

Kurzfassung: Gärrestversuch Bayern – Prüfung der langfristigen Nachhaltigkeit der Nutzungspfade Biogas und BtL

Johannes Burmeister (LfL-IAB), Sebastian Parzefall (TFZ), Martin Wiesmeier (LfL-IAB), Florian Ebertseder (LfL-IAB), Günter Henkelmann (LfL-AQU), Roswitha Walter (LfL-IAB), Maendy Fritz (TFZ)

Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse, Technologie- und Förderzentrum (TFZ)
und
Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz,
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

1 Einleitung

Böden sind nicht nur die Grundlage der Landwirtschaft, sondern erfüllen auch weitere wichtige Funktionen wie die Filterung und Speicherung von Wasser, die Transformation von Nährstoffen und die Bereitstellung von Lebensräumen. Eine große Bedeutung in diesem Zusammenhang haben der Humus im Boden, das Bodengefüge sowie die biologische Aktivität des Bodens. Der Humusvorrat beeinflusst auch das Wasser- und Nährstoffspeichervermögen der Böden. Ein stabiles Bodengefüge wirkt sich positiv auf die Tragfähigkeit des Bodens aus, und der Boden ist weniger anfälliger gegenüber Schäden wie Verdichtungen und Erosion. Bodentiere wie Regenwürmer beeinflussen durch ihre Aktivität positiv das Bodengefüge und durch ihre Einmischung von verrottendem organischem Material in den Boden auch die Nährstoffnachlieferung.

Neben der Erzeugung von Biogas kann pflanzliche Biomasse aus der Landwirtschaft zukünftig auch zur Bereitstellung von Bioenergie über das Biomass to Liquid (BtL)-Verfahren genutzt werden. Die BtL-Technologie umfasst die Produktion von Kraftstoffen oder Chemierohstoffen aus jeglicher Biomasse. Die unterschiedlichen Nutzungspfade der Bioenergie beinhalten daher meist eine vollständige Abfuhr der oberirdischen Biomasse. Ein negativer Einfluss der Nutzungspfade auf die Fruchtbarkeit von Ackerböden sollte insbesondere im Hinblick auf eine ausreichende Humusreproduktion, ein stabiles Bodengefüge sowie auf die biologische Aktivität der Böden frühzeitig erkannt werden.

2 Problemstellung und Zielsetzung

Während bei den BtL-Verfahren die oberirdische Biomasse zur energetischen Verwertung dauerhaft entzogen wird, ist bei einer Nutzung der Biomasse als Gärsubstrat für die Biogasproduktion eine Rückführung humusbildender Verbindungen über die Gärreste die Regel. Bei der Ausbringung von Gärresten werden auf Grund des geringeren Energiegehaltes und auch der höheren Konzentration von Ammonium negative Effekte auf das Bodenleben und besonders auf die Regenwurmfauna befürchtet. Humushaushalt, Bodenleben und Bodenstruktur beeinflussen sich gegenseitig und prägen für die praktische Bewirtschaftung relevante Ökosystemleistungen wie Wasserverfügbarkeit, Erosionsrisiko, Befahrbarkeit, Nährstoffpuffer- und Speicherfähigkeit.

Im Rahmen dieses vom Bayerischen Staatsministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten geförderten Vorhabens soll deshalb geklärt werden, ob der Anbau von landwirtschaftlichen Kulturen zur energetischen Nutzung über eine Biogasvergärung oder das BtL-Verfahren nachhaltig erfolgen kann.

Die zentrale Frage lautet, welche Auswirkungen haben diese Betriebssysteme mit ihrer entsprechenden Düngung auf:

- den Humusgehalt, die Humusvorräte sowie die mikrobiologische Aktivität und Biomasse im Boden?
- die Aggregatstabilität, das Porenvolumen und die Wasserinfiltration des Bodens?
- die Abundanz, Biomasse und Artenvielfalt der Bodentiere?

3 Material und Methoden

Der Versuch wurde an vier Standorten in Bayern als randomisierte Blockanlage angelegt und ortsfest über die Laufzeit von zehn Jahren fortgeführt. Zwei Standorte befanden sich im Landkreis Straubing-Bogen in Niederbayern (Aholting, Straubing) und zwei in Mittelfranken (Reuth, Röckingen). Der Tongehalt auf den Versuchsfeldern lag im Mittel zwischen 14 % und 30 %, die Ackerzahl zwischen 33 und 76. Als Fruchtfolge wurde die Abfolge von Silomais und Winterweizen, beginnend mit Mais im Jahr 2009, gewählt. Eine jährliche Wiederholung jeder Kultur war nicht gegeben und es wurden keine Zwischenfrüchte angebaut. In allen Varianten erfolgte jährlich eine wendende Bodenbearbeitung mit dem Pflug. Über die Varianten des Versuchsfaktors wurden sechs unterschiedliche Nutzungspfade der erzeugten Biomasse simuliert, die verschiedene praxisübliche Betriebstypen/-systeme abbildeten (siehe Tabelle 1).

Tabelle 1: Übersicht über Versuchsaufbau mit unterschiedlicher organischer Düngung der sechs Versuchsvarianten

Variante	Nutzungspfad/ Variante	Düngung	Stroh- nutzung	Bemerkung
miner. -Stroh	Silomais Marktfruchtweizen mit Strohabfuhr (BtL)	ausschließlich mineralische Düngung	Abfuhr	BtL-Simulation, keinerlei Rückfüh- rung org. Biomasse
miner. +Stroh	Silomais Marktfruchtweizen	ausschließlich mineralische Düngung	Verbleib	keine Rückführung der Biomasse, Stroh verbleibt
Gärrest -Stroh	Silomais (Biogas) Marktfruchtweizen mit Strohabfuhr	Gärrest proportional zur Silomaisabfuhr + minerali- sche Ergänzungsdüngung	Abfuhr	Simulation Strohver- kauf
Gärrest +Stroh	Silomais (Biogas) Marktfruchtweizen	Gärrest proportional zur Silomaisabfuhr + minerali- sche Ergänzungsdüngung	Verbleib	Simulation Stroh wird eingearbeitet
max. Gärrest -Stroh	Silomais (Biogas) GPS Weizen (Biogas)	Gärrest proportional zur Si- lomais- und Weizenabfuhr (+20 % Zuschlag) + min. Ergänzungsdüngung	Abfuhr	Simulation 20 % Gär- restüberhang
Rinder- gülle +Stroh	Silomais (Futter) Marktfruchtweizen	Gülle proportional zu Gär- restdüngung (Variante „Gärrest +/-Stroh“) + min. Ergänzungsdüngung	Verbleib	Simulation Güllewirt- schaft, Stroh wird eingearbeitet

Die unterschiedliche Rückführung der pflanzlichen Biomasse in den entsprechenden Versuchsvarianten erfolgte ertragsbezogen. Die zur Düngung zur Verfügung stehenden Gärrest- und Rindergülle-mengen wurden dabei näherungsweise über die Stickstoffabfuhr berechnet. Abweichungen von den Sollmengen wurden im Folgejahr korrigiert. Im Hinblick auf die Auswirkungen auf Humusgehalt im Boden war es notwendig die vom Pflanzenwachstum abhängigen Einträge an organischem Material in den Boden (Ernte- und Wurzelreste, Rhizodeposition und Bestandsabfälle) in allen Varianten möglichst gleich zu halten. Deshalb wurde je Standort ein einheitliches Ertragsniveau in Höhe des jeweiligen wirtschaftlichen Höchsttrags angestrebt. Um dies zu erreichen wurde die unterschiedliche Pflanzenverfügbarkeit des in den organischen Düngern enthaltenen Stickstoffs berücksichtigt und entsprechend mit Mineraldünger zum Düngebedarf hin ausgeglichen.

Zur der Beurteilung der Einflüsse der verschiedenen Varianten auf die bodenphysikalischen Parameter wurden die Korngrößenzusammensetzung (2014), Bodenkennwerte wie Totwassergehalt und Gesamtporenvolumen, die Infiltrationsleistung (alle 2018) sowie regelmäßig die Aggregatstabilität gemessen. Zur Untersuchung der Entwicklung der Humusgehalte wurden gestörte Proben des Oberbodens (0–10 cm) aus den Jahren 2009, 2011, 2012, 2014, 2016 und 2018 entnommen und analysiert. Ebenso wurden zwei bodenmikrobiologische Parameter im Versuch bestimmt: die mikrobielle Aktivität des Bodens mit dem Katalasetest sowie die mikrobielle Biomasse (C_{mic}) durch substratinduzierte Respiration. Die Bodenproben wurden hierfür ebenfalls als Mischproben aus 0–10 cm Tiefe entnommen und tiefgefroren.

Die Regenwurmfauna wurde im Frühjahr 2012, 2014, 2016, 2018 jeweils im Winterweizen mit einer Kombination aus einer Austreibung mit stark verdünnter Formaldehydlösung (0,2 %, insgesamt 40 l/m²) und anschließender Handauslese erfasst. Die gesammelten und in 96 %-igem Ethanol konservierten Tiere wurden im Labor sortiert, auf ihre Art bestimmt (nur Adulte) und zur Ermittlung der Biomasse gewogen. Die ermittelten Arten wurden den drei ökologische Gruppen der bodenbewohnenden Regenwürmer (epigäische = Streubewohner, endogäische = Mineralbodenformen, anezische Arten = Tiefgräber) zugeordnet.

Für die Untersuchungen der Mesofauna wurden Stechzylinderproben des Oberbodens ausgewählter Varianten entnommen (Ø 8,5 cm, Höhe 4,5 cm, Volumen 250 cm³). Die sofort nach Entnahme verschlossenen und gekühlt transportierten Proben wurden am selben Tag in einer Tullgren-Apparatur invers eingestellt, erwärmt und beleuchtet, um die Tiere zur Abwanderung nach unten in den Auffangbereich zu bewegen. Die Konservierung erfolgte mit 80 %-igem Ethanol, bevor die gefangenen Springschwänze und Milben in taxonomische Gruppen eingeteilt wurden.

4 Ergebnisse

Über das Stroh und die organischen Dünger Rindergülle bzw. Gärrest wurden während des gesamten Versuchszeitraums sehr unterschiedliche Mengen an organischer Substanz zugeführt (Abbildung 1). Gegenüber Rindergülle führte eine Gärrestdüngung bei vergleichbaren Ausbringmengen und ähnlicher N-Düngung zu einer geringeren Zufuhr an organischer Substanz. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die anaerobe Fermentation im Biogasreaktor zu einem hochgradigen Abbau der umsetzbaren organischen Substanz des Inputsubstrats führt.

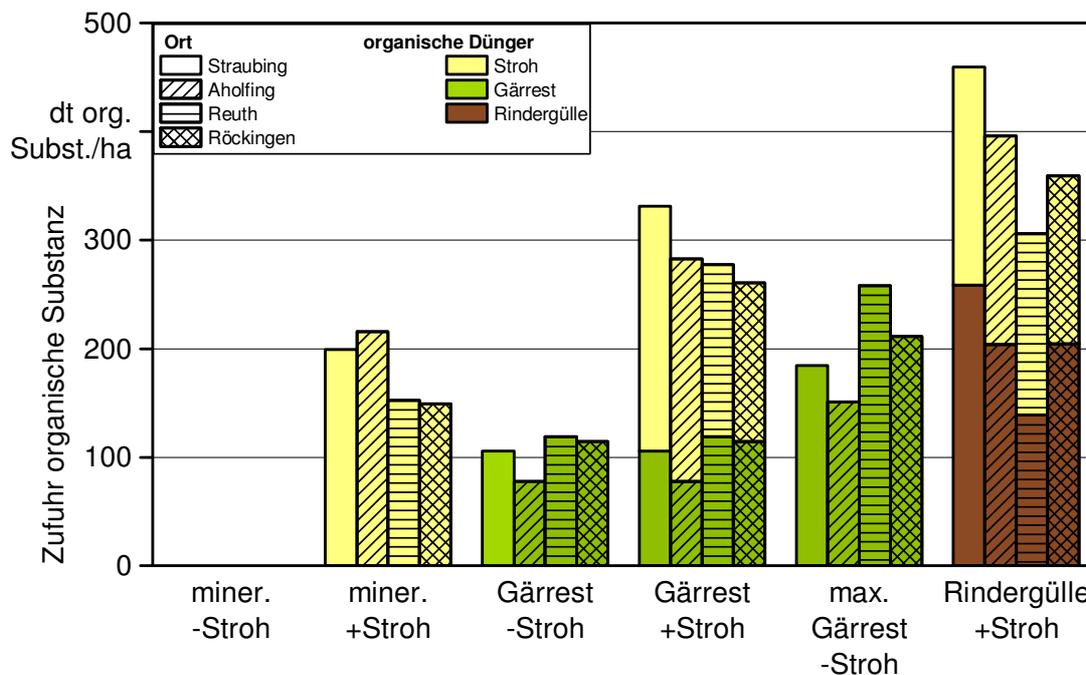


Abbildung 1: Zufuhr an organischer Substanz über Stroh und die flüssigen organischen Dünger Rindergülle und Gärrest in den Versuchsvarianten an den vier Versuchsstandorten aggregiert über den gesamten Versuchszeitraum

Die Bodenfruchtbarkeit als Zusammenspiel von bodenchemischen, bodenphysikalischen und bodenbiologischen Prozessen wird durch eine Vielzahl von Parametern bestimmt. Gemessen wird die Bodenfruchtbarkeit vor allem am potenziell erwirtschaftbaren Ertrag und auch an der langfristigen Ertragsstabilität. Im Gärrestversuch Bayern wurde im Mittel über die gesamte Versuchsdauer das Ziel eines identischen Ertragsniveaus in allen Nutzungspfaden erreicht (Abbildung 2). Anhand des Trends der Relativerträge war allerdings zu erkennen, dass sich die Erträge bei rein mineralischer Düngung relativ zur organischen Düngung verschlechterten. Zusätzlich zeigten die Untersuchungen zum Humushaushalt, der Bodenmikrobiologie, der Bodentierfauna, der Bodenstruktur und der Infiltration, dass sich Bodeneigenschaften düngungsspezifisch im Laufe des Versuchszeitraums verändert haben.

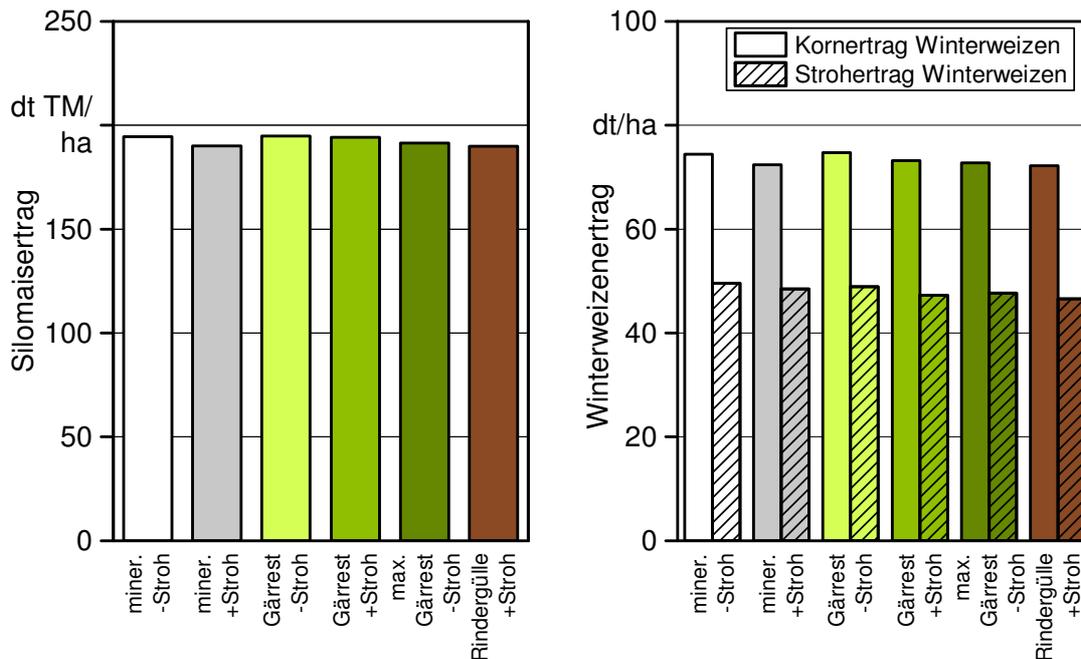


Abbildung 2: Erträge von Silomais (100 % TS, links) und Winterweizen (86 % TS, rechts) bei unterschiedlicher N-Düngung in Form von Mineraldünger, Gärresten oder Rindergülle und unterschiedlicher Strohrückführung im Mittel aller Versuchsstandorte und der gesamten Versuchsdauer (nur wertbare Einzelversuche)

Die Nachhaltigkeit eines Nutzungspfades umfasst aus Sicht der Bodenfruchtbarkeit nicht nur die langfristige Erhaltung der Ertragsfähigkeit des Bodens, sondern auch die Vorsorge gegenüber schädlichen Veränderungen der Bodeneigenschaften. Zum einen kann sich die Bodenfruchtbarkeit langsam über einen langen Zeitraum verschlechtern (z. B. beim Verlust von Humus und Rückgang der Regenwurmbestandsdichte). Aber auch außergewöhnliche Begebenheiten wie Trockenheit oder Starkregen, wie sie im Zuge des Klimawandels vermehrt zu erwarten sind, können innerhalb kurzer Zeit zu Verschlechterungen und Ertragseinbußen führen (z. B. Bodenverdichtung oder Bodenerosion). Vor diesem Hintergrund ist die Erhaltung eines funktional intakten und guten Bodenzustandes wichtig, um das Risiko von entsprechenden schädlichen Auswirkungen zu minimieren. Nicht zuletzt umfasst die Nachhaltigkeit der Bodenbewirtschaftung auch den Schutz der Umwelt vor negativen Veränderungen (z. B. Nährstoffauswaschung, Sedimentaustrag, Freisetzung von Treibhausgasen) und die Funktion als Lebensraum für eine große Vielfalt an Bodenorganismen.

Die Versuchsergebnisse zeigen deutlich, dass sich organische Düngung, auch mit Gärresten, grundsätzlich positiv auf alle untersuchten Bodeneigenschaften wie Humusgehalt, Aggregatstabilität, Infiltration und das Bodenleben auswirkt. In Tabelle 2 sind die wichtigsten Ergebnisse des 10-jährigen Versuchs aufgeführt. Der Probenumfang war nicht für alle Parameter gleich. Informationen zu Probenanzahl, Untersuchungs Jahren und Auswertungsmethoden, die für die Interpretation der Ergebnisse nötig sein können, sind dem ausführlichen Bericht zu entnehmen.

Tabelle 2: Kurzfassung der Ergebnisse der Untersuchungen zur Bodenphysik, Bodenhumushaushalt, Bodenmikrobiologie und Bodentieren (Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede)

Parameter	Einheit	miner. -Stroh	miner. +Stroh	Gärrest -Stroh	Gärrest +Stroh	max. Gärrest -Stroh	Rindergülle +Stroh	Bemerkung
Bodenphysik								
Lagerungsdichte (zu Versuchsende)	g/cm ³	1,44	1,43	1,42	1,42	1,41	1,42	Lagerungsdichte und Gesamtporenvolumen nicht beeinflusst; Boden in Aholting durch org. Düngung leicht gelockert
Gesamtporenvolumen (zu Versuchsende)	%	45	45	46	46	46	46	
pneumatische Leitfähigkeit (zu Versuchsende)	m/s	9,7	9,9	12,2	11,8	12,4	13,6	Durchlüftung des Bodens bei org. Düngung verbessert, Parameter mit Unsicherheiten
Aggregatstabilität (Mittelwert)	%	24,2 _a	23,8 _a	25,0 _a	25,5 _{ab}	27,1 _b	26,5 _b	durch org. Düngung leicht verbesserter Schutz gegenüber Verschlämmung; keine Verschlechterung durch Gärreste
Änderung Aggregatstabilität (Mittelwert der Differenzen)	%	5,4 _a	6,4 _{ab}	6,7 _{ab}	7,2 _{ab}	8,0 _b	7,4 _{ab}	Anteil stabiler Aggregate steigt entsprechend der Verfügbarkeit von org. Material stärker
mittlere Infiltrationsrate zu Versuchsende (nur 3 Varianten)	cm/min	0,64 _a			0,76 _{ab}		0,85 _b	Wasseraufnahmefähigkeit des Bodens durch org. Düngung (insbesondere Rindergülle) verbessert
Infiltrationsleistung (zu Versuchsende)	cm (nach 10 min)	12,1 _a			15,4 _{ab}		17,0 _b	
Humushaushalt und Bodenmikrobiologie								
Humusvorrat (zu Versuchsende)	t C _{org} /ha (10 cm Tiefe)	16,7 _a	17,0 _{ab}	17,2 _{ab}	17,7 _{ab}	17,8 _b	17,6 _{ab}	Humusvorrat durch org. Düngung im Vergleich mit mineralischer Düngung und Strohabfuhr in 9 Jahren um etwa 1 t C _{org} /ha angehoben
C _{org} -Gehalt (Trend)	mg*g ⁻¹ *a ⁻¹	-0,14 _a	-0,11 _{ab}	-0,08 _{bc}	-0,04 _{cd}	-0,01 _d	-0,05 _{cd}	insgesamt Humusrückgang; org. Düngung bremst Abbau; bezogen auf ausgebrachte Menge org. Substanz tragen Gärreste stärker zur Humusversorgung bei
pH-Wert (Trend)	pH/a	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	-0,1	insgesamt Rückgang; keine variantenspezifische Änderung des pH
C/N-Verhältnis (Trend)	CN/a	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	sehr geringe Änderungen des C/N-Verhältnisses
Katalasezahl (Mittelwert)	Vol. O ₂ ml	12,1	12,2	13,0	12,9	13,3	13,6	Boden bei Zufuhr an org. Substanz leicht stärker (mikrobiell) belebt; Schwankungen hoch; Effekt verstärkt sich mit Versuchslaufzeit; Parameter mit hoher Unsicherheit
mikrobielle Biomasse (Mittelwert)	mg/kg	350	380	390	410	390	410	
C _{mic} /C _{org} Verhältnis (zu Versuchsende)	-	3,7 _a	4,3 _{ab}	4,2 _{bc}	4,5 _c	4,1 _{bc}	4,2 _{bc}	Abfuhr von Stroh und fehlende organische Düngung führt zur Verarmung der Bodenmikrobiologie
Bodentiere								
Regenwurm-Siedlungsdichte (Mittelwert)	Ind./m ²	82 _a	98 _a	112 _b	118 _b	119 _b	150 _c	Regenwürmer durch org. Düngung gefördert; Variante mit Rindergülle mit höchsten Regenwurmbestand auf Grund von Menge und Energiegehalt der org. Substanz
Regenwurm-Biomasse (Mittelwert)	g/m ²	18 _a	21 _a	25 _b	28 _{bc}	27 _b	33 _c	
Regenwurm-Diversität Shannon (Mittelwert)	-	0,76 _{ab}	0,80 _a	0,80 _{abc}	0,85 _{bc}	0,82 _{abc}	0,85 _c	
Springschwanz-Siedlungsdichte (Mittelwert)	Ind./m ²	2.420 _a		2.680 _a	2.950 _{ab}	3.780 _b	3.360 _{ab}	tendenziell mehr Springschwänze und Milben in stärker mit org. Material versorgtem Boden; hohe Schwankungen zwischen den Jahren; hohe kleinräumige Variabilität
Milben-Siedlungsdichte (Mittelwert)	Ind./m ²	5.650 _{ab}		5.070 _a	5.710 _{ab}	6.100 _{ab}	6.130 _b	
Bodenmesofauna-Diversität Shannon (Mittelwert)	-	1,79 _a		1,86 _{ab}	1,86 _{ab}	1,91 _b	1,85 _{ab}	Vielfalt der Bodenmesofauna durch Gärrestdüngung nicht verringert; keine Artbestimmung

Abbildung 3 zeigt die skalierten Ergebnisse für die untersuchten Bodeneigenschaften, dies ermöglicht einen relativen Vergleich der Varianten untereinander hinsichtlich ihrer Gesamtwirkung auf die Bodenfruchtbarkeit. Die rein mineralische Düngung mit Abfuhr des Weizenstrohs („miner. -Stroh“) ist als Kreis im Inneren zu erkennen, da sie bei allen Parametern außer der Aggregatstabilität den geringsten Wert aufweist. Die Varianten „max. Gärrest -Stroh“ und „Rindergülle +Stroh“, welche die größte Menge an organischem Material auf die Fläche zurückführen bzw. dort belassen, decken die größte Fläche im Diagramm ab. Auffallend ist, dass die Rindergülldüngung („Rindergülle +Stroh“) bei den Parametern hinsichtlich des Bodenlebens (Regenwürmer, Bodenmikrobiologie) besser abschneidet, wohingegen die Variante „max. Gärrest -Stroh“ Vorteile hinsichtlich Bodenstruktur (GPV, Aggregatstabilität) und Humus (C_{org}) besitzt. Abbildung 4 zeigt dies exemplarisch für die Änderung der Kohlenstoffgehalte über die Versuchslaufzeit und die Regenwurmbiomasse. Das höhere Angebot an organischem Material bei der überproportionalen Gärrestdüngung („max. Gärrest -Stroh“) können die Regenwürmer nicht in Biomasse umsetzen. Die höheren Werte für die Infiltration und die pneumatische Leitfähigkeit bei Rindergülldüngung (auch gegenüber „max. Gärrest -Stroh“) können ein Hinweis darauf sein, dass diese Parameter durch die bodenbiologische Aktivität, insbesondere die Aktivität von Regenwürmern, mitgeprägt werden.

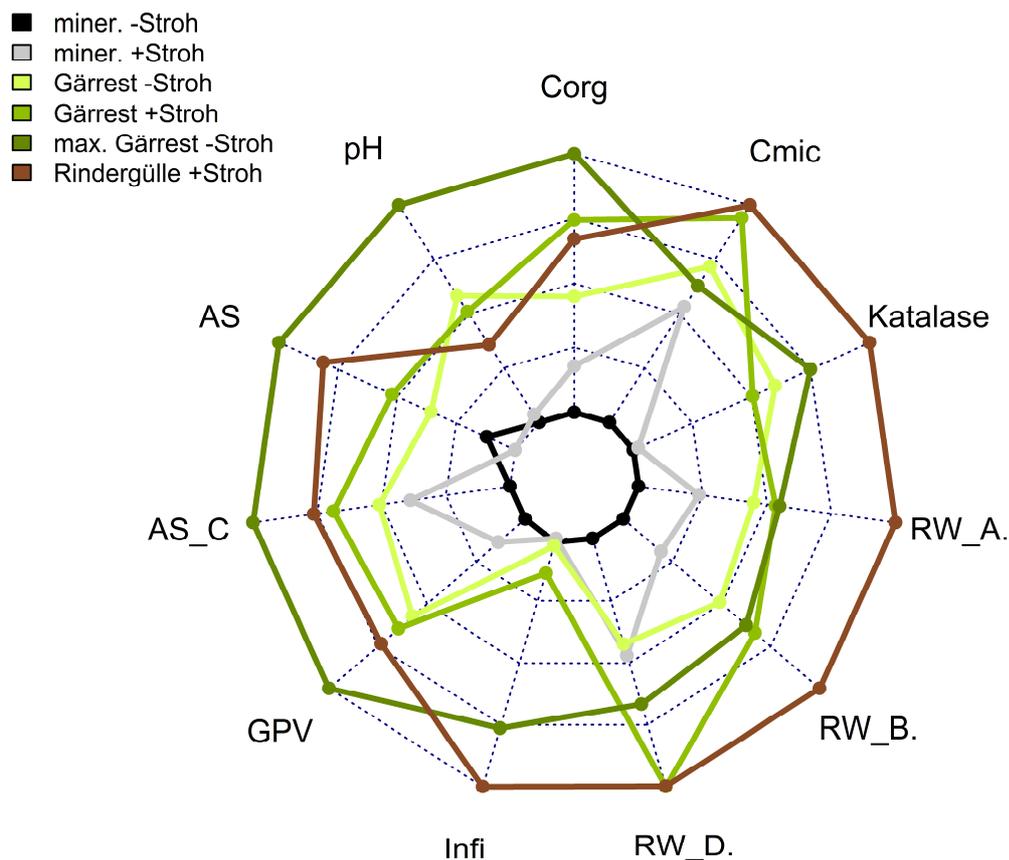


Abbildung 3: Bodeneigenschaften für die Nutzungspfade im Mittel der Standorte als Netzdiagramm (Minimum, Maximum); Cmic = mikrobielle Biomasse, Katalase = Katalasezahl, RW_A. = Siedlungsdichte der Regenwürmer, RW_B. = Biomasse der Regenwürmer, RW_D. = Diversität der Regenwürmer, Infi = kumulative Infiltration nach 10 Minuten (nur Straubing und Aholting), GPV = Gesamtporenvolumen, AS_C = Änderung der Aggregatstabilität nach Düngung, AS = Aggregatstabilität, pH = Trend des pH-Wertes, Corg = Trend der C_{org} -Gehalte

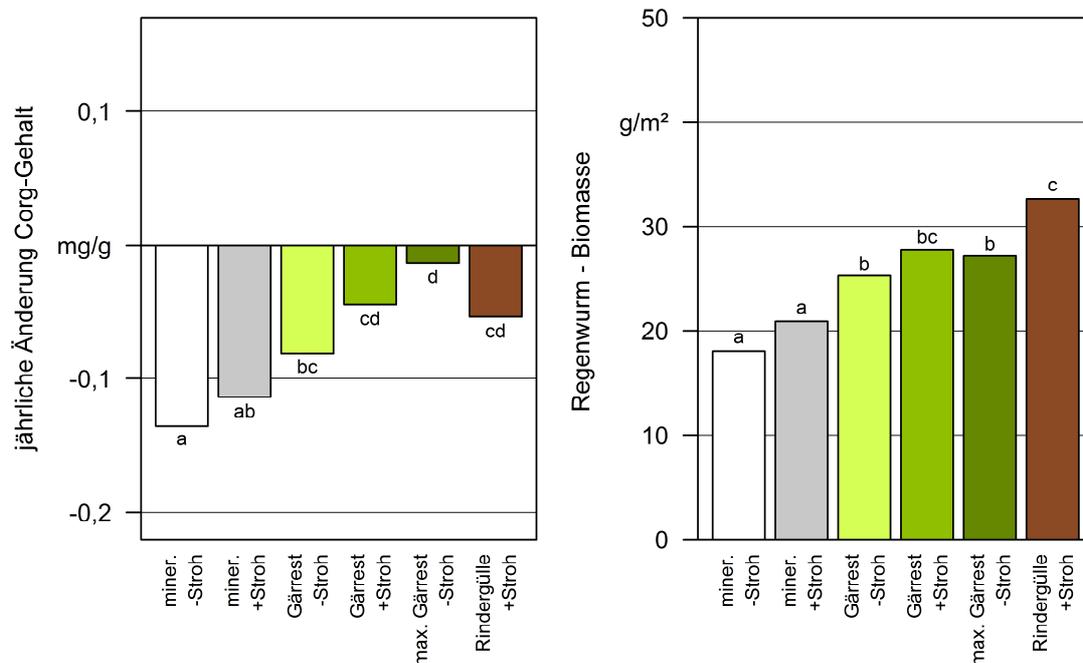


Abbildung 4: Jährliche Änderung der Humusgehalte: links als zeitlicher Trend von fünf Aufnahmen im Mittel der vier Standorte und Regenwurmbiomasse, rechts im Mittel der Standorte und Untersuchungsjahre (2012, 2014, 2016 und 2018) (Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede)

Dennoch kann auf Grund der über die zehnjährige Versuchslaufzeit rückläufigen Humusgehalte eigentlich bei keinem der Nutzungspfade von einer nachhaltigen Bewirtschaftung gesprochen werden. Dem Humus im Boden kommt eine Schlüsselfunktion bei der Steuerung zentraler Bodenfunktionen zu, wie die Reinigung und Speicherung von Wasser, die Speicherung und Nachlieferung von Nährstoffen, als Lebensraum und Nahrungsquelle für Bodenorganismen sowie als bedeutender Kohlenstoffspeicher. Bei weiterem Humusrückgang ist davon auszugehen, dass auch andere Bodeneigenschaften langfristig negativ beeinflusst werden, was aber längere Betrachtungszeiträume erfordert und vermutlich stark vom Ausgangszustand und den Standortfaktoren bedingt ist. Die Tatsache, dass eine Verschlechterung von Bodeneigenschaften nur sehr langfristig feststellbar ist, sollte nicht über die Dringlichkeit der zu ergreifenden Maßnahmen hinwegtäuschen, denn der nötige Aufbau von Humus im Boden und der Bodenstruktur wird vermutlich ebenso langsam von statten gehen.

Ein Mangel an Nachhaltigkeit zeigt sich auch in der Biomasse der Regenwürmer, die ein Indikator für ihre funktionalen Leistungen im Boden ist und im bayernweiten Vergleich selbst für den Nutzungspfad mit Rindergülldüngung noch unterdurchschnittlich war. Verantwortlich dafür ist wahrscheinlich die enge Fruchtfolgegestaltung rein aus Mais und Weizen ohne Zwischenfrüchte und die jährlich intensive Bodenbearbeitung mit dem Pflug.

Aus den vorliegenden Ergebnissen tatsächlich einen Systemvergleich zwischen der Biogaserzeugung (z. B. „Gärrest +Stroh“) und klassischer Viehhaltung mit Güllewirtschaft („Rindergülle +Stroh“) vorzunehmen, ist auf Grund der nicht kontrollierten Betriebsbedingungen (Substratgemisch in der Biogasanlage, Abhängigkeit der Ergebnisse von den betriebsspezifischen Eigenschaften der organischen Dünger usw.), der stark vereinfachten Fruchtfolge und der insgesamt niedrigen Stichprobenzahl gewagt. Auch werden der Weg der organischen Dünger in die Biogasanlagen (Gärreste aus Kofermentationsanlagen) und die damit möglicherweise verbundenen Verluste und Änderungen in der

Zusammensetzung nicht abgebildet. Die Verlagerung von Zersetzungsprozessen vom Feld in die Biogasanlage scheint jedoch durch den verringerten Gehalt an leicht abbaubaren Kohlenstoffverbindungen zu einer leicht verringerten biologischen Aktivität im Boden zu führen, während der Humushaushalt und die an den Kohlenstoffgehalt eng gebundene Faktoren kaum beeinflusst werden. Dies ist besonders für die als Biogassubstrate genutzten Abfall- und Koppelprodukten (Gülle, Mist, Stroh) zu beachten. Die Abwägung zwischen den bislang nicht monetarisierten Ökosystemleistungen, wie beispielsweise der Verbesserung der Infiltration oder dem Schutz vor Erosion, und dem Nutzen der Biogaserzeugung aus Reststoffen, in Form von CO₂-Vermeidung, reduzierte Emissionen aus dem Güllelager oder auch finanziellen Anreizen, bleibt aber schwierig.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass kein im Gärrestversuch Bayern untersuchter Nutzungspfad nachhaltig ist und zur langfristigen Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Ertragsstabilität ausreicht. Hervorzuheben ist, dass allerdings die organisch gedüngten Varianten deutlich besser abschneiden als die ausschließlich mineralisch gedüngten. Da die Nachhaltigkeit der Bewirtschaftungsweise nicht nur von der Düngung beeinflusst wird, sondern auch von zahlreichen weiteren Faktoren wie der Fruchtfolgegestaltung und der Bodenbearbeitung abhängt, sollte stets das betriebsspezifische Gesamtsystem mitbetrachtet und angepasst werden, um eine langfristig nachhaltig pflanzliche Produktion zu erreichen.

5 Gesamtbewertung und Praxisempfehlung

Die untersuchten Versuchsvarianten repräsentieren eine unterschiedliche Abfuhr, Nutzung und Rückführung der oberirdischen Biomasse. Während die Variante mit überproportionaler Gärrest-Düngung nicht einer bedarfsgerechten Düngung nach guter fachlicher Praxis entspricht und vorwiegend aufgenommen wurde um die Auswirkung von sehr hohen Aufwandsmengen zu untersuchen, entsprechen die übrigen Varianten Bedingungen wie sie auch in Praxisbetrieben vorzufinden sind. In diesem Versuchsvorhaben wurden erste Entwicklungen der langfristigen Auswirkungen der Nutzungspfade Biogas und BtL auf verschiedene Bodenparameter und das Pflanzenwachstum aufgezeigt.

Der Gärrestversuch Bayern bestätigt, dass eine regelmäßige organische Düngung mit praxisüblichen Ausbringmengen von Gärresten und Rindergülle im Vergleich mit rein mineralischer Düngung die Humusversorgung des Bodens sowie die Regenwurmaktivität, einschließlich der damit verbundenen positiven Effekte auf das Bodengefüge und das Porensystem verbessert. Für Betriebe ohne hofeigene Wirtschaftsdünger lohnt es sich, Gärreste in den Betrieb aufzunehmen. Die Düngung mit Gärresten im Rahmen der guten fachlichen Praxis lässt auch keine Verschlechterung der Bodenstruktur erkennen, da auch die bodenphysikalischen Untersuchungen zeigen konnten, dass die organische Düngung gegenüber rein mineralischer Düngung nach 10 Jahren einen leicht positiven Effekt auf die Verschlammungsneigung und Erosionsgefährdung der Böden hat.

Die Rückführung von organischen Düngern reicht allerdings in intensiven Fruchtfolgen, wie im Gärrestversuch Bayern, nicht aus, um einen ausgeglichenen Humushaushalt zu erreichen. Es ist zudem bekannt, dass hohe und stabile Erträge eine grundlegende Voraussetzung für ausgeglichene Humusbilanzen sind und so auch entscheidend zur Humusversorgung aus der Gärrestrückführung beitragen. Demgegenüber stehen im Energiepflanzenanbau mit Mais verschiedene Maßnahmen zur Verfügung, den funktionalen Bodenzustand gezielt zu erhalten oder sogar zu verbessern. Der Anbau von Zwischenfrüchten, Un-

tersaaten, eine angepasste abwechslungsreiche Fruchtfolge mit humusmehrenden Kulturen oder mehr Bodenruhe, z. B. durch Mulchsaatverfahren zu Reihenkulturen, sollten gezielt genutzt werden, um einen stabilen Humusgehalt im Boden zu erreichen und zur Verbesserung von Bodenstruktur und Bodenleben beizutragen. Sehr förderlich für den Boden sind intensiv- und tiefwurzelnde Kulturen, insbesondere wenn sie mehrjährig angebaut werden. Hierzu zählen beispielsweise Luzerne und die Dauerkultur Durchwachsene Silphie.

Die Vielfalt an organischen Düngern ist groß und auch besonders die chemische Zusammensetzung von Gärresten schwankt stark in Abhängigkeit der Ausgangssubstrate, der Prozessführung und der späteren Aufbereitung. Die Schlussfolgerungen hier können deshalb nur für typische flüssige Gärreste aus der Vergärung von nachwachsenden Rohstoffen und Rindergülle/-mist gelten. Gärreste aus anderen Ausgangsstoffen, wie beispielsweise Hühnertrockenkot, Bioabfällen, Schlachtabfällen und Ähnlichem, können mit dem hier vorgestellten Versuch nicht bewertet werden. Erhöhte Gehalte an Schwermetallen wie Kupfer und Zink, oder andere Schadstoffe können sich negativ auf das Bodenleben auswirken. Gleichermäßen lässt sich dadurch die Vorgabe begründen, dass bei Gärresten laufende Inhaltstoffuntersuchungen durchzuführen sind, um für die Düngebedarfsermittlung realistische Werte zur Verfügung zu haben. Es ist darauf zu achten, dass die Probenahme aus ausreichend homogenisiertem Behälterinhalt erfolgt. Ebenso ist auch vor der Entnahme für die Ausbringung eine ausreichende Homogenisierung notwendig.

Gärreste sollten bevorzugt auf die Ursprungsflächen zurückgeführt werden, doch insbesondere schlecht mit Humus versorgte Böden können durch organische Düngung effizient aufgewertet werden. Wichtig sind aber grundsätzlich eine bedarfsgerechte Düngung und eine ausgeglichene Nährstoffbilanz auf Schlagebene. So sind unverträglich hohe Aufwandmengen in der Regel ausgeschlossen. Bei hohen Einzelgaben von Gärresten sind auch negative Auswirkungen auf die Regenwurmfauna möglich. Eine gleichmäßige Verteilung auf den Flächen des Betriebes und bedarfsgerechte Gaben je nach Kultur und Wachstumsphase entsprechend den Vorgaben der Düngeverordnung sind demnach umzusetzen.

Flüssige organische Dünger wie Gärreste und Gülle beinhalten neben organischen Stickstoff auch unterschiedlich hohe Mengen an direkt pflanzenverfügbarem Ammoniumstickstoff. Dieser kann zu gasförmigen Ammoniakverlusten führen, so dass eine möglichst emissionsarme Ausbringung über ein direktes Einbringen der Dünger in den Boden oder zumindest eine bandförmige und bodennahe Ablage anzustreben ist. Wird dies berücksichtigt, kann durch die Substitution von Mineraldünger durch Gärreste ein ähnliches Ertragsniveau wie bei rein mineralischer Düngung erzielt werden. In den vorliegenden Versuchen wurde dabei die N-Düngewirkung von Gärresten über ein Mineraldüngeräquivalent von 80 % des Ammoniumstickstoffgehalts gut abgeschätzt.

Die Entscheidung, das Stroh abzufahren oder dem Boden als Dünger zuzuführen, sollte vor dem Hintergrund der Nachhaltigkeit des gesamten Bewirtschaftungssystems und dem Versorgungsgrad des Bodens mit organischem Kohlenstoff durchgeführt werden. Die langfristige bodenverbessernde Wirkung des eingepflügten Strohs scheint nach den hier erarbeiteten Erkenntnissen im Vergleich zur organischen Düngung mit Rindergülle und Gärresten eher von nachrangiger Bedeutung zu sein. Daher ist Stroh zur stofflichen oder energetischen Nutzung als Koppelprodukt der Nahrungs- oder Futtermittelproduktion eine ressourcenschonende Möglichkeit. Trotzdem sollte generell der Verlust des Strohs

als Ausgangsstoff für Humus, Nahrungsquelle für das Bodenleben und Strukturgeber im Boden durch andere Maßnahmen (s.o.) ausgeglichen werden.

Abschließend bleibt festzuhalten, dass die im Versuch umgesetzte Fruchtfolge aus Silomais und Winterweizen zu einseitig und zudem stark humuszehrend ist und somit insbesondere in den Varianten mit Strohabfuhr oder ohne organische Düngung nicht nachhaltig ist. Die Abnahme der Humusgehalte im Mittel über alle Standorte in allen Varianten ist bedenklich. Zusätzlich ist die Variante mit überproportionaler Gärrestdüngung aus Sicht der Nährstoffverwertung (erhöhte Gefahr für N-Verluste) und auch der praktischen Durchführbarkeit kritisch zu bewerten und entspricht nicht der guten fachlichen Praxis. Als besonders problematisch ist ein Humusabbau auch aus Sicht des gegenwärtigen Klimawandels einzustufen, da die Verschlechterung von Bodeneigenschaften zu einer Verstärkung der durch Wetterextreme hervorgerufenen Probleme beitragen kann. Gleichzeitig wird der Humusabbau durch die steigenden Temperaturen verstärkt, so dass der eigentlich erforderliche Humusaufbau zusätzlich erschwert wird.

Um diese Herausforderungen zu meistern und um eine langfristig nachhaltige Bewirtschaftung zu erhalten, wird es zukünftig umso wichtiger sein, auf eine zunehmend bodenschonende Bewirtschaftung zu achten, z. B. durch eine abwechslungsreiche und ausgeglichene Fruchtfolge mit humusmehrenden Kulturen, mit dem Anbau von Zwischenfrüchten und der Umsetzung von Mulchsaatverfahren.

6 Zusammenfassung

Zur energetischen Nutzung pflanzlicher Biomasse sind neben der bereits etablierten Biogasproduktion verschiedene Biomass to Liquid (BtL)-Verfahren in der Entwicklung. Während bei den BtL-Verfahren die oberirdische Biomasse zur energetischen Verwertung dauerhaft entzogen wird, ist bei einer Nutzung als Biogassubstrat eine Rückführung humusbildender Verbindungen über die Gärreste möglich. Zur Überprüfung der langfristigen Nachhaltigkeit dieser Nutzungspfade wurden im Zeitraum von 2009 bis 2018 an vier bayerischen Standorten Feldversuche mit Silomais und Winterweizen im jährlichen Wechsel durchgeführt. In den Versuchsvarianten wurde die Zufuhr an organischer Substanz über den Verbleib des Getreidestrohs sowie die Rückführung von Gärresten bzw. Rindergülle variiert. Eine Variante mit ausschließlich mineralischer Düngung und Strohabfuhr repräsentierte eine BtL-Nutzung. Die Gärrest- und Rindergülldüngung erfolgte proportional zur Silomaisabfuhr. Darüber hinaus war auch eine Variante mit überproportionaler Gärrestdüngung (120 % der Biomasseabfuhr von Silomais und Winterweizen) gegeben. Über ein einheitliches pflanzenverfügbares N-Angebot in allen Varianten wurde ein identisches Ertragsniveau angestrebt. Die Varianten wurden hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die Aggregatstabilität, die Porenverteilung und Lagerungsdichte, die Infiltrationsleistung, den organischen Kohlenstoffgehalt, den pH-Wert, die mikrobiologische Aktivität sowie die Siedlungsdichte und Diversität von Regenwürmern, Springschwänzen und Milben untersucht.

In den organisch gedüngten Varianten wurden sowohl bei Winterweizen als auch Silomais über die gesamte Versuchsdauer stabile Erträge und N-Entzüge auf dem Niveau der mineralisch gedüngten Varianten erreicht. Signifikante Ertragsunterschiede zwischen den Varianten waren nicht gegeben. Die N-Wirkung der Gärreste wurde über das unterstellte Mineräldüngeräquivalent von ca. 80 % des Ammoniumgehalts gut abgeschätzt.

Die Untersuchungen zum Bodenumushaushalt, der Bodenphysik und dem Bodenleben zeigten, dass sich die organische Düngung positiv auf die Aggregatstabilität, den Humusgehalt und die Regenwurmdichte auswirkt. Bei der Düngung mit Rindergülle wurden zwar größere Mengen organische Substanz ausgebracht, die Änderung des Gehaltes an organischem Kohlenstoff im Boden war aber der bei vergleichbarer Gärrestdüngung sehr ähnlich. Insgesamt wurde jedoch an drei von vier Versuchsstandorten ein deutlicher Rückgang der Humusgehalte im Boden festgestellt. Die überproportionale Düngung mit Gärresten führte zu den geringsten Humusverlusten. Regenwürmer profitierten stärker von der Düngung mit unvergorener Rindergülle, was auf deren leichter abbaubare Kohlenstoffverbindungen zurückzuführen ist. Auch andere bodenbiologische Kennwerte und davon abhängige Leistungen, wie die mikrobielle Biomasse und die Infiltration zeigten die höchsten Werte bei Rindergülledüngung. Die komplette Abfuhr der oberirdischen Biomasse ohne Rückführung organischen Materials führte bei nahezu allen Parametern zu den am ungünstigsten beurteilten Bodenbedingungen. Insgesamt zeigte sich, dass eine nachhaltige Bodenbewirtschaftung für keinen Nutzungspfad in der hier untersuchten Form gegeben war und ergänzende Maßnahmen zur Förderung von Humusaufbau, Bodenstruktur und Bodenleben nötig sind.