



UNIVERSITÄT
HOHENHEIM



EIP Projekt Bravö: Düngeversuch

Autorinnen:

Sabrina Francksen

Sadia Sana

Dr. Sabine Zikeli*

Universität Hohenheim, Zentrum Ökologischer Landbau, Stuttgart

* Kontakt: sabine.zikeli@uni-hohenheim.de

1. Einleitung

Im Zuge der allgemeinen Intensivierung und Spezialisierung im Ökologischen Landbau wächst der Anteil viehlos oder vieharm wirtschaftenden Betriebe. In ökologisch wirtschaftenden Gemischtbetrieben, vor allem solchen mit Wiederkäuerhaltung, steht der innerbetriebliche Nährstoffkreislauf im Zentrum aller Maßnahmen zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit: Es werden standardmäßig Gemenge aus Futterleguminosen (Kleearten und Luzerne) und Gräsern zur Futterproduktion angebaut und Festmist und Gülle werden als Düngemittel auf Acker- und Grünlandflächen rückgeführt. Diese Düngergaben wirkt sich positiv auf Humus- und Nährstoffbilanzen aus. Dabei ist die Höhe der Humusreproduktion sowie die Nährstoffrückführung von unterschiedlichen Faktoren wie z.B. der Trockenmasse pro ausgebrachte Einheit und der Herkunft und Behandlung des Ausgangsmaterials (Tierart, Lagerung usw.) abhängig. Die Humusreproduktion von Futterbaugemengen ist, vor allem durch die hohe unterirdische Biomasse, so hoch wie bei keiner anderen Kultur (Stumm 2015). Außerdem ist die symbiontische N-Fixierung durch Leguminosen die wichtigste N-Quelle im Ökolandbau (Stein-Bachinger et al. 2004) und übersteigt die Fixierungsleistung von grobkörnigen Leguminosen deutlich (Kolbe et al. 2006; Castell et al. 2016). Weitere Leistungen der Futterbaugemenge bestehen aus der beikrautunterdrückenden Wirkung vor allem bei über- und mehrjährigem Anbau (Böhm 2014), der Mobilisierung und Freisetzung von Phosphor (Gerke und Meyer 1995) sowie der guten Eignung als Nahrungspflanzen für Bestäuberinsekten (Woodcock et al. 2014; Rundlöf et al. 2014). Bei Betrieben mit Tierhaltung, insbesondere bei der Haltung von Monogastriern, erfolgen meist auch größere Nährstoffinputs über Zukauffutter, die dem Betrieb weitere Nährstoffe zuführen.

Im Gegensatz zum viehhaltenden Betrieb existiert auf viehlosen und vieharmen Betrieben jedoch keine oder nur eine sehr begrenzte direkte Nutzung des Kleegrasaufwuchses, da dieser nicht direkt als Futter verwendet werden kann. Den Kosten für den Anbau von feinsamigen Leguminosen steht folglich keine direkte Leistung in monetärer Form gegenüber.

Eine alternative Nutzungsmöglichkeit für viehlose oder vieharme Betriebe ist der Tausch des Kleegrases gegen Mist im Rahmen einer Futter-Mist-Kooperation mit einem viehhaltenden Betrieb oder der Zukauf von Mist. In typischen Ackerbauregionen befinden sich jedoch wenige viehhaltende Betriebe. Ökologisch wirtschaftende viehhaltende Betriebe nutzen ihren Mist zudem in der Regel selbst. Wenn möglich und soweit im Rahmen der rechtlichen Regelungen und der Standards der Öko-Anbauverbände zulässig, wird in der Praxis häufig auf Mist von konventionellen Betrieben, die sich in der Nähe befinden, zurückgegriffen. Die Bodenfruchtbarkeit über Nährstoffe zu sichern, welche aus

einem Anbausystem stammen, das den ökologischen Prinzipien widerspricht, wird jedoch vor allem von den Anbauverbänden zunehmend kritisch gesehen.

Daher wird der Anbau von Futterleguminosengemengen auf viehlosen oder vieharmen Betrieben meist reduziert (z.B. einjähriger statt über- oder mehrjährigem Anbau) oder ganz eingestellt (Loges und Taube 2007).

Durch diese Veränderung der Fruchtfolgegestaltung (weniger mehrjährige Kleegräser, mehr Marktfrüchte und Körnerleguminosen) sowie der fehlenden Verfügbarkeit von tierischen Düngemitteln wird ein Rückgang der Bodenfruchtbarkeit auf viehlosen und vieharmen Betrieben vermutet. Vor allem eine ausreichende Humus- und Stickstoffzufuhr ist ohne Kleegrasanbau in einer ökologischen Ackerbaufruchtfolge kaum zu erreichen. Im Rahmen eines Dauerversuchs zum Vergleich verschiedener ökologischer Anbausysteme auf dem Versuchsbetrieb Gladbacherhof der Universität Gießen wurde für die viehlose Variante ohne Kleegrasbrache ein Rückgang des ursprünglichen Kohlenstoffgehalts im Boden um 8% und eine um 18% geringere Ausnutzung des im System vorhandenen Stickstoffs (N) gegenüber der Variante mit Viehhaltung dokumentiert (Schulz 2012).

Zwar ermöglicht die EU-Ökoverordnung (EU 2008) sowie die Richtlinien der deutschen Öko-Verbände den Zukauf von externen Grunddüngern wie Kompost (z.B. aus Bioabfall aus der „Braunen Tonne“ oder Grünschnitt), allerdings stellt dies für Ackerbaubetriebe in der Praxis meist keine ökonomisch rentable Alternative dar. Allein durch Zwischenfrüchte oder grobkörnige Leguminosen kann der fehlende Biomasse-Input zur Humusreproduktion jedoch kaum sichergestellt werden (Schulz 2012). Eine weitere Herausforderung der viehlosen Wirtschaftsweise besteht in einem erschwerten Beikrautmanagement (Schmidt 2004). Die beikrautunterdrückende Wirkung des Kleegrases kann nur bei ausreichender Standzeit gewährleistet werden und basiert auf mehreren Faktoren, die nur im Rahmen einer Kulturdauer von mindestens zwei Jahren zum Tragen kommen: Der dichte, konkurrenzstarke Bewuchs reduziert die Keimung von Unkräutern, die wiederholte Mahd des Aufwuchses schwächt vor allem schnittsensible Unkräuter (z.B. die Ackerkratzdistel *Cirsium arvense*) und durch die intensive Durchwurzelung des Bodens werden mehrjährige Wurzelunkräuter bekämpft (Schulz 2012; Böhm et al. 2014).

Wird Kleegras auf viehlosen bzw. vieharmen Betrieben dennoch angebaut, verändert sich in der Regel das Management der Kultur: Der Aufwuchs wird, aufgrund der fehlenden direkten Verwendung häufig nicht mehr abgefahren sondern gemulcht (Loges und Taube 2007). Die Mineralisierung des Mulchs führt zu einem erhöhten Bodenvorrat an mineralischem N (N_{min}) und folglich zu einem höheren Verlustrisiko des sowohl für die Ertragsbildung und damit für die Wirtschaftlichkeit des Betriebes als

auch für die Umwelt relevanten N (Stinner 2011). Im Vergleich von gemulchtem und schnittgenutztem Kleegrasanbau werden bei Ersterem höhere NH_4^+ sowie N_2O -Emissionen (Laber 2007; Helmert et al. 2003; Stumm und Köpke 2017) und eine höhere Nitratauswaschung (Dreyman et al. 2005) festgestellt. Dies trifft jedoch nicht auf alle Standorte und Managementverfahren zu. So finden Brozyna et al. (2013) in einem On-Farm Versuch zu unterschiedlichen Anbaumethoden von Kleegras und Zwischenfrüchten und den jeweiligen Auswirkungen auf die N-Dynamik keine signifikanten Lachgasemissionen beim Anbau mit Mulchnutzung im Vergleich zum Anbau mit Abfuhr des Aufwuchses. Ursache hierfür sind vor allem Unterschiede in der Denitrifikation, welche die Entstehung von NH_4^+ sowie N_2O beeinflusst. Bei Mulchnutzung werden während des Sommers (Möller und Stinner 2009) und während feuchter Witterungsperioden (Larsson et al. 1998) höhere gasförmige Verluste festgestellt. Stumm und Köpke (2016) fanden vor allem nach Starkniederschlägen hohe N_2O -Emissionen. Als generelles Risiko für eine erhöhte Denitrifikation und damit einhergehenden höheren N_2O -Emissionen wird die gleichzeitige Verfügbarkeit von leicht umsetzbarem Kohlenstoff und Stickstoff gesehen (Hansen et al. 2019), wie sie häufig bei gemulchten Kleegrasschnittgut aufgrund des engen C/N-Verhältnis vorliegt.

Der erhöhte N_{min} -Gehalt im Boden führt insgesamt zu einer geringeren N-Fixierleistung der Leguminosen (Schmidt 1997; Heuwinkel und Loges 2004). Die für die Fixierung verantwortlichen Knöllchenbakterien greifen bei entsprechendem Angebot eher auf mineralisch im Boden vorliegenden N zurück statt N energieaufwendig aus der Luft zu fixieren. Im Gemenge mit Gräsern führt eine Erhöhung des N-Angebots außerdem zu einer Bestandsveränderung hin zu höheren Grasanteilen (Kolbe et al. 2006). Mulchen kann jedoch auch Vorteile haben, wie beispielsweise eine gesteigerte Beikrautunterdrückung oder eine geringere Verdunstung aufgrund der Mulchauflage (Schulz 2012).

Die Ausbringung von Mist, Gülle und Jauche, wie auf für Gemischtbetriebe im Ökolandbau typisch, bringt mehrere Vorteile mit sich: Der symbiotisch fixierte Stickstoff sowie andere, bereits im System vorhandene Nährstoffe werden vom Tier aufgenommen und zum Teil wieder ausgeschieden und verbleiben somit auf dem Betrieb. Da diese organischen Dünger lagerfähig sind und dadurch bedarfsgerecht ausgebracht werden können, ist die zeitlich angepasste Düngung nach Bedarf der Kulturen gewährleistet, soweit dies bei organischen Düngern, die Nährstoffe zeitversetzt bereitstellen, möglich ist. Auf solche mobilen Dünger aus der Tierhaltung kann jedoch im viehlosen und vieharmen Betrieb nicht zurückgegriffen werden.

Eine weitere Herausforderung bezüglich der Bodenfruchtbarkeit im viehlosen Betrieb betrifft die Versorgung mit den Nährstoffen Phosphor (P) und Kalium (K). Zur P-Versorgung wurde im Rahmen dieses Projekts eine Literaturstudie erstellt, in welcher der Status Quo, die Lösungsansätze und die

Herausforderungen der P-Versorgung im Ökologischen Landbau diskutiert werden (vgl. Kapitel 2.1 des Abschlussbericht 3 dieses Projekts).

Aufgrund der oben aufgeführten Bedeutung des Kleegrasanbau für Bodenfruchtbarkeit und Beikrautmanagement, ist die Frage nach einer alternativen Verwertung des Aufwuchses im viehlosen bzw. vieharmen Betrieb von zentraler Bedeutung. Um die Nachteile der Mulchnutzung zu umgehen kann der Aufwuchs abgefahren und in verarbeiteter Form als Düngemittel genutzt werden. Hierbei stehen folgende Optionen zur Verfügung: a) Nutzung des Aufwuchses in einer Futter-Mist-Kooperation mit einem viehhaltenden Nachbarbetrieb und Rückführung des tierischen Düngers, b) Vergärung des Aufwuchses in einer Biogasanlage und Rückführung der Gärreste und c) Abfuhr des Aufwuchses und innerbetriebliche Nutzung als Transfermulch (mobiler Dünger) in Form von Cut-and-Carry (Ausbringung des Frischmaterials direkt nach der Mahd), als Silage oder Heu.

Letzteres kann vor allem für jene viehlosen Betriebe eine rentable Möglichkeit sein, für die weder ein viehhaltender Betrieb noch eine Biogasanlage in geringer Entfernung verfügbar ist. Die benötigten technischen Voraussetzungen für die Herstellung, Ausbringung und Einarbeitung von Transfermulch sind auf einem durchschnittlichen Ackerbaubetrieb standardmäßig vorhanden, sodass keine oder kaum Investitionen getätigt werden müssen. Lediglich für die Silagebereitung muss ggfs. auf externe Technik (z.B. Maschinenring, Lohnunternehmen) zurückgegriffen werden. Die Arbeitsschritte bei der Herstellung von Transfermulch sind identisch wie bei Nutzung des Aufwuchses als Futter, sodass auch hier geringe Transaktionskosten für die Aneignung neuen Wissens entstehen. Die Ausbringung und Einarbeitung werden ähnlich wie bei anderen organischen Düngern durchgeführt, jedoch könnte je nach Kultur, Investitionen in passende Technik nötig werden.

Neuere Studien zur Düngewirkung des Kleegrasaufwuchses als Transfermulch weisen auf das Potenzial der alternativen Düngemaßnahme für viehlose Betriebe hin. Diese Untersuchungen befassen sich vor allem mit der Auswirkung der unterschiedlich aufbereiteten, kleegrasbasierten Düngemitteln (frisch, siliert, getrocknet / ggfs. pelletiert und/oder kompostiert) auf verschiedene ökonomische, pflanzenbauliche und ökologische Faktoren.

In einem Vorversuch wurden vom Projektnehmer bereits der Düngewert und die Stickstofftransfereffizienz von unterschiedlichen, auf Klee gras basierenden Düngemitteln (frisch, siliert, kompostiert und nach Vergärung in einer Biogasanlage) untersucht. Dabei wurden eine signifikante Düngewirkung sowie signifikante Unterschiede zwischen den Aufbereitungsarten des Klee gras aufwuchses beobachtet (Benke et al. 2017). Um einen Vergleich zwischen unterschiedlichen Düngemitteln mit unterschiedlicher Behandlung (Lagerung, Silierung, Ausbringungstechnik) und den

dadurch bedingten Nährstoffverlusten (z.B. NH_3 -Verluste bei Gülleausbringung, N-Verluste während der Kompostierung) zu ermöglichen, wurde die sogenannte Nährstofftransfereffizienz berechnet. Diese bezieht sich auf die Menge an Nährstoffen aus dem Ausgangssubstrat die tatsächlich für die Aufnahme in die Pflanze bereit steht. Von den auf Klee gras basierenden Düngemitteln bewirkte der Klee gras aufwuchs in Form von frischem und siliertem Aufwuchs sowie Biogasgärrest auf Basis von Klee gras, Schweingülle, Schweinemist und Mais, hohe bis mittlere langfristige Stickstofftransfereffizienzen von 70%, 60% und 56% sowie eine signifikante Ertragssteigerung gegenüber der ungedüngten Kontrolle (Benke et al. 2017). Die Stickstofftransfereffizienz war höher als bei den Varianten mit den im ökologischen Landbau sehr häufig genutzten Düngemitteln Kompost (6%), Rindermist (22%) und Rindergülle (48%) und nur wenig geringer als bei der Variante mit Mineraldünger (85%). Vor allem die geringen Verluste bei der Herstellung, Aufbereitung und Ausbringung des Klee gras aufwuchses sind vorteilhaft. Eine hohe kurzfristige N-Transfereffizienz korrelierte ebenfalls negativ mit der Höhe der N-Verluste, wurde jedoch auch in hohem Maße von der chemischen Form des vorhandenen Stickstoffs (v.a. vom NH_4^+ zu N_t Verhältnis) beeinflusst. Im Versuch führte der relativ NH_4^+ -reiche Gärrest zu einem höheren Ertrag im ersten Schnitt als frisches oder siliertes Klee gras, das beides geringere NH_4^+ -Gehalte aufwies. Im dritten Schnitt hingegen zeigten frisches und siliertes Klee gras höhere Erträge, sodass von einer langsameren Mineralisierung von frischem und siliertem Klee gras ausgegangen werden kann. Auch hinsichtlich der P-Düngewirkung ergaben sich signifikante Unterschiede, bei einer Düngung mit frischem Klee gras aufwuchs wurde sogar eine P-Nutzungseffizienz von über 100% festgestellt. Es wurde demnach zusätzlich zum gedüngten P als Folge der Düngung weiteres P aus dem Bodenvorrat mobilisiert.

Die Erkenntnisse des Gefäßversuchs von Benke et al. (2017) deuten auf eine hohe Eignung von klee gras basierten Düngemitteln vor allem in frischer und siliert Form, die bereits in Feldversuchen bestätigt werden konnten.

Um die Übertragbarkeit der Ergebnisse des Gefäßversuches von Benke et al. 2017 auf das Freiland zu testen, wurde im Rahmen des EIP-Projekts BRAVÖ „Mit betrieblichen Innovationen Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit auf vieharmen und viehlosen Betrieben steigern“ ein Exaktversuch auf der Versuchsstation Kleinhohenheim der Universität Hohenheim durchgeführt.

Ziel dieser Arbeit war es, die Auswirkungen von klee gras basierten Düngemitteln (Klee grassilage, Klee gras pellets, frisch geschnittenes und ausgebrachtes Klee gras (Cut-and-Carry) sowie nach Vergärung in einer Biogasanlage) auf den Ertrag von Kartoffeln sowie auf die N-Dynamik im Boden zu untersuchen und mit zwei Kontrollvarianten (kompostierter Rindermist (praxisüblicher Dünger) und Horngries) zu vergleichen. Um die langfristigen Auswirkungen der Düngung auf die Folgekultur zu

prüfen, wurden die Datenerhebungen im zweiten Versuchsjahr in der Folgekultur Sommerweizen weitergeführt.

2. Material und Methoden

2.1. Versuchsstandort

Der Exaktversuch wurde in den Jahren 2018 und 2019 auf der ökologisch bewirtschafteten Versuchsstation Kleinhohenheim der Universität Hohenheim (Stuttgart, Südwestdeutschland) (48° 74' N, 9°19' E und 435 ü. M.) durchgeführt. Kleinhohenheim wird seit 1994 nach den Richtlinien des ökologischen Landbaus bewirtschaftet. Der Betrieb ist nach der EU-Öko-Verordnung (EG 834/2007) und nach den Standards der großen deutschen Öko-Anbauverbände Naturland e.V., Demeter e.V. und Bioland e.V. zertifiziert. Die langjährige mittlere jährliche Niederschlagsmenge beträgt ca. 700 mm; die langjährige mittlere Jahresdurchschnittstemperatur 8,8 °C. Der Gesamtniederschlag in der Wachstumsphase (April bis September) betrug 2018 226 mm und 2019 352 mm. Der Bodentyp der Versuchsfelder ist eine Parabraunerde mit einer lehmigen Textur.

2.2. Versuchsaufbau und Versuchsdurchführung

Der zweijährige Versuch wurde als Row-Column-Design mit vier Wiederholungen und sieben Behandlungen und einer ungedüngten Kontrolle angelegt. Das erste Anbaujahr mit Kartoffeln wurde in den Jahren 2018 und 2019 auf zwei unterschiedlichen Flächen der Versuchsstation durchgeführt. Die eingesetzten Düngemittel waren Kleegrassilage, Kleegraspellets, Biogasgärrest auf der Basis von Klee gras und Schweinegülle, frisches Klee gras (Cut-and-Carry, CUT), kompostierter Rindermist und Horngries. Um Unterschiede in der Mineralisierung zwischen Frühjahrs- und Herbstausbringung zu erfassen, wurden bereits im Herbst 2017 bzw. im Herbst 2018 Klee grassilage (SIL-H) sowie kompostierter Rindermist (KM-H) ausgebracht, im Frühjahr vor dem Legen der Kartoffeln erfolgte die Ausbringung von Klee grassilage (SIL-F), Klee graspellets (PEL), Biogasgärrest (BG) aus Klee gras und Schweinegülle sowie Horngries (HOG). Die Einarbeitung erfolgte vor dem Legen der Kartoffeln mit einer Rotorfräse. Das frische Klee gras (CUT) wurde nach dem Legen der Kartoffeln auf die Dämme ausgebracht und ebenfalls eingearbeitet.

Die Zielgröße der N-Zufuhr war 100 kg ha⁻¹ für alle Düngemittel. Der Gesamt-N-Gehalt der Düngemittel wurde vor der Düngemittelanwendung durch eine Kjeldahl-Analyse bestimmt.

Die Größe einer einzelnen Parzelle betrug 11 m × 4,5 m, wobei jede Parzelle 6 Kartoffelreihen umfasste. Der Abstand betrug zwischen den Reihen 75 cm und zwischen den Pflanzen in der Reihe 30 cm.

Als Kartoffelsorte (*Solanum tuberosum* L.) wurde ‚Ditta‘ (festkochend, mittelfrüh) eingesetzt, die ca. 95-110 Tage bis zur Abreife benötigt.



Abbildung 1: Ausbringung von Düngemitteln im Frühjahr

Als Vorkultur wurde auf der Fläche KH1 des Anbaujahrs 2018 Dinkel und auf der Fläche TS2 des Anbaujahrs 2019 Hafer angebaut. Die Kulturführung erfolgte betriebsüblich nach der gängigen landwirtschaftlichen Praxis (Tabelle 1). Die Beikrautregulierung wurde mit Sternradhacken im April und Mai durchgeführt. Die Düngemittel wurden per Hand ausgebracht (Abb. 1). Nach dem Auflaufen der Kultur wurde wöchentlich die Pflanzenentwicklung (BBCH) dokumentiert und das Auftreten von Pflanzenkrankheiten (v.a. Kraut- und Knollenfäule *Phytophthora infestans*) und Schädlingen (v.a.

Kartoffelkäfer, *Leptinotarsa decemlineata*) kontrolliert. Zur Bekämpfung des Kartoffelkäfers wurde im Juni in beiden Jahren jeweils zwei Behandlungen mit NeemAzal T/S, (1,5 bzw. 2,5 l ha⁻¹) durchgeführt.

Tabelle 1: Durchgeführte Maßnahmen und Probenahmen in Kartoffeln für die Versuchsjahre (2018 und 2019)

| Maßnahme | Versuchsjahr 2018 | | Versuchsjahr 2019 | |
|---|-------------------|----------|-------------------|-----------|
| | 2017 | 2018 | 2018 | 2019 |
| Düngung | | | | |
| Düngung Herbst (SIL-H, KM-H) | 24. Okt. | | 18. Okt. | |
| Düngung Frühjahr (SIL-F, PEL, BG, HOG) | | 5. Apr. | | 28. März |
| CUT Ausbringung | | 29. Mai | | 17. Mai |
| Versuchsdurchführung | | | | |
| Pflügen (Meißelpflug) | 28. Sept. | | 19. Dez. | |
| Bodenbearbeitung (Kreiselegge) | | 4. Apr. | | |
| Einarbeitung Dünger | | | | |
| mit Meißelpflug | | 5. Apr. | | |
| mit Grubber | | | | 28. März |
| Bodenbearbeitung (Kreiselegge) | | 16. Apr. | | 12. April |
| Kartoffel legen | | 16. Apr. | | 15. Apr. |
| Striegeln | | 25. Apr. | | 3. Mai |
| Häufeln | | 26. Apr. | | 8. Mai |
| Hacken (Sternradhacke) | | 26. Apr. | | 8. Mai |
| Hacken (Sternradhacke) | | 9. Mai | | 3. Mai |
| Hacken (Sternradhacke) | | 19. Mai | | 2. Juni |
| Kontrolle von <i>L. decemlineata</i> (NeemAzal-T/S, 1,5 l ha ⁻¹) | | 4. Jun. | | 19. Jun. |
| Zwischenernte | | 11. Jun. | | 18. Jun. |
| Kontrolle von <i>L. decemlineata</i> (NeemAzal-T/S, 2,5 l ha ⁻¹) | | 17. Jun. | | 27. Jun. |
| Endernte | | 5. Sep. | | 5. Sep. |

SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleeegrassilage Frühling; PEL = Kleeegraspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Kleeegras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Kleeegrasaufwuchs



Abbildung 2: Kartoffelbestand am 09.06.2018



Abbildung 2: Kartoffelbestand am 11.06.2018



Abbildung 4: Blühende Kartoffelpflanzen am 20.06.2018

Nach Ernte der Kartoffeln wurde im Folgejahr Sommerweizen (Sorte Mistral) mit 450 Körner m² ausgesät und die Pflanzenentwicklung bonitiert.

Tabelle 2: Durchgeführte Maßnahmen in Sommerweizen (2019 und 2020)

| Maßnahme | Versuchsjahr 2018/2019 | Versuchsjahr 2019/2020 |
|-----------------------------------|------------------------|------------------------|
| | 2019 | 2020 |
| Aussaat 450 Körner m ² | 25. März | 20. März |
| Striegeln | | 28. April und 18. Mai |
| Triebzählung | 14. Mai | 20. Mai |
| SPAD Messungen | 31. Mai und 28. Jun. | 03. Jun. |
| Messung der Pflanzenhöhe | 5. Jul. | 23. Jul. |
| Ährenzählung | 6. Jul. | 23. Jul. |
| Ernte | 1. Aug. | 6. Aug. |

2.3. Ertragsfassung und Probenaufbereitung der Pflanzenproben

2.3.1. Kartoffeln

2.3.1.1. *Zwischenernte*

Um die Pflanzenentwicklung und die Pflanzenbiomasse zur Knollenbildung zu bewerten, wurde in beiden Versuchsjahren im Juni eine Zwischenernte durchgeführt. Für diese wurden jeweils zehn Pflanzen zufällig aus einer Reihe pro Parzelle ausgewählt, die Ernte erfolgte manuell. Das Pflanzenmaterial wurde in Knollen-, Wurzel- und oberirdische Biomasse getrennt, für alle Fraktionen wurde pro Parzelle aus den 10 Pflanzen jeweils eine Mischprobe erstellt.

2.3.1.2. *Endernte*

Für die Endernte (Abb. 6) wurden die Kartoffelknollen der drei mittleren Reihen jeder Parzelle entnommen. Nach Bestimmung der gesamten Frischmasse wurde der marktfähige und nicht marktfähige Ertrag der Kartoffeln durch Größeneinstufung der Knollen mit Hilfe eines Siebes bewertet. Knollen die kleiner als 3,5 cm und größer als 11 cm waren, wurden als nicht marktfähig eingestuft, die Knollengröße von 9 bis 11 cm galt als marktfähig. Um den jeweiligen Anteil unbeschädigter, fauler, grüner und mit Drahtwürmern infizierter Kartoffeln pro Parzelle zu bewerten, wurden zusätzlich ca. 1,5 kg zufällig ausgewählte Knollen jeder Parzelle nach diesen Eigenschaften sortiert (Abb. 7).



Abbildung 5: Ernte am 05.09.2018



Abbildung 6: Aussortieren der Knollen um den Anteil beschädigter, fauler, grüner und mit Drahtwürmern infizierter Kartoffeln zu bestimmen.

2.3.2. Sommerweizen

Für die Ernte wurden Anfang August jeweils 2 m² pro Parzelle manuell geerntet. Anschließend wurde die Frischmasse bestimmt, das Erntegut wurde gedroschen und die Gewichte von Stroh und Korn wurden getrennt bestimmt. Danach wurden Korn und Stroh eine Woche lang bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet.

2.4. Bodenprobenahme (Mineralischer Bodenstickstoff (N_{min}) und Grundanalysen)

2.4.1. N_{min}

Die erste N_{min}-Beprobung im Anbaujahr der Kartoffeln erfolgte im März in drei Tiefen (0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) (Abb. 1). Um die Menge an N zu bestimmen, die für die Knollenbildung verfügbar war, wurde eine zweite N_{min}-Probenahme nach der Ausbringung der Düngemittel im Frühjahr etwa einen Monat nach dem Legen der Kartoffeln die Tiefen 0-30 cm und 30-60 cm, dem Hauptwurzelraum der Kartoffeln, durchgeführt. Um das N-Auswaschungspotential abzuschätzen, wurde die dritte N_{min}-Probenahme nach Kulturrende im Herbst für drei Bodentiefen (0-30 cm, 30-60 und 60-90 cm) durchgeführt.

Vor der Aussaat des Sommerweizens im März wurden von jeder Parzelle sechs Bodenproben in drei Tiefen (0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm) zur N_{\min} -Analyse entnommen.

Für jede Tiefe wurden bei allen Beprobungen die sechs Proben pro Parzelle mit einem Bohrstock gezogen und zu einer Mischprobe vereinigt. Die Proben wurden gekühlt und anschließend bis zur Analyse bei einer Temperatur von -18 ° C im Gefrierschrank gelagert.

Tabelle 3: Durchgeführte Maßnahmen und Probenahmen in Kartoffeln für die Versuchsjahre 2018 und 2019 und in Sommerweizen für die Versuchsjahre 2019 und 2020

| Maßnahme | Kartoffeln | | Sommerweizen | |
|------------------------|------------|----------|--------------|----------|
| | 2018 | 2019 | 2019 | 2020 |
| Bodenprobenahme | | | | |
| 1. Bodenprobennahme | 16. März | 26. März | 25. März | 19. März |
| 2. Bodenprobennahme | 25. Mai | 7. Jun. | | |
| 3. Bodenprobennahme | 17. Okt. | 18. Okt. | | |

2.4.2. Grundanalysen

Für die Analyse der pflanzenverfügbaren Nährstoffe (Phosphor (P), Kalium (K), Magnesium (Mg), organischer Kohlenstoff (C_{org}), Gesamtstickstoff (N_{t})) wurde parzellengenau ein Aliquot der im Frühjahr vor dem Legen der Kartoffeln zur Bestimmung von N_{\min} gezogenen Mischprobe aus der Tiefe 0-30 cm luftgetrocknet, auf 2 mm gesiebt und bis zur Analyse bei Zimmertemperatur gelagert.



Abbildung 7: erste Bodenprobennahme am 16.03.2018

2.5. Laboranalysen

2.5.1. Düngemittel

Die Frischmasse der Düngemittel wurde durch Wiegen erfasst, anschließend wurden die Proben ca. drei Tage lang gefriergetrocknet (Gefriertrocknung Christ ALPHA 1-4) und dann zur Ermittlung der Trockenmasse rückgewogen. Dann wurden die Proben mit einer Rotormühle (FRITSCHTM Pulverisette 14) gemahlen. Zur Bestimmung der Makronährstoffe erfolgte ein Aufschluss mit HNO_3 und H_2O_2 in einem mikrowellenbeheizten Druckaufschlussystem (Ultra Clave Fa. MLS Leutkirch) (VDLUFA 2011). Die Makronährstoffe P, K, Mg und Ca in den Extrakten wurden durch ICP-OES (induktiv gekoppelte optische Plasma-Emissionsspektrometrie, Varian Vista Pro) bestimmt (VDLUFA 2007). C_t und N_t wurden im gemahlene Pflanzenmaterial durch Verbrennung (Variomax CNS

Elementaranalysesysteme GmbH) bestimmt (VDLUFA 2000). Der Gehalt an Gesamt-N wurde vor der Ausbringung mittels Kjeldahl-Analyse bestimmt.

2.5.2. Boden

N_{\min} ($NH_4^+ + NO_3^{2-}$) wurde mit 0,025 M $CaCl_2$ extrahiert (VDLUFA 1991) und die Bestimmung von NH_4 -N und NO_3 -N wurde mit einem Durchflussanalysator (FIA 5012 TECTATOR) durchgeführt. Der Boden-pH wurde mit einem pH-Meter (METTLER TOLEDO) in 0,01 M $CaCl_2$ gemessen (VDLUFA 1991). Für die Bestimmung des pflanzenverfügbaren P und K wurde die Calciumlactat-Methode (CAL) genutzt (VDLUFA 1991). P wurde mit dem Durchflussanalysator (FIA 5012 TECTATOR) und K mit dem Flammenphotometer (ELEX 6361 Eppendorf) bestimmt. Magnesium wurde mit 0,025 M $CaCl_2$ extrahiert (VDLUFA 1991) und mit einem Atomabsorptionsspektrometer (VARIAN, 220FS) bestimmt. Der Gehalt von C_t und N_t im Boden wurden durch Verbrennung (Vario EL-CUBE Elementaranalysesysteme GmbH) bestimmt. Anschließend wurde bei 500 °C für 5 h der organische Anteil verbrannt und der verbleibende anorganische Kohlenstoff (C_{anorg}) gemessen (varioMACROcube). Durch Berechnung der Differenz zwischen C_{anorg} und C_t wurde C_{org} bestimmt.

2.5.3. Pflanzen

Für die Bestimmung von C, N und S in den Wurzeln, der oberirdischen Biomasse und der Kartoffelknollen (Zwischenernte und Endernte) wurde nach der Ernte die Frischmasse bestimmt. Im Anschluss wurden die Wurzeln und die oberirdische Biomasse mit einem Cutter, die Knollen mit dem Thermomix zerkleinert. Das Pflanzenmaterial wurde danach eine Woche lang im Ofen bei 40 °C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Für die folgenden C/N-Analysen wurden die getrockneten Knollen mit einer Rotormühle (FRITSCHTM Pulverisette 14) und die getrocknete oberirdische Biomasse und die Wurzeln mit einer Schneidmühle (Retsch SM 200) gemahlen. Anschließend wurden die Gehalte durch Verbrennung bestimmt (Variomax CNS Elementaranalysesysteme GmbH) (VDLUFA 2000).

Korn und Stroh des Sommerweizens wurden ebenfalls bei 40°C bis zur Gewichtskonstanz getrocknet. Die getrockneten Körner wurden mit einer Rotormühle (FRITSCHTM Pulverisette 14), das Stroh mit einer Schneidmühle (Retsch Mühle SM 200) gemahlen. Der Gehalt an C, N und S wurden mittels Verbrennung (Variomax CNS Elementaranalysesysteme GmbH) bestimmt (VDLUFA 2000).

2.5.4. Stickstoffnutzungseffizienz (SNE)

Der Transfer von Stickstoff aus den Düngemitteln in die Pflanze wurde durch die SNE beschrieben. Die in Prozent angegebene SNE wird berechnet indem von der Stickstoffmenge, die von der Kartoffelpflanze (Knolle, oberirdische Biomasse und Wurzel) bei der jeweiligen Behandlung

aufgenommen wurde, jene Stickstoffmenge abgezogen wird, welche von den ungedüngten Kartoffelpflanzen der Kontrolle aufgenommen wurde und durch die Menge an Stickstoff dividiert wird, die durch den Dünger insgesamt ausgebracht wird.

$$\text{SNE\%} = \% \left(N_{\text{AufnahmeDünger}} - N_{\text{Aufnahme 0-Kontrolle}} \right) / N_{\text{Dünger}}$$

wobei

$N_{\text{AufnahmeDünger}}$ = N-Aufnahme durch die Pflanze mit Behandlung

$N_{\text{Aufnahme 0-Kontrolle}}$ = N-Aufnahme durch die Pflanze ohne die Behandlung (Kontrolle) und

$N_{\text{Dünger}}$ = Menge an N, die durch das Düngemittel ausgebracht wird.

3. Ergebnisse

3.1. Nährstoffgehalte der Düngemittel

Unter allen klee-grasbasierten Düngemitteln wies der PEL mit 1,99 % den höchsten Gesamtgehalt an Stickstoff in der Frischmasse auf, gefolgt von SIL-F, SIL-H und CUT. Die tierischen Düngemittel Horngries und kompostierter Rindermist lagen dabei mit jeweils am oberen bzw. unteren Ende der ermittelten Werte. Der niedrigste N-Gehalt wurde mit 0,52% für BG ermittelt. Diese Ergebnisse sind in allererster Linie von den Trockenmassegehalten der Ausgangssubstrate abhängig. Wie zu erwarten war, wiesen die Biogasgärreste mit 1,86% die höchsten Gehalte an NH₄-N auf, gefolgt von PEL.

Tabelle 4: N-Werte der Kjeldahl-Analyse aller Düngemittel gemittelt über beide Versuchsjahre 2018/2019

| Düngemittel | Ges. N in FS (g/kg) | NH ₄ in FS % | Ges. N in FS % |
|-------------|------------------------|----------------------------|-------------------|
| KM-H | 6,2 | 0,08 | 0,62 |
| SIL-H | 12,2 | 0,22 | 1,22 |
| BG | 5,18 | 1,86 | 0,52 |
| CUT* | 6,81 | 0,08 | 0,68 |
| PEL | 19,9 | 1,39 | 1,99 |
| SIL-F | 13,17 | 1,20 | 1,32 |
| HOG | 139,0 | 12,04 | 13,9 |

SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleegrassilage Frühling; PEL = Klee-graspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee-gras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee-gras-aufwuchs. *Werte für CUT nur einjährig für 2018

3.2. Bodengehalt P, K, und Mg

Der Gehalt an pflanzenverfügbarem P, K und Mg war für alle Proben in der Gehaltsklasse C, (Tabelle 5), sodass davon ausgegangen werden kann, dass Ertragsunterschiede zwischen den Behandlungen nicht auf Unterschiede in der Versorgung der Pflanzen mit diesen Nährstoffen zurückzuführen sind.

Tabelle 5: Durchschnittlicher Gehalt an pflanzenverfügbaren Nährstoffen P, K und Mg in Bodenproben gezogen vor der Ausbringung der Düngemittel im Frühjahr

| Zeitpunkt | P _{CAL} (mg kg ⁻¹ Boden) | K _{CAL} (mg kg ⁻¹ Boden) | Mg (mg kg ⁻¹ Boden) |
|-------------|---|---|-----------------------------------|
| 2018 | | | |
| Vor Düngung | 60 | 150 | 140 |
| 2019 | | | |
| Vor Düngung | 90 | 130 | 180 |

P_{CAL} = Mit CAL-Methode extrahierbarer Phosphor; K_{CAL} = Mit CAL-Methode extrahierbares Kalium

3.3. N- Dynamik im Boden

Bei der ersten N_{min}-Beprobung im Frühjahr 2018 betrug die Gehalte der im Herbst gedüngten Felder 50,6 kg ha⁻¹ (KM-H) und 59 kg ha⁻¹ (SIL-H), sowie 2019 54 kg ha⁻¹ (SIL-H) und 57,6 kg ha⁻¹ (KM-H) (Abb. 9a). Sie wiesen damit etwas erhöhte Gehalte im Vergleich zum Status der Parzellen ohne Düngemaßnahmen auf. Im Versuchsjahr 2019 zeigten sich ebenfalls höhere N_{min}-Werte auf den Flächen mit Herbstausbringung der Düngemittel, allerdings wies im Frühjahr 2019 auch die ungedüngte Kontrolle vergleichsweise hohe N_{min}-Gehalte auf (Abb. 9f).

Die N_{min}-Werte in den obersten 60 cm zur Zeit der Blüte/Beginn Knollenbildung waren 2018 deutlich höher als 2019, wobei die gedüngte Kontrollvariante Horngries gefolgt von Biogasgärrest die höchsten Werte aufwies. Die N-Mineralisierung in der Variante Kleegraspellets erreichte ein ähnliches Niveau wie die ungedüngte Kontrolle.

Nach der Ernte war der N_{min}-Gehalt im Jahr 2019 höher als 2018. In beiden Jahren gab es keine signifikanten Unterschiede zwischen den behandelten und unbehandelten Parzellen. Im Jahr 2018 betrug niedrigste mittlere N_{min}-Gehalt 41,5 kg ha⁻¹ (KON), der höchste 68,8 kg ha⁻¹ (HOG). Im Jahr 2019 lagen die Werte zwischen 75,7 kg ha⁻¹ (SIL-H) und 84,9 kg ha⁻¹ (HOG).

In allen Jahren verlief die N-Mineralisierung der beiden im Herbst ausgebrachten Düngemittel Silage kompostierter Rindermist ähnlich (Abb.9a-f).

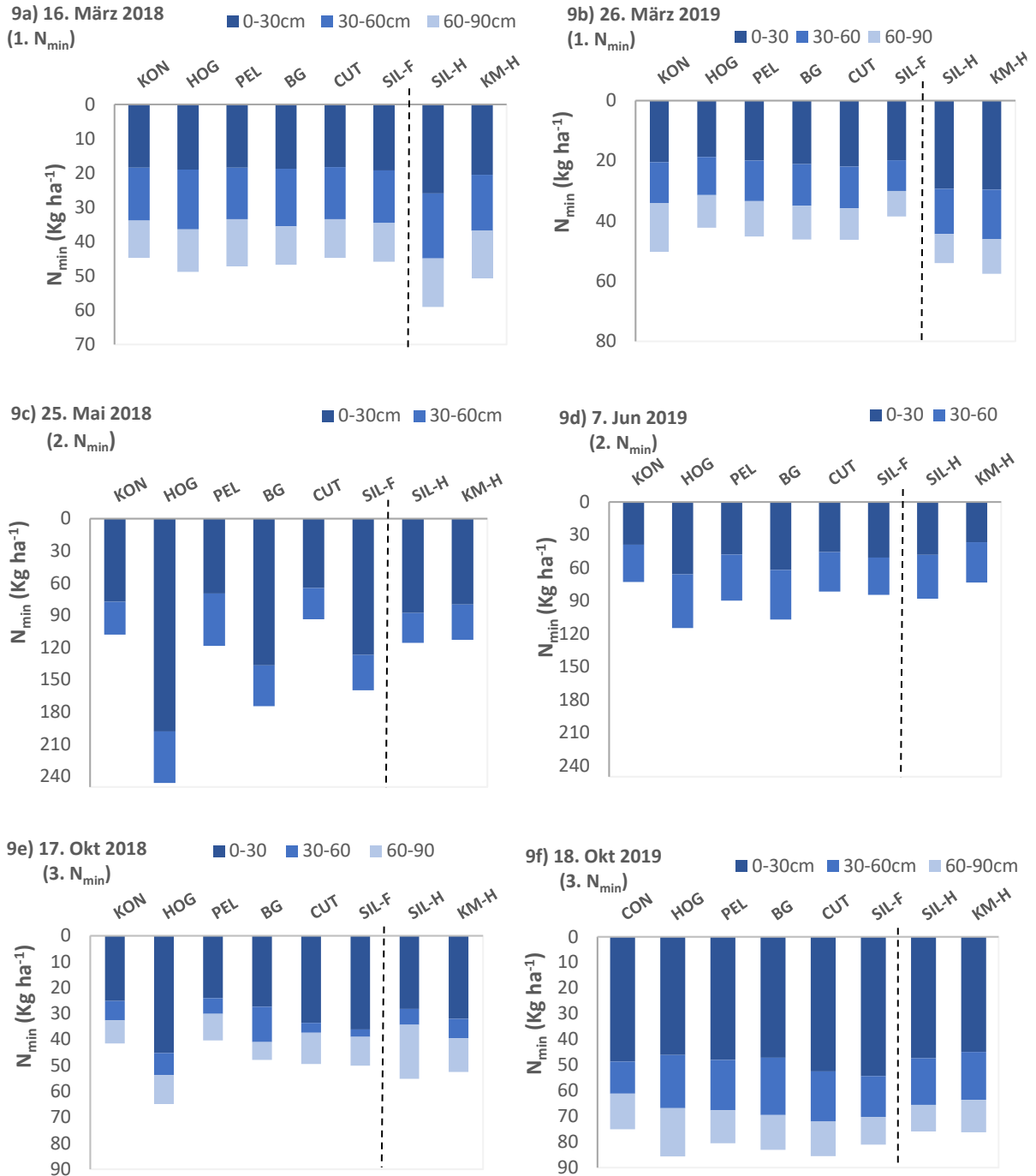


Abbildung 1 a-f: Vergleich der Bodengehalte an mineralischem Stickstoff ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) (N_{min} kg ha^{-1}) im Kartoffelanbau mit unterschiedlichen Zeitpunkten in den Jahren 2018 und 2019. 1. N_{min} 2018 = 16. Mär 2018, 2. N_{min} 2018 = 25. Mai und 3. N_{min} 2018 = 17. Okt.; 1. N_{min} 2019 = 26. Mär, 2. N_{min} 2019 = 7. Juni, 3. N_{min} 2019 = 18. Okt. mit zwei (0-30 und 30-60cm) und drei Tiefen (0-30, 30-60 und 60-90cm). Rechte Seite der gepunkteten Linien zeigt Düngemittel (KM-H und SIL-H), welche im Herbst angewendet wurden. SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleegrassilage Frühling; PEL = Kleegraspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Kleegras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Kleegrasaufwuchs.

3.4. Stickstoffmineralisierung Sommerweizen

Bei der N_{min} -Beprobung im Sommerweizen im Frühjahr 2019 betrug die Gehalte der im Herbst 2017 gedüngten Felder $66,4 \text{ kg ha}^{-1}$ (KM-H) und $69,9 \text{ kg ha}^{-1}$ (SIL-H). Im Versuchsjahr 2020 betrug

die Gehalte der im Herbst 2018 gedüngten Böden $66,5 \text{ kg ha}^{-1}$ (SIL-H) und $60,8 \text{ kg ha}^{-1}$ (KM-H) (Abb. 10).

Die N_{\min} -Werte waren 2019 und 2020 vergleichbar, wobei 2019 die mit SIL-F gedüngte Behandlung gefolgt von HOG die höchsten Werte aufwies. Die N-Mineralisierung in den Varianten BG und KM-H erreichte 2019 und 2020 ein ähnliches Niveau wie die ungedüngte Kontrolle.

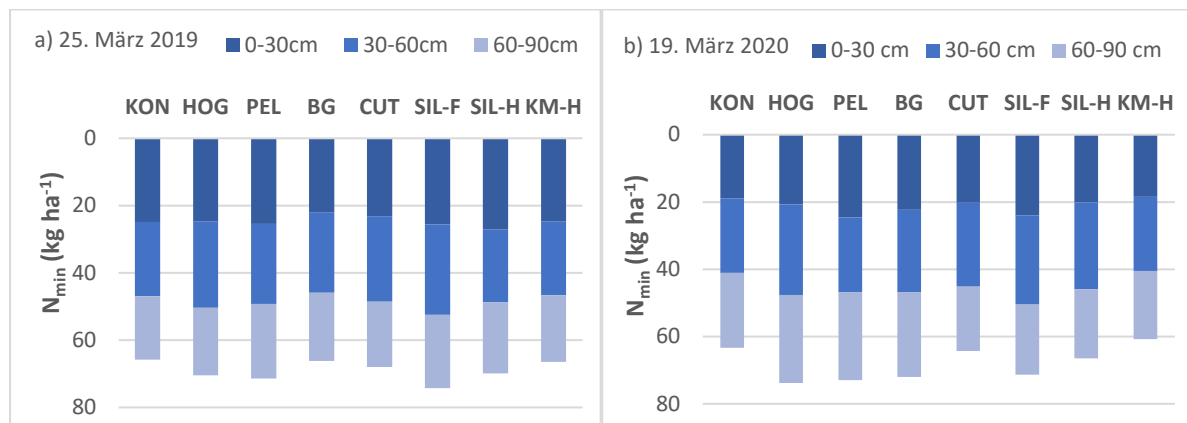


Abbildung 2 a, b: Vergleich der Bodengehalte an mineralischem Stickstoff ($\text{NH}_4^+ + \text{NO}_3^-$) ($N_{\min} \text{ kg ha}^{-1}$) im Sommerweizenanbau 2019 und 2020 in der Bodentiefe 0-30 cm, 30-60 cm und 60-90 cm in Abhängigkeit von der Düngebehandlung). SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleegrassilage Frühling; PEL = Kleegrasspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee gras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee gras aufwuchs.

3.5. Ertragswirkung der Düngemittel auf die Hauptfrucht Kartoffeln

3.5.1. Biomasse zur Zwischenernte

Der oberirdische Aufwuchs aller mit klee grasbasierten Düngemitteln gedüngten Varianten unterschieden sich im Jahr 2018 ebenso wie der Aufwuchs der Düngevariante mit kompostiertem Rindermist nicht signifikant von der Kontrolle; lediglich die Varianten Biogasgärrest ($15,0 \text{ t ha}^{-1}$), Silage bei Herbstausb bringung ($14,7 \text{ t ha}^{-1}$) und Horngries ($16,9 \text{ t ha}^{-1}$) zeigten höhere Aufwüchse. Im 2. Versuchsjahr zeigten sowohl Cut-and-Carry als auch Silage mit Frühjahrsausbringung mit $8,7 \text{ t ha}^{-1}$ und $8,2 \text{ t ha}^{-1}$ signifikant niedrigere Biomasseerträge als alle anderen Düngemittel und ähnelten damit der ungedüngten Kontrolle.

Tabelle 6: Vergleich der Zwischenernte in Abhängigkeit von den eingesetzten Düngemitteln (unterschiedliche Kleinbuchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede)

| | Jahr 2018 | | Jahr 2019 | |
|------------|--|-----|-----------|----|
| Behandlung | Gesamtbiomasse* (t ha^{-1}) | | | |
| KON | 12.0 | cde | 9.1 | gh |
| HOG | 16.9 | a | 12.4 | cd |

| | | | | |
|-------|------|----|------|-----|
| PEL | 13.6 | bc | 10.4 | fg |
| BG | 15.0 | b | 11.9 | def |
| CUT | 12.1 | cd | 8.7 | h |
| SIL-S | 12.4 | cd | 8.2 | h |
| SIL-H | 14.7 | b | 9.3 | gh |
| KM-H | 13.1 | cd | 10.5 | efg |

*Gesamtbiomasse=Oberirdische Biomasse + Knollen + Wurzeln

SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleegrassilage Frühling; PEL = Klee gras pellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee gras und Schweinegülle; HOG = Horn gries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee gras aufwuchs.

Die Stickstoffnutzungseffizienz (SNE) war im Jahr 2018 und 2019 bei der Kontrollvariante HOG mit 35,2% bzw. 21% am höchsten. Von den klee gras basierten Düngemitteln schnitt BG mit 14,5% bzw. 9,3% am besten ab. Die SNE von CUT 2019 und 2020 sowie von SIL-F in 2020 war negativ, sodass hier durch die Zufuhr der Biomasse mehr N festgelegt als aufgenommen wurde.

Tabelle 7: C/N Verhältnis der Kartoffelknollen und der oberirdischen Biomasse sowie die Stickstoffnutzungseffizienz (SNE) in den Jahren 2018 und 2019.

| Behandlung | Jahr 2018 | | | Jahr 2019 | | |
|------------|--------------|----------------|-------|--------------|----------------|-------|
| | C:N (Knolle) | C:N (Biomasse) | SNE % | C:N (Knolle) | C:N (Biomasse) | SNE % |
| KON | 26.2 | 10.4 | - | 27.3 | 11.1 | - |
| HOG | 21.8 | 7.7 | 35.2 | 23.8 | 9.1 | 21 |
| PEL | 25.3 | 9.1 | 10.2 | 26.1 | 11.1 | 3.7 |
| BG | 24.9 | 8.6 | 14.5 | 26.7 | 10.9 | 9.3 |
| CUT | 26 | 10.4 | -1 | 24.5 | 10.6 | -1.1 |
| SIL-F | 24.6 | 8.7 | 3.8 | 27.1 | 11 | -4.3 |
| SIL-H | 25.5 | 9.5 | 12.1 | 25.9 | 10 | 3.1 |
| KM-H | 26.2 | 10.1 | 3.8 | 26 | 11.1 | 5.8 |

SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Klee grassilage Frühling; PEL = Klee gras pellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee gras und Schweinegülle; HOG = Horn gries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee gras aufwuchs; SNE = Stickstoffnutzungseffizienz.

3.5.2. Trockenmassegehalt der oberirdischen Biomasse der Zwischenernte

Der Trockenmassegehalt (TM) war bei BG signifikant am höchsten (1.804 kg ha⁻¹ 2018), alle anderen Behandlungen unterschieden sich jedoch nicht signifikant voneinander. Der TM-Gehalt der oberirdischen Biomasse lag im Jahr 2018 zwischen 1.804 kg ha⁻¹ (HOG) bis 1.316 kg ha⁻¹ (SIL-F). Im Jahr 2019 wurden zwischen 1.523 kg ha⁻¹ (HOG) bis 1.070 kg ha⁻¹ (SIL-F) erreicht.

3.5.3. Gesamtertrag der Kartoffeln

Im ersten Versuchsjahr wurden mit den betriebsinternen Klee gras-Düngern ähnliche Erträge erzielt wie mit der praxisüblichen Düngung mit Mistkompost, und zwar unabhängig davon, ob sie bereits im Vorjahr eingesetzt wurden oder erst im Jahr des Anbaus. Generell entsprach das Ertragsniveau in beiden Versuchsjahren örtlichen Kartoffelerträgen. Im Folgejahr führten sowohl die Cut and Carry-Variante als auch die im Frühjahr ausgebrachte Silage zu signifikant niedrigeren Erträgen als die Mistkompost-Variante.

Der gesamte Frischmasseertrag (in t ha⁻¹) unterschied sich in den meisten Behandlungen zwischen den beiden Versuchsjahren (2018 und 2019) signifikant (Pr > F = 0,0056). 2019 war der Ertrag signifikant höher.

In den gedüngten Parzellen lag der Gesamtertrag der Kartoffeln im Versuchsjahr 2018 zwischen 31 t ha⁻¹ (CUT) und 34,8 t ha⁻¹ (BG). 2018 waren alle Düngevarianten signifikant von der ungedüngten Kontrolle verschieden. Unter allen Klee gras-basierten Düngern wies BG die höchsten Erträge auf (signifikant für p < 0,05). Im Jahr 2019 wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen klee grasbasierten Düngevarianten und der Kontrolle festgestellt, einzig der Ertrag nach der Düngung mit PEL (37,9 t ha⁻¹) war signifikant höher als in der ungedüngten Kontrolle (33,9 t ha⁻¹). Der Gesamtertrag der mit SIL-F gedüngten Parzellen entsprach 2020 dem der ungedüngten Parzellen und unterschied sich signifikant von PEL.

Gesamtertrag Kartoffeln

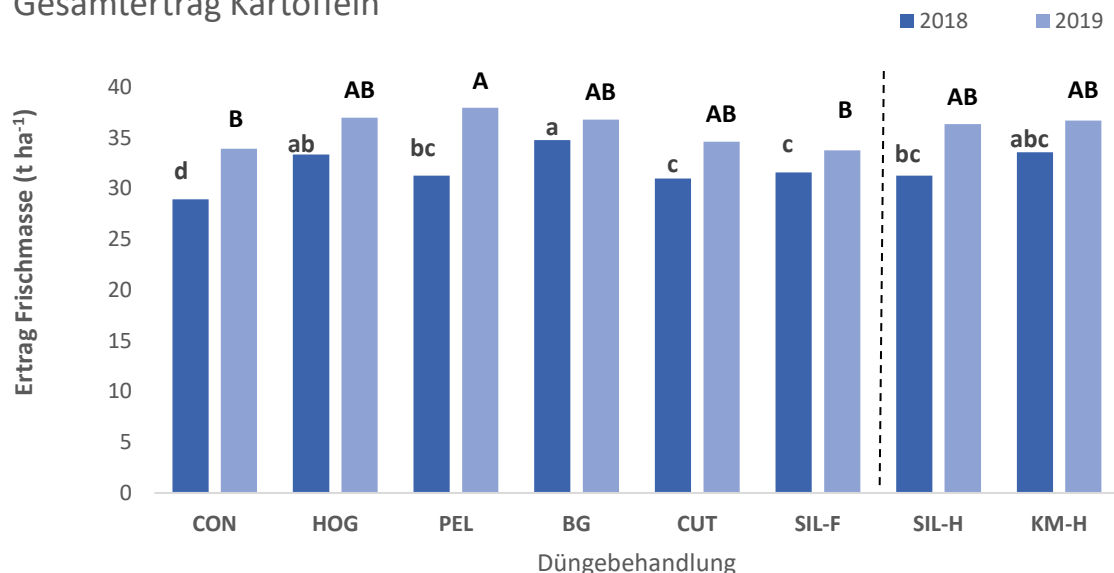


Abbildung 3: Frischmasseertrag der Kartoffelknollen (in t ha⁻¹) im Vergleich der zwei Versuchsjahre 2018 und 2019. Die verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede im Mittelwert für jede Düngebehandlung. SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Klee grassilage Frühjahr; PEL = Klee grasspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee gras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee grasaufwuchs.

3.5.4. Marktfähiger Ertrag

Der marktfähige Anteil der Kartoffelknollen wurde nach den Größenstufen <3.5cm und >11cm klassifiziert. Im ersten Jahr (2018) lag der marktfähige Ertrag zwischen 25 t ha⁻¹ (KON) und 30,4 t ha⁻¹ (BG), im Jahr 2019 zwischen 25,8 t ha⁻¹ (SIL-F) und 29,1 t ha⁻¹ (PEL) und damit im Rahmen der Praxisbetriebe der Umgebung.

Die Düngevarianten unterschieden sich in den beiden Versuchsjahren nicht wesentlich voneinander (Abb. 15).

Die beiden im Herbst eingesetzten Düngemittel Silage und kompostierter Rindermist unterschieden sich nicht signifikant voneinander. Die Düngevarianten CUT und SIL-F zeigten in der Tendenz niedrigere marktfähige Erträge als alle anderen Düngevarianten, allerdings war dieser Unterschied nicht statistisch signifikant.

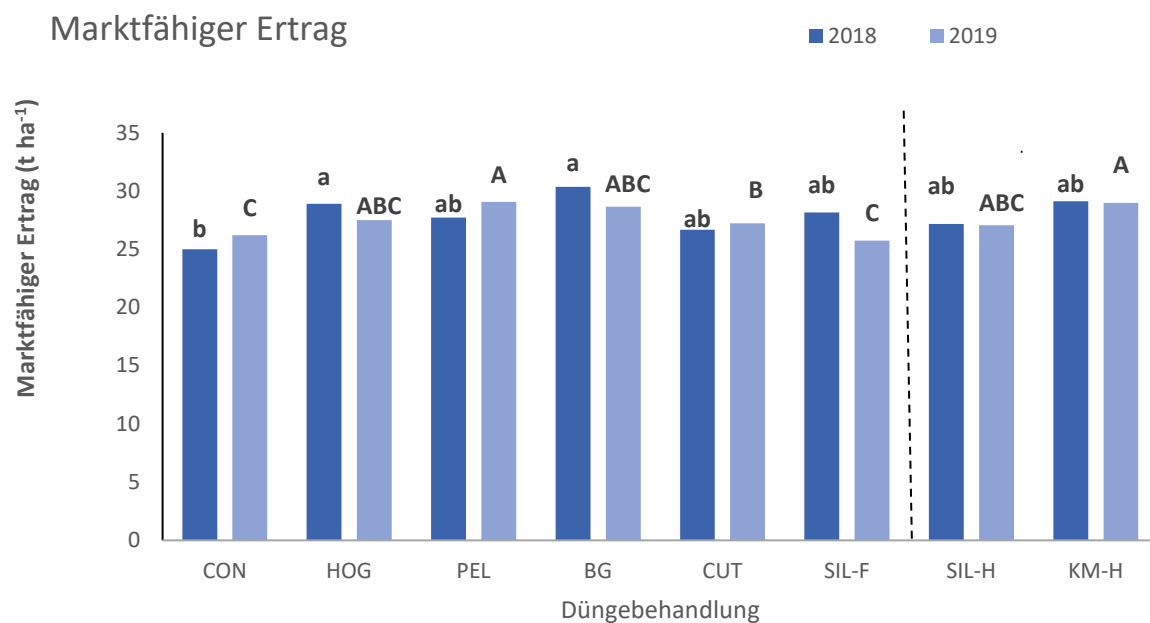


Abbildung 4 Die marktfähigen Erträge (t ha⁻¹) der Kartoffelknollen in den Größen < 3,5 und >11cm wurden als marktfähige Erträge standardisiert. Die verschiedenen Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede im Mittelwert für jede Behandlung in beiden Jahren. SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleegrassilage Frühling; PEL = Kleegraspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Kleegras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Kleegrasaufwuchs.

Im Jahr 2018 trat aufgrund der vorherrschenden Trockenheit ein starker Befall mit Drahtwürmern (*Agriotes spec.*) auf. Zum Teil waren mehr als 50% der geernteten Kartoffeln befallen. Im Abgleich mit der örtlichen Beratung wurden die befallenen Kartoffeln dennoch als marktfähig deklariert. Der geringste Befall wurde bei der Behandlung CUT (45%), der höchste Befall bei PEL (59%) gemessen. Der Schaden war in KON (50%) niedriger als bei den Behandlungen SIL-F (58%), KM-H (56%), BG (52%) und HOG (51%). Im Jahr 2019 war der Schaden sehr gering.

3.6. Ertragswirkung der Düngemittel auf die Folgefrucht Sommerweizen

3.6.1. Gesamtertrag

In der Folgefrucht Sommerweizen waren die Erträge im Jahr 2019 insgesamt geringer als 2020 und zeigen damit dasselbe Muster wie der Frischmasseertrag der Kartoffeln. In 2019 erzielte die Behandlung mit SIL-F (33,1 dt ha⁻¹) gefolgt von PEL (30,3 dt ha⁻¹) die höchsten Erträge, in 2020 die Behandlung mit PEL (34,9 dt ha⁻¹) gefolgt von CUT (34,2 dt ha⁻¹), allerdings ergab sich nur ein signifikanter Unterschied zwischen den Jahren, nicht innerhalb eines Jahres.

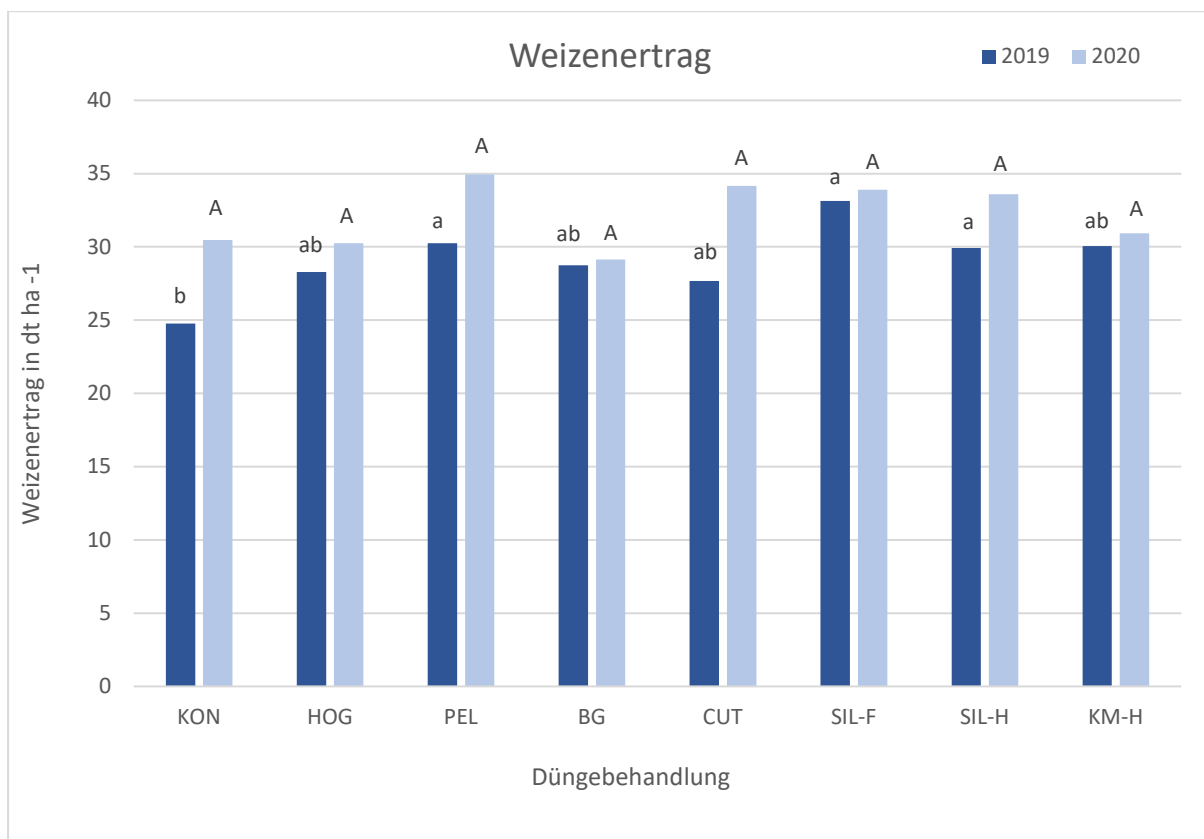


Abbildung 5 Sommerweizenertrag (2019 und 2020) in Abhängigkeit von der Düngung im Folgejahr nach Kartoffelanbau (2018 und 2019) (unterschiedliche Buchstaben zeigen statistisch signifikante Unterschiede). SIL-H = Silage Herbst; KM-H = kompostierter Rindermist Herbst; SIL-F = Kleeegrassilage Frühling; PEL = Kleeegraspellets; BG = Biogasgärrest basierend auf Klee gras und Schweinegülle; HOG = Horngries; CUT = "Cut and Carry" mit frischem Klee gras aufwuchs.

4. Diskussion

Die Gehalte an Ammonium-N und Nitrat-N sowie an weiteren Nährstoffen wie P, K und Mg lagen in den Klee gras-basierten Düngemitteln im Rahmen der in der Literatur angegebenen Werte, soweit für diese Dünger Angaben verfügbar sind (Möller und Schultheiß, 2014). Bedingt durch die hohen Anteile an Ammonium-N in den Biogasgärresten liegt die N-Verfügbarkeit dieser Dünger im Jahr der Ausbringung bei ca. 50–60 %, bei Klee grasprodukten wie Pellets oder Klee grassilage liegt diese bei ca. 25–50 % und übersteigt die von Rindermist (10–20 %) um ein Vielfaches (Möller und Schultheiß 2014; Benke et al. 2017). In diesem Versuch zeigte dementsprechend die Variante, die mit Biogasgärresten gedüngt wurde, in beiden Versuchsjahren die höchsten N_{\min} -Gehalte zur Blüte/Knollenbildung und die höchsten marktfähigen Erträge, allerdings waren diese nicht signifikant von den anderen Düngemitteln verschieden. Dass trotz signifikanter Unterschiede in der NH_4^+ -Konzentration keine signifikanten Unterschiede in den Erträgen gefunden wurde, kann auf N-Verluste hinweisen. Für das Jahr 2018 muss außerdem in Betracht gezogen werden, dass aufgrund der Trockenheit in diesem Versuchsjahr u.U. Wasser früher ertragslimitierend wirkte als die Verfügbarkeit von N. Zwar zeigt sich in den N_{\min} -Gehalten (2. Probenahmezeitpunkt) in beiden Versuchsjahren, dass in der Variante BG in der Wachstumsphase der Kartoffel mehr N_{\min} im Boden vorhanden war, allerdings konnte dies nicht in einen Mehrertrag an Gesamtfrischmasse bzw. marktfähigen Ertrag umgewandelt werden. Rindermist wird erst zeitverzögert wirksam, weshalb in der Praxis häufig eine Ausbringung im Herbst erfolgt. Im Versuch führte die Klee grassilage bei einer Herbstausbringung zu einem ähnlichen Muster in der N-Mineralisierung und zu ähnliche Erträge wie die traditionelle Mistgabe im Herbst.

Andere Studien kommen zu ähnlichen Ergebnissen: Stumm (2015) stellte nach Düngung mit klee grasbasierten Düngemitteln gegenüber der ungedüngten Kontrollvariante einen tendenziell höheren Kornertrag im darauffolgenden Winterraps fest. Die Stickstoffaufnahme war in der Klee grasvariante signifikant höher als in der Kontrollvariante und so wurden auf dem eher nährstoffarmen Boden des Versuchsfelds z.B. nach Düngung mit frischem Klee grasaufwuchs 130 kg N ha^{-1} durch die Pflanzen aufgenommen und damit 50 kg mehr als in der ungedüngten Kontrolle. Bei Düngung von Blumenkohl mit Klee grassilage wurde ebenfalls ein Anteil von 70% verkaufsfähiger Köpfe und damit eine signifikante Steigerung im Vergleich zur ungedüngten Variante mit weniger als 30 % verkaufsfähiger Köpfe erreicht. Toleikiené (2020) stellte auf lehmigem Boden nach der Düngung mit frischem Rotklee im Sommerweizen einen Kornertrag von 24 dt TM ha^{-1} im Vergleich zu 19 dt TM ha^{-1} in der Kontrollvariante fest. Im zweiten Versuchsjahr wurde in der mit Silage gedüngten Variante mit 23 dt TM ha^{-1} der höchste Kornertrag gemessen.

Im vorliegenden Versuch zeigten dagegen die Varianten mit Cut-and-Carry sowie mit einer Silageausbringung im Frühjahr die niedrigsten Erträge und geringe N_{\min} -Gehalte zur Blüte/Knollenbildung. Möglicherweise stand durch den Umsatz des frischen Kleegrases bzw. der Silage im Boden weniger N für die Kultur zur Verfügung. Die negativen SNEs für CUT (beide Versuchsjahre) und SIL-F (2019) unterstützen diese Annahme. Offensichtlich wird bei der Düngung mit Frischmaterial N festgelegt, so dass dieses der Kultur nicht zur Verfügung steht. Gutser et al. (2005) weisen jedoch darauf hin, dass in diesem Fall jedoch die Erhöhung der langfristigen N-Effizienz berücksichtigt werden muss. Dabei spielt vor allem der Gehalt an Trockensubstanz der ausgebrachten Silage mit hohem C/N-Verhältnis eine Rolle (Stumm 2015). Sorensen und Grevsen (2015) untersuchten den Aufwuchs unterschiedlicher Leguminosen unter anderem auf ihren C- und N-Gehalt und stellen für frischen Kleegrasaufwuchs die höchste N-Akkumulierung bei den jüngsten Entwicklungsstadium mit höchster Schnitthäufigkeit fest. Eine Optimierung der Herstellung der kleegrasbasierten Düngemittel muss folglich sowohl den Zeitpunkt der Ausbringung als auch die Eigenschaften des Ausgangsmaterials betreffen. In der vorliegenden Studie zeigte die Kleegrassilage, welche im Frühjahr ausgebracht wurde, das höchste C/N-Verhältnis aller Düngemittel, sodass eine erhöhte Stickstoffimmobilisierung sehr wahrscheinlich ist. Hier zeigt sich eine Schwierigkeit der Klee-gras-basierten Düngemittel, nämlich die Heterogenität des Ausgangsmaterials: Das C/N-Verhältnis des Ausgangsmaterials hängt stark vom Schnittzeitpunkt des Klee-grases und seiner Zusammensetzung ab. Unter Praxisbedingungen kann nicht immer sichergestellt werden, dass Klee-grasbestände zum optimalen Zeitpunkt geschnitten werden, um ein möglichst niedriges C/N-Verhältnis im Ausgangsmaterial des Düngemittels zu gewährleisten. Daher müssen andere Maßnahmen ergriffen werden, das Risiko einer N-Immobilisierung zu verringern. Eine wichtige Rolle spielt dabei der Zeitpunkt der Ausbringung des Düngemittels: Bei der im Herbst ausgebrachten Silage trat dieser Effekt in keinem der beiden Versuchsjahre auf. Ursache hierfür ist eine verringerte Aktivität der Bodenorganismen in der kälteren Jahreszeit und folglich eine langsamere Freisetzung des zugeführten N. Aus pflanzenbaulicher Sicht wird daher empfohlen, die Klee-grassilage im Spätherbst auszubringen. Eine Ausbringung im Herbst könnte allerdings zu einer Verlagerung von N in tiefere Bodenschichten führen, was zu Beginn der Vegetationsperiode in einem der beiden Versuchsjahre festgestellt werden konnte.

Leider erlaubt die aktuell gültige Regelung der Düngeverordnung (DüV 2020) keine Ausbringung im Herbst, da klee-grasbasierte Düngemittel mit ca. 3 % N in der Trockenmasse als „Düngemittel mit einem wesentlichen Gehalt an N“ klassifiziert werden und damit in der Ausbringung der Sperrfrist von der Ernte der Hauptkultur bis zum 31. Januar des Folgejahres unterliegen. Lediglich zu Zwischenfrüchten, die vor dem 15. September gesät werden, können ca. 60 kg Gesamt-N in Form von

Kleegrassilage ausgebracht werden. Hier gilt es, die aktuell gültigen Regelungen in den unterschiedlichen Bundesländern zu beachten.

Die Erträge der Nachfrucht Sommerweizen zeigten im Versuchsjahr 2019 keine signifikanten Unterschiede und lagen zwischen 28 und 33 dt ha⁻¹. Im Versuchsjahr 2020 lagen die Erträge zwischen 29 und 35 dt ha⁻¹. In der Düngewirkung auf die Nachfrüchte scheinen sich die geprüften Düngemittel nicht zu unterscheiden.

Die N_{min}-Gehalte der Frühjahrsbeprobung zum Sommerweizen zeigten keine nennenswerten Unterschiede zwischen den Düngemitteln, dies spiegelte sich auch in den Erträgen der Nachfrucht wieder, die ebenfalls keine statistisch signifikanten Unterschiede aufwiesen. Allerdings wurde ein leichter Trend zu etwas höheren Erträgen für die Kleegas-basierten Düngemittel sichtbar, die im Ausbringungsjahr zur N-Immobilisierung führten. Inwieweit N-Verluste, die über den Winter auftraten, zu einer Angleichung der N_{min}-Gehalte geführt haben, ist aufgrund des Versuchsdesigns nicht festzustellen. Der Einsatz einer Winterkultur (z.B. Winterweizen) würde hier ggfs. eindeutiger Ergebnisse liefern.

Langfristig gesehen spielt die N-Effizienz, d.h. die langfristige N-Verfügbarkeit im Ausbringungsjahr und in den Folgejahren abzüglich der N-Verluste eine große Rolle. Ist die N-Effizienz niedrig, verliert das System N, entweder über Auswaschung oder in Form von Gas – beides nicht erwünschte Umweltwirkungen von Düngemitteln (Grundwasser und Klimaschutz). Die N-Effizienz von Kleegrasprodukten liegt mit ca. 70 % zwischen der von Rindermist (ca. 60 %) und flüssigen Biogasgärresten (80 %). Zum Vergleich: Bioabfallkomposte aus Grünschnitt oder Komposte aus Haushaltsabfällen weisen lediglich eine N-Effizienz von 20 bis 40 % auf (Möller und Schultheiß 2014). Kleegrasbasierte Düngemittel sind also gut geeignet, die N-Effizienz im Betriebskreislauf zu steigern, sofern gasförmige N-Verluste in der gesamten Kette von der Ernte bis zur Einarbeitung nach der Ausbringung minimiert werden. Außerdem enthalten diese Düngemittel ähnlich viel P und K wie Rindermist (ca. 0,5 % P und ca. 3 % K in der Trockenmasse). Allerdings verteilt eine Kleegrasdüngung bei beiden Nährstoffen lediglich zwischen dem Geber- und dem Nehmerfeld innerhalb des Betriebs um, so dass langfristig eine Zufuhr von Nährstoffen über betriebsfremde Düngemittel (z. B. Komposte oder Gärreste aus Haushaltsabfällen) eingeplant werden sollte, um die durch das Erntegut bedingten Verluste dieser Nährstoffe zu kompensieren. Die im vorliegenden Versuch höchsten P-Werte wurden für Biogasgärrest auf der Basis von Kleegras und Schweinegülle ermittelt, wobei die P-Zufuhr vor allem auf letzteres zurückzuführen ist. Mit diesem Düngemittel wurden also zusätzliche Nährstoffe eingebracht, was bei den Kleegras-basierten, aus dem eigenen Betrieb stammenden Düngemitteln nicht der Fall ist. Die stellt für eine langfristig nachhaltige Versorgung von ökologisch wirtschaftenden

Ackerbaubetrieben ein Problem dar, wie von Reimer et al. (2020) festgestellt wurde, die basierend auf Hoftorbilanzen zeigen konnten, dass die Versorgung mit P und K negativ mit der Höhe des Leguminosenanbaus korreliert. Um die P- und K-Lücke zu füllen, sind also weiterhin externe Düngemittel notwendig.

5. Fazit

Klee grasbasierte Düngemittel sind eine geeignete Alternative zur N-Versorgung für vieharme und viehlose Betriebe, da sie ähnlich ertragswirksam sind wie Mistkomposte, aber durch geringere Verluste während der Aufbereitung eine etwas höhere N-Effizienz haben und zugleich durch die Abfuhr der Biomasse auf dem Geberfeld die N-Fixierung erhöht wird und damit innerbetrieblich mehr N zur Verfügung steht. Allerdings ist zu beachten, dass die Anwendung von Cut-and-Carry zeitlich begrenzt ist, da das Material im Ackerbau nicht oder nur sehr eingeschränkt in den Pflanzenbestand des Nehmerfeldes ausgebracht werden kann. Das Silieren oder Vergären des Klee grasses eröffnet hier mehrere Möglichkeiten des Einsatzes von mobilen Transferdüngern, ist jedoch mit einem größeren Arbeitsaufwand verbunden. Der Einsatz von zugekauften Klee gras-Pellets ist für ökologisch wirtschaftende Ackerbaubetriebe nicht rentabel, da die Kosten für diese Düngemittel aktuell zu hoch sind. Außerdem ist zur Trocknung und Aufarbeitung des Ausgangsmaterials ein erheblicher Energieaufwand nötig, so dass dieses Düngemittel nur dann die Kriterien eines nachhaltig produzierten Düngers erfüllt, wenn an dieser Stelle erneuerbare Energien eingesetzt werden. Die Nutzung von klee gras-basierten Biogasgärresten ist ebenfalls als eine vielversprechende Alternative zu tierischen Düngemitteln, allerdings wird dieser Dünger nur für die wenigsten Öko-Ackerbaubetriebe zur Verfügung stehen, da rein pflanzenbasierte Biogasanlagen im ökologischen Landbau kaum genutzt werden. An dieser Stelle werden Betriebe langfristig vermutlich eher auf die Nutzung von Reststoffen aus urbanen Räumen (organische Haushaltsabfälle aus der „Braunen Tonne“) zurückgreifen, die zudem auch durch Nährstoffimporte in der Lage sind, die P und K-Lücke zu schließen.

Da aktuell die pflanzenbaulich sinnvolle Ausbringung von Klee grassilage als Düngemittel im Herbst durch die Düngeverordnung nicht möglich ist, sollten weitere Studien zu optimalen Ausbringzeitpunkten und C/N-Verhältnissen der Düngemittel im Frühjahr erfolgen, um das Risiko einer N-Immobilisierung durch Klee gras-basierte Düngemittel zu verringern.

Literaturverzeichnis

Benke, Anna Pia; Rieps, Ann-Marleen; Wollmann, Iris; Petrova, Ioana; Zikeli, Sabine; Möller, Kurt (2017): Fertilizer value and nitrogen transfer efficiencies with clover-grass ley biomass based fertilizers. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 107 (3), S. 395–411. DOI: 10.1007/s10705-017-9844-z.

Böhm, Herwart (2014): Unkrautregulierung durch Fruchtfolge und alternative Managementverfahren. In: *Julius-Kühn-Archiv* 443. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/27880/>.

Böhm, Herwart; Paulsen, Hans Marten; Fischer, Jenny; Moos, Jan Hendrik; Rahmann, Gerold (2014): Sammendrag af indlæg Plantekongres 2014 14. - 15. januar i Herning Kongrescenter. In: *Sammendrag af indlæg Plantekongres 2014*. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/27885/>.

Brozyna, Michal A.; Petersen, Søren O.; Chirinda, Ngonidzashe; Olesen, Jørgen E. (2013): Effects of grass-clover management and cover crops on nitrogen cycling and nitrous oxide emissions in a stockless organic crop rotation. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 181, S. 115–126. DOI: 10.1016/j.agee.2013.09.013.

Castell, Adelheid; Eckl, Thomas; Schmidt, Martin; Beck, Robert; Heiles, Eberhard; Salzedo, Georg; Urbatzka, Peer (2016): Fruchtfolgen im ökologischen Landbau: Pflanzenbaulicher Systemvergleich. Zwischenbericht über die Jahre 2005 – 2013 (Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft). Online verfügbar unter https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/schriftenreihe/fruchtfolgen-oekologischer-landbau_pflanzenbaulicher-systemvergleich_lfl-schriftenreihe.pdf, zuletzt geprüft am 07.04.2021.

Dreymann, Sonja; Loges, Ralf; Taube, Friedhelm; Heß, J.; Rahmann, G. (2005): Schnittgutabfuhr oder Gründüngung? Auswirkung der Klee gras-Nutzung auf Nitrat im Sickerwasser und Folgefrüchte. In: *Ende der Nische, Beiträge zur 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau*. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/3700/>.

Francksen, Sabrina; Zikeli, Sabine (2021): Phosphor im Ökologischen Ackerbau – Status Quo, Lösungsansätze und Herausforderungen. Teilbericht des EIP Projekts BRAVÖ - Mit betrieblichen Innovationen Bodenfruchtbarkeit und Nachhaltigkeit auf vieharmen und viehlosen Öko-Betrieben steigern. Universität Hohenheim.

Gerke, Jörg; Meyer, Ute (1995): Phosphate acquisition by red clover and black mustard on a humic podzol. In: *Journal of Plant Nutrition* 18 (11), S. 2409–2429. DOI: 10.1080/01904169509365074.

Gutser, R.; Ebertseder, Th.; Weber, A.; Schraml, M.; Schmidhalter, U. (2005): Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. In: *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 168 (4), S. 439–446. DOI: 10.1002/jpln.200520510.

Hansen, Sissel; Berland Frøseth, Randi; Stenberg, Maria; Stalenga, Jaroslaw; Olesen, Jørgen E.; Krauss, Maike et al. (2019): Reviews and syntheses: Review of causes and sources of N₂O emissions and NO₃ leaching from organic arable crop rotations. In: *Biogeosciences* 16 (14), S. 2795–2819. DOI: 10.5194/bg-16-2795-2019.

Helmert, Martin; Heuwinkel, Hauke; Pommer, Günther; Gutser, Reinhold; Schmidhalter, Urs (2003): N-Flüsse in gemulchtem und geschnittenem Klee gras: Warum Klee gras-Brache im Ökologischen Landbau (OL) die Erträge der Fruchtfolge nicht erhöht. Online verfügbar unter <https://mediatum.ub.tum.de/doc/1304999/file.pdf>.

Heuwinkel, Hauke; Loges, Ralf (2004): Mulchen oder Schnittnutzung von Klee gras - Auswirkung der Bewirtschaftung von Klee grasbeständen auf den N-Haushalt von Fruchtfolgen. In: Harald Schmidt (Hg.): Viehloser Öko-Ackerbau Beiträge, Beispiele, Kommentare. 1. Aufl. Berlin: Köster (Wissenschaftliche Schriftenreihe Ökologischer Landbau, 2), S. 21–25.

Kolbe, Hartmut; Schuster, Martina; Hänsel, Martin; Schließer, Ingeborg; Pöhlitz, Birgit; Steffen, Edwin; Pommer, Rene (2006): Feldfutterbau und Gründüngung im Ökologischen Landbau - Informationen für Praxis und Beratung. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/15102/1/Feldfutter.pdf>, zuletzt geprüft am 07.04.2021.

Laber, Hermann (2007): Abschätzung der N-Freisetzung aus unterschiedlich bewirtschafteten Klee-, Klee gras- und Luzernebeständen im Verlauf nachfolgender Weißkohlkulturen und im zweiten Jahr nach Umbruch (Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft). Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/13105/>.

Larsson, Lisbeth; Ferm, Martin; Kasimir-Klemedtsson, Asa; Klemedtsson, Leif (1998): Ammonia and nitrous oxide emissions from grass and alfalfa mulches. In: *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 51 (1), S. 41–46. DOI: 10.1023/A:1009799126377.

Loges, Ralf; Taube, Friedhelm (2007): Stickstoffflüsse im ökologischen Futterbaubetrieb. In: KTBL (Hg.): Bewertung ökologischer Betriebssysteme. Bodenfruchtbarkeit, Stoffkreisläufe, Biodiversität ; Beiträge zum KTBL-Fachgespräch "Systembewertung im ökologischen Landbau" vom 14. bis 15. April 2005 in Freising. Darmstadt: KTBL (KTBL-Schrift, 458), 84_94.

Möller, Kurt; Schultheiß, Ute (Hg.) (2014): Organische Handelsdüngemittel im ökologischen Landbau. Charakterisierung und Empfehlungen für die Praxis. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft. Darmstadt: KTBL (KTBL-Schrift, 499).

Möller, Kurt; Stinner, Walter (2009): Effects of different manuring systems with and without biogas digestion on soil mineral nitrogen content and on gaseous nitrogen losses (ammonia, nitrous oxides). In: *European Journal of Agronomy* 30 (1), S. 1–16. DOI: 10.1016/j.eja.2008.06.003.

Reimer, Marie; Hartmann, Tobias Edward; Oelofse, Myles; Magid, Jakob; Bünemann, Else K.; Möller, Kurt (2020): Reliance on Biological Nitrogen Fixation Depletes Soil Phosphorus and Potassium Reserves. In: *Nutr Cycl Agroecosyst* 118 (3), S. 273–291. DOI: 10.1007/s10705-020-10101-w.

Rundlöf, Maj; Persson, Anna S.; Smith, Henrik G.; Bommarco, Riccardo (2014): Late-season mass-flowering red clover increases bumble bee queen and male densities. In: *Biological Conservation* 172, S. 138–145. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.02.027.

Schmidt, Harald (1997): Viehlose Fruchtfolge im Ökologischen Landbau - Auswirkungen systemeigener und systemfremder Stickstoffquellen auf Prozesse im Boden und die Entwicklung der Feldfrüchte. Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/3716/>.

Schmidt, Harald (Hg.) (2004): Viehloser Ackerbau im ökologischen Landbau - Evaluierung des derzeitigen Erkenntnisstandes anhand von Betriebsbeispielen und Expertenbefragungen. Justus-Liebig-Universität Giessen.

Schulz, Franz (2012): Vergleich ökologischer Betriebssysteme mit und ohne Viehhaltung bei unterschiedlicher Intensität der Grundbodenbearbeitung. Effekte auf Flächenproduktivität, Nachhaltigkeit und Umweltverträglichkeit. Zugl.: Gießen, Univ., Diss., 2012. 1. Aufl. Berlin: Köster (Giessener Schriften zum ökologischen Landbau, Bd. 5).

Sorensen, J. N.; Grevsen, K. (2015): Strategies for cut-and-carry green manure production. DOI: 10.17660/ActaHortic.2016.1137.6.

Stein-Bachinger, Karin; Bachinger, Johann; Schmitt, Liliane (Hg.) (2004): Nährstoffmanagement im ökologischen Landbau - Ein Handbuch für Beratung und Praxis mit Anwendungs-CD. Unter Mitarbeit von Karin Stein-Bachinger, Johann Bachinger und Liliane Schmitt: KTBL (KTBL-Schrift 423). Online verfügbar unter <https://orgprints.org/id/eprint/5152/>.

Stinner, Paul Walter (2011): Auswirkungen der Biogaserzeugung in einem ökologischen Marktfruchtbetrieb auf Ertragsbildung und Umweltparameter. Zugl.: Gießen, Univ., Diss., 2010. 1. Aufl. Berlin: Köster (Giessener Schriften zum ökologischen Landbau, 4).

Stumm, Christoph (2015): Klee grasnutzung im viehlosen Acker- und Gemüsebau. Landwirtschaftskammer NRW (Versuchsbericht 2015). Online verfügbar unter https://www.oekolandbau.nrw.de/fileadmin/redaktion/PDFs/Forschung/Ergebnisse/nach_Jahren/2015/19_FF_KG_Transfer_15.pdf, zuletzt geprüft am 07.04.2021.

Stumm, Christoph; Köpke, Ulrich (2016): Ertragswirkung und Klimarelevanz alternativer Nutzungsformen von Futterleguminosen im viehlosen Acker- und Gemüsebau. In: H. Kage, K. Sieling, L. Francke-Weltmann und Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. (Hg.): 59. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. : Klimawandel und Qualität, Kurzfassungen der Vorträge und Poster ; 27. bis 29. September 2016, Gießen. 27. bis 29. September 2016, Gießen. Göttingen: Liddy Halm.

Stumm, Christoph; Köpke, Ulrich (2017): Düngung mit Sprossmasse von Futterleguminosen: Lachgasemissionen und Nitratverluste. In: Sebastian Wolfrum, Hauke Heuwinkel, Hans Jürgen Reents, Klaus Wiesinger und Kurt-Jürgen Hülsbergen (Hg.): Ökologischen Landbau weiterdenken. Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken : Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Freising-Weihenstephan, 7. bis 10 März 2017. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau; Wissenschaftszentrum Weihenstephan für Ernährung, Landnutzung und Umwelt; Hochschule Weihenstephan-Triesdorf; Institut für Ökologischen Landbau, Bodenkultur und Ressourcenschutz; Stiftung Ökologie & Landbau; Dr. Hans-Joachim Köster. 1. Auflage. Berlin: Verlag Dr. Köster.

Toleikienė, Monika; Arlauskienė, Aušra; Šarūnaitė, Lina; Šidlauskaitė, Gintarė; Kadžiulienė, Žydrė (2020): The effect of plant-based organic fertilisers on the yield and nitrogen utilization of spring cereals in the organic cropping system. In: *Zemdirbyste-Agriculture* 107 (1), S. 17–24. DOI: 10.13080/z-a.2020.107.003.

VDLUFA (Hg.) (1991): Band I Die Untersuchung von Böden. 4. Aufl.

VDLUFA (2000): 3.5.2.7 Bestimmung von Gesamt-Stickstoff: Verbrennungsmethode. In: VDLUFA (Hg.): VDLUFA-Methodenbuch Band II.1.

VDLUFA (2007): 8.10 Bestimmung von Mikronährstoffen in Düngemittel-extrakten, ICP-OES Methode. In: VDLUFA (Hg.): VDLUFA Methodenbuch Band II.1 Düngemittel - 3. Ergänzungslieferung 2007 zu Band II.1.

VDLUFA (2011): 2.1.3 Mikrowellenbeheizter Druckaufschluss. In: VDLUFA (Hg.): Band VII Umweltanalytik. Unter Mitarbeit von Enno Janßen. 4, Neubearb. und erw. Aufl. Darmstadt: VDLUFA-Verl. (Methodenbuch, Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten. Hrsg. von Rolf Bassler ; Bd. 7).

Woodcock, B. A.; Savage, J.; Bullock, J. M.; Nowakowski, M.; Orr, R.; Tallowin, J.R.B.; Pywell, R. F. (2014): Enhancing floral resources for pollinators in productive agricultural grasslands. In: *Biological Conservation* 171, S. 44–51. DOI: 10.1016/j.biocon.2014.01.023.

