % und 150 % durchgeführt. Die in Bayreuth, Puch, Landsberg und Steinach in den Jahren 2009 – 2011 durchschnittlich ausgebrachten Mengen  $\text{NH}_4\text{-N}$  sowie  $\text{N}_t$  können Tabelle 37 entnommen werden.

**Tab. 37:** Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärrest zu dem ortsfesten Fruchtfolgeversuch sowie deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an  $N_t$  und  $NH_4-N$  je Hektar im Mittel der Jahre 2009 - 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach

Applikationsrate	Ø kg/ha Puch	Ø kg/ha Bayreuth
BGR 50 %	123 $N_t$ ; 58 $NH_4-N$	137 $N_t$ ; 69 $NH_4-N$
BGR 75 %	184 $N_t$ ; 87 $NH_4-N$	205 $N_t$ ; 104 $NH_4-N$
BGR 100 %	245 $N_t$ ; 116 $NH_4-N$	273 $N_t$ ; 139 $NH_4-N$
BGR 125 %	307 $N_t$ ; 145 $NH_4-N$	342 $N_t$ ; 174 $NH_4-N$
BGR 150 %	368 $N_t$ ; 174 $NH_4-N$	410 $N_t$ ; 208 $NH_4-N$
Applikationsrate	Ø kg/ha Landsberg	Ø kg/ha Steinach
BGR 50 %	134 $N_t$ ; 72 $NH_4-N$	114 $N_t$ ; 65 $NH_4-N$
BGR 75 %	202 $N_t$ ; 107 $NH_4-N$	171 $N_t$ ; 97 $NH_4-N$
BGR 100 %	268 $N_t$ ; 143 $NH_4-N$	228 $N_t$ ; 129 $NH_4-N$
BGR 125 %	332 $N_t$ ; 179 $NH_4-N$	285 $N_t$ ; 161 $NH_4-N$
BGR 150 %	402 $N_t$ ; 214 $NH_4-N$	359 $N_t$ ; 203 $NH_4-N$

Durch die Düngung mit Biogasgärrest konnte bei der ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Standorte ein durchschnittliches Mineraldüngeräquivalent für den über Biogasgärrest applizierten  $N_t$  von 41 % erreicht werden bei einem  $E\ddot{A}M_{DM}$  von ebenfalls durchschnittlich 41 %. Bei Betrachtung des applizierten  $NH_4-N/ha$  wird deutlich, dass für einen äquivalenten TM-Ertrag 75 % eines mineralischen Düngers benötigt wurde bzw. 71 % des N-Entzuges einer äquivalenten Menge  $N_{\text{mineralisch}}$  erreichte wurde.

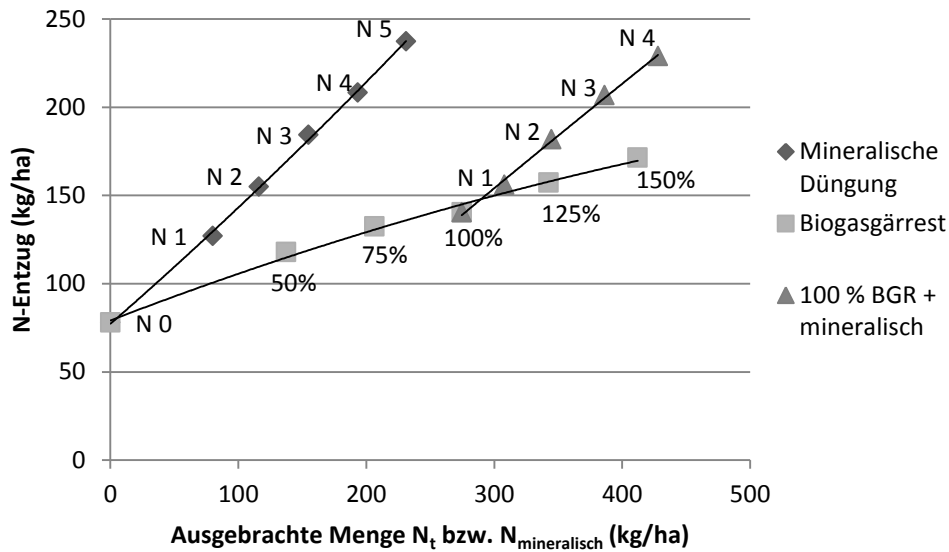
**Tab. 38:** Mineraldüngeräquivalent und Ertragsäquivalent der Applikationsrate von Biogasgärrest an den Standorten der ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Ortsfeste Fruchtfolge (2009-2011)	MDÄ <sub>NUP</sub>				EÄM			
	N-Entzug		TM-Ertrag		N-Entzug		TM-Ertrag	
	$N_t$	$NH_4-N$	$N_t$	$NH_4-N$	$N_t$	$NH_4-N$	$N_t$	$NH_4-N$
<b>Steinach</b>	47 %	75 %	64 %	85 %	41 %	72 %	43 %	77 %
<b>Puch</b>	39 %	73 %	62 %	88 %	43 %	77 %	47 %	83 %
<b>Bayreuth</b>	40 %	77 %	59 %	87 %	39 %	78 %	41 %	80 %
<b>Landsberg</b>	36 %	61 %	50 %	69 %	31 %	58 %	32 %	59 %
<b>Ø MW</b>	<b>41 %</b>	<b>71 %</b>	<b>58 %</b>	<b>82 %</b>	<b>39 %</b>	<b>71 %</b>	<b>41 %</b>	<b>75 %</b>

### Mineralische Ergänzung zur Düngung mit Biogasgärresten

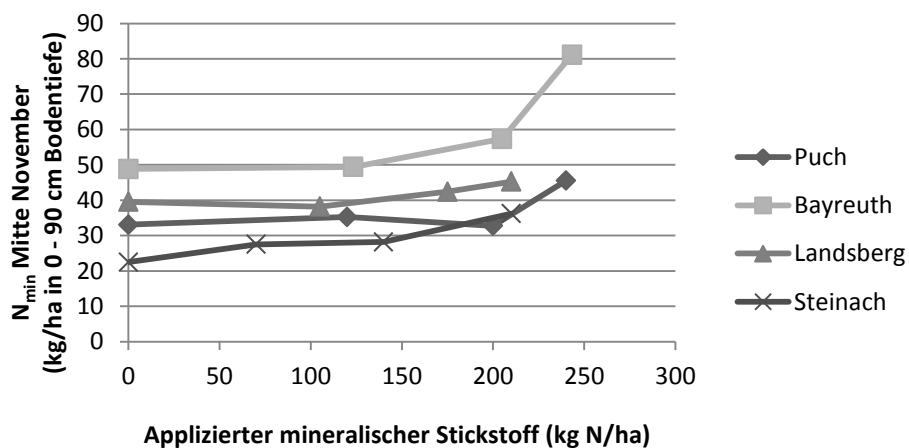
Die ergänzend zur Düngungsvariante mit 100 % Biogasgärrest gegebenen Mengen mineralischen Düngers teilten sich in vier Stufen auf. Die Höhe der mineralischen Ergänzung ist in Kapitel 3.2.6 beschrieben. Die insgesamt applizierten Frachten an Stickstoff aus Biogasgärrest sind Tabelle 37 zu entnehmen. Durch die mineralische Ergänzung konnten in der Fruchtfolge

deutliche Mehrerträge, wie sie bereits zu vorangegangenen Kulturen beschrieben wurden, erzielt werden. Sowohl N-Entzug als auch TM-Ertrag stiegen im Vergleich zu einer Steigerung der Biogasgärrestfracht überproportional.

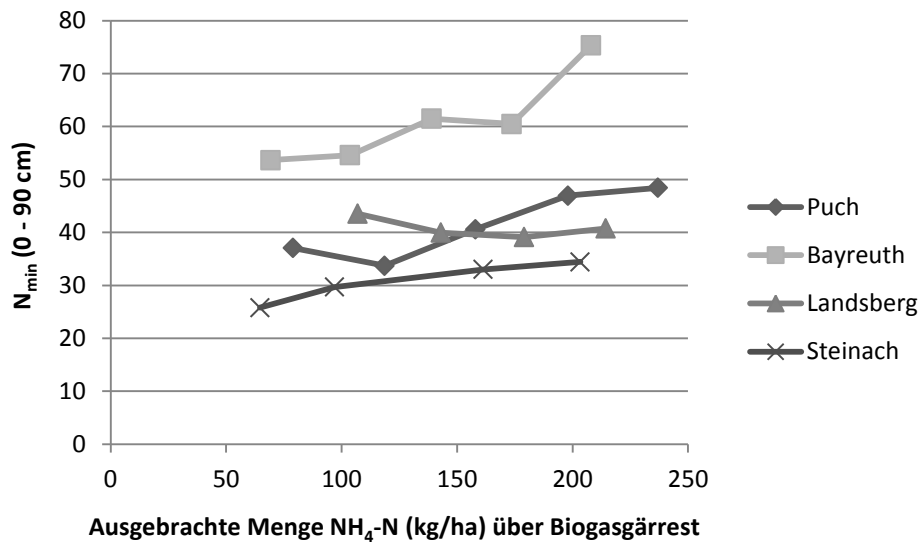


**Abb. 46:** Stickstoffentzug der kombinierten Düngung aus Biogasgärrest und mineralischem Dünger zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 und Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg

Um die Umweltwirkung durch die Düngungssteigerung mit Biogasgärrest zu überprüfen, wurden jährlich Mitte November  $N_{\text{min}}$ -Bodenproben in 0 – 90 cm Bodentiefe entnommen. Es zeigte sich insbesondere an dem leichten Standort in Bayreuth eine Zunahme der  $N_{\text{min}}$ -Werte ab ca. 180 – 200 kg  $N_{\text{mineralisch}}$  bzw. bei Düngung mit Biogasgärrest ab 300 – 350 kg  $N_t$ /ha bzw. 150 – 180 kg  $\text{NH}_4\text{-N}$ /ha.



**Abb. 47:**  $N_{\text{min}}$ -Werte der mineralischen Düngung zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach



**Abb. 48:**  $N_{\min}$ -Werte der Düngung mit Biogasgärrest ( $\text{kg NH}_4\text{-N/ha}$ ) zur ortsfesten Fruchtfolge im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach

Der Verlauf der  $N_{\min}$ -Bodengehalte aus der Düngung mit Biogasgärrest deckt sich auf Basis des applizierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  in etwa mit den Düngeräquivalenten. Der  $N_{\min}$ -Bodengehalt steigt bei einer Düngung mit Biogasgärrest bezogen auf den applizierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  etwas früher an als bei mineralischer Düngung und spiegelt somit das etwas niedrigere  $\text{MDÄ}_{\text{NUP}}$  sowie EÄM von Biogasgärrest wider.

#### Vergleich der verschiedenen organischen Dünger

An den Standorten Puch, Bayreuth und Landsberg wurde neben dem Biogasgärrest die Wirkung eines separiert flüssigen und festen Biogasgärrests und eine Rindergülle geprüft. In Steinach konnten vier Biogasgärreste ein separiert fester Biogasgärrest und eine Rindergülle geprüft werden. Der pH-Wert sowie der TS-Gehalt der Biogasgärreste und der Rindergüllen unterschieden sich an den ersten drei Standorten kaum, mit Ausnahme eines höheren TS-Gehaltes der Rindergülle in Landsberg. Die in Steinach verwendeten Biogasgärreste unterschieden sich jedoch deutlich in ihrer physikalischen Zusammensetzung (Tab. 39).

**Tab. 39:** Inhaltsstoffe der verwendeten organischen Dünger (Probenahme an den Ausbringungsterminen) an den Standorten Puch, Bayreuth, Landsberg und Steinach im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Puch						
Ø 2009 - 2011	Biogasgärrest	Sep. flüssig	Rindergülle	Sep. fest		
pH-Wert	7,8	7,9	7,2	8,8		
TS (%)	7,2	5,8	7,5	19,8		
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4,8	4,5	3,7	4,9		
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2,7	2,7	2,2	2,3		
Bayreuth						
Ø 2009 - 2011	Biogasgärrest	Sep. flüssig	Rindergülle	Sep. fest		
pH-Wert	7,5	7,8	7,2	8,6		
TS (%)	7,0	6,7	7,5	26,9		
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4,3	6,1	3,5	6,4		
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2,2	3,9	1,9	2,4		
Landsberg						
Ø 2009 - 2011	Biogasgärrest	Sep. flüssig	Rindergülle	Sep. fest		
pH-Wert	7,7	7,8	7,1	8,1		
TS (%)	7,1	4,2	8,4	23,0		
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4,7	3,8	3,6	7,5		
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2,6	2,4	1,9	2,2		
Steinach						
Ø 2009 - 2011	BGR 1	BGR 2	BGR 3	BGR 4	Sep. fest	Rindergülle
pH-Wert	7,9	8,4	7,3	7,8	8,9	7,2
TS (%)	5,0	11,2	5,3	6,6	23,9	8,2
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4,1	7,9	3,4	4,9	8,1	4,2
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2,3	5,7	1,8	3,0	4,3	2,6

Das Mineraldüngeräquivalent der organischen Dünger zeigt auch im dreijährigen ortsfesten Fruchtfolgeversuch hohe Wirkungsgrade des separiert flüssigen Biogasgärrest auf. Der unbehandelte Biogasgärrest folgt darauf, wobei sich dieser wiederum kaum von der verwendeten Rindergülle unterscheiden lässt. Dies scheint wie auch aus den ortswechselnden Versuchen hervorgeht daran zu liegen, dass in den Jahren 2009 und 2011 die organischen Dünger vor der Maissaat eingearbeitet werden konnten. Zusätzlich waren die Unterschiede von pH-Wert und TS-Gehalt eher gering. Das höchste Bestimmtheitsmaß zeigte sich zwischen  $MD\ddot{A}_{NUP}$  und TS-Gehalt (Mittelwert Puch, Bayreuth und Landsberg:  $R^2 = 94 \%$ ). Das deutlich niedrigste  $MD\ddot{A}_{NUP}$  des applizierten N<sub>t</sub> wurde trotz durchschnittlicher NH<sub>4</sub>-N-Gehalte von 2,3 kg/m<sup>3</sup> i. d. FM und NH<sub>4</sub>-N Anteilen am N<sub>t</sub> zwischen 30 – 48 % wiederum mit dem separiert festen Biogasgärrest erreicht.

**Tab. 40:** Mittelwerte ( $\emptyset$  2009 – 2011) der Mineraldüngeräquivalente der verschiedenen organischen Dünger des ortsfesten Fruchtfolgeversuches

$\emptyset$ 2009 - 2011	Biogasgärrest	Sep. flüssig	Rindergülle	Separiert fest		
MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub> $\emptyset$	29	41	32	15		
MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub> Puch	31	42	33	16		
MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub> Bayreuth	35	40	38	20		
MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub> Landsberg	35	36	27	19		
$\emptyset$ 2009 - 2011	BGR 1	BGR 2	BGR 3	BGR 4	Separiert fest	Rindergülle
Steinach	50	58	48	43	15	33

Das MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub> der in Steinach verwendeten Biogasgärreste variierte zwischen 43 – 58 %. Trotz des hohen TS-Gehalts erreichte der Biogasgärrest mit Geflügelmist im Inputsubstrat der Biogasanlage das höchste MD $\ddot{A}$ <sub>NU<sub>p</sub></sub>. Wie bereits erwähnt, wurde in den Jahren 2009 und 2010 vor Maissaat der Biogasgärrest eingearbeitet. Der negative Effekt einer nicht durchführbaren Einarbeitung zu Wintertriticale im Frühjahr 2010 konnte wegen des Auswinterungsschadens zusätzlich nicht abgegriffen werden.

#### 4.5 Ergebnisse der Feldversuche einer Düngung mit Biogasgärrest auf Grünland (V552, V553)

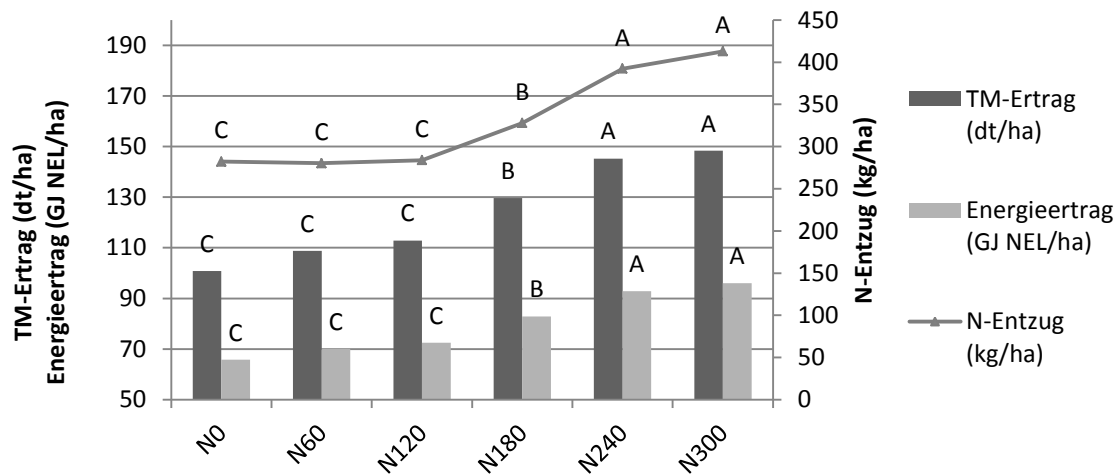
Die Versuche zur Düngung mit Biogasgärresten auf Grünland unterschieden sich an den beiden Standorten in Bayreuth und Puch speziell durch die Anzahl der Schnitte. In Bayreuth wurde der Versuch als dreischnittiger Versuch geplant und durchgeführt, während in Puch viermal jährlich geschnitten wurde. Zu beachten ist, dass die organische Düngung zum vierten Schnitt (erfolgt nach dem dritten Schnitt) in Puch im Versuchsjahr 2011 aufgrund von Umbaumaßnahmen an der Biogasanlage, welche den Biogasgärrest liefert nicht durchgeführt werden konnte. Der vierte Schnitt wurde aber dennoch beerntet und fließt in die Auswertungen mit ein, da somit auch die langfristige Wirkung der organischen Düngung darüber erfasst werden kann.

##### Mineralische Düngungssteigerung

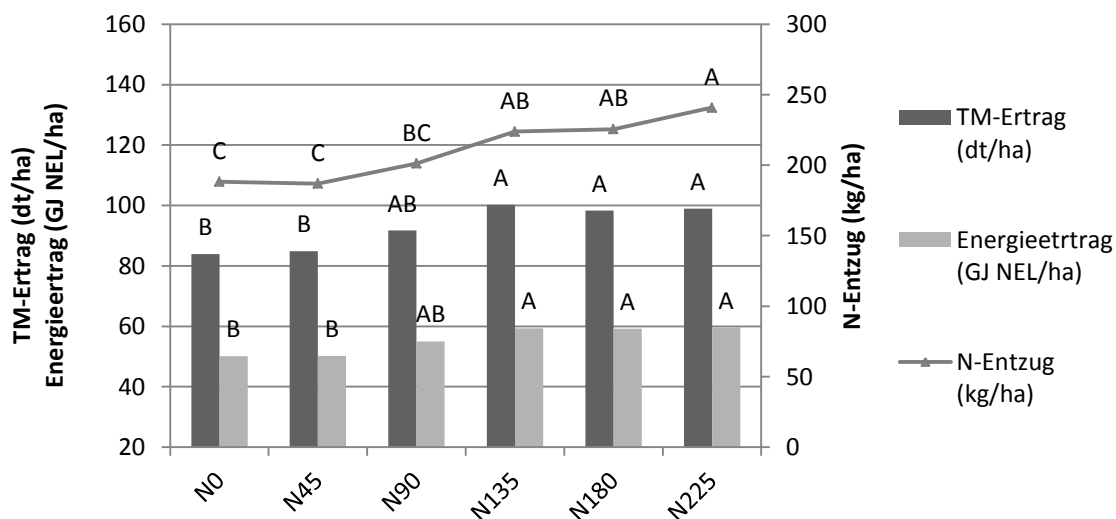
Zum Vergleich der Wirkung der organischen Dünger wurde zur Düngung des Grünlandes an beiden Standorten eine mineralische Stickstoffsteigerung angelegt. Am Standort in Puch wurden zwischen 60 kg N/ha – 300 kg N/ha auf vier Schnitte verteilt, in Bayreuth wurden 45 kg N/ha – 225 kg N/ha auf drei Schnitte verteilt. An beiden Standorten zeigte sich eine ähnliche Reaktion auf die mineralische Düngung. Auf den Nullparzellen etablierte sich innerhalb der



drei Jahre ein deutlicher Kleeanteil im Bestand (nach Bestandsaufnahme im April 2010 bis ca. 20 % Klee). Die mineralischen Varianten waren hingegen durch hohe Weidelgrasanteile gekennzeichnet. Dieser Kleeanteil in der ungedüngten Variante konnte folglich wohl durch den von Rhizobien aus der Luft gebundenen molekularen Stickstoff den Stickstoff der niedrig gedüngten Varianten in der Nullparzelle bis zur zweiten Stickstoffstufe in etwa aufwiegen (siehe Abb. 49 Puch sowie Abb. 50 Bayreuth).



**Abb. 49:** Trockenmasseertrag (dt/ha), Energieertrag (GJ NEL/ha) und Stickstoffentzüge (kg/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 auf Grünland am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )



**Abb. 50:** Trockenmasseertrag (dt/ha), Energieertrag (GJ NEL/ha) und Stickstoffentzüge (kg/ha) der mineralischen Düngungsvarianten (Kalkammonsalpeter) im Mittel der Versuchsjahre 2009 – 2011 auf Grünland am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

In Puch konnte bis zu 120 kg N/ha kein gesteigerter N-Entzug gemessen werden, gleiches gilt für den Standort Bayreuth bis knapp 90 kg N/ha. Erst ab der dritten Stickstoffstufe stiegen die N-Entzüge dann bis zur höchstgedüngten Stufe signifikant an. Ähnlich die Trockenmasseerträge, diese stiegen in den niedrig gedüngten Varianten zunächst nur leicht an und brachten erst ab der dritten Stufe signifikante Mehrerträge.

**Tab. 41:** Rohprotein-, Rohasche- und Rohfasergehalte der mineralischen Stickstoffsteigerung am Standort Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011 (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ )

Bayreuth									
Mineralische Düngung	XP %TM	XA %TM	XF %TM	XP %TM	XA %TM	XF %TM	XP %TM	XA %TM	XF %TM
	1. Schnitt			2. Schnitt			3. Schnitt		
N 0	12,47 BC	7,6 A	27,43 AB	13,99 CD	9,33 A	23,7 B	12,69 B	10,43 ABC	24,07 B
N 45	11,94 C	7,37 A	27,63 AB	13,61 D	9,03 AB	25,3 A	12,41 B	11,17 A	24,67 AB
N 90	12,05 C	7,63 A	25,97 B	14,29 BCD	8,67 ABC	24,77 AB	12,77 B	10,87 AB	25,4 AB
N 135	12,87 ABC	6,87 A	28,8 A	15,01 BC	7,63 D	25,6 A	13,10 AB	11,3 A	25,4 AB
N 180	13,74 AB	6,73 A	28,93 A	15,55 AB	7,8 CD	25,33 A	13,44 AB	8,77 BC	24,87 AB
N 225	14,12 A	7,03 A	28,8 A	16,36 A	8,27 BCD	23,63 B	14,75 A	8,23 C	25,57 A

Demgemäß stieg auch der Energieertrag zunächst nur wenig an und unterschied sich erst ab der dritten mineralischen Stickstoffstufe signifikant von den ungedüngten Parzellen. Die höchsten Rohproteingehalte der mineralischen Düngung fanden sich an beiden Standorten in den ungedüngten oder hochgedüngten Varianten wieder (siehe Tab. 41 Puch sowie Tab. 42 Bayreuth).

**Tab. 42:** Rohprotein-, Rohasche- und Rohfasergehalte der mineralischen Stickstoffsteigerung am Standort Puch im Mittel der Jahre 2009 – 2011 (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Puch												
Mineralische Düngung	XP %TM	XA %TM	XF %TM	XP %TM	XA %TM	XF %TM	XP %TM	XA %TM	XF %TM	XP %TM	XA %TM	XF %TM
	1. Schnitt			2. Schnitt			3. Schnitt			4. Schnitt		
N 0	18,01 A	7,47 ABC	18,33 A	16,87 A	8,40 A	19,67 B	15,85 A	9,70 A	22,87 B	21,64 AB	9,67 A	18,03 A
N 60	16,68 A	7,73 A	19,20 A	15,75 A	8,73 A	19,73 B	14,66 A	9,77 A	22,63 B	19,63 B	10,23 A	17,63 A
N 120	15,15 A	6,90 C	19,37 A	15,07 A	7,67 B	21,17 AB	14,70 A	8,90 AB	23,43 AB	19,92 B	11,30 A	17,47 A
N 180	15,50 A	7,00 BC	19,83 A	15,33 A	7,77 B	21,30 AB	14,11 A	8,47 AB	25,27 A	20,33 B	9,63 A	18,93 A
N 240	16,61 A	7,27 ABC	20,07 A	17,33 A	7,20 B	21,87 A	14,65 A	8,57 AB	25,40 A	22,90 A	10,83 A	18,63 A
N 300	17,16 A	7,57 AB	19,43 A	16,83 A	7,43 B	22,13 A	15,45 A	8,07 B	24,67 AB	23,13 A	8,47 A	18,70 A

Die moderat gedüngten Varianten wiesen immer niedrigere Rohproteingehalte auf. Insgesamt war der Rohproteingehalt im letzten Schnitt am höchsten. Bei der Rohasche kann eine deutliche Zunahme der Gehalte an beiden Standorten mit späterem Schnitt festgestellt werden, wohingegen die Düngung keinen gerichteten Einfluss zeigt. Mit Ausnahme des vierten Schnittes in Puch und des zweiten Schnittes in Bayreuth zeigen die Rohfasergehalte wiederum einen vernehmlichen Anstieg mit zunehmender Düngehöhe an. Die Rohproteinträge lagen im Mittel in Puch bei 20,62 dt/ha und in Bayreuth bei 12,38 dt/ha. Der Verlauf des Rohproteintrages mit steigender Stickstoffdüngung gleicht dem N-Entzug. Maximal wurden jeweils in der höchstgedüngten Variante in Puch 25,81 dt/ha und in Bayreuth 14,5 dt/ha Rohprotein geerntet.

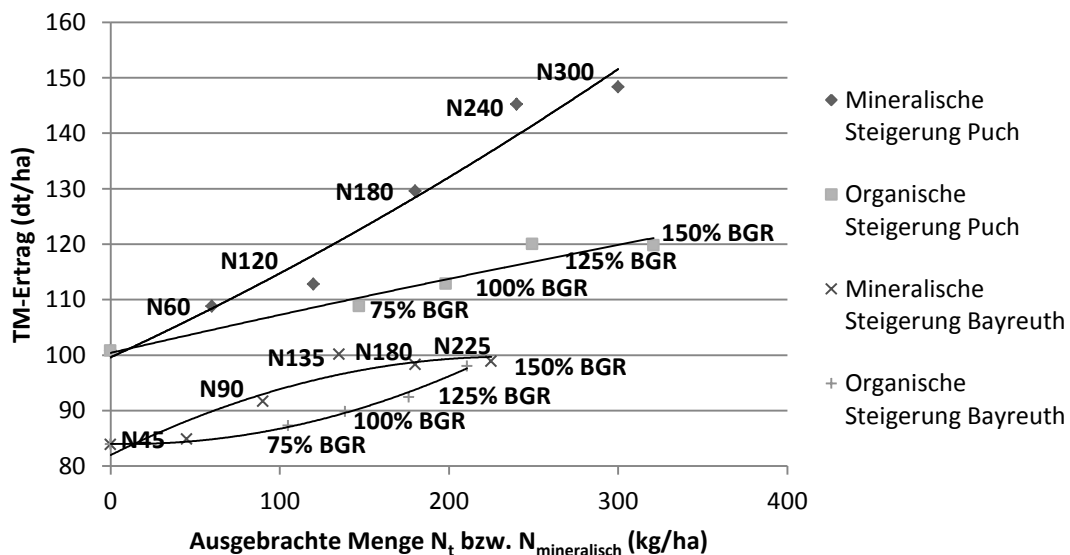
#### Organische Düngungssteigerung mit Biogasgärrest

Die Düngungssteigerung mit Biogasgärrest umfasste die Varianten 75 %, 100 %, 125 % und 150 %. Insgesamt wurden zwischen 147 - 321 kg N<sub>t</sub>/ha gleichmäßig auf vier Schnitte in Puch verteilt und zwischen 105 - 211 kg N<sub>t</sub>/ha gleichmäßig auf drei Schnitte in Bayreuth verteilt (Tab. 43).

**Tab. 43:** Varianten der Stickstoffdüngungssteigerung mit Biogasgärrest auf Grünland und deren tatsächlich ausgebrachte Mengen an  $N_t$  und  $NH_4-N$  je Hektar im Mittel der Jahre 2009 - 2011 an den Standorten Bayreuth und Puch

Applikationsrate	Ø kg/ha Puch	Ø kg/ha Bayreuth
BGR 75 %	147 $N_t$ ; 86 $NH_4-N$	105 $N_t$ ; 62 $NH_4-N$
BGR 100 %	198 $N_t$ ; 116 $NH_4-N$	139 $N_t$ ; 81 $NH_4-N$
BGR 125 %	249 $N_t$ ; 147 $NH_4-N$	176 $N_t$ ; 99 $NH_4-N$
BGR 150 %	321 $N_t$ ; 189 $NH_4-N$	211 $N_t$ ; 129 $NH_4-N$

Je nach Nährstoffgehalt des Biogasgärrestes wurden etwa 10 – 15 m<sup>3</sup> Biogasgärrest/ha und Schnitt appliziert. Durch die Düngungssteigerung mit Biogasgärresten konnten die TM-Erträge bis um 19 % in Puch bzw. um 17 % in Bayreuth gesteigert werden. Die N-Entzüge reagierten in Bayreuth erst ab 211 kg  $N_t$ /ha und in Puch ab 198 kg  $N_t$ /ha signifikant auf die zusätzliche Biogasgärrestdüngung.



**Abb. 51:** TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung auf Grünland in Puch und Bayreuth auf Basis des applizierten  $N_t$  über Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Die in der 150 % Variante applizierten 321 kg  $N_t$ /ha in Puch wurden demgemäß in einen TM-Mehrertrag von knapp 19 dt TM/ha und N-Mehrentzug von lediglich 26 kg N/ha gegenüber der Nullparzelle umgesetzt.

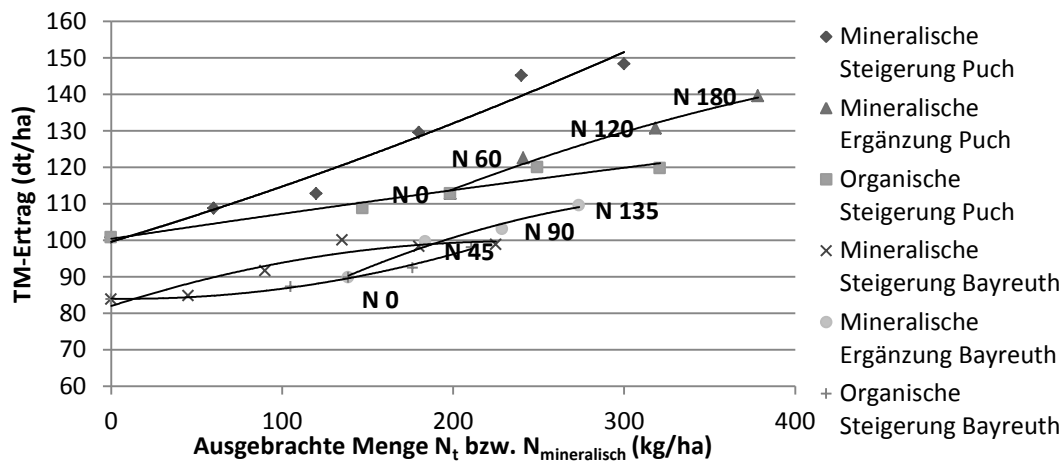
**Tab. 44:** Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der Düngungssteigerung mit Biogasgärresten im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; *t*-Test  $p \leq 0,05$ )

<b>Puch</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Nullparzelle	100,8 C	282,2 C	65,8 B
75% BGR	108,8 BC	289,8 BC	71,4 AB
100% BGR	112,9 AB	292,7 AB	73,4 A
125% BGR	120,1 A	306,0 A	76,8 A
150% BGR	119,8 A	308,6 A	76,8 A
<b>Bayreuth</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Nullparzelle	83,9 B	188,3 B	50,1 B
75% BGR	87,3 B	189,4 B	52,5 AB
100% BGR	89,8 AB	192,4 B	54,5 AB
125% BGR	92,5 AB	199,6 AB	55,2 AB
150% BGR	98,1 A	211,1 A	58,1 A

Dieser N-Mehrentzug konnte beispielsweise in der mineralischen Steigerung bereits mit der Stufe 180 kg N/ha überschritten werden. In Bayreuth war der maximale N-Mehrentzug zur Nullparzelle 23 kg N/ha bei 211 kg N<sub>t</sub>/ha über Biogasgärrest appliziert und einem TM-Mehrertrag von 14 dt TM/ha. Der Energieertrag (GJ NEL/ha) stieg bis zur höchsten Biogasgärrestgabe signifikant um 17 % in Puch und 16 % in Bayreuth (Tab. 44). Die Rohprotein- und Rohaschegehalte zeigten keine evidenten Tendenzen. Der TM-Ertrag welcher im Vergleich zur mineralischen Düngung mit Biogasgärresten erreicht werden konnte, kann auf Basis des applizierten N<sub>t</sub> verglichen werden. In Tab. 43 ist die applizierte Menge N<sub>t</sub> abgebildet. Auf dieser Grundlage konnten mit dem Biogasgärrest je nach Höhe der Düngung in Puch durchschnittlich 83 % des TM-Ertrages der mineralischen Düngung erreicht werden. In Bayreuth wurden durchschnittlich 94 % des TM-Ertrages der mineralischen Düngung erreicht.

#### Mineralische Ergänzung zur Düngung mit Biogasgärresten

Zu der Variante mit 100 % Biogasgärrest wurden zusätzlich drei mineralische Düngungsstufen ausgebracht. In Puch wurden zusätzlich 60, 120 und 180 kg N/ha mineralisch hinzugegeben, in Bayreuth etwas niedrigere Mengen von 45, 90 und 135 kg N/ha.



**Abb. 52:** TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung auf Grünland in Puch und Bayreuth auf Basis des applizierten N/ha über Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Wie in Abbildung 52 ersichtlich, konnten durch die mineralische Ergänzung zu Biogasgärrest die TM-Erträge nochmals deutlich stärker als durch eine Erhöhung der Biogasgärrestmenge gesteigert werden. Auch die N-Entzüge sowie die Energieerträge wurden durch eine mineralische Ergänzung aufgrund der deutlich höheren N-Effizienz signifikant gesteigert. In Puch konnten über die Applikation von 198 kg N<sub>t</sub>/ha Biogasgärrest plus zusätzlich 120 kg N/ha mineralisch (entspricht der zweiten N-Stufe) Energieerträge von 85 GJ NEL/ha erreicht werden. In Bayreuth erreichte eine Gabe von 139 kg N<sub>t</sub>/ha über Biogasgärrest mit zusätzlich 90 kg N/ha mineralisch einen Energieertrag von 62 GJ NEL/ha.

**Tab. 45:** Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der mineralischen Ergänzung zu Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

Puch			
Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	N-Entzug (kg/ha)	Energieertrag (GJ NEL/ha)
100% BGR + N0	112,8 CD	292,7 C	73,4 CD
100% BGR + N60	122,6 BC	316,5 C	79,3 BC
100% BGR + N120	130,7 AB	358,2 B	84,8 AB
100% BGR + N180	139,6 A	390,2 A	90,7 A
Bayreuth			
Auswertungsgruppe	TM-Ertrag (dt/ha)	N-Entzug (kg/ha)	Energieertrag (GJ NEL/ha)
100% BGR + N0	89,8 D	192,4 CD	54,5 CD
100% BGR + N45	99,7 BC	207,0 CD	59,6 BC
100% BGR + N90	103,1 AB	231,1 AB	62,4 AB
100% BGR + N135	109,6 A	245,0 A	66,1 A

Vergleich der verschiedenen organischen Dünger

Außer dem Biogasgärrest wurden auf Grünland auch eine Rindergülle sowie ein separiert flüssiger Biogasgärrest geprüft. Diese unterschieden sich deutlich in ihren chemischen sowie physikalischen Eigenschaften wie z.B. pH-Wert und TS-Gehalt (Tab. 46).

**Tab. 46:** Inhaltsstoffe der verwendeten organischen Dünger (Probenahme an den Ausbringungsterminen) an den Standorten Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Puch			
Ø 2009 - 2011	Sep. flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle
pH-Wert	7,9	7,8	7,2
TS (%)	5,9	6,5	8,0
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	4,4	4,5	3,8
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	2,6	2,6	2,2
Bayreuth			
Ø 2009 - 2011	Sep. flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle
pH-Wert	7,9	7,6	7,0
TS (%)	6,5	7,0	8,4
N <sub>t</sub> (kg/m <sup>3</sup> )	5,8	4,7	3,4
NH <sub>4</sub> -N (kg/m <sup>3</sup> )	3,7	2,6	1,8

In Puch sollten über die organischen Dünger 220 kg N<sub>t</sub>/ha beziehungsweise in Bayreuth 150 kg N<sub>t</sub>/ha appliziert werden. Aufgrund von Abweichungen zwischen der Vorprobe der Dünger und der Nährstoffprobe während der Ausbringung wurde die Zielmenge teilweise nicht erreicht. Die Abweichung von der applizierten Menge N<sub>t</sub>/ha mittels Biogasgärrest betrug in Puch zwischen -2 % für die Rindergülle und -5 % für den separiert flüssigen BGR. In Bayreuth wich die applizierte Menge von dem unbehandelten Biogasgärrest um -1 % bei der Rindergülle und +15% bei dem separiert flüssigen BGR ab.

**Tab. 47:** Darstellung der über die organischen Dünger ausgebrachten Mengen an N<sub>Ges</sub> im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth

Ø 2009 - 2011	Separiert flüssig	Biogasgärrest	Rindergülle
N <sub>t</sub> appliziert Puch	194	198	200
N <sub>t</sub> appliziert Bayreuth	160	139	137

Problematisch zeigte sich, dass durch den zunächst flachen bzw. kaum wahrnehmbaren Anstieg des N-Entzuges gegenüber der ungedüngten Variante keine Reaktion der organischen Dünger im N-Entzug sowie auch im TM-Ertrag gemessen werden konnte. Hinzu kommt, dass sich die Applikationsrate an NH<sub>4</sub>-N über die organischen Dünger auf einem eher niedrigen

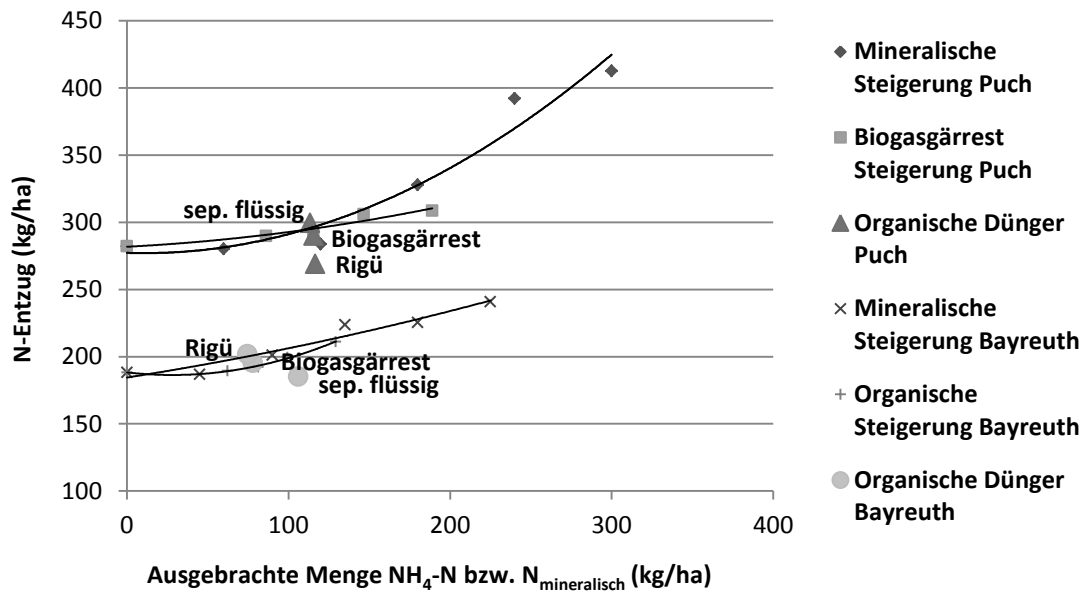
Niveau bewegte. Betrachtet man die ausgebrachte Menge an  $\text{NH}_4\text{-N}$  über die verschiedenen organischen Dünger mit der mineralischen bzw. über unbehandelten Biogasgärrest applizierten Düngungssteigerung, wird die geringe Reaktion auf die organische Stickstoffdüngung ersichtlich. Auffallend ist das bereits sehr hohe Niveau der ungedüngten Parzellen sowohl im N-Entzug (Abb. 53) als auch im TM-Ertrag (Abb. 54), welches auf eine hohe Grundversorgung der Grünlandstandorte hinweist.

**Tab. 48:** *Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge verschiedener organischer Dünger im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )*

<b>Puch</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Separiert flüssig	113,7 A	299,6 A	73,2 A
Biogasgärrest	116,0 A	290,1 A	74,8 A
Rindergülle	107,7 A	269,2 A	69,5 A
<b>Bayreuth</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Separiert flüssig	86,7 A	185,3 A	51,4 A
Biogasgärrest	89,0 A	195,5 A	53,4 A
Rindergülle	89,6 A	202,0 A	54,0 A

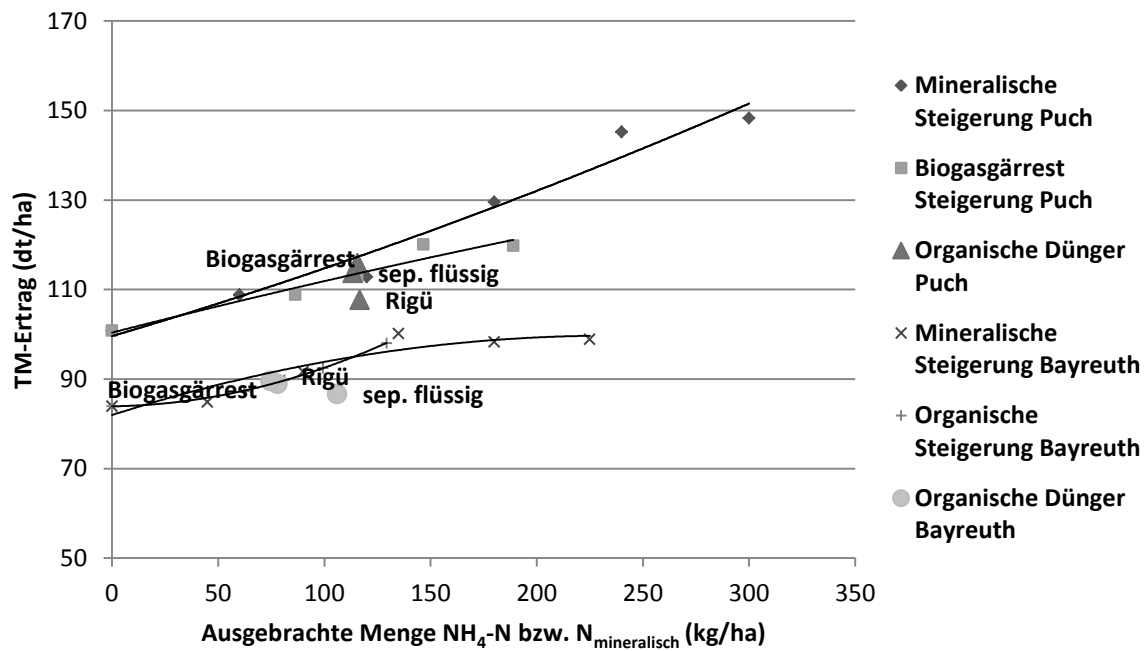
Besonders aber auch in Anbetracht der Grenzdifferenz von 26,3 kg N-Entzug/ha in Puch und 18,1 kg N-Entzug/ha in Bayreuth bei der Auswertungsgruppe der Düngungssteigerung mit Biogasgärrest bzw. einer Grenzdifferenz von 47,5 kg N-Entzug/ha in Puch und 25,6 kg N-Entzug/ha in Bayreuth bei dem Vergleich der organischen Dünger können keine statistisch signifikanten Differenzen aufgezeigt werden.





**Abb. 53:** N-Entzüge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung und Vergleich verschiedener organischer Dünger auf Grünland in Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011

Hierbei ist auch zu berücksichtigen, dass eine Grunddüngung der Parzellen ohne organischen Dünger, unter anderem der ungedüngten Variante, in Höhe von 80 – 100 kg  $P_2O_5$ /ha sowie 160 – 200 kg  $K_2O$ /ha erfolgte (Puch und Bayreuth). Dies verdeutlicht, dass auf langjährigem Grünland mit  $C_{org}/N_t$ -Quotienten von 9,9 bzw. 8,8 und  $N_t$ -Gehalten von 0,28 – 0,5 % bereits durch die erfolgte Düngung mit Phosphor und Kalium hohe Erträge erzielt werden können.



**Abb. 54:** TM-Erträge der mineralischen und mit Biogasgärrest durchgeführten Düngungssteigerung und Vergleich verschiedener organischer Dünger auf Grünland in Puch und Bayreuth im Mittel der Jahre 2009 – 2011

#### Herbstdüngung mit Biogasgärresten

Um die Wirksamkeit der Düngung mit Biogasgärresten auf Grünland im Herbst zu prüfen wurde ein Versuchsglied angelegt, welches zwischen Ende Oktober und Anfang November gedüngt wurde. Im Herbst wurden dabei in Puch durchschnittlich 53 kg  $N_t$ /ha (entspricht 32 kg  $NH_4-N$ /ha) und in Bayreuth ebenfalls 53 kg  $N_t$ /ha (entspricht 28 kg  $NH_4-N$ /ha) über Biogasgärrest appliziert. Bei den im Herbst mit Biogasgärrest gedüngten Varianten wurde dann die erste Gabe im Frühjahr ausgelassen und anschließend die restlichen Schnitte entsprechend dem Versuchsglied ohne Herbstapplikation gedüngt. Die Vergleichsvariante erhielt den Biogasgärrest statt im Herbst im Frühjahr sowie jeweils zum folgenden Schnitt. Die Düngung im Frühjahr erfolgte je nach Witterung zwischen Anfang März und Mitte April. Aufgrund der verschiedenen Applikationstermine schwanken die applizierten Mengen Biogasgärrest der beiden Varianten wie aus Tabelle 49 abzulesen ist.

**Tab. 49:** Varianten der Herbstdüngung mit Biogasgärresten und deren ausgebrachte Mengen an  $NH_4-N$  und  $N_t$  je Hektar im Mittel der drei Jahre und Standorte auf Grünland

Ø 2009 - 2011	$N_t$ (kg/ha)	$NH_4-N$ (kg/ha)
Herbstdüngung Puch	197	116
Frühjahrsdüngung Puch	198	116
Herbstdüngung Bayreuth	152	83
Frühjahrsdüngung Bayreuth	139	78

Die Verlagerung der Düngung mit Biogasgärrest von Frühjahr in den Herbst erzielte an beiden Standorten ähnliche TM-Erträge wie eine Düngung im Frühjahr. Auch N-Entzug und Energieertrag zeigten keine statistisch signifikanten Unterschiede der beiden Varianten auf. Auch bei ausschließlicher Betrachtung des ertragsreichen 1.Schnittes zeigten die im Herbst mit Biogasgärrest gedüngten Varianten keine Ungleichheiten zur Frühjahrsdüngung.

**Tab. 50:** Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieerträge der Herbstdüngung mit Biogasgärrest im Mittel der Jahre 2009 – 2011 an den Standorten Puch und Bayreuth für die Summe der Schnitte sowie nur den 1.Schnitt (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ )

<b>Puch</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Herbstdüngung	115,2 A	298,7 A	74,9 A
Frühjahrsdüngung	116,0 A	290,1 A	74,8 A
Herbstdüngung (nur 1.Schnitt)	37,8 A	94,3 A	26,3 A
Frühjahrsdüngung (nur 1.Schnitt)	38,1 A	87,8 A	26,3 A
<b>Bayreuth</b>			
<b>Auswertungsgruppe</b>	<b>TM-Ertrag (dt/ha)</b>	<b>N-Entzug (kg/ha)</b>	<b>Energieertrag (GJ NEL/ha)</b>
Herbstdüngung	91,2 A	203,7 A	55,2 A
Frühjahrsdüngung	89,0 A	195,5 A	53,4 A
Herbstdüngung (nur 1.Schnitt)	46,4 A	89,1 A	28,6 A
Frühjahrsdüngung (nur 1.Schnitt)	44,8 A	83,7 A	27,5 A

## 5 Diskussion

Sowohl durch die Vielzahl der eingesetzten Input-Substrate, als auch durch deren Nährstoffvariabilität unterliegen die Nährstoffgehalte von Biogasgärresten einem großen Schwankungsbereich. Dadurch lassen sich Biogasgärreste bezüglich deren Stickstoffwirkung nicht pauschal systematisch einordnen. Den stärksten Effekt auf den Nährstoffgehalt zeigt das verwendete Eingangssubstrat, da für die Nährstoffe Phosphor und Kalium keine Verluste auftreten, sowie für Stickstoff nach Siliuverlusten erst während Lagerung und Ausbringung mit Verlusten gerechnet werden muss (WILLMS, et al. 2009). Wurde beispielsweise wie am Standort Steinach N-haltiger Geflügelmist in Anteilen eingesetzt, so fanden sich auch in dem entstandenen Biogasgärrest gesteigerte N-Gehalte. Selbiges galt auch für den Kaliumgehalt der Biogasgärreste bei gräserhaltigem Eingangssubstrat. Die Herkunft der Biogasgärreste aus rein pflanzlichen Fermentationsanlagen oder Co-Fermentationsanlagen war für deren Wirkung auf das Ertragspotential der geprüften Kulturarten nebensächlich. In Versuchen von ELSÄBER (2011) zur Prüfung von Biogasgärresten unterschiedlicher Herkunft zeigte sich ebenfalls, dass es für die Ertragswirkung unerheblich war ob der zugeführte N aus pflanzlichen Kofermenten oder tierischen Fermenten stammte.

### Vergleich der eingesetzten organischen Dünger mit unbehandeltem Biogasgärrest

Die Versuche zeigten, dass sowohl für die verwendeten Rindergüllen als auch Biogasgärreste (unbehandelter BGR sowie separiert flüssiger und fester BGR aus Pressschneckenseparator) Korrelationen zu inhaltlichen Parametern gegeben waren. Wurde im Feldversuch der organische Dünger eingearbeitet, wie es vor Silomais der Fall war, so konnten Wechselbeziehungen zwischen dem Mineraldüngeräquivalent und dem Quotienten aus organischer Substanz und Stickstoffgehalt des Biogasgärrests nachgewiesen werden ( $\emptyset$  der Versuche zu Silomais  $R^2=0,76$ ). Wurde der organische Dünger zu Wintergetreide im Frühjahr nicht eingearbeitet, so konnte eine etwas bessere Korrelation des  $MD\ddot{A}_{NUP}$  zum Trockensubstanzgehalt und der damit einhergehenden Infiltrationsfähigkeit gefunden werden ( $\emptyset$  der Versuche zu Wintergetreide  $R^2=0,87$ ). Dieser Effekt beruht größtenteils auf einer positiven Wechselbeziehung zwischen dem Trockensubstanzgehalt von organischen Düngern und dessen Risikoneigung für  $NH_3$ -Verluste nach der Ausbringung durch schlechtere Infiltrationseigenschaften (BRASCHKAT, MANNHEIM und MARSCHNER 1997), wobei die Höhe der Wechselbeziehung nicht beurteilt werden kann, da auch andere Einflussgrößen diese Beziehung beeinflussen können. Eine Verdünnung des Biogasgärrestes mit Wasser auf 50 % des ursprünglichen TS-Gehaltes brachte eine weitere Verbesserung des  $MD\ddot{A}_{NUP}$  und unterstützt somit die Beobachtung einer engen

Interaktion zwischen TS-Gehalt und  $MD\ddot{A}_{NUP}$  einer Biogasgärrestdüngung zu Wintergetreide bei gleichzeitig unverändertem C/N-Quotienten. Nach MISSELBROOK et al. (2005), SMITH et al. (2000) und MOAL (1995) kann eine Reduktion des TS-Gehaltes um 1 % die Ammoniakemissionen um 4 – 6 % verringern. Insgesamt tragen eine Vielzahl von Einflussgrößen wie Lufttemperatur, Windgeschwindigkeit, Art des organischen Düngers, Trockensubstanzgehalt sowie Ammoniumstickstoffgehalt zu Ammoniakverlusten bei, wobei der Einfluss einzelner Größen stark variiert (SOMMER und OLESEN 2000, HUIJSMANS, HOL und VERMEULEN 2003, NI, et al. 2012). Da sich manche dieser Einzelgrößen gegenläufig verhalten, so sind bspw. höhere Temperaturen standortbedingt meist mit niedrigeren Windgeschwindigkeiten verbunden, wird deren Einzeleinfluss teilweise ausgeglichen (SØOGAARD, et al. 2002). Zusätzlich wurde der Biogasgärrest in den Versuchen bei Wintergetreide in einen stehenden Pflanzenbestand ausgebracht, wodurch Witterungseinflüsse weniger stark ausschlaggebend waren bzw. der Einfluss des TS-Gehaltes des organischen Düngers weniger stark überlagert wurde.

Ein wichtiger Indikator für die Effizienz der Verwertung des eingesetzten Stickstoffs ist die scheinbare N-Ausnutzung ( $ANE_{NUP}$ ). Diese beschreibt den Anteil der N-Mehraufnahme eines Düngers (gegenüber der Kontrollvariante) zur insgesamt eingesetzten Menge N. Die  $ANE_{NUP}$  des Biogasgärrestes in Puch lag bei 35 % zu Wintertriticale GPS und 15 % zu Winterweizen. An dem Standort in Bayreuth wurde eine  $ANE_{NUP}$  von 16 % zu Winterweizen festgestellt. Auffallend ist die etwas höhere  $ANE_{NUP}$  der GPS gegenüber dem Winterweizen. ALTOM et al. (1996) weisen darauf hin, dass durch die frühere Ernte von Pflanzen in Futterbausystemen diese nicht in die Phase höherer gasförmiger N-Verluste ab der Blüte bis zur physiologischen Totreife kommen und postuliert daher eine höhere  $ANE_{NUP}$  gegenüber einer späteren Beerntung. Auch THOMASON (1998) berichtet von einer deutlich niedrigeren  $ANE_{NUP}$  bei Winterweizen wenn selbiges nur für Korn gegenüber der Nutzung als Ganzpflanze berechnet wurde (31 % zu 77 %). Da das Wintertriticale GPS in den Feldversuchen erst nach dessen Kornfüllungsphase beerntet wurde sind diese Unterschiede gegenüber dem Winterweizen nicht so stark ausgeprägt. Hinzu kommt, dass bei ausschließlicher Kornnutzung der im Stroh festgelegte N nicht erfasst wird. Dieser von der Pflanze aufgenommene im Stroh verbleibende Stickstoff fließt somit nicht in die Berechnung der N-Effizienz ein und führt zusätzlich zu niedrigeren  $ANE_{NUP}$ . Verdeutlicht wird dies durch Betrachtung der mittleren N-Entzüge der mineralischen Düngung (0 - 180 kg N/ha). am Standort Puch. Während das Wintertriticale GPS mittlere Entzüge von 201 kg N/ha erreichte, wurden bei Winterweizen Korndrusch nur 132 kg N/ha entzogen. Zu Silomais wurde für Biogasgärrest (bei sofortiger Einarbeitung) eine  $ANE_{NUP}$  von 12 % in Bayreuth und 28 % in Puch ermittelt. Die niedrigere N-Effizienz in Bay-

reuth lässt sich besonders auf die durch ungünstige Witterungsbedingungen hervorgerufenen deutlich niedrigeren N-Entzüge in den Jahren 2009 (46 % von 2010) und 2011 (62 % von 2010) zurückzuführen.

Im Gegensatz zu der scheinbaren N-Ausnutzung  $ANE_{NU_p}$  gibt das  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  (gemessen am applizierten  $N_i$ ) den Quotienten aus dem N-Entzug der organischen zur mineralischen Düngung, jeweils bereinigt um die Kontrollvariante ohne Düngung, an. Dieses ergab am Standort Puch für den dort verwendeten BGR 45 % zu Wintertriticale GPS und 32 % zu Winterweizen Korn. In Bayreuth betrug das  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  des eingesetzten Biogasgärrestes 30 % zu Winterweizen Korn und lag somit auf einem ähnlichen Niveau wie am Standort Puch. Bei Silomais zeigte sich wie auch bei der  $ANE_{NU_p}$  ein witterungsbedingt niedrigeres  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  in Bayreuth von 30 % gegenüber 50 % in Puch. In einer zusammenfassenden Bewertung der  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  organischer Dünger geben GUTSER et al. (2005) für Biogasgärreste ein  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  zwischen 40 % - 70 % an, wobei unterschieden wird zwischen BGR aus pflanzlicher Biomasse und BGR aus der Fermentation von Rindergülle mit einem etwas höheren  $MD\ddot{A}_{NU_p}$ . Somit lagen die aus den Feldversuchen errechneten  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  am unteren Ende dieser Spannbreite für Biogasgärreste bzw. unterschritten diese bei Winterweizen Korndrusch sowie unter ungünstigen Witterungsbedingungen bei Silomais. Nach TECHOW et al. (2011) ist die Effizienz des eingesetzten Biogasgärrestes maßgeblich von dem Produktionssystem und Einzeljahreseffekten abhängig. Dabei wies vor allem die Maismonokultur eine hohe Effizienz auf. Das  $RNFV_{DM}$ , berechnet aus dem Quotienten der  $ANE_{DM}$  einer organischen Düngung zur  $ANE_{DM}$  der mineralischen Düngung, betrug nach Angabe der Autoren für Maismonokultur 88 %, wohingegen die Fruchtfolge Mais - Weizen- Welsches Weidelgras lediglich 51 % erreichte. In den vorliegenden Feldversuchen wurden bei den ortswechselnden Versuchen zu Silomais  $RNFV_{DM}$ 's von 64 % in Puch bzw. 47 % in Bayreuth erreicht. Die zweijährige Fruchtfolge Mais – Wintertriticale GPS- Einjähriges Weidelgras brachte nach drei Jahren 45 % in Puch, 51 % in Bayreuth, 28 % in Landsberg und für das Mittel der vier BGR in Steinach 54 %. Auch der starke Einfluss einzelner Jahre konnte nachgewiesen werden, mit einem  $RNFV_{DM}$  von 77 % in 2010 und 51 % in 2011 am Standort Puch. Im Gegensatz zu den Untersuchungen von TECHOW et al. (2011) wurde in den Feldversuchen zu Silomais in dieser Studie keine mineralische Unterfußdüngung durchgeführt, wodurch ein etwas niedrigeres  $RNFV_{DM}$  zu erklären ist.

Die eingesetzten Rindergüllen zeigten ein  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  von 39 % zu Wintertriticale GPS, 30 % zu Winterweizen Korn und 32 % zu Silomais am Standort Puch auf und lagen somit zwischen 6 - 36 % niedriger als der eingesetzte Biogasgärrest. An den Standorten in Bayreuth wies die verwendete Rindergülle einen deutlich niedrigeren TS-Gehalt auf als der dort eingesetzte Biogasgärrest, wodurch wiederum ein höheres  $MD\ddot{A}_{NU_p}$  von 36 % gegenüber dem dort verwen-

deten Biogasgärrest ( $MD\ddot{A}_{NUp}$  30 %) bei Winterweizen gemessen wurde. Da die Rindergülle vor Silomais eingearbeitet wurde zeigte sich dieser Effekt vor Silomais in Bayreuth nicht, das  $MD\ddot{A}_{NUp}$  für Rindergülle zu Silomais lag in Bayreuth bei 29 %.

Infolgedessen hatten die chemischen und physikalischen Eigenschaften des organischen Düngers einen maßgeblichen Einfluss auf das Mineraldüngeräquivalent. Speziell die separiert festen Biogasgärreste wiesen in den Versuchen bedeutsam niedrigere Mineraldüngeräquivalente als die flüssigen Biogasgärreste auf. Dies mag zum einen an höheren gasförmigen Verlusten durch Ammoniak aufgrund erhöhter pH-Werte liegen. Zum andern gibt es Hinweise auf eine ausgeprägte Immobilisierung des enthaltenen  $NH_4-N$  nach Düngung mit separiert festem BGR (v. TUCHER, et al. 2011). Eigene Untersuchungen an der äußeren Schicht von abgelagertem und frischem Biogasgärrest nach Separierung zeigten zudem deutlich niedrigere  $NH_4-N$ -Gehalte in dem abgelagerten Material (ca. 27 - 36 % des  $NH_4-N$ -Gehalte im Inneren nach 17 Tagen Lagerung). Dies bekräftigt wiederum das hohe Potential gasförmiger Verluste während und nach der Ausbringung der separiert festen Phase. Das  $MD\ddot{A}_{NUp}$  der separiert flüssigen BGR lag bei 55 % zu Wintertriticale GPS, 35 % zu Winterweizen Korn und 33 % zu Silomais am Standort Puch sowie 42 % zu Winterweizen Korn und 48 % zu Silomais am Standort Bayreuth. Ein wesentlich niedrigeres  $MD\ddot{A}_{NUp}$  lieferte der erwähnte separiert feste BGR mit 27 % zu Wintertriticale GPS, 18 % zu Winterweizen Korn und einem N-Entzug auf Niveau der Kontrolle zu Silomais am Standort Puch sowie 16 % zu Winterweizen Korn und 5 % zu Silomais am Standort Bayreuth. Der ortsfeste Feldversuch mit der zweijährigen Fruchtfolge Silomais – Wintertriticale GPS- Einjähriges Weidelgras zeigte eine ähnliche Abstufung der eingesetzten organischen Dünger. Zusätzlich konnten deutliche Schwankungen der drei Einzeljahre und vier Standorte festgestellt werden. Am Standort in Steinach konnten insgesamt vier BGR geprüft werden. Die  $MD\ddot{A}_{NUp}$  variierten dort zwischen 43 – 50 %. Abweichungen zeigte BGR 2, ein BGR dessen Eingangssubstrat neben Maissilage zu einem Großteil aus N-reichem Hühnermist besteht, mit einem  $MD\ddot{A}_{NUp}$  von 58 %. Dieser BGR zeigte trotz des höheren TS-Gehaltes bei ähnlichem org. Substanz/ $N_t$ -Quotienten das höchste  $MD\ddot{A}_{NUp}$ . Auffallend bei diesem BGR war der hohe Anteil  $NH_4-N$  am  $N_t$  mit 72 % verglichen mit 55 – 60 % der anderen drei BGR.

Durch die Düngung mit Biogasgärrest in Höhe einer kalkulatorisch vollständigen Rückführung des entzogenen Stickstoffs konnte nicht das gleiche Ertragsniveau erreicht werden wie durch entsprechende mineralische Düngung. Als Stickstoffmenge zur vollständigen Rückführung des über eine Biogasfruchtfolge entzogenen Stickstoffs wurden ca. 220 kg  $N_t$ /ha über Biogasgärrest festgelegt. Bei einem Vergleich der Fruchtfolge zweier Biogasanlagen in Süddeutschland errechneten MÖLLER, SCHULZ und MÜLLER (2010) einen leicht geringeren

Stickstoffanfall von 208 kg N/ha im Biogasgärrest. Wurde zusätzlich mineralischer Stickstoff gedüngt, stiegen die TM-Erträge aufgrund der höheren N-Effizienz mineralischer Dünger nochmals an. Um negative Auswirkungen hoher Reststickstoffmengen nach der Ernte zu vermeiden, muss in diesem Zusammenhang der Stickstoffsaldo beachtet werden. Zu den Kulturarten Wintertriticale (Puch) und Silomais wurden durch deren hohen Stickstoffentzüge maximal tolerierbare Stickstoffüberhänge von 60 kg N/ha auch bei der notwendigen zusätzlichen mineralischen Düngung zur Erreichung von Höchsterträgen eingehalten. Die Stickstoffentzüge der kombinierten Düngung erreichten bei Wintertriticale maximal 275 kg N/ha (2010) sowie bei Silomais max. 235 kg N/ha in Puch (2011) bzw. max. 201 kg N/ha in Bayreuth (2010). Entscheidend ist hier die Abfuhr der gesamten oberirdischen Biomasse. Zu Winterweizen im Marktfruchtanbau war bereits bei den Varianten eines kalkulatorisch geschlossenen Nährstoffkreislaufs einer Biogasfruchtfolge ein Stickstoffsaldo von 60 kg N/ha erreicht. Der N-Saldo wurde berechnet aus der Differenz zwischen dem N-Gehalt des Erntegutes i. d. TM multipliziert mit dem TM-Ertrag und der gedüngten Menge N. Da Analysewerte verwendet wurden und die Faustzahlen nach DüV tendenziell höhere N-Entzüge liefern fallen die hier berechneten N-Salden tendenziell höher aus. Die über das Korn ermittelte N-Abfuhr bei Winterweizen lag maximal bei 186 kg N/ha in Puch (2009) bzw. max. 168 kg N/ha in Bayreuth (2009). Somit ist bei der Düngung von Marktfrüchten mit Biogasgärrest unter Einhaltung des kritischen N-Saldos die Zufuhr an Stickstoff über Biogasgärrest zu reduzieren um insbesondere eine mineralische Qualitätsdüngung durchführen zu können. Zusätzlich muss erwähnt werden, dass der Anfall an BGR aus einer Biogasfruchtfolge errechnet wurde und mit steigendem Anteil an Marktfrüchten dieser geringer würde. Zur Quantifizierung der Stickstoffwirkung auf den TM-Ertrag durch organische Dünger eignet sich das Ertragsäquivalent mineralischer Dünger (EÄM). Die Wirkung des organischen Düngers kann über diesen Wert in die eines mineralischen Düngers konvertiert werden und somit für die Düngplanung verwendet werden. Es gibt an bei welcher Menge mineralischem Dünger bereits der TM-Ertrag des organischen Düngers erreicht wurde. Insgesamt lag das Ertragsäquivalent mineralischen Düngers (EÄM<sub>DM</sub>) der Stickstoffsteigerung mit Biogasgärresten an den ortswechselnden Versuchstandorten im Mittel der Standorte und Jahre 2009 – 2011 zu Winterweizen und Wintertriticale GPS bei ca. 35 %, zu Silomais bei 50 % und in der ortsfesten Fruchtfolge bei 41 %. Verdeutlicht man, dass bereits mit ca. 40 % mineralischem Dünger-N der TM-Ertrag des eingesetzten BGR erreicht wurde, so zeigt dies die äquivalente Verwertung des N aus BGR auf. Das trifft auf die anderen organischen Dünger im Versuch in ähnlichem Maße zu. DITTERT et al. (1999) berichten ebenfalls von einer Ausnutzung des Gesamt-N von mit <sup>15</sup>N



markierter Rindergülle in Höhe von ca. 30 – 40 %. Die Rindergülle in den ortswechselnden Versuchen zeigte ein  $E\ddot{A}M_{DM}$  von 26 – 37 % auf.

Eine Betrachtung des  $E\ddot{A}M_{DM}$  auf Basis des applizierten  $NH_4-N$  zu Winterweizen und Wintertriticale GPS mit 58 - 62 % und zu Silomais mit 98 % zeigt zudem, dass die Menge des applizierten  $NH_4-N$  nicht vollständig einer mineralischen Düngung gleichgestellt werden kann und somit von einem eher geringen Priming-Effekt auszugehen ist. Eine Minderung des  $E\ddot{A}M_{DM}$  bezogen auf den applizierten  $NH_4-N$  könnte zudem auch durch gasförmige N-Verluste während und nach der Ausbringung ausgehen. Diese Verlustquelle sollte durch den Einsatz bodennaher Applikation in wachsende Pflanzenbestände bzw. sofortige Einarbeitung auf unbewachsenem Ackerland vor Silomais möglichst gering gehalten werden. Unterschiede im  $E\ddot{A}M_{DM}$  zwischen Silomais und Wintergetreide könnten durch die Möglichkeit der sofortigen Einarbeitung vor Silomais entstanden sein, da ausschließlich bei Maßnahmen die einen ausreichenden Einarbeitungserfolg gewährleisten von einer Beendigung der  $NH_3$ -Freisetzung ausgegangen werden kann (HORLACHER und MARSCHNER 1990). Zusätzlich beschreiben MAIDL, STICKSEL und VALTA (1999) bei Silomais eine ausgeprägte Verwertung von im Spätsommer mineralisiertem Stickstoff aus organischer Düngung. Mit erfasst werden in dem  $E\ddot{A}M_{DM}$  zusätzlich diverse Faktoren, welche über die direkte Wirkung des applizierten Stickstoffs hinausgehen. Bei der Ausbringung leicht abbaubarer organischer Verbindungen kann beispielsweise durch die organische Düngung ein Priming-Effekt bodenbürtigen Stickstoffs einsetzen (LIN, et al. 2004). Durch eine kombinierte Zugabe mineralischen Düngers kann dieser Effekt verstärkt werden (KUZYAKOV, FRIEDEL und STAHR 2010). Der Gehalt an leicht verfügbaren organischen Verbindungen ist in Biogasgärresten hingegen durch den vorangegangenen anaeroben Abbau deutlich reduziert, sodass dieser Effekt wohl weniger stark ausgeprägt ist als bei unbehandelter Gülle. Insgesamt würde der Priming-Effekt zu einer inapparenten Verbesserung der Düngeräquivalente führen, da dieser nicht über eine Kontrollvariante bereinigt wird. Da der applizierte  $NH_4-N$  nicht vollständig einer mineralischen Düngung gleichkam, kann von einem eher geringen Priming-Effekt ausgegangen werden.

Ein Überblick der  $E\ddot{A}M_{DM}$  je Standort, Jahr und Fruchtart des ortsfesten Dauerversuches verdeutlicht den Einfluss dieser Einzelfaktoren (Tab. 51). In den Jahren 2009 und 2011 stand an allen Standorten Silomais, 2010 wurde die Summe des TM-Ertrages aus Wintertriticale GPS (in Landsberg Winterweizen GPS) und der darauffolgenden Schnitte Weidelgras gebildet. Die Farbskalen in Tabelle 51 und 52 kennzeichnen das  $E\ddot{A}M_{DM}$  in Abhängigkeit der Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg je organischem Dünger sowie der vier Biogasgärreste, Rindergülle und BGR sep. fest in Steinach.

**Tab. 51:** Farbskala des  $E\ddot{A}M_{DM}$  (bezogen auf die applizierte Menge  $N_t$ ) in Abhängigkeit der Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg je organischem Dünger sowie der vier Biogasgärreste, Rindergülle und BGR sep. fest in Steinach. MW berechnet aus den MW der Ergebnisse der Jahre 2009 -2011

	$E\ddot{A}M_{DM}$ (TM-Ertrag $N_t$ )											
	Puch				Bayreuth				Landsberg			
	2009	2010	2011	MW	2009	2010	2011	MW	2009	2010	2011	MW
RiGü	58%	33%	61%	44%	35%	49%	38%	40%	19%	32%	20%	23%
Sep.flüssig	88%	52%	51%	58%	47%	69%	35%	50%	37%	42%	28%	35%
Sep.fest	12%	18%	25%	19%	15%	26%	17%	20%	12%	17%	10%	13%
BGR	31%	46%	44%	40%	31%	46%	56%	39%	29%	41%	21%	29%
$E\ddot{A}M_{DM}$ (TM-Ertrag $N_t$ )												
Steinach												
	2009	2010	2011	MW								
Biogasgärrest 1	43%	34%	53%	43%								
Biogasgärrest 2	54%	46%	61%	54%								
Biogasgärrest 3	44%	36%	77%	48%								
Biogasgärrest 4	39%	34%	63%	44%								
Rindergülle	39%	27%	41%	36%								
separiert fest	7%	22%	25%	17%								

**Tab. 52:** Farbskala des  $E\ddot{A}M_{DM}$  (bezogen auf die applizierte Menge  $NH_4-N$ ) in Abhängigkeit der Standorte Puch, Bayreuth und Landsberg je organischem Dünger sowie der vier Biogasgärreste, Rindergülle und BGR sep. fest in Steinach. MW berechnet aus den MW der Ergebnisse der Jahre 2009 -2011

	$E\ddot{A}M_{DM}$ (TM-Ertrag $NH_4-N$ )											
	Puch				Bayreuth				Landsberg			
	2009	2010	2011	MW	2009	2010	2011	MW	2009	2010	2011	MW
RiGü	91%	61%	96%	75%	69%	86%	75%	75%	41%	58%	38%	44%
Sep.flüssig	126%	90%	89%	95%	80%	102%	61%	82%	44%	73%	47%	52%
Sep.fest	32%	35%	55%	41%	54%	59%	63%	58%	35%	32%	22%	28%
BGR	59%	76%	81%	72%	62%	86%	112%	76%	56%	71%	42%	55%
$E\ddot{A}M_{DM}$ (TM-Ertrag $NH_4-N$ )												
Steinach												
	2009	2010	2011	MW								
Biogasgärrest 1	70%	63%	93%	75%								
Biogasgärrest 2	73%	61%	82%	72%								
Biogasgärrest 3	76%	65%	153%	87%								
Biogasgärrest 4	72%	56%	94%	73%								
Rindergülle	68%	45%	63%	59%								
separiert fest	10%	45%	40%	28%								

Aus der farblichen Abstufung kann folglich der Jahreseffekt der einzelnen Dünger abgelesen werden. Zu beachten ist, dass der Biogasgärrest 3 in Steinach 2011 und der Biogasgärrest in Bayreuth 2011 um ca. 2 dt TM/ha nach unten korrigiert wurden um das  $E\ddot{A}M_{DM}$  berechnen zu können. Auffallend ist zunächst die deutlich schlechtere Effizienz der organischen Düngung am Standort Landsberg. Während im Mittel der drei Jahre und organischen Dünger in Puch ein  $E\ddot{A}M_{DM}$  (bezogen auf  $NH_4-N$ ) von 74 % gemessen wurde, erreichten diese in Landsberg nur 47 %. An den Standorten Puch und Landsberg wurden zudem organische Dünger gleicher Herkunft verwendet. Die Bodenuntersuchungen lieferten bei ähnlicher Korngrößenzusammensetzung, einem C/N von 8,8 in Puch bzw. 9 in Landsberg und einem Boden-pH von 6,5 in Puch bzw. 7 in Landsberg kaum aufschlussreiche Erklärungen.

Neben der Festlegung des applizierten  $NH_4-N$  durch die mikrobielle Biomasse, welche durch NIEDER et al. (2008) als nicht ausreichend angesehen wird um die Veränderungen des verfügbaren N im Boden zu erklären, könnte die Festlegung von  $NH_4-N$  an die mineralische Tonfraktion nach NIEDER et al. (1995a) weitere Erklärungen für die teilweise niedrige Effizienz des über organischen Dünger applizierten  $NH_4-N$  liefern. Der Effekt mikrobieller N-Festlegung wird von den Autoren als sekundär betrachtet, da mikrobiell gebundener N meist während den Sommermonaten aufgrund leicht verfügbarer C-Quellen aus Ernteresten und Wurzelexsudaten ein Maximum durchläuft und während den Phasen erhöhter N-Aufnahme weniger leicht verfügbare C-Quellen vorhanden sind. Diese C-Quelle könnte in den Feldversuchen aus den organischen Düngern geliefert worden sein und so auch während den Phasen hohen N-Bedarfs zu Festlegungsprozessen geführt haben. Fortlaufende Untersuchungen zur Kationenaustauschkapazität und Basensättigung der Standorte sollen hier weitere standortabhängige Erkenntnisse bringen. APPEL (1994) berichtet von einer ähnlichen standortabhängigen Variation der apparenten Wiederfindung (N-Aufnahme der Pflanze +  $N_{min}$  im Boden) des eingesetzten N zwischen 33 und 96 %, wobei die höchste Korrelation zu dem extrahierbaren  $N_{Org}$ -Gehalt des Bodens als maßgeblicher Parameter für N-Mineralisationsprozesse gefunden wurde. Auf eine Standortabhängigkeit der Effizienz des eingesetzten N wird nicht weiter eingegangen. Die Übersicht der  $E\ddot{A}M_{DM}$  in Tabelle 51 und 52 zeigt mit Ausnahme des Standortes Landsberg zudem eine steigende Effizienz des organischen Düngers von 2009 – 2011, dieser Effekt kann durch eine Nachwirkung von organischem Dünger-N zustande kommen, aber auch ein Einzeljahreseffekt sein. Deutlich zeigt sich der Effekt einzelner Jahre in Bayreuth 2009. Die Silomaiserträge sämtlicher Versuchsglieder lagen dort auf einem Niveau von max. 100 dt TM/ha gegenüber 119 dt TM/ha in 2011 und 222 dt TM/ha (Summe aus Wintertriticale GPS und Weidelgras Folgefrucht) in dem witterungsbedingt günstigen Jahr 2010.

Ableiten lässt sich aus einer Variation der  $E\ddot{A}M_{DM}$  für unbehandelten Biogasgärrest zwischen 55 – 77 % (MW je Standort gemessen am  $NH_4-N$ ), dass zur Verbesserung der Düngerbedarfs-ermittlung insbesondere bei organischer Düngung ergänzend nur standortabhängige Methoden zur weiteren Optimierung der Effizienz des eingesetzten N dienen können.

### Einfluss verschiedener Applikationstechniken auf TM-Ertrag und N-Entzug

Der Einfluss unterschiedlicher Applikationstechniken auf Trockenmasseertrag und Stickstoffentzug wurde in den Feldversuchen geprüft. Zur Anwendung kam eine breitflächige Verteilung mittels welcher der Biogasgärrest über ein Leitblech verteilt wurde, Schleppschlauchapplikation sowie Schleppschuhapplikation. Eine lange Flugphase der organischen Partikel, wie sie bei einer Breitverteilung mit Abstrahlung nach oben gegeben ist, fand bei der hier angewendeten Breitverteilung nicht statt. Stattdessen wurde der organische Dünger aus den Verteilerschläuchen auf ein Leitblech abgelegt, wovon dieser dann breitflächig abtropfte. Dies kann zu niedrigeren  $NH_3$ -Verlusten während der Ausbringung gegenüber praxisüblichen Systemen geführt haben. PAIN (1989) und GRONAUER (1993) fanden jedoch heraus, dass nur ein geringer Anteil der  $NH_3$ -Emissionen während der Ausbringung auftreten und der Großteil erst in den Stunden nach der Ausbringung emittiert wird. Durch die Applikationstechnik Schleppschlauch in Winterweizen oder Wintertriticale GPS konnte gegenüber der erwähnten Breitverteilung keine Reaktion auf TM-Ertrag oder N-Entzug festgestellt werden. Von ähnlichen Effekten geringer Vorteile durch Schleppschlauchapplikation gegenüber einer Breitverteilung berichten auch FROST (1994) und THOMPSON et al. (1990). Hier konnte eine niedrigere Ammoniakemission durch Schleppschlauchapplikation nur bei hohen Applikationsraten (ca.  $60\text{ m}^3$ ) bzw. größeren Schleppschlauchbändern gemessen werden, während in vorliegenden Versuchen die Applikationsraten niedriger lagen. SOMMER und OLESEN (2000) zeigten in einem Vergleich der Applikation von Rindergülle mit Schleppschlauch in 60 cm hohes Getreide gegenüber einer Breitverteilung auf unbewachsenes Ackerland eine Reduktion der Ammoniakverluste von 75 %, sodass in hohen Pflanzenbeständen generell von niedrigeren Ammoniakverlusten ausgegangen werden kann. Dies bedingte wohl die geringen, statistisch nicht absicherbaren Reaktionen auf TM-Ertrag und N-Entzug. WULF, MAETING und CLEMENS (2002) geben auf Ackerland Verluste von ca. 30 % des applizierten  $NH_4-N$  bei Breitverteilung (mit modifizierten Gießkannen) an, wobei durch Schleppschlauchausbringung auf Ackerland und Grünland keine Verlustreduktion festgestellt werden konnte. SMITH et al. (2000) konnten in mehreren Versuchen zu  $NH_3$ -Verlusten trotz messbaren Unterschieden zwi-

schen Breitverteilung (40 % des  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) und Schleppschlauch (25 % des  $\text{NH}_4\text{-N}$ ) keine oder nur geringe Effekte auf TM-Ertrag und N-Entzug feststellen.

Der Einarbeitungseffekt mittels Schleppschuh führte je nach Bodenbedingung zu visuell erkennbar unterschiedlich starkem Öffnen des Pflanzenbestandes und Bodens und somit Infiltrationspotential. Die Versuchsergebnisse der Trockenmasseerträge aber auch insbesondere der Stickstoffentzüge zeigten zu Wintergetreide lediglich bei der Applikationstechnik Schleppschuh und dem Applikationstermin zu Vegetationsbeginn in Winterweizen einen signifikant höheren N-Entzug sowie TM-Ertrag als durch Schleppschlauch oder Breitverteilung. Insgesamt wurden mit dem Schleppschuh zu Wintertriticale GPS und Winterweizen an den beiden Applikationsterminen zu Vegetationsbeginn und zum Schossen gesteigerte, jedoch nicht signifikante TM-Erträge gemessen. TM-Ertrag und N-Entzug konnten um 2 % bzw. 6 % in Winterweizen sowie jeweils 4 % in Wintertriticale zu Breitverteilung gesteigert werden.

Verglichen mit der verwendeten Breitverteilung konnte in Wintergetreide folglich nur durch eine Erhöhung des Infiltrationspotentials der Biogasgärreste in den Boden durch Schleppschuh eine positive Reaktion auf TM-Ertrag und N-Entzug erreicht werden. Wurde der Biogasgärrest vor der Maissaat eingearbeitet, so konnten gesteigerte N-Entzüge und TM-Erträge bei Silomais gegenüber einer Schleppschuhvariante ohne Einarbeitung gemessen werden, diese zeigten jedoch keine Signifikanz. Auch aus Ammoniakemissionsmessungen als quantitativ bedeutsamste Verlustquelle ist bekannt, dass die höchste Effizienz der Verlustreduktion von gasförmigem  $\text{NH}_3$  eine vollständige Injektion in den Boden darstellt (DOSCH und GUTSER 1995) und zwischen Breitverteilung und Schleppschlauch oftmals nur geringe, nicht signifikante Unterschiede messbar sind (MATTILA und JOKI-TOKOLA 2003, VANDRÉ, et al. 1997, MISSELBROOK, SMITH, et al. 2002). DOSCH und GUTSER (1995) zeigten jedoch zusätzlich bei einem Vergleich von breitflächiger Verteilung mit Bandapplikation zu Winterweizen während des Schossens eine Reduktion der  $\text{NH}_3$ -Verluste um ca. 37 %, wobei insgesamt die Verluste bei Bandverteilung bei ca. 23 kg N/ha lagen. Die nicht gegebenen Unterschiede zwischen Breitverteilung und Schleppschlauch sind folglich auf die beschriebene Art der Breitverteilung in Kombination mit der Ausbringung in einen wachsenden Pflanzenbestand aufgrund vermutlich höherer Absorption von  $\text{NH}_3$  (SOMMER, JENSEN und SCHØRRING 1992) sowie niedrigeren Windgeschwindigkeiten in dem Pflanzenbestand (SOMMER, OLESEN und CHRISTENSEN 1991) zurückzuführen.

Anhand der Stickstoffsteigerung des mittels Schleppschlauch applizierten Biogasgärrests lässt sich die Wirkung der Applikationstechnik vergleichen. Gegenüber Schleppschuh errechnet sich ein N-Mehraufwand bei Schleppschlauchapplikation zur Erzielung gleichwertiger TM-

Erträge von 21 %  $\text{NH}_4\text{-N}$  (19 %  $\text{N}_t$ ) bei Wintertriticale Ganzpflanzensilage und 18 %  $\text{NH}_4\text{-N}$  (16 %  $\text{N}_t$ ) bei Winterweizen. Für die mineralische Stickstoffsteigerung entsprach dies bei Wintertriticale einer zusätzlichen mineralischen Stickstoffmenge von 11,7 kg N/ha sowie 10,9 kg N/ha bei Winterweizen. Dieser Mehraufwand ist aber nicht gänzlich gleichzusetzen mit gasförmigen Verlusten, da sämtliche im Boden stattfindenden Prozesse, insbesondere Mineralisation/Immobilisation sowie Nitrifikation/Denitrifikation, eine Auswirkung auf die N-Aufnahme haben können. SØRENSEN (2004) fand bspw. gesteigerte Immobilisationsraten des applizierten  $\text{NH}_4\text{-N}$  aus Rindergülle mit steigender Einarbeitungsintensität, wobei durch Breitverteilung aufgrund der vorangegangenen gasförmigen N-Verluste überhaupt weniger N in den Boden gelangte. Dieser Effekt könnte auch stattfinden wenn durch gasförmige N-Verluste vor der Einbringung in den Boden eine Ausweitung des C/N-Quotienten des organischen Düngers auftritt. Die Wirkung einer Einarbeitung von Biogasgärrest auf Ackerland innerhalb 1 h, nach 3 h und nach 24 h auf den TM-Ertrag und N-Entzug von Silomais wurde zusätzlich geprüft. Anhand der Stickstoffsteigerung von sofort eingearbeitetem Biogasgärrest kann wiederum der Mehraufwand berechnet werden, der nötig ist um die Minderwirkung einer späteren Einarbeitung auszugleichen. Bei Einarbeitung von Biogasgärrest nach 24 h mussten um den TM-Ertrag einer sofortigen Einarbeitung zu erreichen 24 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  entsprechend 50 kg  $\text{N}_t\text{/ha}$  mehr ausgebracht werden (über Biogasgärrest welcher sofort eingearbeitet wurde). Bei Einarbeitung nach 3 h mussten 17 kg  $\text{NH}_4\text{-N/ha}$  entsprechend 36 kg  $\text{N}_t\text{/ha}$  zusätzlich ausgebracht werden.

Da in den Feldversuchen keine Verlustmessungen durchgeführt wurden, können über die Ergebnisse keine direkten Aussagen über gasförmige Verluste getroffen werden. Die Ergebnisse können aber Aussagen über die Wirkung der verwendeten Applikationstechniken liefern. Vorliegende Ergebnisse verdeutlichen, dass ein zusätzlicher Nutzen gesteigerter TM-Erträge gegenüber der verwendeten Breitverteilung je nach Düngungstermin (Schleppschuh im Frühjahr auf Getreide bzw. Einarbeitung vor Maissaat) durch verlustarme Applikationstechnik erst durch ein Einbringen des Biogasgärrests in den Boden (Schleppschuh oder Einarbeitung) gegeben war. Diese zeigten die gesteigerten TM-Erträge der Varianten mit Schleppschuh, während die Schleppschlauchapplikation hier keine Reaktion zeigte. Verlässliche Rückschlüsse auf  $\text{NH}_3$ -Verluste oder  $\text{N}_2\text{O}$ -Emissionen können hieraus jedoch nicht gezogen werden. Vielmehr können die Untersuchungen zusätzlich zu Emissionsmessungen dazu dienen, ökonomisch relevante Parameter (Reaktionen im TM-Ertrag und N-Entzug) bei betrieblichen Entscheidungen mit einbeziehen zu können.

### Herbstdüngung mit Biogasgärresten auf Acker- und Grünland

Wurden zu Wintergetreide 40 kg NH<sub>4</sub>-N/ha der gesamten Applikationsrate über Biogasgärrest bereits im Herbst appliziert (die im Herbst applizierte Menge wurde dann im Frühjahr abgezogen), so konnte bei Wintertriticale ein signifikant niedrigerer N-Entzug gemessen werden. Durch Zugabe eines Nitrifikationshemmstoffes konnte dieser Effekt wiederum aufgehoben werden, der N-Entzug dieser Variante gliederte sich zwischen der Herbstdüngung ohne NI und der gesamten Düngung zu Vegetationsbeginn ein, unterschied sich jedoch von beiden nicht signifikant. SCHRÖDER et al. (1993) konnten selbiges bei einer Herbstdüngung vor Silomais auch im TM-Ertrag messen. Der TM-Ertrag in diesen Feldversuchen zeigte weder bei Wintertriticale noch bei Winterweizen eine Reaktion auf die Verlegung der Gärrestgabe von Vegetationsbeginn in den Herbst. Die im Spätherbst gezogenen N<sub>min</sub>-Bodenproben zeigten hingegen sowohl mit als auch ohne NI-Zugabe signifikant höhere Gehalte der im Herbst gedüngten Versuchsglieder. Auch der Ammoniumgehalt dieser Varianten lag Mitte November signifikant über der ungedüngten Variante. Die NI-Zugabe erbrachte hier ca. 14 % höhere Ammoniumgehalte in 0 – 90 cm Boden als BGR ohne NI-Zugabe (keine Signifikanz). Somit ist die Gärrestgabe zu Wintergetreide durch das mit den gesteigerten N<sub>min</sub>-Bodengehalten einhergehende höhere Risiko einer Verlagerung des Stickstoffs in tiefere Schichten vorzüglich ins Frühjahr zu verlagern. Auch wenn die Möglichkeit einer Nitrifikationsverzögerung durch NI-Zugabe zu BGR besteht sollte dennoch der Vorzug auf eine Düngung im Frühjahr liegen (SCHRÖDER, et al. 1993). Wurde die Stickstoffgabe über Biogasgärrest auf Grünland komplett im Herbst appliziert, konnte gegenüber einer Applikation im Frühjahr weder im TM-Ertrag noch im N-Entzug oder Energieertrag ein signifikanter Unterschied der Herbstdüngung festgestellt werden. Dies stimmt mit Versuchsergebnissen aus der Herbstdüngung mit Rindergülle überein (DIEPOLDER und RASCHBACHER 2011). Selbst bei ausschließlicher Betrachtung des 1. Aufwuchses zeigten sich keinerlei Unterschiede im TM-Ertrag. Lediglich bei dem N-Entzug zum 1. Schnitt waren tendenziell höhere Stickstoffentzüge bei den im Herbst gedüngten Varianten an beiden Standorten zu erkennen (N-Mehrentzug 7 %, keine Signifikanz).

Generell konnte auf Grünland durch die Düngung mit Biogasgärrest nur eine geringe Ertragswirkung festgestellt werden. Bei dem Vergleich mit der mineralischen Düngung zeigte sich, dass erst ab einer mineralischen Stickstoffgabe ab 180 kg N/ha in Puch bzw. 135 kg N/ha in Bayreuth eine signifikante Reaktion im TM-Ertrag sowie N-Entzug feststellbar war. Dies führte insbesondere bei dem Vergleich der organischen Dünger bei einem N-Düngungsniveau von ca. 115 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (ca. 200 kg N<sub>t</sub>/ha) in Puch und ca. 75 – 105 kg NH<sub>4</sub>-N/ha (ca. 150 kg N<sub>t</sub>/ha) in Bayreuth zu statistisch nicht absicherbaren Ergebnissen. Die TM-Erträge

oder N-Entzüge lagen in ihren Absolutwerten teilweise knapp unter der Kontrollvariante ohne N-Düngung, sodass eine Berechnung der MDÄ nicht möglich war. Bei Betrachtung der gedüngten Varianten konnte eine Abnahme des Kleeanteils festgestellt werden. DIEPOLDER und RASCHBACHER (2008) berichten aus einem Versuch in der Nähe von Bayreuth ebenfalls von einer Verminderung des rhizobiellen Stickstoffeintrages durch abnehmenden Kleeanteil und erklären somit die schwache Ertragsreaktion der niedrig gedüngten Varianten. Ebenfalls erwähnt wird das relativ hohe Ertragspotential der Varianten ohne N-Düngung ausschließlich mit PK-Versorgung wie es auch in den vorliegenden Versuchen gegeben war. Dies kann wiederum als Hinweis für eine hohe N-Nachlieferung über den Boden oder Leguminosen der Standorte bei gesicherter PK-Düngung angesehen werden.

#### Wirkung der Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren zu Biogasgärrest auf TM-Ertrag und N-Entzug

Die Zugabe von Nitrifikationsinhibitoren zu Biogasgärrest im Frühjahr zeigte in den Versuchen stark unterschiedliche Wirkung der verschiedenen Versuchsvarianten auf TM-Ertrag und N-Entzug. Zu Wintertriticale als Ganzpflanzensilage wurden signifikant niedrigere N-Entzüge in den rein über Biogasgärrest mit PIADIN®-Zusatz gedüngten Varianten erfasst. Wurden zum Schossen des Wintertriticale zusätzlich 30 kg N/ha mineralisch gedüngt, zeigte sich der Effekt reduzierter N-Entzüge nur noch tendenziell. Der TM-Ertrag des Wintertriticale reagierte bei zusätzlicher mineralischer Düngung ebenfalls statistisch nicht signifikant auf eine NI-Zugabe. Ohne mineralische Düngung zur Schossphase wurde durch Zugabe von PIADIN® ein signifikant niedrigerer TM-Ertrag gemessen als durch Zugabe von ENTEC flüssig®. Beide unterschieden sich jedoch nicht absicherbar von der zwischen den beiden NI-Varianten gelegenen Düngung ohne NI-Zugabe. Bei ammoniumbetonter Düngung aus Biogasgärresten und Hemmung der Nitrifikation durch Nitrifikationsinhibitoren hielt vermutlich die gegenüber einer Nitraternährung reduzierte Bestockung des Ammoniums länger an (B. BAUER 2010). Bekräftigen lässt sich diese These bei einem Blick auf die Bodentemperaturen der nächstgelegenen Wetterstationen in den Einzeljahren. Während in 2009 bei einer Summe der Bodentemperatur bis acht Wochen nach Applikation von 721 °C nur leicht niedrigere N-Entzüge gemessen wurden (im Mittel der verwendeten NI 97 % gegenüber ohne NI), fiel die Reduktion im N-Entzug in 2010 und 2011 bei 509 °C bzw. 449 °C deutlich stärker aus (2010: 94 %, 2011: 93 %). Zu Winterweizen wurden auf dem leichten Standort Bayreuth ebenfalls signifikant niedrigere N-Entzüge sowohl bei einer zusätzlich zu Biogasgärrest erfolgten mineralischen Düngung von 60 kg N/ha als auch ohne zusätzliche mineralische Dün-



gung gemessen. Der TM-Ertrag zeigte diese Reaktion nicht statistisch signifikant. Auf dem lehmigen Standort in Puch konnten durch den Einsatz von NI keine signifikanten Unterschiede abgebildet werden. Zu Silomais wurde Biogasgärrest mit sowie ohne NI-Zugabe direkt vor der Maissaat sowie ca. ein Monat vor der Maissaat ausgebracht. An beiden Standorten konnten keine statistisch signifikanten Reaktionen der NI-Zugabe zu BGR auf TM-Ertrag oder N-Entzug festgestellt werden. Zu selbigem Ergebnis kommen auch ELSTE, RÜCKNAGEL und CHRISTEN (2011) in einem Gefäßversuch mit Mais. In diesem Zusammenhang muss auf die quantitativ unbedeutende und damit in vorliegender Arbeit nicht erfassbare, aber klimatisch gewichtige, Reduktion der Lachgasfreisetzung durch Zugabe von NI hingewiesen werden (HERBST, AUGUSTIN und GANS 2011).

## Literaturverzeichnis

- ALTOM, W., ROGERS, J., RAUN, W., JOHNSON, G., & TAYLOR, S. (1996). Long-term rye-wheat-ryegrass forage yields as affected by rate and date of applied nitrogen. *Journal of Production Agriculture*, S. 9: 510-516.
- AMON, T., KRYVORUCKO, V., MACHMÜLLER, A., BODIROZA, V., MILOVANOVIC, D., & AMON, B. (2006). *Optimierung der Methanausbeute aus Zuckerrüben, Silomais, Körnermais, Sonnenblumen, Ackerfutter, Getreide, Wirtschaftsdünger und Rohglyzerin unter den Standortbedingungen der Steiermark*. Universität für Bodenkultur Wien: Juni.
- APPEL, T. (1994). Relevance of soil N mineralization, total N demand of crops and efficiency of applied N for fertilizer recommendations for cereals — Theory and application. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, S. 157: 407–414.
- ARNOLD, M. (2009). *Reduction and monitoring of biogas trace compounds*. VTT RESEARCH NOTES 2496.
- ASMUS, F., LINKE, B., & DUNKEL, H. (1988). Eigenschaften und Düngerwirkung von ausgefauter Gülle aus der Biogasgewinnung. *Archiv Acker- Pflanzenbau und Bodenkunde* 32, S. 527-532.
- BAUER, B. (2010). Winterweizenanbau - Bestandesaufbau im Frühjahr auf den Sortentyp abstimmen? *Innovation*, S. 16-18.
- BAUER, C., LEBUHN, M., & GRONAUER, A. (2009). *Mikrobiologische Prozesse in landwirtschaftlichen Biogasanlagen*. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, L. (2009). *Einsatz von Gärresten aus der Biogasproduktion als Düngemittel*. Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL).
- BERG, W., & HÖRNIG, G. (1996). Wirksamere Emissionsminderung. Bietet die Ansäuerung von Gülle neue Möglichkeiten? *Landtechnik* 51.
- BIS. (2009). *GeoFachdatenAtlas des Bodeninformationssystems Bayern, Bayerisches Landesamt für Umwelt (LfU)*. Abgerufen am 25. August 2009
- BOXBERGER, J., AMON, T., & WEBER, A. (2002). *Biogasnutzung im Kontext von Agrar-, Umwelt und Energiepolitik*. Freising: 11. Jahrestagung des Fachverbandes Biogas e.V.
- BRASCHKAT, J., MANNHEIM, T., & MARSCHNER, H. (1997). Estimation of ammonia losses after application of liquid cattle manure on grassland. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, S. 160: 117-123.
- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2008). Intensivierung der Grünlandnutzung in Nordbayern. *Schule und Beratung*, S. 5-6/08 III-1-4.
- DIEPOLDER, M., & RASCHBACHER, S. (2011). *Versuchsergebnisse zur Terminierung der Güllegaben bei Grünland*. Abgerufen am 16. 11 2011 von LfL Bayern: <http://www.lfl.bayern.de/iab/gruenland/20049/>

- DITTERT, K., GOERGES, T., BLESS, H.-G., LIN, S., & SATTELMACHER, B. (1999). Stickstoffdynamik im Boden nach Gülledüngung unter besonderer Berücksichtigung der N-Pflanzenaufnahme. *Pflanzenbauwissenschaften*, S. S. 53–58.
- DOSCH, P., & GUTSER, R. (1995). Reducing N losses (NH<sub>3</sub>, N<sub>2</sub>O, N<sub>2</sub>) and immobilization from slurry through optimized application techniques. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, S. 43: 165-171.
- DWYER, L. M., ANDERSON, A. M., MA, B. L., STEWART, D., TOLLENAAR, M., & GREGORICH, E. (1994). Quantifying the nonlinearity in chlorophyll meter response to corn leaf nitrogen concentration. *Canadian Journal of Plant Science*.
- ELSÄßER, M. (2011). Düngung von Biogasgärresten unterschiedlicher Herkunft und ihre Auswirkung auf Erträge und Pflanzenbestände von Dauergrünland. *Gülle II - Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland*, S. 102 ff.
- ELSTE, B., RÜCKNAGEL, J., & CHRISTEN, O. (2011). Einfluss von Mineral-, Rohgülle- und Gärrestdüngung auf ausgewählte Bodenparameter sowie den Trockenmasseertrag von Mais (*Zea mays*). *Jahrestagung der DBG - Kommission IV: Böden verstehen - Böden nutzen - Böden fit machen*. Berlin.
- ERISMAN, J., & DRAAJERS, G. (1995). *Atmospheric deposition in relation to acidification and eutrophication*. Amsterdam: Studies in Environmental Science 63. Elsevier.
- FANGMEIER, A., HADWIGER-FANGMEIER, A., VAN DER EERDEN, L., & JÄGER, H.-J. (2003). *Effects of atmospheric ammonia on vegetation—A review*. Environmental Pollution Volume 86, 43-82.
- faostat. (2008). Abgerufen am 19. 03 2010 von <http://faostat.fao.org>
- FNR. (2010). *Fachagentur nachwachsende Rohstoffe*. Abgerufen am Mai 2011 von [www.biogasportal.info](http://www.biogasportal.info)
- FROST, J. (1994). Effect of spreading method, application rate and dilution on ammonia emission from cattle slurry. *Grass and Forest Science*, S. 49: 391 - 400.
- GERICKE, D. (2009). Measurement and modelling of ammonia emissions after field application of biogas slurries. *Dissertation, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung*.
- GRONAUER, A. (1993). Einflußfaktoren auf die Ammoniakfreisetzung aus Flüssigmist als Grundlage verfahrenstechnischer Verbesserungen. *Dissertation, TU München-Weihenstephan*.
- GRUBER, W. (2007). Biogasanlagen in der Landwirtschaft. 4. Auflage. *AID Infodienst Verbraucherschutz, Ernährung, Landwirtschaft e.V., Bonn*.
- GUTSER, R., EBERTSEDER, T., WEBER, A., SCHRAML, M., & SCHMIDHALTER, U. (2005). Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, S. 439 - 446.
- GUYOT, G. (1990). Optical Properties of Vegetation Canopies. *Steven, M.D. and Clark, J.A. (Eds.): Applications of Remote Sensing in Agriculture*, S. 19-43.

- HERBST, F., AUGUSTIN, J., & GANS, W. (2011). Die Wirkung eines Nitrifikationsinhibitors bzw. einer Strohdüngung auf die Freisetzung klimarelevanter Gase nach Gärrestapplikation. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, S. 23: 214.
- HERSENER, J.-L., MEIER, U., & DINKEL, F. (2002). *Ammoniakemissionen aus Gülle und deren Minderungsmaßnahmen unter besonderer Berücksichtigung der Vergärung*. Luzern: Amt für Umweltschutz Kanton Luzern und in Zusammenarbeit mit dem Bundesamt für Energie.
- HOFMAIR, W. (2000). DMPP - ein neuer Nitrifikationsinhibitor (Wirkstoff-Wirksamkeit-Einsatzgebiet). *Fachgruppe Boden, Fachgruppe Düngemittel und verwertbare Abfallstoffe*, S. 24.
- HOHENWARTER, U., RENETZEDER, P., & BAMBERGER, G. (2006). Endbericht des Projektes Brennstoffzellen-Blockheizkraftwerk für anaerobes Biogas. *Institut für Wärmetechnik, Graz (IWT)*.
- HORLACHER, D., & MARSCHNER, H. (1990). Schätzrahmen zur Beurteilung von Ammoniakverlusten nach Ausbringung von Rinderflüssigmist. *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, S. 153: 107–115.
- HUIJSMANS, J., HOL, J., & VERMEULEN, G. (2003). Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. *Atmospheric Environment* 17, S. 3669 - 3680.
- JÄCKEL, K., & MAU, S. (1998). *Landwirtschaftliche Biogaserzeugung und Verwertung*. Beratungsunterlagen Freistaat Sachsen.
- JÄKEL, K., & MAU, S. (1999). Umweltwirkung von Biogasgüllen., (S. 51-53). Dresden.
- JENKINSON, D., FOX, R., & RAYNER, J. (1985). Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen—the so-called ‘priming’ effect. *Journal of Soil Science. European Journal of Soil Science*, S. 36: 425–444.
- JORGENSEN, U., & PETERSEN, B. M. (2006). Interactions between biomass energy technologies and nutrient and carbon balances at the farm level. *12th Ramiran International conference; Technology for Recycling of Manure and Organic Residues in a Whole-Farm Perspective. Vol. I*, (S. 49-54). Denmark - Tjele.
- JUNGBLUTH, T., BÜSCHER, W., & KRAUSE, M. (2005). *Technik Tierhaltung*. Stuttgart: Eugen Ulmer.
- KATZ, P. (1996). *Ammoniakemissionen nach der Gülleanwendung auf Grünland*. Dissertation., ETH Zürich.
- KIRCHMANN, H., & WITTER, E. (1989). Ammonia volatilisation during aerobic and anaerobic manure decomposition. *Plant and Soil* 115, S. 34-41.
- KORIATH, H., HERRMANN, V., VOLLMER, G., & FRANZ, J. (1985). Nährstoffdynamik während der anaeroben Fermentation von Gülle und Wirkung auf den Ertrag und Inhaltsstoffe von Mais im Gefäßversuch. *Archiv Acker- Pflanzenbau und Bodenkunde* 29, S. 741-747.
- KUHN, E., & DÖHLER, H. (1993). Bewertung ökologischer Aspekte der Biogasgewinnung. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft.

- KUZYAKOV, Y., FRIEDEL, J. K., & STAHR, K. (2000). Review of mechanisms and quantification of priming effects. *Soil Biology & Biochemistry*, S. 32: 1485 - 1498.
- KUZYAKOV, Y., FRIEDEL, J. K., & STAHR, K. (2010). Priming effects: Interactions between living and dead organic matter. *Soil Biology & Biochemistry*, S. 42: 1363 - 1371.
- LEICK, B. C. (2003). *Emission von Ammoniak (NH<sub>3</sub>) und Lachgas (N<sub>2</sub>O) von landwirtschaftlich genutzten Böden in Abhängigkeit von produktionstechnischen Maßnahmen*. Dissertation, Hohenheim.
- LfL. (2009). *Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) Agrarmeteorologisches Messnetz*. Abgerufen am 25. August 2009 von <http://www.wetter-by.de>
- LIN, S., DITTERT, K., WU, W.-L., & SATTELMACHER, B. (April 2004). Added nitrogen interaction as affected by soil nitrogen pool size and fertilization – significance of displacement of fixed ammonium. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, S. 138 - 146.
- LOEHR, R. C. (1977). *Pollution Control for Agriculture*. New York: Academic Press.
- MAIDL, F.-X., STICKSEL, E., & VALTA, R. (1999). Pflanzenbauwissenschaften, 1999, ISSN 1431-8857, Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart. *Untersuchungen zur verbesserten Gülleverwertung im Maisanbau. 1. Mitteilung: Verwertung von Güllestickstoff durch Silo- und Körnermais bei unterschiedlichen Applikationsverfahren*, S. 9–16.
- MANNHEIM, T. (1994). *Ammoniakemissionen von landwirtschaftlichen Nutzflächen: Quellen und Minderungsmaßnahmen*. . Dissertation.
- MATTILA, P., & JOKI-TOKOLA, E. (2003). Effect of treatment and application technique of cattle slurry on its utilization by ley: I. Slurry properties and ammonia volatilization. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, S. 65: 221-230.
- MEISSNER, P. (2004). *Analyse und Bewertung des Emissionsverhaltens eines einstreulosen Mastschweinestalles mit Spülmistung im Vergleich zu Güllelagerung im Stall*. Göttingen: Cuvillier Verlag.
- MESSNER, H. (1988). Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle. *Diss. an der TU München-Weihenstephan, Lehrstuhl für Pflanzenernährung*.
- MISSELBROOK, T., NICHOLSON, F., & CHAMBERS, B. (2005). Predicting ammonia losses following the application of livestock manure to land. *Bioresource Technology*, S. 96: 159-168.
- MISSELBROOK, T., SMITH, K., JOHNSON, R., & PAIN, B. (2002). SE—Structures and Environment: Slurry Application Techniques to reduce Ammonia Emissions: Results of some UK Field-scale Experiments. *Biosystems Engineering*, S. Volume 81, Issue 3, 313-321.
- MISTELE, B., GUTSER, R., & SCHMIDHALTER, U. (2004). Validation of field-scaled spectral measurements of the nitrogen status in winter wheat. *Program book of the joint conference ICPA, Minneapolis*, S. 1187-1195.

- MOAL, J., MARTINEZ, J., GUIZIOU, F., & COSTE, C. (1995). Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. *Journal of Agricultural Science*, S. 125: 245-252.
- MÖLLER, K., LEITHOLD, G., WEISKE, A., MICHEL, J., SCHNELL, S., & STINNER, W. (2006). Auswirkung der Fermentation biogener Rückstände in Biogasanlagen auf Flächenproduktivität und Umweltverträglichkeit im Ökologischen (Endbericht: DBU – AZ 15074). *Justus-Liebig-Universität Giessen, Professur für organischen Landbau*.
- MÖLLER, K., SCHULZ, R., & MÜLLER, T. (2010). Effects of setup of centralized biogas plants on crop acreage and balances of nutrients and soil humus. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, S. 303 - 312.
- MÖLLER, K., SCHULZ, R., & MÜLLER, T. (2010). Substrate inputs, nutrient flows and nitrogen loss of two centralized biogas plants in southern Germany. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 89, S. 303 - 312.
- Müller-Langer F., R. S. (2009). Erdgassubstitute aus Biomasse für die mobile Anwendung im zukünftigen Energiesystem. S. 10 f.
- NI, K., PACHOLSKI, A., GERICKE, D., & KAGE, H. (2012). Analysis of ammonia losses after field application of biogas slurries by an empirical model. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, S. 175: 253–264.
- NIEDER, R., HARDEN, T., MARTENS, R., & KUMAR BENBI, D. (2008). Microbial biomass in arable soils of Germany during the growth period of annual crops. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, S. 171: 878–885.
- NIEDER, R., NEUGEBAUER, E., WILLENBOCKEL, A., & RICHTER, J. (1995a). Die Rolle der mikrobiellen Biomasse und des mineralisch fixierten Ammoniums bei den Stickstoff-Transformationen in niedersächsischen Löß-Ackerböden unter Winterweizen. I. Poolgrößenveränderungen. *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, S. 158, 469–475.
- PAIN, B. F., PHILLIPS, V. R., CLARKSON, C. R., & KLARENBEEK, J. V. (1989). Loss of Nitrogen through Ammonia Volatilisation during and following the Application of Pig or Cattle Slurry to Grassland. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, S. 47: 1-12.
- PAIN, B., MISSELBROOK, T., CLARKSON, C., & REES, Y. (1990). Odour and ammonia emissions following the spreading of anaerobically-digested pig slurry on grassland. *Biological Wastes Volume 34, Issue 3*, S. 259-267.
- PESTA, G., & MEYER-PITTROFF, R. (2002). *Gärprozess: Bakterien lieben es warm und nicht zu sauer*. Münster: Landwirtschaftsverlag GmbH: TOP AGRAR (Hrsg.): Fachbuch Biogas - Strom aus Gülle und Biomasse.
- PÖTSCH, E. (2004). *Nährstoffgehalt von Gärrückständen aus landwirtschaftlichen Biogasanlagen und deren Einsatz im Dauergrünland*. Abschlussbericht.
- QUAKERNACK, R., TECHOW, A., HERRMANN, A., TAUBE, F., KAGE, H., & PACHOLSKI, A. (2010). Ammonia volatilization after application of digested biogas slurries in a coastal marsh region of northern Germany. *Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Institute of Crop Science and Plant Breeding*.

- R.B., T., PAIN, B., & J.Y., R. (1990). Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland. II. Influence of application rate, wind speed and applying slurry in narrow bands. *Plant and Soil Science*, S. 125(1): 119-128.
- RASI, S. (2009). Biogas Composition and Upgrading to Biomethane. *Jyväskylä studies in biological and environmental science* 202.
- RAUN, W., & JOHNSON, G. (1999). Improving Nitrogen Use Efficiency for Cereal Production. *Agronomy Journal*, S. 91: 357 - 363.
- REINHOLD, G., & ZORN, W. (2008). Eigenschaften und Humuswirkung von Biogasgülle. *Klimaschutz und Bioenergie, Kongressband 2008*.
- REITZ, P., & KUTZBACH, H. D. (1998). Ammoniakemissionen nach der Flüssigmistausbringung. Einfluss verschiedener Flüssigmistvorbehandlungen. *Landtechnik* 53.
- REUSCH, S., & HEEGE, H. (1995). Berührungslose Messung des Stickstoffbedarfs von Kulturpflanzen. 53. *Internationale Tagung Landtechnik, Braunschweig*, S. p. 194ff.
- ROSCHKE, M., & PLÖCHL, M. (2007). Eigenschaften und Zusammensetzung der Gärreste. *Biogas in der Landwirtschaft: Leitfaden für Landwirte im Land Brandenburg*, S. 36-39.
- SCHIEDER, D., GRONAUER, A., LEBUHN, M., BAYER, K., BECK, J., HIEPP, G., & BINDER, S. (2010). *Prozessmodell Biogas*. Freising: Arbeitsgemeinschaft Landtechnik und landwirtschaftliches Bauwesen in Bayern e.V.
- SCHRÖDER, J. J., HOLTE, L., KEULEN, H., & STEENVOORDEN, J. H. (1993). Effects of nitrification inhibitors and time and rate of slurry and fertilizer N application on silage maize yield and losses to the environment. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, S. 34: 267-277.
- SCHRÖDER, J., JANSEN, A., & HILHORST, G. (2005). Long-term nitrogen supply from cattle slurry. *Soil Use and Management*, S. 21: 196-204.
- SCHÜLLER, H. (1969). Die CAL-Methode, eine neue Methode zur Bestimmung des pflanzenverfügbaren Phosphates in Böden. *Z. Pflanzenernähr., Bodenkd.* 123, S. 48-63.
- SCHULZ, H., & EDER, B. (2001). *Biogas-Praxis: Grundlagen, Planung, Anlagenbau*. Staufen: Ökobuch Verlag.
- SEIGNER, L. (2009). Das Hygienisierungspotenzial des Biogasprozesses im Hinblick auf phytopathogene Schaderreger. Freising: Vortrag im Rahmen der Kolloquienreihe der LfL-Institute im Winterhalbjahr 2008/2009.
- SMITH, K., JACKSON, D., MISSELBROOK, T., PAIN, B., & JOHNSON, R. (2000). Reduction of ammonia emission by slurry application techniques. *Journal of Agricultural Engineering Research*, S. 77: 277-287.
- SOMMER, S., & OLESEN, J. (2000). Modelling ammonia volatilization from animal slurrytrailing hose applied to cereals. *Atmospheric Environment* 34, S. 2361 - 2372.
- SOMMER, S., JENSEN, E., & SCHØRRING, J. (1992). Leaf absorption of gaseous ammonia after application of pig slurry on sand between rows of winter wheat. *Air Pollution*

- Research Report 39. Commission of the European Communities, Bruxelles, Belgium., S. 395-402.*
- SOMMER, S., OLESEN, J., & CHRISTENSEN, B. (1991). Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface-applied cattle slurry. *J. Agric. Sci.*, S. 117: 91-100.
- SØOGAARD, H., SOMMER, S., HUTCHINGS, N., HUIJSMANS, J., BUSSINK, D., & NICHOLSON, F. (2002). Ammonia volatilization from field-applied animal slurry - the ALFAM model. *Atmospheric Environment* 36, S. 3309 - 3319.
- SØRENSEN, P. (2004). Immobilisation, remineralisation and residual effects in subsequent crops of dairy cattle slurry nitrogen compared to mineral fertiliser nitrogen. *Plant and Soil*, S. 267: 285-296.
- SVOBODA, N., WIENFORTH, B., MEHRTENS, H., KAGE, H., TAUBE, F., & HERRMANN, A. (2009). Grundwasserbelastung durch Biogas? 53. Jahrestagung der Arbeitsgemeinschaft für Grünland und Futterbau (AGGF) der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V.
- TECHOW, A., QUAKERNACK, R., PACHOLSKI, A., KAGE, H., TAUBE, F., & HERRMANN, A. (2011). Biogas-Expert: Kurzfristige N-Düngewirkung von Biogas-Gärresten verschiedener Biogasproduktionssysteme auf einem Marschstandort. *Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss.*, S. 23: 35-36.
- THOMASON, W., RAUN, W., JOHNSON, G., PHILLIPS, S., & WESTERMAN, R. (1998). Winter wheat nitrogen use efficiency in grain and Forage Production Systems. *M.S. thesis. Oklahoma State Univ., Stillwater.*
- UBA. (2002). *Luftreinhaltung 2010 Nationales Programm zur Einhaltung von Emissionshöchstwerten für bestimmte Luftschadstoffe nach der Richtlinie 2001/81/EG (NEC-RL)*. Berlin: Umweltbundesamt, Texte 37/02 ISSN 0722-186X.
- v. TUCHER, S., FOU DA, S., LICHTI, F., & SCHMIDHALTER, U. (2011). Kurz- und längerfristige Stickstoffwirkung nicht separierter und separierter Biogasgärreste zu Weidelgras nach einmaliger und wiederholter Ausbringung. *Gülle 11 Gülle- und Gärrestdüngung auf Grünland*, (S. 43 - 47). Kloster Reute.
- VANDRÉ, R., CLEMENS, J., GOLDBACH, H., & KAUPENJOHANN, M. (1997). NH<sub>3</sub> and N<sub>2</sub>O Emissions after Landspreading of Slurry as Influenced by Application Technique and Dry Matter-Reduction. I. NH<sub>3</sub> Emissions. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, S. Volume 160 Issue 2: 303-307.
- VDLUFA. (1. Auflage 2000, 1. Ergänzungslieferung 2008). VDLUFA-Methodenhandbuch Band II.2: Die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngern, Kultursubstraten und Bodenhilfsstoffen. . Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- VDLUFA. (4.Auflage 1995, 4. Ergänzungslieferung 2008). VDLUFA-Methodenhandbuch Band II.1: Die Untersuchung von Düngemitteln. Darmstadt: VDLUFA-Verlag.
- VETTER A., N. A. (2007). Schriftenreihe "Nachwachsende Rohstoffe" Band 31. S. 55 f.



- WEILAND, P. (2004). Biogas – eine neue Einkommensquelle für die Landwirtschaft. *Forschungsreport. Verbraucherschutz – Ernährung – Landwirtschaft. Agrartechnik. (Heft 29)*, S. 16-19.
- WENDLAND, M. (2009). Einsatz als Dünger und Inverkehrbringen der Gärrückstände. *Biogashandbuch Bayern - Materialienband Kap. 2.2.7*, S. 4 f.
- WILLMS, M., HUFNAGEL, J., REINICKE, F., WAGNER, B., & v. BUTTLAR, C. (2009). Energiepflanzenanbau – Wirkungen auf Humusbilanz und Stickstoffhaushalt. *Deutsche Bodenkundliche Gesellschaft - "Böden - eine endliche Ressource"*. Bonn.
- WULF, S., MAETING, M., & CLEMENS, J. (2002). Application technique and slurry co-fermentation effects on ammonia, nitrous oxide, and methane emissions after spreading: I. Ammonia volatilization. *J. Environ. Qual.* , S. 31:1789-1794.
- ZETHNER, G., PFUNDTNER, E., & HUMER, J. (2002). *Qualität von Abfällen aus Biogasanlagen*. Wien: Umweltbundesamt.
- ZIADI, N., BRASSARD, M., BELANGER, G., CAMBOURIS, A., TREMBLAY, N., NOLIN, M., PARENT, L.-E. (2008). Critical Nitrogen Curve and Nitrogen Nutrition Index for Corn in Eastern Canada. *Agronomy Journal Volume 100, Issue 2*.

## Anhang

- i) *Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge von Wintertriticale GPS (V548) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
43	192,01	A	228,63	CDEF
45	191,75	AB	245,2	ABC
23	189,88	ABC	239,96	BCD
31	187,64	ABCD	247,44	AB
46	186,39	ABCD	233,9	BCDE
19	185,87	ABCD	259,24	A
17	184,26	ABCDE	225,88	DEF
42	182,57	ABCDEF	204,41	GHIJ
22	182,4	ABCDEF	227,17	DEF
18	181,23	BCDEFG	227,75	CDEF
30	180,97	CDEFG	221,28	EFG
21	180,8	CDEFG	204,78	GHI
44	180,54	CDEFGH	222,02	DEFG
33	179,85	CDEFGHI	204,08	GHIJ
27	179	DEFGHI	213,79	FGH
29	177,08	DEFGHIJ	202,91	HIJ
26	174	EFGHIJK	201,98	HIJK
16	173,55	FGHIJKL	192,5	IJKLM
25	173,4	FGHIJKLM	191,12	IJKLM
3	171,07	GHIJKLMN	184,53	KLMNO
41	170,94	GHIJKLMNO	177,33	MNOP
20	170,1	HIJKLMNOP	180,08	LMNOP
9	169,77	IJKLMNOP	204,78	GHI
32	169,76	IJKLMNOP	196,14	HIJKL
8	169,75	IJKLMNOP	178,83	LMNOP
12	168,14	JKLMNOPQ	175,92	MNOPQ
37	166,56	JKLMNOPQ	177,78	MNOP
28	164,43	KLMNOPQR	186,48	JKLMN
1	164,1	KLMNOPQR	176,02	MNOPQ
39	163,58	KLMNOPQRS	171,04	NOPQR
34	163	LMNOPQRST	158,47	QRST
36	162,82	MNOPQRST	157,81	RST
24	162,48	NOPQRST	164,94	PQRS
15	160,31	OPQRSTU	172,23	NOPQR
2	159,87	PQRSTUV	164,45	PQRS
35	157,61	QRSTUV	148,83	STU
6	154,62	RSTUV	171,67	NOPQR
38	153,99	RSTUV	145,38	TU
5	153,21	STUV	169,83	NOPQR
14	152,82	TUV	143,33	TU
7	150,39	VWX	158,83	QRST
4	149,48	VW	166,78	OPQRS
11	139,86	WX	137,26	V
13	136,65	X	131,94	V
10	134,61	X	138,25	V
40	108,19	Y	95,19	V

ii) Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge von Winterweizen (V549) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
17	89,96	A	155,38	BCD
34	89,52	A	149,2	CDEF
47	89,52	A	156,78	BC
18	89,15	AB	162,03	B
49	88,81	AB	175,93	A
36	88,16	AB	145,83	CDEFGH
30	87,42	ABC	153	BCDE
48	87,18	ABC	164,87	AB
22	86,96	ABC	147,83	CDEFG
21	86,72	ABC	141,36	EFGHI
33	86,49	ABC	135,46	GHIJK
16	85,89	ABCD	139,55	FGHIJ
46	85,8	ABCD	142,87	DEFGHI
35	84,61	ABCDE	134,32	HIJK
29	84,33	ABCDE	135,14	GHIJK
20	84,15	ABCDEF	131,65	IJK
26	82,89	ABCDEF	124,37	KLM
28	82,55	ABCDEF	123,2	KLM
45	82,07	ABCDEF	126,9	JKL
42	81,77	ABCDEF	124,23	KLM
40	80,97	BCDEFG	123,73	KLM
15	79,83	CDEFG	124,14	KLM
25	79,38	CDEFGH	114,89	LMN
24	78,1	DEFGHI	114,69	LMN
19	76,88	EFGHIJ	111,68	MNO
9	75,99	FGHIJ	103,34	NOPQ
44	75,96	FGHIJ	107,2	NOP
27	73,45	GHIJK	101,25	OPQ
8	73,06	GHIJKL	97,82	PQR
23	71,38	HIJKLM	97,36	PQR
14	70,49	IJKLM	99,69	OPQR
3	70,4	IJKLM	100,83	OPQ
4	70,2	IJKLM	97,84	PQR
6	70,13	IJKLM	99,63	OPQR
11	69,92	IJKLM	98,93	OPQR
10	69,89	IJKLM	98,76	PQR
5	68,96	JKLM	95,88	PQRS
37	67,49	KLM	87,68	RST
1	67,27	KLM	93,3	QRS
7	67,05	KLM	90,93	QRST
41	65,41	KLMN	87,93	RST
2	65,11	LMN	90,71	QRST
38	64,78	LMN	83,27	STUV
39	63,6	MN	83,33	STUV
13	63,18	MN	84,18	STU
12	58,74	NO	80,16	TUV
32	57,85	NO	72,98	VW
31	54,04	O	70,84	V
43	43,54	P	54,33	W

iii) Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge von Winterweizen (V549) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; *t*-Test  $p \leq 0,05$ );

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
22	95,72	A	175,62	ABC
48	94,56	AB	183,58	AB
49	93,78	ABC	188,98	A
17	92,92	ABC	167,63	BCDEF
18	92,74	ABC	174,11	ABCD
36	92,63	ABC	171,36	BCDE
47	92,06	ABC	166,28	CDEFGH
21	92,01	ABC	166,68	BCDEFG
30	91,82	ABCD	177,87	ABC
16	91,56	ABCDE	163,16	CDEFGHIJ
46	90,95	ABCDEF	157,63	DEFGHIJK
20	90,51	ABCDEFG	149,43	HIJKLMN
34	90,07	ABCDEFGH	163,32	CDEFGHIJ
29	89,99	ABCDEFGH	165,33	CDEFGHI
28	89,54	ABCDEFGHI	154,74	EFGHIJKL
40	89,07	ABCDEFGHIJ	148,14	JKLMN
15	88,53	ABCDEFGHIJK	145,17	KLMNO
35	88,37	ABCDEFGHIJK	151,48	FGHIJKLM
42	88,3	ABCDEFGHIJK	150,12	GHIJKLM
26	88,01	ABCDEFGHIJKL	155,95	EFGHIJKL
24	86,73	BCDEFGHIJKLM	136,79	MNOPQR
25	86,72	BCDEFGHIJKLM	143,2	KLMNOP
45	86,62	BCDEFGHIJKLM	140,32	LMNOPQ
9	86,38	BCDEFGHIJKLM	130,85	OPQRS
33	85,88	CDEFGHIJKLM	149,23	IJKLMN
19	85,39	CDEFGHIJKLMN	130,08	OPQRS
27	83,58	DEFGHIJKLMNO	130,87	OPQRS
14	83,31	EFGHIJKLMNO	125,92	QRSTU
23	83,02	FGHIJKLMNO	118,25	STUVW
3	82,86	FGHIJKLMNO	117,83	STUVW
6	82,24	GHIJKLMNOP	132,69	NOPQRS
11	81,74	HIJKLMNOP	112,68	TUVWX
4	81,68	HIJKLMNOP	126,79	PQRST
5	81,25	IJKLMNOP	126,5	PQRSTU
44	80,78	JKLMNOP	121,43	RSTUV
38	80,37	KLMNOP	110,88	TUVWXY
8	80,23	KLMNOP	112,24	TUVWX
1	79,79	LMNOPQ	108,72	VWXY
37	79,65	LMNOPQ	111,51	TUVWXY
39	79,65	LMNOPQ	107,8	VWXY
10	79,64	LMNOPQ	117,76	STUVW
2	79,59	MNOPQ	109,78	VWXYZ
13	77,02	NOPQR	104,22	WXY
7	76,68	OPQR	110,3	TUVWXY
12	74,39	PQR	99,58	XY
32	71,57	QR	97,08	XY
31	70,03	R	95,04	YZ
43	58,92	S	79,24	Z

iv) Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieertrag von Silomais (V551) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping	Energieertrag (GJ NEL/ha)	t-Grouping
25	135,15	A	133,71	BC	90,43	AB
34	134,6	AB	156,59	A	91,08	A
33	132,23	ABC	149,07	AB	88,88	ABCD
23	131,67	ABCD	134	BC	89,23	ABC
24	131,31	ABCD	126,88	CDE	89,2	ABC
21	130,85	ABCD	125,03	CDEF	89,23	ABC
22	130,47	ABCD	128,73	CD	87,77	ABCDE
31	129,01	ABCDE	131,08	BC	87,73	ABCDE
32	128	ABCDEF	132,28	BC	86,59	ABCDEF
13	126,58	ABCDEFG	109,58	EFG	86,67	ABCDEF
7	125,48	ABCDEFGH	111,84	DEFG	85,45	ABCDEFG
15	125,13	ABCDEFGH	108,87	EFG	85,34	ABCDEFG
11	123,7	ABCDEFGH	102,69	GH	84,32	ABCDEFGH
12	123,48	BCDEFGHI	108,3	EFG	84,63	ABCDEFG
26	123,09	CDEFGHI	110,48	DEFG	84,48	ABCDEFGH
30	122,59	CDEFGHI	109,79	DEFG	82,1	ABCDEFGH
27	122,17	CDEFGHI	104,1	GH	82,93	ABCDEFGH
14	122,03	CDEFGHI	111,05	DEFG	82,16	ABCDEFGH
18	121,32	CDEFGHI	106,42	FGH	82,28	ABCDEFGH
5	121,06	CDEFGHI	101,59	GH	82,18	ABCDEFGH
16	121,01	CDEFGHI	100,02	GH	81,42	BCDEFGHI
10	120,56	DEFGHI	101,43	GH	82,13	ABCDEFGH
3	118,64	EFGHIJ	96,6	GH	80,38	CDEFGHIJ
17	118,28	EFGHIJ	95,45	GHI	79,84	DEFGHIJ
9	117,54	FGHIJ	101,55	GH	79,46	EFGHIJ
20	115,63	GHIJ	101,97	GH	77,06	GHIJ
19	115,61	GHIJ	95,5	GHI	78,38	FGHIJ
1	114,72	HIJ	98,19	GH	77,68	FGHIJ
6	112,15	IJ	94,45	GHIJ	75,43	HIJK
29	109	JK	94,21	GHIJ	72,74	IJKL
2	107,24	JK	88,78	HIJK	72,16	JKLM
8	98,25	KL	77,34	IJK	66,94	KLM
28	94,06	L	73,05	K	63,21	M
4	93,96	L	75,34	JK	64,21	LM

v) *Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieertrag von Silomais (V551) im Mittel der Jahre 2010 – 2011 am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping	Energieertrag (GJ NEL/ha)	t-Grouping
34	213,3	A	234,08	A	147,41	A
23	200,41	AB	211,13	AB	136,84	ABC
22	199,85	ABC	198,49	BCD	137,14	AB
33	198,24	ABC	203,04	ABC	134,16	ABCD
21	196,72	ABCD	182,38	BCDEFG	133,3	ABCDE
25	195,04	ABCDE	189,01	BCDEF	134,43	ABCD
32	193,78	ABCDE	192,15	BCDE	131,94	ABCDEF
20	192,51	ABCDEF	172,68	CDEFGHIJ	131,74	ABCDEF
5	186,93	BCDEFG	174,49	CDEFGHI	129,04	ABCDEFG
1	183,54	BCDEFG	164,74	FGHIJKL	126,16	BCDEFGH
9	183,15	BCDEFG	156,11	FGHIJKLMN	123,59	BCDEFGHI
17	182,82	BCDEFG	163,8	FGHIJKL	124,69	BCDEFGH
31	182,48	BCDEFG	179,95	BCDEFGH	123,98	BCDEFGHI
14	182,37	BCDEFG	166,78	DEFGHIJKL	124,45	BCDEFGH
12	180,18	BCDEFGH	168,65	DEFGHIJK	121,4	BCDEFGHIJ
24	180,18	BCDEFGH	163,94	FGHIJKL	122,03	BCDEFGHI
11	179,89	BCDEFGH	169,79	CDEFGHIJK	122,74	BCDEFGHI
15	179,45	BCDEFGH	165,73	DEFGHIJKL	121,21	BCDEFGHIJ
3	178,08	BCDEFGHI	154,24	GHIJKLMNO	122,96	BCDEFGHI
7	176,92	BCDEFGHIJ	162,31	FGHIJKL	120,4	BCDEFGHIJ
18	174,59	BCDEFGHIJ	162,89	FGHIJKL	118,38	BCDEFGHIJ
6	174,32	BCDEFGHIJ	149,1	GHIJKLMNOP	117,28	BCDEFGHIJK
29	174	CDEFGHIJ	148,75	HIJKLMNOP	119,38	BCDEFGHIJ
27	171,42	DEFGHIJK	149,93	GHIJKLMNOP	116,33	DEFGHIJK
16	170,35	FGHIJK	157,89	FGHIJKLMN	115,11	DEFGHIJK
30	169,77	FGHIJK	160,03	FGHIJKLM	116,99	CDEFGHIJK
2	169,44	FGHIJK	156,46	FGHIJKLMN	116,29	DEFGHIJK
19	167,52	FGHIJK	146,04	IJKLMNOPQ	113,96	FGHIJKL
13	167,37	FGHIJK	144,8	IJKLMNOPQR	112,08	FGHIJKLM
10	165,3	GHIJKL	139,35	JKLMNOPQR	111,79	GHIJKLM
8	155,28	HIJKLM	138,9	KLMNOPQR	107,05	HIJKLMN
26	154,72	HIJKLM	133,84	LMNOPQR	104,2	IJKLMNO
36	152,23	IJKLM	127,18	MNOPQR	97,81	KLMNO
4	151,04	JKLM	121,85	OPQR	101,86	JKLMNO
35	145,86	KLM	125,11	NOPQR	94,15	LMNO
37	140,45	LM	119,01	PQR	89,19	NO
28	135,74	M	111,75	R	92,4	MNO
38	131,16	M	113,95	QR	84,86	O

vi) Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieertrag von Grünland (V553) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz;  $t$ -Test  $p \leq 0,05$ );

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping	Energieertrag (GJ NEL/ha)	t-Grouping
13	109,56	A	244,97	A	66,1	A
12	103,14	AB	231,13	AB	62,38	AB
19	100,17	BC	223,83	ABCDE	59,32	BC
11	99,65	BCD	206,97	CDEFGH	59,58	BC
21	98,93	BCDE	240,92	A	59,6	BC
20	98,33	BCDEF	225,5	ABC	59,17	BCD
15	98,07	BCDEFG	211,13	BCDEFG	58,13	BCDE
24	96,66	BCDEFGH	224,95	ABCD	58,45	BCDE
23	95,71	BCDEFGHI	212,7	BCDEF	57,23	BCDEF
9	93,73	CDEFGHIJ	203	EFGH	56,25	CDEFG
14	92,46	CDEFGHIJK	199,58	FGH	55,24	CDEFGH
6	92,45	CDEFGHIJK	202,19	EFGH	55,58	CDEFG
18	91,7	CDEFGHIJK	201,2	FGH	55,01	CDEFGH
1	91,18	DEFGHIJK	203,69	DEFGH	55,19	CDEFGH
22	90,55	EFGHIJK	200,68	FGH	53,88	EFGH
7	89,83	FGHIJK	192,38	FGHI	54,48	CDEFGH
3	89,58	GHIJK	201,99	FGH	54	DEFGH
5	88,98	HIJK	200,11	FGH	53,38	EFGH
2	88,97	HIJK	195,53	FGH	53,39	EFGH
10	87,31	IJKL	189,44	GHI	52,49	FGHI
4	86,7	JKL	185,29	HI	51,43	GHI
25	85,56	JKL	190,6	GHI	51,6	GHI
17	84,87	KL	186,98	HI	50,23	HI
16	83,93	KL	188,32	HI	50,1	HI
8	79,75	L	170,88	I	47,58	I

vii) *Trockenmasseerträge, Stickstoffentzüge und Energieertrag von Grünland (V552) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping	Energieertrag (GJ NEL/ha)	t-Grouping
21	148,36	A	412,77	A	96,03	A
20	145,22	A	392,32	A	92,88	AB
13	139,63	AB	390,18	A	90,72	ABC
12	130,73	BC	358,15	B	84,75	BCD
19	129,62	BC	327,88	C	82,88	CDE
11	122,58	CD	316,47	CD	79,32	DEF
5	120,53	CDE	307,88	CDEF	77,4	DEFG
14	120,05	CDEF	306,03	CDEF	76,84	DEFG
15	119,78	CDEF	308,61	CDE	76,88	DEFG
2	115,96	DEFG	290,14	DEFGH	74,77	EFG
1	115,22	DEFG	298,68	DEFG	74,89	EFG
4	113,7	DEFGH	299,55	CDEFG	73,16	FGH
9	113,31	DEFGH	299,55	CDEFG	73,88	FGH
7	112,87	DEFGH	292,65	DEFGH	73,44	FGH
18	112,83	DEFGH	283,81	EFGH	72,48	FGH
8	112,57	DEFGH	294,58	DEFGH	73,56	FGH
6	112,54	DEFGH	300,03	CDEFG	73,35	FGH
24	111,53	DEFGH	296,45	DEFGH	72,47	FGH
22	109,65	DEFGH	285,16	EFGH	71,43	FGHI
10	108,83	EFGH	289,75	DEFGH	71,43	FGHI
17	108,82	EFGH	280,21	EFGH	70,04	GHI
25	108,3	EFGH	280,84	EFGH	70,32	GHI
3	107,7	EFGH	269,17	H	69,51	GHI
23	107,38	FGH	279,43	FGH	69,98	GHI
26	106,03	GH	271,2	GH	63,23	I
16	100,8	H	282,22	EFGH	65,75	HI



viii) *Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge des ortsfesten Fruchtfolgeversuches (V554) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Puch (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
11	223,09	A	262,74	AB
12	222,67	A	290,43	A
20	219,3	AB	286,33	A
10	209,84	ABC	233,08	ABCD
18	206,31	ABC	221,21	BCDE
19	205,89	ABC	245,14	ABC
14	196,99	ABCD	198,58	CDEF
9	196,15	BCD	193,57	CDEFG
4	190,4	CDE	173,48	DEFGH
13	189,54	CDE	189,12	CDEFGH
2	188,71	CDE	175,27	DEFGH
5	185,31	CDE	163,14	EFGH
1	176,73	DEF	161,93	EFGH
8	176,35	DEF	163,02	EFGH
17	175,7	DEF	167,72	EFGH
7	171,68	DEF	156,41	FGH
6	164,33	EFG	140,42	FGHI
16	155,54	FG	134,37	GHI
3	145,36	G	128,88	HI
15	112,05	H	90,5	I

ix) *Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge des ortsfesten Fruchtfolgeversuches (V554) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Bayreuth (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
11	142,15	A	148,68	ABCD
20	141,03	A	175,06	A
19	140,56	A	161,38	AB
12	139,31	AB	159,46	ABC
14	136,08	AB	130,27	ABCDEF
18	131,84	AB	137,79	ABCDE
10	131,36	AB	124,22	BCDEFG
13	127,93	ABC	114,94	BCDEFG
9	125,61	ABCD	115,83	BCDEFG
5	125,54	ABCD	111,67	CDEFG
17	123,6	ABCD	114,07	BCDEFG
2	123,02	ABCD	101,03	DEFGH
8	118,45	ABCD	102,73	DEFG
1	116,92	ABCD	101,83	DEFGH
4	109,96	BCD	94,29	EFGH
16	109,84	BCD	89,18	EFGH
7	109,72	BCD	94,98	EFGH
6	99,49	CD	82,93	FGH
3	95,58	DE	78,92	GH
15	68,09	E	53,14	H

x) *Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge des ortsfesten Fruchtfolgeversuches (V554) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Landsberg am Lech (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
20	191,73	A	250,64	A
12	191,3	A	236,7	AB
19	187,85	A	218,09	ABC
11	183,61	AB	208,87	BC
10	173,31	BC	187,83	CDE
18	172,16	BC	193,98	CD
14	166,18	CD	185,41	CDE
17	164	CDE	183,13	CDEF
13	157,52	DEF	167,64	DEFG
5	155,75	DEF	163,03	DEFG
2	149,98	EF	150,7	EFG
16	149,51	F	157,59	DEFG
8	148,85	FG	155,31	EFG
9	148,46	FG	158,38	DEFG
4	147,84	FG	145,78	FG
7	145,84	FG	145,58	FG
1	134,54	GH	135,96	G
6	129,91	H	130,28	G
3	128,69	H	134,18	G
15	95,34	I	90,13	H

xi) *Trockenmasseerträge und Stickstoffentzüge des ortsfesten Fruchtfolgeversuches (V554S) im Mittel der Jahre 2009 – 2011 am Standort Steinach (unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen Signifikanz; t-Test  $p \leq 0,05$ );*

Versuchsglied	TM-Ertrag (dt/ha)	t-Grouping	N-Entzug (kg/ha)	t-Grouping
18	214,74	A	284,06	A
17	214,03	A	267,35	AB
16	201,07	AB	241,54	BC
10	196,81	BC	231,91	BCD
3	196,01	BC	208,71	CDE
9	191,16	BCD	215,04	CDE
12	190,43	BCD	203,63	DEFG
2	188,58	BCDE	206,15	CDEF
4	188,12	BCDE	192,06	EFGH
11	187	CDE	206,19	CDEF
15	186,57	CDE	215	CDE
1	186,46	CDE	204,37	DEFG
8	180,51	DEF	181,62	EFGH
5	177,62	DEF	171,28	FGHI
14	176,65	EF	168,98	GHI
7	168,45	FG	160,09	HI
6	157,3	G	141,2	IJ
13	128,19	H	111,58	J

## **Eidesstattliche Erklärung**

Ich erkläre hiermit, dass ich die Dissertation selbstständig angefertigt habe. Es wurden keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt. Wörtlich oder inhaltlich übernommene Stellen sind als solche gekennzeichnet.

Freising, den 01.08.2012

.....  
(Unterschrift)