Verein zur Förderung agrar- und stadtökologischer Projekte e. V. (A.S.P) für sein Institut
Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP)
Invalidenstr. 42
10115 Berlin

Schlussbericht

zu dem Verbundprojekt

Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrats Energiepflanzen

FKZ 22012105

Gefördert durch:
Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)

Projektträger:
Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. 18276 Gülzow

Verein zur Förderung agrar- und stadtökologischer Projekte e. V. (A.S.P) für sein Institut Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP)
Invalidenstr. 42
10115 Berlin

Schlussbericht

Vorhabenbezeichnung:	Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrats Energiepflanzen
Zuwendungsempfänger:	Verein zur Förderung agrar- und stadtökologischer Projekte e. V. (A.S.P) Ausführende Stelle: Institut für Agrar- und Stadtökologische Projekte an der Humboldt-Universität zu Berlin (IASP)
Gefördert durch:	Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV)
Projektträger:	Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) Hofplatz 1, 18276 Gülzow
Förderkennzeichen:	22012105
Laufzeit des Vorhabens:	01.01.2006 – 31.06.2008
Kooperationspartner:	Humboldt-Universität zu Berlin; Landwirtschaftlich-Gärtnerische Fakultät; Institut für Pflanzenbauwissenschaften; Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau Albrecht-Thaer-Weg 5 14195 Berlin http://www.agrar.hu-berlin.de/
Verfasser des Berichts:	Dipl.-Ing. Karen Sensel (IASP) Dipl.-Agr. Biol. Verena Wragge (HU Berlin)
Projektleiter:	Dipl.-Ing. Karen Sensel (IASP)

Berlin, den 30.10.2008
Dipl.-Ing. Karen Sensel, Projektkoordinator

1. Kurze Darstellung des Projektes 15
1.1 Aufgabenstellung 15
1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens 17
1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens 18
1.4 Wissenschaftlich-Technischer Stand 19
1.4.1 Einführung 19
1.4.2 Zusammensetzung und Eigenschaften von Gärrückständen 19
1.4.3 Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen 21
1.4.4 Biologisch aktive Substanzen im Gärrückstand 23
1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen 26
2. Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes 27
2.1 Material und Methoden 27
2.1.1 Bestandsaufnahme an den Biogasanlagen 27
2.1.1.1 Biogasanlage Püggen 27
2.1.1.2 Biogasanlage Dolgelin 28
2.1.1.3 Biogasanlage Groß Kreutz 29
2.1.1.4 Probenahme der Gärrückstände 30
2.1.2 Feldversuche - Standortbeschreibungen und Versuchsaufbau 31
2.1.2.1 Bodeneigenschaften an den Versuchsstandorten 31
2.1.2.2 Klima der Versuchsstandorte und Witterung in den Versuchsjahren 32
2.1.2.3 Versuchsaufbau 36
2.1.3 Untersuchungen an Gärrückständen 40
2.1.3.1 Generelle chemische Analysen 40
2.1.3.2 Analyse freier Indol-3-essigsäure in Gärrückständen 41
2.1.3.3 Spektrophotometrische Untersuchungen 41
2.1.3.4 Biologische Untersuchungen 43
2.1.3.4.1 Restgaspotenzialuntersuchungen 43
2.1.3.4.2 Untersuchungen zur Pflanzenverträglichkeit der Gärrückstände 44
2.1.3.4.3 Inkubationsversuche zur Bildung von freier Indol-3-essigsäure in Gärrückständen 47
2.1.3.4.4 Bioassays zur auxin-analogen Wirkung von Gärrückständen 48
2.1.4 Untersuchungen des Bodens 52

2.1.4.1 Bodenatmung 53
2.1.4.2 Regenwurmaktivität 54
2.1.5 Untersuchungen an Pflanzen 56
2.1.5.1 Wachstum und Entwicklung 56
2.1.5.2 Ertrag und Ertragsstruktur 57
2.1.5.3 Innere Qualität (chemische Analysen) 57
2.1.6 Statistische Auswertungen 58
2.2 Ergebnisse und Diskussion 59
2.2.1 Stoffliche Charakterisierung der Gärrückstände 59
2.2.1.1 Chemische Parameter, Pflanzenhauptnährstoffe 59
2.2.1.2 Elementaranalytische Parameter, Schwermetalle 60
2.2.1.3 Gärrückstandslagerung - Restgaspotenziale 61
2.2.1.3.1 Veränderung ausgewählter Stoffkenngrößen 63
2.2.1.3.2 Einfluss von Zellulose, Hemizellulose und Lignin auf die Methanausbeute in Gärrückständen 64
2.2.1.4 Schlussfolgerungen zur stofflichen Charakterisierung der Gärrückstände 66
2.2.2 Biologische Beschaffenheit von Gärrückständen 67
2.2.2.1 Vorkommen und Bildung von Indol-3-essigsäure (IES) 67
2.2.2.1.1 IES-Vorkommen in Gärrückständen 67
2.2.2.1.2 Spektrophotometrische Untersuchungen 68
2.2.2.1.3 Mikrobielle Bildung von IES in Gärrückständen 69
2.2.2.2 Bioassays zur auxin-analogen-Wirkung 72
2.2.2.2.1 Bioassay Mungbohne (*Vigna radiata*) 72
2.2.2.2.2 Bioassay Kresse (*Lepidium sativum*) 73
2.2.2.3 Pflanzenverträglichkeitstest 78
2.2.2.4 Schlussfolgerungen zur biologischen Beschaffenheit von Gärrückständen 84
2.2.3 Ergebnisse der Feldversuche 85
2.2.3.1 Wirkung von Gärrückständen auf die Bodenbiologie 85
2.2.3.2 Wirkungen von Gärrückständen auf Kulturpflanzen 92
2.2.3.3 Nährstoffbilanzen 104
2.2.3.4 Schlussfolgerungen aus den Feldversuchen 111
3. Gesamtauswertung 112

3.1 Anwendungsempfehlungen 112
3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse 113
3.3 Zwischenzeitlich bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen . 114
3.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse und Schutzrechtsanmeldungen 116
3.4.1 Wissenschaftliche Publikationen 116
3.4.2 Vorträge und Posterpräsentationen 116

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Biogasanlage Püggen - Reaktor und Nachgärer mit Foliendach 27
Abbildung 2: Biogasanlage Dolgelin - Reaktor, Nachgärer und Endlager; 28
Abbildung 3: Biogasanlage Groß Kreutz; Reaktor 29
Abbildung 4: Langjähriges Mittel (1971-2000) der Lufttemperatur in Berlin-Dahlem im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007 33
Abbildung 5: Langjähriges Mittel (1971-2000) der Niederschläge in Berlin-Dahlem im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007 34
Abbildung 6: Anlageplan der Parzellenfeldversuche 36
Abbildung 7: Anlageplan der Praxisversuche 39
Abbildung 8: UV-Spektrum von Indol-3-essigsäure in 80 %igem Ethanol (λ_{max} = 279 nm) 42
Abbildung 9: Eudiometer-Apparatur zur Restgaspotenzialbestimmung nach VDI-Richtlinie 4630 43
Abbildung 10: Pflanzenverträglichkeitstest mit der Prüffrucht Mungbohne *(Vigna radiata)* und den GRS D und GK 45
Abbildung 11: Mungbohnenkeimlinge (*Vigna radiata*) nach Überführung in die IES-Lösungen 10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1} zur Induktion 50
Abbildung 12: Kressesamen *(Lepidium sativum*) nach Quellung (2 h) in dest. Wasser 51
Abbildung 13: Messung der Bodenatmung im Feld a) „Environmental Gas Monitor“ mit „Soil Respiration Chamber“ (EGM-4 mit SRC-1); b) fixe Messpunkte in einer Parzelle des Sommerweizenversuches 53
Abbildung 14: Untersuchung der Wirkung von Gärrückständen auf Regenwürmer a) Handauslese der Bodenproben aus dem Sommerweizenversuch; b) Versuchsgefäß für einen Vermeidungstest mit *Eisenia fetida* 54
Abbildung 15: Beziehung zwischen Methanausbeute und (Z+HZ)/L-Verhältnis der Gärrückstände D, P und GK bei T = 20 °C und 38 °C 65
Abbildung 16: c[IES] [mg kg^{-1} TS] in den Gärmedien der Prozessstufen der untersuchten Biogasanlagen D, P und GK 67

Abbildung 17: UV-Spektren der Gärrückstände D (NG) und P (EL) im Vergleich zum UV-Spektrum der Indol-3-essigsäure 68

Abbildung 18: c[IES] [mg kg^{-1} FM] in den Gärrückständen der Anlagen D, P und GK nach Zugabe von Trp [0,4 g kg^{-1} FM] und Trp [0,4 g kg^{-1} FM] + Glc [4,0 g kg^{-1} FM] im Vergleich zur Kontrolle K (ohne Zusätze) nach 24 h; 70

Abbildung 19: c[IES] [mg kg^{-1} FM] im Gärrückstand der Anlage D; Zugabe von Trp [0,4 g kg^{-1} FM] und Trp [0,4 g kg^{-1} FM] + Glc [4,0 g kg^{-1} FM] nach 24, 48, 72 und 120 h im Vergleich zur Kontrolle ohne Zugabe von Trp bzw. Glc; 71

Abbildung 20: Anzahl der Wurzeln [n] von Mungbohnenkeimlingen im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1 und 1:49 verdünnt) im Vergleich zur IES-Referenz (10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1}) und Kontrolle (dest. Wasser);..... 72

Abbildung 21: Wurzelentwicklung der Kressekeimlinge im Bioassay mit Extrakten aus 1, 2 und 4 g der Gärrückstände D und GK nach 120 h..... 74

Abbildung 22: Wurzellänge [cm] von Kressekeimlingen im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1, 1:49 und 1:99 verdünnt) im Vergleich zur IES-Referenz (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und Kontrolle (dest. Wasser) nach 120 h;..... 74

Abbildung 23: Wurzelentwicklung der Keimlinge der Kresse im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1, 1:49 und 1:99 verdünnt) im Vergleich zur Kontrolle (dest. Wasser) nach 120 h 75

Abbildung 24: Effekt einer möglichen Interaktion von IES c[10^{-10} mol l^{-1}] mit Inhaltsstoffen des Gärrückstandes auf die Wurzelentwicklung von *Lepidium sativum* nach 48, 72 und 120 h;..... 77

Abbildung 25: Einfluss der verschiedenen Gärrückstände (D, GK) und GRS-Konzentrationen sowie Ausbringungsmethoden auf den relativen Frisch- und Trockenmasseertrag [%] im Pflanzenverträglichkeitstest..... 79

Abbildung 26: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf die relative Wurzeltrockenmasse [%] im Pflanzenverträglichkeitstest 80

Abbildung 27: Wurzeltrockenmasse der Versuchsreihen 50, 100, 150 und 500 kg ha^{-1} N (Gärrückstand NG, Anlage D, Variante 1) im Vergleich 81
Abbildung 28: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf die relative Sprosslänge [%] im Pflanzen-verträglichkeitstest 82
Abbildung 29: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf den relativen Wasserverbrauch [%] im Pflanzenverträglichkeitstest..... 83
Abbildung 30: Bodenatmung unter Sommerweizen zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05) 86
Abbildung 31: Bodenatmung unter Sommerweizen zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05) 88
Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf von Blattfarbe, Pflanzenhöhe und Blattflächenindex bei Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung 94
Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf von Blattfarbe, Pflanzenhöhe und Blattflächenindex bei Silomais im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung 95
Abbildung 34: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05) 100
Abbildung 35: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05) 101

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Abschätzung von Gärrückstandmenge und Nährstoffgehalt einzelner Substrate (nach PERETZKI et al., 2005) 20

Tabelle 2: Probenahme in den Biogasanlagen Dolgelin (D), Püggen (P) und Groß Kreutz (GK) 30

Tabelle 3: Korngrößenverteilung der Böden an den Versuchsstandorten Berlin, Dolgelin und Püggen 31

Tabelle 4: Bodenchemische Parameter vor Versuchsbeginn an den Versuchsstandorten Berlin, Dolgelin und Püggen 31

Tabelle 5: Monatliche Durchschnittstemperaturen und Niederschlagshöhen des langjährigen Mittels (1971-2000) sowie der Jahre 2006 und 2007 an den Standorten Dolgelin (Station Müncheberg) und Püggen (Station Lüchow); MW = Mittelwert 35

Tabelle 6: Eigenschaften und Nährstoffgehalte der in den Parzellenfeldversuchen eingesetzten Gärrückstände 37

Tabelle 7: Ausgebrachte Nährstoffmengen (kg ha^{-1}) in den hoch gedüngten Varianten (N3) im Feldversuch in Berlin-Dahlem in den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007 38

Tabelle 8: Verwendete Methoden für die Analyse verschiedener Inhaltsstoffe in den Gärmedien 40

Tabelle 9: Mittlere N- und TS-Gehalte der GRS D und GK als Berechnungsgrundlage für die Ausbringung der GRS in den Stufen 50, 100, 150 und 500 kg ha^{-1} N im Pflanzen-verträglichkeitstest 45

Tabelle 10: Versuchsanordnung[*)] des Pflanzenverträglichkeitstests mit GRS D und GK 46

Tabelle 11: Merkmale der beiden Vermeidungstests bezüglich Düngermenge und Feuchtegehalt im Boden 55

Tabelle 12: Verwendete Methoden zur Analyse der Pflanzen auf verschiedene Inhaltsstoffe 58

Tabelle 13: Chemische Parameter TS, oTS und pH sowie Pflanzenhauptnährstoffe N, NH_4^+, P_{DL} und K_{DL} in den Gärrückständen D, P und GK aus den Endlagern 59

Tabelle 14: Elementaranalytische Parameter C, N und S sowie die Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn in den Gärrückständen D, P und GK aus den Endlagern 61
Tabelle 15: Stoffkennwerte der für die Restgaspotenzialbestimmung verwendeten Gärrückstande (GRS) D, P und GK 62
Tabelle 16: Restgaspotenziale der Gärrückstände D, P und GK bei 20 °C und 38 °C 62
Tabelle 17: Abbaugrade für ausgewählte Parameter TS, oTS 64
Tabelle 18: c[IES] [mg kg^{-1} FM] im Gärrückstand der Anlage GK nach Zugabe von Gülle [0,4 g kg^{-1} FM], Trp [0,2 g kg^{-1} FM] + Glc [2,0 g kg^{-1} FM], Glc [2,0 g kg^{-1} FM] im Vergleich zur Kontrolle K (ohne Zusätze) nach 0, 7, 14 und 35 Tagen 69
Tabelle 19: Stoffkennwerte der für den Bioassay mit Kresse verwendeten Gärrückstande (GRS) aus den Biogasanlagen D, P und GK 73
Tabelle 20: Berechnung der theoretischen IES-Konzentrationen [mol l^{-1}] in den Extrakten der GRS D, P und GK und in ihren Verdünnungsstufen 76
Tabelle 21: Ausgewählte Stoffkennwerte der für den Pflanzenverträglichkeitstest verwendeten Gärrückstande (GRS) aus den Biogasanlagen D und GK 78
Tabelle 22: Abundanz, Altersstufe, Arten und Biomasse der Regenwürmer je Fläche in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge aus Gärrückstand im Feldversuch in Berlin-Dahlem im Jahr 2007 90
Tabelle 23: Durchschnittliche Anzahl von Würmern (*Eisenia fetida*) im Kontroll- bzw. Prüfboden im Rahmen von Vermeidungstests (n=5) sowie berechnete Vermeidung (ausgehend von einer 50:50-Verteilung) 91
Tabelle 24: Kornertrag (86 % TS) und Ertragsstruktur von Sommerweizen im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, α=0,05) 96
Tabelle 25: Kornertrag (86 % TS) und Ertragsstruktur von Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben

unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, α=0,05) 98

Tabelle 26: TM-Erträge von Silomais und Grünroggen in den Praxisversuchen an den Standorten Dolgelin und Püggen in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des jeweils hofeigenen Gärrückstands 102

Tabelle 27: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Sommerweizen in den Versuchsjahren 2006 und 2007 im Parzellenfeldversuch in Berlin-Dahlem 105

Tabelle 28: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais in den Versuchsjahren 2006 und 2007 im Parzellenfeldversuch Berlin-Dahlem 108

Tabelle 29: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Roggen im Praxisversuch in Dolgelin in den Versuchsjahren 2006 und 2007 109

Tabelle 30: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais im Praxisversuch in Dolgelin in den Versuchsjahren 2006 und 2007 110

Tabelle 31: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais im Praxisversuch in Püggen in den Versuchsjahren 2006 und 2007 110

Formelverzeichnis

Formel 1: Berechnung des Abbaugrades 63
Formel 2: Berechnung des (Z+HZ)/L-Verhältnisses (nach ZHENG et al., 2008) 65
Formel 3: Berechnung zur Bewertung der Pflanzenverträglichkeit auf der Basis der Sprossfrischmasse 78

°C	Grad Celsius
BBCH	Skala zur Beschreibung der Entwicklungsstadien verschiedener Kulturpflanzen
BFI	Blattflächenindex
C	Kohlenstoff
c	Konzentration
Ca	Kalzium
C_{ges}	Kohlenstoff gesamt
C_{hwl}	heißwasserlöslicher Kohlenstoff
cm	Zentimeter
CO_2	Kohlendioxid
C_{org}	Organisch gebundener Kohlenstoff (Boden)
dt	Dezitonne
DüVO	Düngeverordnung
EL	Endlager
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
FM	Frischmasse
g	Gramm
GRS	Gärrückstand
GRS D	Gärrückstand aus der Biogasanlage in Dolgelin
GRS GK	Gärrückstand aus der Biogasanlage in Groß Kreutz
GRS P	Gärrückstand aus der Biogasanlage in Püggen
H	Wasserstoff
h	Stunde
H_2O	Wasser
ha	Hektar
IES	Indol-3-essigsäure
K	Kalium
kg	Kilogramm
KW	Kalenderwoche
kW_{el}	Kilowatt elektrisch
l	Liter
m ü. NN	Meter über Normalnull (Meeresspiegel)
M-%	Masseprozent
m^3	Kubikmeter
MDÄ	Mineraldüngeräquivalent
mg	Milligramm
Mg	Magnesium
mm	Millimeter
mol	Mol
MW	Mittelwert
N	Stickstoff
n. b.	nicht bestimmt
n. n.	nicht nachweisbar
N0 - N3	Stickstoffdüngestufen in den Parzellenfeldversuchen
NfE	Stickstofffreie Extraktstoffe
NG	Nachgärer
N_{ges}	Stickstoff gesamt
NH_3	Ammoniak
NH_4^+	Ammonium

N_{hwl}	heißwasserlöslicher Stickstoff
N_{min}	Mineralischer Stickstoff
O	Sauerstoff
OS	Organische Substanz
oTS	Organische Trockensubstanz
P_{DL}	Phosphor löslich / pflanzenverfügbar (Doppellactat-Methode)
P_{ges}	Phosphor gesamt
pH	Negativer dekadischer Logarithmus der Wasserstoffionen-konzentration als Maßzahl für den sauren oder basischen Charakter von Lösungen
R	Reaktor
RA	Rohasche
RFa	Rohfaser
Rfe	Rohfett
RP	Rohprotein
S	Schwefel
Stabw.	Standardabweichung
T	Temperatur
t	Tonne
t	Zeit
TKM	Tausendkornmasse
TS	Trockensubstanz(-gehalt)
uv	unverdünnt
WK_{max}	Maximale Wasserhaltekapazität (Boden)

1. Kurze Darstellung des Projektes

1.1 Aufgabenstellung

Das Forschungsvorhaben "Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrats Energiepflanzen" sollte einen entscheidenden Beitrag zur pflanzenbaulichen Beurteilung von Gärrückständen aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen leisten. Dazu sollte ein Anwendungsregime zum landwirtschaftlichen Einsatz von Gärrückständen aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen entwickelt werden, das sowohl verschiedenen Standorten als auch den unterschiedlichen Forderungen des integrierten und ökologischen Landbaus gerecht wird. Um dieses Ziel zu erreichen, waren:

- grundlegende wissenschaftliche Untersuchungen zur chemischen und biologischen Struktur der verschiedenen Gärrückstände im Hinblick auf eine positive Beeinflussung der Pflanzenentwicklung und Bodenqualität erforderlich,
- Untersuchungen zur Wirksamkeit dieser Gärrückstände auf Ertragsquantität und -qualität in zweijährigen praxisnahen Freilandversuchen an verschiedenen Standorten in Deutschland notwendig.

Im Rahmen des geplanten Vorhabens wurde ein mehrstufiger Forschungsansatz verfolgt. Die wissenschaftlichen und technischen Arbeitsziele fokussierten einerseits auf eine Substratpalette bezüglich der Eingangssubstrate in Biogasanlagen mit dem Schwerpunkt Energiepflanzen als Mono- und Koferment. Andererseits sollten standörtliche Bezüge hergestellt werden. Ferner sollte auch ein neuer grundlegender Ansatz bezüglich möglicher bioaktiver Wirksubstanzen im Gärrückstand untersucht werden.

Folgende Fragestellungen wurden daher in den Blickpunkt der Forschungsarbeiten gestellt:

- Welche Wirkungen haben Gärrückstände aus Biogasprozessen insbesondere pflanzlicher Herkunft auf Boden und Pflanze?

- Welche Kausalität besteht zwischen bisher beobachteten Ertragssteigerungen und dem Wirkstoffträger Gärrückstand? (Steigerung der mikrobiellen Aktivität im Boden?, Träger von biologisch aktiven Minorkomponenten?)
- Kann ein Anwendungsregime zum Einsatz von Gärrückständen in Bezug auf regionale Gegebenheiten (Art, Menge und Zeitpunkt der Ausbringung) entwickelt werden?

Deshalb wurden in diesem Vorhaben folgende praxisrelevante Gärrückstände aus Biogasanlagen untersucht:

- Gärrückstand aus Gülle in Kofermentation mit Energiepflanzensilage und
- Gärrückstand aus Energiepflanzensilage in Monofermentation.

Das Versuchsdesign war auf die Durchführung von Freilandversuchen (Parzellen- und Praxisfeldversuche) ausgerichtet. Der Boden stellt einen wichtigen Einflussfaktor dar. Daher wurden begleitend zu den Parzellenfeldversuchen am Intensivversuchsstandort Versuche an zwei verschiedenen Praxis-Standorten durchgeführt. Die unterstützenden Partner vor Ort für die Durchführung der Praxisversuche waren zwei Landwirtschaftsbetriebe des integrierten bzw. des ökologischen Landbaus. Beide Partner sind zudem Betreiber von Biogasanlagen zur Monofermentation von Energiepflanzen.
Neben der Quantifizierung von Nährstoffwirkungen auf Wachstum, Entwicklung und Ertrag von ausgewählten Nutzpflanzen (Silomais, Sommerweizen) wurden die biologischen Effekte stärker untersucht, um die Wirkungsfaktoren herauszufiltern und mögliche Synergieeffekte nachvollziehbar aufzuklären.
Es wurden sowohl Untersuchungen zur Veränderung der bodenbiologischen Aktivität vorgenommen als auch die Einflüsse der Düngung auf das Pflanzenwachstum analysiert. Die Bodenuntersuchungen umfassten dabei chemische (wie Nährstoffe, N_{min}, pH-Wert, C/N-Verhältnis), physikalische (wie Bodentemperatur) und vor allem biologische Parameter (Bodenatmung, Regenwurmaktivität).
Die Grundlagenforschung auf dem Gebiet möglicher bioaktiver Substanzen im Gärrückstand wurde in das Vorhaben integriert. Deshalb sind Untersuchungen zu dem Phytohormon und Wachstumsregulator Indol-3-essigsäure (IES) im Gärrückstand durchgeführt worden. Dabei sollte geklärt werden, ob und in welcher Quantität IES in

Biogasanlagen gebildet wird. Dazu wurden Ausgangssubstrate und insbesondere die Gärrückstände auf diese Substanz untersucht. Die physiologische Wirkung der Gärrückstände auf die Pflanzenentwicklung wurde anhand eines ausgewählten biologischen Testverfahrens (Bioassays) mit den als auxinsensitiv bekannten Pflanzenkeimlingen der Mungbohne (*Vigna radiata*) nachvollzogen. Mit dieser Untersuchungsmethode zur Bestimmung der Wirksamkeit von IES bzw. auxin-analog wirkenden Substanzen wurde die Dosis/Wirkungs-Beziehung der Gärrückstände anhand der Förderung der Adventivwurzelbildung am Pflanzenkeimling quantifiziert und mit einer parallel eingesetzten IES-Referenz verglichen. Ein Vorteil dieses Bioassays ist somit die Prüfung des Gärrückstandes auf die Anwesenheit möglicher Hemmstoffe bzw. weiterer additiv wuchsfördernder Substanzen (auxin-analoge Wirkung). Zusätzlich zum geplanten Mungbohnen-Biotest wurde ein Bioassay zur auxin-analogen Wirkung anhand der Hemmung der Wurzelentwicklung von Kressesamen (*Lepidium sativum*) durchgeführt. Der Vorteil dieser Methode liegt vor allem in der kurzfristigeren Datenerhebung.

1.2 Voraussetzungen zur Durchführung des Vorhabens

Das IASP hat über mehrere Jahre Wissen und Erfahrungen auf dem Forschungsgebiet der Biogaserzeugung aus organischen Materialien erworben. Insbesondere die Analyse und Optimierung vor- und nachgelagerter Bereiche des Biogasprozesses stehen im Fokus der Arbeitsgruppe Biogas des IASP. Dazu gehört neben Untersuchungen zu einer optimierten Vorbehandlung der Inputsubstrate von Biogasanlagen für eine bessere Verwertung auch eine Vielzahl von analytischen sowie verfahrenstechnischen Untersuchungen an Gärrückständen aus Biogasanlagen.

Die, für die Durchführung der pflanzenbaulichen Feldversuche zur Gärrückstands-wirkung, unbedingt erforderliche spezielle Fachkompetenz wurde durch das FG Acker- und Pflanzenbau am Institut für Pflanzenbauwissenschaften der Humboldt-Universität zu Berlin eingebracht. Wissenschaftliches Know-How, entsprechende Kapazitäten für die Konzipierung und Durchführung der Freilandversuche sowie die erforderlichen Versuchsparzellen an der institutseigenen Versuchsstation standen dafür zur Verfügung.

Darüber hinaus wurden zu Beginn des Projektes zwei Bodenatmungsmessgeräte erworben und erfolgreich zur Bestimmung des bodenbiologischen Parameters Bodenatmung eingesetzt.

Insbesondere die stark praxisbezogene Ausrichtung des Vorhabens durch eine sehr enge Kooperation mit den Biogasanlagenbetreibern war ein gewinnbringender Aspekt bei der erfolgreichen Durchführung des vorliegenden Projektes.

1.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Entsprechend dem vorgegebenen Arbeitsplan waren im Zeitraum des Vorhabens folgende Arbeitspakete verbunden mit den entsprechenden Teilzielen bzw. -aufgaben zu bearbeiten:

Bestandsaufnahme an den Biogasanlagen

- Prozessdatenerfassung
- Substratuntersuchungen

Gärrückstandslagerung / Substratuntersuchungen

- Stoffliche Charakterisierung der Gärrückstände
- Restgaspotenzialuntersuchungen und stoffliche Veränderungen der Gärrückstände während einer anaeroben Lagerung

Untersuchungen zum Vorkommen und der Bildung des Wachstumsregulators Indol-3-essigsäure (IES) in Gärrückständen

- Durchführung der IES-Analysen in Ausgangssubstraten, Gärmedien und Gärrückständen
- Inkubationsversuche zur Bildung und zum Abbau von IES in Batch-Versuchen mit verschiedenen Ausgangssubstraten

Bioassay zur IES-Wirkung

- Entwicklung und Adaption einer Bioassay-Methode zum Nachweis einer auxinanalogen Wirkung von Gärrückständen

Vorbereitung Feldversuche und Feldversuchsdurchführung für zwei Vegetationsperioden

- Versuchsplanung und Anlegen der Parzellenfeld- und Praxisversuche
- Versuchsdurchführung und Datenerfassung in den Beständen
- Boden- und Pflanzenuntersuchungen

1.4 Wissenschaftlich-Technischer Stand

1.4.1 Einführung

In Deutschland gibt es zum gegenwärtigen Zeitpunkt ca. 3900 Biogasanlagen. Neben der Produktion von Biogas, dem eigentlichen Energieträger, entsteht im Rahmen des Gärprozesses auch ein stoffliches Endprodukt, der so genannte Gärrückstand oder Gärrest, häufig auch als Biogasgülle bezeichnet. Die Gärrückstände werden in der Praxis, ähnlich der Wirtschaftsdüngerform Gülle, auf landwirtschaftlichen Nutzflächen zur Nährstoffversorgung unterschiedlicher Kulturpflanzen eingesetzt.

1.4.2 Zusammensetzung und Eigenschaften von Gärrückständen

Naturgemäß unterscheiden sich Gärrückstände aus Biogasanlagen durch unterschiedliche Eingangssubstrate und die Verfahrenstechnik in ihrer Zusammensetzung und Konsistenz. Ein Großteil der landwirtschaftlichen Biogasanlagen wird aus Gründen einer Steigerung der Energieausbeute nicht nur mit Gülle sondern mit Kosubstraten beschickt. Ein substratseitiger Schwerpunkt, bedingt durch die EEG-Novellierung von 2004, ist der verstärkte Einsatz von Pflanzen, Pflanzenteilen und Ganzpflanzensilagen als nachwachsende Rohstoffe in Biogasanlagen. Diese verschiedenen Eingangssubstrate bewirken neben einer erhöhten Energieausbeute auch eine quantitative und vor allem eine qualitative Veränderung des anfallenden Gärrückstandes. Beim Einsatz von pflanzlichem Material ist aufgrund des hohen Anteils leicht vergärbarer Organik im Vergleich zu Gülle mit einem höheren Abbaugrad der organischen Substanz zu rechnen. Folglich kann der Abbau organischer Substanz zwischen 24 % (z. B. Milchviehgülle) bis 80 % (z. B. Gemisch aus Pflanzensilage und Flüssigmist) liegen (ROSCHKE, 2003[1]; AMON et al., 2003[2]). Durch den Abbau von organischer Trockensubstanz verbleibt der Gärrückstand als wässrige Suspension mit Trockensubstanzgehalten zwischen 2 und 10 %. Die in der organischen Substanz vorher gebundenen Nährstoffe werden mineralisiert und sind dadurch besser für die Pflanzen verfügbar. Die Pflanzennährstoffe Stickstoff (N),

[1] Roschke, M.: „Verwertung der Faulsubstrate“. In: Biogas in der Landwirtschaft – Leitfaden für Landwirte und Investoren in Brandenburg, Ministerium für Landwirtschaft, Umweltschutz und Raumordnung des Landes Brandenburg (Hrsg.), Potsdam, S. 29-33. (2003)

[2] Amon, Th., Kryvoruchko, V., Amon, B., Moitzi, G., Fistarol-Lyson, D., Hackl, E., Jeremic, D., Zollitzsch, W., Pötsch, E., Mayer, K., Plank, J.: Endbericht „Optimierung der Biogaserzeugung aus den Energiepflanzen Mais und Kleegras“. Forschungsprojekt Nr. 1249 GZ 24.002/59-IIA1/01, Austria. (2003)

Phosphor (P) und Kalium (K) bleiben dabei im Gärrückstand fast vollständig erhalten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Abschätzung von Gärrückstandmenge und Nährstoffgehalt einzelner Substrate (nach PERETZKI et al., 2005)[3]

Art	Gehalte im Ausgangsubstrat [kg t^{-1} Frischmasse]					Unterstellter Abbau	Nicht vergorene Trockensubstanz	Gärrückstandmenge (t) und Nährstoffgehalt (kg t^{-1}) bei 6 % TS im Gärrückstand			
	TS	oTS	N	P_2O_5	K_2O	% oTS	kg TS	Menge	N	P_2O_5	K_2O
Silomais	300	285	3,8	1,8	4,5	80	72	1,2	3,2	1,5	3,8
Roggen (Korn)	850	833	1,5	0,8	0,8	92	84	1,4	1,1	0,6	0,6
Schweine-gülle	75	45	6,5	3,3	3,3	40	57	1,0	6,8	3,5	3,5

Auf die Trockensubstanz bezogen steigt der Nährstoffgehalt stark an, insbesondere wenn nährstoffreiche und leicht abbaubare organische Substanz, wie z. B. Getreidekorn, eingesetzt wird. Da aber der Trockensubstanzgehalt im Gärrückstand im Vergleich zum Ausgangssubstrat geringer ist, liegt eine hohe Verdünnung vor. Der absolute Gehalt an mineralischen Stoffen bleibt folglich gleich bzw. ist leicht reduziert.

Infolge der Reduktion der organischen Substanz wird auch ein Teil des organisch gebundenen Stickstoffs mineralisiert, so dass dadurch höhere Ammoniumgehalte als im Ausgangssubstrat nachgewiesen werden. Da der pH-Wert nach der Vergärung in den Gärrückständen im schwach alkalischen bis alkalischen Bereich liegt, kann es zu Ammoniakemissionen und damit verbunden zu Nährstoffverlusten kommen. Diesem Sachverhalt ist durch eine fachgerechte Lagerung mit Abdeckung der Lagerbehälter und bodennaher Ausbringung, sowie schnelle Einarbeitung der Gärrückstände Rechnung zu tragen. Höhermolekulare organische Substanzen, wie z. B. der Cellulose-Lignin-Komplex in Pflanzen, sind im anaeroben Prozess nur schwer abbaubar und werden im Gärrückstand durch den Rohfasergehalt beschrieben.

Hinsichtlich des Gehaltes an möglichen Schadstoffen, wie beispielweise Schwermetalle, sind Gärrückstände aus der Vergärung von Energiepflanzen als unbedenklich einzustufen. Ein Problem stellen die hohen Kupfer- und Zinkgehalte bei Schweinegülle dar, die vor allem aus der Fütterung resultieren. Unsicherheit besteht über die Wirkung von Antibiotika aus der Vergärung von Wirtschaftsdüngern.

[3] Peretzki, F., Müller, C., Dittmann, T.: „Düngerfabrik Biogasanlage“. In.: BLW 7, 19.02.2005, S. 42-44. (2005)

1.4.3 Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen

Aufgrund der traditionellen Inputsituation von Biogasanlagen in den letzten Jahrzehnten fanden vor allem Untersuchungen zur Düngewirkung von Rohgülle im Vergleich zu fermentierter Biogasgülle statt. In Gefäßversuchen zur Wirkung beider Düngerarten wurden keine Unterschiede in der Wirkung festgestellt (MESSNER, 1988)[4]. In späteren Gefäßversuchen von JÄKEL et al. (1999)[5] konnte jedoch eine höhere N-Wirkung anaerob behandelter gegenüber gelagerter Gülle nachgewiesen werden. Da Gärrückstände im Vergleich zu gelagerter bzw. frischer Rohgülle höhere Anteile an Ammonium-N am Gesamtstickstoffgehalt aufweisen, ist dieses Ergebnis durch die bessere Sofortwirkung des Stickstoffs erklärbar. Hinsichtlich der N-Wirkung vergorener gegenüber unbehandelter Gülle ergaben Rinder- und Schweinegülle sowohl in Gefäß- als auch in Feldversuchen unterschiedliche Ergebnisse (HERMANN & ASMUS, 1978[6]; HEGE, 1988[7]; ASMUS & LINKE, 1987[8]; GUTSER et al., 1987[9]; MESSNER, 1988[10]; JÄKEL et al., 1999[11]). In Parzellenversuchen mit Gärrückstand aus vergorenem Rinder- und Schweinemist wurden im Vergleich zur unbehandelten Kontrolle signifikante Ertragszunahmen bei der Prüffrucht Sommergerste festgestellt. Dies führte zu der Annahme, dass der gesamte Ammonium-N ertragswirksam geworden war (RAUBUCH et al., 2005)[12]. Hinsichtlich der Nährstoffwirkung wurde, in Abhängigkeit des Ausgangsmaterials, auch bei Systemen mit Trennung der Flüssig- und Festphase deren unterschiedliche N-Verfügbarkeit im Hinblick auf die Ertragswirksamkeit untersucht. Während die festen Gärrückstände vergleichsweise langsam mineralisieren, sind die flüssigen Anteile in hohem Maße pflanzenverfügbar. KIRSCH (2002)[13] zeigte, dass

---

[4] Messner, H.: „Düngewirkung anaerob fermentierter und unbehandelter Gülle“. Diss. Institut für Bodenkunde, Pflanzenernährung und Phytopathologie München 166 S. (1988)

[5] Jäkel et al.: „Umweltwirkung von Biogas“. Abschlussbericht zum Forschungsprojekt, 60 S., Freistaat Sachsen, Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft. (Juli 1999)

[6] Hermann, V. u. Asmus, F.: „Wirkung und Ausnutzung des Stickstoffs aus Rinder- und Schweinegülle im Gefäßversuch“. Archiv Acker- Pflanzenbau und Bodenkunde 22, S. 47-57. (1978)

[7] Hege, U.: „Düngewirkung von ausgefaultem Fließmist“. 27. Biogas Praktiker Informationstagung, Grub S. 50 – 56. (1988)

[8] Asmus, F. u. Linke, B.: „Zur pflanzenbaulichen Verwertung von Gülle-Faulschlamm aus der Biogasgewinnung“. Feldwirtschaft 28, S. 354-355. (1987)

[9] Gutser, A., Amberger, A., Vilsmaier, K.: „Wirkung unterschiedlich aufbereiteter Gülle im Gefäßversuch zu Hafer und Weidelgras“. VDLUFA-Schriftenreihe, 23. Kongressband S. 279-293. (1987)

[10] siehe Fußnote 4

[11] siehe Fußnote 5

[12] Raubuch, M., Terhoeven-Urselmans, Th., Scheller, E.: „Suspension aus Biogasanlagen: Qualität und Wirkung auf den Ertrag [Biogas suspension: quality and effect on yield]". Poster präsentiert bei der Konferenz 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau-Ende der Nische, Kassel, 01.03.2005-04.03.2005; Veröffentlicht in Heß, J und Rahmann, G, (Hrsg.) Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. (2005)

[13] Kirsch, A.: „Einsatz kompostierter Gärreste in der Landwirtschaft“ Diss. Universität Bonn. Ersch. Im: Kirsch-Verlag, Nürnbrecht. (2002)

feste kompostierte Gärrückstände aus Bioabfall eine positive Wirkung auf Boden und Pflanzen haben. Bei Einhaltung der gesetzlich vorgegebenen Schwermetall- und Fremdstoffgrenzwerte sind nach Meinung des Autors kompostierte Gärrückstände als hochwertige und preisgünstige organische Dünge- und Bodenverbesserungsmittel anzusehen. Kompostierte Gärrückstande eignen sich ferner zur Herstellung gärtnerischer Erden (POPP & FISCHER, 2001)[14].

Die Biogaserzeugung bietet auch im ökologischen Landbau neben der Energiegewinnung die Möglichkeit, organische Dünger zu produzieren, die im Betrieb flexibel eingesetzt werden können. Sie sind aber auch hier pflanzenbaulich bis dato weitgehend unbeforscht (NEUHOFF, 2005)[15]. Insbesondere Stickstoff stellt im ökologischen Landbau einen ertragslimitierenden Faktor dar, da der Einsatz von mineralischem Stickstoffdünger nicht erfolgt. Erste Untersuchungen zeigen für die Anwendung der flüssigen Gärrückstandsphase sowohl aus der anaeroben Fermentation rein pflanzlicher Ausgangssubstrate als auch von Wirtschaftsdüngern signifikante Ertragserhöhungen im Vergleich zur Gründüngung bzw. ohne Düngung (STINNER et al., 2005[16]; RAUBUCH et al., 2005)[17].

Nach Auswertung bisheriger Forschungsergebnisse und in Bezug auf die veränderte Inputsituation von Biogasanlagen ist ersichtlich, dass erhebliche Wissenslücken hinsichtlich des pflanzenbaulichen Einsatzes und der Wirkung von Gärrückständen aus der Mono- und Kofermentation von Energiepflanzen bestehen. Es fehlen wissenschaftlich gesicherte Untersuchungen zum Einsatz und zur Wirkung dieser Gärrückstände unter Freilandbedingungen und in verschiedenen Fruchtarten. Auch die Auswirkungen einer Gärrückstandsausbringung im ökologischen Landbau, insbesondere im Vergleich zu sonst üblichen Düngemaßnahmen, bedürfen weiterer Untersuchungen sowie einer umfassenden Bewertung. Neben Aspekten der Wirtschaftlichkeit des Einsatzes von Gärrückständen ist auch das praktische Management bezüglich der zeit- und standortgerechten Zufuhr von Gärrückständen zu optimieren.

---

[14] Popp, W. u. Fischer, P.: „Verwendung fester Rückstände aus der Bioabfallvergärung im Gartenbau und Landschaftsbau". Institut für Bodenkunde und Pflanzenernährung, Informationsdienst Weihenstephan. (2001)

[15] http://www.wissenschaftstagung.de/programm/session_pflanzenbau_5.html

[16] Stinner, W., Möller, K., Leithold, G.: „Biogaserzeugung im viehlosen Betrieb: Effekte auf Stickstoffmanagement, Erträge und Qualität [Biogas production in a stockless farming system: Effects on nitrogen management, yield and quality]". Beitrag präsentiert bei der Konferenz: 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau - Ende der Nische, Kassel, 01.03.05 - 04.03.05; Veröffentlicht in Heß, J und Rahmann, G, (Hrsg.) Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. (2005)

[17] siehe Fußnote 12

Da mit Gärrückständen dem Boden nicht nur Nährstoffe sondern auch organische Substanz zugeführt werden, kann mit dessen Einsatz gleichzeitig ein Beitrag zur Reproduktion der organischen Substanz bzw. zur Erhöhung der mikrobiellen Aktivität des Bodens geleistet werden. Hier ist die Wirkung durch eine breite Parametererhebung zur Quantifizierung des bodenbiologischen Bodenzustandes zu untersuchen.

1.4.4 Biologisch aktive Substanzen im Gärrückstand

Generell könnte eine bessere Pflanzenentwicklung bei der Ausbringung von Gärrückständen speziell aus pflanzlichen Substraten auch auf die Anwesenheit verschiedener chemischer und biologisch aktiver bzw. pflanzenwachstums- und gesundheitsfördernder Substanzen in der organischen Substanz des Gärrückstandes selbst zurückzuführen sein.

Biologisch aktive Komponenten können dabei sowohl aus den eingesetzten Substraten stammen (z. B. sekundäre Pflanzenstoffe aus den Energiepflanzen) als auch aus dem bakteriellen Stoffwechsel des Biogasprozesses hervorgehen (z. B. bakteriell synthetisierte Enzyme, Vitamine, phytohormonell wirkende Substanzen). Auch bestimmte Mikroorganismen selbst könnten sich positiv auf das Wachstum und die Gesundheit von Kulturpflanzen (z. B. Antagonisten zu Phytophatogenen) auswirken. Diese Komponenten wirken dabei entweder direkt auf die Pflanze und/oder schaffen ein Bodenmilieu, das sich positiv auf die Pflanzenentwicklung auswirkt. Bisher gibt es zu diesen genannten Ansätzen kaum Untersuchungen. Eine Ursache dafür liegt in der sich derzeit zwar stark entwickelnden, aber relativ jungen Form der biotechnologischen Energiegewinnung. Damit verbunden sind die noch ungenügenden Kenntnisse über die (mikro-) biologischen Vorgänge im Inneren der Biogasanlagen, insbesondere auch beim Einsatz von pflanzlichen Materialien. Ferner konzentrierten sich bisherige Untersuchungen zu qualitätsbestimmenden Inhaltsstoffen in Gärrückständen mehr auf den Gehalt an Pflanzennährstoffen sowie das Spektrum und die Gehalte an möglichen Schad- und Störstoffen. Der Einsatz von gering belasteten Energiepflanzen bietet hier eine Möglichkeit, stärker den ökologischen Aspekt der Ausbringung von Gärrückständen durch Untersuchungen zu pflanzenwachstums- und -gesundheitsfördernden Substanzen in der biologischen Matrix zu erforschen.

Dass der Gärrückstand durchaus Träger solcher bioaktiver Substanzen ist, zeigen erste eigene Voruntersuchungen zu Gärrückständen aus der anaeroben Fermentation von rein pflanzlichen Ausgangsstoffen bezüglich des Gehaltes an phytohormonellen

Substanzen. So wurde eine 10-fach höhere Konzentration des wichtigen Pflanzenwachstumshormons Indol-3-essigsäure im Gärrückstand im Vergleich zu den pflanzlichen Ausgangssubstraten festgestellt (SENSEL, 2004)[18]. Diese starke Erhöhung ließe sich nur durch eine mikrobielle Bildung der am Biogasprozess beteiligten Bakterien erklären.

Phytohormone sind in erster Linie verantwortlich für die Regulation der Wachstums- und Entwicklungsprozesse von Pflanzen. Indol-3-essigsäure zählt zur Phytohormongruppe der Auxine und wird vorwiegend in der Pflanze gebildet. Zu ihren Effekten zählen u. a.:

- Stimulation des Streckungswachstums
- Zellteilungen
- Wurzelbildungen
- Förderung der plastischen Dehnbarkeit von Zellwandpolysacchariden
- Synthese von Zellwandmaterial.

Aber auch für eine Vielzahl von Mikroorganismen ist das Phänomen der Phytohormonbiosynthese bekannt. Zahlreiche Autoren berichten von einer Bildung von Phytohormonen, u. a. von Indol-3-essigsäure durch pflanzenassoziierte Rhizosphärenbakterien und deren direkte bzw. indirekte Wirkung auf das Pflanzenwachstum. Bakterien der Gattung *Azospirillum* beispielsweise sind in der Lage, die Entwicklung des Wurzelwachstums zu verbessern und das Wachstum und den Ertrag von Nutzpflanzen zu erhöhen (DOBBELAERE et al., 2001)[19]. Sie werden deshalb zu den Plant Growth Promoting Rhizobacteria (PGPR) gerechnet. Der Einfluss des von *Azospirillum* produzierten Phytohormons Indol-3-essigsäure (Auxin) wird als wichtiger PGPR-Mechanismus angenommen. Dabei wird von einem durch die Indol-3-essigsäure angeregten, verstärkten Wurzelwachstum ausgegangen, welches der Pflanze neben einer besseren Etablierung im Boden auch eine größere spezifische Wurzeloberfläche bietet, mit dem Effekt der stärkeren Besiedelung durch pflanzenassoziierte Rhizosphärenbakterien.

[18] Sensel, K.: „Untersuchungen zu Gärrückständen aus der anaeroben Fermentation pflanzlicher Ausgangssubstrate". Vortrag im Rahmen der Tagung der Forschungsplattform "Ländliche Räume Berlin-Brandenburg". 27.10.2004, Berlin.

[19] Dobbelaere, S., Croonenborghs, A., Thys, A., Ptacek, D., Vanderleyden, J., Dutto, P., Labandera-Gonzalez, C., Caballero-Mellado, J., Francisco Aguirre, J., Kapulnik, Y., Brener, S., Burdman, S., Kadouri, D., Sarig, S. and Okon, Y.: „Responses of agronomically important crops to inoculation with Azospirillum". Australian Journal of Plant Physiology 28: 871-879. (2001)

Beobachtet wurde dieser Mechanismus der Phytohormon-Biosynthese ferner bei Bakterien wie *Klebsiella*, *Achromobacter* (LENGELER et al., 1999)[20] und *Azotobacter* (BAREA et al., 1974)[21], (LEE et al., 1970)[22]. Bekannt ist die Bildung von Auxinen auch für Vertreter der Gattungen *Bacillus* und *Pseudomonas* (PODILE & DUBE, 1988[23]; CHEN et al., 1992[24]; DEY et al, 2004)[25]. Mittlerweile werden mikrobiologische Pflanzenstärkungsmittel eingesetzt, die diese Bakterien enthalten und sich damit u. a. deren Eigenschaft zur Phytohormon-Biosynthese zu Nutze machen. Beispiele hierfür sind die in der Liste für Pflanzenstärkungsmittel des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit aufgeführten Produkte FZB24® *Bacillus subtilis* (LS 004954-00-00); Phytovit®WG (LS 005023-00-00), enthält *Bacillus subtilis*; PRORADIX (LS 004816-00-00), enthält *Pseudomonas sp*. Aber auch Phytohormonpräparate selbst (z. B. ComCat®, LS 004990-00-00) werden bereits angewendet.

Die Wirkung exogen applizierter Phytohormone und deren Vorstufen auf das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen wurde intensiv von FRANKENBERGER & ARSHAD (1991)[26] und FRANKENBERGER & ARSHAD (1995)[27] untersucht. Sie zeigten, dass die Behandlung von natürlichem Boden mit den physiologischen Phytohormonvorstufen Tryptophan (Indol-3-essigsäure), Adenin (Cytokinin) und Methionin (Ethylen) zu einer verstärkten mikrobiellen Synthese der resultierenden Phytohormone führte und das Pflanzenwachstum stimulierte. BROWN et al. (1968)[28] behandelten Tomatensamen und die Wurzeln von Tomatensämlingen mit einer Kombination von Gibberellinsäure3 und Indol-3-essigsäure und stellten eine Steigerung der Sprosslänge und der Blattgröße fest.

---

[20] Lengeler, J., Drews, G., Schlegel, H.G. (eds.) „*Biology of the Prokaryotes".* Thieme Verlag, Stuttgart, 1. Auflage. (1999)

[21] Barea JM. u. Brown, ME.: „Effects on plant growth produced by Azotobacter paspali related to synthesis of plant growth regulating substances". J Appl Bacteriol; 37(4):583–593. Dec (1974)

[22] Lee, M., Breckenridge, C., Knowles, R.: „Effect of some culture conditions on the production of indole-3-acetic acid and a gibberellin-like substance by Azotobacter vinelandii". Can J Microbiol; 16(12):1325–1330. Dec (1970)

[23] Podile, A.R., u. Dube, H.C. „Plant growth promotion activity of Bacillus subtilis". API, Curr. Sci. India, 57 pp.; 183–186. (1988)

[24] Chen, B., Ji, P., Mei, R.: „Observation of hormones produced by yield increasing bacteria (YIB)". Proceeding of the Sixth International Symposium on Microbial Ecology Barcelona, Spain, 6–11, p. 258. September (1992)

[25] Dey, R., Pal, KK., Bhatt, DM., Chauhan, SM.: „Growth promotion and yield enhancement of peanut (Arachis hypogaea L.) by application of plant growth-promoting rhizobacteria". Microbiol Res. 159(4): 371-94. (2004)

[26] Frankenberger, W.T. u. Arshad, M.: „Microbial production of plant hormones". In: KEISTER, D.L. und CREGAN, P.B. (eds.), The Rhizosphere and Plant Growth. Kluwer Academic Publishers, Dordrecht / Boston / London, 327-334. (1991)

[27] Frankenberger, W.T. u. Arshad, M. „Phytohormones in soils: microbial production and function". Marcell Deker, Inc. New York, 35-78. (1995)

[28] Brown, M. E., Jackson, R. M., Burlingham, S. K.: „Effects produced on tomato plants, Lycopersicume sculenturn, by seed or root treatment with gibberellic acid and indolyl-3-acetic acid". J. Exp. Bot. 19: 544-52. (1968)

Die Behandlung von Pflanzen mit Wachstumsregulatoren kann überdies Mechanismen der induzierten Resistenz auslösen. Damit wird die Pathogenese von Pflanzenkrankheiten entscheidend beeinflusst. CHRIST & MÖSINGER (1989)[29] beobachteten nach der Injektion von Indol-3-essigsäure (50 ppm) in die Blätter von Tomatenpflanzen eine Akkumulation von PR-Proteinen (pathogenesis-related proteins). Der Befall mit *Phytophthora infestans* wurde verringert.

Indol-3-essigsäure und einige synthetische Auxine haben als Wachstumsregulatoren in der Landwirtschaft sowie im Obst- und Gartenbau (z. B. Förderung des Fruchtansatzes) bereits breite Anwendung gefunden. Den Hormonen ähnliche Wirkungen zeigen zahlreiche synthetisch hergestellte Wachstumsregulatoren. Diese spielen in der modernen Landwirtschaft und im Gartenbau als Herbizide oder Wachstumsstimuli eine entscheidende wirtschaftliche, wegen ihrer Toxizität der im industriellen Herstellungsprozess anfallenden Nebenprodukte (z. B. Dioxin) jedoch ebenso eine brisante politische Rolle.

1.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Die Bearbeitung des Projektes erfolgte in Zusammenarbeit und Abstimmung mit dem Kooperationspartner Fachgebiet Acker- und Pflanzenbau der Humboldt-Universität zu Berlin sowie den Praxispartnern Landwirtschaftsbetrieb Martin Schulze, Biolandhof Manfred Ebeling sowie der Lehr- und Versuchsanstalt für Tierzucht und Tierhaltung e.V., Groß Kreutz.

[29] Christ, U. u. Mösinger, E.: „Pathogenesis-related proteins of tomato 1. Induction by Phytophthora infestans and other biotic and abiotic inducers and correlations with resistance". Physiol Mol Plant Path 35: 53-65. (1989)

2. Eingehende Darstellung der wissenschaftlich-technischen Ergebnisse des Projektes

2.1 Material und Methoden

2.1.1 Bestandsaufnahme an den Biogasanlagen

2.1.1.1 Biogasanlage Püggen

Die Biogasanlage Püggen arbeitet auf der Basis einer zweistufigen mesophilen Nassvergärung. Die Anlage besteht aus einer Güllegrube, zwei stehenden Reaktoren aus Beton (Abbildung 1) und einem offenen Endlagerbehälter aus Stahl, wobei der 2. Reaktor als Nachgärer eingesetzt wird. Das Volumen der einzelnen Behälter ist nachfolgend aufgeführt:

- Reaktor: 1500 m^3
- Nachgärer: 1500 m^3
- Endlager: 600 m^3

Abbildung 1: Biogasanlage Püggen - Reaktor und Nachgärer mit Foliendach

Es handelt sich um ein Durchfluss-Speicher-Verfahren. Die Substrate werden täglich aus einem Feststoffdosierer mit Wiegeeinrichtung in den Reaktor gepumpt. Da alle Behälter über einen Freispiegelüberlauf miteinander verbunden sind, gelangt das Gärmedium über Verdrängung aus dem Reaktor in den Nachgärer und anschließend ins Endlager. Das gebildete Biogas wird unter den Foliendächern aufgefangen. Reaktor und Nachgärer fungieren folglich als „Gasspeicheranlage“. Als Eingangssubstrate standen im Berichtszeitraum Mais-, Kleegras- und Extensivgrassilage sowie Festmist, Roggenschrot und Kartoffeln zur Verfügung. Der von anderen Betrieben gelieferte Festmist wird mit Hilfe einer Drehkolbenpumpe in den Reaktor gefördert und damit gegebenenfalls auch Gärgut aus dem Nachgärer in den Reaktor zurückgeführt. Die Temperierung der Behälter erfolgt durch in Wand und Fußboden verlegte Heizungsrohre. Die Behälter sind durch 10 cm

dicke PU-Hartschaumplatten isoliert. Die Durchmischung in der ersten Stufe (Reaktor) erfolgt durch ein Großflügelrührwerk und ein Tauchmotorrührwerk. In der zweiten Stufe (Nachgärer) wird zu diesem Zweck ein Tauchmotorrührwerk eingesetzt. Das entstandene Biogas wird unter den 1,5 mm starken EPDM-Foliendächern des Reaktors und des Nachgärers gespeichert. Das Biogas wird durch das Einleiten von Luft entschwefelt und danach dem Blockheizkraftwerk (BHKW) (dreimal je 110 $kW_{el.}$) zur Strom- und Wärmeerzeugung zugeführt.

Der anfallende Gärrückstand ist für den Betrieb ein Dünger, denn das landwirtschaftliche Unternehmen kann nicht wie ein konventionell arbeitender Betrieb auf mineralischen Dünger zurückgreifen. Er wird auf den hofeigenen Flächen als Düngestoff eingesetzt bzw. zum Teil an umliegende landwirtschaftliche Betriebe verkauft.

2.1.1.2 Biogasanlage Dolgelin

Die Biogasanlage Dolgelin arbeitet auf der Basis eines zweistufigen mesophilen Nassvergärungsverfahrens. Es handelt sich um eine Durchflussspeicheranlage. Die Biogasanlage besteht aus einem Reaktor mit Betondeckel, einem Nachgärer und einem Endlager aus Beton, jeweils mit Foliendach (Abbildung 2). Reaktor und Nachgärer sind über einen Freispiegelüberlauf miteinander verbunden.

- Reaktor: 940 m^3
- Nachgärer: 900 m^3
- Endlager: 1000 m^3

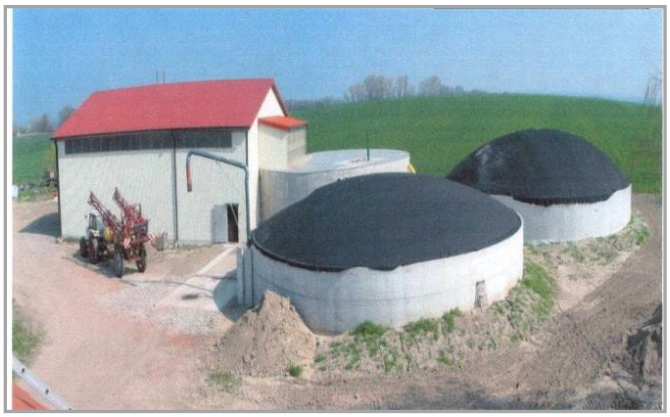

Abbildung 2: Biogasanlage Dolgelin - Reaktor, Nachgärer und Endlager;
Quelle: M. Schulze

Die hauptsächlichen Eingangssubstrate sind Maissilage, Roggensilage und Roggenschrot.

Die Durchmischung in der ersten Stufe (Reaktor) erfolgt durch ein Großflügelrührwerk, in der zweiten Stufe (Nachgärer) durch ein hydraulisches Tauchmotorrührwerk. Im Endlager wird ein Tauchpropeller eingesetzt. Das entstandene Biogas wird in dem Nachgärer und

dem Endlager unter Foliendächern gespeichert und anschließend in zwei BHKWs (jeweils 250 KW_{el}) in elektrische und thermische Energie umgewandelt. Der anfallende Gärrückstand wird im Endlager gesammelt und als Düngestoff auf den hofeigenen Flächen eingesetzt.

2.1.1.3 Biogasanlage Groß Kreutz

In Groß Kreutz wird eine einstufige Durchfluss-Biogasanlage betrieben. Als Eingangssubstrate werden Rindergülle aus den betriebseigenen Ställen der Milchviehhaltung sowie Maissilage und Getreide in die Anlage eingebracht. Das Material wird im mesophilen Bereich vergoren.

Abbildung 3: Biogasanlage Groß Kreutz; Reaktor

Anders als bei den beiden Biogasanlagen in Püggen und Dolgelin handelt es sich in Groß Kreutz nicht um eine Durchflussspeicheranlage, sondern um eine einstufige Anlage mit einer innovativen Reaktorform (Abbildung 3). Der Reaktor Typ Vera 700 wurde von der Firma Biowatt Energy GmbH aus Hamburg geliefert. Er besteht aus Stahlbeton mit einem Arbeitsvolumen von 630 m³ und ist außen mit einem Wärmeverbundsystem gedämmt. Eine Längstrennung in der Mitte des Reaktors erzwingt eine Ringführung des Substratgemisches. Dieses wird durch zwei stehende Rührwerke mit jeweils zwei Rührflügeln durchmischt. Das erzeugte Biogas wird in einem 180 m^3 Foliendachspeicher aufgefangen. Über die zentrale Pumpstation, bestehend aus einer selbstansaugenden Drehkolbenpumpe und einem System automatischer Schieber, wird sowohl Substrat zugeführt als auch der Gärrückstand abgeführt. Um ein pumpfähiges Substrat zu erzeugen, werden die Feststoffe vorher über einen Schubboden und eine Förderschnecke in ein Rührwerk befördert, dort zerkleinert und mit Gärsubstrat aus dem Reaktor vermischt. Das BHKW (80 kW_{el}) besteht aus einem 4-Zylinder-Biogas-Zündstrahlmotor und einem Synchrongenerator. Der erzeugte Strom wird vollständig in das öffentliche Netz eingespeist, die abgegebene Wärmeleistung wird primär für den

Reaktor benötigt, ferner für die Beheizung der umliegenden Gebäude verwendet. Der Gärrückstand wird in ein offenes Endlager gepumpt und als Düngestoff auf den betriebseigenen Ackerflächen genutzt.

2.1.1.4 Probenahme der Gärrückstände

Die stoffliche Analyse der Gärrückstände wurde für alle drei Anlagen ab März 2006 geplant. Der Probenahmeplan beinhaltete zunächst einmal wöchentlich Proben aus dem Nachgärer (Probe Nachgärer) und dem Endlager (Probe Endlager) und jeweils eine Mischprobe von den Ausgangssubstraten (Probe Ausgangssubstrat) der einzelnen Biogasanlagen zu nehmen. Die Beprobung des Gärmediums aus dem Reaktor erfolgte 14-tägig (Probe Reaktor) (vgl. Tabelle 2).
Im Jahr 2006 konnte die Biogasanlage in Püggen entsprechend beprobt werden. Allerdings beschränkten sich die Probenahmen aus logistischen Gründen nur auf die Gärmedien. Die Ausgangssubstrate wurden jeweils nur einmal in allen drei Anlagen analysiert. Die Probenahme in der Biogasanlage in Dolgelin musste wegen einem Rührwerksausfall und erneutem Anfahren der Anlage für 3 Monate (September bis November 2006) unterbrochen werden.
In der Biogasanlage Groß Kreutz wurde ein mehrmonatiger Umbau des Blockheizkraftwerkes auf eine höhere Leistung vorgenommen. Eine Beprobung der beiden letztgenannten Anlagen war erst ab Oktober 2006 bzw. 2007 möglich. 2007 wurde die Probenahme in den Anlagen Dolgelin und Püggen auf einmal monatlich reduziert. Ausnahme war die Biogasanlage in Groß Kreutz, wo die Probenahme 14-tägig statt fand.

Tabelle 2: Probenahme in den Biogasanlagen Dolgelin (D), Püggen (P) und Groß Kreutz (GK)

Biogasanlage	Reaktor	Nachgärer	Zulauf Endlager	Endlager
D	x	x		x
P	x	x		x
GK			x	x

Die Probenahme der Gärrückstände fand bei der Biogasanlage Püggen im Reaktor, im Nachgärer, am Überlauf zwischen Nachgärbehälter und Endlager (zur Restgasbestimmung) bzw. direkt aus dem Endlager (nur nach Durchmischung und vor Ausbringung bzw. Verkauf) statt. Bei den Anlagen Dolgelin und Groß Kreutz wurden die Proben an der Pumpenstation von Nachgärer und Endlager entnommen. Die

Gülleprobe und die Endlagerprobe der Biogasanlage Groß Kreutz stammten direkt aus der Güllegrube bzw. dem Endlager und wurden mit einem Probenzieher entnommen.

2.1.2 Feldversuche - Standortbeschreibungen und Versuchsaufbau

Zur Untersuchung der Wirkung einer pflanzenbaulichen Verwertung von Gärrückständen wurden im Rahmen des Projektes Parzellenfeld- und Praxisversuche durchgeführt. Da sowohl der Boden als auch das Klima eines Standortes sowie die Witterung im Versuchsjahr einen Einfluss auf die Ergebnisse von Feldversuchen haben, werden diese im Folgenden beschrieben.

2.1.2.1 Bodeneigenschaften an den Versuchsstandorten

Der vorherrschende Bodentyp am Standort der Parzellenfeldversuche (Berlin-Dahlem) ist Parabraunerde mit schwachen Merkmalen der Fahlerde (FAO-Klassifikation: Albic Luvisol). Mit 73 % Sand, 20 % Schluff und <8 % Ton wird die Bodenkrume als schwach lehmiger Sand bezeichnet. Die Praxisversuche wurden in Dolgelin (Brandenburg) und Püggen (Niedersachsen) durchgeführt. An beiden Standorten sind die Böden mit 61 % Sand, 34 bzw. 33 % Schluff und 6 % Ton s. g. mittel schluffige Sande (Tabelle 3).

Tabelle 3: Korngrößenverteilung der Böden an den Versuchsstandorten Berlin, Dolgelin und Püggen

Standorte	Korngrößenanteile [%]					
	Sand	Schluff	Grobschluff	Mitelschluff	Feinschluff	Ton
Berlin	**72,6**	**19,7**	9,0	7,7	3,0	**7,7**
Dolgelin	**60,7**	**33,7**	17,6	9,1	7,1	**5,5**
Püggen	**60,8**	**33,2**	17,6	9,6	6,0	**6,0**

Die chemischen Bodeneigenschaften der drei Standorte sind in Tabelle 4 dargestellt.

Tabelle 4: Bodenchemische Parameter vor Versuchsbeginn an den Versuchsstandorten Berlin, Dolgelin und Püggen

Standorte	pH-Wert	C_{ges}	C_{hwl}	N_{ges}	N_{hwl}	P	K	C/N
		[mg 100 g^{-1} Boden]						
Berlin	6,8	1062	42	69	7	36	28	15
Dolgelin	5,9	817	59	64	10	8	18	13
Püggen	4,7	1025	67	76	10	9	9	14

Die pH-Werte der Böden reichen von sehr gering (4,7 in Püggen) über optimal (5,9 in Dolgelin) bis hoch in Berlin-Dahlem mit einem pH-Wert von 6,8. Die Gesamtkohlenstoffgehalte (C_{ges}) liegen zwischen 817 und 1062 mg 100 g^{-1} Boden. Da der Boden bis in ca. 60 cm Tiefe nicht ausgesprochen carbonathaltig ist, kann der Gehalt an Gesamtkohlenstoff (C_{ges}) dem des organischen Kohlenstoffs (C_{org}) gleichgesetzt werden. Die C_{org}-Gehalte liegen damit zwischen 0,8 und 1,1 %, was für mittel schluffige Sande standortspezifisch ist. Der heißwasserlösliche Kohlenstoff bzw. Stickstoff (C_{hwl} und N_{hwl}) ist ein Maßstab für die umsetzbare organische Substanz. Die C_{hwl}-Gehalte liegen mit 42 bis 67 mg 100 g^{-1} Boden an allen drei Standorten nach KÖRSCHENS & SCHULZ (1999)[30] in einem sehr hohen Bereich. An den Praxisversuchsstandorten sind nicht nur die Gehalte höher als in Dahlem, sondern auch die Anteile am Gesamtkohlenstoffgehalt. Mit 7 % vom C_{ges} ist der Anteil in Dolgelin und Püggen hoch, in Dahlem mit 4 % in einem mittleren Bereich. Die Anteile von N_{hwl} an N_{ges} liegen zwischen 10 und 16 % und damit an allen Standorten sehr hoch. Die C/N-Verhältnisse liegen in einem für Ackerböden typischen Bereich zwischen 13 und 15. Bezüglich der Phosphor- und Kaliumversorgung ist der Boden in Berlin-Dahlem in die Gehaltsklasse E (sehr hoch) einzuordnen. In Dolgelin ist der Phosphorgehalt mit 8 mg 100 g^{-1} Boden in einem optimalen Bereich (Klasse C), der Kaliumgehalt ist mit 18 mg 100 g^{-1} Boden dagegen hoch (Klasse D). In Püggen liegt der Phosphorgehalt mit 9 mg 100 g^{-1} Boden in einem hohen Bereich (Klasse D) und der Kaliumgehalt ist mit 9 mg 100 g^{-1} Boden optimal (Klasse C).

2.1.2.2 Klima der Versuchsstandorte und Witterung in den Versuchsjahren

Parzellenfeldversuche

Der Intensivversuchsstandort Berlin-Dahlem liegt 52° 28“ nördlicher Breite, 13° 18“ östlicher Länge und auf 51 m ü. NN. Das Klima ist ozeanisch bis kontinental geprägt. Im langjährigen Mittel (1971 bis 2000) beträgt die Jahresdurchschnittstemperatur 9,6 °C und die Niederschlagshöhe 540 mm.

Abbildung 4 zeigt die Jahresdurchschnittstemperaturen im langjährigen Mittel (1971-2000) im Vergleich zu den Versuchsjahren 2006 und 2007.

[30] Körschens, M. u. Schulz, E.: „Die organische Bodensubstanz. Dynamik – Reproduktion - ökonomisch und ökologisch begründete Richtwerte“. UFZ-Bericht Nr. 13/1999. (1999)

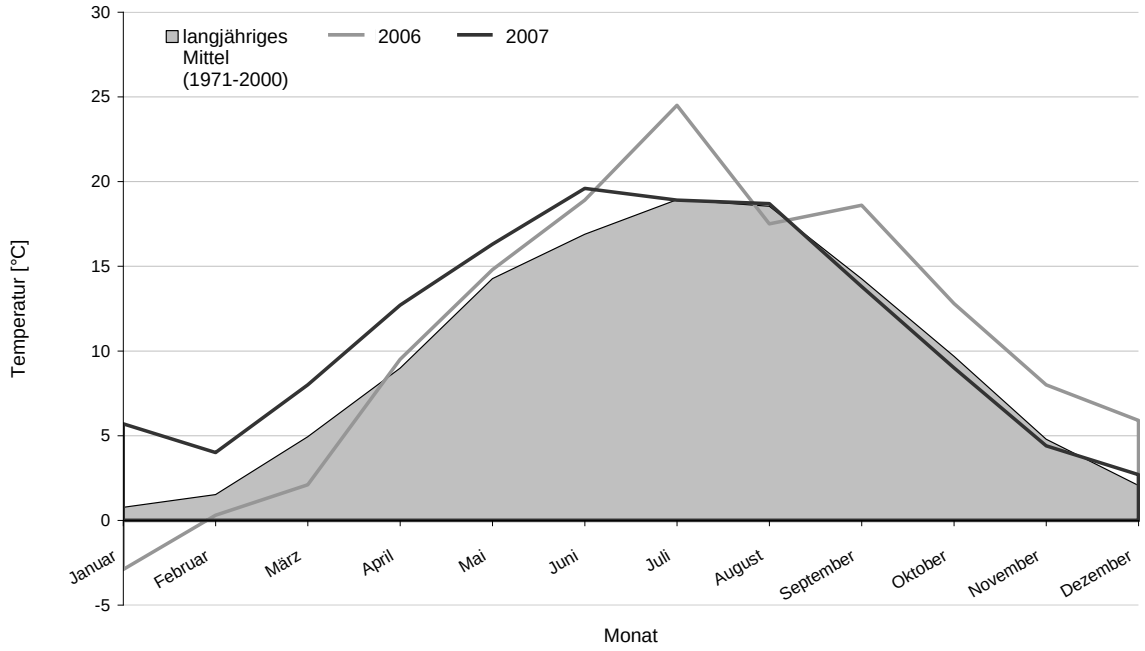

Abbildung 4: Langjähriges Mittel (1971-2000) der Lufttemperatur in Berlin-Dahlem im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007

In beiden Versuchsjahren lag die Lufttemperatur im Jahresmittel mit 10,8 °C (2006) und 11,2 °C (2007) über dem langjährigen Mittel. In Folge des ungewöhnlich langen und kalten Winters 2005/2006 verzögerte sich der Beginn der Vegetationsperiode 2006 auf den 26. März (langjähriger Durchschnitt: 10. März). Die Frühjahrestemperaturen waren dann jedoch ausgeglichen und der Sommer sehr warm mit Ausnahme des Monats August. Im Winter herrschten im Gegensatz zum Vorjahr sehr milde Temperaturen, welche einen frühen Vegetationsbeginn verursachten (25. Februar). Die Sommertemperaturen waren sehr ausgeglichen. In Abbildung 5 sind die Niederschläge im langjährigen Mittel (1971-2000) im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren dargestellt. Die Jahresniederschlagshöhe im Jahr 2006 betrug mit 488 mm nur 90 % des langjährigen Mittels. Eine andauernde Trockenperiode im Juni wirkte sich negativ auf die Ertragsbildung des im Versuch angebauten Sommerweizens aus. Im Juli und August fielen dagegen überdurchschnittlich hohe Niederschläge.

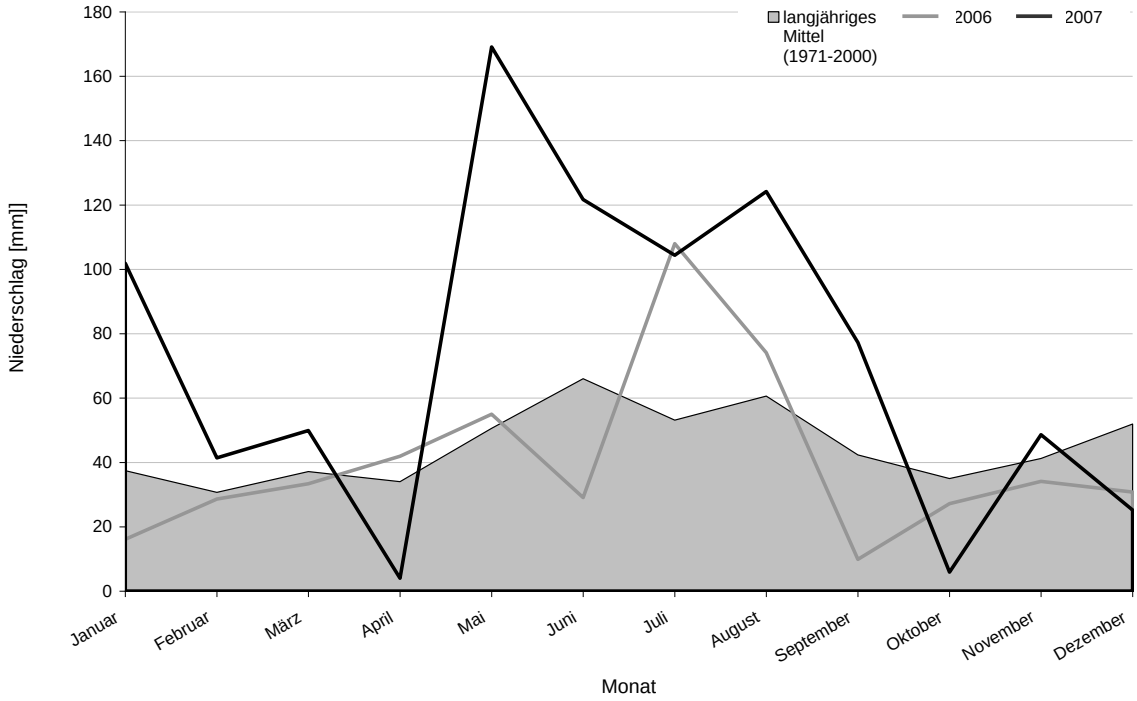

Abbildung 5: Langjähriges Mittel (1971-2000) der Niederschläge in Berlin-Dahlem im Vergleich zu den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007

Das Versuchsjahr 2007 war mit 874 mm sehr niederschlagsreich. Der Trockenphase im Frühjahr, in deren Folge der angebaute Sommerweizen starke Trockenschäden erlitt und das Auflaufen der Maispflanzen verzögert wurde, folgte eine sehr niederschlagsreiche Zeit von Mai bis September.

Praxisversuche

Der Versuchsstandort Dolgelin liegt im östlichen Brandenburg mit der geographischen Lage 52° 30“ nördliche Breite, 14° 24“ östliche Länge und 46 m ü. NN. Auch hier ist das Klima ozeanisch bis kontinental geprägt. Im langjährigen Mittel beträgt die jährliche Niederschlagshöhe 537 mm und die Jahresdurchschnittstemperatur liegt bei 8,8 °C (Meteorologische Station Müncheberg). Der Versuchsstandort Püggen liegt im Wendland im östlichen Niedersachsen. Die geographische Lage ist 52° 57“ nördlicher Breite, 11° 01“ östlicher Länge und 28 m ü. NN. Im langjährigen Mittel liegen die Niederschlagshöhen hier bei 523 mm und die Durchschnittstemperatur bei 8,9 °C (Meteorologische Station Lüchow). Die Temperatur- und Niederschlagsdaten der langjährigen Mittel sowie der Jahre 2006 und 2007 sind in Tabelle 5 dargestellt.

Tabelle 5: Monatliche Durchschnittstemperaturen und Niederschlagshöhen des langjährigen Mittels (1971-2000) sowie der Jahre 2006 und 2007 an den Standorten Dolgelin (Station Müncheberg) und Püggen (Station Lüchow); MW = Mittelwert

Monat	Dolgelin			Püggen		
	Langj. Mittel	2006	2007	Langj. Mittel	2006	2007
Temperatur [° C]						
Januar	-0,4	-4,5	5,2	0,7	-2,6	5,4
Februar	0,5	-0,4	2,7	1,1	0,5	3,7
März	3,7	1,0	6,9	4,3	1,2	7,1
April	7,9	8,8	11,0	7,8	8,2	10,9
Mai	13,5	13,6	15,2	13,0	13,4	14,3
Juni	16,4	17,9	18,7	15,6	16,8	17,7
Juli	18,3	23,4	18,1	17,7	22,2	17,5
August	17,9	17,2	17,9	17,3	16,7	17,4
September	13,6	17,6	13,3	13,4	17,5	13,8
Oktober	8,8	11,9	8,3	9,0	12,5	8,6
November	4,0	7,3	3,6	4,6	7,4	4,6
Dezember	1,1	5,4	2,2	2,1	5,9	2,8
MW	**8,8**	**9,9**	**10,3**	**8,9**	**10,0**	**10,3**
Niederschlag [mm]						
Januar	39,2	12,8	100,0	41,9	22,5	91,0
Februar	30,4	23,9	48,0	30,4	26,6	66,7
März	36,3	31,7	50,0	37,2	61,9	56,7
April	35,3	40,8	1,4	36,2	49,9	2,5
Mai	52,0	43,5	108,1	46,9	63,8	100,5
Juni	65,2	18,0	(121,7)*	57,6	24,7	81,6
Juli	53,2	25,2	98,2	61,6	41,4	96,5
August	53,4	70,4	91,3	48,3	66,0	108,1
September	43,2	17,5	(77,3)*	38,9	10,3	59,9
Oktober	37,4	25,5	5,9	38,8	43,1	38,7
November	40,1	29,5	45,2	38,4	37,6	55,8
Dezember	51,4	24,3	29,3	47,0	22,1	30,8
Summe	**537,2**	**363,1**	**776,4**	**523,4**	**469,9**	**788,8**

*Fehlwert, Wert in Klammern aus Berlin-Dahlem übernommen

Auch an diesen Standorten lagen in den Versuchsjahren 2006 und 2007 die Jahresdurchschnittstemperaturen deutlich über dem langjährigen Mittel. In Dolgelin betrugen sie 9,9 °C (2006) und 10,3 °C (2007), in Püggen 10,0 °C (2006) und 10,3 °C (2007). Die Jahresniederschlagshöhen waren im Jahr 2006 mit 363 mm (Dolgelin) und 470 mm (Püggen) deutlich geringer und im Jahr 2007 mit 776 mm (Dolgelin) und 789 mm (Püggen) deutlich höher als im langjährigen Mittel.

2.1.2.3 Versuchsaufbau

Parzellenfeldversuche

Die Parzellenfeldversuche waren als zweifaktorielle Spaltanlage mit vierfacher Wiederholung angelegt (Abbildung 6). Faktor A (Großteilstücke) war dabei die Düngerart und Faktor B (Kleinteilstücke) die N-Aufwandmenge.

- Faktor A: Gärrückstand aus der Biogasanlage in Püggen (GRS P)
  Gärrückstand aus der Biogasanlage in Dolgelin (GRS D)
  Gärrückstand aus der Biogasanlage in Groß Kreutz (GRS GK)
  Mineraldünger (Kalkammonsalpeter, Tripelsuperphosphat, Korn-Kali)

- Faktor B: N0: ungedüngte Kontrolle (0 kg ha^{-1} N)
  N1: 50 kg ha^{-1} N
  N2: 100 kg ha^{-1} N
  N3: 150 kg ha^{-1} N

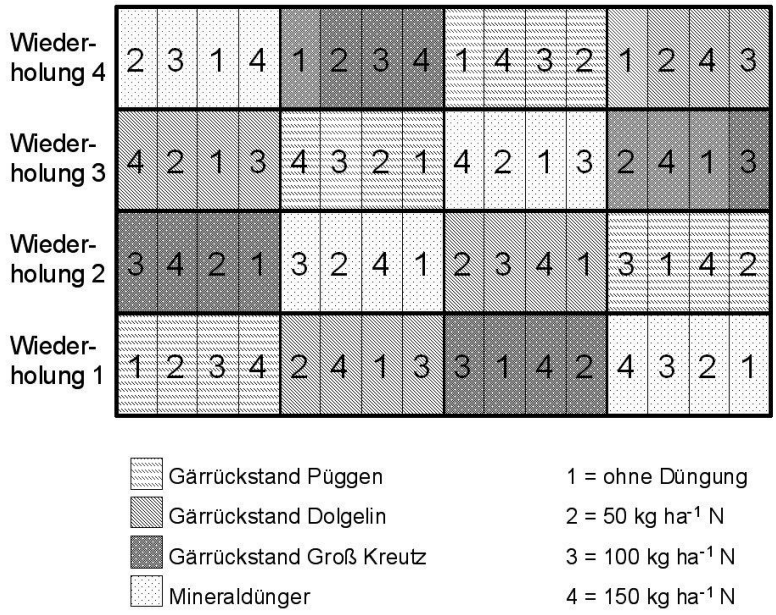

Abbildung 6: Anlageplan der Parzellenfeldversuche

Als Prüffrüchte dienten in beiden Versuchsjahren Silomais und Sommerweizen, wobei die Versuchsflächen im zweiten Jahr getauscht wurden. Notwendige Pflanzenschutzmaßnahmen wurden jeweils in allen Parzellen gleichermaßen durchgeführt und werden hier nicht gesondert aufgeführt.

Der Sommerweizen (Sorte „Picolo“) hatte im Jahr 2006 als Vorfrucht Sommerölfrüchte und wurde am 13.04.2006 mit 400 Körnern m^{-2} ausgesät. Die Ernte fand am 01.08.2006 statt. Die Vegetationszeit betrug somit ca. 15 ½ Wochen, in denen 218 mm Niederschlag fielen. Die Gärrückstände wurden am 12.04.2006 (anschließend Einarbeitung) und am 03.05.2006 ausgebracht, der Mineraldünger am 05.05.2006. Im Jahr 2007 war die Vorfrucht Silomais. Die Aussaat (Sorte und Aussaatdichte wie 2006) fand am 30.03.2007 und die Ernte am 15.08.2007 statt, so dass die Vegetationszeit etwa 19 ½ Wochen betrug, in der 432 mm Niederschlag fielen. Die Gärrückstände wurden am 28.03.2007, die Mineraldünger am 29.03.2007 ausgebracht und beides anschließend eingearbeitet.

Der Silomais (Sorte „Lucas“, Siloreifezahl 240) hatte im Jahr 2006 Körnermais zur Vorfrucht und wurde am 28.04.2006 mit 8 Körnern m^{-2} ausgesät. Die Ernte erfolgte am 05.09.2006, so dass sich die Vegetationszeit auf 18 ½ Wochen belief, in denen 281 mm Niederschlag fielen. Die Gärrückstandsausbringung erfolgte am 26./27.04.2006 mit anschließender Einarbeitung, die Mineraldünger wurden am 12.05.2006 ausgebracht. Im Jahr 2007 war die Vorfrucht Sommerweizen (mit anschließender Zwischenfrucht Ölrettich). Der Mais (Sorte und Aussaatdichte wie 2006) wurde am 26.04.2007 ausgesät und am 27.09.2007 geerntet, so dass die Vegetationszeit in diesem Jahr 22 Wochen betrug, in der 581 mm Niederschlag fielen. Die Gärrückstände wurden am 24.04.2007, der Mineraldünger am 25.04.2007 ausgebracht und beides anschließend eingearbeitet.

Die Eigenschaften und Nährstoffgehalte der verwendeten Gärrückstände sind in Tabelle 6 aufgeführt.

Tabelle 6: Eigenschaften und Nährstoffgehalte der in den Parzellenfeldversuchen eingesetzten Gärrückstände

Parameter	GRS D		GRS P		GRS GK	
	2006	2007	2006	2007	2006	2007
TS [%]	7,15	7,04	6,71	8,40	4,86	4,97
oTS [% TS]	74,9	79,1	73,2	73,6	70,2	71,8
N_{ges} [% FM]	0,55	0,51	0,41	0,38	0,43	0,27
NH_4^+ [% FM]	0,36	0,41	0,24	0,19	0,26	0,21
P_{ges} [% FM]	0,08	0,07	0,06	0,07	0,05	0,05
K_{ges} [% FM]	0,47	0,45	0,45	0,46	0,41	0,33
pH-Wert	8,32	8,22	8,02	8,13	7,91	7,90

Größere Unterschiede weisen die Dünger im TS- und Stickstoffgehalt sowie im Anteil von Ammoniumstickstoff auf. Die Anteile von NH_4^+ am N_{ges} sind beim GRS D mit 66 % (2006) bzw. 80 % (2007) sehr hoch, GRS P weist mit 59 und 50 % die geringsten Anteile auf und der GRS GK liegt mit Anteilen von 61 und 78 % im mittleren Bereich.
Die auszubringenden Gärrückstandsmengen wurden anhand des Stickstoffgehaltes berechnet. Im Jahr 2006 sind infolge fehlerhafter Gärrückstandsanalysen zu hohe Düngermengen ausgebracht worden. Die mineralische P- und K-Düngung sollte als Mittelwert der drei Gärrückstände berechnet werden. Allerdings ergaben sich auch hier in beiden Versuchsjahren fehlerhafte Aufwandmengen. Die durch die vier Dünger in den beiden Versuchsjahren ausgebrachten Mengen der Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium sind in Tabelle 7 aufgeführt.

Tabelle 7: Ausgebrachte Nährstoffmengen (kg ha^{-1}) in den hoch gedüngten Varianten (N3) im Feldversuch in Berlin-Dahlem in den beiden Versuchsjahren 2006 und 2007

Dünger	2006			2007		
	N	P	K	N	P	K
	[kg ha^{-1}]					
GRS D	252	37	215	149	21	132
GRS P	194	28	213	150	28	182
GRS GK	373	43	355	142	26	173
Minerald.	150	233	203	150	37	148

Praxisversuche

Die Praxisversuche in Dolgelin und Püggen waren einfaktoriell angelegt, indem der jeweils hofeigene Gärrückstand in den Aufwandmengen 0, 50, 100 und 150 kg ha^{-1} N (bzw. 0, 50, 150, 190 kg ha^{-1} N am Standort Püggen im Jahr 2006) getestet wurde. Diese vier Varianten wurden in Streifen (Bearbeitungsbreite x 75 m) nebeneinander angelegt und aus diesen jeweils fünf Quadrate (Pseudowiederholungen) geerntet (Abbildung 7). Die Größe der Quadrate betrug 1 m^{-2} im Roggen und 1,5 m^2 für Mais im ersten Versuchsjahr bzw. 2 m^2 im Jahr 2007.

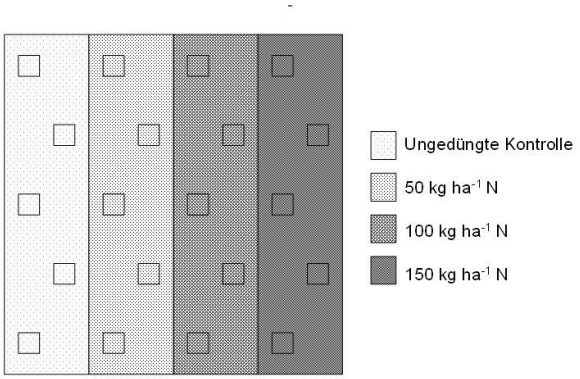

Abbildung 7: Anlageplan der Praxisversuche

An beiden Standorten wurde Silomais als Prüffrucht genutzt. In Dolgelin ist zusätzlich Winterroggen geprüft worden, welcher für Ganzpflanzensilage genutzt wurde (Ernte etwa zu BBCH 83).

Im Jahr 2006 wurde in Dolgelin die Maissorte *Taxxoa* mit 10 Körnern m^{-2} am 29.04.2006 ausgesät (Vorfrucht Roggen). Die Ausbringung des Gärrückstandes mit anschließender Einarbeitung erfolgte bereits am 11.04.2006, die Ernte fand am 18.09.2006 statt. Im Jahr 2007 wurde die Sorte *Nexos* gewählt und mit 8 Körnern m^{-2} am 19.04.2007 ausgesät (Vorfrucht Sudangras). Die Gärrückstandsausbringung mit anschließender Einarbeitung erfolgte am 13.04.2007, die Ernte fand am 26.09.2007 statt.

Für die Prüffrucht Winterroggen wurde im Versuchsjahr 2006 die Sorte *Valett* mit 80 kg ha^{-1} Saatgut am 02.10.2005 ausgesät (Vorfrucht Mais). Die Düngung erfolgte im Frühjahr am 11.04.2006, die Ernte fand am 22.06.2006 statt. Im Jahr 2007 wurde die Sorte *Askari* mit 70 kg ha^{-1} Saatgut am 08.10.2006 ausgesät, am 28.02.2007 gedüngt (Vorfrucht Mais) und am 13.06.2007 geerntet. Der Standort der Parzellen war identisch mit denen des Maisversuchs im Jahr 2006, so dass hier ein zweijähriger Effekt getestet wurde.

In Püggen wurde im Jahr 2006 die Maissorte *Gavott* mit 8 Körnern m^{-2} am 23.05.2006 ausgesät (Vorfrucht Grünroggen). Die Düngung fand in zwei Gaben zu den Terminen 23.06.2006 (0, 50, 100, 100 kg ha^{-1} N) und 10.07.2006 (0, 0, 50, 90 kg ha^{-1} N) statt. Die Ernte erfolgte am 26.09.2006. Im Jahr 2007 wurde die gleiche Sorte mit 10 Körnern m^{-2} am 25.04.2007 ausgesät (vorher Brache). Die Düngung erfolgte zu den Terminen 04.06.2007 (0, 50, 75, 75 kg ha^{-1} N) und 01.07.2007 (0, 0, 25, 75 kg ha^{-1} N), geerntet wurde am 14.09.2007.

2.1.3 Untersuchungen an Gärrückständen

2.1.3.1 Generelle chemische Analysen

Nach Probenahme wurden jeweils zwei Probenaliquote aus der Gärrückstandsprobe gebildet. Ein Aliquot wurde gefriergetrocknet. Das getrocknete Material wurde je nach anschließender Analysenmethode auf 0,5 mm oder 1 mm gemahlen. Die zur chemischen Analyse der Inhaltsstoffe der Gärrückstände verwendeten Methoden sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Verwendete Methoden für die Analyse verschiedener Inhaltsstoffe in den Gärmedien

Parameter	Methode	
TS	Gravimetrisch: Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz	
oTS	Gravimetrisch: Trocknung bei 550 °C bis zur Gewichtskonstanz	
pH-Wert	Elektrometrisch	
C, N, S	Verbrennung nach Dumas mit vario MAX CNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau), DIN ISO 10694	
N_{ges}	nach Kjeldahl	
NH_4^+	nach Kjeldahl	
P_{ges}, K_{ges}	Mikrowellenaufschluss mit Mars Express (CEM, North Carolina, USA), Messung des Phosphors spektralphotometrisch mit CFSA, Messung des Kaliums mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)	
P_{DL} und K_{DL}	Aufschluss nach Doppellactat-Methode, P wurde spektralphotometrisch gemessen, K mittels Atomabsorptionsspektrometrie, Methode A 6.2.1.2 aus Methodenbuch VDLUFA	
Cd, Cu, Pb, Zn	Mikrowellenaufschluss mit Mars Express (CEM, North Carolina, USA), Messung mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS)	
IES	GC-MS/MS mit chemischer Ionisierung, siehe Kapitel 2.1.3.2	
RP	Kjeldahl-N x 6,25 (Berechnung des Rohproteingehaltes mit Faktor 6,25 unter der Annahme des mittleren N-Gehaltes der Proteine von 16 %)	
Rfa	Bestimmung der in Schwefelsäure und Kalilauge unlöslichen organischen Anteile, Methode 6.1.1 aus Methodenbuch III 3. Erg. VDLUFA (1993)	
Rfett	Bestimmung der in Petrolether löslichen Anteile nach Säureaufschluss, Methode 5.1.1 aus Methodenbuch III 2. Erg. VDLUFA (1988)	
NDF	Summe der Gerüstsubstanzen als Rückstand nach Kochen in neutraler Detergentienlösung	Bestimmung im Fibertec-System 1020 Fa. Foss ehemals Fa. Tecator
ADF	Rückstand nach Kochen in schwefelsaurer Detergentienlösung	
ADL	Weiterbehandlung der ADF mit 72%iger Schwefelsäure zur Hydrolysierung der Cellulose	

2.1.3.2 Analyse freier Indol-3-essigsäure in Gärrückständen

Am Beispiel des Auxins IES wurde untersucht, ob Gärrückstände aus Biogasanlagen Träger von natürlichen, biologisch aktiven Pflanzenwachstumsregulatoren sein können, die aus dem mikrobiellen Stoffwechsel stammen. Die Bestimmung der freien Indol-3-essigsäure im Gärrückstand erfolgte auf der Basis der GS/MS-MS-Analyse nach folgenden wesentlichen Schritten:

- Gefriertrocknung / Zerkleinerung der Proben zur weiteren Analyse
- Einwaage der Probe und Methanolextraktion
- Flüssig-flüssig-Extraktion bei pH <3; Methanol:Wasser:Chloroform
- Aufnahme von IES in der Chloroformphase
- Festphasenextraktion (Aminopropylphase) mit Mini-FPE-Säulen
- GC-MS/MS-Bestimmung der freien IES mit chemischer Ionisierung
- Kalibrierung mit isotopenmarkiertem Standard (d2-IES)

2.1.3.3 Spektrophotometrische Untersuchungen

Um Gärrückstände hinsichtlich eines Vorkommens der bioaktiven Indol-3-essigsäure zunächst schnell einschätzen zu können und damit eine Möglichkeit des Screenings zur Verfügung zu stellen, wurden UV-spektrophotometrische Untersuchungen an ethanolischen Extrakten von Gärrückständen durchgeführt. Dabei soll die strukturelle Eigenschaft von Indol-3-essigsäure genutzt werden, im Wellenlängenbereich um 280 nm ein typisches Triple-Absorptionsspektrum aufzuweisen (Abbildung 8).

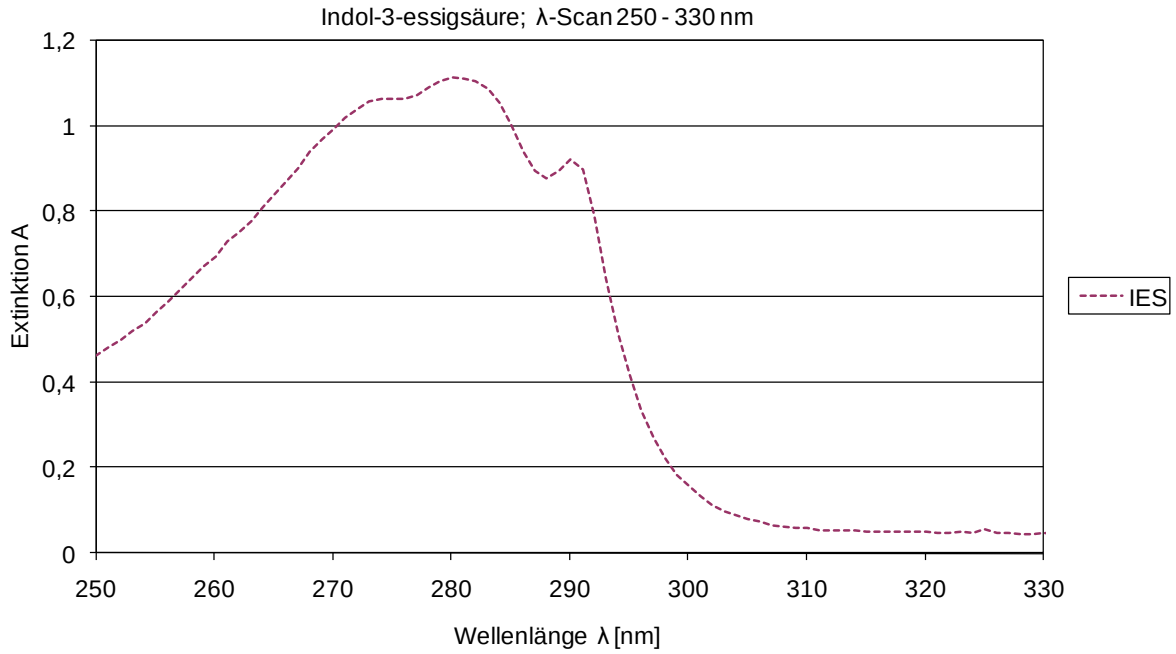

Abbildung 8: UV-Spektrum von Indol-3-essigsäure in 80 %igem Ethanol (λ_{max} = 279 nm)

Extraktion: Für die Vorbereitung der Gärrückstände wurde 1 g gefriergetrocknetes Probenmaterial in 100 ml 80%igem Ethanol 24 h bei 10 °C extrahiert. Danach wurde der Extrakt über Filter Whatman No.1 gefiltert und nochmals mit 100 ml 80%igem Ethanol gewaschen. Diese ethanolische Lösung wurde für Screening-Untersuchungen ausgewählter Gärrückstände genutzt.

Extinktion: Die Bestimmung der Extinktion erfolgte mit einem Spektrophotometer (Helios Alpha, Thermo Fisher Scientific). Dabei wurden die Wellenlängen im UV-Bereich zwischen 200 - 340 nm gemessen. Zur Bestimmung in diesem Wellenlängenbereich wurden die Extraktlösungen direkt gemessen oder 1:100 bis 1:1000 (v/v) verdünnt und in einer Quarzglasküvette mit 1 cm Schichtdicke bestimmt.

Nach der Aufnahme eines UV-Spektrums im Bereich von 250 – 350 nm gegenüber Ethanol (80%ig) als Leerwert wurden die maximalen Extinktionen (E_{max}) aus dem erhaltenen UV-Spektrum ermittelt.

2.1.3.4 Biologische Untersuchungen

2.1.3.4.1 Restgaspotenzialuntersuchungen

In den Versuchsjahren 2007 und 2008 wurde jeweils eine Restgaspotenzialbestimmung der Gärrückstände durchgeführt. Das Probenmaterial wurde in allen drei Anlagen als Mischprobe dem Zulauf zum Endlager entnommen.

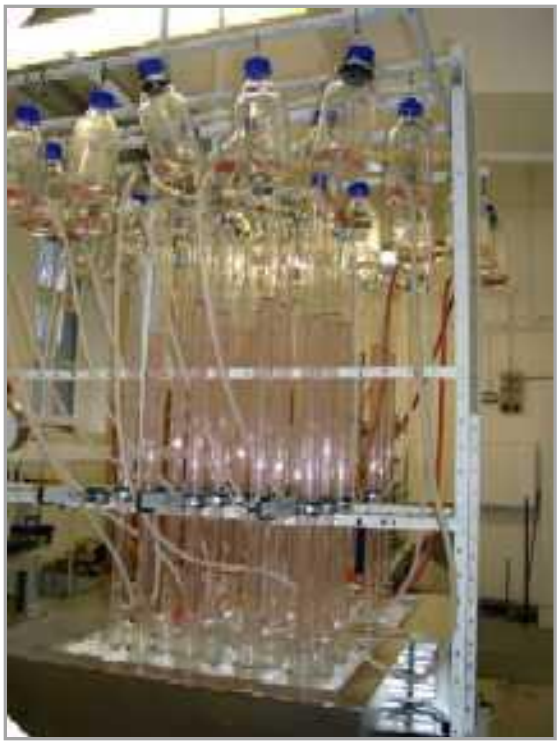

Abbildung 9: Eudiometer-Apparatur zur Restgaspotenzialbestimmung nach VDI-Richtlinie 4630

Versuchsaufbau und -durchführung: Die spezifische Restgasproduktion der Gärrückstände wurde in Eudiometer-Messzellen unter kontrollierten Gärbedingungen gemessen (siehe Abbildung 9). Die Untersuchung erfolgte nach VDI-Richtlinie 4630.

Die Eudiometer-Apparatur besteht aus einer Glassäule, die mit einer Sperrflüssigkeit (HCl-Lösung, angesäuert auf pH 1,5) gefüllt ist. Die Säule ist am unteren Ende mit einem Ausgleichsgefäß verbunden sowie mit dem Reaktionsgefäß, in dem sich das Probenmaterial, der Gärrückstand befindet. Es wurden je 300 g Gärrückstand in die Reaktionsgefäße eingewogen, die in einem Wasserbad temperiert wurden. Die Untersuchungen fanden bei mesophiler (38 °C) und psychrophiler (20 °C) Gärtemperatur statt. Die erstgenannte Temperatur spiegelt die Prozesstemperatur in den Biogasanlagen wieder. Die Untersuchungstemperatur bei 20 °C dient der Simulation der Lagerbedingungen. Das in den Reaktionsgefäßen gebildete Biogas verdrängt die Sperrflüssigkeit aus der Säule in die Ausgleichsgefäße. Die produzierte Biogasmenge wurde an der Säulenskalierung abgelesen. Bei fast vollständiger Verdrängung der Sperrflüssigkeit wurde das Gas in speziellen Gasbeuteln (Fa. Tesseraux) abgelassen und anschließend mit einem Gasmessgerät (Fa. Ansyco) die Bestandteile Methan, Kohlendioxid und Sauerstoff analysiert. Die Proben wurden im Dreifachansatz untersucht. Die Versuchsdauer betrug, wenn nicht anders benannt, 90 Tage.

Prüfparameter: Zur Bewertung des Restgaspotenzials wurde die in diesem Zeitraum gebildete und auf Normbedingungen umgerechnete Biogas- bzw. Methangasmenge je kg organischer Substanz bestimmt. Eine Analytik bezüglich der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz, des pH-Wertes, der Pflanzennährstoffgehalte N, P, K, der Rohnährstoffgruppen (erweiterte Weender-Futtermittel-Analyse) sowie ausgewählter Schwermetalle und der Elemente C, N und S wurde an den Gärrückständen vor und nach Beendigung der Versuche durchgeführt.

2.1.3.4.2 Untersuchungen zur Pflanzenverträglichkeit der Gärrückstände

Die heute übliche stoffliche Charakterisierung der Gärrückstände ist noch nicht ausreichend. Tatsächlich ist auch die Kenntnis der biologischen Beschaffenheit und deren Einfluss auf das Pflanzenwachstum und die Pflanzenentwicklung ein relevantes Thema. Eine praktisch nur auf chemischen Parametern basierende Beurteilung reicht nicht aus, um die komplexen biologischen Eigenschaften eines Gärrückstandes auch beispielsweise in Bezug auf die Schaffung neuer Anwendungsbereiche zu bewerten. Zur Charakterisierung der biologischen Beschaffenheit sind Pflanzentests bzw. Biotests nützlich, die die chemischen Untersuchungen ergänzen. Pflanzen reagieren auf die Gesamtheit aller Faktoren eines Gärrückstandes und nicht ausschließlich auf einzelne Parameter. Sie decken somit qualitative Einschränkungen auf, welche mit den konventionell durchgeführten chemischen Analysen nicht erfasst werden.
Im Rahmen der Untersuchungen zur biologischen Beschaffenheit von Gärrückständen wurde ein Pflanzenverträglichkeitstest durchgeführt. Ziel war es, die Verträglichkeit von zwei ausgewählten Gärrückständen anhand der für die Pflanzenentwicklung relevanten Parameter zu bewerten.

Prüfmaterial: Als Prüfmaterial dienten Gärrückstände aus den Biogasanlagen D (Monofermentation) und GK (Kofermentation). Die Probenahme des Materials konnte in der Biogasanlage GK zum damaligen Zeitpunkt aus technischen Gründen nur aus dem Zulauf zum Endlager (GRS GK-EL) erfolgen. In der Biogasanlage D wurde Gärrückstand daher sowohl dem Nachgärer (GRS D-NG) als auch dem Endlager (GRS D-EL) entnommen.

Pflanzenmaterial: Als Prüffrucht kam die Mungbohne *Vigna radiata* (L.) Wilczek zum Einsatz (siehe Abbildung 10). Als Mischkomponente und Vergleichssubstrat wurde Einheitserde verwendet. Die Mungbohnen wurden vor der Aussaat 24 h in destilliertem Wasser aufgequollen und anschließend auf Filterpapier 72 h vorgekeimt.

Abbildung 10: Pflanzenverträglichkeitstest mit der Prüffrucht Mungbohne *(Vigna radiata)* und den GRS D und GK

Versuchsdurchführung: Die Versuchsvorschrift wurde für eine Anwendung von flüssigen Gärrückständen im Vergleich zur gängigen Methode für Kompost modifiziert (BGK, 1998)[31]. Da es bisher keine Vorgaben zur Prüfung der Pflanzenverträglichkeit von flüssigen Gärrückständen gibt, wurden die Konzentrationen an Gärrückstand je Gefäß an die Ausbringmengen der Gärrückstände in den Feldversuchen angepasst. Diese Konzentrationen entsprachen umgerechnet der in den pflanzenbaulichen Versuchen angewendeten 3 Stickstoffmengen von 50, 100, 150 kg ha^{-1} in je 4 Wiederholungen. Zusätzlich wurde eine sehr hohe, extreme Konzentration entsprechend 500 kg ha^{-1} N in das Versuchsprogramm aufgenommen. Zur Berechnung der Ausbringungsmengen in die Gefäße wurden zunächst mittlere N- und TS-Gehalte der Gärrückstände aus vorhergehenden Untersuchungen angenommen (Tabelle 9).

Tabelle 9: Mittlere N- und TS-Gehalte der GRS D und GK als Berechnungsgrundlage für die Ausbringung der GRS in den Stufen 50, 100, 150 und 500 kg ha^{-1} N im Pflanzenverträglichkeitstest

Gärrückstand	TS [%]	N [%]
GRS D	6,00	0,51
GRS GK	6,01	0,36

[31] Methodenbuch zur Analyse von Kompost, Kapitel II.5; Hrsg.: Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.; 4. Auflage (1998)

Des Weiteren wurden zwei Möglichkeiten der *Gärrückstandsausbringung* berücksichtigt. In der ersten Variante (I) wurde der Gärrückstand in allen Konzentrationsstufen auf die Bodenoberfläche im Topf ohne weitere Einarbeitung ausgebracht. In der zweiten Variante (II) wurde der Gärrückstand in den Boden eingearbeitet. Je Topf wurden fünf Mungbohnensamen ausgesät. Damit ergab sich die in Tabelle 10 dargestellte Versuchsanordnung.

Tabelle 10: Versuchsanordnung*) des Pflanzenverträglichkeitstests mit GRS D und GK

Gärrück-stand	Komponente	Entsprechend Stickstoff-Aufwandmenge [kg ha^{-1} N]				
		50	100	150	500	Kontrolle (ohne GRS)
GRS D-NG	Boden [g]	250,0	250,0	250,0	250,0	250,0
	GRS [g]	9,8	19,6	29,4	98,0	-
	Wasser [g]	125,8	116,6	107,4	42,8	135,0
GRS D-EL**)	Boden [g]	250,0	250,0	250,0	250,0	
	GRS [g]	9,8	19,6	29,4	98,0	
	Wasser [g]	125,8	116,6	107,4	42,8	
GRS GK-EL	Boden [g]	250,0	250,0	250,0	250,0	
	GRS [g]	14,0	28,0	42,0	140,1	
	Wasser [g]	121,8	108,7	95,5	3,4	

*) Versuchsanordnung gilt für Variante I und II (ohne und mit Bodeneinarbeitung)

**) GRS D-EL konnte aus versuchstechnischen Gründen nur in der Variante 1 getestet werden

Prüfmerkmale:

- Sprosshöhe gemessen nach 3, 5, 7, 10 und 12 Tagen; zusätzlich wurde an den entsprechenden Tagen der Wasserverlust ermittelt und mit destilliertem Wasser ausgeglichen
- Sprossfrischmasse nach der Ernte
- Sprosstrockenmasse nach der Ernte
- Wurzeltrockenmasse nach der Ernte

Zur Ermittlung der Trockenmasse wurden die Sprosse und ausgewaschenen Wurzeln bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und dann gewogen.

Die Versuche dienten darüber hinaus für eine Einschätzung der Wasserspeicher-fähigkeit von Gärrückständen im Boden. Sie fanden als offene Tests in Pflanztöpfen mit den Abmessungen 10,5 x 10,5 x 11 cm statt. Die Versuchsdauer betrug 12 Tage.

2.1.3.4.3 Inkubationsversuche zur Bildung von freier Indol-3-essigsäure in Gärrückständen

Zur Untersuchung der Fähigkeit zur Auxinbildung in Fermenterproben verschiedener Biogasanlagen am Beispiel der freien Indol-3-essigsäure wurden drei Batch-Versuche durchgeführt. Die Aminosäure Tryptophan fand hierbei als Auxin-Prekursor und Modellsubstrat Verwendung. Die Versuche waren wie folgt konzipiert:

a) Gärrückstand GK plus ausgewählte Ausgangsubstrate der Biogasanlage GK sowie Tryptophan (Vorversuch)
   - GRS GK + Gülle (166,7 g kg^{-1} GRS),
   - GRS GK + Silage (16,7 g kg^{-1} GRS) und
   - Tryptophan (0,2 g kg^{-1} GRS) sowie
   - Tryptophan (0,2 g kg^{-1} GRS und Glucose (2 g kg^{-1} GRS);

   (Versuchsdauer 35 d; Probenahme nach 7, 14 und 35 Tagen).

b) Gärrückstände D, P und GK plus Tryptophan
   - Tryptophan (0,4 g kg^{-1} GRS) sowie
   - Tryptophan (0,4 g kg^{-1} GRS) und Glucose (4 g kg^{-1} GRS);

   (Versuchsdauer 24 h).

c) Zeitverlauf der Auxinbildung am Beispiel des Gärrückstands D plus Tryptophan
   - Tryptophan (0,4 g kg^{-1} GRS) sowie
   - Tryptophan (0,4 g kg^{-1} GRS) und Glucose (4 g kg^{-1} GRS);

   (Versuchsdauer 120 h, Probenahme nach 24, 48, 72 und 120 h).

Für alle Versuche wurde frischer Gärrückstand aus dem Zulauf zum Endlager der jeweiligen Biogasanlage entnommen und fand noch am selben Tag der Probenahme für den Versuch Verwendung. Feststoffe im Gärrückstand wurden weitestgehend über ein Sieb mit 2 mm Porengröße abgetrennt. Danach wurden jeweils 300 g Gärrückstandsprobe und die entsprechenden Zusätze in 0,45 l-Glasflaschen eingewogen. Bei allen drei Versuchen wurde jeweils mindestens eine Gärrückstands-kontrolle ohne Zusätze mitgeführt. Die Reaktionsgefäße wurden bei 38 °C in einem

Wasserbad anaerob inkubiert. Die Durchführung der Versuche erfolgte, wenn nicht anders angegeben, in dreifacher Wiederholung.

Verwendete Chemikalien

- L-Tryptophan; Fa. Fluka, Art.-Nr. 93659
- D-Glucose, Fa. Roth, Art.-Nr. X997.1
- Indol-3-essigsäure; Fa. Fluka Art.-Nr. 57330

2.1.3.4.4 Bioassays zur auxin-analogen Wirkung von Gärrückständen

1. Bioassay zum Nachweis der Föderung der Adventivwurzelbildung von Mungbohnenkeimlingen (*Vigna radiata* L.)

Es wurde eine Biotest-Methode etabliert, wie sie zum Nachweis der stimulierenden Wirkung von Auxinen auf die Adventivwurzelbildung von auxinsensitiven Pflanzen genutzt wird. Der Bioassay musste mehrmals modifiziert werden und dient in seiner an dieser Stelle beschriebenen Form ganz allgemein dem Nachweis einer auxin-analogen Wirkung von Extrakten aus Gärrückständen in verschiedenen Verdünnungsstufen anhand der Untersuchung der Förderung der Adventivwurzelbildung von Mungbohnen-keimlingen.

2. Bioassay zum Nachweis der Hemmung der Wurzelbildung von Kressesamen (*Lepidium sativum* L.)

In der Literatur wurde zum Nachweis einer auxin-analogen Wirkung mehrfach ein Bioassay unter Verwendung von Samen der Kresse (*Lepidium sativum* L.) beschrieben. Eine auxin-analoge Wirkung wird dabei an Hand der Hemmung der Wurzelbildung bei Kressesamen demonstriert. Im Bereich von c[IES] 10^{-10} mol l^{-1} bis 10^{-12} mol l^{-1} wurde jedoch auch eine Förderung der Wurzelbildung beobachtet (MOEWUS et al., 1951)[32].
Dieser Test wurde somit zusätzlich in das Untersuchungsprogramm aufgenommen, da mit dieser Methode innerhalb von fünf Tagen Ergebnisse erzielt werden können, im Vergleich zu dem dreiwöchigen Mungbohnen-Bioassay.

[32]Moewus, F., Moewus, L., Skwarra, H.: „Nachweis von zwei Wuchsstoffen in Samen und Wurzeln der Kresse (Lepidium Sativum)“. Planta, Bd. 40, B. 254-264. (1952)

Verwendete Chemikalien

- Methanol; Fa. Roth, ≥99,5 %, DAB, reinst, Art.-Nr. CP 43.3
- Indol-3-essigsäure; Fluka 57330
- Stickstoffgas N; 5.0, Air Liquide; 0.356.727; 04.06
- Natriumhydroxid NaOH 0,1 N, Fa. Roth, Art.-Nr. 6771.2
- Salzsäure HCl 0,1 N; Fa. Roth Art.-Nr. CP 43.5

Herstellung der Testlösungen für die Bioassays

– IES-Lösungen

10^{-3} mol l^{-1} IES (17,5 mg l^{-1}) wurden in wenig 0,1 N NaOH-Lösung vollständig gelöst und mit ca. 80 ml dest. Wasser versetzt. Der pH-Wert wurde mit 0,1 N HCl-Lösung auf 6 bis 7 eingestellt und das Volumen mit Wasser auf 100 ml gebracht. Um den Effekt der Indol-3-essigsäure-Konzentration auf die Wurzelbildung der Mungbohnenkeimlinge zu untersuchen, wurden IES-Verdünnungsstufen im Bereich von 10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1} als Referenz eingesetzt.

– Gärrückstandslösungen

Zur Herstellung der Testlösungen aus den Extrakten der Gärrückstände wurde dieser zunächst gefriergetrocknet und auf 1 mm zerkleinert und gemahlen. Anschließend wurden, wenn nicht anders ausgewiesen, 1 g des vorbereiteten Gärrückstandes in 80%igem Methanol 24 h bei 7 °C extrahiert, dann kurz ins Ultraschallbad gestellt und über einen Filter (Whatman Nr. 297 ½) gefiltert. Der Rückstand wurde nochmals mit 100 ml Methanol (80 %) gespült. Der methanolische Extrakt wurde anschließend unter Vakuumbedingungen am Rotationsverdampfer bei 35 °C getrocknet. Die verbleibende Restfeuchte wurde mit Stickstoff ausgeblasen und anschließend der Rückstand in 100 ml destilliertem Wasser aufgenommen. Die Gärrückstandsextrakte wurden in den Verdünnungsstufen a) unverdünnt, b) 1:1 und c) 1:49 eingesetzt.

Zu 1.) Pflanzenmaterial: Mungbohne (*Vigna radiata* L.)

Die Samen der Mungbohne (*Vigna radiata* L.) wurden zunächst mit 5%iger Wasserstoffperoxidlösung oberflächensterilisiert, mit destilliertem Wasser gespült und 24 h in destilliertem Wasser vorgequollen. Anschließend wurden die Samen in feuchtem Vermiculit zum Keimen ausgelegt und in der Klimakammer 10 Tage bei einer 14 h-Tag-Photoperiode und 25 C +/- 1 °C angezogen.

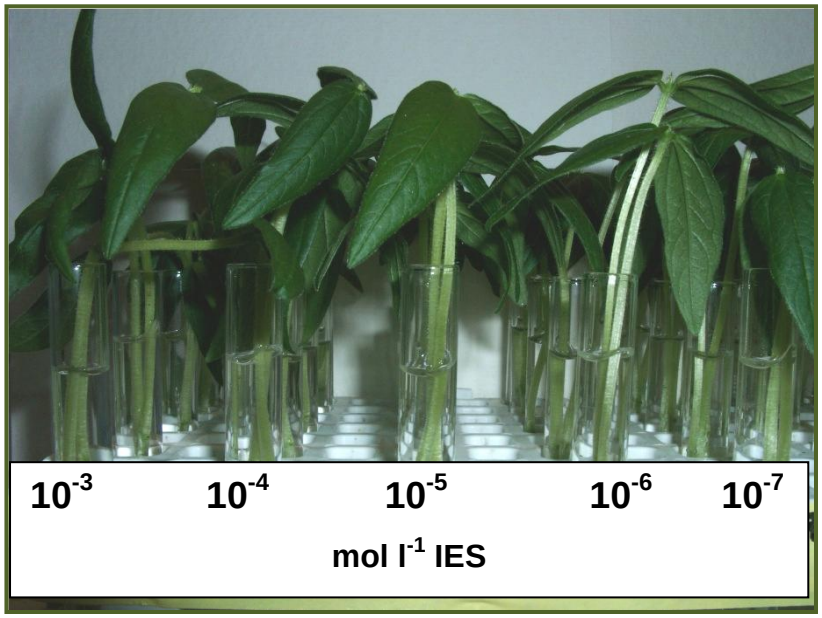

Abbildung 11: Mungbohnenkeimlinge (*Vigna radiata*) nach Überführung in die IES-Lösungen 10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1} zur Induktion

Die Hypokotyle[33] phänotypisch gleicher Mungbohnenkeimlinge wurden 3 cm unterhalb der Kotyledonen abgeschnitten und je zwei Keimlinge in ein Reagenzglas mit den vorbereiteten Testlösungen zur erneuten Wurzelbildung überführt. Pro Variante wurden fünf Reagenzgläser mit je 4 ml Testlösung vorbereitet. Die Induktionszeit betrug hierbei 6 h. Danach wurden die Keimlinge kurz mit destilliertem Wasser gespült und jeweils zwei Keimlinge in fünf Reagenzgläser mit 4 ml dest. Wasser je Variante überführt (Abbildung 11).

Die Keimlinge wurden anschließend in der Klimakammer bei einer 14 h-Tag-Photoperiode und 25 °C (+/-1 °C) zur Wurzelbildung belassen. Nach 10 Tagen wurde die neue Wurzelbildung, durch die manuelle Ermittlung der Anzahl der Wurzeln, bewertet.

Es wurden jeweils drei Gärrückstände der Anlagen D und P sowie zwei Gärrückstände der Anlage GK getestet.

[33] Hypokotyl (grch.: hypo = unterhalb und kotyle = Höhlung; engl.: Hypocotyl) ist ein Fachausdruck der Botanik und bezeichnet den untersten Abschnitt der Sprossachse einer Samenpflanze vom Wurzelhals (das ist die Grenzzone zwischen Wurzel und Sprossachse) bis zu den Kotyledonen (Keimblättern). Der nächsthöhere Abschnitt der Sprossachse zwischen Keimblättern und dem Primärblatt bzw. den Primärblättern ist das Epikotyl.

zu 2.) Pflanzenmaterial II: Kresse (*Lepidium sativum* L.)

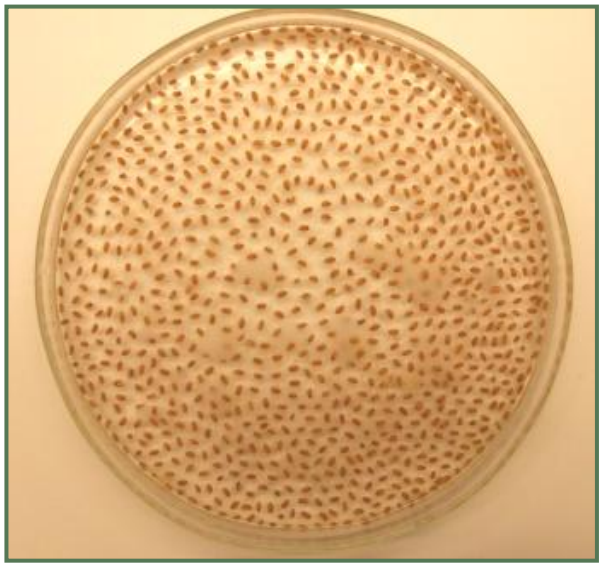

Abbildung 12: Kressesamen *(Lepidium sativum*) nach Quellung (2 h) in dest. Wasser

Für einen weiteren Test zum Nachweis einer auxin-analogen Wirkung wurden Kressesamen (*Lepidium sativum* L.) verwendet. Die Kressesamen sind zunächst 15 min mit 5%iger Wasserstoffperoxidlösung oberflächensterilisiert, mit destilliertem Wasser gespült und 2 h in destilliertem Wasser vorgequollen worden (Abbildung 12). Pro Variante wurden 10 Samen untersucht, die anschließend in Petrischalen auf Filterpapier (Whatman Nr. 41) mit 10 ml der jeweiligen Testlösung ausgelegt wurden:

- destilliertes Wasser (Kontrolle),
- Indol-3-essigsäure-Lösung (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und
- Gärrückstandsextrakt.

Bei den Induktionsversuchen (siehe Vorversuch 2) wurden die Samen nach sechsstündiger Induktion mit destilliertem Wasser gespült und in weitere Petrischalen mit jeweils 10 ml destilliertem Wasser überführt. Die Petrischalen, die je 10 Samen enthielten, wurden bei 25 °C im Dunkeln gelagert. Zur Bewertung wurde manuell die Länge der gebildeten Wurzel nach 48, 72 und 120 h gemessen.

Prüfparameter:

- Anzahl der gekeimten Samen [n]
- Länge der Wurzel [cm]

Folgende Versuche wurden durchgeführt:

- Versuch 1: Einfluss von IES (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum*)

- Versuch 2: Einfluss von IES (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) mit und ohne Induktion auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum*).
- Versuch 3: Einfluss von Gärrückstandsextrakten D und GK in verschiedenen Konzentrationen (aus 1, 2 und 4 g gefriergetrocknetem Gärrückstand, nach Extraktion und Trocknung aufgenommen in 100 ml destilliertem Wasser) im Vergleich zu IES (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und Kontrolle mit und ohne Induktion auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum*).
- Versuch 4: Einfluss von Gärrückstandsextrakten D und GK (aus 1 g gefriergetrocknetem Gärrückstand, nach Extraktion und Trocknung aufgenommen in 100 ml destilliertem Wasser) sowie in verschiedenen Verdünnungsstufen (unverdünnt, 1:1, 1:49) im Vergleich zu IES (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und Kontrolle ohne Induktion auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum*).
- Versuch 5: Untersuchung des Effektes einer möglichen Interaktion von IES mit Inhaltsstoffen des Gärrückstandes auf die Wurzelentwicklung nach 24, 72 und 120 h.

  Einfluss von Gärrückstandsextrakten D, P und GK (aus 1 g gefriergetrocknetem Gärrückstand, nach Extraktion und Trocknung aufgenommen in 100 ml destilliertem Wasser) sowie aus 1 g gefriergetrocknetem Gärrückstand, aufgenommen in 100 ml 10^{-10} molarer IES-Lösung im Vergleich zu IES (10^{-10}mol l^{-1}) und Kontrolle ohne Induktion auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum*).

Variante	
1	Gärrückstandsextrakt D, P und GK (aufgenommen in 100 ml destilliertem Wasser) n=3
2	Gärrückstandsextrakt D, P und GK (aufgenommen in 100 ml 10^{-10} molarer IES-Lösung) n=3
3	IES (10^{--10} mol l^{-1}) n=1
4	Kontrolle: destilliertes Wasser n=1

2.1.4 Untersuchungen des Bodens

Um den Einfluss von Gärrückständen auf den Boden zu untersuchen, wurden im Rahmen der Feldversuche sowohl chemische als auch biologische Bodenuntersuchungen durchgeführt. Da deutliche bodenchemische Änderungen erst nach

mehrjähriger Versuchsdauer auftreten, sollen im Folgenden nur die bodenbiologischen Untersuchungen behandelt werden. Die Wirkung von Gärrückständen auf die Bodenbiologie wurde zum einen anhand der Bodenatmung im Feld, zum anderen anhand der Regenwurmaktivität unter Sommerweizen nach Düngung mit Gärrückstand untersucht.

2.1.4.1 Bodenatmung

Die Messung der Bodenatmung im Feld fand in beiden Versuchsjahren und unter beiden Prüffrüchten statt, jedoch nur in ausgewählten Varianten. Dazu wurde in den Varianten mit GRS D und Mineraldünger in allen Aufwandmengen und in den Wiederholungen 2 und 3 gemessen. In diesen 16 Parzellen befanden sich jeweils sieben fixe Messpunkte, an welchen einmal wöchentlich während der gesamten Vegetationsperiode die Bodenatmung bestimmt wurde. Für diese Messungen wurde das Gerät Environmental Gas Monitor (EGM-4) mit der Soil Respiration Chamber (SRC-1) der Firma PPSystems (Großbritannien) verwendet (Abbildung 13 a), an welches zusätzlich ein Thermometer zur Messung der Bodentemperatur in 5 cm Tiefe angeschlossen war.

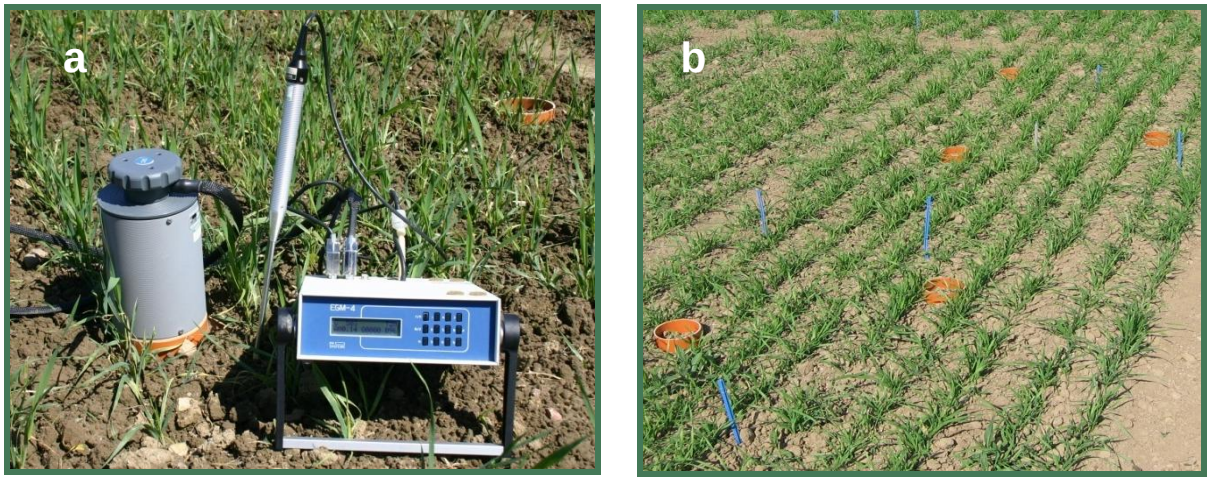

Abbildung 13: Messung der Bodenatmung im Feld a) „Environmental Gas Monitor“ mit „Soil Respiration Chamber“ (EGM-4 mit SRC-1); b) fixe Messpunkte in einer Parzelle des Sommerweizenversuches

Die Messpunkte im Feld waren durch ca. 10 cm lange Plastikrohre mit einem Durchmesser von 10 cm festgelegt, die zu etwa 3/4 in den Boden eingelassen waren (Abbildung 13 b). Zur Bestimmung der Bodenatmung an einem Messpunkt wurde die

Bodenatmungskammer luftdicht auf den entsprechenden Ring gesetzt und der Verlauf der CO_2-Ansammlung unter der Bodenatmungskammer mittels Infrarotgasanalysator (im EGM-4) gemessen.

2.1.4.2 Regenwurmaktivität

Feldtest: Zur Untersuchung der Wirkung von Gärrückständen auf Regenwürmer wurden im Jahr 2007 im Sommerweizenversuch etwa drei Wochen nach der Düngung (23./24.04.2007) Bodenproben entnommen und auf folgende Parameter untersucht:

- Abundanz
- Biomasse
- Altersstufe (juvenil bzw. adult)
- Artenspektrum.

Da die Untersuchung nach ISO 23611-1 (2006) durchgeführt wurde und eine sehr zeitaufwendige Handauslese beinhaltete, wurde sie auf den GRS D beschränkt. Aus den Randbereichen dieser Parzellen wurden einmalig 2 x 1/8 m^2 Boden 20 cm tief entnommen, so dass insgesamt pro Aufwandmenge 1 m^2 beprobt wurde. Die in Gewebesäcken gelagerten und kühl gestellten Proben wurden in den folgenden Tagen mittels Handauslese auf Regenwürmer durchsucht (Abbildung 14 a).

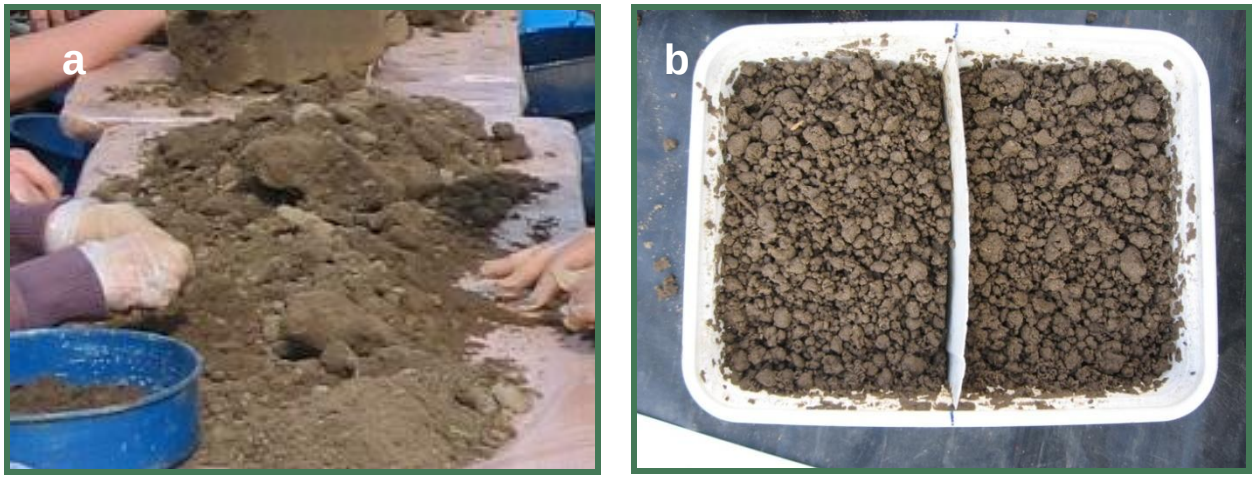

Abbildung 14: Untersuchung der Wirkung von Gärrückständen auf Regenwürmer a) Handauslese der Bodenproben aus dem Sommerweizenversuch; b) Versuchsgefäß für einen Vermeidungstest mit *Eisenia fetida*

Zur Erfassung tiefgrabender (anözischer) Regenwurmarten erfolgte zusätzlich in den Ausgrabungsstellen eine Formalinextraktion mit ein bis zwei Litern einer 0,2%igen

Formalinlösung. Während der Beprobung wurden parallel die Bodenfeuchte in 5 bis 15 cm Tiefe sowie die Temperatur im Oberboden (10 cm Tiefe) erfasst.

Vermeidungstests: Zur Überprüfung der festgestellten Tendenz aus dem Feldtest wurden im Herbst 2007 zusätzlich zwei Vermeidungstests im Labor durchgeführt. Hierbei wurden das Vermeidungsverhalten der Kompostwurmart *Eisenia fetida* (Savigny 1826) bezüglich mit Gärrückstand versetztem Prüfboden getestet. Für dieses Zweikammersystem sind Kunststoffschalen (17 x 12,5 x 6,5 cm) in der Mitte geteilt und jeweils zur Hälfte mit ungedüngtem Kontrollboden und mit Gärrückstand versetztem Prüfboden befüllt worden (Abbildung 14 b). Der Test wurde mit zwei verschiedenen Aufwandmengen Gärrückstand (ebenfalls GRS D) durchgeführt. Ausgehend von der höchsten Aufwandmenge im Feld (150 kg ha^{-1} N) wurde bei der Berechnung die zu applizierende Gärrückstand-Frischmasse einmal auf die Bodenoberfläche und einmal auf die Bodenmasse bezogen. Außerdem wurde beim zweiten Versuch die Bodenfeuchte höher eingestellt. Die Merkmale der beiden Tests sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

Tabelle 11: Merkmale der beiden Vermeidungstests bezüglich Düngermenge und Feuchtegehalt im Boden

Testmerkmal	Vermeidungstest 1	Vermeidungstest 2
Berechnung der GRS-Menge	150 kg ha^{-1} N berechnet auf Bodenmasse	150 kg ha^{-1} N berechnet auf Bodenoberfläche
GRS-Menge [FM 500 g^{-1} Boden]	6,2 g	30,6 g
Bodenfeuchte [M-% von WK_{max}]	50	60

Der Boden wurde auf ≤ 2 mm gesiebt und die Wasserkapazität (28 M-%) sowie der TS-Gehalt (98 %) bestimmt. Pro Testschale wurden zweimal 500 g trockener Boden mit den entsprechenden Mengen an Wasser und Dünger versetzt und eingefüllt. Die Füllhöhe betrug ca. 6 cm. Der Wassergehalt wurde einen Tag vor Versuchsbeginn eingestellt, wobei der Wasseranteil im Gärrückstand berücksichtigt wurde. Beide Vermeidungstests wurden fünffach wiederholt und dabei randomisiert bei 20 – 25 °C aufgestellt. In die Mitte jeder Testschale wurden 10 Würmer, alle zwischen 0,3 und 0,6 g schwer und mit jeweils gleichem Verhältnis juvenil zu adult, eingesetzt. Die Schalen sind anschließend mit einem perforierten Plastikdeckel verschlossen und 48 h

verdunkelt abgestellt worden. Danach erfolgte die Auszählung und Wägung der Kompostwürmer aus den beiden Bodenvarianten. Nach HUND-RINKE et al. (2002)[34] gibt eine 80%ige Vermeidung des Prüfbodens nach Testende (ausgehend von einer 50:50-Verteilung) einen Hinweis auf ein ökologisches Gefährdungspotential, welches von der getesteten Substanz ausgeht.

2.1.5 Untersuchungen an Pflanzen

Im Rahmen der Feldversuche wurden die verschiedenen Prüffrüchte hinsichtlich Wachstum und Entwicklung sowie ihrer Erträge und Ertragsstruktur untersucht. Die Ernteprodukte wurden auf verschiedene innere Qualitätsparameter analysiert.

2.1.5.1 Wachstum und Entwicklung

In den Parzellenfeldversuchen mit Silomais und Sommerweizen wurden in beiden Jahren die Parameter Pflanzenhöhe, Blattfarbe und Blattflächenindex wöchentlich während der Vegetationsperiode erfasst. Zusätzlich wurde an einigen Terminen der Entwicklungsstand erfasst.

Pflanzenhöhe: Das Wachstum der Mais- und Weizenpflanzen wurde zum einen durch Messen einzelner Pflanzenhöhen dokumentiert. Hierfür wurden die Wuchshöhen von fünf (2006) bzw. zehn (2007) Pflanzen je Parzelle erfasst, wobei bis zur Entwicklung der generativen Organe die Länge bis zum höchsten Blatt gemessen wurde, danach bis zur Ähre bei Weizen bzw. bis zum männlichen Blütenstand bei Mais.

Blattflächenindex: Als weiterer Wachstumsparameter wurde der Blattflächenindex (BFI) gemessen. Er gibt das Verhältnis von einseitiger Blattfläche zu Bodenfläche an. In den Parzellenfeldversuchen wurde der BFI wöchentlich während der Vegetationsperiode mit dem LAI-2000 Plant Canopy Analyzer (LI-COR, Lincoln, NE, USA) gemessen.

Blattfarbe: Die Wirkung der Stickstoffversorgung auf die Prüffrüchte wurde indirekt über die Messung der Blattfarbe mit dem N-Tester (HYDRO Agri GmbH & Co. KG, Dülmen,

[34] Hund-Rinke, K., Achazi, R., Römke, J., Warnecke, D.: „Avoidance Test with Eisenia fetida as Indicator for the Habitat Function of Soils: Results of a Laboratory Comparison Test. Journal of Soils and Sediments 3 (1), 7-10. (2002)

Deutschland) untersucht. Die Messungen fanden wöchentlich an den jeweils jüngsten, vollentwickelten Blättern statt. Da das Gerät einen Mittelwert aus 30 Messungen berechnet, wurde nur ein Wert pro Parzelle ermittelt.

2.1.5.2 Ertrag und Ertragsstruktur

Ertrag: In den Parzellenfeldversuch wurde der Ertrag durch Wiegen des Erntegutes einer 7,5 m^2 großen Parzelle ermittelt. Beim Sommerweizen wurden Stroh und Korn getrennt erfasst, das Korn wurde vor dem Wiegen gereinigt. In den Praxisversuchen wurden jeweils die 20 Beprobungsquadrate abgeerntet und gewogen. Zur Bestimmung der Trockenmasseerträge wurde ein Teil des Erntegutes bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

Ertragsstruktur: Zur Ermittlung der Ertragsstruktur des Sommerweizens wurde jeweils kurz vor der Ernte die Anzahl der ährentragenden Halme je Quadratmeter bestimmt. Hierfür wurden je Parzelle zwei halbe Quadratmeter ausgezählt. Außerdem wurde die Tausendkornmasse in dreifacher Wiederholung bestimmt. Aus diesen beiden Parametern wurden die Anzahl der Körner je Ähre berechnet.

2.1.5.3 Innere Qualität (chemische Analysen)

Pflanzenprobenahmen

Nach dem Wiegen des gesamten Erntegutes wurde jeweils eine repräsentative Probe entnommen und für eine chemische Analyse auf 60 °C getrocknet. Je nach anschließender Analysenmethode erfolgte die Vermahlung des getrockneten Pflanzenmaterials auf 0,2 oder 0,5 mm.

Analytische Methoden

Alle in den Versuchen geernteten Pflanzen wurden auf die Parameter Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P) und Kalium (K) untersucht. Die Ergebnisse wurden zur Berechnung der Nährstoffbilanzen verwendet. Beim Sommerweizen wurden Stroh und Korn getrennt behandelt, Mais und Roggen wurden als Ganzpflanzen untersucht. Die zur chemischen Analyse der Pflanzeninhaltsstoffe verwendeten Methoden sind in Tabelle 12 zusammengefasst.

Tabelle 12: Verwendete Methoden zur Analyse der Pflanzen auf verschiedene Inhaltsstoffe

Parameter	Methode
TS	Gravimetrisch: Trocknung bei 105 °C bis zur Gewichtskonstanz
C, N	Verbrennung nach Dumas mit vario MAX CNS (Elementar Analysensysteme GmbH, Hanau), DIN ISO 10694
P, K	Mikrowellenaufschluss mit Mars Express (CEM, North Carolina, USA), Messung des Phosphors spektralphotometrisch mit CFSA, Messung des Kaliums mittels Atomabsorptionsspektroskopie (AAS) Methode A 2.1.1 nach Methodenbuch VDLUFA 2. Aufl. (2003)

2.1.6 Statistische Auswertungen

Für die Auswertung der Feldversuchsergebnisse wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen mit Excel (Microsoft) berechnet. Die weitere statistische Auswertung erfolgte mit der Prozedur MIXED der Statistiksoftware SAS 9.13. Dabei wurden die Parzellenfeldversuche als Spaltanlage (nur die Bodenatmung als Blockanlage) behandelt. Zunächst wurden die Voraussetzungen der Normalverteilung (Shapiro-Wilk-Test) sowie der Varianzhomogenität (Levene-Test) überprüft. Waren diese gegeben, wurde eine zweifaktorielle Varianzanalyse (F-Test und Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$) durchgeführt. Bei nicht erfüllten Voraussetzungen wurde eine Rang-Varianzanalyse genutzt. Die Auswertung der Regenwurmuntersuchungen erfolgte mittels Excel durch Tests für die randomisierte Blockanlage. Hierbei wurde für die Überprüfung auf Varianzhomogenität und Normalverteilung der Residuen eine Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,1$ gewählt. Die weiteren Auswertungen erfolgten mittels Varianzanalysen (F-Test und Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$) bzw. Rangvarianz-analysen (Friedmann-Test und Wilcoxon-Wilcox-Test mit $\alpha = 0,05$).

Für die Auswertung der Bioassays und des Pflanzenverträglichkeitstest wurden die Mittelwerte und Standardabweichungen mit Excel (Microsoft) berechnet. Die statistische Auswertung der Prüfmerkmale erfolgte über ANOVA. Bei Varianzhomogenität wurde eine einfaktorielle Varianzanalyse mittels Duncan-Test bei einer Irrtumswahrschein-lichkeit von $\alpha \leq 0,05$ durchgeführt. Bei Nichterfüllung einer Varianzhomogenität wurde der Kruskal-Wallis-Test angewendet. Ein Vergleich fand auf der Basis der Mediane statt.

Für den Bioassay mit *Lepidium sativum* wurde eine Normalverteilung vorausgesetzt. Die weitere Auswertung erfolgte mittels Tukey-Test mit $\alpha = 0,05$. Alle Berechnungen erfolgten mit dem Statistikprogramm SPSS 15.0.

2.2 Ergebnisse und Diskussion

2.2.1 Stoffliche Charakterisierung der Gärrückstände

2.2.1.1 Chemische Parameter, Pflanzenhauptnährstoffe

Im Projektzeitraum wurden die Gärmedien und Gärrückstände aus den einzelnen Prozessstufen der Anlagen (Reaktor, Nachgärer bzw. Zulauf Endlager sowie Endlager) in zeitlichen Abständen untersucht. In den folgenden Tabellen 13, 14 und 15 sind nur die Werte für die Gärrückstände aus den Endlagern dargestellt.

Tabelle 13: Chemische Parameter TS, oTS und pH sowie Pflanzenhauptnährstoffe N, NH_4^+, P_{DL} und K_{DL} in den Gärrückständen D, P und GK aus den Endlagern

Gärrückstand	Probenahmestelle		Trockensubstanz (TS)	Organische Trockensubstanz (oTS)	pH-Wert	Stickstoff (N) (Kjeldahl)	Ammonium-Stickstoff (NH_4^+)	Phosphor (P_{DL})	Kalium (K_{DL})
			[%]	[% TS]		[%]	[%]	[%]	[%]
			n=25	n=25	n=25	n=22	n=22	n=18	n=18
GRS D	Endlager	**Median**	**6,24**	**77,72**	**7,96**	**0,47**	**0,34**	**0,05**	**0,31**
		Minimum	3,40	72,76	7,49	0,39	0,23	0,02	0,26
		Maximum	9,17	82,19	8,29	0,71	0,46	0,08	0,41
		Mittelwert	**6,19**	**77,58**	**7,96**	**0,50**	**0,33**	**0,05**	**0,32**
		Standardabweichung	1,78	2,16	0,18	0,10	0,07	0,02	0,04
			n=22	n=22	n=22	n=19	n=19	n=21	n=21
GRS P	Endlager	**Median**	**7,46**	**75,77**	**7,89**	**0,41**	**0,18**	**0,06**	**0,35**
		Minimum	4,75	72,89	7,23	0,29	0,10	0,04	0,30
		Maximum	10,66	80,42	8,47	0,51	0,33	0,09	0,39
		Mittelwert	**7,87**	**76,10**	**7,86**	**0,40**	**0,18**	**0,07**	**0,35**
		Standardabweichung	1,62	2,08	0,33	0,07	0,05	0,01	0,02
			n=25	n=25	n=25	n=25	n=25	n=12	n=12
GRS GK	Endlager	**Median**	**5,52**	**75,24**	**7,49**	**0,34**	**0,23**	**0,06**	**0,28**
		Minimum	3,79	67,52	6,59	0,28	0,16	0,04	0,25
		Maximum	10,94	83,55	8,28	0,43	0,40	0,07	0,33
		Mittelwert	**5,91**	**75,54**	**7,56**	**0,34**	**0,26**	**0,06**	**0,29**
		Standardabweichung	1,51	3,39	0,41	0,04	0,08	0,01	0,02

Die TS-Gehalte in Gärrückständen liegen zwischen 5 und 7 %. Der Anteil an organischer Substanz im Gärrückstand wird durch die oTS (% TS) bestimmt. Die Gärrückstände enthalten im Durchschnitt 5 % organische Substanz. Interessanterweise ist der

mittlere Gehalt an organischer Substanz trotz der verschiedenen Prozessführungen und Inputsubstrate sehr ähnlich.

Der pH-Wert aller drei Gärrückstände liegt im alkalischen Bereich. Stickstoff tritt in den Gärrückständen zu einem bestimmten Anteil in Form des basisch wirkenden Ammonium-N auf. Im GRS D und GK ist der Anteil NH_4^+ am Gesamt-Stickstoffgehalt mit 66 - 76 % am höchsten. Für GRS P wurden im Mittel 45 % ermittelt.

Pflanzenverfügbare Kalium- und Phosphorgehalte wurden für die nur mit Energiepflanzen betriebenen Anlagen D und P mit 0,31 bzw. 0,35 % ermittelt. Ein geringerer Gehalt von durchschnittlich 0,28 % wurde in der mit Gülle betriebenen Anlage GK gefunden.

2.2.1.2 Elementaranalytische Parameter, Schwermetalle

In Tabelle 14 sind die Ergebnisse der Parameter C, N und S der Elementaranalyse sowie die Konzentrationen der ausgewählten Schwermetalle Cadmium Cd, Kupfer Cu, Blei Pb und Zink Zn angegeben.

Durch die Elementaranalyse und die KJELDAHL-Methode konnte der Stickstoffgehalt im Gärrückstand nicht vergleichbar bestimmt werden. Es wurden niedrigere N-Werte in der Elementaranalyse als durch das KJELDHAL-Verfahren ermittelt. Aus diesem Grund erfolgt nur die Berechnung des C/N-Verhältnisses im Gärrückstand über die Elementar-analyse. Der Stickstoff- und der Ammonium-Stickstoffgehalt als Pflanzennährstoffe im Gärrückstand werden nach der Methode von KJELDAHL angegeben.

Der Gehalt an Kohlenstoff (C) schwankt in allen Anlagen zwischen ca. 1 und 3 %. Eine Ausnahme bildet der Gärrückstand P mit einem maximalen Wert von 4,7 %. Im Mittel liegt der Kohlenstoffgehalt jedoch zwischen 2,05 und 2,90 %. Das C/N-Verhältnis bezieht sich auf die Anteile von Kohlenstoff (C) und Stickstoff (N). Die C/N-Verhältnisse liegen bei den Energiepflanzen-Anlagen vergleichbar zwischen 8 bis 10. In der mit Gülle betriebenen Anlage GK ist das C/N-Verhältnis mit 6,5 enger.

Der durchschnittliche Gehalt der ausgewählten Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn in den Gärrückständen liegt unterhalb der in der DüMV vorgegebenen Grenzwerte. Höhere Cu- und Zn-Gehalte sind im Vergleich zu den anderen beiden Anlagen in den Gärrückständen aus Anlage GK analysiert worden.

Tabelle 14: Elementaranalytische Parameter C, N und S sowie die Schwermetalle Cd, Cu, Pb und Zn in den Gärrückständen D, P und GK aus den Endlagern

Gärrückstand	Probenahmestelle		Stickstoff (N)	Kohlenstoff (C)	Schwefel (S)	C/N-Verhältnis	Cadmium (Cd)	Kupfer (Cu)	Blei (Pb)	Zink (Zn)
			[%]				[mg kg TS^{-1}]			
			n=18			n=18	n=6			
GRS D	Endlager	**Median**	**0,23**	**1,93**	**0,03**	**8,58**	n. n.	**35**	**<5**	**222**
		Minimum	0,13	0,90	0,02	4,96	n. n.	23	**<5**	134
		Maximum	0,33	3,43	0,04	12,83	n. n.	64	**<5**	262
		Mittelwert	**0,21**	**2,05**	**0,03**	**8,84**	n. n.	**41**	**<5**	**206**
		Standardabweichung	0,05	0,86	0,01	2,54	n. n.	21	**<5**	66
			n=20			n=20	n=3			
GRS P	Endlager	**Median**	**0,25**	**2,70**	**0,03**	**10,92**	n. n.	**35**	**<5**	**161**
		Minimum	0,19	1,06	0,02	3,97	n. n.	27	**<5**	151
		Maximum	0,37	4,72	0,06	12,66	n. n.	50	**<5**	173
		Mittelwert	**0,27**	**2,90**	**0,04**	**9,18**	n. n.	**36**	**<5**	**160**
		Standardabweichung	0,06	1,11	0,01	3,71				
			n=13			n=13	n=3			
GRS GK	Endlager	**Median**	**0,23**	**2,30**	**0,03**	**6,50**	n. n.	**52**	**<5**	**278**
		Minimum	0,16	1,62	0,01	4,08	n. n.	39	**<5**	273
		Maximum	0,40	3,10	0,04	8,09	n. n.	80	**<5**	314
		Mittelwert	**0,26**	**2,20**	**0,03**	**6,23**	n. n.	**57**	**<5**	**289**
		Standardabweichung	0,08	0,38	0,01	1,28				

2.2.1.3 Gärrückstandslagerung - Restgaspotenziale

Eine Analytik bezüglich der Trockensubstanz, der organischen Trockensubstanz, des pH-Wertes, der Pflanzennährstoffgehalte N, P, K, der Rohnährstoffgruppen (erweiterte Weender Analyse) sowie ausgewählter Schwermetalle und der Elemente C, N und S wurde an den Gärrückständen vor und nach Versuchsende durchgeführt. In Tabelle 15 sind die Stoffkennwerte der Gärrückstände vor Beginn des Versuches dargestellt.

Tabelle 15: Stoffkennwerte der für die Restgaspotenzialbestimmung verwendeten Gärrückstande (GRS) D, P und GK

	Parameter	Einheit	GRS D		GRS P		GRS GK	
			2007	2008	2007	2008	2007	2008
	TS	[%]	7,54	10,97	6,19	8,38	6,95	6,73
	oTS	[% TS]	79,19	80,38	72,61	71,35	73,19	66,10
	pH		7,73	7,71	7,73	7,76	7,56	7,79
Futtermittel-analytik	**RP** Rohprotein	[% TS]	52,21	48,44	33,23	23,27	30,72	42,59
	Rfa Rohfaser		25,12	30,94	25,17	16,98	26,99	21,16
	ADL (Lignin)		20,54	24,45	15,46	15,05	8,44	11,95
	ADF (Cellulose + Lignin)		37,14	42,52	28,72	24,77	24,32	26,46
	NDF (Gerüstsubstanzen)		41,96	51,16	40,23	28,66	40,76	38,67
	NfE – berechnet*)		-1,46	-1,02	12,86	30,2	13,7	0,71
	Rf Rohfett		3,32	2,02	1,35	0,90	1,78	1,64
Pflan-zennähr-stoffe	**N** (*Kjeldahl*)	[%]	0,60	0,66	0,33	0,30	0,32	0,44
	NH_4^+ (*Kjeldahl*)		0,43	0,39	0,14	0,15	0,17	0,18
	P_{DL}		0,01	0,08	0,02	0,06	0,04	0,08
	K_{DL}		0,46	0,44	0,34	0,32	0,28	0,37
Schwer-metalle	**Cd**	[mg kg^{-1} TS]	< 0,2	< 1	< 0,2	< 1	< 0,2	< 1
	Cu		41	17	37	31	37	70
	Zn		127	115	115	177	200	278
	Pb		6	<1	6	21	10	12
Elementar-analyse	**C**	[%]	3,48	4,09	2,55	3,20	2,87	2,77
	N		0,30	0,45	0,24	0,36	0,22	0,31
	S		0,04	0,04	0,03	0,04	0,03	0,03
	C/N-Verhältnis		12	9	11	9	13	9

*) Der NfE-Gehalt wird durch Berechnung bestimmt: von der organischen Masse werden Rohfett, Rohprotein und Rohfaser abgezogen, der Rest ist NfE. Dies sind vor allem lösliche Zucker, Stärke, Pektine und organische Säuren.

In Tabelle 16 sind die Ergebnisse der Restgaspotenzialuntersuchungen dargestellt.

Tabelle 16: Restgaspotenziale der Gärrückstände D, P und GK bei 20 °C und 38 °C

Parameter	Einheit	GRS D		GRS P		GRS GK	
		2007	2008	2007	2008	2007	2008
Gaspotenziale (20 °C)							
Biogasausbeute	$m^3\ t^{-1}$ FM	2,8	2,6	1,2	1,6	11,8	3,3
Methanausbeute	$m^3\ t^{-1}$ FM	1,3	1,0	0,3	0,4	6,5	1,3
Methanausbeute	**l $kg\ oTS^{-1}$**	**16,7**	**13,7**	**4,1**	**6,2**	**133,7**	**28,3**
Gaspotenziale (38 °C)							
Biogasausbeute	$m^3\ t^{-1}$ FM	6,9	8,1	6,4	6,4	18,3	8,1
Methanausbeute	$m^3\ t^{-1}$ FM	3,8	4,6	3,5	3,3	10,0	4,6
Methanausbeute	**l $kg\ oTS^{-1}$**	**63,7**	**64,8**	**77,3**	**55,9**	**196,7**	**120,8**

Die Ergebnisse zeigen, dass alle Gärrückstände noch nennenswerte Mengen an Biogas bzw. Methan produzieren. Das Methanbildungspotenzial der Gärrückstände lag zwischen 0,3 m^3 t^{-1} FM (Gärrückstand P, 20 °C) und 18,3 m^3 t^{-1} FM (Gärrückstand GK, 38 °C). Dabei hat die Temperatur einen wichtigen Einfluss auf das Restgaspotenzial in den Gärrückständen. Erkennbar ist, dass die Restgaspotenziale bei 20 °C signifikant niedriger sind als bei 38 °C. Theoretisch beeinflusst die Temperatur lediglich die Abbaurate, nicht jedoch die absolute Abbaubarkeit eines Substrates. Allerdings kann die Abbaurate in der Praxis aufgrund geringer Temperaturen so gering sein, dass das erreichbare Restgaspotenzial niedriger ist.
Auffällig ist das höhere Restgaspotenzial der Biogasanlage GK sowohl im mesophilen Bereich als auch bei 20 °C im Vergleich zu den Gärrückständen D und P. Erklärbar wäre dieser Sachverhalt durch die kürzere Verweilzeit der Substrate von ca. 90 Tagen im Vergleich zu den anderen Anlagen (ca. 180 bzw. ca. 220 Tage) bzw. auch durch die einstufige Prozessführung. Folglich kann ein Anteil an organischem, noch vergärbarem Material vorzeitig wieder ausgeschleust werden.

2.2.1.3.1 Veränderung ausgewählter Stoffkenngrößen

Bestimmung der Abbaugrade für Trockensubstanz und organische Trockensubstanz

Grundsätzlich bezeichnet der Abbaugrad ein Maß zur Beschreibung des biologischen oder chemischen Abbaus organischer Verbindungen, der bei biologischen Prozessen vor allem auf Stoffwechselvorgängen von Mikroorganismen beruht. Der Abbaugrad kann für Einzelparameter oder durch verschiedene Summenparameter ausgedrückt werden, wie z. B. Trockensubstanz oder organische Trockensubstanz. Die Definition des Abbaugrades erfolgt nach folgender allgemeiner Formel 1:

Formel 1: Berechnung des Abbaugrades

$$\text{Abbaugrad}\,\eta\,[\%] = \frac{\text{Parameter}_{\text{vor dem Abbau}} - \text{Parameter}_{\text{nach dem Abbau}}}{\text{Parameter}_{\text{vor dem Abbau}}} * 100\ \%$$

Somit nimmt der Abbaugrad Werte zwischen 0 und 100 % an. In Tabelle 17 sind die Abbaugrade für die ausgewählten Parameter TS und oTS dargestellt.

Tabelle 17: Abbaugrade für ausgewählte Parameter TS, oTS

Parameter	GRS D		GRS D		GRS P		GRS P		GRS GK		GRS GK	
	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008	2007	2008
	20 °C		38 °C		20 °C		38 °C		20 °C		38 °C	
	Abbaugrad [%]											
TS	20	18	23	21	12	6	21	18	29	40	44	53
oTS	21	20	25	22	13	10	26	24	36	35	52	54

Höhere Abbaugrade bezüglich der TS und oTS werden bei einer mesophilen Restgaspotenzialbestimmung erreicht. Gärrückstände mit geringeren oTS-Abbaugraden (GRS P) wiesen auch geringere Restgaspotenziale auf, gefolgt von den Gärrückständen aus den Anlagen D und GK. Generell sind hohe Gärrückstandsrestgaspotenziale aus der anaeroben Mono- und Kofermentation von pflanzlichen Substraten durch den langsameren Abbau des Restpflanzenanteils (Zellulose, Hemizellulose, Lignin und weitere Gerüstsubstanzen) in Gärrückständen erklärbar.

2.2.1.3.2 Einfluss von Zellulose, Hemizellulose und Lignin auf die Methanausbeute in Gärrückständen

Die Berechnung des Verhältnisses von Zellulose *Z* (Z=ADF-ADL) und Hemizellulose *HZ* (HZ=NDF-ADF) zu Lignin *L* (L=ADL) ist eine Möglichkeit, den möglichen Abbaugrad zu quantifizieren (ZHENG et al., 2007)[35]. Konzentrationen von Z und L wurden bereits verwendet, um den Grad des Abbaus in Deponieabfällen abzuschätzen (STINSON et al., 1995[36] und RYAN et al., 2006)[37]. Die Berechnung von (Z+HZ)/L ergibt sich aus den Werten der Futtermittelanalytik für ADF (saure Detergenzien Faser), ADL (saure Detergenzien Lignin) und NDF (neutrale Detergenzien Faser) nach folgender Formel 2.

[35] Zheng, B., Richards, D.J., Smallman, D.J., Beaven, R.P.: „Assessing MSW degradation by BMP and fibre analysis". Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management, 160, (4), 133-139. (2007)

[36] Stinson, J. A. u. Ham, R. K.: „Effect of lignin on the anaerobic decomposition of cellulose as determined through the use of biochemical methane potential method". Environmental Science and Technology, 29 (9), 2305-2310. (1995)

[37] Ryan J. Kelly, Bradley D. Shearer, Jongmin Kim, C. Douglas Goldsmith, Gary R. Hater, John T. Novak: „Relationships between analytical methods utilized as tools in the evaluation of landfill waste stability". Waste Management 26, 1349–1356. (2006)

Formel 2: Berechnung des (Z+HZ)/L-Verhältnisses (nach ZHENG et al., 2008)[38]

$$\frac{Z + HZ}{L} = \frac{(ADF - ADL) + (NDF - ADF)}{ADL}$$

Abbildung 15 stellt die Methanausbeute (l kg^{-1} oTS) als Funktion des (Z+HZ)/L-Verhältnisses dar, ermittelt bei den Gärtemperaturen 20 °C und 38 °C.

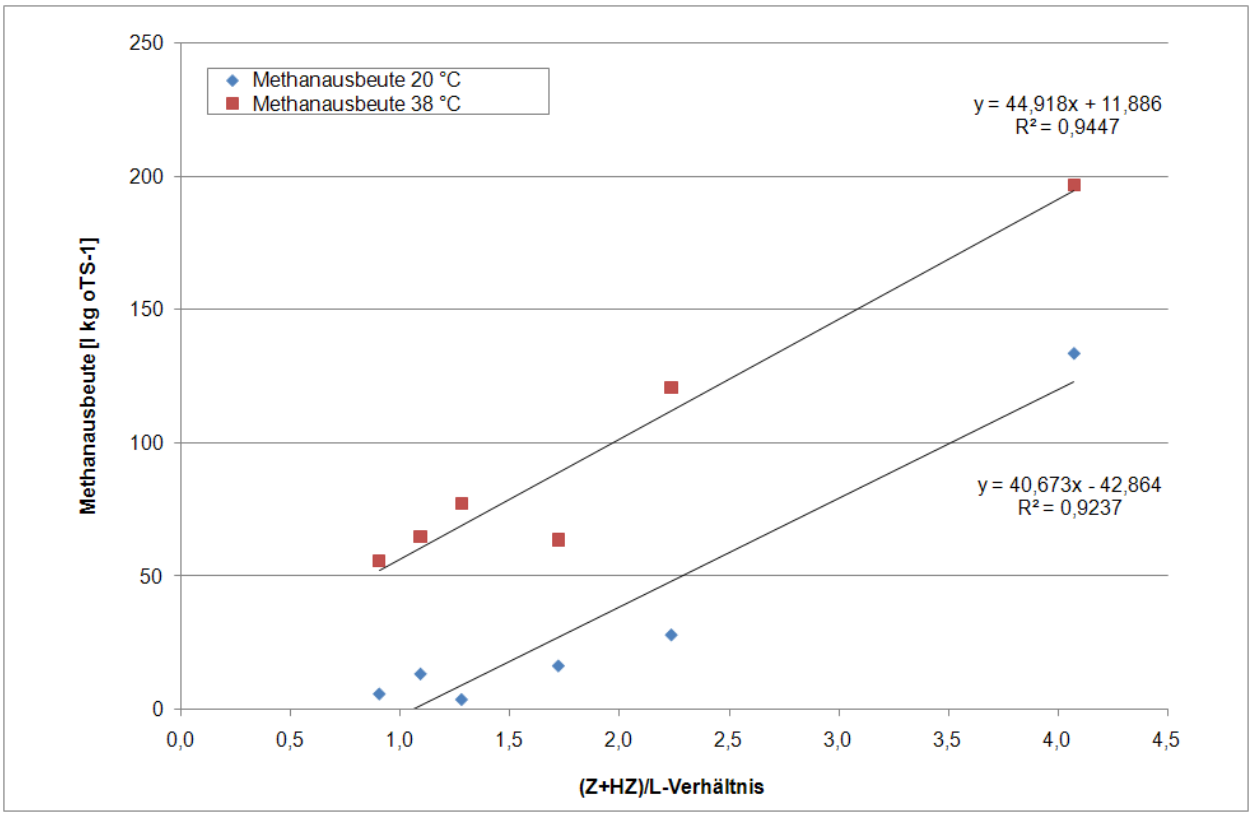

Abbildung 15: Beziehung zwischen Methanausbeute und (Z+HZ)/L-Verhältnis der Gärrückstände D, P und GK bei T = 20 °C und 38 °C

Es ist eine enge lineare Korrelation zwischen dem (Z+HZ)/L-Verhältnis und der Methanausbeute der einzelnen Gärrückstände feststellbar (R^2=0,95; 38 °C bzw. R^2=0,92; 20 °C). Je höher der Anteil an Zellulose und Hemizellulose im Verhältnis zum Lignin-Gehalt ist, desto höher ist auch das Restgaspotenzial. ZHENG et al. (2007)[38] fanden ebenfalls eine enge Korrelation zwischen der Biogasausbeute und (Z+HZ)/L in

[38] Zheng, B., Richards, D.J., Smallman, D.J., Beaven, R.P.: „Assessing MSW degradation by BMP and fibre analysis". Proceedings of the Institution of Civil Engineers: Waste and Resource Management, 160, (4), 133-139. (2007)

kommunalen Abfällen, während WANG et al. (1994)[39] und ELEAZER et al. (1997)[40] nur eine relativ schwache Beziehung zwischen dem (Z+HZ)/L-Verhältnis und der Biogasausbeute von Deponieabfällen ermitteln konnten.

2.2.1.4 Schlussfolgerungen zur stofflichen Charakterisierung der Gärrückstände

In den untersuchten Gärrückständen aus der anaeroben Fermentation von pflanzlichen Substraten variiert die stoffliche Zusammensetzung in Abhängigkeit von der Betriebsführung der Biogasanlage im Untersuchungszeitraum. Der Einsatz von Gülle beeinflusst die Zusammensetzung der Gärrückstände. Betrachtet man jedoch die mittleren Konzentrationen der einzelnen Inhaltsstoffe über einen längeren Zeitraum, so sind Vergleichbarkeiten der stofflichen Parameter insbesondere zwischen den mit Energiepflanzen betriebenen Anlagen erkennbar.

Pflanzennährstoffe liegen in löslicher und damit pflanzenverfügbarer Form vor. Der besser pflanzenverfügbare Ammonium-Stickstoff nimmt in allen Gärrückständen den überwiegenden Anteil am Gesamtstickstoff ein. Das enge C/N-Verhältnis in den Gärrückständen weist gleichfalls auf eine gute Stickstoffverfügbarkeit hin.

Schwermetalle spielen hier aufgrund der pflanzlichen Inputsubstrate keine Rolle.

Nicht nur der Gehalt an organischer Substanz, sondern ihre stoffliche Zusammensetzung im Hinblick auf die Rohnährstoffgruppen ADF, NDF und ADL beeinflusst das Restgaspotenzial von Gärrückständen entscheidend. Das (Z+HZ)/L-Verhältnis stellt hierbei einen nützlichen Indikator des Methanpotenzials von Gärrückständen dar. Es demonstriert die Diversität der abbaubaren organischen Fraktion von Gärrückständen bezüglich einer Restgaspotenzialbestimmung. Hier bedarf es jedoch weiterer Untersuchungsergebnisse, um diesen methodischen Ansatz für Gärrückstände aus mit Energiepflanzen betriebenen Anlagen zu festigen.

[39] Wang, Y.-S., Byrd, B. C. and Barlaz, M. A.: Anaerobic biodegradability of cellulose and hemicellulose in excavated refuse samples using a biochemical methane potential assay. J. Ind. Microbiol, (13), 147-153. (2004)

[40] Eleazer, W. E. Odle,W. S. Wang Y.-S., Barlaz, M. A.: Biodegradability of municipal solid waste components in laboratory-scale landfills. Env. Sci. Technol. (31 3), 911–917. (2007)

2.2.2 Biologische Beschaffenheit von Gärrückständen

2.2.2.1 Vorkommen und Bildung von Indol-3-essigsäure (IES)

2.2.2.1.1 IES-Vorkommen in Gärrückständen

Das Vorkommen an freier IES in den Gärmedien der einzelnen Prozessstufen der Biogasanlagen wurde durch die GC/MS-MS-Analyse bestätigt. Der Gehalt an IES in den Gärrückständen schwankte hierbei in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Probenahme, der Prozessstufe und der Biogasanlage. In Abbildung 16 sind die Mittelwerte sowie die maximalen und minimalen Werte der IES-Konzentration dargestellt.

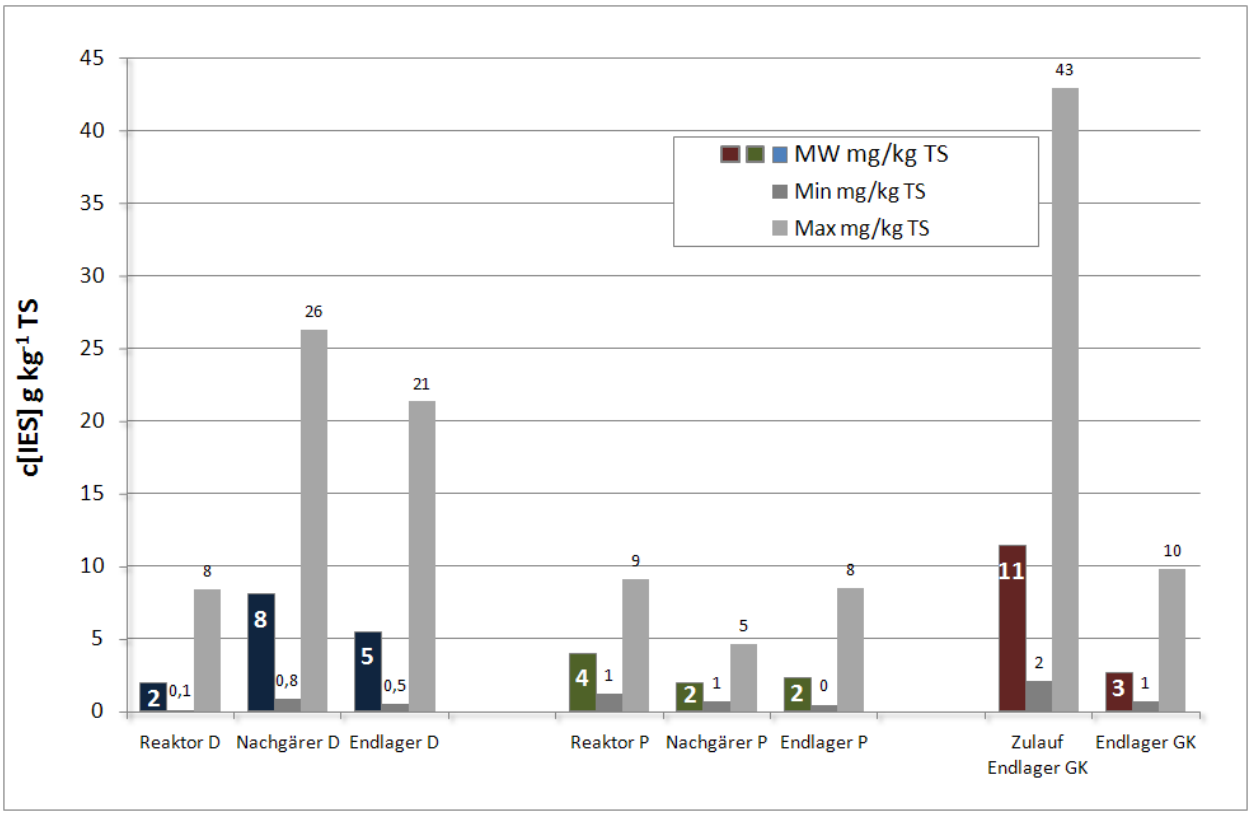

Abbildung 16: c[IES] [mg kg^{-1} TS] in den Gärmedien der Prozessstufen der untersuchten Biogasanlagen D, P und GK

In allen Stufen der Biogaserzeugung wurde freie und damit potenziell biologisch aktive Indol-3-essigsäure nachgewiesen. Der Gehalt an Indol-3-essigsäure in den Gärrückständen schwankt zwischen 0,1 – 43 mg kg^{-1} TS. Die durchschnittlich höchsten Konzentrationen an IES wurden in den Prozessstufen Reaktor und Nachgärer gemessen. In der nachfolgenden Stufe Endlager nahm die Konzentration an freier IES ab. Die beiden zuletzt genannten Sachverhalte lassen die Schlussfolgerung eines Abbaus bzw. der Konjugation der IES in den nachfolgenden Prozessstufen zu.

2.2.2.1.2 Spektrophotometrische Untersuchungen

Für zwei ausgewählte Gärrückstände aus Nachgärer NG (Anlage D) und Endlager EL (Anlage GK) ergaben sich beispielhaft die in Abbildung 17 dargestellten Spektren.

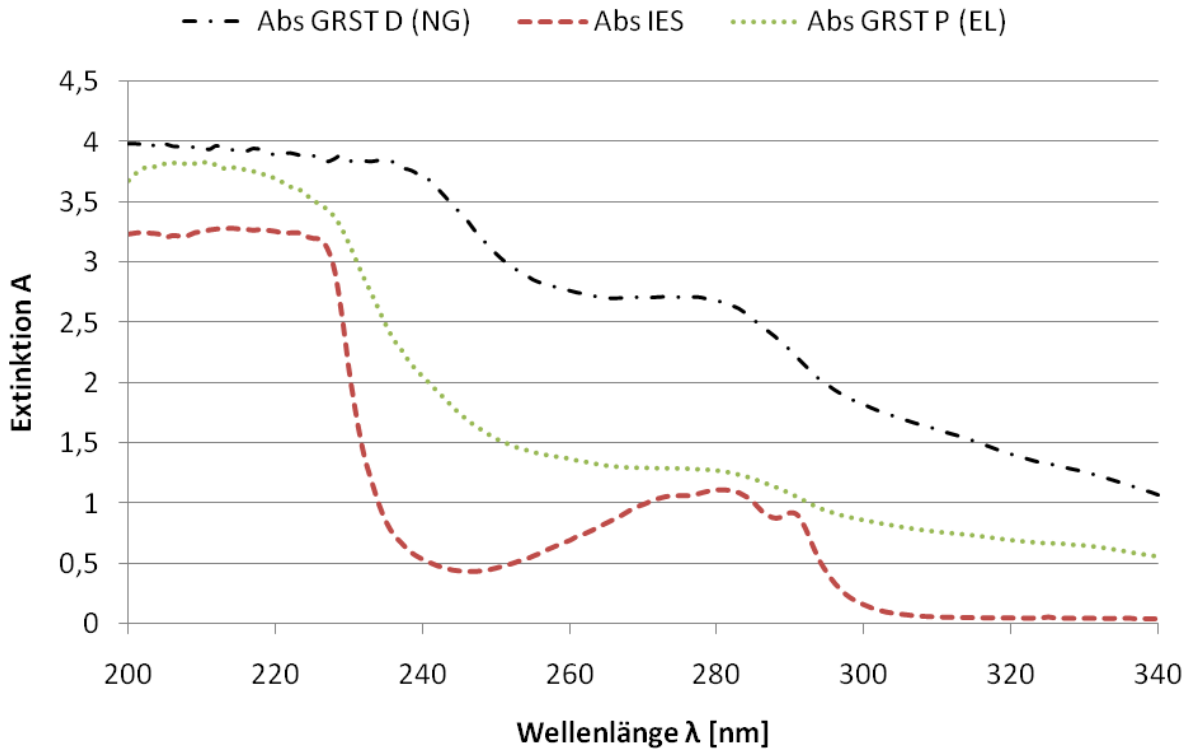

Abbildung 17: UV-Spektren der Gärrückstände D (NG) und P (EL) im Vergleich zum UV-Spektrum der Indol-3-essigsäure

Die UV-Spektren der Gärrückstände unterscheiden sich von dem Spektrum der Modellsubstanz IES. Während IES im Bereich unterhalb 250 nm bzw. oberhalb 320 nm nur noch eine geringe Absorption aufweist, zeigen die Gärrückstände eine Erweiterung des Absorptionsspektrums. Erkennbar ist, dass ein Absorptionsmaximum des Gärrückstandes GRS D (NG) mit λ_{max} = 274 nm tatsächlich im für Indol-Verbindungen typischen Wellenlängenbereich $\lambda \approx 270 – 290$ nm liegt. Für den Gärrückstand GRS P (EL) konnte trotz langgezogener „Schulter“ zwischen 270 und 290 nm kein absolutes Maximum in diesem Wellenlängenbereich bestimmt werden. Generell lassen die Spektren der Gärrückstände die Vermutung zu, dass neben Indol-3-essigsäure eine Vielzahl weiterer indolischer Verbindungen im Gärrückstand vorhanden sind (vgl. λ_{max} = 278 nm, typisches Absorptionsmaximum für Indol-Derivate).

2.2.2.1.3 Mikrobielle Bildung von IES in Gärrückständen

Versuch 1: Zur Analyse der Fähigkeit der Indol-3-essigsäurebildung in Gärmedien bzw. Gärrückständen von Biogasanlagen wurden zunächst in Batch-Versuchen unter anaeroben, mesophilen Bedingungen der Einfluss verschiedener Ausgangssubstrate und unterschiedlicher Verweilzeiten am Beispiel des GRS GK untersucht. Die Ergebnisse sind in Tabelle 18 zusammengefasst.

Tabelle 18: c[IES] [mg kg^{-1} FM] im Gärrückstand der Anlage GK nach Zugabe von Gülle [0,4 g kg^{-1} FM], Trp [0,2 g kg^{-1} FM] + Glc [2,0 g kg^{-1} FM], Glc [2,0 g kg^{-1} FM] im Vergleich zur Kontrolle K (ohne Zusätze) nach 0, 7, 14 und 35 Tagen

Ansatz	0 Tage	7 Tage	14 Tage	35 Tage
	c[IES] [mg kg^{-1} FM]			
Gülle	0,039	n. n.	0,012	0,012
Glc+Trp	0,019	**6,267**	n. n.	0,032
Glc	0,006	n. n.	n. n.	0,010
Silage	0,019	**0,096**	n. n.	0,018
Kontrolle	0,006	n. n.	0,014	0,037

Nach sieben Tagen ist ein Anstieg der IES-Konzentration im Ansatz mit Glucose und Tryptophan (6,3 mg kg^{-1} FM) sowie Silage (0,1 mg kg^{-1} FM) erkennbar. In den anderen Ansätzen schien nach sieben Tagen keine IES gebildet bzw. IES abgebaut oder konjugiert worden zu sein. Nach zwei Wochen konnte außer in den Ansätzen mit Gülle und in der Kontrolle keine IES mehr nachgewiesen werden. Nach 35 Tagen wurde erneut in allen Ansätzen IES detektiert.

Auf Grund dieses Versuches wurde angenommen, dass Tryptophan (Trp) einen entscheidenden Einfluss auf die Bildung von IES in Gärrückständen hat, allerdings nach sieben Tagen entweder bereits vollständig umgesetzt bzw. abgebaut oder konjugiert wurde. Nach 35 Tagen kann wiederum ein Teil der Biomasse abgestorben und damit möglicherweise tryptophanhaltige Aminosäuren aus dem Proteinabbau für eine erneute Synthese von IES zur Verfügung stehen.

Darauf aufbauend wurde ein Versuch mit dem Modellsubstrat Trp als Zusatz zu allen drei Gärrückständen durchgeführt. Es sollte die Annahme geprüft werden, dass eine mikrobielle Biosynthese von IES auf der Basis von Trp und seine Umsetzung zu IES unter anaeroben Bedingungen innerhalb von weniger als sieben Tagen in Gärrückständen stattfindet.

Versuch 2: Die IES-Produktion wurde an drei verschiedenen Gärrückständen D, P und GK mit Zugabe von Tryptophan untersucht. Für eine Stimulanz der bakteriellen Aktivität erfolgte die Zugabe von Glucose als externe C-Quelle (Abbildung 18). Als Vergleich dienten die jeweiligen Gärrückstände ohne Zusätze als Kontrolle.

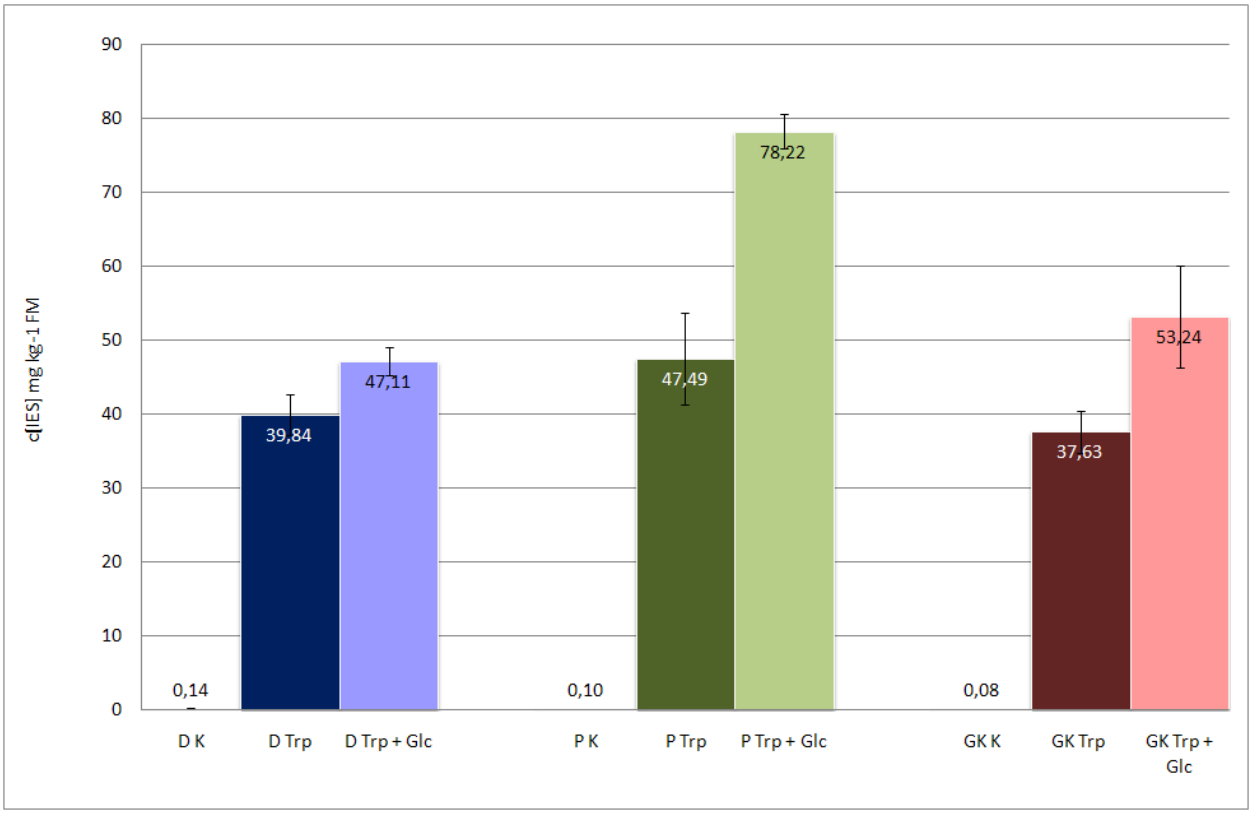

Abbildung 18: c[IES] [mg kg^{-1} FM] in den Gärrückständen der Anlagen D, P und GK nach Zugabe von Trp [0,4 g kg^{-1} FM] und Trp [0,4 g kg^{-1} FM] + Glc [4,0 g kg^{-1} FM] im Vergleich zur Kontrolle K (ohne Zusätze) nach 24 h;
MW ± Stabw.

In allen Varianten wurde IES auf der Basis von Trp gebildet. Die höchste Konzentration wurde in der Variante P (Trp+Glc) mit 78 mg kg^{-1} FM ermittelt. Die Ergebnisse lassen die Schlussfolgerung zu, dass ein mikrobieller, tryptophanabhängiger Biosyntheseweg für IES in den Gärmedien der Biogasanlagen vorliegt. Der Zusatz von Glucose als leicht verwertbare C-Quelle förderte den mikrobiellen Stoffwechsel und damit eine vermehrte Produktion von IES.

Versuch 3: Welcher zeitabhängigen Dynamik die IES-Bildung bzw. auch deren Abbau im Prozess unterliegt, ist in Abbildung 19 dargestellt. Dazu wurde ein Gärrückstand der

Anlage D mit Trp und Glc versetzt und nach jeweils 24, 48, 72 und 120 h analysiert im Vergleich zur parallel laufenden Kontrolle ohne Zugabe von Trp bzw. Glc.

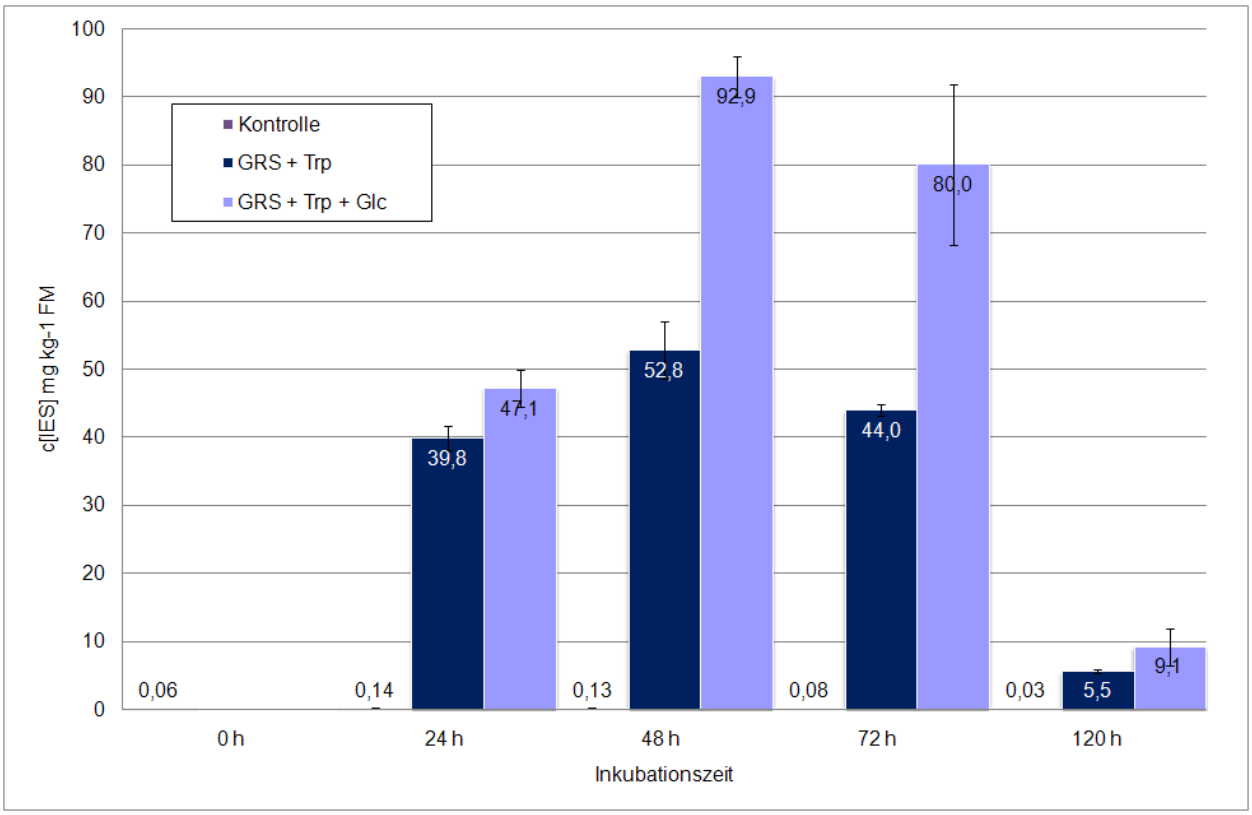

Abbildung 19: c[IES] [mg kg^{-1} FM] im Gärrückstand der Anlage D; Zugabe von Trp [0,4 g kg^{-1} FM] und Trp [0,4 g kg^{-1} FM] + Glc [4,0 g kg^{-1} FM] nach 24, 48, 72 und 120 h im Vergleich zur Kontrolle ohne Zugabe von Trp bzw. Glc;
MW ± Stabw.

Deutlich erkennbar ist ein Maximum der IES-Konzentration nach 48 h für beide Varianten (Trp; Trp und Glc). Aber auch in der Kontrolle steigt die IES-Konzentration leicht an. Glucose wirkt stoffwechselstimulierend. Es wird in dieser Variante mit 93 mg IES kg^{-1} FM eine nahezu doppelt so hohe Konzentration gemessen wie in der Variante ohne Zusatz von Glucose (53 mg IES kg^{-1} FM). Nach 120 h kann nur noch eine geringe Menge an freier IES in beiden Varianten gemessen werden, was auf einen Abbau oder eine Konjugation der IES zurückführbar wäre. Ein Rückgang der IES-Konzentration fand auch in der Kontrolle statt. Da keine hydrolytische Vorbehandlung der Proben zur Analyse der gebundenen IES stattgefunden hat, kann nicht abschließend geklärt werden, ob freie IES tatsächlich einem mikrobiellen Abbau unterliegt oder mit anderen Inhaltsstoffen, wie z. B. Kohlenhydraten und/oder

Aminosäuren bzw. Peptiden im Gärrückstand konjugiert. Eine Konjugation hätte eine (temporäre) biologische Inaktivierung der IES zur Folge.

2.2.2.2 Bioassays zur auxin-analogen-Wirkung

2.2.2.2.1 Bioassay Mungbohne (*Vigna radiata*)

Der Bioassay beruht auf der Induktion bzw. Förderung der Adventivwurzelbildung durch Auxine. Dabei erfolgt die Teilung und Kontrolle der ersten Zellen der Adventivwurzel-primordien durch pflanzeneigene Auxine und auch durch applizierte Auxine.

Im Bioassay getestet wurden die Extrakte von jeweils drei Gärrückständen aus den Anlagen D (D1 - D 3) und P (P1 - P3) sowie von zwei Gärrückständen der Anlage GK (GK1, GK2). In der Abbildung 20 ist die Wurzelanzahl von Mungbohnenkeimlingen dargestellt nach sechsstündiger Induktion in den unverdünnten Extrakten der GRS D, P und GK und in den Verdünnungsstufen 1:1 und 1:49. Als Referenz dienten IES-Lösungen (10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1}) und eine Kontrolle (dest. Wasser).

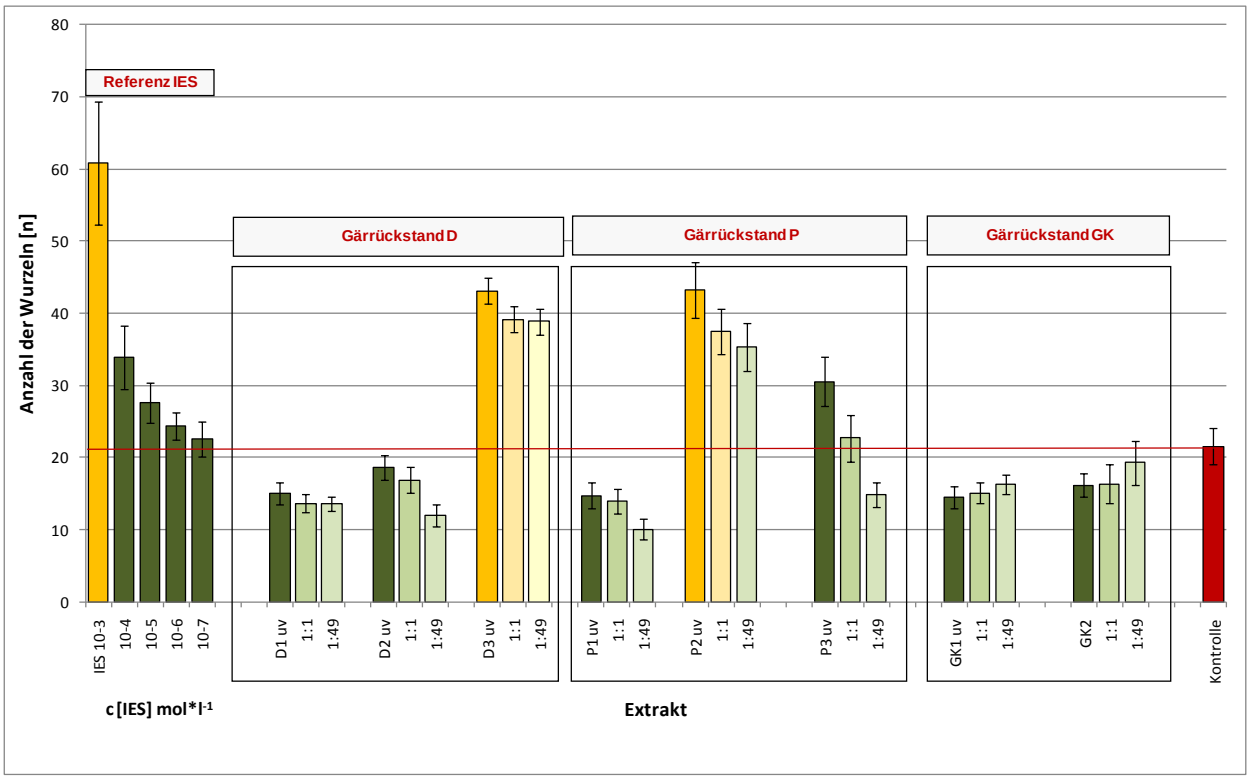

Abbildung 20: Anzahl der Wurzeln [n] von Mungbohnenkeimlingen im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1 und 1:49 verdünnt) im Vergleich zur IES-Referenz (10^{-3} bis 10^{-7} mol l^{-1}) und Kontrolle (dest. Wasser);
MW ± Stabw.; orangefarbige Balken unterscheiden sich signifikant von der Kontrolle (Duncan-Test, α=0,05)

Eine Hemmung der Wurzelbildung im Vergleich zur Kontrolle wurde in den unverdünnten Extrakten der Gärrückstände D1, D2, P1 und P2 sowie GK1 und GK2 festgestellt. Eine Verdünnung der Extrakte scheint diesen Effekt noch zu verstärken. Eine Ausnahme bilden die Gärrückstände aus der Anlage GK. In den Verdünnungsstufen erfolgt eine tendenzielle Erhöhung der Anzahl der Wurzeln.
Eine signifikante Förderung der Wurzelbildung ist für c[IES] = 10^{-3} mol l^{-1} sowie den Extrakten D3 (alle Stufen) und P2 (unverdünnt und 1:1-Verdünnung) ermittelt worden.

2.2.2.2.2 Bioassay Kresse (*Lepidium sativum*)

Die Versuche wurden mit den Gärrückständen D, P und GK aus dem Inkubationsversuch (siehe Kapitel 3.1.2.1.3) durchgeführt.

Tabelle 19: Stoffkennwerte der für den Bioassay mit Kresse verwendeten Gärrückstande (GRS) aus den Biogasanlagen D, P und GK

Parameter	GRS D	GRS P	GRS GK
pH-Wert	7,71	8,03	7,92
TS [%]	6,09	6,01	4,89
oTS [%]	74,01	65,53	75,89
N_{ges} [%]	0,55	0,44	0,28
NH_4^+ [%]	0,37	0,18	0,14
IES [mg kg^{-1} FM]	0,06	0,20	0,09

In Vorversuchen wurde festgestellt, dass eine 6-h-Induktion der Samen in der IES- bzw. GRS-Extrakt-Lösung analog der Induktion der Keimlinge im Mungbohnen-Bioassay zu keinen messbaren Unterschieden in der Wurzellänge vor allem bei geringen IES-Konzentrationen führt. Deshalb wurde auf das Verfahren der Induktion in weiteren Versuchen verzichtet und die Samen über den gesamten Versuchszeitraum in den Testlösungen belassen.
Versuche mit wässrigen Extrakten aus 1, 2 und 4 g gefriergetrocknetem Gärrückstand führten im Falle der beiden letzten Varianten zu einer extremen Hemmung der Wurzelbildung der Kressekeimlinge (Abbildung 21).

Abbildung 21: Wurzelentwicklung der Kressekeimlinge im Bioassay mit Extrakten aus 1, 2 und 4 g der Gärrückstände D und GK nach 120 h

Für die nachfolgenden Versuche wurden die Extrakte aus 1 g Gärrückstand hergestellt. In Abbildung 22 ist der Einfluss von Gärrückstandsextrakten D, P und GK in verschiedenen Verdünnungsstufen (unverdünnt, 1:1, 1:49) im Vergleich zur Referenz IES (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und Kontrolle auf die Wurzelentwicklung von Kresse *(Lepidium sativum)* nach 120 h dargestellt.

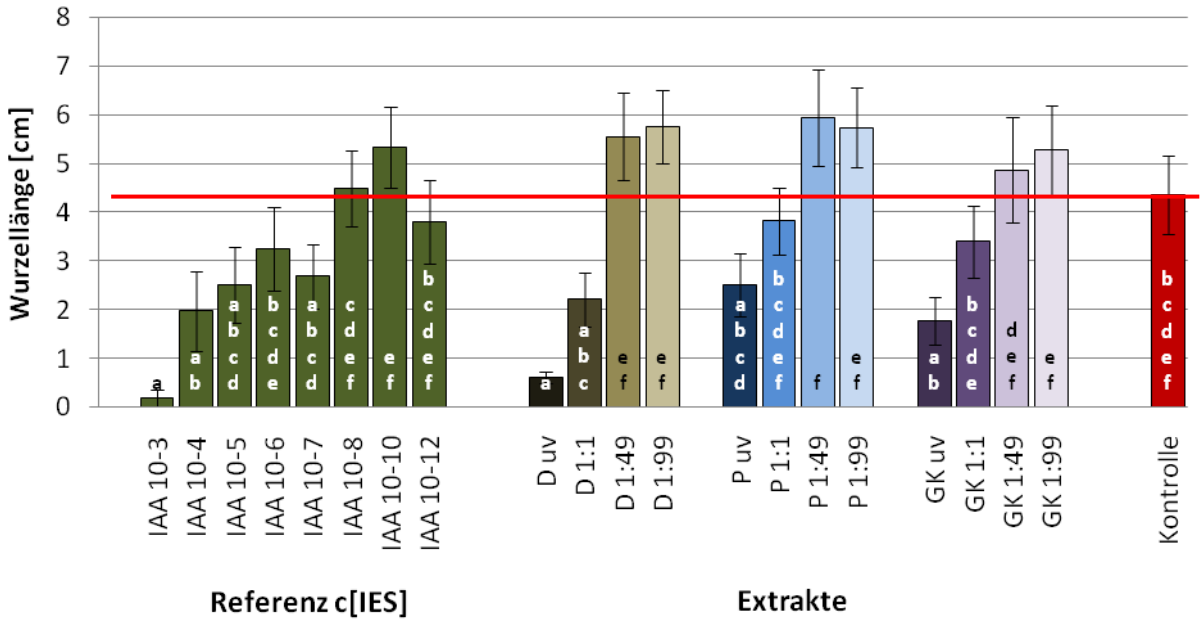

Abbildung 22: Wurzellänge [cm] von Kressekeimlingen im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1, 1:49 und 1:99 verdünnt) im Vergleich zur IES-Referenz (10^{-3} bis 10^{-12} mol l^{-1}) und Kontrolle (dest. Wasser) nach 120 h;

MW ± Stabw.; Tukey-Test, α=0,05

Die Kresse-Samen in den unverdünnten Extrakten der Gärrückstände D, P und GK reagieren mit einer stark gehemmten Wurzelentwicklung, entsprechend dem Konzentrationsbereich 10^{-3} bis 10^{-5} mol l^{-1} IES. Eine 1:1-Verdünnung der Extrakte bedingt eine bessere Wurzelentwicklung; eine Hemmung im Vergleich zur Kontrolle ist jedoch ersichtlich. Die Verdünnungsstufen 1:49 und 1:99 zeigen für alle GRS-Extrakte hingegen eine Förderung der Wurzelentwicklung, insbesondere für die GRS-Extrakte D und P (siehe Abbildung 23). Sie sind vergleichbar mit dem IES-Konzentrationsbereich 10^{-10} mol l^{-1} IES.

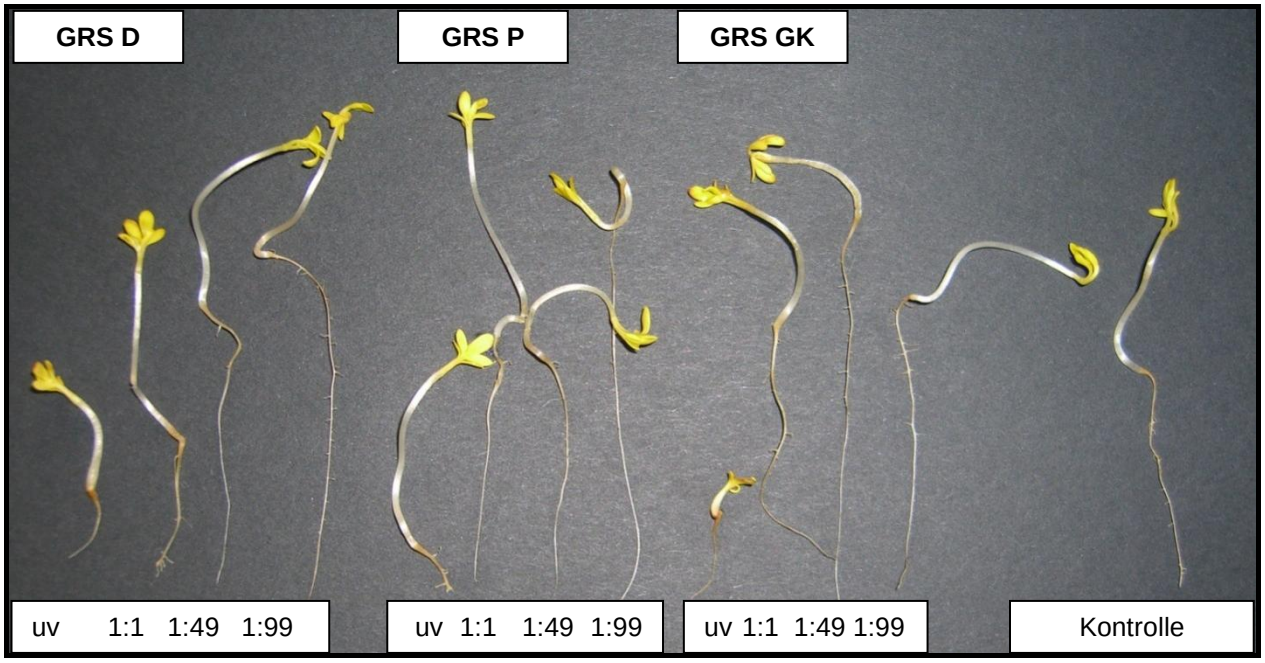

Abbildung 23: Wurzelentwicklung der Keimlinge der Kresse im Bioassay mit Extrakten der Gärrückstände D, P und GK (uv - unverdünnt; 1:1, 1:49 und 1:99 verdünnt) im Vergleich zur Kontrolle (dest. Wasser) nach 120 h

Ausgehend von den bekannten IES-Konzentrationen in den getrockneten Gärrückständen lässt sich eine theoretische IES-Konzentration in den Extrakten (1 g trockener GRS je 100 ml dest. Wasser) und in den entsprechenden Verdünnungsstufen berechnen (siehe Tabelle 20). Es wird dabei unterstellt, dass während der Extraktion keine Verluste entstehen.

Tabelle 20: Berechnung der theoretischen IES-Konzentrationen [mol l^{-1}] in den Extrakten der GRS D, P und GK und in ihren Verdünnungsstufen

Variante	Einheit	GRS D	GRS P	GRS GK
		IES-Konzentration		
trockener GRS	**[nmol g^{-1} TS]*)**	4,0	16,0	11,0
unverdünnt**	**[mol l^{-1}]**	$4,0*10^{-10}$	$1,6*10^{-11}$	$1,1*10^{-11}$
1:1	**[mol l^{-1}]**	$2,0*10^{-10}$	$0,8*10^{-12}$	$0,6*10^{-12}$
1:49	**[mol l^{-1}]**	$8,0*10^{-12}$	$3,2*10^{-13}$	$2,2*10^{-13}$
1:99	**[mol l^{-1}]**	$4,0*10^{-12}$	$1,6*10^{-13}$	$1,1*10^{-13}$

*) die Konzentrationsangabe bezieht sich auf einen Gramm trockene Probe

**) unverdünnt: Extrakt aus 1 g trockenem GRS in 100 ml dest. Wasser

Die berechnete IES-Konzentration in den unverdünnten Extrakten umfasst den Bereich von $1,1*10^{-11}$ bis $4,0*10^{-10}$ mol l^{-1} IES, vergleichbar mit dem im Bioassay gefundenen IES-Konzentrationsbereich der Wurzelförderung. Es wurde dennoch eine Hemmung der Wurzelentwicklung festgestellt. Das lässt zum einem vermuten, dass sich in den Extrakten Substanzen befinden, die eine starke auxin-analoge Wirkung besitzen. Erst durch eine Verdünnung werden Konzentrationsbereiche erreicht, die eine Förderung der Wurzelentwicklung zur Folge haben. Eine weitere Erklärung wäre zum anderen, dass Substanzen in den unverdünnten GRS-Extrakten enthalten sind, die toxisch auf den Keimling wirken und erst durch eine entsprechende Verdünnung diese Wirkung weitgehend verlieren.

In einem weiteren Versuch wurde die Möglichkeit des Effektes einer möglichen Interaktion von IES mit Inhaltsstoffen des Gärrückstandes auf die Wurzelentwicklung des Kressekeimlings untersucht. Dazu wurden die am Rotationsverdampfer bis zur Trockne eingeengten Gärrückstandsextrakte D, P und GK sowohl in Wasser als auch in 10^{-10} molarer IES-Lösung aufgenommen. Ein Vergleich erfolgte mit Wasser und einer 10^{-10} molaren IES-Lösung. Die Ergebnisse zum Versuchszeitpunkt 48, 72 und 120 h sind in der folgenden Abbildung 24 dargestellt.

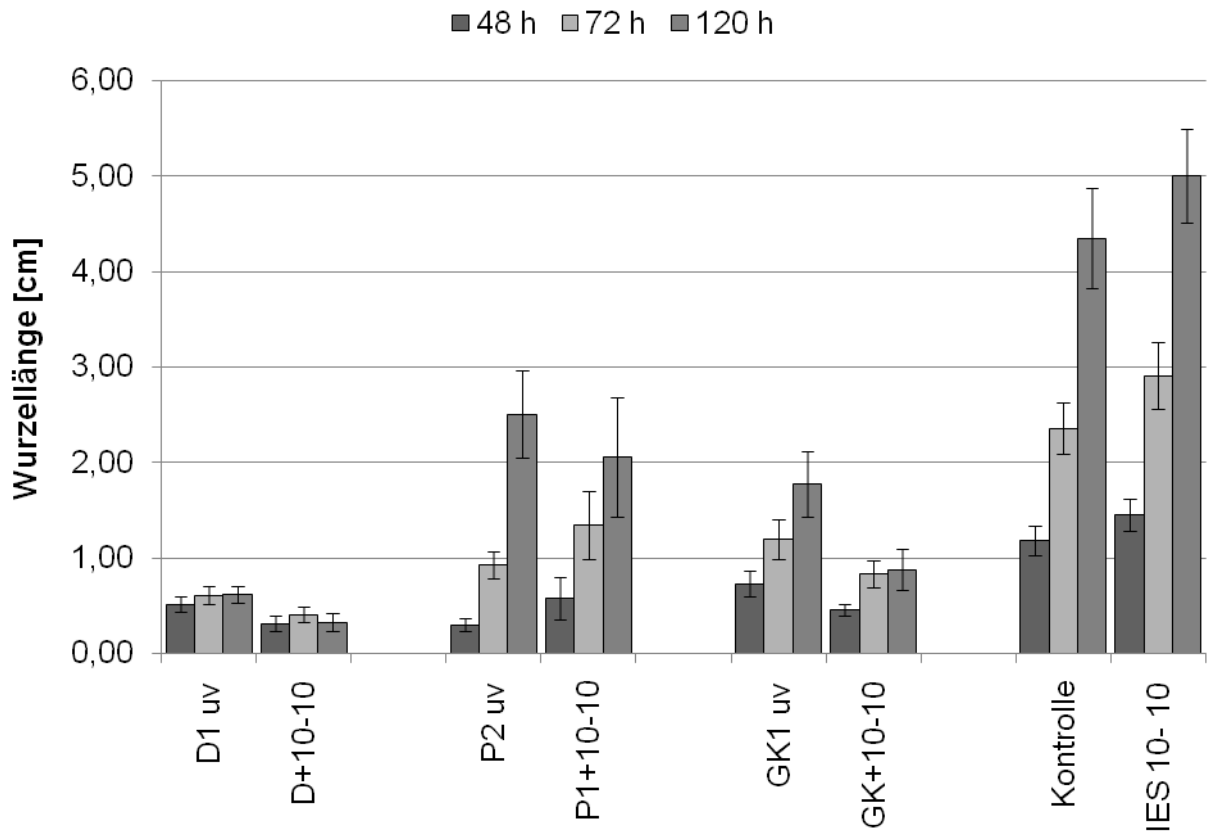

Abbildung 24: Effekt einer möglichen Interaktion von IES c[10^{-10} mol l^{-1}] mit Inhaltsstoffen des Gärrückstandes auf die Wurzelentwicklung von *Lepidium sativum* nach 48, 72 und 120 h;

MW ± Stabw.

Während eine 10^{-10} molare IES-Lösung tendenziell eine leichte Wurzellängenförderung des Kressekeimlings bewirkt, verstärkt die Zugabe von IES in diesem Konzentrationsbereich zu den Gärrückständen vielmehr die mit GRS allein erzielte Hemmung der Wurzelbildung, insbesondere bei den Gärrückständen D und GK. Einzig für den GRS P ergibt die Zugabe von IES nach 48 und 72 h zunächst eine Förderung der Wurzelentwicklung. Nach 120 h ist jedoch in allen GRS-Varianten mit IES eine geringere Wurzellänge festgestellt worden im Vergleich zum GRS-Extrakt ohne IES. Durch die Zugabe von IES kommt es zu einer Konzentrationserhöhung, die eine verminderte Wurzellänge zur Folge haben könnte. Eine weitere Erklärung wäre aber auch die Bildung eines Komplexes der IES mit Substanzen im GRS, der hemmend auf die Wurzelentwicklung der Kressekeimlinge wirkt.

2.2.2.3 Pflanzenverträglichkeitstest

Mit Gärrückständen aus zwei verschiedenen Anlagen (D und GK) und verschiedenen Prozessstufen (Nachgärer, Endlager) wurde ein Pflanzenverträglichkeitstest durchgeführt. Da der Versuch unverzüglich nach Probenahme der Gärrückstande vorbereitet werden musste, konnte eine entsprechende Gärrückstandsanalytik bezüglich der exakten Gehalte an TS, oTS, N und NH_4^+ (Tabelle 21) erst nach Versuchsbeginn durchgeführt werden.

Tabelle 21: Ausgewählte Stoffkennwerte der für den Pflanzenverträglichkeitstest verwendeten Gärrückstande (GRS) aus den Biogasanlagen D und GK

Gärrückstand	TS	oTS	N	NH_4^+	pH-Wert
	[%]	[% TS]	[%]	[%]	-
GRS D – NG	7,83	83,96	0,53	0,28	7,95
GRS D – EL	4,78	76,45	0,59	0,41	7,92
GRS GK - EL	5,45	79,22	0,28	0,15	7,37

Die Bewertung der Pflanzenverträglichkeit der drei Gärrückstände erfolgt anhand der Mediane der oberirdischen Frischmassenerträge (Sprossfrischmasse) der vier Wiederholungen je Gärrückstandskonzentration[41]. Die Erträge werden prozentual in Relation zum mittleren Ertrag (Median) der Nullvariante ausgedrückt (Formel 3).

Formel 3: Berechnung zur Bewertung der Pflanzenverträglichkeit auf der Basis der Sprossfrischmasse

$$FM\,(r) = \frac{FM_{\text{Variante/N–Konzentration}}}{FM_{EE0}} * 100\,\%$$

FM(r): Relativer Ertrag der Varianten bezüglich des Vergleichssubstrats EE0 in [%]

FM: Mittlere Frischmasseerträge der einzelnen Varianten/N-Konzentrationen in [g]

FM_{EE0}: Mittlerer Frischmasseertrag des Vergleichssubstrats in [g]

[41] Entsprechend dem Methodenbuch Kompost (1998) der Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V. gilt Kompost als pflanzenverträglich, wenn keine sichtbaren Chlorosen oder Nekrosen an den Blättern auftreten und der Frischmasseertrag der Varianten mit 25% bzw. 50% Kompostanteil mindestens 90% des Ertrages des Vergleichssubstrates erreicht. Bei Erfüllung dieser Anforderungen kann Kompost zur Verwendung als Bodenverbesserungsmittel und Dünger (Variante 25%) oder darüber hinaus prinzipiell auch für die Verwendung als Mischkomponente in Blumenerden und Kultursubstraten empfohlen werden (Variante 50%). Da es bisher keine Vorgaben für (flüssige) Gärrückstände gibt, wird für die Ergebnisbewertung der geforderte relative Frischmassemindestertrag von 90% verwendet.

Sprossfrischmasse (FM) und Sprosstrockenmasse (TM)

In Abbildung 25 ist der Einfluss verschiedener Gärrückstände- und -konzentrationen sowie der zwei unterschiedlichen Ausbringungsmethoden auf den relativen Frisch- und Trockenmasseertrag [%] im Pflanzenverträglichkeitstest grafisch dargestellt. Eine Ermittlung der Sprosstrockenmasse in allen Versuchsvarianten erfolgte nach der Trocknung der Frischmasse.

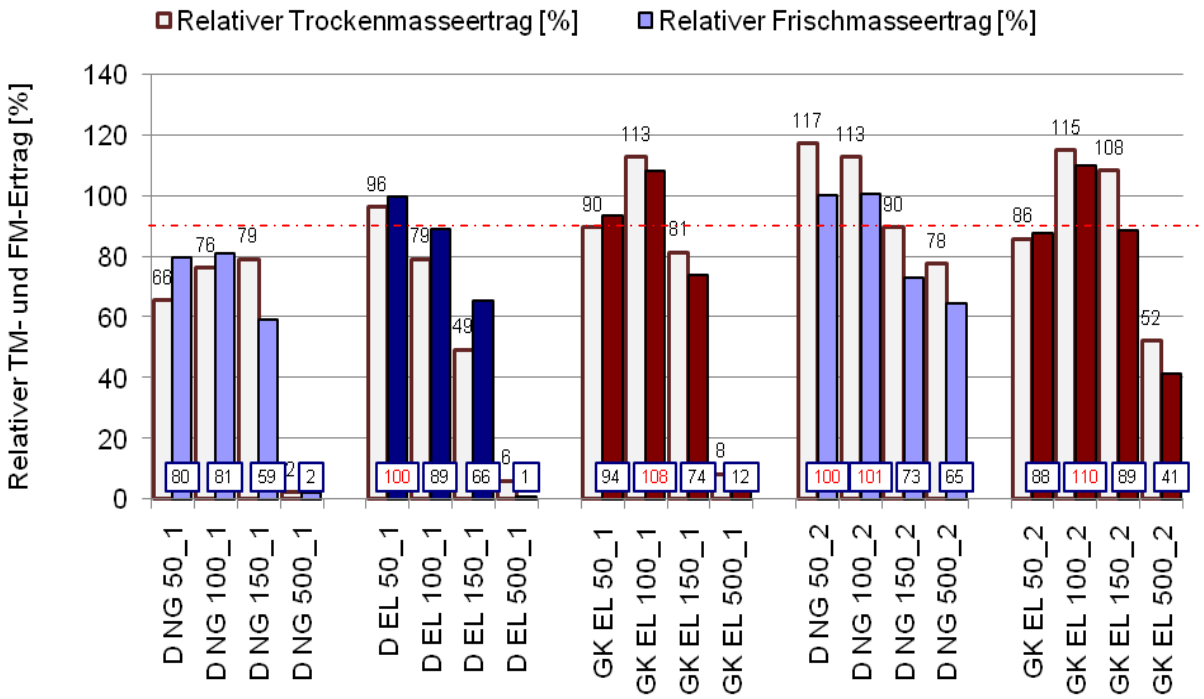

Abbildung 25: Einfluss der verschiedenen Gärrückstände (D, GK) und GRS-Konzentrationen sowie Ausbringungsmethoden auf den relativen Frisch- und Trockenmasseertrag [%] im Pflanzenverträglichkeitstest

NG – Nachgärer, EL – Endlager, Variante 1 – ohne Einarbeitung, Variante 2 – mit Einarbeitung

-------- geforderter Mindestwert von 90 % der relativen Frischmasse bezüglich des Vergleichssubstrats EE0

Deutlich ist eine bessere Pflanzenverträglichkeit in allen Versuchsreihen mit den geringeren N-Aufwandmengen von 50 und 100 kg ha^{-1} N. Allerdings wird der geforderte Mindestwert der relativen Frischmasse von 90 % in der Variante ohne Einarbeitung des Gärrückstandes nur durch die Gärrückstände aus den Endlagern (EL) in den Versuchsreihen 50 kg ha^{-1} N (Anlage D und GK) und 100 kg ha^{-1} N (Anlage D) erreicht. Eine Verbesserung der Pflanzenverträglichkeit ergibt sich offenbar durch die Einarbeitung des Gärrückstandes in den Boden. Dies gilt insbesondere für den Gärrückstand aus dem Nachgärer der Anlage D. Die Versuchsreihen 50 kg ha^{-1} N und 100 kg ha^{-1} N erreichen hier einen relativen Frischmasseertrag von 100 % bzw. 101 %. Eine statis-

tische Bewertung der Ergebnisse für die relative Frischmasse in Abhängigkeit vom Einarbeitungsverfahren ergab mit $p < 0,05$ signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit und ohne Einarbeitung. Das Verfahren der Einarbeitung des Gärrückstandes bringt insbesondere in der Variante 500 kg ha^{-1} N signifikante Effekte auf relative Frisch- und Trockenmasse. Dies ist nachweisbar für beide Biogasanlagen.

Wurzeltrockenmasse

Die Ermittlung der Wurzeltrockenmasse erfolgte nach Auswaschen und Trocknen der Wurzeln bei 105 °C. Abbildung 26 stellt den Einfluss verschiedener Gärrückstände- und -konzentrationen sowie Ausbringungsmethoden auf die relative Wurzeltrockenmasse im Pflanzenverträglichkeitstest im Vergleich zur Kontrolle dar.

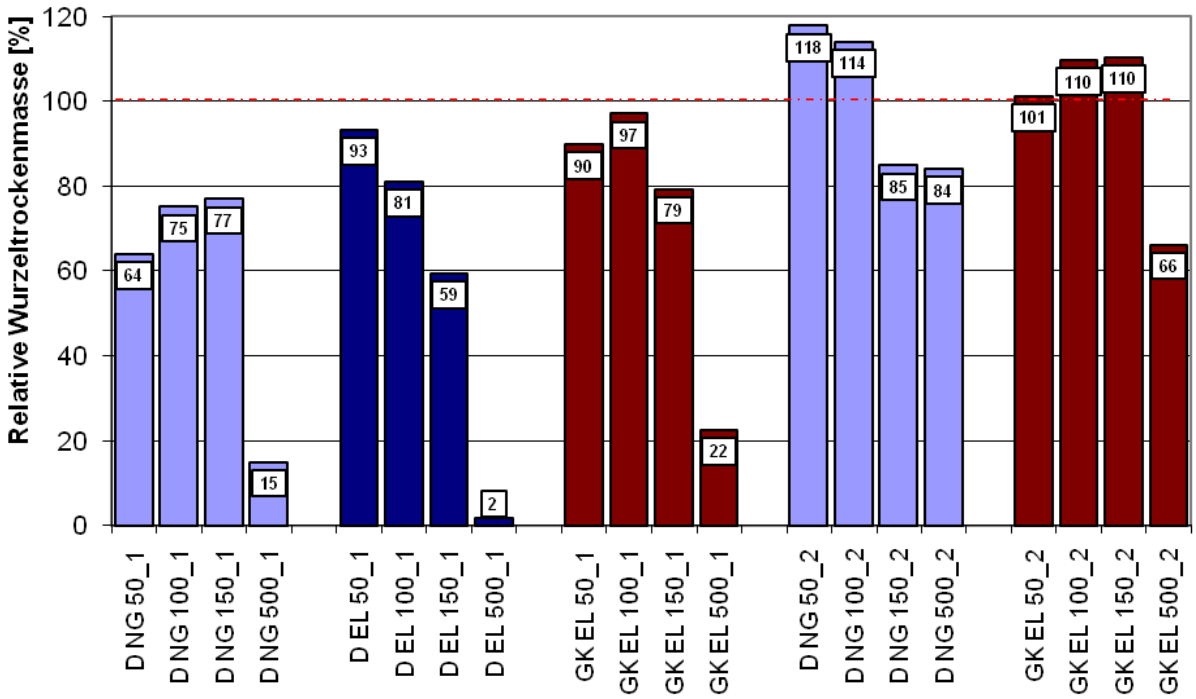

Abbildung 26: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf die relative Wurzeltrockenmasse [%] im Pflanzenverträglichkeitstest

NG – Nachgärer, EL – Endlager, Variante 1 - ohne Einarbeitung, Variante 2 – mit Einarbeitung

-------- relative Wurzeltrockenmasse 100 % bezüglich des Vergleichssubstrates EE0

Die relative Wurzeltrockenmasse variiert bezüglich der jeweiligen Gärrückstände, Gärrückstandskonzentrationen und der Form der Gärrückstandseinarbeitung.

Erkennbar ist eine Zunahme der Wurzeltrockenmasse mit steigender Konzentration in den ersten drei Versuchsreihen mit dem Gärrückstand (Nachgärer) der Biogasanlage D in der Variante 1 ohne Einarbeitung (vgl. auch Abbildung 27) Dagegen nimmt die Wurzeltrockenmasse mit steigender Gärrückstandsgabe in der Variante 2 (mit Einarbeitung) ab. Gegensätzlich verhält sich der Gärrückstand aus der Biogasanlage GK. In der Variante 1 (ohne Einarbeitung) ist tendenziell eine Abnahme der Wurzeltrockenmasse mit steigender Gärrückstandsgabe zu verzeichnen. Eine bessere Wurzelentwicklung im Vergleich zur Kontrolle zeigen die Versuchsreihen der Variante mit Einarbeitung des Gärrückstandes in den Boden.

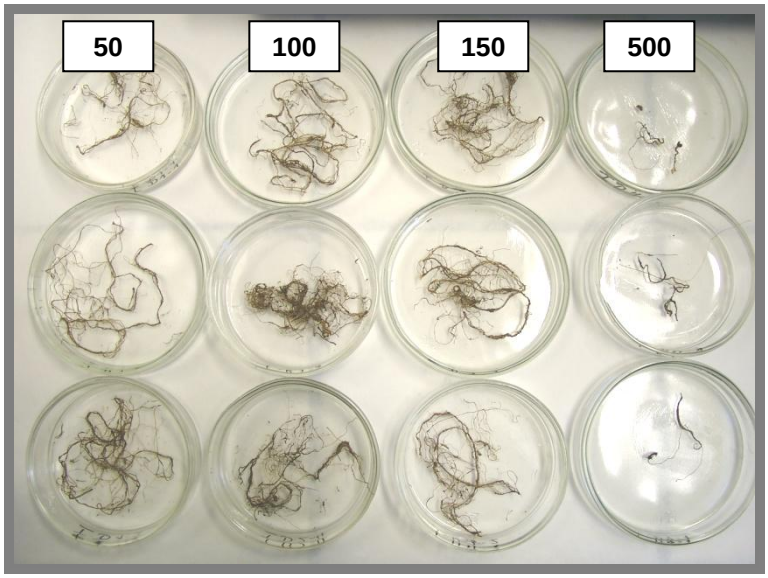

Abbildung 27: Wurzeltrockenmasse der Versuchsreihen 50, 100, 150 und 500 kg ha^{-1} N (Gärrückstand NG, Anlage D, Variante 1) im Vergleich

Sprosslänge

Eine Messung der Sprosslänge in allen Versuchsvarianten erfolgte nach 3, 5, 7, 10 und 12 Tagen. Die entsprechenden Ergebnisse für die relative Sprosslänge werden für den Tag 12 dargestellt (Abbildung 28).

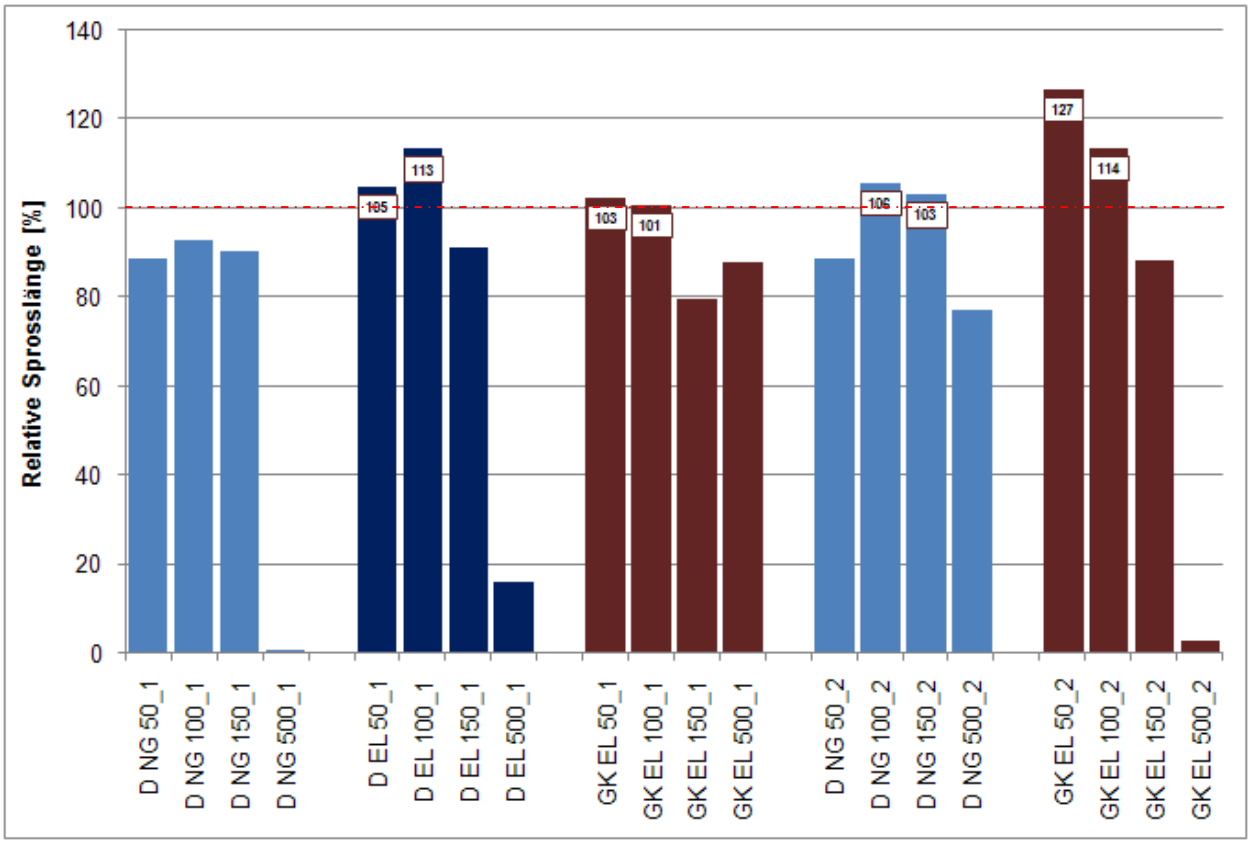

Abbildung 28: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf die relative Sprosslänge [%] im Pflanzenverträglichkeitstest

NG – Nachgärer, EL – Endlager, Variante 1 - ohne Einarbeitung, Variante 2 – mit Einarbeitung

-------- relative Sprosslänge 100 % bezüglich des Vergleichssubstrates EE0

Tendenziell ist ein besseres Längenwachstum der Pflanzen in den Varianten 50 und 100 kg ha^{-1} N erkennbar, vor allem in den Varianten mit den Gärrückständen aus den Endlagern. Es konnten jedoch nach einer statistischen Prüfung keine signifikanten Einflüsse auf die Sprosslänge durch die Herkunft des Gärrückstandes (Biogasanlage und Prozessstufe) nachgewiesen werden. Ein signifikanter Unterschied wurde für den Parameter Sprosslänge nur bei Variante 500 kg ha^{-1} N im Vergleich zu den anderen Varianten nachgewiesen. Ferner unterschied sich diese Variante auch bezüglich der Ausbringungsform signifikant von den anderen Varianten (*ausgewertet im NP-Verfahren, Mann-Whitney-Test*).

Wasserverbrauch

In Abbildung 29 ist der Einfluss der verschiedenen Gärrückstände und der GRS-Konzentrationen sowie Ausbringungsmethoden auf den relativen Wasserverbrauch [%] im Pflanzenverträglichkeitstest dargestellt.

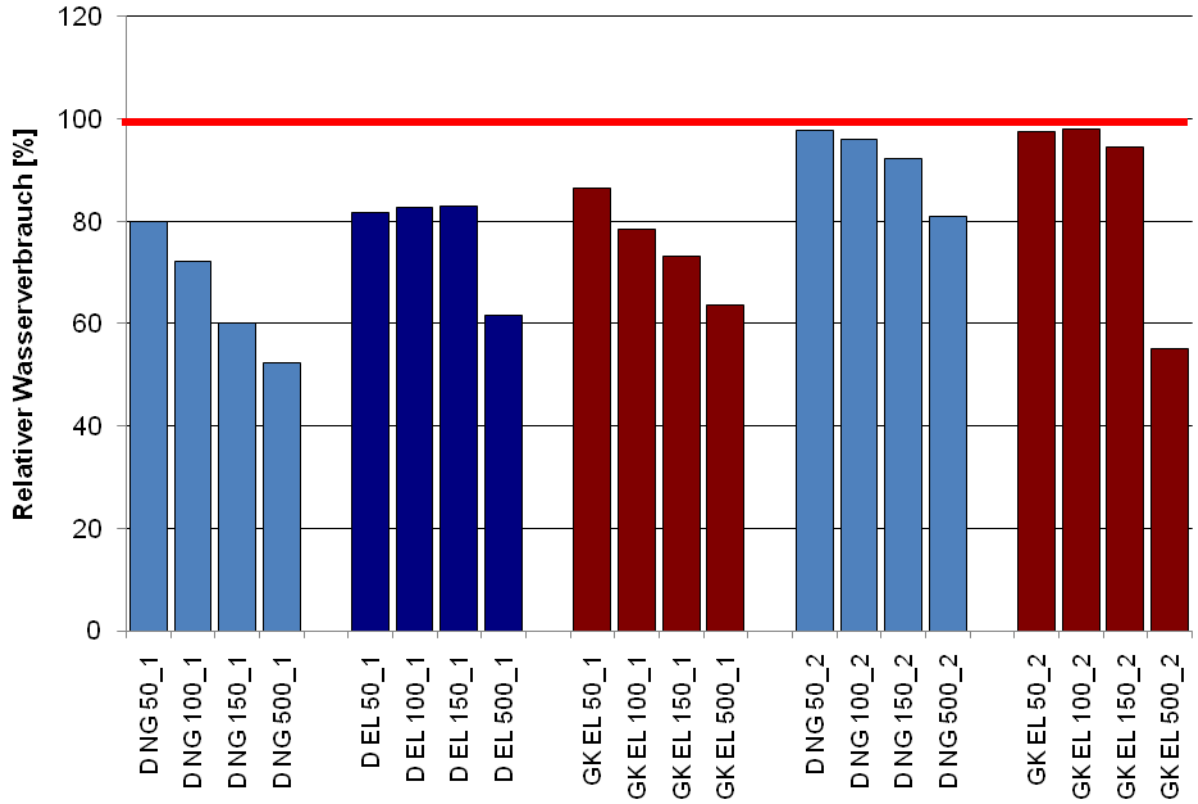

Abbildung 29: Einfluss verschiedener Gärrückstände und N-Aufwandmengen sowie Ausbringungsmethoden auf den relativen Wasserverbrauch [%] im Pflanzenverträglichkeitstest

NG – Nachgärer, EL – Endlager, Variante 1 - ohne Einarbeitung, Variante 2 – mit Einarbeitung

relativer Wasserverbrauch 100% bezügliches des Vergleichssubstrates EE0

Generell senkt eine Ausbringung der Gärrückstände ohne Einarbeitung den Wasserverbrauch. Dies ist erklärbar durch die Bildung einer faserhaltigen Schicht auf der Bodenoberfläche durch die im Gärrückstand enthaltenen Rohfasern. Je höher die Ausbringmenge ist, desto stärker ist die sich bildende Faserschicht und desto geringer ist die Wasserverdunstung. Eine Einarbeitung der Gärrückstände verringert diesen Effekt, führt aber durch den Rohfaseranteil in den Gärrückständen zu einer gewissen Wasserspeicherung insbesondere bei höheren Ausbringmengen der Gärrückstände.

2.2.2.4 Schlussfolgerungen zur biologischen Beschaffenheit von Gärrückständen

In den bisher untersuchten Gärrückständen aus der anaeroben Fermentation von pflanzlichen Substraten wurden biologisch aktive Substanzen in Form des Auxins Indol-3-essigsäure (freie Form) in unterschiedlichen Konzentrationen nachgewiesen. Auf der Basis von Tryptophan wird IES (freie IES) in den Gärrückständen mikrobiell gebildet. Es kann somit ein tryptophanabhängiger Biosyntheseweg für IES der am Biogasprozess beteiligten Mikroorganismen angenommen werden. IES wird hierbei nach Erreichen eines Konzentrationsmaximums im Gärrückstand D nach 48 h mikrobiell abgebaut und/oder konjugiert. Die Zugabe einer organischen C-Quelle erhöht die IES Produktion erheblich.

Nur für zwei Gärrückstände konnte eine auxin-analoge Wirkung anhand der Förderung der Adventivwurzelbildung von Mungbohnen signifikant nachgewiesen werden. Wichtig ist somit zu klären, in welchem Zusammenhang weitere chemische Substanzen in den Gärrückstandsextrakten mit der Adventivwurzelbildung bei Mungbohnenkeimlingen stehen.

Die Ergebnisse der Kressekeimtests zeigten, dass in den Gärrückständen entweder IES-synergistisch wirkende Substanzen vorhanden sind (wie z. B. Huminstoffe, phenolische Verbindungen) oder aber phytotoxische Substanzen eine Rolle spielen. Hier bedarf es weiterer Untersuchungen. Folgende Fragestellungen stehen dabei im Vordergrund:

- Welche Substanzen können für eine IES-synergistische Wirkung in Gärrückständen tatsächlich verantwortlich sein?
- Könnte eine mögliche Phytotoxizität mit den chemischen Eigenschaften der Gärrückstände in Verbindung gebracht werden?

In Bezug auf die Ergebnisse des Pflanzenverträglichkeitstests wurde eine bessere Pflanzenverträglichkeit bei geringeren Ausbringmengen und nach Einarbeitung der Gärrückstände in den Boden nachgewiesen. Eine extrem hohe Gärrückstands-konzentration analog 500 kg ha^{-1} N unter Gewächshausbedingungen scheint einen negativen Einfluss auf den Keimling bzw. die Pflanzenentwicklung zu haben. Eine Verträglichkeit der Gärrückstände für Pflanzen ist unter den genannten Bedingungen nicht gegeben.

Fazit der Versuche zur biologischen Beschaffenheit von Gärrückständen ist, dass geringere Konzentrationen der Gärrückstände eine bessere Wurzel- und Pflanzentwicklung in den verwendeten Bioassays zur Folge haben. Die Ausnahme bildet hier der Bioassay mit *Vigna radiata*, wo eine Verdünnung der Gärrückstandsextrakte eine verminderte Adventivwurzelbildung in den Varianten GRS D und P zeigt.

Kritisch zu überprüfen ist die tatsächliche Anwendbarkeit des Bioassays mit *Lepidium sativum* für den Nachweis eines auxin-analogen Effekts, da dieser Test auch für die phytotoxische Beurteilung von z. B. Düngersubstraten zum Einsatz kommt.

Sollen Gärrückstände nicht nur pflanzenbaulich sondern beispielsweise auch gartenbaulich genutzt werden, ist eine Adaption des Pflanzenverträglichkeitstests an flüssige Gärrückstände erforderlich. Pflanzenverträglichkeitstests bieten zudem die Möglichkeit, weiter aufbereitete Gärrückstände hinsichtlich ihrer biologischen Qualität und Eignung für andere Anwendungsfelder zu beurteilen.

2.2.3 Ergebnisse der Feldversuche

2.2.3.1 Wirkung von Gärrückständen auf die Bodenbiologie

Bodenatmung

Die vom Boden exhalierte CO_2-Menge resultiert aus der Atmung von Bodenorganismen und Pflanzenwurzeln und ist ein Maß für die biologische Aktivität des Bodens. Da die Bodenatmung sehr stark von der Bodentemperatur und -feuchte des jeweiligen Messtages abhängt, sind die Ergebnisse in Relation zur ungedüngten Kontrolle dargestellt. Im Jahr 2006 wurde die Bodenatmung vier bis zwölf Wochen nach der Düngerausbringung wöchentlich gemessen. Ausgewählte Messtermine sind in Abbildung 30 dargestellt. Mit den Messungen sollte die Hypothese überprüft werden, dass sich die Bodenatmung durch die im Gärrückstand enthaltende organische Substanz mit steigender GRS-Aufwandmenge erhöht und der Mineraldünger einen geringeren Effekt hat. Das Ergebnis zeigte jedoch, dass zwar eine Stickstoffdüngung die Bodenatmung für einige Zeit steigert, aber weder die N-Aufwandmenge noch die Düngerart einen eindeutigen Effekt hatten.

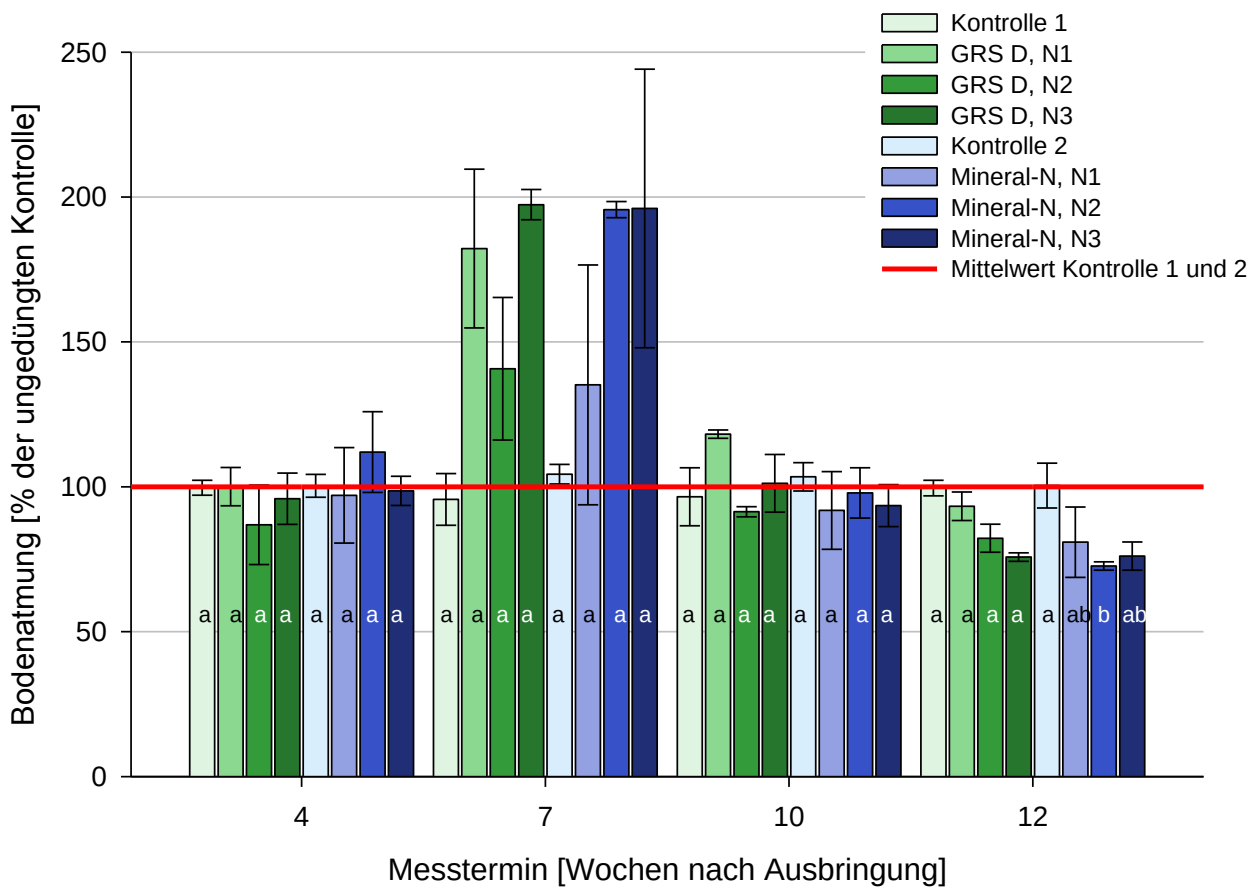

Abbildung 30: Bodenatmung unter Sommerweizen zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05)

Vier Wochen nach der Gärrückstandsausbringung gab es keine wesentlichen Unterschiede in der Bodenatmung zwischen den Varianten. Die CO_2-Exhalation lag zwischen 87 und 112 % in Bezug zur ungedüngten Kontrolle. Von der sechsten bis zur achten Woche nach Ausbringung war die Bodenatmung sowohl in den mit Gärrückstand als auch in den mineralisch gedüngten Parzellen höher als in den ungedüngten Kontrollparzellen (hier nur die siebte Woche nach Ausbringung dargestellt). Die Unterschiede sind jedoch aufgrund der relativ hohen Schwankung zwischen den Messwerten nicht signifikant. Am stärksten wurde die Bodenatmung durch die stark gedüngten Varianten GRS-N3, Mineral-N2 und Mineral-N3 mit 96 bis 97 % gegenüber der Kontrolle erhöht. In der neunten bis zehnten Woche nach der Gärrückstandsdüngung waren die gedüngten Parzellen den ungedüngten in der Bodenatmung wieder angeglichen und lagen dann in der elften und zwölften Woche nach der Ausbringung deutlich unter den ungedüngten Kontrollen (hier nur die zehnte

und zwölfte Woche nach Ausbringung dargestellt). Die Bodenatmung wurde zu diesem Zeitpunkt um bis zu 27 % gegenüber der Kontrolle signifikant verringert.

Da nicht nur eine Zufuhr von Gärrückstand auf den Boden, sondern auch von mineralischem N-Dünger die Bodenatmung erhöht, ist dieser Effekt offensichtlich nicht nur der Zufuhr organischer Primärsubstanz im Boden zuzuschreiben, sondern dem in beiden Düngern enthaltenen Stickstoff. Betrachtet man die vierte bis achte Woche nach der Düngung, so kann man von einem verzögerten Effekt sprechen, da in der vierten Woche noch keine erhöhte Bodenatmung gemessen wurde. Dies könnte zum einen an der geringen Bodenfeuchte in der 19. Kalenderwoche gelegen haben (unter 12 %). Zum anderen könnte es sein, dass die gemessene erhöhte Bodenatmung ein sekundärer Stickstoffeffekt war, das heißt, der Stickstoff wird zunächst über die Pflanzenwurzeln aufgenommen und bewirkt über das Wurzelwachstum und Exsudatabgabe in die Rhizosphäre eine erhöhte Atmung der Wurzeln und Mikroorganismen. Je nach Witterung könnte es einige Zeit dauern, bis der Effekt als Bodenatmung messbar wird. Diese Vermutung wird durch einen Versuch bekräftigt, der 2006 am Rande des Maisfeldes durchgeführt wurde. Nach unterschiedlicher Düngung auf unbewachsenem Boden wurde hier ebenfalls die Bodenatmung gemessen. Anders als im bewachsenen Feld führte eine mineralische N-Düngung bei Abwesenheit von Pflanzen nicht zu einer Erhöhung der Bodenatmung gegenüber der ungedüngten Kontrolle (Ergebnisse nicht dargestellt).

Die Erscheinung, dass sich der bodenatmungsfördernde Effekt der Düngung nach einigen Wochen in einen hemmenden Effekt umkehrte, lässt vermuten, dass die leicht verfügbaren Nährstoffe durch einen starken Anstieg der Mikroorganismenpopulation in den gedüngten Parzellen schneller abgebaut wurden und es in Folge dessen nach einiger Zeit zu Nahrungsmangel mit anschließender Verringerung der Population kam.

Da sich die Vermutung, dass Gärrückstand durch den organischen Anteil einen stärkeren Effekt auf die Bodenatmung hat als Mineraldünger, im ersten Versuchsjahr nicht bestätigte, wurde im zweiten Jahr mit den Messungen bereits zwei Tage nach der Düngung begonnen und diese bis zur 13. Woche fortgeführt. Ausgewählte Ergebnisse sind in Abbildung 31 dargestellt.

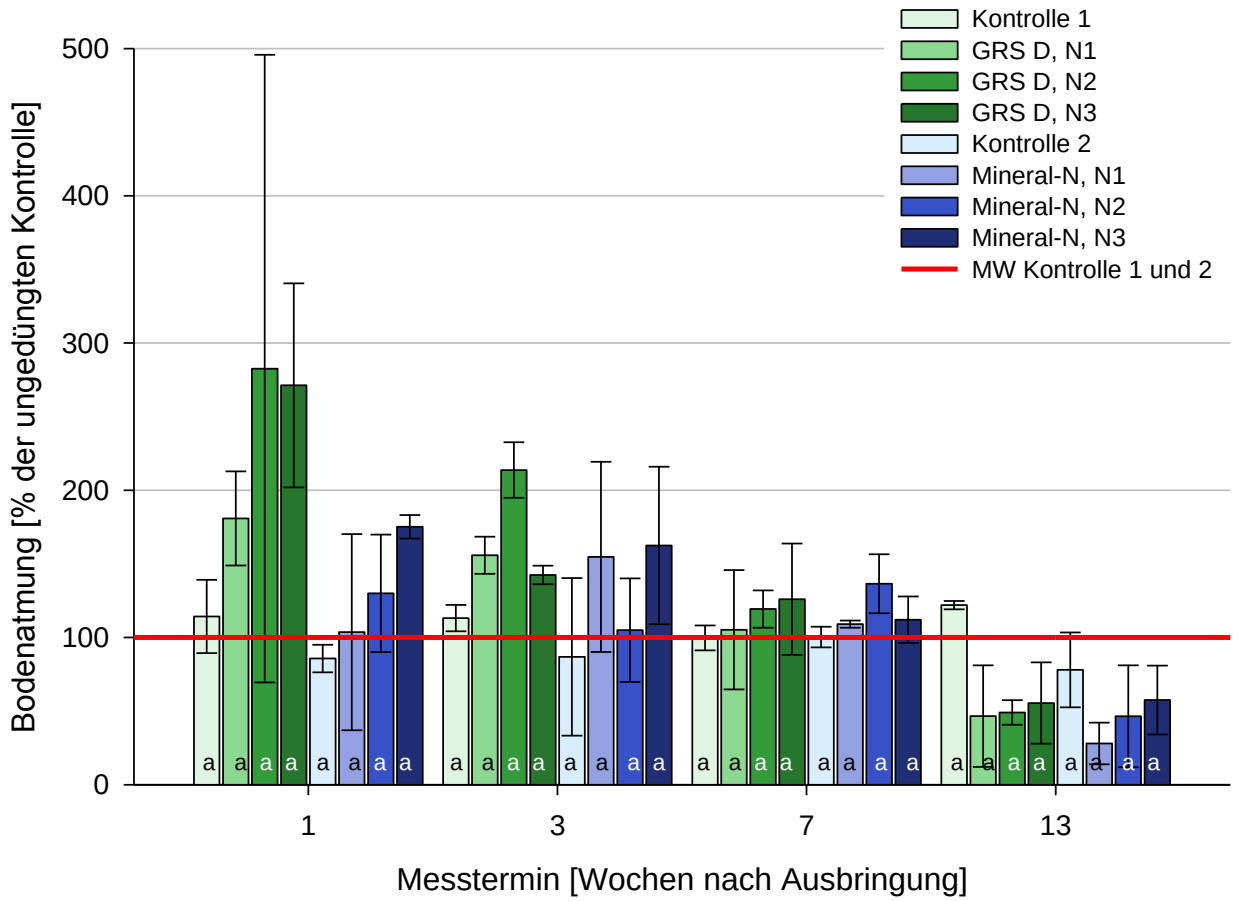

Abbildung 31: Bodenatmung unter Sommerweizen zu verschiedenen Zeitpunkten im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Innerhalb eines Messtermins unterscheiden sich Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05)

Im zweiten Jahr waren ebenfalls deutliche Tendenzen erkennbar, durch relativ hohe Streuungen und die geringe Wiederholungszahl ergaben sich jedoch keine signifikanten Unterschiede. Im Gegensatz zum Jahr 2006 wurde im zweiten Versuchsjahr eine stärkere Erhöhung der Bodenatmung durch Gärrückstand als durch Mineraldünger gemessen, jedoch nur an wenigen Tagen nach der Düngung. Bereits zwei Wochen nach der Ausbringung glichen sich die beiden Dünger in der Erhöhung der Bodenatmung gegenüber der ungedüngten Kontrolle an. Wie auch im Vorjahr nahm der bodenatmungsfördernde Effekt durch die Düngung mit der Zeit langsam ab und kehrte sich nach einigen Wochen, hier 13 Wochen nach der Düngung, in einen bodenatmungshemmenden Effekt um. Betrachtet man die Unterschiede zwischen den Aufwandmengen, so bewirkte in diesem Jahr bis auf drei Wochen nach der Düngung eine höhere N-Stufe tendenziell eine stärkere Erhöhung der Bodenatmung. Somit kann geschlussfolgert werden, dass der erwartete Kohlenstoffeffekt nur sehr kurzfristig

auftritt, da die mit dem Gärrückstand ausgebrachte leicht abbaubare organische Substanz durch die Mikroorganismen sehr schnell umgesetzt wird und wahrscheinlich der größere Anteil des Kohlenstoffs in stabilen Verbindungen vorliegt, welche nicht rasch umgesetzt werden können. Ob die nachfolgende Erhöhung der Bodenatmung durch beide Düngerarten ein direkter oder indirekter Stickstoffeffekt ist, bleibt durch diese Versuche unbeantwortet. Jedoch sprechen sowohl der am Feldrand ohne Pflanzen durchgeführte Versuch als auch ein weiterer im Labor durchgeführter Bodenatmungsversuch (hier nicht dargestellt), bei denen der mineralische N-Dünger keine Bodenatmungserhöhung erzielte, für einen sekundären Stickstoffeffekt über die Pflanzen.

Regenwurmaktivität

Feldtest: Unter den natürlichen Bedingungen des Feldtests lag die gemessene Bodentemperatur während der Probenahmen im für Regenwürmer optimalen Bereich. Der Feuchtegehalt des Bodens war für die typische auf Äckern lebende Art *Aporrectotdea caliginosa* (Savigny 1823) in Folge des trockenen Aprils jedoch suboptimal, so dass mit einer verringerten Abundanz gerechnet werden musste. Im Durchschnitt wurden 122 Tiere m^{-2} gefunden (Tabelle 22). Dabei hatte die ungedüngte Kontrolle mit einem Mittelwert von 148 Tieren m^{-2} den größten Besatz. Die Regenwurmabundanz nahm mit steigender Gärrückstands-Aufwandmenge ab, wobei die Unterschiede jedoch nicht signifikant waren. Der Rückgang der Abundanz durch Düngung gegenüber der Kontrolle betrug 21 % bei der N-Stufe 1, 23 % bei N2 und 27 % bei der höchsten Aufwandmenge. Bei der Bestimmung der Altersstufen wurden im Durchschnitt 23 adulte und 92 juvenile Regenwürmer je Quadratmeter gezählt. Durch steigende N-Aufwandmengen aus Gärrückstand nahm im Verhältnis die Anzahl der juvenilen Tiere stärker ab als die der adulten. Im Wesentlichen wurden zwei Arten Regenwürmer gefunden. Die für Ackerboden typische Art *A. caliginosa* sowie *A. icterica* (Savigny 1823), von deren Vorkommen bisher in Berlin und Brandenburg nicht berichtet wurde. Dabei wurde *A. icterica* mit einem durchschnittlichen Anteil von über 50 % relativ häufig gefunden. Würmer, die nicht eindeutig einer Gattung zuzuordnen waren, wurden mit *A. spec.* gelistet. Vergleicht man das Vorkommen bei den verschiedenen Düngestufen, so ist der Rückgang der Anzahlen von *A. icterica* mit steigender N-Stufe stärker als von *A. caliginosa*. Wahrscheinlich ist also die Gattung *A. icterica* empfindlicher gegenüber einer Gärrückstandsdüngung. Die Biomasse je Fläche lag in

allen gedüngten Varianten unter der Kontrolle (nicht dargestellt), berechnet auf die Biomasse je Tier wurde jedoch mit 0,35 g der höchste Wert in den stark gedüngten Parzellen gefunden. Somit bestätigte sich der durch die anderen Parameter angedeutete Trend durch diesen Aspekt nicht.

Tabelle 22: Abundanz, Altersstufe, Arten und Biomasse der Regenwürmer je Fläche in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge aus Gärrückstand im Feldversuch in Berlin-Dahlem im Jahr 2007

Parameter	Einheit	N0	N1	N2	N3	MW
Abundanz	[Tier m^{-2}]	148	117	114	108	**122**
Adulte	[Tier m^{-2}]	29	19	18	26	**23**
Juvenile	[Tier m^{-2}]	109	92	92	74	**92**
A. caliginosa	[Tier m^{-2}]	50	43	38	48	**45**
A. icterica	[Tier m^{-2}]	74	59	60	49	**61**
A. spec.	[Tier m^{-2}]	17	11	14	8	**13**
Biomasse	[g $Tier^{-1}$]	0,28	0,28	0,27	0,35	**0,30**

Vergleicht man die Ergebnisse der Regenwurmuntersuchungen mit den Ergebnissen der Bodenatmung ein bis drei Wochen nach der Gärrückstandsausbringung (Abbildung 31), so sind die Trends gegenläufig. Mit steigender N-Menge nimmt die Bodenatmung zu, die Regenwurmabundanz dagegen ab. Eine mögliche Erklärung dafür wäre die Konkurrenz um den Kohlenstoff, der durch Gärrückstandapplikation dem Boden zugeführt wurde. Sowohl Regenwürmer als auch Mikroorganismen sind stark abhängig von Kohlenstoff im Boden. Die Ergebnisse von BUTENSCHÖN (2007)[42] deuten darauf hin, dass Regenwürmer mikrobiellen Kohlenstoff in der Rhizosphäre nicht nutzen können. Der Autor kommt ebenfalls zu der Schlussfolgerung, dass Mikroorganismen in der Rhizosphäre wahrscheinlich erfolgreich mit endogäischen Regenwürmern um Kohlenstoffressourcen konkurrieren können. Auch Ernst et al. (2008)[43] gehen von einer Konkurrenz um leicht verfügbaren Kohlenstoff zwischen Mikroorganismen und Regenwürmer nach Gärrückstandsapplikation aus.

[42] Butenschön, C.: „Regulation of soil organic matter dynamics and microbial activity by endogenic earthworms". Online veröffentlicht unter: http://elib.tu-darmstadt.de/diss/000820 (2007)
[43] Ernst, G., Müller, A., Göhler, H., Emmerling, C.: „C- and N-turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (Lumbricus terrestris, Aporrectodea longa, Aporrectodea caliginosa)". Soil Biology and Biochemistry 40, 1413-1420. (2008)

Laborversuch: Im Vermeidungstest 1 mit der geringeren Aufwandmenge befanden sich im Mittel der fünf Wiederholungen etwa 2/3 der Versuchstiere im mit Gärrückstand behandelten Prüfboden, was einer Vermeidung von -28 %, also einer Bevorzugung des Prüfbodens entsprach (Tabelle 23). Bei dieser Aufwandmenge gab es also keinen Hinweis auf ein Gefährdungspotenzial durch Gärrückstände. Anders zeigte sich dagegen das Ergebnis des zweiten Vermeidungstest mit der höheren Aufwandmenge an Gärrückstand. Von den insgesamt 50 Versuchstieren (in fünf Wiederholungen) wurde nur eines im Prüfboden gefunden, welches verendet war. Somit lag eine 96%ige Vermeidung des Prüfbodens und demzufolge ein Gefährdungspotenzial durch Gärrückstände vor.

Tabelle 23: Durchschnittliche Anzahl von Würmern (*Eisenia fetida*) im Kontroll- bzw. Prüfboden im Rahmen von Vermeidungstests (n=5) sowie berechnete Vermeidung (ausgehend von einer 50:50-Verteilung)

Test	Kontrollboden	Prüfboden	Vermeidung
	[Anzahl Tiere]		[%]
Vermeidungstest 1	3,6	6,4	-28
Vermeidungstest 2	9,8	0,2	96

Durch die sehr unterschiedlichen Ergebnisse dieser Tests muss an dieser Stelle diskutiert werden, welcher der beiden Tests, die sich durch die Art der Aufwandmengenberechnung unterscheiden, eher die Bedingungen im Feld wiedergibt. Grundsätzlich ist das Beziehen der Stickstoffmenge auf das Bodenvolumen sinnvoll, da der Gärrückstand im Feld ebenfalls eingearbeitet wurde. Für den Test wurde mit einer Tiefe von 15 cm gerechnet. Wäre stattdessen von einer Bearbeitungstiefe von nur 10 cm ausgegangen, so wäre die Aufwandmenge noch um die Hälfte gestiegen. Bei Gefäßversuchen mit Pflanzen wird jedoch die Nährstoffmenge meist sehr viel höher angesetzt, als es eine direkte Umrechnung ergeben würde, da den Pflanzen relativ wenig Wurzelraum zur Verfügung steht. Die Erfahrungen zeigen also, dass eine direkte Umrechnung schwierig ist, vermutlich entspricht eine N-Menge zwischen 10 und 20 g je 500 g Boden einer Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} N im Feld. Zur genauen Klärung sind weitere Untersuchungen im Feld sowie im Vermeidungstest mit der gleichen Regenwurmart notwendig.

2.2.3.2 Wirkungen von Gärrückständen auf Kulturpflanzen

Wachstum und Blattfarbe

Um den Verlauf des Pflanzenwachstums zu bestimmen, wurden wöchentlich Blattflächenindex (BFI), Pflanzenhöhe sowie Blattfarbe in allen Parzellen der Feldversuche gemessen. Pflanzenhöhe und BFI sind Wachstumsparameter, die im Feldversuch genutzt wurden, um den Versorgungszustand der unterschiedlichen Düngevarianten vergleichen zu können. Die vom Pflanzenbestand gegen Ende der Vegetationszeit maximal erreichten Werte liegen für jede Kulturart in typischen Bereichen. Ein hoher BFI sagt aus, dass viel Blattoberfläche vorhanden ist, was bei Kulturen, die als ganze Pflanzen geerntet werden, bedingt auf einen hohen Ertrag schließen lässt. Aber auch bei Getreide spiegelt der BFI die Fläche der photosynthetisch aktiven Blätter wieder, die bei der Ertragsbildung von Bedeutung ist. Die Pflanzenhöhe korreliert ebenfalls in der Regel positiv mit dem Ertrag, wobei der Zusammenhang bei einer Ganzpflanzenernte stärker ist als beim Kornertrag. Die Blattfarbe ist ein indirektes Maß für den Chlorophyllgehalt der Blätter, welcher eng mit dem N-Versorgungszustand zusammenhängt. Schwefel- oder Wassermangel können jedoch die Werte beeinflussen und sollten bei den Messungen ausgeschlossen werden können. Der N-Tester ermöglicht Düngeempfehlungen für Winterweizen, Wintergerste, Winterroggen sowie Triticale. In den Parzellenfeldversuchen wurde er für beide Prüffrüchte lediglich für einen Vergleich des Versorgungszustandes der Düngevarianten verwendet.

Sommerweizen: In Abbildung 32 sind die Messergebnisse dieser drei Parameter für Sommerweizen im Jahr 2007 dargestellt. Dabei wird der Dünger bei höchster N-Stufe mit der ungedüngten Kontrolle verglichen. Gemessen wurde von der 22. bis zur 26. Kalenderwoche (KW). Bei allen drei Parametern konnte ein stärkerer Anstieg von der 22. zur 23. Kalenderwoche beobachtet werden und eine Stagnation bzw. ein Abfallen der Werte in den folgenden Wochen. Die größten Unterschiede zwischen den einzelnen Düngevarianten wurden beim Blattflächenindex festgestellt. Hier weist die Kontrolle die deutlich niedrigsten Werte und die Mineraldüngevariante die höchsten Werte auf. Auch zwischen den drei Gärrückständen sind Unterschiede erkennbar. Mit GRS P gedüngte Weizenpflanzen haben während des gesamten Messverlaufs einen geringeren Blattflächenindex als die mit GRS D und GRS GK gedüngten Pflanzen. Dies steht in direkter Beziehung zu den Ertragsergebnissen (s. u.). Die Pflanzenhöhe steigt bei allen

Varianten ab der 24. KW nicht mehr an. Bei einigen Varianten geht die Pflanzenhöhe ab der 24. KW sogar etwas zurück, dies liegt wahrscheinlich daran, dass ab dem Ährenschieben nicht mehr die Blätter, sondern die Ährenspitze als höchster Punkt gemessen wurde. In der Pflanzenhöhe unterscheiden sich die drei GRS nicht voneinander, liegen jedoch über der Kontrolle und unter der Mineraldüngevariante. Ein anderes Bild zeigt der Verlauf der Blattfarbenmessungen, bei denen die Mineraldüngervariante zu allen Messterminen über allen anderen Varianten liegt, sich die GRS jedoch ab der 24. KW nicht mehr voneinander und der ungedüngten Kontrolle unterscheiden. Dagegen hob sich GRS D in den ersten beiden Wochen noch deutlich von den anderen GRS ab, was zeigt, dass die Pflanzen zu diesem Zeitpunkt noch sehr gut mit Stickstoff versorgt waren.

Silomais: In Abbildung 33 sind die entsprechenden Messergebnisse für den Silomais dargestellt. Die Messungen wurden über einen längeren Zeitraum von der 23. bis zur 34. Kalenderwoche durchgeführt. Beim Blattflächenindex wurden in dieser Kultur weniger deutliche Unterschiede gemessen. Jedoch lag auch hier ab der 26. KW die mineralisch gedüngte Variante über den mit GRS gedüngten Varianten, die ungedüngte Kontrolle wies zu allen Terminen die geringsten Werte auf. Die mit GRS gedüngten Pflanzen wiesen bezüglich dieses Parameters keine Unterschiede auf. Die Pflanzenhöhe erreichte durch die mineralisch gedüngten Pflanzen über 2,5 m und zeigte ab der 30. KW keine Veränderungen mehr. Im Verlauf der Vegetationsperiode zeigten sich Unterschiede zwischen den drei GRS-Varianten, wobei auch hier die mit GRS P gedüngten Pflanzen hinter den Varianten GRS D und GRS GK zurück blieben. Gegen Ende der Vegetationsperiode (30. KW) war ein Unterschied nur noch gegenüber der Mineraldüngervariante erkennbar. Die N-Tester-Werte der Blattfarbenmessungen wiesen zu den unterschiedlichen Messterminen eine hohe Varianz auf, was möglicherweise am Alter des jeweils beprobten Blattes liegen könnte. Trotzdem sind die Werte der mineralisch gedüngten Pflanzen zu allen Messterminen höher als die der anderen Varianten. Die mit GRS gedüngten Pflanzen unterschieden sich untereinander und zur Kontrolle kaum, somit spiegelte dieser Parameter die Erträge des Silomaises am schlechtesten wieder.

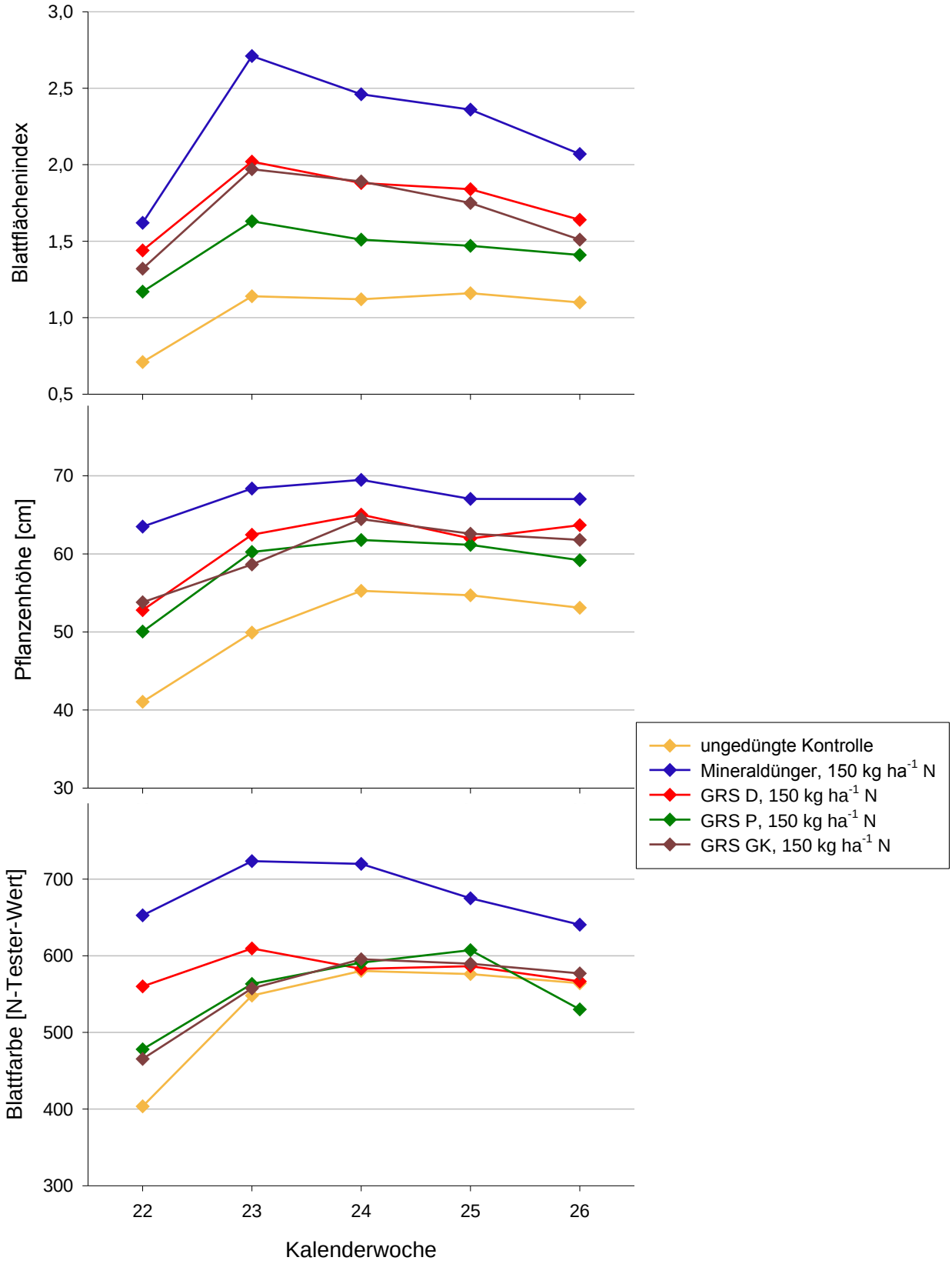

Abbildung 32: Zeitlicher Verlauf von Blattfarbe, Pflanzenhöhe und Blattflächenindex bei Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung

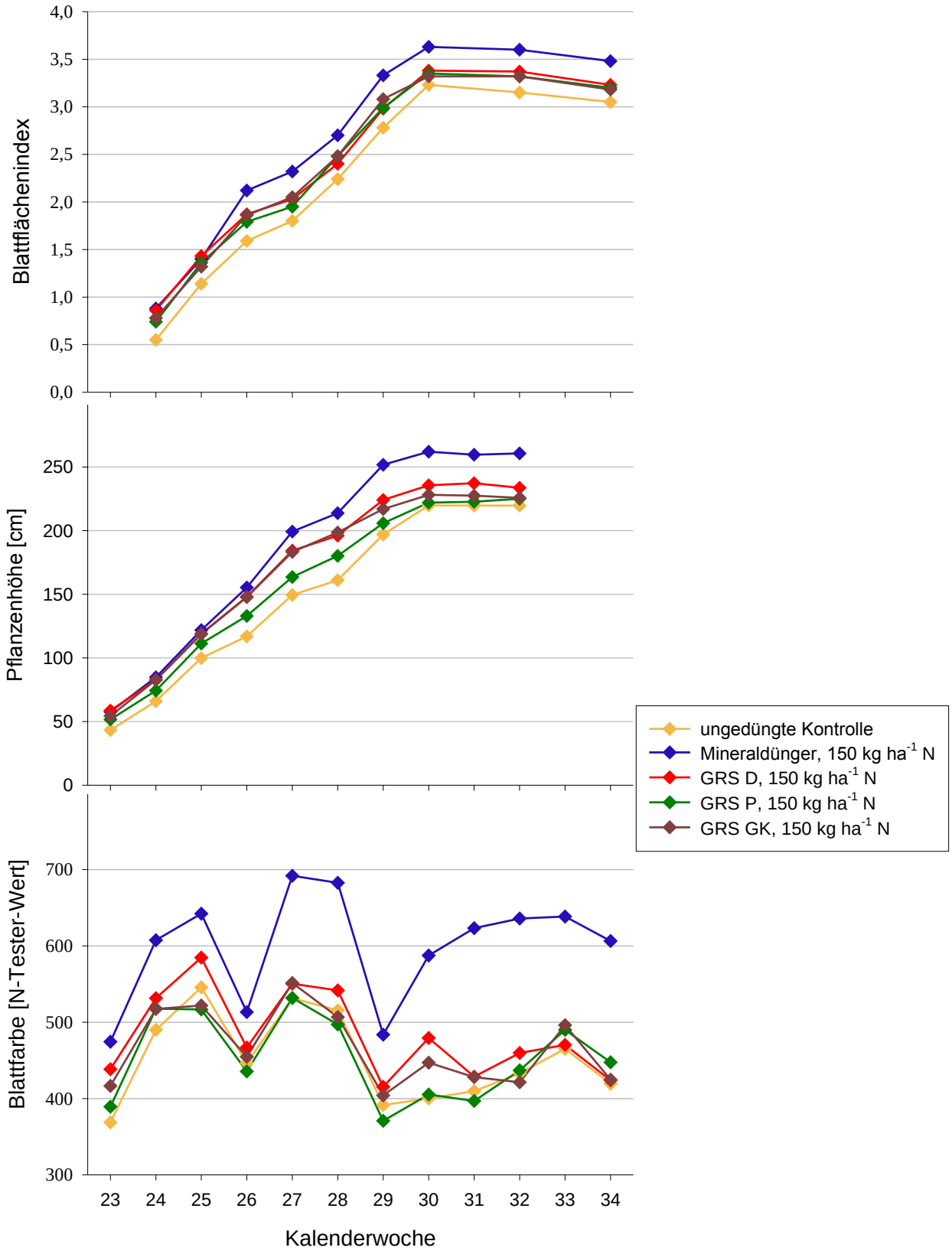

Abbildung 33: Zeitlicher Verlauf von Blattfarbe, Pflanzenhöhe und Blattflächenindex bei Silomais im Jahr 2007 in Abhängigkeit von der Düngung

Erträge und Ertragsstrukturen

Im ersten Versuchsjahr 2006 können die vier Dünger nicht direkt miteinander verglichen werden und keine Mineraldüngeräquivalente abgeleitet werden, da unterschiedliche N-Aufwandmengen verwendet wurden (siehe Kapitel 2.1.2.3).

Sommerweizen: Der Weizenkornertrag setzt sich aus den drei Ertragskomponenten Bestandesdichte, Anzahl der Körner je Ähre und der Tausendkornmasse zusammen. Diese drei Parameter werden im Laufe der Bestandesentwicklung nacheinander determiniert und sind unter anderem abhängig von der Wasser- und Nährstoffversorgung der Pflanze. Darüber hinaus besitzen die Pflanzen ein hohes Kompensationsvermögen während der einzelnen Entwicklungsphasen.

Tabelle 24: Kornertrag (86 % TS) und Ertragsstruktur von Sommerweizen im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, α=0,05)

Dünger	N-Stufe	Kornertrag	Bestandesdichte	Körner Ähre^{-1} (berechnet)	Tausendkorn-masse
		[dt ha^{-1}]	[ährentragende Halme m^{-2}]	[Körner Ähre^{-1}]	[g]
GRS D	N0	34,6 ^{a}	461 ^{ab}	21,2 ^{a}	38,5 ^{a}
	N1	38,5 ^{ab}	430 ^{a}	23,6 ^{a}	37,8 ^{a}
	N2	43,2 ^{b}	554 ^{ab}	21,1 ^{a}	36,2 ^{ab}
	N3	42,1 ^{b}	573 ^{b}	21,5 ^{a}	34,0 ^{b}
GRS P	N0	36,1 ^{a}	421 ^{a}	19,5 ^{a}	38,8 ^{a}
	N1	39,2 ^{a}	446 ^{a}	23,6 ^{a}	38,1 ^{a}
	N2	40,3 ^{a}	467 ^{a}	21,6 ^{a}	37,8 ^{a}
	N3	39,9 ^{a}	429 ^{a}	21,6 ^{a}	36,9 ^{a}
GRS GK	N0	34,8 ^{a}	410 ^{a}	22,1 ^{a}	38,7 ^{a}
	N1	40,5 ^{a}	483 ^{ab}	22,8 ^{a}	37,5 ^{a}
	N2	40,8 ^{a}	551 ^{bc}	22,7 ^{a}	35,3 ^{ab}
	N3	39,1 ^{a}	619 ^{c}	25,0 ^{a}	33,6 ^{b}
Mineral-N	N0	32,4 ^{a}	396 $_{a}$	21,9 ^{a}	38,7 ^{a}
	N1	40,3 ^{b}	485 ^{ab}	22,1 ^{a}	35,4 ^{ab}
	N2	40,1 ^{b}	537 ^{b}	20,7 ^{a}	33,5 ^{b}
	N3	42,7 ^{b}	567 ^{b}	18,5 ^{a}	34,0 ^{b}
Mittelwert N0		34,5	422	21,2	38,7
Mittelwert gesamt		**39,0**	**489**	**21,8**	**36,9**

Die Kornerträge (86 % TS) des Sommerweizens lagen im Jahr 2006 zwischen 32 und 43 dt ha^{-1}, was für den Standort durchschnittliche Werte sind (Tabelle 24). Bei allen drei Gärrückständen gab es von der Stufe N2 zu N3 keine Ertragssteigerung, so dass der maximale Ertrag in allen Fällen bereits mit der Stufe N2 erreicht wurde, welche 170

(GRS D), 130 (GRS P) bzw. 250 (GRS GK) kg ha^{-1} N entsprach. Das Maximum der mineralisch gedüngten Variante wurde mit 150 kg ha^{-1} N (Stufe N3) erreicht. Die Ertragssteigerungen durch Düngung mit GRS P und GRS GK betrugen zwischen 9 und 17 % gegenüber der ungedüngten Kontrolle, waren aber dennoch nicht signifikant. GRS D erzielte von der Kontrolle zu den Stufen N2 und N3 signifikante Ertragssteigerungen von 25 bzw. 22 %. Durch Düngung mit mineralischem Stickstoff waren die Mehrerträge gegenüber N0 in allen N-Stufen signifikant und betrugen zwischen 24 und 32 %.

Die Bestandesdichte von Weizen wird durch die Aussaatdichte sowie die Bestockung beeinflusst. Letztere ist wiederum unter anderem vom Stickstoffangebot abhängig. Im Jahr 2006 stiegen bei den beiden Düngern GRS GK sowie Mineralstickstoff die Bestandesdichten mit der zugeführten Stickstoffmenge an. Die N-Stufen 2 und 3 erreichten dabei signifikant höhere Werte als die Kontrollen. GRS D wies die geringste Bestandesdichte bei N1 auf. Dieser Wert war signifikant geringer als in der Stufe N3. Die geringste Bestandesdichte bei höchster N-Stufe wurde mit 429 ährentragenden Halmen m^{-2} für GRS P ermittelt. Hier erreichte die Stufe N2 den höchsten Wert (467 Halme m^{-2}), statistische Unterschiede gab es dabei jedoch nicht.

Die Anzahl der Körner je Ähre ist sowohl genetisch bedingt als auch z. B. durch die Stickstoffzufuhr zum richtigen Zeitpunkt beeinflussbar. Im Parzellenfeldversuch werden mit einem Mittelwert von 22 Körnern $Ähre^{-1}$ eher geringe Werte erzielt, obwohl die Sorte „Picolo“ vom Bundessortenamt (2008) in der beschreibenden Sortenliste für diesen Parameter mit „mittel“ bewertet wurde. Hinsichtlich der Düngung ist hier kein Trend zu beobachten.

Die Tausendkornmasse ist zum einen genetisch bedingt, sie kann jedoch abhängig von Stickstoff- und Wasserversorgung sowie witterungsbedingtem Krankheitsdruck größeren Schwankungen unterliegen. Zur Ausbildung dieses Parameters sind die Bedingungen zur Zeit der Blüte und zur Kornbildungsphase entscheidend. Im Versuchsjahr 2006 lag der Mittelwert mit 37 g in einem für den Standort normalen Bereich. Die Werte verhielten sich umgekehrt proportional zur N-Aufwandmenge und zu den Bestandesdichten. Außer bei GRS P waren die Tausendkornmassen der N-Stufe 3 signifikant geringer als bei der Kontrolle. Die Ursachen dafür können verschiedener Natur sein. Zum einen spielte wahrscheinlich die Trockenheit verbunden mit hohen Temperaturen im Juni eine Rolle, zum anderen könnte die Stickstoffwirkung durch die einmalige Zufuhr im Frühjahr zu den entscheidenden Zeitpunkten nicht mehr

ausreichend für eine gute Kornausbildung gewesen sein. Dafür spricht außerdem ein geringer N_{min}-Gehalt im Frühjahr von knapp 20 kg ha^{-1} N sowie ein nasses Frühjahr, durch welches die N-Mineralisierungrate des ausgebrachten Düngers wahrscheinlich sehr hoch war. Das Zusammenspiel der einzelnen Faktoren kann jedoch sehr komplex sein und kann nicht abschließend geklärt werden.

Im zweiten Versuchsjahr 2007 entsprachen die N-Stufen bei allen Düngern den Aufwandmengen 0, 50, 100 und 150 kg ha^{-1} N. Die Ergebnisse der Erträge sowie der Ertragsstruktur sind in Tabelle 25 dargestellt. Zu beachten ist, dass in diesem Versuchsjahr ein zweijähriger Effekt gemessen wurde (eventuelle Vorjahreseffekte).

Tabelle 25: Kornertrag (86 % TS) und Ertragsstruktur von Sommerweizen im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey-Test, α=0,05)

Dünger	N-Stufe	Kornertrag	Bestandesdichte	Körner Ähre^{-1} (berechnet)	Tausendkorn-masse
		[dt ha^{-1}]	[ährentragende Halme m^{-2}]	[Körner Ähre^{-1}]	[g]
GRS D	N0	14,4 ^{a}	357,5 ^{a}	12,1 ^{a}	33,5 ^{a}
	N1	16,5 ^{ab}	384,5 ^{a}	12,5 ^{a}	34,3 ^{a}
	N2	19,6 ^{b}	425,8 ^{a}	13,4 ^{a}	34,5 ^{a}
	N3	21,3 ^{b}	433,8 ^{a}	14,1 ^{a}	34,8 ^{a}
GRS P	N0	15,3 ^{a}	353,5 ^{a}	13,1 ^{a}	32,9 ^{a}
	N1	16,0 ^{ab}	383,0 ^{a}	12,4 ^{a}	33,7 ^{a}
	N2	18,8 ^{ab}	404,0 ^{a}	13,6 ^{a}	34,1 ^{a}
	N3	20,9 ^{b}	421,8 ^{a}	14,2 ^{a}	34,9 ^{a}
GRS GK	N0	15,3 ^{a}	385,3 ^{ab}	12,0 ^{a}	33,3 ^{a}
	N1	16,7 ^{a}	366,0 ^{a}	13,5 ^{a}	33,9 ^{a}
	N2	19,5 ^{ab}	403,8 ^{ab}	14,0 ^{a}	34,6 ^{a}
	N3	22,2 ^{b}	459,0 ^{b}	14,1 ^{a}	34,2 ^{a}
Mineral-N	N0	15,1 ^{a}	331,3 ^{a}	13,6 ^{a}	33,5 ^{a}
	N1	17,3 ^{a}	364,0 ^{a}	14,3 ^{a}	33,1 ^{a}
	N2	24,4 ^{b}	488,3 ^{b}	14,8 ^{a}	33,7 ^{a}
	N3	25,7 ^{b}	523,0 ^{b}	15,2 ^{a}	32,3 ^{a}
Mittelwert N0		15,0	356,9	12,7	33,3
Mittelwert gesamt		**18,7**	**405,3**	**13,6**	**33,8**

Die Kornerträge des Sommerweizens waren im Jahr 2007 mit 14 bis 26 dt ha^{-1}, bedingt durch das trockene Frühjahr, gering. Bei allen Düngern stieg der Kornertrag mit steigender N-Düngungsstufe, so dass die jeweils höchsten Werte bei der Stufe N3 erreicht wurden. Die Ertragssteigerungen durch Düngung mit 150 kg ha^{-1} N aus

Gärrückstand betrugen 37 % (GRS P), 45 % (GRS GK) und 48 % (GRS D). Die Erträge waren in allen Fällen signifikant höher als die ungedüngte Kontrolle. Der Mineraldünger erreichte eine Ertragssteigerung von 70 %. Aus den Erträgen wurden Mineraldüngeräquivalente (MDÄ) gemittelt über die drei N-Stufen berechnet. Diese lagen für den GRS D bei 86, für den GRS GK bei 88 und die GRS P-Varianten erreichten im Mittel 84 % des Ertrags der Mineraldüngervarianten. Im Mittelwert über die drei Gärrückstände ergibt dies ein hohes MDÄ von 86.

Die Bestandesdichte fiel mit im Durchschnitt 405 ährentragenden Halmen m^{-2} im Jahr 2007 sehr gering aus, was der extremen Trockenheit im Frühjahr geschuldet ist. Trotzdem erkennt man eine Zunahme mit steigender N-Düngung, welche bei den Düngern GRS GK sowie Mineral-N signifikant war.

Auch die Kornanzahl je Ähre war mit durchschnittlich 14 Körnern sehr gering. Es war eine leichte Tendenz zu höheren Werten mit steigender Düngung erkennbar, die Unterschiede waren jedoch nicht signifikant. Die mineralisch gedüngte Variante erreicht bei N-Stufe 3 mit 15,2 Körnern je Ähre den höchsten Wert.

Die Tausendkornmasse lag mit einem Mittelwert von 34 g leicht unter dem Wert aus dem Vorjahr, ist jedoch für den Standort als normal zu bewerten. Bei keinem der vier Dünger gab es signifikante Unterschiede zwischen den Aufwandmengen. Bei den drei Gärrückständen ist jedoch im Gegensatz zum Vorjahr die Tendenz erkennbar, dass die TKM mit steigender Düngung zunimmt. Beim mineralischen Stickstoffdünger erreichte dagegen die Stufe N3 mit 32,3 g den geringsten Wert. Hier wurden jedoch bereits bei den beiden anderen Parametern der Ertragsstruktur die höchsten Werte erreicht, so dass keine Kompensation mehr notwendig war, um den höchsten Kornertrag zu erzielen.

Sucht man nach Erklärungen für die unterschiedlichen Wirkungen der Gärrückstände, so fällt auf, dass GRS P sowohl die niedrigsten Erträge erreicht als auch den geringsten Anteil Ammoniumstickstoff am Gesamtstickstoff enthält (50 %). Die GRS D und GK enthalten ca. 80 % NH_4^+ an N_{ges} und erreichen etwas höhere Erträge als GRS P.

Silomais: Die Ertragsergebnisse für Silomais aus den Parzellenfeldversuchen sind in Abbildung 34 dargestellt. Die geernteten Trockenmassen der ganzen Pflanzen lagen auf einem für den Standort sehr geringen Niveau zwischen 98 und 148 dt ha^{-1}, was durch den trockenen und warmen Sommer bedingt war. Bei Düngung mit GRS GK wurde ein maximaler Ertrag von 145 dt ha^{-1} TM bereits mit der N-Stufe 2 erreicht, wobei

diese sich nicht signifikant von der Stufe N3 mit 143 dt ha^{-1} TM unterschied. Die anderen drei Dünger erreichten die maximalen Erträge mit der Düngungsstufe N3, die Mehrerträge gegenüber der ungedüngten Kontrolle betrugen dabei bis zu 50 % (GRS D und Mineral-N). Die Gärrückstände P und GK erreichten dagegen lediglich maximale Mehrerträge von 25 bzw. 27 % gegenüber N0.

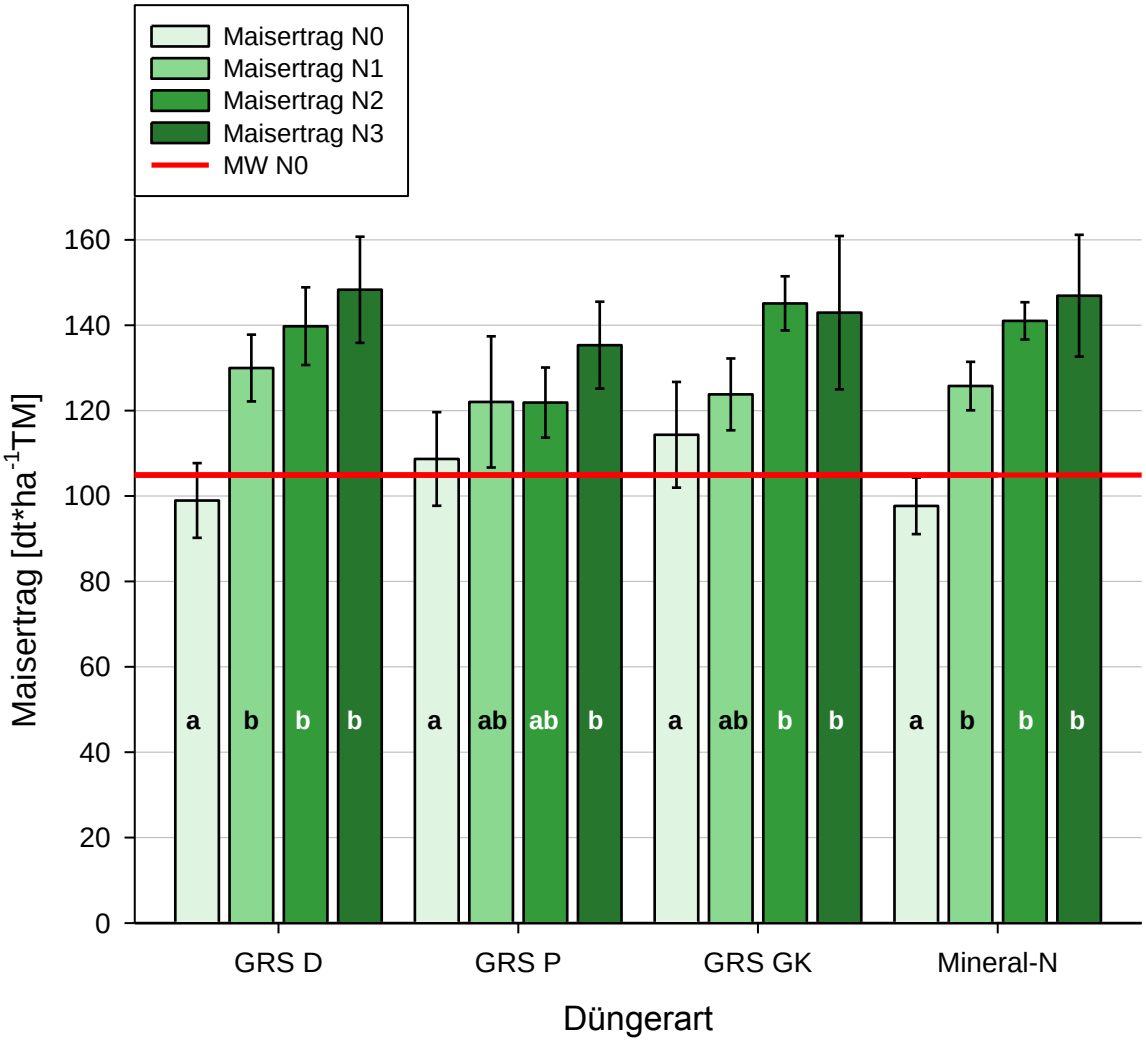

Abbildung 34: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2006 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05)

Im Jahr 2007 lagen die Trockenmasseerträge des Silomaises zwischen 130 und 216 dt ha^{-1} (Abbildung 35), was bedingt durch das warme Frühjahr und den niederschlagsreichen Sommer ein relativ hohes Niveau für den Standort Berlin-Dahlem ist. Die GRS D und GK erreichten signifikante Ertragssteigerungen gegenüber N0 von 30 bzw. 19 %. Die geringen Mehrerträge von 1 bis 7 % gegenüber N0 durch Düngung mit GRS P waren statistisch nicht signifikant. Mit bis zu 216 dt ha^{-1} TM erreichte der

mineralische Stickstoffdünger die höchsten Mehrerträge gegenüber N0 (66 %). Die MDÄ betrugen im Mittel über die drei N-Stufen für GRS D 81, für GRS GK 79 und 72 für GRS P. Im Mittel der drei Dünger lies sich damit ein MDÄ von 77 berechnen.

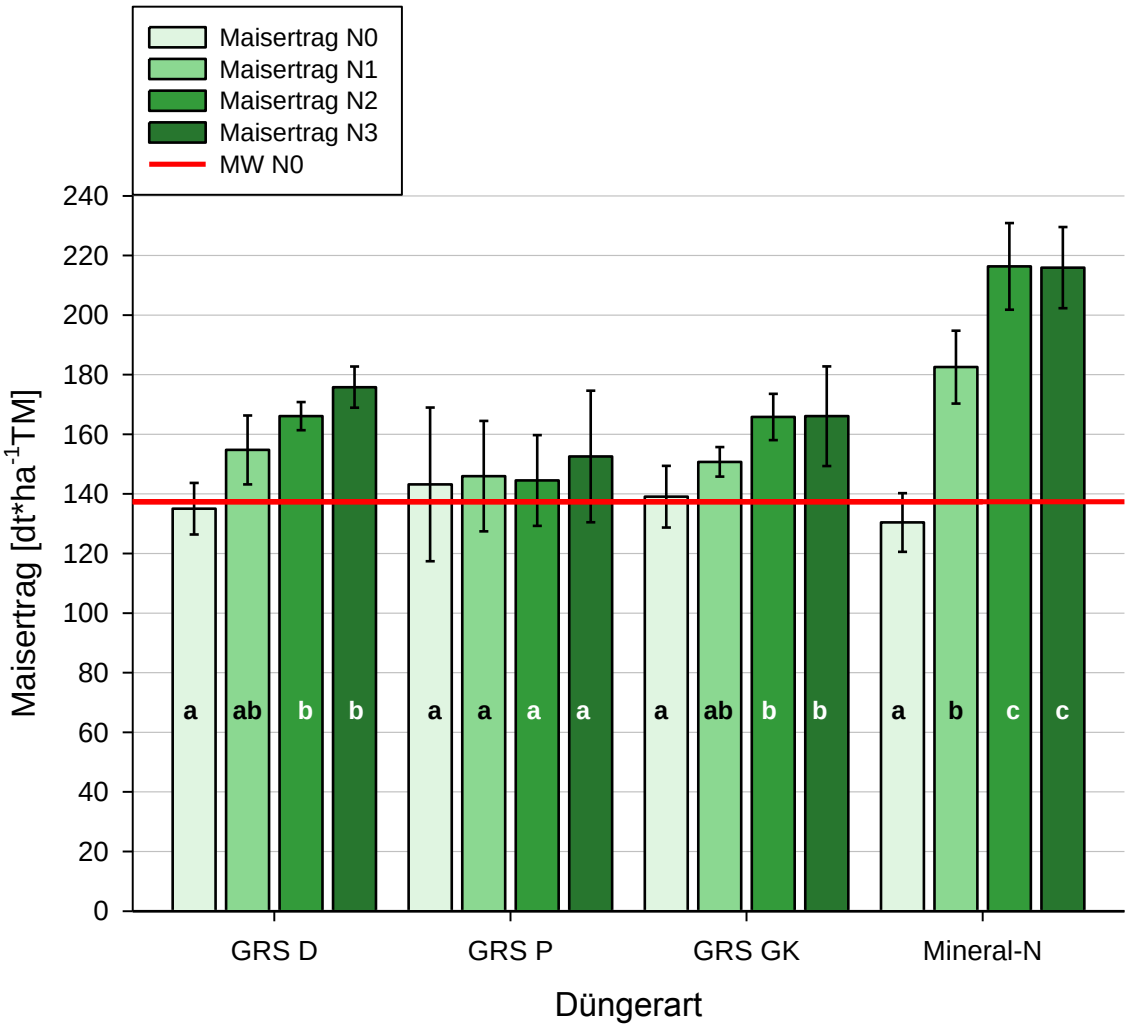

Abbildung 35: Silomaisertrag (TM) im Jahr 2007 in Abhängigkeit von Düngerart und N-Aufwandmenge; MW ± Stabw.; Aufwandmengen einer Düngerart mit gleichem Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant voneinander (Tukey Test, α=0,05)

Wie auch beim Sommerweizen waren die Erträge der mit GRS P gedüngten Varianten geringer als die mit GRS D und GK gedüngten Varianten. Diese Ergebnisse korrelieren mit den Anteilen von NH_4^+ an N_{ges} der drei Gärrückstände, was wahrscheinlich ein Grund für die unterschiedliche Wirkung der drei GRS ist.

Praxisversuche: Am Standort Dolgelin wurde der hofeigene Gärrückstand in den Kulturen Silomais und Roggen als Dünger im Praxisversuch getestet. Am Standort

Püggen wurde der GRS P ebenfalls in Silomais eingesetzt. Die Ertragsergebnisse für beide Versuchsjahre sind in Tabelle 26 dargestellt.

Der Grünroggen erzielte im Jahr 2006 Trockenmasseerträge zwischen 95 und 114 dt ha^{-1}, was in einem standorttypischen Bereich liegt. Die Unterschiede zwischen den N-Stufen waren relativ gering, die Mehrerträge durch Düngung betrugen zwischen 11 und 17 %. Die geringen Unterschiede können damit erklärt werden, dass die Felder der Landwirte bereits seit mehreren Jahren mit den Gärrückständen gedüngt werden und es somit wahrscheinlich in allen Parzellen eine N-Nachlieferung aus dem Vorjahr gegeben hat. Im zweiten Versuchsjahr 2007 stand der Roggen jedoch auf den gleichen Parzellen wie im Vorjahr der Maisversuch. Somit wurde hier ein zweijähriger Effekt getestet. Die Erträge der Stufe N3 lagen mit 110 dt ha^{-1} TM ähnlich hoch wie im Vorjahr. Die Kontrolle (N0) wies dagegen mit 47 dt ha^{-1} TM deutlich geringere Erträge auf als 2006. Die Mehrerträge durch Düngung mit 50 bis 150 kg ha^{-1} N aus GRS D betrugen somit zwischen 41 und 136 %.

Tabelle 26: TM-Erträge von Silomais und Grünroggen in den Praxisversuchen an den Standorten Dolgelin und Püggen in den Jahren 2006 und 2007 in Abhängigkeit von der N-Aufwandmenge des jeweils hofeigenen Gärrückstands

N-Stufe	Grünroggen Dolgelin	Silomais Dolgelin	Silomais Püggen
	[dt ha^{-1} TM]		
	2006		
N0	97,3	117,6	91,5
N1	95,4	138,7	82,7
N2	108,2	118,8	84,1
N3	113,5	152,4	75,0
	2007		
N0	46,8	114,4	131,6
N1	66,1	153,6	143,1
N2	94,5	172,3	154,4
N3	110,2	186,1	105,3

Der Silomais in Dolgelin erreichte 2006 Erträge zwischen 118 und 152 dt ha^{-1} TM, was auch hier bedingt durch den trockenen Sommer relativ gering war. Der niedrige Ertrag von 119 dt ha^{-1} TM bei der N-Düngestufe 2 lässt sich durch eine geringere Anzahl geernteter Pflanzen erklären, da durch das Reihenaussaatverfahren (anstatt Einzelkornaussaat) eine sehr heterogene Pflanzendichte im Bestand anzutreffen war (im

Mittel über die fünf Wiederholungen standen zwischen 11,4 und 14,4 Pflanzen je 1,5 m^2). Die Mehrerträge gegenüber der Kontrolle (N0) lagen zwischen 1 und 30 %. Im Jahr 2007 wurden mit bis zu 186 dt ha^{-1} TM, bedingt durch die hohen Niederschläge während der Hauptwachstumszeit, höhere Erträge als im Vorjahr erreicht. Auch die Mehrerträge lagen mit 34 bis 63 % gegenüber N0 höher als im Jahr 2006. Eine N-Nachlieferung aus der Düngung mit Gärrückstand in den Vorjahren gab es in allen Parzellen. Wie hoch diese anzusetzen ist, kann jedoch anhand der Versuche nicht festgestellt werden.

Der Silomais in Püggen erbrachte im Jahr 2006 Trockenmasseerträge zwischen 75 und 92 dt ha^{-1}, was gemessen an den Erträgen aus Dolgelin sehr gering ist. Dabei ist jedoch zu beachten, dass der Betrieb in Püggen ökologisch wirtschaftet. Die mechanische Unkrautbekämpfung in Mais konnte die Konkurrenz durch Wildpflanzen nicht hinreichend unterdrücken. Hinzu kommt eine verkürzte Wachstumszeit durch den späten Aussaattermin Ende Mai. Nicht erklärbar ist dagegen, dass durch die Düngung mit Gärrückstand in diesem Versuch keine Ertragssteigerungen, sondern Ertragsminderungen eingetreten sind. Der höchste Ertrag wurde mit 92 dt ha^{-1} TM durch die ungedüngte Kontrolle erreicht. In den N-Stufen 1 und 2 wurden 90 bis 92 % der Kontrolle geerntet, den geringsten Ertrag erbrachte die N-Stufe 3 mit nur 75 dt ha^{-1} TM (18 % Ertragsminderung). Im Gegensatz zum Versuch in Dolgelin war der Pflanzenbestand in Püggen sehr homogen (im Mittel über die fünf Wiederholungen zwischen 7,2 und 8,6 Pflanzen je 1,5 m^2), so dass die Höhe der Erträge hier nicht durch die Anzahl der geernteten Pflanzen erklärt werden kann. Möglicherweise war die N-Düngung in der N-Stufe 3 mit 190 kg ha^{-1} N zu hoch, wobei bei einer Stickstoffanrechnung von 80 % diese Menge für Silomais noch üblich ist und eine Überdüngung auch nicht die niedrigen Erträge in den N-Stufen 1 und 2 erklären würde. Eine Möglichkeit wäre das Vorhandensein von hemmend auf das Maiswachstum wirkenden Substanzen im Gärrückstand. Da eine negative Ertragswirkung in den Parzellenfeldversuchen jedoch nicht bestätigt wurde, tritt die hemmende Wirkung eventuell erst durch Wechselwirkungen mit chemischen Bodenbestandteilen auf. Denkbar wäre ein Einfluss des niedrigen pH-Wertes des Bodens am Standort Püggen (pH 4,7). Zur endgültigen Klärung müsste dies jedoch weiter untersucht werden. Im Versuchsjahr 2007 waren die Silomaiserträge mit 105 bis 154 dt ha^{-1} TM ebenfalls bedingt durch hohe Niederschläge auf gutem Niveau. Ein durchgängig negativer Trend mit steigender N-Düngung konnte

in diesem Jahr nicht beobachtet werden. Die N-Stufen 1 und 2 erbrachten Mehrerträge gegenüber N0 von 9 und 17 %. Die Stufe N3 erbrachte jedoch mit 105 dt ha^{-1} TM den geringsten Ertrag (Minderertrag von 20 % gegenüber N0). Ein Vorhandensein von Substanzen mit einer hemmenden Wirkung im Gärrückstand kann somit nicht ausgeschlossen werden. Eine Klärung der Ursache für diese Ergebnisse kann jedoch anhand der durchgeführten Versuche nicht abschließend erfolgen.

2.2.3.3 Nährstoffbilanzen

Für die Parzellenfeldversuche konnten Bilanzen für die Hauptnährstoffe Stickstoff, Phosphor und Kalium berechnet werden. Hierfür wurden den ausgebrachten Nährstoffmengen den durch die Pflanzen entzogenen Mengen an Nährstoffen, die aus den chemischen Analysen des Pflanzenmaterials sowie den Erträgen ermittelt wurden, gegenübergestellt. Das Ziel bei der Bewirtschaftung sollte grundsätzlich eine leicht positive Bilanz sein, damit der Nährstoffvorrat des Bodens über die Jahre nicht abgebaut wird.

Nährstoffbilanzen für Sommerweizen 2006 und 2007

Die Nährstoffbilanzen für die Prüffrucht Sommerweizen in den Jahren 2006 und 2007 sind in Tabelle 27 aufgeführt. Die über Düngung ausgebrachten Nährstoffmengen wurden den Entzügen durch die Pflanzen gegenübergestellt und daraus Differenzen (Bilanzen) berechnet.

Für die Auswertungen der Bilanzen muss sowohl für die Prüffrucht Sommerweizen als auch für den Silomais beachtet werden, dass im Jahr 2006 zu hohe GRS-Mengen ausgebracht wurden. Für den GRS GK wurden die für die N-Stufe 3 vorgesehenen 150 kg ha^{-1} N bereits mit der N-Stufe 1 erreicht, für die GRS D und P mit der Stufe N2. Diese, in der Tabelle gelb markierten Werte, sollen im Folgenden miteinander verglichen werden.

Tabelle 27: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Sommerweizen in den Versuchsjahren 2006 und 2007 im Parzellenfeldversuch in Berlin-Dahlem

N-Stufe	Dünger	2006			2007		
		N	P	K	N	P	K
		[kg ha^{-1}]					
		Düngung					
N0	Kontrolle	0	0	0	0	0	0
N1	GRS D	84	12	71	50	7	44
	GRS P	65	10	71	50	9	61
	GRS GK	124	15	119	47	9	58
	Mineral	50	78	68	50	13	49
N2	GRS D	168	24	143	100	14	88
	GRS P	129	19	142	100	19	121
	GRS GK	249	29	237	95	18	116
	Mineral	100	155	135	100	25	99
N3	GRS D	252	37	215	149	21	132
	GRS P	194	28	213	150	28	182
	GRS GK	373	43	355	142	26	173
	Mineral	150	233	203	150	37	148
		Entzug					
N0	Kontrolle	76	13	82	40	7	23
N1	GRS D	83	14	101	43	8	25
	GRS P	86	14	97	44	8	27
	GRS GK	102	16	119	44	7	24
	Mineral	105	18	136	49	8	35
N2	GRS D	105	18	135	54	9	33
	GRS P	89	15	107	50	8	31
	GRS GK	107	17	138	53	8	30
	Mineral	129	20	161	71	10	48
N3	GRS D	114	18	152	56	10	36
	GRS P	91	16	110	55	9	34
	GRS GK	116	19	150	58	9	34
	Mineral	144	20	183	87	12	61
		Bilanz					
N0	Kontrolle	-76	-13	-82	-40	-7	-23
N1	GRS D	+1	-2	-30	+7	-1	+19
	GRS P	-21	-4	-26	+6	+1	+34
	GRS GK	+22	-1	+/-0	+3	+2	+34
	Mineral	-55	+60	-68	+1	+5	+14
N2	GRS D	+63	+6	+8	+46	+5	+55
	GRS P	+40	+5	+35	+50	+11	+90
	GRS GK	+142	+12	+99	+42	+10	+86
	Mineral	-29	+135	-26	+29	+15	+51
N3	GRS D	+138	+19	+63	+93	+11	+96
	GRS P	+103	+12	+103	+95	+19	+148
	GRS GK	+257	+24	+205	+84	+17	+139
	Mineral	+6	+213	+20	+63	+25	+87

Aufgrund von Stickstoffanalysenfehler zu hoch ausgebrachte GRS-Menge
Aufgrund von Phosphoranalysenfehler des GRS zu hoch angepasste mineralische P-Düngung
Markierte Werte entsprechen am ehesten einer Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} N und werden im Text miteinander verglichen

Die ungedüngte Kontrolle wies aufgrund der unterlassenen Nährstoffzufuhr stark negative Bilanzen auf. Die gelb markierten Varianten, welche etwa einer Düngung mit

150 kg ha^{-1} N entsprachen, lagen für den Nährstoff Stickstoff bei allen Düngern im positiven Bereich. Der Mineraldünger wies mit +6 kg ha^{-1} N eine annähernd ausgeglichene Bilanz auf, somit war die Höhe der Aufwandmenge für diesen Dünger angemessen. Die GRS wiesen jedoch mit +22 bis +63 kg ha^{-1} N eine deutlich positive Bilanz auf. Da die Bilanzen mit den Gesamtstickstoffmengen im Gärrückstand (mineralisch und organisch) berechnet wurden und nur ein Teil des Stickstoffs im Anwendungsjahr wirksam wird (ca. 80 %), ist ein N-Überschuss von 30-40 kg ha^{-1} als positiv zu bewerten. Dieser Stickstoff muss jedoch bei der Düngeberechnung im nächsten Jahr berücksichtigt werden. Die sehr hohen N-Überschüsse bei der Stufe N3 werden auch durch die Weizenkornerträge wieder gespiegelt. Bei keinem der drei GRS gab es eine Ertragssteigerung von der N-Stufe 2 zu N3. Die mineralische Phosphor- und Kaliumdüngung für das Jahr 2006 soll hier aufgrund der fehlerhaften Ausbringmengen nicht betrachtet werden. Für die GRS lässt sich jedoch die Aussage treffen, dass die Nährstoffe Phosphor und Kalium verglichen mit Stickstoff mit einer Ausnahme erst bei einer höheren Ausbringmenge in eine positive Bilanz kommen, so dass die Berechnung der Ausbringmenge anhand der Stickstoffgehalte hier richtig erscheint. Die Ausnahme ist der Kaliumgehalt im GRS P, der im Verhältnis passend zum Stickstoff vorhanden ist. Der Grund dafür liegt im relativ hohen Kaliumgehalt des GRS P, der seine Ursache wahrscheinlich durch die Verwendung von Kartoffeln als Substrat hat. Über einen längeren Zeitraum gesehen sollte darauf geachtet werden, dass ein Nährstoff nicht dauerhaft in einer negativen Bilanz liegt um den Boden nicht zu verarmen. Eine mineralische Ausgleichsdüngung sollte jedoch nur erfolgen, wenn der Boden bezüglich dieses Nährstoffs nicht über der Gehaltsklasse C liegt (wie es in Berlin-Dahlem für P und K der Fall ist).

Im Jahr 2007 verhielt es sich aufgrund der extremen Trockenperiode im Frühjahr anders, da die gebildeten Trockenmassen insgesamt niedriger ausfielen als im Vorjahr. Aus diesem Grund waren bereits bei einer Aufwandmenge von 50 kg ha^{-1} N (N1) für alle Dünger die Bilanzen leicht positiv. Auffällig ist, dass im Gegensatz zum Vorjahr der Nährstoff Kalium vor dem Stickstoff in eine positive Bilanz kommt. Eine Erklärung hierfür wäre, dass das Stroh- zu Kornverhältnis in diesem Jahr niedriger war, also im Verhältnis mehr Korn gebildet wurde. Da Stroh mehr Kalium enthält als Korn, wird bei einem engen Verhältnis entsprechend weniger Kalium benötigt. Ausgehend von der N-Stufe 1 sind die Nährstoffüberschüsse jedoch nicht sehr hoch und können kaum

kalkuliert werden, da die Erträge und somit der Nährstoffverbrauch von Jahr zu Jahr in Abhängigkeit von den Witterungsverhältnissen Schwankungen unterlegen sind.

Nährstoffbilanzen für Silomais 2006 und 2007

Die Nährstoffbilanzen für die Prüffrucht Silomais in den Jahren 2006 und 2007 sind in Tabelle 28 aufgeführt.

Im Jahr 2006 wurde bei den GRS-Varianten eine positive N-Bilanz bei etwa 150 kg ha^{-1} N erreicht, wohingegen der mineralische Stickstoff in dieser Aufwandmenge noch mit 20 kg ha^{-1} N im Minus lag. Die zugehörigen Phosphor- und Kaliumbilanzen der GRS kommen erst bei höheren Aufwandmengen zu einer positiven Bilanz, so dass eine Ausrichtung der Düngermenge am Stickstoff auch hier als richtig erscheint. Wie auch beim Sommerweizen verhält sich Kalium für den GRS P ähnlich wie Stickstoff und müsste bei einer angepassten N-Düngungsmenge, im Gegensatz zu Phosphor, über einen längeren Zeitraum nicht mineralisch ausgeglichen werden.

Diese Ergebnisse bestätigten sich im Jahr 2007. Auch hier erreichten alle GRS bei 150 kg ha^{-1} N eine ausgeglichene Bilanz und lagen für die Nährstoffe P und K noch im Minus (außer Kalium beim GRS P). Die mineralische N-Düngung müsste gemessen an dem Nährstoffentzug der Maispflanzen dagegen eher bei 200 kg ha^{-1} N liegen. Dabei müssen jedoch die Vorgaben der Düngeverordnung beachtet werden. Zudem wäre wahrscheinlich sowohl für Sommerweizen als auch für Silomais eine zeitlich angepasste Düngung in mehreren Gaben sinnvoll, um N-Verluste zu vermeiden. Da im Rahmen des Projektes dazu jedoch keine Versuche gemacht wurden, kann eine Auswirkung geteilter Düngergaben hier nicht diskutiert werden.

Tabelle 28: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais in den Versuchsjahren 2006 und 2007 im Parzellenfeldversuch Berlin-Dahlem

N-Stufe	Dünger	2006			2007		
		N	P	K	N	P	K
		[kg ha^{-1}]					
		Düngung					
N0	Kontrolle	0	0	0	0	0	0
N1	GRS D	84	12	71	50	7	44
	GRS P	65	10	71	50	9	61
	GRS GK	124	15	119	47	9	58
	Mineral	50	78	68	50	13	49
N2	GRS D	168	24	143	100	14	88
	GRS P	129	19	142	100	19	121
	GRS GK	249	29	237	95	18	116
	Mineral	100	155	135	100	25	99
N3	GRS D	252	37	215	149	21	132
	GRS P	194	28	213	150	28	182
	GRS GK	373	43	355	142	26	173
	Mineral	150	233	203	150	37	148
		Entzug					
N0	Kontrolle	82	25	113	121	28	150
N1	GRS D	106	26	142	139	34	164
	GRS P	96	26	131	154	28	149
	GRS GK	97	27	145	129	29	167
	Mineral	112	29	143	168	36	211
N2	GRS D	119	30	158	137	37	193
	GRS P	93	24	124	138	27	155
	GRS GK	123	33	167	154	35	176
	Mineral	161	32	159	203	42	229
N3	GRS D	135	31	171	144	42	198
	GRS P	110	31	143	149	31	172
	GRS GK	122	29	162	143	37	203
	Mineral	170	29	198	203	40	219
		Bilanz					
N0	Kontrolle	-82	-25	-113	-121	-28	-150
N1	GRS D	-22	-14	-71	-89	-27	-120
	GRS P	-31	-16	-60	-104	-19	-88
	GRS GK	+27	-12	-26	-82	-20	-109
	Mineral	-62	+49	-75	-118	-23	-162
N2	GRS D	+49	-6	-15	-37	-23	-105
	GRS P	+36	-5	+18	-38	-8	-34
	GRS GK	+126	-4	+70	-59	-17	-60
	Mineral	-61	+123	-24	-103	-17	-130
N3	GRS D	+117	+6	+44	+5	-21	-66
	GRS P	+84	-3	+70	+1	-3	+10
	GRS GK	+251	+14	+193	-1	-11	-30
	Mineral	-20	+204	+5	-53	-3	-71

Aufgrund von Stickstoffanalysenfehler zu hoch ausgebrachte GRS-Menge
Aufgrund von Phosphoranalysenfehler des GRS zu hoch angepasste mineralische P-Düngung
Markierte Werte entsprechen am ehesten einer Aufwandmenge von 150 kg ha^{-1} N und werden im Text miteinander verglichen

Nährstoffbilanzen in den Praxisversuchen 2006 und 2007

Auch für die Praxisversuche wurden Nährstoffbilanzen berechnet. Die Bilanzen für die Nährstoffe N, P und K des Roggenversuchs in Dolgelin zeigt Tabelle 29.

Tabelle 29: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Roggen im Praxisversuch in Dolgelin in den Versuchsjahren 2006 und 2007

N-Stufe	2006			2007		
	N	P	K	N	P	K
	[kg ha^{-1}]					
	Düngung					
N0	0	0	0	0	0	0
N1	50	11	63	50	11	69
N2	100	22	126	100	22	138
N3	150	32	190	150	32	207
	Entzug					
N0	94	16	130	44	12	47
N1	95	16	121	62	18	68
N2	122	20	172	95	20	112
N3	127	20	176	128	23	136
	Bilanz					
N0	-94	-16	-130	-44	-12	-47
N1	-45	-5	-58	-12	-7	+1
N2	-22	+2	-46	+5	+1	+26
N3	+23	+12	+14	+22	+10	+71

Im Jahr 2006 wurde eine ausgeglichene Bilanz für die Nährstoffe N und K zwischen den N-Stufen 2 und 3 erreicht, für Phosphor war die Bilanz bereits bei der Düngungsstufe N2 ausgeglichen. Im zweiten Versuchsjahr zeigten N und P bei der Stufe N2 eine ausgeglichen Bilanz, Kalium dagegen bereits bei der Stufe N1. Da die Nährstoffzusammensetzung des Gärrückstandes in den beiden Versuchsjahren ähnlich war, resultieren diese Unterschiede aus den Entzügen durch die Pflanzen. Diese lagen für Kalium im ersten Versuchsjahr aus ungeklärter Ursache etwas höher als im Jahr 2007.

Für Silomais zeigte sich ein etwas anderes Bild. Im ersten Versuchsjahr erreichte Kalium als einziger der berechneten Nährstoffe bei der Stufe N3 eine positive Bilanz (Tabelle 30). Im zweiten Versuchsjahr wurde dies durch die hohen Silomaiserträge in keinem Fall erreicht. Die Praxisversuche weisen im Gegensatz zu den Parzellenfeldversuchen darauf hin, dass eine Berechnung der auszubringenden Gärrückstandsmenge eher an den Nährstoffen Phosphor oder Kalium ausgerichtet werden sollte, um anschließend den fehlenden Stickstoff mit Mineraldünger auszugleichen.

Tabelle 30: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais im Praxisversuch in Dolgelin in den Versuchsjahren 2006 und 2007

N-Stufe	2006			2007		
	N	P	K	N	P	K
	[kg ha^{-1}]					
	Düngung					
N0	0	0	0	0	0	0
N1	50	11	63	50	11	69
N2	100	22	126	100	22	138
N3	150	32	190	150	32	207
	Entzug					
N0	142	27	130	108	25	99
N1	161	32	158	142	33	160
N2	145	27	129	193	40	217
N3	194	37	147	205	41	225
	Bilanz					
N0	-142	-27	-130	-108	-25	-99
N1	-111	-21	-95	-92	-23	-91
N2	-45	-5	-2	-93	-19	-79
N3	-44	-5	+42	-55	-9	-18

Im Praxisversuch mit Silomais am Standort Püggen bestätigte sich das Ergebnis aus den Parzellenfeldversuchen. Im Jahr 2006 erreichten N und K bereits bei der N-Stufe 2 eine positive Bilanz, P dagegen erst mit N3 (Tabelle 31). Im zweiten Versuchsjahr erreichten alle Nährstoffe mit der N-Stufe 3 eine positive Bilanz, wobei für Phosphor mit +6 kg ha^{-1} N der geringste Wert erreicht wurde.

Tabelle 31: Vereinfachte Bilanz für die Nährstoffe N, P und K für die Prüffrucht Silomais im Praxisversuch in Püggen in den Versuchsjahren 2006 und 2007

N-Stufe	2006			2007		
	N	P	K	N	P	K
	[kg ha^{-1}]					
	Düngung					
N0	0	0	0	0	0	0
N1	34	6	45	50	9	61
N2	102	18	135	100	19	121
N3	129	23	171	150	28	182
	Entzug					
N0	71	21	87	104	33	147
N1	63	18	80	133	31	143
N2	78	18	80	141	42	196
N3	75	15	71	102	21	115
	Bilanz					
N0	-71	-21	-87	-104	-33	-147
N1	-29	-12	-35	-83	-22	-83
N2	+24	+/-0	+55	-41	-23	-74
N3	+54	+8	+100	+48	+6	+67

Welche Art der Berechnung der Düngermengen in diesem Fall die am besten geeignete ist, steht also nicht genau fest. Im Endeffekt sind jedoch die Differenzen zu den optimalen Verhältnissen nicht sehr groß, so dass erst bei einer mehrjährigen Anwendung darauf geachtet werden sollte, den Boden nicht mit einem Nährstoff über- oder unterzuversorgen. Zudem können keine allgemeinen Aussagen über die Nährstoffverhältnisse von Gärrückständen getroffen werden, da diese abhängig von den eingesetzten Substraten stark schwanken können. Bei einem Gärrückstand, der das Produkt einer Maissilage-Vergärung ist, kann davon ausgegangen werden, dass dieser eine ideale Nährstoffzusammensetzung für eine Maisdüngung aufweist. Wird jedoch ein höherer Anteil Kartoffeln als Substrat eingesetzt, enthielte der Gärrückstand für eine Maisdüngung im Verhältnis zu viel Kalium, so dass hier eine Düngerberechnung anhand des Stickstoffgehaltes nicht sinnvoll wäre.

2.2.3.4 Schlussfolgerungen aus den Feldversuchen

Die Feldversuche haben gezeigt, dass durch eine Düngung mit Gärrückständen die mikrobielle Aktivität des Bodens für einige Wochen erhöht werden kann, was jedoch durch Düngung mit mineralischem Dünger ebenfalls geschieht. Die Ergebnisse des zweiten Versuchsjahres wiesen darauf hin, dass die leicht umsetzbare organische Substanz im Gärrückstand bereits in kurzer Zeit nach der Ausbringung durch die Mikroorganismen abgebaut wird. Der in allen Düngevarianten gemessene fördernde Effekt auf die Bodenatmung kehrte sich nach ca. neun bis zehn Wochen in einen leicht hemmenden Effekt um. Wahrscheinlich gleichen sich nach einigen Wochen alle Varianten in der Höhe der Bodenatmung an (dies wurde nicht mehr gemessen), so dass die Bilanz auf die Vegetationsperiode bezogen eher positiv als negativ ist.

Hinsichtlich der Wirkung auf Regenwürmer ist eine Ausbringung hoher Mengen an Gärrückständen kritisch zu bewerten, da die Lebensraumfunktion des gedüngten Bodens eingeschränkt und er von den Tieren gemieden wird. Mit geringeren Aufwandmengen gedüngter Boden wurde jedoch toleriert oder sogar bevorzugt. Ein Grund dafür ist wahrscheinlich die im Gärrückstand enthaltene organische Substanz, die den Tieren als Nahrungsquelle dienen kann. Es konnte jedoch nicht geklärt werden, ab welcher Aufwandmenge im Feld von einem Gefährdungspotenzial durch Gärrückstände auszugehen ist und welcher Inhaltsstoff bzw. welche Eigenschaft für die Vermeidung verantwortlich ist.

Bezüglich der Ertragswirkung von Gärrückständen wurden für Sommerweizen durchschnittliche MDÄ von 86 berechnet. Dies ist für einen organisch-mineralischen Dünger sehr hoch und deutet darauf hin, dass bei der Düngung von Sommerweizen mit Gärrückständen Mineral-N-Dünger weitgehend substituiert werden können. Ein etwas anderes Bild zeigte sich für die Kultur Silomais. Das durchschnittliche MDÄ lag mit 77 gleichfalls hoch, dennoch deutete sich an, dass diese stark stickstoffbedürftige Kultur durch die hohen Erträge mit nur einer Gabe an Gärrückstand nicht ausreichend versorgt werden konnte. Ausbringung höherer Düngermengen könnten zwar in einem gewissen Rahmen die Erträge steigern, sie sind jedoch aufgrund der Gefahr von hohen Stickstoffverlusten durch die Düngeverordnung beschränkt. Somit wäre wahrscheinlich eine kombinierte Verwendung von Gärrückstand und Mineraldünger, wie es viele Landwirte auch mit Rindergülle praktizieren, sowohl für den Ertrag als auch für die Umwelt günstiger zu beurteilen.

3. Gesamtauswertung

3.1 Anwendungsempfehlungen

Grundsätzlich unterliegt die Ausbringung von Gärrückständen der Düngeverordnung (DüVO), in der u. a. maximale auszubringende Nährstoffmengen, Anwendungszeitpunkte sowie Abstandsregelungen zu Gewässern festgelegt sind. Anwendungsempfehlungen können aus den im Rahmen dieses Projektes durchgeführten Versuche nur bedingt abgeleitet werden, da die Ergebnisse immer auf die verwendete Prüffrucht, die getesteten Gärrückstände sowie die Standortbedingungen bezogen zu sehen sind. Die Ergreifung von Maßnahmen zur Vermeidung von Stickstoffverlusten durch Ammoniakausgasungen ist zwar keine neue Empfehlung, dennoch die Wichtigste beim Umgang mit Gärrückständen als Dünger, da ein hoher Anteil des Stickstoffs als Ammoniumstickstoff vorliegt. Zu diesen Maßnahmen zählen die Wahl des Ausbringungstermins (Witterung) sowie das Ausbringungsverfahren (möglichst bodennah bzw. direkt in den Boden injizieren). Des Weiteren sollte der Landwirt in regelmäßigen Abständen (zur Düngung) seinen Gärrückstand auf die Hauptnährstoffe untersuchen lassen, um die Düngeberechnung entsprechend anpassen zu können und gegebenenfalls einzelne Nährstoffe mit mineralischen Düngern auszugleichen.

In den Parzellenfeldversuchen wurden Stickstoff-MDÄ der Gärrückstände von 77 für Mais bzw. 86 für Sommerweizen berechnet. Der in der Düngeverordnung für Rinder-

gülle anzurechnende Mindestwert des Gesamtstickstoffs bei der Zufuhr liegt bei 70 % (nach Abzug der Stall-, Lagerungs- und Ausbringungsverluste). Bei der Verwendung von Gärrückständen mit hohen Ammoniumanteilen (wie GRS D und GK) sollte dieser anzurechnende Stickstoffanteil noch höher angesetzt werden. Da der Anteil NH_4^+ an N_{ges} jedoch stark schwanken kann, sollte der Landwirt diesen Parameter in seine Analysen mit einbeziehen. Außerdem ist zu beachten, dass der organisch gebundene Stickstoff mit der Zeit ebenfalls mineralisiert wird und somit anteilig in den Folgejahren angerechnet werden sollte. Da es jedoch auch immer unvermeidbare Stickstoffverluste z. B. durch Auswaschung gibt, kann im Rahmen dieser Versuche nicht abschließend geklärt werden, wie hoch dieser anzurechnende Anteil sein sollte.

3.2 Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Vor dem Hintergrund des Baus größerer Anlagen und dem damit z. T. verbundenen betrieblichen Nährstoffüberschüssen (z. B. in viehstarken Regionen bzw. bei Verwendung bzw. Zukauf betriebsfremder Gärsubstrate) besteht die Notwendigkeit zur stärkeren Herausstellung des Produktcharakters von Gärrückständen zur Verbesserung des Absatzes und der Erlössituation für Biogasanlagenbetreiber. Je größer die Biogasanlagen konzipiert sind und je höher der Nährstoffgehalt im Gärrückstand, speziell durch den wachsenden Einsatz nährstoffreicher Gärsubstrate, desto stärker besteht die ökonomische Notwendigkeit der Vermarktung des Gärrückstandes. Die hier dargestellten wissenschaftlichen Ergebnisse ermöglichen hierzu die Schaffung von Anwendungsstrategien für diese Düngestoffe.

Parallel dazu gibt es eine drastische Preisentwicklung für mineralische Düngemittel seit Ende des vergangenen Jahres. Auf Grund der Verknappung von Rohstoffen und stetig steigender Energiepreise sind für Mineraldünger Preiserhöhungen bis zu 50 % zu verzeichnen[44]. Die Dynamik auf dem Mineraldüngemittelmarkt wird sich deutlich auf die Nachfrage nach organischen Sekundärrohstoffdüngern auswirken. Gärrückstände bieten in zunehmendem Maße eine ökonomisch und ökologisch günstige Alternative.

Die Marktchancen von Gärrückständen hängen neben der ökonomischen Wettbewerbsfähigkeit von den Gebrauchseigenschaften aber auch von der Akzeptanz dieser Produkte durch die potenziellen Anwender ab. Daher sind durch die an diesem Projekt

[44] „Düngewertberechnung für Kompost und Gärprodukte angepasst“. IN: Humuswirtschaft & Kompost aktuell 05/2008. S 8

beteiligten Forschungseinrichtungen verschiedene Maßnahmen zum erfolgreichen Transfer der Forschungsergebnisse, also zur Implementierung der Ergebnisse in die Praxis, durchgeführt worden. Neben der Praxisnähe der Versuche wurden zwischenzeitliche Forschungsergebnisse in Fachzeitschriften publiziert und so den Biogasanlagenbetreibern und auch potenziellen Anwendern von Gärrückständen die positiven Eigenschaften des Produktes näher gebracht und eine Vertrauensbasis bezüglich der Anwendung von Gärrückständen aufgrund wissenschaftlich gesicherter Erkenntnisse geschaffen (siehe Kapitel 4.4.1).

3.3 Zwischenzeitlich bekannt gewordener Fortschritt bei anderen Stellen

Parallel zum verstärkten Bau von NaWaRo-Biogasanlagen in den letzten Jahren stieg auch die Nachfrage nach wissenschaftlichen Untersuchungen zur pflanzenbaulichen Verwertung der dabei anfallenden Gärrückstände. Wissenschaftliche Untersuchungen hierzu ermöglichen die Schaffung von Anwendungsstrategien für diese Düngestoffe.

Aktuelle Forschungsprojekte zu Gärrückständen aus NaWaRo-Substraten:

• Schwerpunkt eines durch die FNR geförderten und bereits abgeschlossenen Projektes „Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrückständen aus NaWaRo-Biogasanlagen“ (FKZ: 22011201) der Universität Trier waren 1,5-jährige Untersuchungen in der Fruchtfolge Sommergerste, Ölrettich und Winterweizen unter Zugabe verschiedener Gärrückstände (Schweine , Rinder- und Mischgüllen in Kombination mit ausgewählten Energiepflanzen). Die Untersuchungen beschränkten sich dabei auf Gefäßversuche. Untersucht wurden Nährstoff- und Schwermetallgehalte in den Gärsubstraten, im Boden und in der Pflanze sowie die Beeinflussung des Pflanzenwachstums. In Abhängigkeit von den eingesetzten NaWaRo’s und bestimmten Prozessparametern variierten die Gehalte an Nährstoffen und Schwermetallen im Gärrückstand. Als Hauptquelle für erhöhte Frachten der Schwermetalle wurden die Frischgülle und spezielle hoch angereicherte NaWaRo’s wie Festmist oder Hühnertrockenkot genannt. Im Ergebnis wurde festgestellt, dass es durchaus zu einer positiven Beeinflussung des Pflanzenwachstums durch die Anwendung der einzelnen Gärrückstände kam. Signifikante Unterschiede in Biomasseertrag und Proteingehalt begründeten die Autoren beispielsweise mittels der durch die einzelnen Gärrückstände unterschiedlich aufgebrachten Frachten an Stickstoff und Ammonium. Allerdings

konnten auf Grund von Abweichungen zwischen den einzelnen Varianten keine verallgemeinerungsfähigen Aussagen getroffen werden[45].

• Im laufenden Verbundprojekt „Biogasexpert“ im Rahmen des Kompetenzzentrums Biomassenutzung Schleswig-Holstein werden u. a. die Wirkung der Gärrückstandsapplikation auf die Ertragsbildung von Energiepflanzen, die Bodenfruchtbarkeit (Humus-C) und die Methanausbeute des Substrats bestimmt. Parallel dazu werden die Auswirkungen der Gärrückstandsapplikation auf die Emission klimarelevanter Spurengase (CH_4 und N_2O) erfasst. Diese Untersuchungen finden zunächst für zwei repräsentative Standorte Schleswig-Holsteins landschaftsraum-bezogen statt.

• Eine geplante Fortsetzung des derzeit durch die FNR geförderten Verbundvorhabens „Entwicklung und Vergleich von optimierten Anbausystemen für die landwirtschaftliche Produktion von Energiepflanzen unter den verschiedenen Standortbedingungen Deutschlands“ (EVA) (Teilprojekt 6 „Systemversuch zum Zweikultur-Nutzungssystem auf sechs Standorten im Bundesgebiet“, FKZ: 22002805) beinhaltet unter anderem auch die Untersuchung der Nährstoffversorgung über den Einsatz von Gärrückständen in Zweikultur-Nutzungssystemen unter ökologischen Anbaubedingungen. Über eine vorhergehende Separation des Gärrückstandes in eine feste und flüssige Phase sollen Nährstoffverluste speziell über die NH_3-Emission minimiert werden. Als Prüffrüchte sind die bereits untersuchten Kulturen aus dem derzeit noch laufenden Verbundvorhaben geplant.

• In einem durch die FNR geförderten Verbundvorhaben (FKZ: 22017206) sollen am Beispiel der Energiepflanzen Mais und Raps Untersuchungen zu Fruchtfolgen mit Energiepflanzen als Beitrag zur Reduktion des Pflanzenschutzmitteleinsatzes im Ackerbau durchgeführt werden. Hier sollen insbesondere Lösungen für phytomedizinisch weniger kritische Fruchtfolgen erarbeitet und Möglichkeiten für eine Quantifizierung des Fruchtfolgewertes der Energiepflanzen entwickelt werden. Der Forschungsschwerpunkt liegt auf der Entwicklung einer Pflanzenschutzstrategie.

[45] Göhler, H., Emmerling, C.: „Landwirtschaftliche Verwertung von Gärrückständen aus NaWaRo-Biogasanlagen“ (FKZ: 22011201); gefördert durch die FNR, Endbericht Mai (2007)

3.4 Veröffentlichungen der Ergebnisse und Schutzrechtsanmeldungen

3.4.1 Wissenschaftliche Publikationen

Die Ergebnisse aus dem Projekt „Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrates Energiepflanzen“ wurden bisher detailliert in folgenden Publikationen vorgestellt:

[1] SENSEL, K.; WRAGGE, V.; AIGELTINGER, R.; ELLMER, F.: „Mehr als Resteverwertung. Wie wertvoll sind Gärrückstände aus Biogasanlagen?“ In: Neue Landwirtschaft 5 (2007), 42-45

[2] SENSEL, K.; ELLMER, F.: „Gärrückstände aus der Erzeugung von Biogas mit Energiepflanzen – Stoffkenngrößen und Variabilität“. In: Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19 (2007), 204-205

[3] WRAGGE, V.; ELLMER, F.: “Anaerobic digested residues as fertilizer in spring wheat. Effects on soil and crop”. In: Practical Solutions for Managing optimum C and N Content in Agricultural Soils IV. Book of Abstracts, Prague (2007), 84

[4] WRAGGE, V.; ELLMER, F.: „Rückstände aus der Biogaserzeugung als Düngemittel bei Sommerweizen“. In: Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 19 (2007), 206-207

[5] SENSEL, K.; WRAGGE, V.; ELLMER, F.: „Gärrückstände aus der Biogaserzeugung mit pflanzlichen Substraten – Eigenschaften und pflanzenbauliche Verwertung“. In: Nutzung von Biomasse als Gärsubstrate. 26. Fachtagung Acker- und Pflanzenbau; Landesamt für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Brandenburg (2007), 35-38

[6] SENSEL, K., ELLMER, F.: „Gärprodukte aus der Biogaserzeugung als Träger natürlicher Wachstumsregulatoren“. In: Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 20 (2008), 99-100

[7] WRAGGE, V., ELLMER, F.: „Gärprodukte aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen als Düngestoff im Pflanzenbau“. In: Ges. Pflanzenbauwiss. 20 (2008), 101-102

[8] WRAGGE, V., GRUNER, P., ELLMER, F.: „Einfluss von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen auf Regenwurmpopulationen eines mittel schluffigen Sandbodens“. In: . Ges. Pflanzenbauwiss. 20 (2008), 73-74

3.4.2 Vorträge und Posterpräsentationen

[1] SENSEL, K.; WRAGGE, V.; ELLMER, F.: "Gärrückstände aus Biogasanlagen in der pflanzenbaulichen Verwertung". Vortrag im Rahmen der Grünen Woche (Berlin, 26.01.2007)

[2] WRAGGE, V., ELLMER, F. (2007): „Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen“. Poster, ausgestellt zur Internationalen Grünen Woche in Berlin, Januar 2007.

[3] SENSEL, K.: "Wirkung von NawaRo-Gärprodukten auf Böden und Pflanze". Information IN: „Humuswirtschaft & Kompost aktuell 03/2007, S. 11.

[4] WRAGGE, V., ELLMER, F.: „Gärrückstände aus der Fermentation von Energiepflanzen in der pflanzenbaulichen Verwertung“. Vortrag auf der Wintertagung der internationalen Arbeitsgemeinschaft für Bodenfruchtbarkeit (Rauischholzhausen, 1. März 2007)

[5] SENSEL, K., WRAGGE, V., ELLMER, F.: "Gärrückstände aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen - Stoffliche Charakterisierung und pflanzenbauliche Verwertung – „; Poster im Rahmen der 4. VDI-Fachtagung "Biogas-Energieträger der Zukunft". (Berlin, 14. - 15.06.2007)

[6] WRAGGE, V., ELLMER, F. (2007): “Anaerobic digested residues as fertiliser in spring-wheat – Effects on soil and crop”. Poster, ausgestellt zum “International Workshop Managing Optimum C and N Content in Soils IV in Prag am 20. Juni 2007

[7] SENSEL, K., ELLMER, F.: "Gärrückstände aus der Erzeugung von Biogas mit Energiepflanzen“ Posterbeitrag im Rahmen der 50. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften in Bonn - "Rückblick und Perspektiven für die Zukunft" (18.–20. September 2007)

[8] WRAGGE, V., ELLMER, F.: „Rückstände aus der Biogaserzeugung als Düngemittel bei Sommerweizen”, Posterbeitrag im Rahmen der 50. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften in Bonn – „Rückblick und Perspektiven für die Zukunft“ (18.-20. September 2007)

[9] SENSEL, K., WRAGGE, V., ELLMER, F.: „Gärrückstände aus der Biogaserzeugung mit Pflanzensubstraten – Eigenschaften und pflanzenbauliche Verwertung“. Vortrag im Rahmen der 26. Fachtagung „Perspektiven der Nutzung von Biomasse als Gärsubstrate unter den Standortbedingungen des Landes Brandenburg“ (Güterfelde, 22.11.2007)

[10] SENSEL, K., ELLMER, F.: "Gärrückstände aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen - Stoffliche Charakterisierung und pflanzenbauliche Verwertung“ – Poster im Rahmen der 5. Informationsveranstaltung zum Tag des Bodens „Humusreproduktion und Wassermanagement“ (Schmachtenhagen, 05.12. 2007)

[11] Statusseminar „Pflanzenbauliche Verwertung von Gärrückständen aus Biogasanlagen unter besonderer Berücksichtigung des Inputsubstrats Energiepflanzen“; 11. Dezember 2007, Berlin

[12] SENSEL, K., ELLMER, F.: "Gärprodukte aus der Biogaserzeugung als Träger natürlicher Wachstumsregulatoren“. Vortrag im Rahmen der 51. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften und des Friedrich-Körnicke-Symposiums der Gesellschaft für Pflanzenzüchtung in Göttingen - "Biodiversität in der Pflanzenproduktion" (1.–2. Oktober 2008)

[13] WRAGGE, V., ELLMER, F. (2008): “Gärprodukte aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen als Düngestoff im Pflanzenbau”. Vortrag im Rahmen der 51. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften und des Friedrich-Körnicke-Symposiums der Gesellschaft für Pflanzenzüchtung in Göttingen - "Biodiversität in der Pflanzenproduktion" (1.–2. Oktober 2008)

[14] WRAGGE, V., GRUNER, P., ELLMER, F. (2008): “Einfluss von Gärprodukten aus der Biogaserzeugung mit Energiepflanzen auf Regenwurmpopulationen eines mittel schluffigen Sandbodens”. Poster, ausgestellt zur 51. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften und des Friedrich-Körnicke-Symposiums der Gesellschaft für Pflanzenzüchtung in Göttingen - "Biodiversität in der Pflanzenproduktion" (1.–2. Oktober 2008)