



Bundesministerium  
für Landwirtschaft, Ernährung  
und Heimat



---

Schlussbericht zum Thema

---

# Optimierung der internen Klee grasverwertung in viehlosen Öko-Betrieben

FKZ: 2818OE023

Projektnehmer/Projektnehmerin: Universität Kassel

Gefördert durch das Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat auf Grund eines Beschlusses des deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische Landwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in die Praxis umgesetzt. Das Programm gliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder - das Forschungs- und das Informationsmanagement.

**Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter:**

[www.bundesprogramm.de](http://www.bundesprogramm.de)  
[www.oekolandbau.de/forschung](http://www.oekolandbau.de/forschung)

**Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:**

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung  
Bundesprogramm Ökologischer Landbau  
Deichmanns Aue 29  
53179 Bonn  
Tel.: 0228-6845-3280  
E-Mail: [boel-forschung@ble.de](mailto:boel-forschung@ble.de)

## Abschlussbericht

**Für ein Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (FuE-Vorhaben)  
zur „Optimierung des Nährstoffmanagements im Ökologischen Landbau“  
im Rahmen der Bekanntmachung Nr. 18/17/31  
vom 31.08.2017**

# Optimierung der internen Klee grasverwertung in viehlosen Öko-Betrieben

**[Akronym: Opti-KG]**

**Förderkennzeichen: 2818OE023**

**Laufzeit** Mai 2019 bis Dezember 2023

**Kontakt** Dr. Christian Bruns

Ökologischer Land- und Pflanzenbau  
Universität Kassel Nordbahnhofstr. 1a, D-37213 Witzenhausen  
Tel. 05542 – 981543

Bearbeitung und Co-Autoren: Dr. Christian Bruns, Dr. Benjamin Blumenstein, Prof. Dr. Detlev Möller

### Konsortium

**Universität Kassel – Ökologische Agrarwissenschaften**, vertreten mit den Fachgebieten Ökologischer Land- und Pflanzenbau (FÖL) (Prof. Dr. J. Heß/Prof Dr Miriam Athmann) und Betriebswirtschaft (BWL) (Prof. Dr. D. Möller), 4 **Landwirtschaftliche Betriebe (anonymisiert)** und die **Beratungsinstitutionen** Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen (LLH, Dr. Thorsten Haase) sowie Bioland GmbH (Stephan Gehrendes, Bioland NRW)

Gefördert durch



aufgrund eines Beschlusses  
des Deutschen Bundestages

## Kurzfassung

### **Optimierung der internen Klee grasverwertung in viehlosen Öko-Betrieben**

Dr. Christian Bruns [ch.bruns@uni-kassel.de](mailto:ch.bruns@uni-kassel.de), Dr. Benjamin Blumenstein [blumenstein@uni-kassel.de](mailto:blumenstein@uni-kassel.de), Prof. Dr. Detlev Möller [d.moeller@uni-kassel.de](mailto:d.moeller@uni-kassel.de)

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Optimierung der innerbetrieblichen Klee grasverwertung viehloser Biobetriebe entlang der Bereitstellungskette vom Schnitt bis zur Anwendung. Im Zentrum sollen die verlustarme Konservierung des Klee gras, die effiziente Verwertung der Nährstoffe und die wirtschaftliche Bewertung von Klee gras-Transferverfahren stehen.

Mit fünf Kompostierungsversuchen über jeweils 13 Wochen konnten die Rahmenbedingungen für eine Minimierung der Stickstoffverluste während der Kompostierung erfolgreich definiert werden. Damit ist eine Steigerung der betrieblichen Stickstoff Effizienz bei viehlosen Betrieben, die auf die oberirdische Biomasse angewiesen sind, möglich. Entscheidend für die Kompostierung als erfolgreiche Transferstrategie mit hoher Stickstoffeffizienz, ist die Kompostierung von stickstoffreichen Klee gras mit C-reichen externen Co-Substraten wie GrünGut oder betriebsinternen wie Stroh. Damit können im Vergleich zu einer reinen Klee gras Kompostierung (50 % N Verluste) die N-Verluste bis auf weniger als 10 % abgesenkt werden.

Sechs Feldversuche wurden Pandemie bedingt verspätet mit verschiedensten Transferdünger wie Gärreste, Silage, Cut&Carry, Klee graskomposten aus den Kompostierungsversuchen, Rindermistkompost und Kleepellets N-äquivalent angelegt. Es ergaben sich je nach C/N-Verhältnis, der Höhe der Gehalt an N-Gesamt und Nmin in den Düngern zwar gewisse Steigerungen im Ertrag aber nicht so differenziert wie erwartet. Die Komposte zeigten recht ansprechende Ergebnisse, die aber in der Mehrzahl der Fälle auf gleichem Niveau wie Cut&Carry oder andere Dünger lagen. Kurzfristige Effekte zeigten sich bei Gärresten, längerfristige Effekte ergaben sich in den Nachfruchtversuchen in Komposten, Cut&Carry oder Kleepellets.

Die ökonomischen Analysen umfassten eine grundlegende wirtschaftliche Bewertung verschiedener Klee grasdüngemittel-Bereitstellungsketten sowie aufbauend auf einer integrierten Stoffstromanalyse die ökonomische Stickstoff-Effizienz der Verfahren im Vergleich. Neben einer monetären Bewertung von Klee gras-Komposten über Nährstoff- und Humuswerte erfolgte eine betriebswirtschaftliche Optimierung sowie Risikobewertung des Einsatzes von Klee gras-Transferdüngemitteln basierend auf einem Fruchtfolgemodell. Um den Praxistransfer der Ergebnisse zu verbessern, wurde ein Kalkulationstool entwickelt, das als Entscheidungsunterstützung bei der betrieblichen Klee grasnutzung in Beratung und Praxis dienen kann

Im Projektverlauf wurden umfangreiche Wissenstransfermaßnahmen durchgeführt. Hierzu sind zum einen teils öffentliche Projektworkshops zu zählen ebenso wie Workshops mit Beratungspersonen mit dem Ziel der Optimierung des Entscheidungsunterstützungs-Tools. Darüber hinaus wurden zahlreiche Vorträge sowohl bei Praxisveranstaltungen als auch auf wissenschaftlichen Tagungen abgehalten. Weitere Bausteine des Wissenstransfers waren die Auftritte auf drei verschiedenen Ökofeldtagen sowie das Verfassen von Artikeln in Praxispublikationen oder Beiträge in einer KTBL-Broschüre zum Thema Kompostierung in der Landwirtschaft sowie 35 minütiger Lehrfilm.

## Abstract

The overall aim of the project was to optimize the on-farm utilization of clover grass on organic farms along the supply chain from cutting to application. The focus should be on the low-loss conservation of clover grass, the efficient utilization of nutrients and the economic evaluation of clover grass transfer processes.

With five composting trials, each lasting 13 weeks, the framework conditions for minimizing nitrogen losses during composting were successfully defined. This makes it possible to increase the operational nitrogen efficiency of livestock farms that rely on above-ground biomass. The decisive factor for composting as a successful transfer strategy with high nitrogen efficiency is the composting of nitrogen-rich clover grass with C-rich external co-substrates such as green manure or internal farm substrates such as straw. Compared to pure clover-grass composting (50 % N losses), N losses can be reduced to less than 10 %.

Six field trials were set up with a delay due to the pandemic using various transfer fertilizers such as fermentation residues, silage, cut & carry, clover-grass compost from the composting trials, cattle manure compost and clover pellets N-equivalent. Depending on the C/N ratio, the level of total N and N<sub>min</sub> in the fertilizers, there were certain increases in yield, but not as differentiated as expected. The composts showed quite pleasing results, but in the majority of cases they were at the same level as Cut&Carry or other fertilizers. Short-term effects were seen with fermentation residues, while longer-term effects were seen in the post-crop trials with composts, Cut&Carry or clover peelings.

The economic analyses included a basic economic evaluation of different clover-grass fertilizer supply chains and, based on an integrated material flow analysis, a comparison of the economic nitrogen efficiency of the methods. In addition to a monetary evaluation of clover-grass composts via nutrient and humus values, an economic optimization and risk assessment of the use of clover-grass transfer fertilizers was carried out based on a crop rotation model. In order to improve the practical transfer of the results, a calculation tool was developed that can serve as a decision-making aid for the operational use of clover-grass in consulting and practice

Extensive knowledge transfer measures were carried out during the course of the project. These included public project workshops as well as workshops with consultants with the aim of optimizing the decision support tool. In addition, numerous presentations were held both at practical events and at scientific conferences. Other components of the knowledge transfer included appearances at three different eco-field days as well as the writing of articles in practical publications or contributions to a KTBL brochure on composting in agriculture and a 35-minute educational film.

## Inhaltsverzeichnis

Abschlussbericht.....	1
Kurzfassung .....	2
Abstract .....	3
Abkürzungsverzeichnis .....	6
Tabellenverzeichnis .....	7
Abbildungsverzeichnis.....	9
1 Einführung - Gegenstand und Ziele des Vorhabens .....	11
1.2 Bezug zu den einschlägigen Zielen des BÖL oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen .....	12
1.2 Planung und Ablauf des Projektes.....	13
2 Stand der Forschung.....	16
3 Arbeitspaket 1 - Kompostierung von Klee gras - Exaktversuche.....	20
3.1 Material und Methoden .....	20
3.1.1 Design und Aufbau der Versuche .....	21
3.1.2 Anlage und Pflege der Versuche .....	21
3.1.3 Monitoring Kompostierungsprozess, Probennahmen und Datenerhebung.....	23
3.1.4 Auswertung und Bestimmung der Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff.....	25
3.1.5 Statistische Auswertungen.....	26
3.2 Material und Methoden – Spezifika Kompostierungsversuche .....	26
3.2.1 Kompostierungsversuch 1 A – Einfluss des C/N-Verhältnisses (KV_19_1).....	27
3.2.2 Kompostierungsversuch 1 B - Einfluss des C/N-Verhältnisses (KV 19_2).....	28
3.2.3 Kompostierungsversuch 2 - Einfluss von Art und Mengen an Strukturträgern (KV 20_2) 29	
3.2.4 Kompostierungsversuch 3 – Einfluss des Umsetzmanagements (KV 20_3).....	30
3.2.5 Kompostierungsversuch 4 - Einfluss von Umsetzhäufigkeit und zusätzlicher Klee graszugabe KV_21_3 .....	32
3.2.6 Kompostierungsversuch 5 - Einfluss von Wassermenge und Bewässerungszeitpunkt (KV 21_4) .....	33
3.2.7 Versuche auf Praxisbetrieben .....	33
3.3 Ergebnisse - Kompostierungsversuche.....	35
3.3.1 Kompostierungsversuch 1A (Juni – August 2019) – „Opti_KG_19_1“ .....	35
3.3.2 Kompostierungsversuch 1B (Juli – Oktober 2019) – „Opti_KG_19_2“ .....	37
3.3.3 Kompostierungsversuch 2 - Strukturträger und Strukturart (KV 20_2) .....	41
3.3.4 Kompostierungsversuch 3 Umsetzfrequenz und Mischung (KV 20_3).....	47
3.3.7 Betriebliche Versuche.....	51
4 Arbeitspaket 2 - Düngewirkung von Klee gras-Transferdüngern .....	52

4.1	Material und Methoden – Feldversuche.....	52
4.2	Ergebnisse.....	53
5	Arbeitspaket 3 - Ökonomik von Klee gras-Transferstrategien .....	55
5.1	Systemanalyse: pflanzenbauliche Effekte und Grundlage der ökonomischen Bewertung ..	55
5.2	Kosten verschiedener Klee gras-nutzungsverfahren.....	58
5.2.1	Prozessketten und Mechanisierung .....	58
5.2.2	Verfahrenskosten im Vergleich .....	60
5.2.3	Fokus Kompostierung von Klee gras .....	62
5.3	Ökonomische N-Effizienz im Verfahrensvergleich .....	69
5.4	Betriebswirtschaftliche Effekte der Düngung mit Klee gras-Transferdüngern .....	72
5.5	Ökonomische Bewertung von Kompost über den Nährstoff- und Humuswert.....	73
5.5.1	Nährstoffwert von Kompost.....	73
5.5.2	Humuswert von Kompost.....	74
5.5.3	Kombinierter Nährstoff- und Humuswert von Kompost.....	75
5.6	Betriebswirtschaftliche Optimierung und Risikoaspekte des Einsatzes von Klee gras-Transferdüngern.....	76
5.6.1	Betriebswirtschaftliche Optimierung einer Beispielfruchtfolge abhängig vom Einsatz bestimmter Klee gras-transferdüngemittel.....	76
5.6.2	Einfluss der Streuung des Stickstoff-Verlustpotentials auf die N-Kosten .....	76
5.7	Opti-KG-Tool für die betriebliche Optimierung der Klee gras-nutzung.....	77
5.7.1	Nutzung .....	78
5.7.2	Mit dem Opti-KG-Tool erstellte Auswertungsbeispiele .....	78
6	Arbeitspaket 4 – Wissenstransfer .....	87
7	Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	89
8	Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen .....	89
9	Zusammenfassung.....	90
10	Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen.....	91
11	Literaturverzeichnis .....	92
II.	Anhang zum Schlussbericht: Erfolgskontrollbericht.....	95

## Abkürzungsverzeichnis

Ca	Calcium
C <sub>t</sub>	Kohlenstoff total
FM	Frischmasse
G	Grundfläche
G <sub>M</sub>	Flächenbedarf Kompostmiete
GV	Großvieheinheit
ha	Hektar
Häq	Humusäquivalent
H <sub>SK</sub>	Höhe Schüttkegel
h <sub>M</sub>	Mietenhöhe
h <sub>P</sub>	Höhe Prisma
kW	Kilowatt
N <sub>t</sub>	Stickstoff total
m <sup>3</sup>	Kubikmeter
Mg <sub>t</sub>	Magnesium total
C/N-Verhältnis	
K	Kalium
L <sub>GM</sub>	Gesamtlänge Kompostmiete
L <sub>M</sub>	Mietenlänge
P	Phosphor
Q	Querschnitt Kompostmiete
T	Tonne
TM	Trockenmasse (=Trockensubstanz)
TS	Trockensubstanz (=Trockenmasse)
Vol%	Volumen-Prozent
V <sub>SK</sub>	Volumen Schüttkegel
Z <sub>v</sub>	Längenzusatz Kompostmiete

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Überblick zu den Kompostierungsversuchen im Opti-KG-Projekt.....	20
Tabelle 2: Kompostierungsdurchgänge und Zeitverläufe .....	27
Tabelle 3: TS-, Nt- und Ct-Gehalt in % sowie das C/N-Verhältnis der Ausgangssubstrate Klee gras und Stroh vor dem Aufsetzen des Kompostes am 03. Juni 2019 .....	27
Tabelle 4: Mittelwerte der TS-, N-, P-, K- und Mg-Gehalte sowie des C/N-Verhältnisses der Ausgangssubstrate .....	28
Tabelle 5: Mischung der Varianten .....	28
Tabelle 6: Mittelwerte (N = 3) der Analyseergebnisse der Anfangsmischproben jeder Variante vom 24.07.2019.....	29
Tabelle 7: Trockensubstanzgehalte der Klee grasbestandteile und Kleeanteil an Klee gras nach Quadratmeterschnitte für den Versuch 2 .....	29
Tabelle 8: Trockensubstanz-, Nt-, Ct-Gehalte sowie C/N Verhältnis von Klee gras, Grüngut und Stroh für den Versuch 2 .....	30
Tabelle 9: Festgelegte Volumenverhältnisse der Varianten .....	30
Tabelle 10: Probennahmen in Versuch 3 .....	31
Tabelle 11: Variantenverteilung Versuch 4 .....	32
Tabelle 12. Probennahmen in Versuch 4 .....	32
Tabelle 13: Varianten Aufteilung und Durchführung, Varianten in 3 Wiederholung .....	33
Tabelle 14: TS-, Nt-, Mg-, P-, und K-Gehalt sowie C/N-Verhältnis der drei Mischproben der Mieten (N=1) und des reinen Strohs bei Aufsetzen am 03.06.2019.....	35
Tabelle 15: Mittelwerte der TS-, Nt-, Mg-, P-, und K-Gehalt sowie des C/N-Verhältnis der Rottesäcke der drei Mieten (N=2; N=3) nach Kompostierung am 28.08.2019.....	35
Tabelle 16: Mittelwerte der Ct-, Nt-, Volumen-, P-, K- und Mg-Verluste (N=2; N=3) nach Berechnung anhand der Rottesäcke der drei Varianten .....	36
Tabelle 17: Mittelwerte der Gesamtkohlenstoff, -stickstoff, -kalium und -magnesium-Verluste (N=2, N=3) in % unter der Annahme, dass Phosphor nicht verlagert wurde .....	37
Tabelle 18: C/N-Verhältnis im Verlauf des Kompostierungsversuches 1B (N=3).....	38
Tabelle 19: Verlauf N-Gehalt während des Kompostierungsprozesses im Kompostierungsversuch 1B (N=3).....	39
Tabelle 20: Verluste-Berechnung für Nährstoffe nach N:P-Verhältnis (n=3).....	40
Tabelle 21: Zusammenfassung Stickstoffparameter Kompostierungsversuch 1B .....	41
Tabelle 22: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der N-Verluste [%] in den Varianten für die Zeiträume T0-T1, T0-T2, T0-T3 und T0-T4.....	42
Tabelle 23: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA mit den kategoriellen Faktoren Strukturträgeranteil und Strukturträgerart und der metrischen Zielvariable N-Verlust im Zeitraum T0-T4; Signifikanz-Kodierung: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 '' 1 .....	44
Tabelle 24 Gehalte an Kohlestoff, Stickstoff, dem CN Verhältnis und den N Verlustraten (basierend auf Aschegehalten) im Kompostierungsversuch 4 .....	49
Tabelle 25: N <sub>t</sub> , C <sub>t</sub> und P <sub>t</sub> Gehalte zu den unterschiedlichen Terminen in Kompostierungsversuch 5... 50	50
Tabelle 26: N <sup>t</sup> -Verlust (Basis N:P Verhältnis) im Kompostierungsversuch 5 .....	50
Tabelle 27: Auflistung der mit Klee gras-Transferdüngern durchgeführten Feldversuche, eingebrachte N- Mengen und Kulturen im Rahmen des Projektes OPTI-KG .....	52
Tabelle 28: Mittlere Erträge (in dt /ha, n=4) nach Düngung mit diversen Klee gras Transferbürgern (P = Pellets, C&C = Cut und Carry, KG S = Klee gras-Silage, Gärreste, RMK = Rindermistkompost und Klee graskomposte (1-4)) sowie relative Erträge im OPTI-KG Projekt in verschiedenen Kulturen auf der Domäne Frankenhausen (+/ - = Standardabweichung) (SW = Sommerweizen, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, Kart = Kartoffeln; NF = Nachfrucht).....	54

Tabelle 28: Pflanzenbauliche Effekte als Grundlage darauf aufbauender ökonomischer Analysen (Systemanalyse).....	57
Tabelle 29: Transferierte Frischmassenmengen sowie Bereitstellungskosten unterschiedlicher Klee grasnutzungsoptionen (pro ha Klee gras mit Ertrag von 40 t FM/ha und Jahr bei 4 Nutzungen) ..	60
Tabelle 30: Arbeitsvorgänge und Mechanisierung der in Tabelle 1 aufgeführten Klee grasnutzungsverfahren.....	61
Tabelle 31: Beispielhafter Substratmix eines Kompostierdurchgangs.....	64
Tabelle 32: Zusammengefasste Darstellung der Parameter zur Flächenberechnung des Kompostmietenbeispiels.....	65
Tabelle 33: Verfahrenskosten und Ermittlung notwendiger Mehrerträge verschiedener Klee grasnutzungsverfahren.....	72
Tabelle 34: Nährstoffwert pro Tonne Frischmasse Kompost mit Bezugsbasis von im ökologischen (Öko) oder im konventionellen (Konv.) Landbau einsetzbaren Düngemitteln .....	74
Tabelle 35: Kalkulation des monetären Humuswerts von Kompost.....	74
Tabelle 36: Nährstoff- und Humuswert von Kompost unter Berücksichtigung ökologischer und konventioneller Preise für Pflanzennährstoffe (Spannweiten in Klammern) .....	75
Tabelle 37: Beispielfruchtfolge mit IST-Erträgen und jeweiligen Marktpreisen .....	76
Tabelle 38: Mengenanfall Klee gras im Rahmen der Beispielfruchtfolge und Verteilung auf die Klee grasnutzungsverfahren (Beispiel 1).....	79
Tabelle 39: Komponenten der Klee graskompostierung sowie Kompostmanagement (Beispiel 1).....	79
Tabelle 40: Mengenbezogener Output (Frischmasse; Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie Raumbedarf nach der Kompostierung (Beispiel 1) .....	79
Tabelle 41: Mengenbezogener Output aller produzierten Klee grasdüngemittel (Frischmasse, Stickstoff) (Beispiel 1).....	80
Tabelle 42: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte (Beispiel 1) .....	82
Tabelle 43: Vergleich der Bereitstellungskosten (absolut, FM-bezogen, N-bezogen) verschiedener Klee grasdüngemittel im Vergleich (Beispiel 1).....	82
Tabelle 44: Mengenanfall Klee gras im Rahmen der Beispielfruchtfolge und Verteilung auf die Klee grasnutzungsverfahren (Beispiel 2).....	83
Tabelle 45: Komponenten der Klee graskompostierung für eine „Betriebsmischung“ mit 11 % Strukturträgeranteil und einer Alternativvariante „Mischung C+“ mit 20 % Strukturträgeranteil (Beispiel 2).....	83
Tabelle 46: Verlustraten der beiden Kompostvarianten im Vergleich (Beispiel 2) .....	83
Tabelle 47: Mengenbezogener Output (Frischmasse; Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie Raumbedarf nach der Kompostierung (Beispiel 2) .....	84
Tabelle 48: Mengenbezogener Output aller produzierten Klee grasdüngemittel (Frischmasse, Stickstoff) (Beispiel 2).....	84
Tabelle 49: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte der Variante „Betriebsmischung“ (Beispiel 2).....	85
Tabelle 50: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte der Variante „Mischung C+“ (Beispiel 2).....	86
Tabelle 51: Vergleich der Bereitstellungskosten (absolut, FM-bezogen, N-bezogen) verschiedener Klee grasdüngemittel im Vergleich (Beispiel 2).....	86

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur des OptiKG-Projektes.....	12
Abbildung 2: Bewertungsrahmen für Klee gras-Management .....	19
Abbildung 3: Grundriss der Komposthalle mit Anordnung der Mieten und Angabe der Mietennummer, Variantenummer und qualitativen Variantenbezeichnung, die Bemaßung ist in Meter angegeben (eigene Darstellung) .....	22
Abbildung 4: Verlauf, Anzahl und Häufigkeit des Umsetzens im Versuch 3 .....	31
Abbildung 5: prozentuale Änderung der Parameter Gesamtkohlenstoff, -stickstoff, -phosphor, -kalium und -magnesium sowie des Volumens durch die Kompostierung .....	36
Abbildung 6: Boxplots der N-Verluste der Varianten (N=3) zu den Zeitpunkten T1-T4 in Bezug auf T0 .....	42
Abbildung 7: Mittelwerte der N-Verluste [%] im Zeitraum T0-T4 in Abhängigkeit der Varianten mit Fehlerbalken: ± Standardabweichung und Kennzeichnung homogener Untergruppen (a-c) nach Tukey-HSD-Test (N=21) .....	43
Abbildung 8: Punktwolke des N-Verlusts [%] im Zeitraum T0-T4 in Abhängigkeit des mittleren Feuchtegehaltes [%] der Miete im Zeitraum T0-T4 (N=21).....	45
Abbildung 9: Korrelation zwischen N Verlust zum Zeitpunkt T4 - Ende des Versuches -und den C/N Verhältnis im Ausgangsmaterial.....	46
Abbildung 10: N-Verlust in % vom N-Gehalt im Ausgangsgehalt (Basierend auf N:P Verhältnis) im Mittel über den Faktor Umsetzmanagement im Kompostierungsversuch 3.....	47
Abbildung 11: N-Verlust in % vom N-Gehalt im Ausgangsgehalt (Basierend auf N:P Verhältnis) im Mittel über den Faktor Materialmischungen im Kompostierungsversuch 3 .....	48
Abbildung 12: Beispiel für einen Versuchsplan eines Feldversuches in Opti KG. ....	53
Abbildung 12: Stoffströme und Wirkbeziehungen (nummeriert) verschiedener Klee grasnutzungsverfahren innerhalb eines landwirtschaftlichen Betriebssystems: (1) Reduzierte N-Fixierleistung, reduzierte N-Bereitstellung Marktfrüchte; (2) Erhöhte Stickstoff-Emissionen auf Feld; (3) Räumliche Flexibilität des Einsatzes (Düngung, Beikrautunterdrückung); (4) Räumliche und zeitliche Flexibilität des Einsatzes (Düngung, Unkrautunterdrückung); (5) Düngewirkung und verfahrensabhängige Nährstoffverluste (N, C); (6) Phytosanitäre Wirkungen, Wasserhaushalt, Beikrauteffekte.....	56
Abbildung 13: Mögliche Prozessketten der Mechanisierung verschiedener Klee grasnutzungsverfahren .....	59
Abbildung 14: Parameter und ökonomische Effekte der Klee gras-Kompostierung .....	62
Abbildung 15: Schematische Darstellung der den Flächenbedarf beeinflussenden Mietenform zu Beginn und zum Ende eines Kompostierdurchgangs .....	63
Abbildung 16: Schematische Darstellung einer Kompostmiete und Beschriftungen der Maße.....	64
Abbildung 17: Schematische Darstellung eines Lagers für Komposte oder Lagersubstrate .....	66
Abbildung 18: Angabe der Breite verschiedener Elemente für die Kompostierung abhängig von der Mechanisierung (angehängter oder selbstfahrender Kompostwender) (schematisch) .....	67
Abbildung 19: Abbildung 20: Möglichkeiten der Überdachung von Kompostmieten und Substratlagern .....	68
Abbildung 20: Stickstoff-Flow und (N-)Bereitstellungskosten verschiedener Klee grasdüngemittel ....	71
Abbildung 21: Schwankungspotential der Stickstoff-Kosten verschiedener Klee grasdüngemittel abhängig von Verfahrenskosten und N-Verlustpotential. ....	77
Abbildung 22: Struktur des Opti-KG-Tools .....	78
Abbildung 23: Kreisförmige Darstellung der Beispielfruchtfolge mit Düngefenstern von Klee grasdüngemitteln und weiteren organischen Düngemitteln (Beispiel 1) .....	80
Abbildung 24: Flächenbilanzen für N, P, K, S Mg und Ca sowie Kohlenstoffbilanz (Beispiel 1) .....	81

Abbildung 25: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen (Beispiel 1) .....	81
Abbildung 26: Flächenbilanzen für N, P, K, S Mg und Ca sowie Kohlenstoffbilanz (Beispiel 2) .....	84
Abbildung 27: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen der „Betriebsmischung“ (Beispiel 2) .....	85
Abbildung 28: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen der „Mischung C+“ (Beispiel 2).....	86

# 1 Einführung - Gegenstand und Ziele des Vorhabens

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens ist die Optimierung der innerbetrieblichen Klee grasverwertung viehloser Biobetriebe entlang der Bereitstellungskette vom Schnitt bis zur Anwendung. Im Zentrum sollen die verlustarme Konservierung des Klee grasses, die effiziente Verwertung der Nährstoffe und die wirtschaftliche Bewertung von Klee gras-Transferverfahren stehen.

In den letzten Jahren haben sich die Betriebsformen der ökologisch wirtschaftenden Betriebe stärker differenziert. Neben klassischen viehhaltenden Gemischtbetrieben ist der Anteil von viehlos wirtschaftenden Betrieben oder Betrieben mit geringem Viehbesatz ( $<0,2$  GV ha<sup>-1</sup>) deutlich gestiegen (ca. 20 % [Schmidt 2003]; 34 % [Maaß et al. 2017]). Im Vergleich zu Gemischtbetrieben haben aber viehlose Betriebe durchschnittlich niedrigere Erträge und Probleme mit der Nährstoff- und Humusversorgung ihrer Böden (Schulz et al. 2017; Kolbe 2015, Brock et al. 2008). Ein entscheidender ertragslimitierender Faktor in ökologischen Produktionssystemen ist Stickstoff (N) (Berry et al. 2002), der über die symbiotische Fixierung durch den Anbau von Leguminosen ins System gelangt. Den höchsten N-Input gewährleistet der Anbau von Klee gras, eine Sicherstellung der N-Versorgung über den Anbau von Körnerleguminosen, Untersaaten und Zwischenfrüchten allein ist nicht möglich (Kelm et al. 2007).

Außerdem dienen Klee grasbestände dem Humusaufbau, der Unkrautunterdrückung und der Verbesserung der Bodenstruktur, um nur einige Leistungen zu nennen. Daher bauen auch viehlose Betriebe vielfach Klee gras als Hauptkultur an (Maaß et al. 2017). In einer Umfrage zur Klee grasverwertung auf vielschwachen Betrieben gaben 70 % der Betriebe an, mindestens einen Schnitt auf dem Feld zu belassen (Maaß 2016 - unveröffentlicht). Nur 17 % der Schnitte werden einem nachgeschalteten Transferverfahren wie Cut and Carry (14 % der befragten Betriebe), Silierung (11% der befragten Betriebe) oder Kompostierung (7,6 % der befragten Betriebe) von Klee gras zugeführt. Die oft gängige Praxis, die Bestände zu mulchen und das Material auf dem Feld zu belassen, reduziert den Netto-N-Gewinn um etwa 30% gegenüber einer abfahrenden Schnittnutzung (Loges et al. 2005; Heuwinkel et al. 2002), erhöht die Gefahr von N-Verlusten durch Auswaschung (Dreyman et al. 2005) und verursacht klimarelevante Emissionen von Lachgas (Stumm und Köpke 2017; Helmert et al. 2003). Wenn es die regionalen Gegebenheiten zulassen, kommt für manche Betriebe eine Futter-Mist-Kooperation in Frage (Nowak 2015; Loges und Heuwinkel 2004). Auch die Einspeisung in eine Biogasanlage und aliquote Rückführung der Gärreste ist eine Option.

BetriebsleiterInnen, für die diese Optionen regional nicht umsetzbar sind oder die sich bewusst dazu entscheiden, Klee grasaufwüchse innerbetrieblich zu nutzen (z.B. bei bioveganer Wirtschaftsweise), können Klee gras alternativ als Transferdünger einsetzen. Eine Möglichkeit ist der direkte Transfer von frischem Klee gras, wenn zum Zeitpunkt des Schnitts eine Nehmerkultur zur Verfügung steht (Cut and Carry). Die Umwandlung der Klee grasaufwüchse in mobil einsetzbare Düngemittel kann über eine Silierung, Kompostierung oder Pelletierung erfolgen. Sowohl in der Praxis (Maaß et al. 2017; Stumm und Köpke 2015), als auch in der Forschung (Kapitel 2) besteht reges Interesse an den verschiedenen Transferdüngerverfahren. Die Unsicherheit zu den Grenzen und Möglichkeiten der Verfahren sind aber groß. Dies betrifft sowohl die Einschätzung der Düngewirkung der Transferdünger als auch die betriebswirtschaftliche Bewertung der Verfahren.

Für landwirtschaftliche EntscheiderInnen (PraktikerInnen und BeraterInnen) besteht außerdem die Notwendigkeit, zwischen Maßnahmen zu wählen, die einerseits auf die Nährstoffeffizienz, andererseits aber auch auf die Wirtschaftlichkeit von Klee gras-Kompostierungs- und anderen Klee gras-Transferverfahren Auswirkungen haben. Da nur selten „win-win“-Situationen, sondern „trade-offs“, also Zielkonflikte auftreten, müssen Wirtschaftlichkeitsberechnungen interdisziplinär und praxisorientiert

durchgeführt werden. Angesichts der hohen Unsicherheit bei der Vorhersage von Nährstoffströmen, Kosten und Leistungen müssen die Spannweiten der Ergebnisse eine explizite Berücksichtigung erfahren. Die Wirtschaftlichkeitsbetrachtungen sollen daher im Projekt integriert die gesamten Bereitstellungsketten umfassen.

Im vorliegenden Vorhaben hat sich ein Konsortium aus Praxis, Beratung und Wissenschaft die **wissenschaftlichen und technischen Ziele** gesetzt, (i) einen Kompostierungs- Prozess für Klee gras mit dem Schwerpunkt der Minimierung von Stickstoffverlusten zu entwickeln, (ii) die Düngerwirkung der Komposte vergleichend mit anderen Klee gras-Transferverfahren in mehrjährigen Feldversuchen zu ermitteln und (iii) die wirtschaftliche Bewertung (Leistungs-Kosten-Rechnungen) verschiedener Klee gras-Düngungs-Strategien zur Verbesserung des Nährstoffmanagements auf Basis von praxisrelevanten Herstellungs- und Einsatzverfahren vorzunehmen und für die Praxis zu Verfügung zu stellen (Abbildung 1).

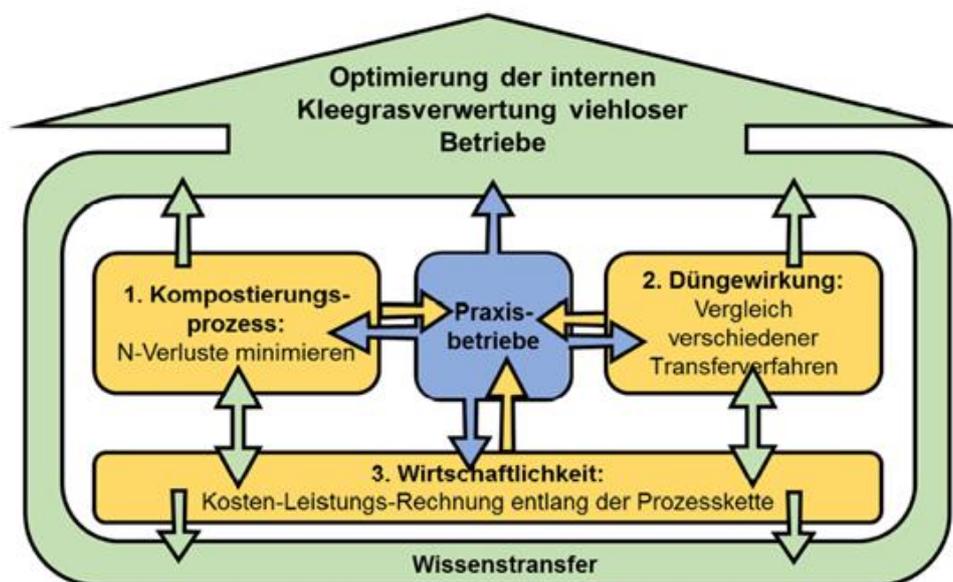


Abbildung 1: Struktur des OptiKG-Projektes

## 1.2 Bezug zu den einschlägigen Zielen des BÖL oder zu konkreten Bekanntmachungen und Ausschreibungen

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Optimierung der innerbetrieblichen Klee grasverwertung viehloser Biobetriebe entlang der Bereitstellungskette vom Schnitt bis zur Anwendung. Im Zentrum sollten die verlustarme Konservierung des Klee grasses, die effiziente Verwertung der Nährstoffe und die wirtschaftliche Bewertung von Klee gras-Transferverfahren stehen.

Die Ergebnisse des vorliegenden Vorhabens tragen in mehreren Bereichen zu den aktuellen förderpolitischen Zielen der Richtlinie des BMEL zur Förderung von Forschungs- und Entwicklungsvorhaben sowie von Maßnahmen zum Technologie- und Wissenstransfer in der ökologischen Land- und Lebensmittelwirtschaft bei. Dazu zählen insbesondere die **Weiterentwicklung des Nährstoffmanagements (Punkt 2.2.11)** und die **Weiterentwicklung von Produktionssystemen für viehlos wirtschaftende Betriebe (Punkt 2.2.2)**. Das Projekt hat in vielerlei Hinsicht die Nutzungsoptionen von Leguminosengras-

Gemengen insbesondere in viehlosen Ökobetrieben beleuchten und bewerten können. Hierzu zählen umfangreiche Untersuchungen zur Prozess- und Nährstoffeffizienz bei der Klee gras-Kompostierung, dem Einsatz von Klee grastransfer-Düngemitteln in ökologischen Fruchtfolgen mittels Düngeversuchen sowie die betriebswirtschaftliche Analyse von Kosten und Nutzen unterschiedlicher Klee gras-Transferdünger und deren ökonomischer Stickstoff-Effizienz. Die Arbeiten konnten zudem engen Bezug zu weiteren förderpolitischen Zielen wie der **Förderung und Weiterentwicklung des Kreislaufwirtschaftsprinzips auf betrieblicher Ebene (Punkt 2.1.1)** oder **den Erhalt und die Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit (Punkt 2.2.3)** herstellen. Außerdem adressierte das Projekt die Ziele der Bekanntmachung 17/18/31, da es „das System landwirtschaftliche Betriebe in den Fokus“ des Vorhabens stellte und neben den „Wechselwirkungen zwischen Boden und Pflanze“ auf das „Verständnis über Organisation und Funktion innerbetrieblicher Prozesse“ besonders einging. „Ein ganzheitlicher systemarer Forschungsansatz“ wurde im Verbund mit der Praxis verfolgt, um „innerbetriebliche Prozesse in ihren Zusammenhängen und den Wechselwirkungen im Betriebssystem zu analysieren und weiterzuentwickeln“.

## 1.2 Planung und Ablauf des Projektes

Der ursprünglich geplante Zeitraum für die Projektdurchführung war von Mai 2019 bis April 2022 (36 Monate) vorgesehen, wurde aber aufgrund der Corona- Pandemie wie auch weiteren wichtigen Inhalten, die im Projekt noch abgebildet werden sollten, bis Ende 2023 verlängert. Auch wenn sich aufgrund der Corona-Pandemie die Erreichung einiger Meilensteine im Projektablauf verzögert haben, konnten die geplanten Meilensteine auch aufgrund der gewährten Projektverlängerung allesamt im Verlauf des Projekts erreicht werden. Die Ausgabenplanung wurde mit dem Projektmitte lgeber erfolgreich abgestimmt.

### a) Arbeitspakete und Meilensteine

#### AP 1 Kompostierung

<b>Erwartete Ergebnisse:</b>		Differenzierte Daten und Maßnahmen für eine Stickstoff-verlustarme Kompostierung von Klee gras im Ökobetrieb
		Handlungsempfehlungen für Praktiker und Berater
<b>Meilensteine:</b>	M1:	Günstigste C/N-Verhältnisse für Klee gras-Grü ngut-Mischungen ermittelt (vorgesehen September 2019) <i>erfolgt bis Okt. 2019</i>
	M2:	Benötigte Anteile an Strukturträgern bekannt (Dezember 2019) <i>erfolgt bis August 2020</i>
	M3:	optimale Umsetzhäufigkeit für eine verlustminimale Kompostierung ermittelt (September 2020) <i>erfolgt bis Nov. 2020</i>
	M4:	Verifizierung der Einzelergebnisse durch eine dreifaktorielle Untersuchung (Dezember 2020) – <i>es wurden keine dreifaktoriellen Versuche durchgeführt aber 2 weitere 2-faktorielle Versuche zum Umsetzman gement und zur optimierten Bewässerung</i>
<b>Zusammenfassung</b>		Mit fünf Kompostierungsversuchen über jeweils 13 Wochen konnten die Rahmenbedingungen für eine Minimierung der Stickstoffverluste während der Kompostierung erfolgreich definiert werden. Damit ist eine Steigerung der betrieblichen Stickstoff Effizienz bei viehlosen Betrieben, die auf die oberirdische Biomasse angewiesen sind, möglich. Entscheidend für die Kompostierung als erfolgreiche

	Transferstrategie mit hoher Stickstoffeffizienz, ist die Kompostierung von stickstoffreichem Klee gras mit C-reichen externen Co-Substraten wie GrünGut oder betriebsinternen wie Stroh. Damit können im Vergleich zu einer reinen Klee gras Kompostierung (50 % N Verluste) die N-Verluste bis auf weniger als 10 % abgesenkt werden. Handlungsempfehlungen flossen in Arbeitspaket 4 und Merkblätter ein.
--	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

### AP 2 Feldversuche mit Transferdüngern

<b>Erwartete Ergebnisse:</b>	Differenzierte Ergebnisse zu der Düngereffizienz verschiedener Klee gras-Transferdünger gleichen Ausgangsmaterials
<b>Meilensteine:</b>	M5: Ergebnisse aus Feldversuch Winterung 2019 und Sommerung 2020 liegen vor (November 2020) – <i>erfolgt in Form von 2 Sommerungen 2021 inclusive Nachfruchtversuchen im Jahr 2022</i>
	M6: Ergebnisse aus Feldversuch Winterung 2020 und Sommerung 2021 liegen vor (November 2021) – <i>erfolgt in Form einer Winterung 2021/2022 und einer Sommerung 2022</i>
<b>Zusammenfassung</b>	Sechs Feldversuche wurden Pandemie bedingt verspätet mit verschiedensten Transferdüngern wie Gärreste, Silage, Cut&Carry, Klee graskomposten aus den Kompostierungsversuchen, Rindermistkompost und Klee pellets N-äquivalent angelegt. Es ergaben sich je nach C/N-Verhältnis, der Höhe der Gehalt an N-Gesamt und Nmin in den Düngern zwar gewisse Steigerungen im Ertrag aber nicht so differenziert wie erwartet. Die Komposte zeigten recht ansprechende Ergebnisse, die aber in der Mehrzahl der Fälle auf gleichem Niveau wie Cut&Carry oder andere Dünger lagen. Kurzfristige Effekte zeigten sich bei Gärresten, längerfristige Effekte ergaben sich in den Nachfruchtversuchen in Komposten, Cut&Carry oder Klee pellets.

### AP 3 Ökonomik verschiedener Klee gras-Transfer-Strategien

<b>Erwartete Ergebnisse:</b>	Wirtschaftliche Bewertung verschiedener Kompostbereitstellungsketten mittels Kosten-Leistungs-Rechnung Daraus abgeleitet szenariengestützte Aussagen zu Rankings und Break-even-Punkten bestimmter Maßnahmen unter expliziter Berücksichtigung der Unsicherheit
<b>Meilensteine:</b>	M7: Systemanalyse und Kosten-Leistungsmodell fertiggestellt und projektintern getestet - <i>erfolgt</i>
	M8: Szenarienrechnungen konzipiert und durchgeführt - <i>erfolgt</i>
	M9: Risikobetrachtungen sind implementiert und bewertet - <i>erfolgt</i>
<b>Zusammenfassung</b>	Die ökonomischen Analysen umfassten eine grundlegende wirtschaftliche Bewertung verschiedener Klee grasdüngemittel-Bereitstellungsketten sowie aufbauend auf einer integrierten Stoffstromanalyse die ökonomische Stickstoff-Effizienz der Verfahren im Vergleich. Neben einer monetären Bewertung von Klee gras-Komposten über Nährstoff- und Humuswerte erfolgte eine betriebswirtschaftliche Optimierung sowie Risikobewertung des Einsatzes von Klee gras-Transferdüngemitteln basierend auf einem Fruchtfolgemodell. Um den

	Praxistransfer der Ergebnisse zu verbessern, wurde ein Kalkulations-tool entwickelt, das als Entscheidungsunterstützung bei der betrieblichen Klee grasnutzung in Beratung und Praxis dienen kann.
--	----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

#### AP 4: Technologie- und Wissenstransfer in die Praxis

<b>Erwartete Ergebnisse:</b>		Intensive Verbreitung der Ergebnisse durch interaktive Workshops, Feldtage und die Herausgabe eines Merkblattes in Zusammenarbeit mit der Beratung und Praxis Netzwerken.
<b>Meilensteine:</b>	M10/12:	Workshop 1 und 3 zur Kompostherstellung und Kompostierung von Klee gras erfolgt (6/2020 und 6/2021)
	M11/13:	Workshop 2 und 4 zu den ökonomischen Rahmenbedingungen der Klee grasverwertung erfolgt (2/2021 und 12/2021) und Merkblatt verfasst (12/2024)
<b>Zusammenfassung</b>		Im Projektverlauf wurden umfangreiche Wissenstransfermaßnahmen durchgeführt. Hierzu sind zum einen teils öffentliche Projektworkshops zu zählen ebenso wie Workshops mit Beratungspersonen mit dem Ziel der Optimierung des Entscheidungsunterstützungs-Tools. Darüber hinaus wurden zahlreiche Vorträge sowohl bei Praxisveranstaltungen als auch auf wissenschaftlichen Tagungen abgehalten. Weitere Bausteine des Wissenstransfers waren die Auftritte auf drei verschiedenen Ökofeldtagen sowie das Verfassen von Artikeln in Praxispublikationen oder Beiträge in einer KTBL-Broschüre zum Thema Kompostierung in der Landwirtschaft sowie 35-minütiger Lehrfilm.

## 2 Stand der Forschung

In einer Umfrage zum aktuellen Klee grasmanagement vieh armer Betrie be konnten Maaß et al. (2017) die grundsätzlich hohe Bedeutung bestätigen, die viehlose Betrie be den Klee gras-Transferverfahren beimessen, und feststellen, dass die Entscheidung für ein bestimmtes Transferverfahren betriebsindividuell getroffen und begründet wird. Zwar sind die Silierung oder Kompostierung von Klee gras den befragten LandwirtInnen prinzipiell bekannt, unter den Praktikern herrscht aber Unsicherheit in Bezug auf den Nutzen und die Kosten der Verfahren. Insbesondere der Kenntnisstand zur Düngerwirkung aus diesen Verfahren wird als sehr unzureichend eingeschätzt. Dies ist nicht verwunderlich, wenn man sich die Trefferquote bei einer Recherche in einschlägigen Datenbanken (SCOPUS) vergegenwärtigt, die nur in im einstelligen Bereich liegen.

Aus den wenigen vorliegenden Studien lassen sich in der Tendenz eher widersprüchliche als einheitliche Schlüsse ziehen. Umfassende Untersuchungen entlang der gesamten Prozesskette mit mehrjährigen Feldversuchsergebnissen, die vergleichend die Düngewirkungen der verschiedenen Transferverfahren bearbeitet haben, sind nicht zu finden. Ein großes Manko sind darüber hinaus die geringen Umfänge der Kompostierungs-Untersuchungen, die beispielsweise ein differenziertes Bild zur Düngewirkung von Klee graskomposten in Abhängigkeit der Prozessführung hätten ergeben können.

Carter et al. (2014) verglichen in dreimonatigen Inkubationsexperimenten die N-Freisetzung im Boden nach der Ausbringung von Klee grassilage und Klee gras-Stroh-Kompost. Bei der Silage wurde, je nach Bodenbearbeitungsart, ein Drittel des ausgebrachten Stickstoffs innerhalb der Versuchszeit pflanzenverfügbar. Aus dem Kompost hingegen fand keine N-Freisetzung statt. Im Gegenteil, in einer Variante (Bodenbearbeitung mit der Egge) wurde sogar eine Immobilisierung von im Boden vorhandenem mineralischen N festgestellt. Die AutorInnen vermuten als Grund hierfür, dass die Rotte zum Ausbringungszeitpunkt noch nicht abgeschlossen war (Grund: fehlende Feuchtigkeit im Material). Ein reiferer Kompost, so Carter et al. (2014) hätte vermutlich bessere Düngeeigenschaften gezeigt. Sørensen et al. (2013) stellten in Feldversuchen mit Sommergerste eine höhere Düngewirkung von siliertem (32-48 % im Vgl. zur Mineraldüngung) als von (mit Stroh) kompostiertem (13-22 % im Vgl. zur Mineraldüngung) Klee gras fest. Insgesamt konnten sie einen negativen linearen Zusammenhang zwischen dem C/N-Gehalt des Düngers und der Düngewirkung feststellen. Zum gleichen Ergebnis kamen auch Sørensen und Thorup-Kristensen (2011). Allerdings kam es bei der Anwendung von Silage zu Winterroggen zu Pflanzenschädigungen und Ertragsminderungen, vermutlich durch temporär toxisch wirkende organische Säuren.

Benke et al. (2017) untersuchten den kurzzeitigen Düngeeffekt von kompostiertem, siliertem und frischem Klee gras sowie von Biogasgülle aus der Vergärung von Klee gras in Gefäßversuchen bei N-äquivalenter Düngung zu Weidelgras. Die höchste N-Aufnahme in die Pflanze wurde mit der Biogasgülle erzielt (64 % d. ausgebrachten N), die niedrigste mit Kompost (6 % d. ausgebrachten N), was aufgrund der Anteile an mineralisiertem Stickstoff in den Substraten auch nicht verwunderlich ist. Mithilfe von Modellrechnungen wurden die Feld-zu-Feld und die Gesamt-N-Transfereffizienzen abgeleitet. Kompost schnitt sowohl bei der kurz- als auch bei der langfristigen Betrachtung schlecht ab. Die AutorInnen raten sogar davon ab, eine Kompostierung überhaupt für die Aufbereitung von N-reichem Material in Betracht zu ziehen.

In den Grundsätzen des ökologischen Landbaus wird jedoch der Einsatz von kompostierten Materialien wegen der positiven Effekte auf Bodenfruchtbarkeit und Bodengesundheit bevorzugt (EG-Öko-Basisverordnung 834/2007). Während der Kompostierung werden in einem aeroben Prozess zunächst schwer für Pflanzen zugängliche organische Rohstoffe aus dem Betrieb in pflanzenverwertbare Stoffe

transformiert und konserviert, außerdem entstehen wertvolle Dauerhumusformen (Wilbois et al. 2013). Es besteht allerdings die Gefahr, dass Nährstoffe gasförmig verloren gehen oder ausgewaschen werden. Durch die Vermeidung von Sickerwasserausträgen können Phosphor- und Kaliverluste weitgehend ausgeschlossen werden. Gasförmige N-Verluste während der Kompostierung können zwischen 5 und 70% liegen und treten vor allem in Form von Ammoniak ( $\text{NH}_3$ ) auf (Körner 2008; Sommer 2001; Martins und Dewes 1992; Witter und Lopez-Real 1987). Beeinflusst wird die Höhe dieser Verluste durch verschiedene Faktoren, die sich zudem untereinander beeinflussen: Temperatur, pH-Wert und Feuchtegehalt während der Rotte, sowie der Menge und Verfügbarkeit des vorliegenden C und N (Körner 2008; Peigné und Girardin 2004; Martins und Dewes 1992)

Benke et al. (2017) veranschlagen, basierend auf Literaturwerten, für die Kompostierung von Klee gras Verluste in Höhe von 50%. In einer der herangezogenen Studien (Martins und Dewes 1992) traten bei der Kompostierung von Stroh mit Gülle besonders hohe Verluste auf: 46,8 bis 77,4% in Form von  $\text{NH}_3$  und 9,6 bis 19,6% durch Auswaschung. Wegen ihrer spezifischen Eigenschaften lässt sich eine Kompostierung von Gülle mit Stroh aber nur schwer mit einer Klee gras-Kompostierung vergleichen. Sommer et al. (2001) und Eghball et al. (1997) ermittelten bei der Kompostierung von Rindermist deutlich niedrigere Verluste (28% bzw. 19 – 42%). Bei der Kompostierung von Biogut gingen in Versuchen von Beck-Friis et al. (2004) 24 bis 33% des anfänglich enthaltenen Stickstoffs verloren. In eigenen Versuchen (2016 unveröffentlicht) mit unterschiedlichen Ausgangssubstraten (Klee gras, Rindermist, Grüngut, Biogut) und deren Mischungen gingen durchschnittlich knapp 24 % des zu Beginn im Material enthaltenen N verloren. Zwar waren die Verluste bei der Kompostierung von reinem Klee gras besonders hoch (49,5%), in einer Klee gras/Grüngut-Mischung (3:1) traten jedoch nur Verluste in Höhe von 11,3% auf.

Wie bereits erwähnt, wurde in den genannten Versuchen meist keine Düngewirkung von Kompost festgestellt. Im Feldversuch mit Winterweizen (2017 unveröffentlicht) schnitten die selbst hergestellten Klee graskomposte nicht schlechter ab als die Varianten mit frischem oder siliertem Klee gras, im Gegenteil: Tendenziell konnten durch eine N-äquivalente Kompostdüngung höhere Erträge erzielt werden als in mit den anderen Transferverfahren. Die eingesetzten Komposte enthielten auch deutlich höhere N-Gehalte als die Vergleichskomposte der aufgeführten Studien: 2,4 % (i. d. TM) bei der Kompostierung mit Grüngut, 4,0 % (i. d. TM) bei der Kompostierung von reinem Klee gras (eigene Daten – unveröffentlicht) im Vergleich zu 1,34 % (i. d. TM) bei Benke et al. (2017).

Entscheidend für geringe N-Verlusten einerseits und eine entsprechend gute Düngewirkung andererseits ist eine den gesamten Kompostierungsprozess umfassende optimale Rotteführung, die die Auswahl und die Aufbereitung des Inputmaterials, die Kontrolle von Temperatur sowie des Wasser- und Gashaushaltes während der Rotte und abschließend eine verlustarme Lagerung umfasst. Werden diese Dinge beachtet, so lassen sich offenbar deutlich positivere Ergebnisse erzielen.

Während Temperatur und pH-Wert nur in gewissen Grenzen zu steuern sind, sind die Ausgangsgehalte der Nährstoffe, die Struktur der Mieten und die Aufrechterhaltung und Kontrolle der Feuchtigkeit prozessabhängige Größen, die gesteuert werden können. Insbesondere in der thermophilen Anfangsphase der Rotte besteht die Gefahr hoher Ammoniakverluste, die durch Erweiterung des C/N-Verhältnisses in gewissem Rahmen eingeschränkt werden kann. Der Gashaushalt kann durch die Mietengeometrie, kohlenstoffreiche Strukturträger, die Umsetzfrequenz der Mieten und den Wasserhaushalt gesteuert werden. Bei N-reichen Ausgangsmaterialien mit einem hohem Feuchtegehalt wird empfohlen, kohlenstoffreiche/lignocellulose Materialien beizumengen, um einerseits das C/N-Verhältnis zu erhöhen und andererseits die Struktur zu verbessern (Brown et al. 2008; Körner 2008). Eine Möglichkeit ist die Beimischung von Stroh, das auf den meisten viehlosen Betrieben auf dem Feld belassen wird. Die Humuswirkung bei Verbleib auf dem Feld ist allerdings gering (Zimmerer et al. 2005; Thomsen

2004; Soon 2012). Wichtig ist neben der Erweiterung des C/N-Verhältnisses auch die zugeführte Kohlenstoffqualität (Eklind und Kirchmann 2000). Während Eklind und Kirchmann (2000) annehmen, dass die N-Verluste durch Vorliegen ausreichender Mengen von schnell verfügbarem C verringert werden können, rät Körner (2008) zur Beimischung von schwerer abbaubaren C-Quellen. Ziel dieser Maßnahmen ist die Förderung der Nitrifizierung der organischen Substanz. Optimale Bedingungen für die Nitrifizierung in Kompostmieten sind Temperaturen zwischen 25 und 35°C und O<sub>2</sub>-Gehalte von 16 Vol.-%. Ab Temperaturen von 45°C kommen Nitrifizierungsprozesse zum Erliegen (Willers et al. 1998) und Ammonifikationsprozesse herrschen vor, bei denen wiederum NH<sub>3</sub> entsteht und entweichen kann.

Um verlässliche Empfehlungen für die Praxis bereitstellen zu können, wurden daher umfangreiche Kompostierungsversuchen (ein- und mehrfaktoriell) mit der Variation der Substrateigenschaften und Rottebedingungen durchgeführt, so dass schrittweise die Bedingungen für die Minimierung von Nährstoffverluste während der Kompostierung von Klee gras ermittelt werden konnten, sowie Feldexperimente, in denen umfassend die Nährstoffeffizienz der Komposte im Vergleich zu anderen Transferverfahren dargestellt werden. Flankiert wurden diese Kernuntersuchungen mit intensiven ökonomischen Untersuchungen bis zur Entwicklung eines Entscheidungshilfetools für die Beratung und landwirtschaftliche Betriebe zur Bewertung der für sie günstigsten Klee gras Transferverfahren.

Als Richtschnur wurde ein Bewertungsrahmen für das Klee gras Management aufgestellt, der die differenzierten Kriterien für die Rahmenbedingungen auf Betrieben zeigt (Abbildung 2). Als Hauptkriterien gehören dazu die Nährstoffbereitstellung einerseits und die optimierte Nährstoffversorgung der Marktfrüchte andererseits, insgesamt sodann deren ökonomische Effizienz vor dem Hintergrund einer differenzierten Betrachtung der betrieblichen Rahmenbedingungen. Dies war die Leitlinie während des gesamten Projektes und auch Maßgabe für die vielfältigen Workshops und Aktivitäten im Wissenstransfer. Im Folgenden erläutern wir Material und Methoden sowie die Ergebnisse entlang der Arbeitspakete.

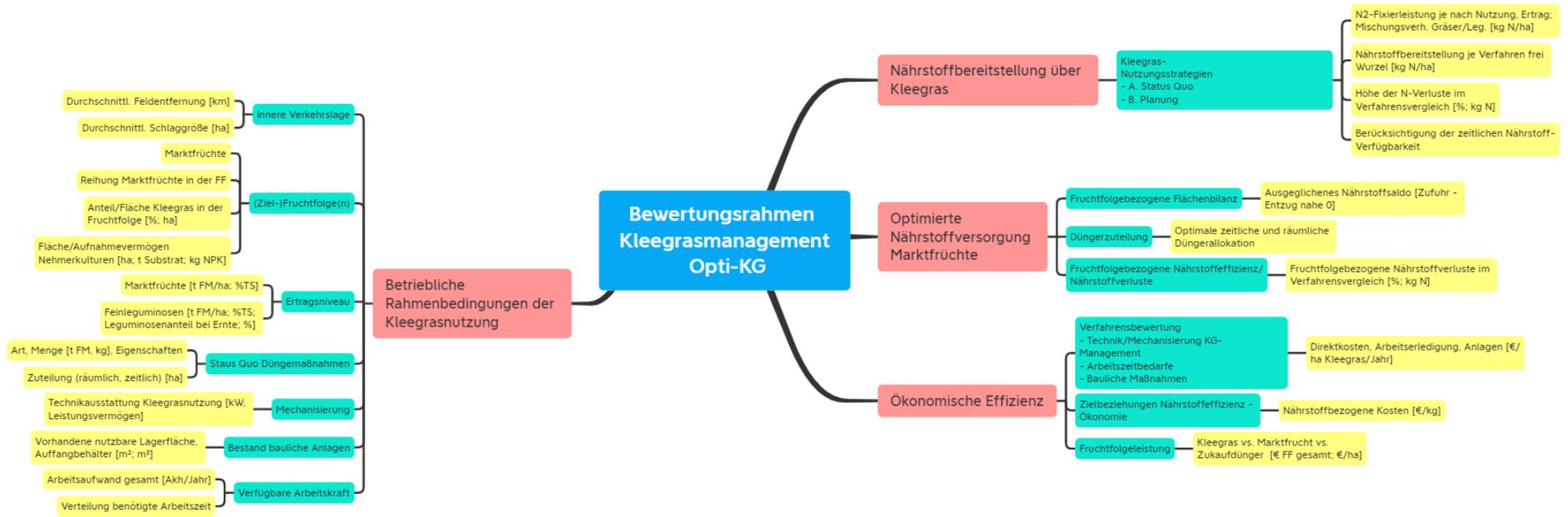


Abbildung 2: Bewertungsrahmen für Klee gras-Management

### 3 Arbeitspaket 1 - Kompostierung von Klee gras - Exaktversuche

Der Kompostierung von Klee gras wurde im Opti-KG Projekt intensiv Beachtung geschenkt. Fünf Versuche wurden unter quasi Praxis Bedingungen als Exaktversuche auf der hessischen Staatsdomäne Frankhausen angelegt (Tabelle 1). Untersuchungsschwerpunkt war der Aspekt „Minimierung von Stickstoffverlusten während der Rotte“. Die Größe der Mieten, die Verwendung üblicher maschineller Ausstattungen und Materialien waren ebenso mit betrieblicher Praxis vergleichbar wie Verfahrensschritte für eine ordnungsgemäße Kompostierung. Ergänzt wurden die Exaktversuche mit Untersuchungen unter reinen Praxisbedingungen, die auf zwei der angeschlossenen Partnerbetriebe angelegt worden sind.

Tabelle 1 zeigt die Hauptfragestellungen und Informationen zu den gewählten Varianten sowie den ausgewählten Co-Substraten, die dem Klee gras während der Kompostierung zugesetzt worden sind. Während für die Versuche 1 und 2 grundsätzliche Erwägungen im Mittelpunkt des Interesses standen wie die Auswahl von Klee gras und Co-Substrat-Anteilen, so waren in den Versuchen 3-5 eher rein praktische Verfahrensfragen wie das Umsetzmanagement, die zusätzliche Zugabe von Klee gras während des Kompostierungsprozesses und das Bewässerungsmanagement die Schwerpunktthemen.

Tabelle 1: Überblick zu den Kompostierungsversuchen im Opti-KG-Projekt

Versuch	Fragestellung	Varianten	Co-Substrate
1	Einfluß des C/N Verhältnis	C/N-Verhältnis der Mieten auf 15 bis 40	Stroh, Sägemehl
2	Einfluß von Art der Strukturträger / des Strukturanteils (vol. %)	25% und 65% Klee gras, Anteil Strukturträgerzuschlag und Art	Stroh, Grüngut Grüngut + Stroh
3	Einfluß Umsetzmanagement	4 Umsetzvarianten: 10 (Kontrolle), 20 (mehr / Lübke), 5 (weniger)	Klee gras (KG) + Grüngut KG + Grüngut + Stroh
4	Einfluß Umsetzhäufigkeit und zusätzliche Klee graszugabe	Umsetzhäufigkeit: 11x, 15x, Kontrolle KG 6 Wochen, hoch/niedrig	KG + Grüngut + Stroh
5	Einfluß von Bewässerungsmenge und -zeitpunkt	Wasserzugabe: zu viel / früh; zu viel / spät; zu wenig/früh; zu wenig/spät; Kontrolle	KG + Grüngut + Stroh

#### 3.1 Material und Methoden

Das Kapitel Material und Methoden ist im Nachfolgenden in einen allgemeinen (Kapitel 3.1) und einen speziellen Teil zu den Kompostierungsversuchen (Kapitel 3.2) unterteilt. Um Wiederholungen zu vermeiden, finden sich die Angaben, die in allen Versuchen zur Anwendung kamen, zusammengefasst im allgemeinen Teil, versuchsspezifische Aspekte zu Material und Methoden werden in den Kapiteln zu den Kompostierungsversuchen dargestellt.

### 3.1.1 Design und Aufbau der Versuche

Alle Versuche wurden auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen in 34393 Grebenstein auf einer überdachten Betonfläche durchgeführt. Die Komposthalle ist nach Westen, der Hauptwindrichtung (HESSISCHES LANDESAMT FÜR UMWELT UND GEOLOGIE O. J.), geschlossen. Hierdurch wird eine direkte Beeinflussung der Kompostmieten durch Regen verhindert und der Windeinfluss vermindert.

Bei allen Versuchen handelte es sich um randomisierte, zumeist zweifaktorielle Versuche in einem Completely Randomised Design, in dem der Einfluss der Faktoren auf die Reduzierung und Minimierung der Stickstoffverluste während der Rotte und den Einfluss auf die N Gehalte der Substrate untersucht wurde (siehe Tabelle 1). Daraus ergaben sich vollständige Prüfglieder (Varianten), die zusammen mit einer Kontrolle aus reinem Klee gras immer in drei echten Wiederholungen angelegt waren.

Abbildung 3 zeigt beispielhaft einen Plan zur Anlage der Mieten in der Kompostierungshalle. Wenn nicht anders erwähnt, betrug die Grundfläche der Mieten maximal 3m\*5m. Die Form und die Volumina allerdings variierten während des Kompostierungsprozesses von Prüfglied zu Prüfglied aufgrund der unterschiedlichen Ausprägungen und Anteile der Strukturmaterialien und sind über die Zeit aufgrund des Umsetzens der Mieten und der stattfindenden Rotte kontinuierlichen Veränderungen unterworfen gewesen.

Das Klee gras wurde aus betrieblichen Feldern der Staatsdomäne verwendet. Soweit nicht anders erwähnt, fand die Mahd der Flächen am Nachmittag des Tages vor Anlage der Versuche statt. Die Mahd erfolgte mit einem Scheibenmäherwerk ohne Aufbereiter. Mittels eines Kurzschnittladewagens wurde das Klee gras am darauffolgenden Tag morgens aufgeladen und zur Komposthalle transportiert.

Zur Ermittlung der Masse und Qualität des Klee grasses wurden an jeweils vier repräsentativen Stellen von je einem ¼- Quadratmeter auf den Schlägen das Klee gras händisch geschnitten. Die Proben wurden nach Klee und Gras sortiert, eingewogen (Bruttomasse), auf Massekonstanz getrocknet und erneut eingewogen (Nettomasse). Im jeweils spezifischen Teil im Kapitel Material und Methoden sind die entsprechenden Daten wie die durchschnittlichen Trockensubstanz-Gehalte und Anteil des Klees sowie die N Gehalte von Gras und Klee aufgeführt.

Als Ko-Substrate wurde geschreddertes GrünGut Material aus Baum und Strauchschnitt verwendet sowie in der Regel Weizenstroh aus Quaderballen der Staatsdomäne Frankenhausen. Das holzreiche geschredderte GrünGut stammt aus der Sammlung der Vogteier Kompost GmbH aus 37213 Witzenhhausen und aus einer GrünGut-Kompostierungsanlage des Landkreis Kassel in Hofgeismar. Das Material wurde stets frisch geliefert und lagerte nicht länger als vier Tage auf der Domäne Frankenhausen.

### 3.1.2 Anlage und Pflege der Versuche

#### *Herstellung der Mischungen und Umsetzfrequenz*

Das Herstellen der unterschiedlichen Mischungen für die Kompostierungsversuche erfolgte nach Volumen. Dazu wurden nach einem festgelegten Schema (Befüllung, Verfestigung) die Schüttdichten des Klee grasses und der Strukturmaterialien Stroh und GrünGut in 90 l Kunststoffkübeln bestimmt. Anhand der ermittelten Schüttdichten (Vorgehen siehe unten) und der für die Versuche festgelegten Volumenverhältnisse wurde die Masse für die Komponenten abgeleitet. Die einzelnen Komponenten wurden mit einem Teleskoplader (Hersteller: JCB, Typ: 536-60 Agri Super) in einen Ein-Schnecken-Futtermischwagen mit stehender Mischschnecke (Hersteller: BvL van Lengerich, Typ: VMIX 12 PRO) gefüllt und gemischt.

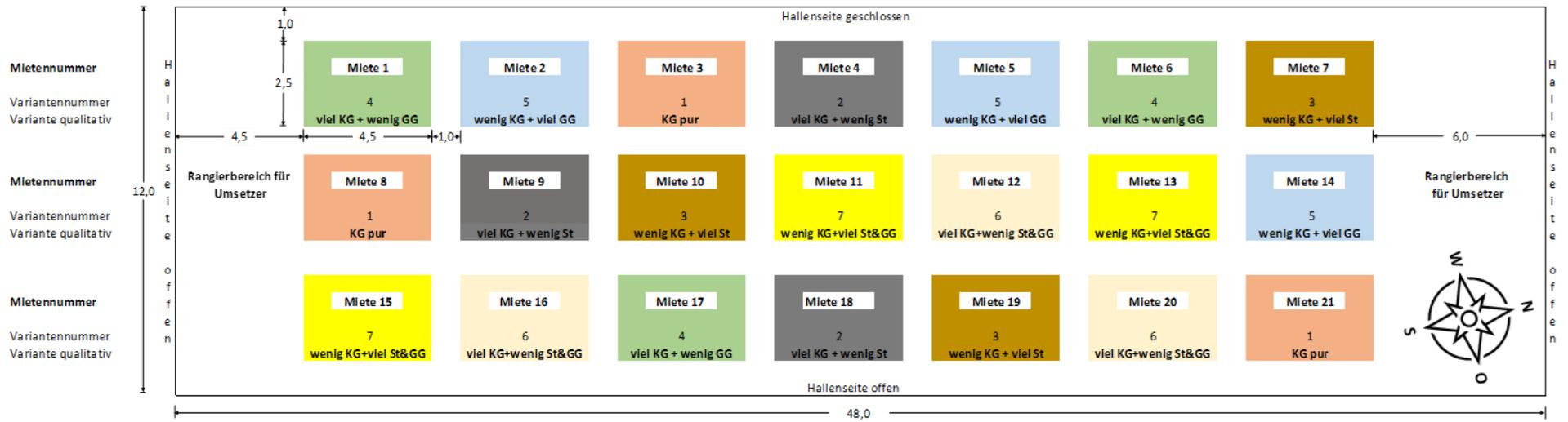


Abbildung 3: Grundriss der Komposthalle mit Anordnung der Miets und Angabe der Mietnummer, Variantnummer und qualitativen Variantenbezeichnung, die Bemaßung ist in Meter angegeben (eigene Darstellung)

Mit Hilfe der Waage des Futtermischwagens konnten die Substrate mit einer Genauigkeit von 5 Kilogramm abgewogen werden. In dieser Form wurden die Mischungen und die Anlage ab Versuch 2 angelegt.

Die homogene Mischung wurde über den seitlichen Auslass des Futtermischwagens an der entsprechenden Position in der Komposthalle aufgeschüttet und gegebenenfalls mit Hilfe eines Hofladers und händisch auf einen möglichst gleichmäßigen Querschnitt geformt.

#### *Umsetzen der Mieten*

Soweit nicht anders erläutert, wurden die Mieten mit einem selbstfahrenden Dreiecks-Mietenumsetzer (Hersteller: Backhus, Typ: 16.30) während der ersten sechs Wochen der Kompostierung wöchentlich, und in den weiteren sechs Wochen 14-tägig umgesetzt. Der Umsetzer verfügt über eine integrierte Bewässerungsmöglichkeit, sodass die Zugabe des Wassers in Abhängigkeit der ermittelten Mengenbedarfs gegeben werden kann. Er ist ein selbstfahrender Umsetzer für Mieten mit einer maximalen Abmessung von 3,0 m Breite und 1,3 m Höhe. Er verfügt über eine Leistung von 34,5 kW mit einem maximalen Drehmoment von  $1.800 \text{ min}^{-1}$ . Nach Angabe des Herstellers können  $700 \text{ m}^3/\text{h}$  umgesetzt werden. Die Bewässerung geschieht über 5 separat einstellbare Düsen, die das aufgewirbelte Material noch im Flug befeuchten. Ab dem Kompostierungsdurchgang 2 (Mai 2020) befand sich am Umsetzer eine Wasseruhr am Zuleitungsrohr, sodass die genauen Wassermengen pro Miete aufgezeichnet werden konnten. Die Wasserbedarfsbestimmung erfolgte aus einer repräsentativen Probe aus dem Mietenquerschnitt (Trockensubstanzbestimmung). Zielgröße ist 50-60% Wassergehalt (in % FM).

### 3.1.3 Monitoring Kompostierungsprozess, Probennahmen und Datenerhebung

Während des Kompostierungsprozesses unterlag die Temperatur-Entwicklung und -Verlauf während des gesamten Verfahrens einer Kontrolle, die Proben zur Rotte Verlustbestimmungen und zur Nährstoffe-Untersuchung wurden nach einem festen Schema entnommen, analysiert und ausgewertet.

#### *Temperaturkontrolle*

Zur Ermittlung des Temperaturverlaufs in den Mieten wurde in der Regel pro Miete ein Temperaturlogger im Mietenkern und -rand platziert (Typs Tinytag TGP 4520, außenliegenden 2-Kanal-Datenlogger). Die Logger speichern halbstündig die Temperatur der zwei Fühler. Zudem erfasste ein Temperaturlogger (Tinytag Aquatic 2) die Lufttemperatur in der Komposthalle. Die Lage im Mietenkern ist senkrecht unter der Mietenspitze und mittig zwischen Boden und Mietenspitze definiert, die Platzierung der Messfühler im Mietenrand befand sich in halber Höhe der Mieten seitlich an den Mietenflanke in ca. 10 cm Tiefe.

#### *Probenahme*

Für die Versuche wurden Probenahme-Schemata aufgestellt, die ggf. je nach Fragestellung angepasst wurden (siehe Einzelbeschreibungen der Kompostierungsversuche). In der Regel erfolgte neben einer Probennahme zu Anfang der Versuche mit Einzelkomponenten und Mischungen Beprobungen für vier bis sechs weitere Termine während der Kompostierungsversuche (Mischprobe pro Miete = 3-fache Wiederholung; zwei Proben je Miete).

Bestimmungsparameter waren:

- Erfassung der Masse pro Miete: Anfang und Ende der Kompostierungszeit
- Erhebung der Schüttdichten und Volumenabmessungen in 2-facher Wdh. je Miete und Termin und die Trockensubstanz Bestimmung des Rottegutes; die Probennahme und die chemischen Analysen auf Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphat erfolgten jeweils pro Termin, der Kaliumgehalt

zu Anfang und zu Ende der Versuche, pH-Wert und verfügbare Nährstoffe zu Versuchende. Die Trocken-Schüttdichte zu den verschiedenen Probenahmen wurden durch Multiplikation des Trockensubstanzgehalts zum Beprobungszeitpunkt mit der Frisch-Schüttdichte errechnet.

- Die Trockensubstanzproben dienten darüber hinaus zur Einstellung der notwendigen Wassermenge für die Bewässerung.

#### *Bestimmung der Schüttdichte*

Die Schüttdichte (g oder kg/Liter oder m<sup>3</sup>) wurde mit zwei Messwiederholungen pro Miete zu den gleichen Terminen wie das Mietenvolumen ermittelt. Hierbei wurde gleichmäßig um die Miete verteilt an 10-12 Probenahme-Punkten pro Messwiederholung in die Miete eingestochen, um repräsentative Mischproben der Miete zu erhalten. An den einzelnen Probenahme-Punkten wurde je eine Probe aus dem äußeren und eine Probe aus dem inneren Mietenquerschnitt entnommen und nicht gelockert in einen 90 l-Kübel gegeben. Im Folgenden wurde der Kübel nach der oben beschriebenen Methode dreimal bis zur 90 l-Markierung gefüllt, darauf jeweils viermal aus etwa 10 cm Höhe auf den Boden fallen gelassen und anschließend noch einmal bis zur 90 l – Markierung gefüllt. Über die Massenbestimmung dieser Mischprobe wurde die Schüttdichte berechnet und aus beiden Wiederholungen der Mittelwert gebildet.

Zusätzlich zur Bestimmung der Schüttdichte erfolgte eine Probenahmen des jeweiligen Substrates auf ausgewählte Nährstoffe (siehe unten). Dazu wurden die 90 Liter Proben intensiv zweimal über ein Schüttkegel geschaufelt, dabei intensiv gemischt und nach der zweiten Mischung auf jeweils ein Drittel Probenmenge eingengt. Dazu wurden die Kegel flach ausgebreitet und an mehreren Stellen Material bis zu einer Größenordnung des Drittels für eine repräsentative Probe genommen. Diese Menge wurde erneut gut gemischt und diente dann für eine Probe á 3 l. Das Prozedere wurde für eine zweite unabhängige Probe wiederholt. Dies Verfahren erfolgte analog für die Einzelkomponenten, die Mischungen und die fertigen Komposte einheitlich.

Die Mischproben wurden am Tag der Probennahme im Feldlabor auf der Domäne Frankenhausen eingewogen und für mindestens 24 h bei 60°C im Trockenschrank getrocknet. Für die Trockensubstanz Bestimmung wurden die Probenaliquote bei 105°C getrocknet. Frische Proben wurden für die Bestimmung der verfügbaren Nährstoffe bei -20 °C bis zur Analyse eingefroren. Die getrockneten Proben wurden vor der Analyse mit Retsch Mühle auf 1 mm vermahlen.

#### *Bestimmung der Mietenvolumina*

Zur Ableitung des Massenverlustes im Verlauf der Kompostierung wurden das Mietenvolumen und die Schüttdichte der jeweiligen Miete zu den Beprobungsterminen ermittelt, um daraus die Masse der Miete zum Zeitpunkt der Messung bestimmen zu können. Zur Bestimmung des Mietenvolumens wurden Grundfläche, Höhe und Bogenmaß der Mieten mit Hilfe eines Maßbandes gemessen. Durch die Konstruktion eines Zylinders mit dreieckiger Grundfläche und eines Zylinders mit halbkreis-förmiger Grundfläche war durch Verrechnung beider Volumina über terminabhängige Faktoren eine Annäherung an das tatsächliche Volumen der Miete möglich.

Die Berechnung des Volumens erfolgte nach der folgenden Formel:

$$V_{Miete} = x * V_{Dreieckszylinder} + y * V_{Halbkreiszylinder} \text{ mit}$$

$$V_{Dreieckszylinder} = 0,5 * b * h * l \quad V_{Halbkreiszylinder} = B^2 * \pi * l$$

$$V_{Miete} = x * 0,5 * b * h + y * B^2 * \pi \text{ mit}$$

**b = Mietenbreite; h = Mietenhöhe; l = Mietenlänge B = Bogenmaß**  
*x= Anteil des Dreieckszylinders an Mietenform; y= Anteil des Halbkreiszyllinders an Mietenform*

Da sich die Form der Miete im Laufe der Kompostierung immer mehr hin zu einem Halbkreiszyylinder veränderte, ergaben sich für die beiden terminabhängigen Faktoren x und y:

- T0:  $x=0,5$ ;  $y=0,5$
- T1:  $x=0,6$ ;  $y=0,4$
- T2:  $x=0,7$ ;  $y=0,3$
- T3:  $x=0,8$ ;  $y=0,2$
- T4:  $x=0,9$ ;  $y=0,1$

Das Oberflächen-Volumenverhältnisse der Mieten wurde durch Mittelwert-Bildung der Oberfläche des Dreieckszyinders und der Oberfläche des Halbkreiszyinders als Annäherung an die Mietenform gebildet.

#### *Chemische Analysen*

Die Bestimmung der Menge an verfügbarem Phosphor (nach VDLUFA Methodenbuch I, A 6.2.1.1) und Kalium erfolgte mittels Calcium-Lactat-Extraktion (CAL) und anschließender photometrischer Messung (bei Phosphor) bzw. mittels Atomabsorptionsspektroskopie (bei Kalium) jeweils aus den bis zur Analyse eingefrorenen ( $-20^{\circ}\text{C}$ ), anschließend luftgetrockneten Proben.

Die Bestimmung des pH-Wertes erfolgte nach Extraktion der Probe in Calcium-Chlorid-Lösung mittels eines elektronischen pH-Meters aus den frischen Proben. Aus dem Calcium-Chlorid Extrakt wurde ebenfalls der Gehalt an pflanzenverfügbarem Magnesium mittels Atomabsorptionsspektroskopie gemessen.

Der Gesamtgehalt an P, K und Mg wurde nach Veraschung der Probe bei  $550^{\circ}\text{C}$  im Muffelofen und anschließendem Königswasser-Aufschluss photometrisch bestimmt (nach VDLUFA Methodenbuch I, A 2.4.2.1)

Die Analytik auf Ct und Nt wurden im Elementaranalysator „vario MAX CHN“ aus den bei  $60^{\circ}\text{C}$  getrockneten und vermahlenden Proben gemessen. Hierzu wurde die Probe nach dem Prinzip der katalytischen Rohrverbrennung unter hohen Temperaturen und Sauerstoffzufuhr verbrannt und die emittierten Gase und Mengen einzeln mit einem Wärmeleitfähigkeitsdetektor bestimmt (Verfahren nach Dumas).

Der Aschegehalt der Proben wurde nach Verbrennung im Muffelofen bei  $550^{\circ}\text{C}$  über zehn bis zwölf Stunden gravimetrisch über das Verhältnis der Asche zur Einwaage vor der Verbrennung bestimmt.

#### 3.1.4 Auswertung und Bestimmung der Verluste an Kohlenstoff und Stickstoff

Nach anfänglichen Verlust Bestimmungen über die Rottesack-Methode in den Kompostierungsversuchen 1A und 1B (siehe Ergebnisse S. ...ff) wurde in allen nachfolgenden Kompostierungsversuchen die Verlustbestimmungen für Nährstoffe, insbesondere Stickstoff, mit Mischproben-Methode bzw. mit Hilfe der Veränderung der Kohlenstoff/Phosphor- (C/P-) bzw. Stickstoff/Phosphor- (N/P-) Verhältnisse. In den Versuchen 1A und 1B erfolgten methodische Vergleiche zwischen der Rottesack-Methode und der Mischproben-Methode, sowohl eine gute Übereinstimmung aber vor allen Dingen auch um eine höhere Präzision mithilfe der Mischproben Methode.

Unter der Annahme, dass es nicht zu Verlusten an der Masse von Phosphor im Verlauf des Kompostierungsprozesses kommt, wurde mit Hilfe der Veränderung der Kohlenstoff/Phosphor- (C/P-) bzw. Stickstoff/Phosphor- (N/P-) Verhältnisse und der C-, P- und N-Gehalte an der Substrattrockenmasse über die Zeit, die C- und N-Verluste während der Kompostierung quantifiziert

Folgende Formeln dienen der Berechnung

$$C_{\text{Verlust}} = 100\% - \frac{P_{\text{Gehalt}_{\text{Anfang}}} * C_{\text{Gehalt}_{\text{Ende}}}}{P_{\text{Gehalt}_{\text{Ende}}} * C_{\text{Gehalt}_{\text{Anfang}}} * 100\%}$$

$$N_{\text{Verlust}} = 100\% - \frac{P_{\text{Gehalt}_{\text{Anfang}}} * N_{\text{Gehalt}_{\text{Ende}}}}{P_{\text{Gehalt}_{\text{Ende}}} * N_{\text{Gehalt}_{\text{Anfang}}} * 100\%}$$

Quelle: Eigene Herleitung

### 3.1.5 Statistische Auswertungen

Arithmetische Berechnungen von Parametern (Bsp.: N-Verlust über N- und P-Gehalte), sowie die Erstellung einiger Tabellen erfolgten mit Excel 2016, die statistische Auswertung erfolgte mit der Software R Studio 3.6.1.

Je nach Versuchsansatz wurden die einzelnen Parameter (zum Beispiel N-Verluste) in Abhängigkeiten der gewählten Faktoren und Faktorstufen mit ein- oder zweifaktoriellen Varianzanalysen (ANOVA) auf ihren jeweiligen Einfluss statistisch getestet. Allen Untersuchungen lag ein Signifikanzniveau von  $\alpha=5\%=0,05$  zugrunde. Die Untersuchungen wurden durchgeführt, wenn Homogenität der Varianzen zwischen den untersuchten Gruppen, Normalverteilung der Residuen und unabhängige Messwerte vorlagen. Wenn die Residuen nicht normalverteilt waren, wurde ein Kruskal-Wallis-Test (nicht-parametrisch) gerechnet. Die Überprüfung der Varianzhomogenität erfolgte mittels Betrachtung eines Residual vs. Fitted values -Plots und mittels Durchführung des Levene-Tests. Anhand von Q-Q-Plots und des Shapiro-Wilk-Tests wurde die Normalverteilung der Residuen überprüft. Zusätzlich wurde zum jeweiligen Modell die Effektstärke  $R^2$  bestimmt. Sofern die einfaktorielle ANOVA oder genannte Alternativen einen signifikanten Einfluss der Variante auf die jeweilige Zielgröße zeigten und die notwendigen Voraussetzungen erfüllt waren, wurden Mittelwertvergleiche für paarweise Vergleiche mittels des Tukey-/HSD-Tests durchgeführt. Im Falle des Kruskal-Wallis-Tests wurde der Dunn-Test als post-hoc-Test ausgewählt.

Um den Einfluss verschiedener Faktoren und Prozessparameter wie Temperatursummen, Mittlerer Feuchtegehalt, Frisch- oder Trocken-Schüttdichte sowie Oberflächen-Volumenverhältnis und C/N-Verhältnisse zwischen Ausgangswerten und dem N-Verlust über den Zeitraum der Versuche zu bestimmen, erfolgte dies über lineare oder multiple Regressionen mit dem Ziel, die Einflussgrößen der Faktoren auf den N-Verlust zu ermitteln. In der Regel wurde die Werte der Versuchenden gegen die der Versuchsanfänge verwendet oder wie im Fall der Temperatursummen der Mietenkerne im Zeitraum T0-T4. Dazu wurden die Daten auf homogene Varianzen mittels Residuen (Residual vs. Fitted-Plots, Levene-Test) und Normalverteilung mittels Q-Q-Plot, Shapiro-Wilk-Test sowie auf Unabhängigkeit der Daten überprüft.

## 3.2 Material und Methoden – Spezifika Kompostierungsversuche

Im Folgenden werden die einzelnen Versuche separat in Bezug auf das gewählte Material und die genutzten Methoden dargestellt.

Durchgeführt wurden zwischen Juni 2019 bis Dezember 2022 fünf Kompostierungsversuche. Da das jeweilige inhaltliche Vorgehen aufeinander aufbaut, werden sie nachfolgend zeitlich chronologisch beschrieben.

Tabelle 2: Kompostierungsdurchgänge und Zeitverläufe

Versuchsteil	Zeitpunkt	Inhalt
Kompostierdurchgang 1A	Juni 19 - August 19	Vorversuch für C/N-Verhältnis
Kompostierdurchgang 1B	Juli 2019 - Oktober 2019	C/N-Verhältnis
Kompostierdurchgang 2	Mai 2020 - August 2020	Strukturart/-menge
Kompostierdurchgang 3	August 2020 - November 2020	Umsetzmanagement
Kompostierdurchgang 4	Juni 2021 - September 2021	Umsetzhäufigkeit/Klee graszugabe
Kompostierdurchgang 5	September 2021 – Dezember 2021	Bewässerungsmenge und -zeitpunkt

### 3.2.1 Kompostierungsversuch 1 A – Einfluss des C/N-Verhältnisses (KV\_19\_1)

Von Juni bis August 2019 fand der erste Kompostierungsversuch im OptiKG-Projekt auf der Domäne Frankenhausen statt. Dieser diente vorrangig zwar der Anschauung für die Ökofeldtage, um das Projekt den BesucherInnen anschaulich darstellen zu können, aber war auch ein erste Annäherungen an die zentralen Fragen nach Minimierung der N-Verluste mit der Variation des Ausgangsmaterials, namentlich der Variation des C/N-Verhältnisses. Aufgrund der verzögerten Bewilligung des Projektes und des Platzmangels durch die Nutzung der Komposthalle seitens der Ökofeldtage, war es nicht möglich, den ersten Durchgang als vollwertigen Versuchsdurchgang durchzuführen, wie im Antrag beschrieben.

Orientiert an dem Vorhaben zuerst die Mischung von Klee gras und Stroh in verschiedenen C/N-Verhältnissen untersuchen zu wollen, wurden aus ebendiesen Komponenten drei Varianten mit einem gewünschten C/N-Verhältnis von 15, 20 und 25 gemischt. Hierzu wurde angewelktes und mit dem Ladewagen geschnittenes Klee gras sowie Weizenlangstroh aus Ballen genutzt. Das gewünschte Masseverhältnis von Klee gras und Stroh zur Einstellung des C/N-Verhältnisses der jeweiligen Variante wurde nach den analysierten C- und N-Gehalte in den Ausgangssubstraten Klee gras und Stroh (Tabelle 3) auf Basis der Gesamtfrachten berechnet.

Tabelle 3: TS-, Nt- und Ct-Gehalt in % sowie das C/N-Verhältnis der Ausgangssubstrate Klee gras und Stroh vor dem Aufsetzen des Kompostes am 03. Juni 2019

	TS (%)	Nt (%)	Ct (%)	C/N-Verhältnis
<b>Klee gras</b>	42,44	2,92	44,63	15,27
<b>Stroh</b>	88,27	0,57	44,28	78,30

Die Mieten wurden im Kompostierungszeitraum 10-mal mit dem Backhus Kompostwender umgesetzt und bewässert (04.06., 13.06., 19.06., 26.06., 01.07., 10.07., 25.07., 01.08., 7.08., 20.08.).

In der Miete der Variante mit dem C/N-Verhältnis 15 wurden drei Temperaturlogger in den Kern der Miete und drei Temperaturlogger in den Randbereich der Miete gelegt. Diese Miete wurde am 24.07.2019 in drei gleichgroße Einheiten geteilt und an unterschiedliche Orte in der Komposthalle gelegt. In den Mieten der Varianten mit dem C/N-Verhältnis 20 und 25 lagen je zwei Temperaturlogger im Rand- und Kernbereich.

Zusätzlich zu den Temperaturloggern befanden sich ebenfalls Rottesäcke in den drei Mieten. Analog zu dem oben Beschriebenen lagen in der Variante mit dem C/N-Verhältnis ,15' drei Säcke und in den anderen beiden Varianten je zwei Säcke. Jeder Sack wurde mit 4 kg des jeweiligen Mietenmaterials befüllt.

### 3.2.2 Kompostierungsversuch 1 B - Einfluss des C/N-Verhältnisses (KV 19\_2)

Von Juli bis Oktober 2019 fand der Kompostierdurchgang 1B auf der Domäne Frankenhausen statt. Dieser ist als erster „richtiger“ Kompostierdurchgang zu verstehen und deckt sich in weiten Teilen mit dem angedachten ersten Kompostierdurchgang aus dem Antrag. Soweit nicht anders erwähnt, wurden alle unter Kapitel 3.1 beschriebenen methodischen Schritte vorgenommen. Es fanden kleine Anpassungen aufgrund der Erkenntnisse des ersten Kompostierdurchgangs statt. So wurde das Weizenstroh in möglichst klein gehäckselter Form verwendet und ein über alle Varianten gleiches Mischungsverhältnis von 2 Teilen Klee gras auf 1 Teil Stroh im Volumen (abgesehen von der reinen Klee grasvariante) eingestellt. Das C/N-Verhältnis wurde durch Beimischung von Sägemehl in der entsprechenden Menge in sechs Abstufungen eingestellt.

Die Ausgangssubstrate wurden im Vorhinein auf ihre Inhaltsstoffe analysiert (siehe *Tabelle 4*). Hierzu wurden vier Quadratmeterschnitte am Klee grasbestand auf dem Feld durchgeführt und je zwei Mischproben des Strohs und Sägemehls gezogen.

Tabelle 4: Mittelwerte der TS-, N-, P-, K- und Mg-Gehalte sowie des C/N-Verhältnisses der Ausgangssubstrate

	TS- Gehalt (% FS)	N-Gehalt (% TS)	C/N-Verhältnis	P-Gehalt (g/ kg TS)	K-Gehalt (g/ kg TS)	Mg-Gehalt (g/ kg TS)
<b>Klee gras (N=4)</b>	14,4	2,8	15,8	2,6	36,7	2,8
<b>Stroh (N=2)</b>	85,2	0,5	86,5	0,8	26,3	0,6
<b>Sägemehl (N=2)</b>	72,7	0,1	383,1	0,1	0,9	0,5

Nach Schätzung der Schüttungen (Klee gras: 150 kg/ m<sup>3</sup>; Stroh: 40 kg/ m<sup>3</sup>; Sägemehl: 230 kg/ m<sup>3</sup>) wurde analog zum Kompostierdurchgang 1 über die benötigte Frischmasse das benötigte Volumen einer jeden Variante berechnet. Erst am Tag des Aufsetzens (= Tag der Klee grasernte) konnten die exakte Schüttung des Klee grasses bestimmt werden, welche bei 200 kg/ m<sup>3</sup> lag. Zu diesem Zeitpunkt war unklar, ob die Differenz durch einen höheren Wassergehalt als angenommen oder durch eine tatsächlich andere Schüttung zustande kam. Es wurde von einem anderen Wassergehalt ausgegangen und nach den vorab berechneten Volumina aufgesetzt. Denn Klee gras mit einem höheren Wassergehalt hätte zwar ein höheres Gewicht aber die gleichen Nährstoffgehalte. Die einzelnen Varianten mit ihren Volumenverhältnissen von angewelktem und mit dem Ladewagen geschnittenem Klee gras, gehäckseltem Weizenstroh und Buchensägemehl sind in *Tabelle 5* aufgeführt.

Tabelle 5: Mischung der Varianten

	Volumen Klee gras (m <sup>3</sup> )	Volumen Stroh (m <sup>3</sup> )	Volumen Sägemehl (m <sup>3</sup> )
<b>C/N = 15</b>	26,4	0	0,0
<b>C/N = 20</b>	13,2	6,6	0,6
<b>C/N = 25</b>	13,2	6,6	2,1
<b>C/N = 30</b>	12,0	6,0	3,6
<b>C/N = 35</b>	12,0	6,0	5,1
<b>C/N = 40</b>	12,0	6,0	6,9

Nach Analyse von Mischproben aus jeder Variante ergaben sich die in *Tabelle 6* dargestellten Ergebnisse für den TS- und N-Gehalt sowie das C/N-Verhältnis. Mit der voran beschriebenen Methode konnten folglich nicht exakt die geplanten C/N-Verhältnisse eingestellt werden. Vor Allem für die Varianten C/N = 30, 35 und 40 sind die Abweichungen mit -12 %, -20 % und -26 % als groß zu beschreiben. Es ist

davon auszugehen, dass die Methode der Abmessung des Volumens mit der Hofladerschaufel fehlerbehaftet ist und auch der Mischvorgang mit der Hofladerschaufel kein zu 100 % homogen gemischtes Substrat erzeugen konnte.

Tabelle 6: Mittelwerte (N = 3) der Analyseergebnisse der Anfangsmischproben jeder Variante vom 24.07.2019

	<b>TS-Gehalt (% FS)</b>	<b>N-Gehalt (% TS)</b>	<b>C/N-Verhältnis nach Analyse</b>
<b>C/N = 15</b>	43,81	2,89	15,62
<b>C/N = 20</b>	56,03	2,32	19,32
<b>C/N = 25</b>	55,56	1,85	24,54
<b>C/N = 30</b>	51,82	1,78	26,47
<b>C/N = 35</b>	52,21	1,65	28,15
<b>C/N = 40</b>	56,91	1,56	29,74

Die in *Tabelle 5* beschriebenen Mischungen wurden am 23.07.2019 erstellt. Am 24.07.2019 wurde dieser eine Haufen auf drei Haufen aufgeteilt und in einem randomisierten Blockdesign in der Komposthalle aufgesetzt. Der Versuch wurde am 23.10 beendet.

Die Probenahme aus den Rottesäcken erfolgte 7-mal. Parallel zu diesen regulären Untersuchungen wurden im Rahmen dieses Durchgangs auch die Methode der Rottesäcke überprüft, indem parallel zu jeder Rottesack-Entnahme eine Mischprobe aus dem Mietenkörper aus dem Horizont der Rottesäcke (Mietenkern) gezogen wurde, um vor allem die Trockensubstanzgehalte aber auch die Stickstoff- und Kohlenstoffgehalte zu vergleichen und eine Aussage darüber treffen zu können, ob von einer Gleichbehandlung bei den Rottesäcken ausgegangen werden kann.

### 3.2.3 Kompostierungsversuch 2 - Einfluss von Art und Mengen an Strukturträgern (KV 20\_2)

Der Versuch wurde im Zeitraum zwischen dem 07.05.2020 bis zum 04.08.2020 durchgeführt; soweit nicht anders erwähnt, erfolgten alle methodischen Schritte wie unter Kapitel 3.1 beschrieben; nach den Erfahrungen aus den beiden Versuchen 1A und 1B wurden für diesen Versuchsdurchgang keine Rotteverlustbestimmungen mehr aus den Rottesäcken analysiert, sondern nach der Mischproben-Methode. Die Beprobungen erfolgten zu Anfang (T0) sowie an 3 Termin (T1: 2.06., T2: 22.06., T3: 14.07.) und zum Ende des Versuchsdurchgangs nach zwölf Wochen Rotte (T4: 04.08.2020).

Insbesondere auf Basis der Ergebnisse von Versuch 1B wurde für die Herstellung der Mischungen und Strukturträger geschreddertes, hygienisiertes GrünGut aus Baum und Strauchschnitt sowie gehäckseltes Weizenstroh zur Anlage der Mischungen verwendet. Zudem wurde nicht mehr mit dem Hoflader gemischt, sondern wie unter Kap. 3.1.2 beschrieben mit dem Teleskoplader und dem Futtermischwagen mit integrierter Waage. Die Werte für das Klee gras, bzw. die einzelnen Bestandteile, für GrünGut und Stroh sind den Tabellen 7 und 8 zu entnehmen.

Tabelle 7: Trockensubstanzgehalte der Klee grasbestandteile und Kleeanteil an Klee gras nach Quadratmeterschnitte für den Versuch 2

<b>Ø TS-Gehalt Klee [%]</b>	<b>Ø TS-Gehalt Gras [%]</b>	<b>Ø TS-Gehalt Klee gras [%]</b>	<b>Anteil Klee an TM [%]</b>
15,4	20,4	17,3	63,4

Tabelle 8: Trockensubstanz-, Nt-, Ct-Gehalte sowie C/N Verhältnis von Klee gras, Grüngut und Stroh für den Versuch 2

Material	Ø TS-Gehalt [%]	Ø N Gehalt [%]	C [%]	C/N
Klee gras	20,4	2,9	43,5	15
Grü ngut	72,9	0,75	36,8	49,1
Stroh	88,1	0,72	43,9	60,9

Die Zusammenstellung der Mischungen erfolgten in Anlehnung an die Ergebnisse der vorhergegangenen Versuche mit dem Ziel vorteilhafte CN-Verhältnisse einzustellen. Dabei wurden zwei Faktoren berücksichtigt: zum einen der Faktor Strukturart (Stroh und Grün Gut, Grün Gut/Stroh vs Klee gras pur) und der Faktor Strukturträgeranteil (wenig: 35 vol%; viel: 65 vol% bzw. 75% bei Grün Gut/Stroh) (Tabelle 9)

Tabelle 9: Festgelegte Volumenverhältnisse der Varianten

Varianten Bezeichnung	Volumenanteile [%]		
	Klee gras	Stroh	Grü ngut
Klee gras Pur	100	0	0
Viel Klee gras + wenig Stroh	65	35	0
Wenig Klee gras + viel Stroh	35	65	0
Viel Klee gras + wenig Grü ngut	65	0	35
Wenig Klee gras + viel Grü ngut	35	0	65
Viel Klee gras + wenig Stroh & Grü ngut	65	17,5	17,5
Wenig Klee gras + viel Stroh & Grü ngut	25	37,5	37,5

Daraus ergaben sich sechs vollständige Prüfglieder (Varianten), die sich zusammen mit einer Kontrolle aus reinem Klee gras bei drei echten Wiederholungen in 21 randomisiert angeordneten Mieten in der Komposthalle in Frankenhausen angelegt wurden (siehe Abbildung 3)

### 3.2.4 Kompostierungsversuch 3 – Einfluss des Umsetzmanagements (KV 20\_3)

Der Versuch wurde am 7.8.2020 auf der Domäne Frankenhausen angesetzt und erstreckte sich über einen Zeitraum von 13 Wochen bis zum 12.11.2020. Design und Anzahl Wiederholung je Behandlung entsprach den unter Kapitel 3.1 gemachten Angaben. Der Versuch war als 2-faktorieller Versuch mit dem Faktor Umsetzfrequenz und dem Faktor Mischung angesetzt.

Im Faktor Umsetzfrequenz wurden 4 Stufen eingesetzt (Abbildung 4):

- im Projekt übliches 10-faches Umsetzen über 13 Wochen („Kontrolle“);
- eine Variante mit der Hälfte der Termine, alle 14 Tage bis zu 6 Wochen Rotte, gefolgt von einem finalen Termin nach 9 Wochen Rotte („Weniger“);
- zwei Varianten mit je 20-fachen Umsetzen. Ein Verfahren war an die Methode von „Lübke“ angelehnt; es wurde in den ersten neun Tagen täglich umgesetzt, für die drei nachfolgenden Termine jeden zweiten Tag, dann dreimal jeden dritten Tag, je zweimal jeden 4.Tag und anschließend jeden 5.Tag sowie ein weiteres Mal nach 6 Tagen und schließlich final nochmalig nach 7 Tagen (7,5 Wochen). Im zweiten Verfahren („Mehr“) wurde für 7 Wochen zweimal pro Woche, dann für die übrigen 6 Wochen einmal pro Woche umgesetzt.

Im Faktor Mischungen wurden vergleichbar mit dem Versuch 2 wiederum Klee gras, Grün Gut und Stroh in verschiedenen Mischungen verwendet. Die eine Stufe erfolgte in einem Volumenanteil von 35 %

Klee gras und 65 % GrünGut, während die Stufe 2 eine Mischung aus 25 % Klee gras, 37,5 % GrünGut und 37,5 % Stroh enthielt.

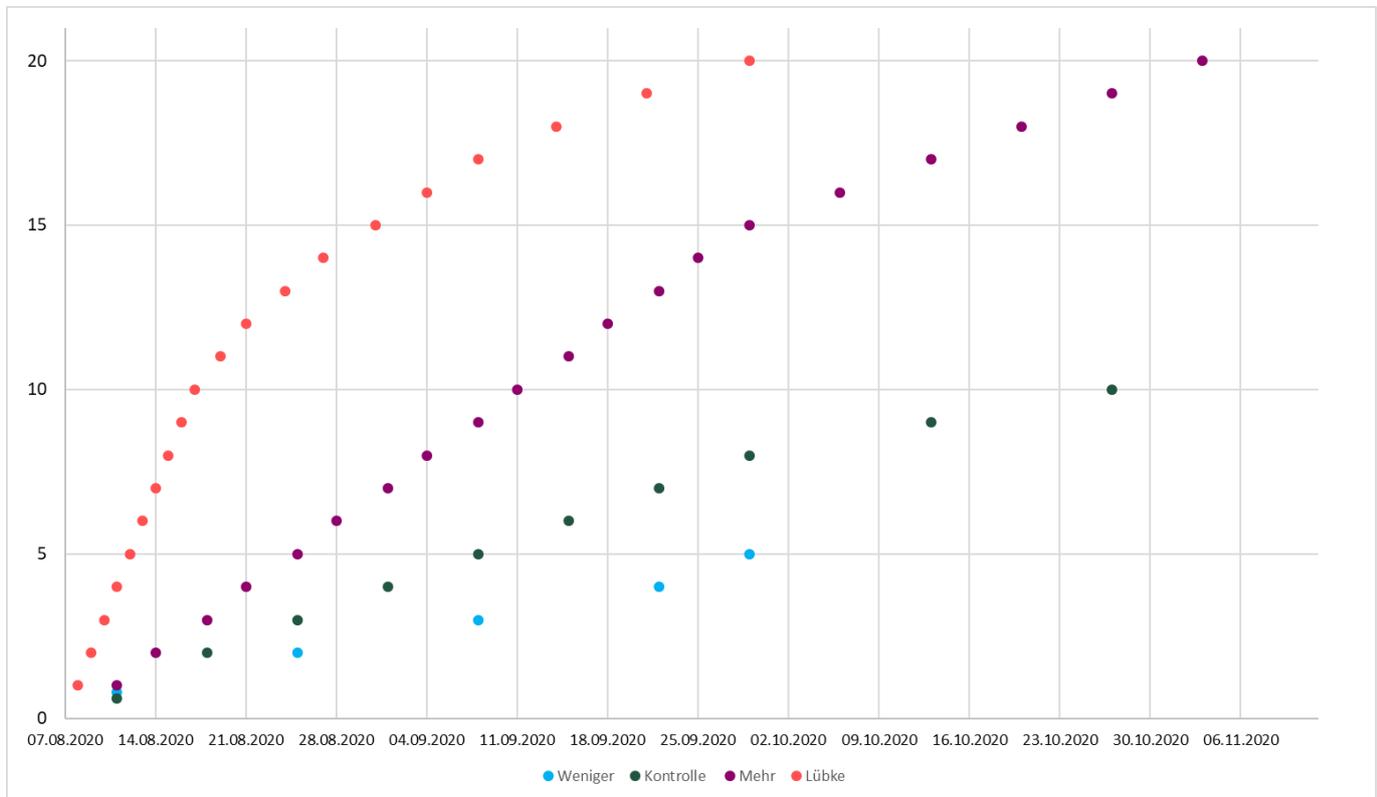


Abbildung 4: Verlauf, Anzahl und Häufigkeit des Umsetzens im Versuch 3

Die Probennahme erfolgte zu den in der Tabelle 10 aufgeführten Termin und Varianten.

Tabelle 10: Probennahmen in Versuch 3

Proben-Name	Proben Anzahl	Termin	Varianten	Parameter
T 0	48	07.8.20	Alle	ges. Nährstoffe
T1	12	13.8.20	Lübke	TS, C, N, P
T2	12	19.8.20	Lübke	TS, C, N, P
T3	12	28.8.20	Mehr	TS, C, N, P
T4	48	15.9.20	Alle	TS, C, N, P
T5	24	13.10.20	Kontrolle, Weniger und Mehr	TS, C, N, P
T6	48	10.11.20	Alle	TS, C, N, P
T7	48	12.11.20	Alle	ges. und verf. Nährstoffe

Die Ausgangswerte für die Einzelkomponenten und Mischungen entsprachen den in Tabelle 8 aufgeführten Kohlenstoff- und Stickstoffgehalten.

### 3.2.5 Kompostierungsversuch 4 - Einfluss von Umsetzhäufigkeit und zusätzlicher Klee graszu- gabe KV\_21\_3

Der Versuch wurde am 1.6.2021 aufgesetzt und für einen Zeitraum von 13 Wochen kompostiert. De- sign und Anzahl Wiederholung je Behandlung entsprach den unter Kapitel 3.1 gemachten Angaben. Der Versuch war als 2-faktorieller Versuch mit dem Faktor Umsetzmanagement und dem Faktor ver- spätete Beigabe von Klee gras angesetzt (Tabelle 11).

Zwei Stufen wurden im *Faktor Umsetzmanagement* genutzt:

- Gesamtzahl **11-mal Umsetzen**, für die ersten 14 Tage jeweils zweimal wöchentlich, einmal pro Woche bis zur 7. Woche sowie für den restlichen Teil der Rottezeit zwei weitere Male im Ab- stand von 14 Tagen
- Gesamtzahl **15-mal Umsetzen**, bis zur 7. Woche wie oben, von der 7. Woche bis zur 13. Woche wöchentlich

*Tabelle 11: Variantenverteilung Versuch 4*

Umsetzmanagement	Verspätete Klee graszugabe
11x	Kontrolle – ohne zusätzliche Klee grasgabe
11x	Viel - Verdopplung der initialen Klee grasmenge
11x	Wenig- Hälfte der initialen Klee grasmenge
15x	Kontrolle – ohne zusätzliche Klee grasgabe
15x	Viel - Verdopplung der initialen Klee grasmenge
15x	Wenig- Hälfte der initialen Klee grasmenge

Im *Faktor verspätete Klee graszugabe* wurden die initialen Anteile wie im Versuch 3 mit einer Kontroll- variante aus 25 % Klee gras, 37,5 % GrünGut und 37,5 % Stroh (vol.) angesetzt sowie zwei zusätzlichen Abstufungen mit Variation der Klee gras Zugabe; nach vier Wochen Rottezeit wurden den entsprechen- den Mieten Klee gras-Mengen in Höhe der doppelten initialen Klee gras Menge zugeteilt („viel“), wäh- rend die andere Variante die Hälfte der initialen Klee gras Menge erhielt („wenig“).

*Tabelle 12. Probennahmen in Versuch 4*

Probennahmen Termine	Probennahmen Zeitpunkt Verfahren	Parameter
02.06.2021	<b>vor Beginn der Kompostierung</b>	TS, Ct, Nt, Pt, Kt, Mgt, pH
20.07.2021	<b>Vor 2. Zugabe Klee gras nach 6 Wochen Rotte</b>	TS, Ct, Nt, Pt, pH
22.07.2021	<b>Nach 2. Zugabe Klee gras</b>	TS, Ct, Nt, Pt, pH
04.08.2021	<b>nach 9 Wochen</b>	TS, Ct, Nt, Pt, pH
21.9.2021	<b>Zum Ende der Kompostierung</b>	TS, Ct, Nt, Pt, Kt, Mgt, pH + verfg. Nährstoffe

Die Ausgangswerte für die Einzelkomponenten und Mischungen entsprachen den in Tabelle 8 aufgeführten Kohlenstoff und Stickstoffgehalten.

### 3.2.6 Kompostierungsversuch 5 - Einfluss von Wassermenge und Bewässerungszeitpunkt (KV 21\_4)

Der Versuch wurde am 6.9.2021 aufgesetzt und für einen Zeitraum von 13 Wochen kompostiert. Design und Anzahl Wiederholung je Behandlung entsprach den unter Kapitel 3.1 gemachten Angaben. Die Mischungen bestanden aus 25% (vol.) Klee gras und einer Strukturträgerzugabe aus je 37,5 % Grün gut und Stroh. Der Versuch war als 2-faktorieller Versuch mit dem Faktor Termin-Wasserzugabe und dem Faktor Wassermenge angelegt. Die Varianten bzw. das Bewässerungsmanagement waren so gewählt, dass letztlich fehlerhafte Bewässerungstermine bzw. Bewässerungsmengen simuliert wurden. Die Fehler bestanden in der Kombination einer frühen, gegebenenfalls zu hohen Bewässerungsmenge in den ersten beiden Wochen vs. keine Bewässerung während dieses Zeitraums; demgegenüber bestand die zweite Kombination in gleicher Weise für den späten Zeitraum in Woche 5 und 6. Am 7.12.21 wurde der Versuch beendet.

Tabelle 13: Varianten Aufteilung und Durchführung, Varianten in 3 Wiederholung

Termin Bewässerung	Bewässerungsmenge	
Kontrolle	Kontrolle	Wasserführung nach Bedarf für 13 Wochen, Zielgröße 50-60% Feuchtigkeit
früh	zu viel	in Woche 1 und 2 zu viel Wasser so viel Wasser geben bis Mieten kurz vor dem Auslaufen sind, ansonsten nach Bedarf
früh	zu wenig	in Woche 1 und 2 gar kein Wasser, ansonsten nach Bedarf
spät	zu viel	in Woche 5 und 6 zu viel Wasser so viel Wasser geben bis Mieten kurz vor dem Auslaufen sind, ansonsten nach Bedarf
spät	zu wenig	in Woche 5 und 6 gar kein Wasser, ansonsten nach Bedarf

Das Umsetzen erfolgte 11 Mal: 2mal je Woche in Woche 1 und 2, anschließend bis Woche 6 einmal wöchentlich und daraufhin bis Woche 13 alle zwei Wochen.

Probennahmen erfolgten jeweils in allen Varianten zu folgenden Termine: zu Beginn der Kompostierung (T0 7.9.21), in Woche 3 (T1: 27.09.) entsprechend nach 2 Wochen Fehlerbehandlung für die Variante Bewässerung ‚früh‘; die nächste Beprobung fand vor der Fehlerbehandlung für die Variante Bewässerung ‚spät‘ in Woche 5 (T2: 12.10.) sowie in Woche 7 nach 2 Wochen Fehlerbehandlung für die Variante Bewässerung ‚spät‘ statt (T3: 25.10.). Die finalen Proben wurden am 7.12.21 genommen.

### 3.2.7 Versuche auf Praxisbetrieben

In zwei Versuchsdurchgängen wurden auf zwei Partnerbetrieben Kompostierungsversuche unter Praxisbedingungen des jeweiligen Betriebes mit folgenden Schwerpunkten durchgeführt:

**Versuch A** behandelte die Frage, ob und inwieweit Gesteinsmehl und/oder Pflanzenkohle als Zuschlagstoff zu Beginn der Kompostierung zu geringeren Stickstoffverlusten während der Kompostierung führen. Dazu wurde ein der Kompostierungsversuch mit zwei Varianten und einer Kontrollvariante mit je zwei Wiederholungen durchgeführt, die jeweils in 5 Transekte aufgeteilt waren. Der Faktor „Zuschlagstoffe“ variierte in den Stufen „Nur Pflanzenkohle“ (P) und „Pflanzenkohle und Gesteinsmehl“ (P+G). Alle aufgesetzten Dreiecksmieten bestanden aus einer gleichen Mischung aus Strauchschnitt, Biotopgras, Klee gras, Gemüseabfälle und Wascherde. Während der etwa 60-tägigen Kompostierung wurden alle Mieten hinsichtlich der Bewässerung und der Umsetzfrequenz (17 Mal) gleichbehandelt.

**Versuch B** betrachte zum einen die Meliorationsmischung für Klee gras nach Sepp Braun (Mischung A) im Vergleich zu der betriebsüblichen Klee grasmischung (Mischung B) und zum anderen den Effekt von Stroh als Zuschlagstoff. Um die beiden Klee grasmischungen und den Effekt von Stroh als C-Träger und Strukturmittel zu vergleichen, wurden insgesamt vier Kompostvarianten/-mieten angelegt, welche hinsichtlich der N<sub>t</sub>-Verluste während der Kompostierung beprobt wurden. Dabei wurde auf ein Volumenanteil Klee gras zwei Volumenanteile Stroh gegeben, zusätzlich enthielten die Mieten jeweils 2 t Erde. Die Aufteilung ergab nach Gewichts\_% ein Verhältnis von 11% Stroh, 18% Erde und 71% Klee gras im Fall der Mischung A und von 13%, 22% und 65% Klee gras bei Mischungen B; die Ungenauigkeit und Unterschiede ergaben sich aufgrund der Anlage mit hofeigenen Maschinen.

In beiden Versuchen wurden am Anfang und am Ende der Kompostierung Mischproben die Wiederholungen und Transekt entnommen und im Labor auf Trockensubstanz, Stickstoff, Kohlenstoff, Phosphor und Asche-gehalt untersucht. Alle Arbeiten wurden wie oben für die exakt Versuche beschrieben durchgeführt.

### 3.3 Ergebnisse - Kompostierungsversuche

Die Kompostierungsversuche im Projekt OptiKG hatten im Wesentlichen zum Ziel, die Transferstrategie „Kleegraskompostierung“ unter dem Aspekt von hoher Nährstoff-Effizienz und Minimierung von Stickstoffverlusten kritisch zu untersuchen. Die Ergebnisse dieser Versuche sind Inhalt der nächsten Kapitel.

#### 3.3.1 Kompostierungsversuch 1A (Juni – August 2019) – „Opti\_KG\_19\_1“

Im Versuch 1A wurden drei C/N Verhältnisse mittels Mischung von Klee gras mit einem Stroh eingestellt. Die zu Anfang am 03.06.2019 gezogenen Mischproben aus den drei Mieten und dem Grundsubstrat Stroh wiesen ein C/N Verhältnis von 15 für das Klee gras auf, durch die Zugabe des Strohs mit einem C/N Verhältnis von 80 konnten die C/N Verhältnisse auf 18 bis 23 gesteigert werden konnten (Tabelle 14). Damit reduzierte sich der N-Gehalt der Mischungen im Vergleich zum reinen Klee gras um ein halbes bzw. ein Prozent.

Tabelle 14: TS-, N<sub>t</sub>-, Mg-, P-, und K-Gehalt sowie C/N-Verhältnis der drei Mischproben der Mieten (N=1) und des reinen Strohs bei Aufsetzen am 03.06.2019

	TS (% FS)	N <sub>t</sub> (% TS)	C/N-Ver- hältnis	P (g/ kg TS)	K (g/ kg TS)	Mg (g/ kg TS)
<b>C/N = 15</b>	42,44	2,92	15,27	3,12	31,88	2,92
<b>C/N = 20</b>	43,07	2,41	18,51	2,66	31,36	2,48
<b>C/N = 25</b>	38,79	1,89	23,52	2,17	29,85	2,11
<b>reines Stroh</b>	88,27	0,57	78,30	0,51	25,81	0,53

Nach Kompostierung wurden die Rottesäcke am 28.08.19 entnommen und auf ihre Nährstoffgehalte analysiert. Diese sind in Tabelle 15 dargestellt. Aufgrund der ordnungsgemäßen Kompostierung und der entsprechenden Kohlenstoffverluste durch die Kompostierung konnten die N-Gehalte auf 4 % N gesteigert werden, die C/N Verhältnisse betragen 9.

Tabelle 15: Mittelwerte der TS-, N<sub>t</sub>-, Mg-, P-, und K-Gehalt sowie des C/N-Verhältnis der Rottesäcke der drei Mieten (N=2; N=3) nach Kompostierung am 28.08.2019

	TS (% FS)	N <sub>t</sub> (% TS)	C/N-Ver- hältnis	P (g/ kg TS)	K (g/ kg TS)	Mg (g/ kg TS)
<b>C/N = 15</b>	35,45	4,16	8,85	6,68	86,40	6,46
<b>C/N = 20</b>	38,49	3,98	9,40	7,34	95,37	6,92
<b>C/N = 25</b>	45,87	4,08	9,46	7,09	91,68	6,49

Die sich aus der Methode der Rottesäcke ergebenden prozentualen Nährstoffverluste durch Kompostierung lagen zwischen 63-73 % Verlust an Kohlenstoff in Abhängigkeit des Ausgangs C/N Verhältnisses (Tabelle 16 und Abbildung 5); für das reine Klee gras ergab sich ein N<sub>t</sub>-Verlust von 40 % bzw. 44 % im C/N Verhältnis 20, wohingegen durch die Steigerung auf ein C/N-Verhältnis von 25 die Verlustrate an Stickstoff um rund 10 % gesenkt werden konnte.

Tabelle 16: Mittelwerte der Ct-, Nt-, Volumen-, P-, K- und Mg-Verluste (N=2; N=3) nach Berechnung anhand der Rottesäcke der drei Varianten

	Ct-Verlust [%]	Nt-Verlust [%]	Volumen-verlust [%]	P-Verlust [%]	K-Verlust [%]	Mg-Verlust [%]
<b>C/N = 15</b>	63,08	40,44	68,37	3,18	-22,15	5,48
<b>C/N = 20</b>	71,57	44,08	77,88	6,75	-2,77	5,74
<b>C/N = 25</b>	73,37	29,38	90,77	0,83	7,13	1,49

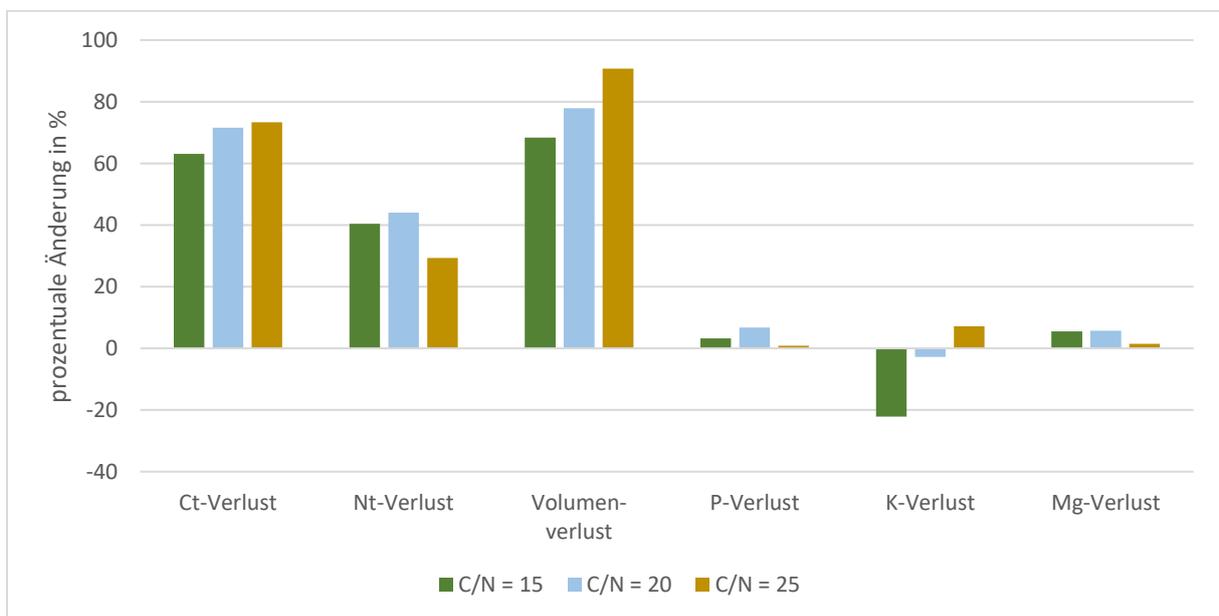


Abbildung 5: prozentuale Änderung der Parameter Gesamtkohlenstoff, -stickstoff, -phosphor, -kalium und -magnesium sowie des Volumens durch die Kompostierung

Unter der Voraussetzung, dass Phosphor im Kompostierungsprozess nur marginalen Verlusten unterliegt, kann auf Basis der Veränderungen des N:P Verhältnisses im Vergleich von Ausgangsmaterial zum Endprodukt auf die Nt Verluste geschlossen werden. Im hier vorliegenden Fall sind die analytisch ermittelten Phosphorgehalte und sich daraus ergebenden Verlustraten im Bereich der Fehler von Probennahme bzw. analytischen Ungenauigkeiten bei geringen Wiederholungszahlen anzusiedeln. Im Allgemeinen kann davon ausgegangen werden, dass Phosphor nicht verlagerbar ist. Unabhängig von den absoluten Nährstofffrachten kann so die prozentuale Änderung aller anderer Nährstoffe anhand der Änderungen des N:P Verhältnisses bestimmt werden. Die Ergebnisse dieser Berechnungen stimmen relativ gut mit der Ermittlung der bereits genannten Verlustraten überein. Durch die Steigerung des C/N Verhältnis auf 25 reduzieren sich nach diesen Berechnungen die N Verluste um 10 % (Tabelle 17). Dieser Wert liegt sehr eng im Bereich der über die massenbezogene Berechnung ermittelten Verlustraten mit der Rottesack-Methode.

Tabelle 17: Mittelwerte der Gesamtkohlenstoff-, -stickstoff-, -kalium und -magnesium-Verluste (N=2, N=3) in % unter der Annahme, dass Phosphor nicht verlagert wurde

	<b>N<sub>t</sub>-Verlust</b>	<b>C<sub>t</sub>-Verlust</b>	<b>K-Verlust</b>	<b>Mg-Verlust</b>
<b>C/N = 15</b>	38,50	61,88	-26,14	2,38
<b>C/N = 20</b>	40,02	69,51	-10,30	-1,08
<b>C/N = 25</b>	28,58	73,14	6,06	0,60

Lediglich bei den K-Verlusten sind die numerischen Unterschiede höher. Die Ergebnisse zeigen, dass der Nährstoffverlust für Stickstoff, Kalium und Magnesium bei der Variante mit C/N = 25 am geringsten war und zugleich der Kohlenstoff- bzw. Trockensubstanz- und Volumenverlust am größten.

Dieser erste Versuch ergab somit für die zentrale Fragestellung wichtige Hinweise und bestätigte die Hypothese, dass mit einer Erweiterung des C/N Verhältnis stickstoffreiches Material wie Klee gras durch eine technisch relativ einfache Verwendung kohlenstoffreicher Betriebsmittel wie Stroh, es bereits deutliche Reduzierung der Stickstoffverluste und damit eine Steigerung der Stickstoffeffizienz der oberirdischen Biomasse des Klee grasses bewirkt werden kann.

### 3.3.2 Kompostierungsversuch 1B (Juli – Oktober 2019) – „Opti\_KG\_19\_2“

Die Erfahrungen aus dem Kompostierungsversuch 1A flossen in die Konzeption und Durchführung für einen nächsten sehr umfangreichen Versuch auf der Domäne Frankenhausen ein. In Übereinstimmung mit dem Antrag wurde ein Versuch angelegt, um der Frage nachzugehen, in welcher Größenordnung ein Anstieg des CN Verhältnis bei der Kompostierung von Klee gras durch die Zugabe geeigneter Kohlenstoffreicher Co-Substrate zu einer Reduktion der Stickstoffverluste während der Kompostierung beitragen kann (siehe Kap. 3.2.1 und 3.2.2) Die Zugabe von Weizenstroh und Sägemehl aus Buchenholz sollte zu abgestuften C/N-Verhältnissen in einem Fünfer-Schritt beginnend bei 15 für das Klee gras auf maximal 40 ansteigen. Methodisch stieß dieses Vorhaben ab einem CN Verhältnis über 25 an seine Grenzen, da zwar die Zugabemengen entsprechend verabreicht wurden, jedoch bei der Analyse sich nur ein deutlich geringeren Zuwachs an Kohlenstoff nachweisen ließ (Tabelle 18). Offenbar kam es durch den relativ hohen Anteil an Sägemehl zu Entmischungen während des Umsetzens, sodass eine ordnungsgemäße Probennahme aufgrund der heterogenen Verhältnisse in der Miete fehlschlug. Allerdings zeigte dieser Versuch dennoch interessante Ergebnisse.

Die C/N Verhältnisse konnten mit Zugabe des Strohs und Sägemehls bis zu einem C/N Verhältnis von 25 nahezu perfekt eingestellt werden, die weiteren Schritte verfehlten dann die Zielwerte aber das höchste C/N Verhältnis lag bei 29,7 (Zielwert 40) (Tabelle 18). Mit zunehmender Rottezeit war sehr gut die Schritt für Schritt erfolgende Einengung des C/N Verhältnisses zu erkennen. So engte sich das C/N Verhältnis in den Kontrollen mit reinem Klee gras auf einen Wert von 9 ein, während in der Stufe C/N 25 sich der Wert auf 14 zum Ende der Kompostierungsperiode senkte. Eine ähnliche Dynamik lässt sich in allen CN Stufen erkennen.

Tabelle 18: C/N-Verhältnis im Verlauf des Kompostierungsversuches 1B (N=3)

Variante		C/N-Verhältnis							
		MP 26.07.	RO1 01.08.	RO2 07.08.	RO3 14.08.	RO4 28.08.	RO5 11.09.	RO6 23.09.	RO7 23.10.
CN=15	Mittelwert	15,62	16,08	14,08	12,60	11,84	11,58	11,94	9,56
	Standard-ab- weichung	1,11	0,52	1,20	3,32	0,75	0,98	0,87	0,34
CN=20	Mittelwert	19,32	19,34	17,60	15,50	14,94	15,67	15,44	11,07
	Standard-ab- weichung	0,10	0,36	1,61	2,19	0,29	1,37	0,30	0,90
CN=25	Mittelwert	24,54	22,76	20,53	17,47	18,11	19,00	19,34	14,38
	Standard-ab- weichung	1,51	1,59	1,26	2,48	0,86	0,96	1,34	2,13
CN=30	Mittelwert	26,47	23,75	22,40	21,52	19,55	21,83	20,50	14,16
	Standard-ab- weichung	6,13	3,71	2,17	3,42	2,72	2,93	2,19	2,20
CN=35	Mittelwert	28,15	26,86	26,69	25,42	22,40	25,90	25,37	18,21
	Standard-ab- weichung	3,78	1,70	2,85	1,56	3,19	2,34	0,91	3,30
CN=40	Mittelwert	29,74	28,61	25,16	23,56	26,37	27,50	25,06	18,02
	Standard-ab- weichung	1,74	1,38	1,74	0,58	1,25	3,45	1,40	2,02
Insg.	Mittelwert	23,97	22,90	21,08	19,34	18,87	20,25	19,61	14,23
	Standard-ab- weichung	5,75	4,65	4,71	5,10	5,12	6,01	5,09	3,73

In ähnlicher Weise verlief die Entwicklung des Gehaltes N in den Proben (Tabelle 19). Beginnend mit einem Ausgangswert von 2,9 % N erhöhte er sich im reinen Klee gras auf einen Wert von 4 %, während in Stufe 25 der Wert von 1,9 auf 2,9 % N anstieg. Für die übrigen Einstufungen im CN Verhältnis ließen sich analoge Veränderungen beobachten. Für landwirtschaftliche Belange sind diese Entwicklungen von großer Bedeutung, da die N-Gehalte doch als sehr günstig für feste organische Wirtschaftsdünger eingestuft werden können.

Tabelle 19: Verlauf N-Gehalt während des Kompostierungsprozesses im Kompostierungsversuch 1B (N=3)

Variante		N-Gehalt in % TS							
		MP 26.07.	RO1 01.08.	RO2 07.08.	RO3 14.08.	RO4 28.08.	RO5 11.09.	RO6 23.09.	RO7 23.10.
CN=15	Mittelwert	2,89	2,76	3,09	3,55	3,58	3,66	3,44	4,12
	Standard-abweichung	0,21	0,06	0,26	0,89	0,25	0,32	0,23	0,19
CN=20	Mittelwert	2,32	2,28	2,50	2,82	2,85	2,70	2,69	3,57
	Standard-abweichung	0,01	0,04	0,26	0,37	0,05	0,22	0,05	0,23
CN=25	Mittelwert	1,85	1,96	2,16	2,54	2,40	2,28	2,23	2,92
	Standard-abweichung	0,11	0,13	0,13	0,33	0,11	0,11	0,14	0,46
CN=30	Mittelwert	1,78	1,92	2,01	2,10	2,28	2,05	2,13	3,01
	Standard-abweichung	0,37	0,32	0,17	0,34	0,30	0,25	0,21	0,38
CN=35	Mittelwert	1,65	1,69	1,70	1,78	2,03	1,76	1,77	2,44
	Standard-abweichung	0,19	0,10	0,21	0,12	0,28	0,14	0,05	0,41
CN=40	Mittelwert	1,55	1,58	1,79	1,91	1,72	1,67	1,80	2,46
	Standard-abweichung	0,09	0,08	0,12	0,06	0,09	0,19	0,10	0,24
Insg.	Mittelwert	2,01	2,03	2,21	2,45	2,48	2,36	2,34	3,09
	Standard-abweichung	0,50	0,42	0,51	0,73	0,64	0,72	0,61	0,68

Von zentraler Bedeutung sind die in Tabelle 20 gezeigten Stickstoffverluste in Abhängigkeit des C/N Verhältnis. Während für das reine Klee gras hohe Verlustraten in Höhe von 50 % ermittelt werden konnten, reduzierte sich die Verlustrate in den höheren C/N Stufen auf 44,3 % (Stufe 25) bzw. auf 36 % in Stufe 29 (Zielwert 40). Hier bestätigten sich die Erkenntnisse aus dem vorhergehenden Versuch, dass eine Zugabe von Stroh und einem weiteren Kohlenstoffreichen Co-Substrat die richtigen Stellschrauben sind, allerdings die Ergebnisse noch nicht zufriedenstellend waren.

Tabelle 20: Verluste-Berechnung für Nährstoffe nach N:P-Verhältnis (n=3)

Variante		N-, P-, K- und Mg-Verluste in % von Anfangsprobe nach P-Verhältnis			
		P-Verlust 23.10.	N-Verlust 23.10.	K-Verlust 23.10.	Mg-Verlust 23.10.
CN=15	Mittelwert	0,00	50,95	9,60	8,62
	Standardabweichung	0,00	5,64	5,23	4,27
CN=20	Mittelwert	0,00	46,75	18,03	6,37
	Standardabweichung	0,00	1,82	16,27	6,15
CN=25	Mittelwert	0,00	44,31	13,23	-1,61
	Standardabweichung	0,00	6,48	6,39	9,37
CN=30	Mittelwert	0,00	39,01	12,31	-0,53
	Standardabweichung	0,00	3,70	3,51	3,43
CN=35	Mittelwert	0,00	38,57	5,21	-14,11
	Standardabweichung	0,00	6,32	4,59	21,78
CN=40	Mittelwert	0,00	36,55	5,56	-7,79
	Standardabweichung	0,00	7,93	4,75	22,37
Insg.	Mittelwert	0,00	42,69	10,66	-1,51
	Standardabweichung	0,00	7,09	8,18	14,04

Tabelle 21: Zusammenfassung Stickstoffparameter Kompostierungsversuch 1B

C/N-Verhältnis SOLL	C/N-Verhältnis IST	N-Verlust (RO) (%)	N-Verlust (P:N) (%)	N-Gehalt (% TS)	C/N-Verhältnis Kompost
C/N = 15	15,62	52,77	50,95	4,12	9,56
C/N = 20	19,32	44,47	46,75	3,57	11,07
C/N = 25	24,54	41,11	44,31	2,92	14,38
C/N = 30	26,47	34,22	39,01	3,01	14,16
C/N = 35	28,15	38,23	38,57	2,44	18,21
C/N = 40	29,74	34,72	36,55	2,46	18,02

➔ Es besteht eine signifikante Korrelation ( $p < 0,05$ ) nach Pearson zwischen dem N-Verlust (P:N) und dem N-Verlust (RO) mit  $r^2 = 0,80$

Zusammenfassend lassen sich aus den Versuch 1B schlussfolgern, dass allgemein bestätigt werden konnte, dass eine angemessene Erhöhung des CN Verhältnis auf Ausgangswerte von etwa 30 sich günstig auf die Reduktion der Stickstoffverluste um etwa 20 % ergibt, zudem versuchstechnisch aus diesen Versuchen gefolgert wurde, dass eine Anwendung der Mischproben Methode sich als sehr günstig für die Versuchsdurchführung und die Ermittlung der Verlustraten mit sehr geringen Streuungen gezeigt haben. Hier lagen die Korrelationen zwischen Portoproben und Mischproben Methode bei Erbe gleich 0,8.

### 3.3.3 Kompostierungsversuch 2 - Strukturträger und Strukturart (KV 20\_2)

Basierend auf den beiden vorhergegangenen Versuchen war im Kompostierungsversuch 2 die Zugabe von Kohlenstoffträgern nicht allein auf die Einstellung des C/N Verhältnisses ausgerichtet. Der Wert von C/N 30 als wurde zwar als Kontrollvariable für günstige Verhältnisse gewählt, aber es wurde vielmehr auf praktische Belange in landwirtschaftlichen Betrieben für die Auswahl geeigneter Kohlenstoffträger gesetzt, die außerdem gut verfügbar sind. Daher wurde als betriebseigenes Mittel Stroh und als kohlenstoffreiches Strukturmaterial GrünGut aus der kommunalen Sammlung von Baum und Strauchschnitt verwendet. Der Vorteil gegenüber dem Einsatz von Sägemehl wie in Versuch 1B ist das Angebot qualitativ sehr verschiedener Kohlenstoffträger. Stroh ist bekanntlich nach einer gewissen Lag-Phase sehr schnell zersetzt, während holziges Grüngut sehr verschiedenen Qualitäten wie Astwerk, Rinde, Blattreste usw. als heterogene Kohlenstoffträger aufweist. Im Gegensatz dazu verhält sich Sägemehl aus Kernholz als eine sehr einseitige homogene Quelle mit wenig Strukturwirkung.

Tabelle 22 zeigt die großen Vorteile, die sich aufgrund der Auswahl der Struktur Träger Menge und Art auf die Reduzierung der Stickstoffverlusten hat. Während sich für die Kontrollvariante bestehend aus purem Klee gras mit Verlusten von 53 % am oberen Ende der Skala lag - und damit eine Bestätigung für die vorhergehenden Versuche darstellt - konnte durch einen hohen Anteil (65 %) GrünGut die Verlusten auf rund 2 % reduziert werden. Die Mischung aus Stroh und GrünGut mit einem Anteil von 75 % ergaben Verlusten zu Ende des Versuches von 10 %. Die übrigen Varianten lagen in Abhängigkeit von der Größenordnung und der Strukturträger-Art zwischen 47% N-Verlust für Stroh bis zu einer N-Verlustrate von 26 % GrünGut (beide mit 35 % Zugabemenge).

Tabelle 22: Arithmetische Mittelwerte und Standardabweichungen der N-Verluste [%] in den Varianten für die Zeiträume T0-T1, T0-T2, T0-T3 und T0-T4

Variante	Arithmetischer Mittelwert (der Wiederholungen) des N-Verlustes [%] ± Standardabweichung			
	T0-T1	T0-T2	T0-T3	T0-T4
KG_Gruengut_viel	2,33 ± 15,92	2,65 ± 1	3,11 ± 1,36	1,59 ± 3,37
KG_Stroh_Gruengut_viel	-6,45 ± 10,63	9,7 ± 2,57	10,8 ± 2,93	10,01 ± 0,85
KG_Gruengut_wenig	14,18 ± 1,97	20,17 ± 2,42	24,68 ± 2,29	26,71 ± 5,93
KG_Stroh_viel	14 ± 4,58	20,87 ± 6,71	30,19 ± 4,9	28,06 ± 1,87
KG_Stroh_Gruengut_wenig	21,79 ± 1,96	29,89 ± 1,27	32,03 ± 1,98	35,7 ± 1,9
KG_Stroh_wenig	38,75 ± 6,63	45,66 ± 4,47	47,32 ± 3,72	47,61 ± 4,52
KG_pur	39,9 ± 3,69	51,32 ± 2,01	51,8 ± 1,54	53,86 ± 2,16

Außerdem war festzustellen, dass die Verlustraten einen deutlichen Unterschied in der Dynamik der N-Verluste (Abbildung 6) aufwiesen. So wurden bereits in den frühen Kompostierungsphasen die höchsten Verlustraten mit nahezu 40 % in reinem Klee gras bzw. in der Variante mit wenig Stroh Zugabe festgestellt und bewegt sich dann auf einem relativ gleichmäßigen Niveau mit verhältnismäßig geringen zusätzlichen Verlusten. Diese Dynamik nahm in Abhängigkeit von Strukturträger-Art und -Menge einen deutlich flacheren Kurvenverlauf in den Verlustraten über die Kompostierungszeit ein.

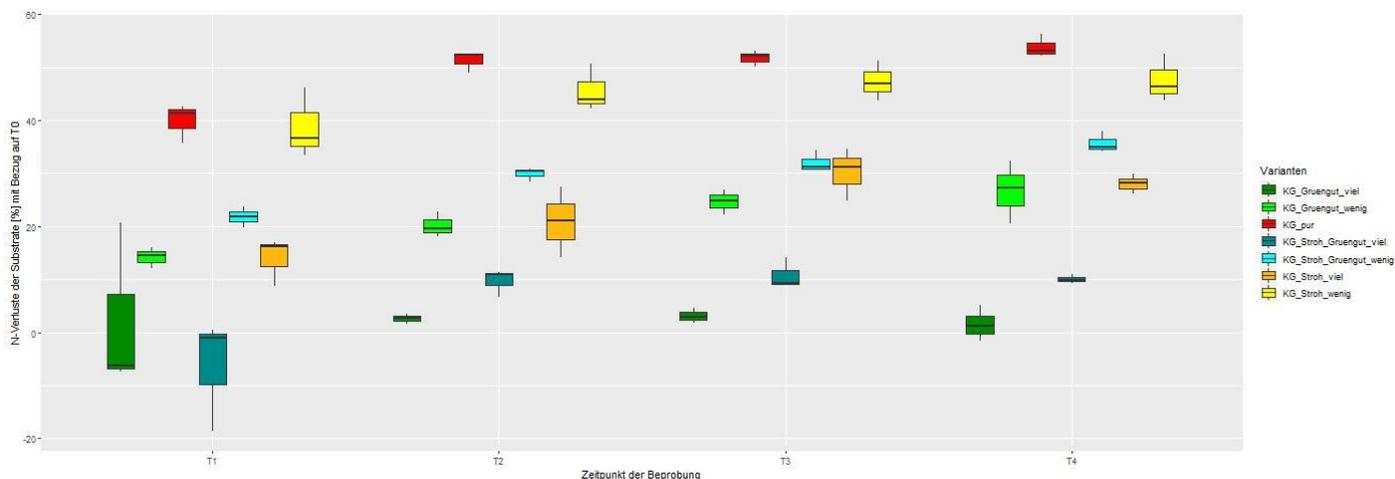


Abbildung 6: Boxplots der N-Verluste der Varianten (N=3) zu den Zeitpunkten T1-T4 in Bezug auf T0

Im statistischen Vergleich zeigten sich deutlich signifikante Unterschiede der Varianten Grün Gut und Mischung Grün Gut/Stroh mit jeweils hohen Zugabemengen gegenüber der Kontrollvariante mit reinem Klee gras und der Variante mit wenig Stroh Zugabe (jeweils gleiche homogene Gruppen). Die übrigen Varianten nahmen ein statistisch gesichertes mittleres Niveau ein.

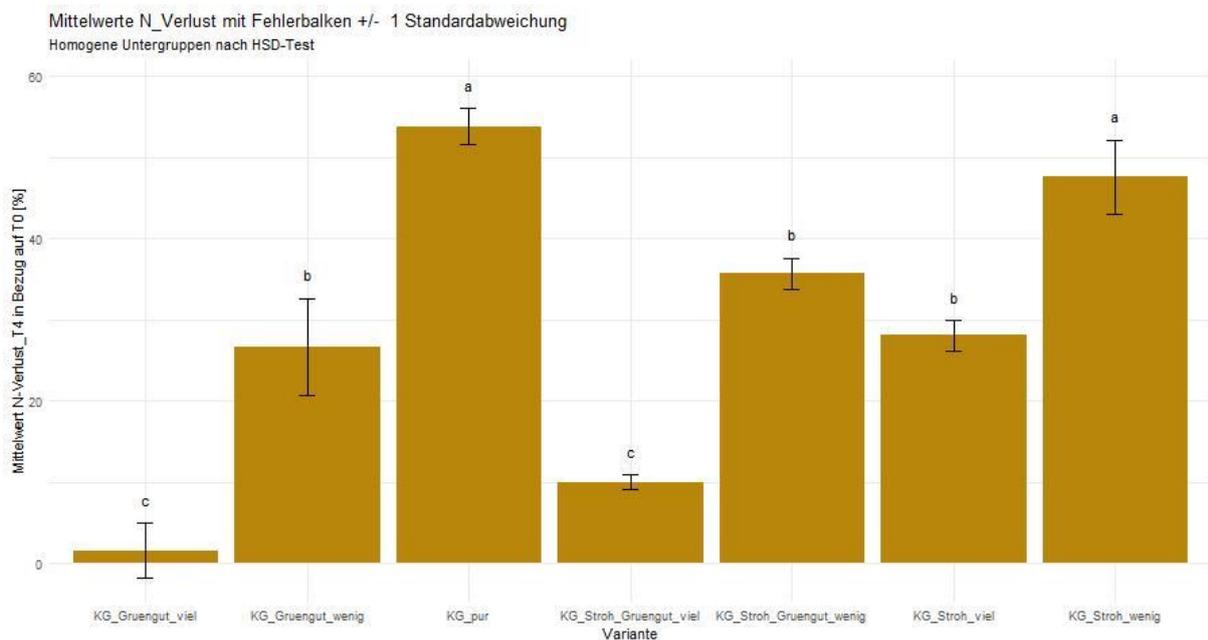


Abbildung 7: Mittelwerte der N-Verluste [%] im Zeitraum T0-T4 in Abhängigkeit der Varianten mit Fehlerbalken:  $\pm$  Standardabweichung und Kennzeichnung homogener Untergruppen (a-c) nach Tukey-HSD-Test (N=21)

#### *Einfluss der Faktoren Strukturträgerart und Strukturträgeranteil auf die N-Verluste*

Für die Zeiträume T0-T1 (vgl. Anhang), sowie T0-T2 (vgl. Anhang) und T0-T3 (vgl. Anhang) waren die Bedingungen der zweifaktoriellen ANOVA erfüllt und diese zeigten jeweils signifikante Einflüsse der Faktoren Strukturträgerart und Strukturträgeranteil auf den jeweiligen N-Verlust, während für keinen der Zeiträume eine signifikante Interaktion zwischen diesen beiden Faktoren vorlag.

Die Bedingungen der zweifaktoriellen ANOVA mit den Faktoren Strukturträgeranteil und Strukturträgerart waren für den N-Verlust im Zeitraum T0-T4 ebenfalls erfüllt (siehe Anhang **Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.**). Sie zeigte signifikante Einflüsse der einzelnen Faktoren auf den N-Verlust im entsprechenden Zeitraum, während keine signifikante Interaktion zwischen den beiden Faktoren vorlag.

Mit einer Effektstärke von  $\eta^2 = 0,966$  besitzt das Modell eine sehr hohe Erklärungskraft (Tabelle 23).

Tabelle 23: Ergebnisse der zweifaktoriellen ANOVA mit den kategoriellen Faktoren Strukturträgeranteil und Strukturträgerart und der metrischen Zielvariable N-Verlust im Zeitraum T0-T4; Signifikanz-Kodierung: 0 '\*\*\*\*' 0.001 '\*\*' 0.01 '\*' 0.05 '.' 0.1 '' 1

	Df	Sum Sq	Mean Sq	F value	Pr(>F)	Signifikanz-Kodierung	Effektgröße R <sup>2</sup>
Strukturträgerart	2	1722,7	861,4	69,07	2,61e-07	***	0.966
Strukturträgeranteil	1	2475,5	2475,5	198,50	7,94e-09	***	
Strukturträgerart - Strukturträgeranteil	2	34,6	17,3	1,387	0,287		
Residuals	12	149,7	12,5				

#### Einfluss des mittleren Feuchtegehalt und des C/N über die Zeit auf den N-Verlust

Einen wichtigen Teil der Analyse nahm auch die Bestimmung von wichtigen Einflussfaktoren wie die C/-Verhältnis, Feuchtigkeit, Temperatur oder Volumen-Oberflächenverhältnis etc. auf die N Verluste ein. Im hier vorliegenden Beispiel ist der Zusammenhang zwischen mittlerem Feuchtegehalt über die Zeit und den N-Verlusten dargestellt.

Da die Bedingungen einer linearen Regression nicht erfüllt waren, wurde der statistische Zusammenhang zwischen dem mittleren Feuchtegehalt der Mieten im Zeitraum T0-T4 mit dem N-Verlust im Zeitraum T0-T4 mittels Spearman-Rang-Korrelation untersucht.

Es besteht ein statistisch signifikanter, positiver Zusammenhang zwischen der mittleren Feuchte der Miete im Zeitraum T0-T4 und dem N-Verlust im Zeitraum T0-T4 (Spearman-Rang-Korrelation:  $p=2,645e-6$ ,  $S=162$ ,  $\rho=0,8948$ ). Mit einer Effektstärke von  $\rho=0,8948$  besteht ein starker Zusammenhang zwischen den beiden Parametern. Abbildung 8 zeigt den positiven Zusammenhang der untersuchten Parameter.

Für praktische Belange ist es ein interessanter Hinweis, denn er zeigt, dass mittlere Feuchtegehalte zwischen 55-60 % sich im Mittel über diese Varianten, die im Versuch untersucht worden sind, sehr günstig Verlustraten in der Größenordnung von etwa 10 % ergeben haben. Dies zeigt empirisch den in der Praxis auch oftmals empfohlenen Wert der Feuchtigkeit im Mietenstock von etwa 50-60 %.

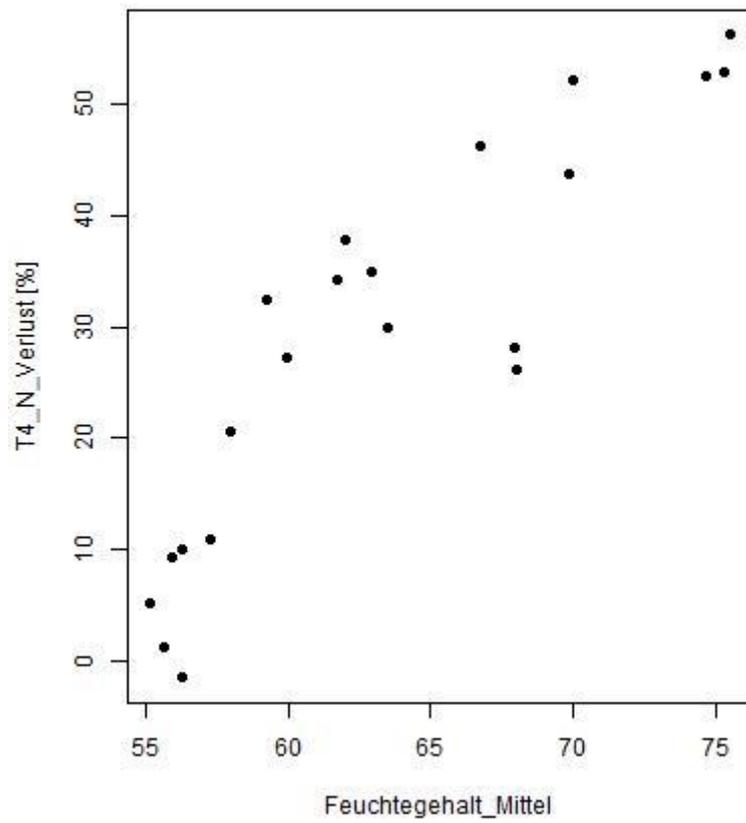


Abbildung 8: Punktwolke des N-Verlusts [%] im Zeitraum T0-T4 in Abhängigkeit des mittleren Feuchtegehaltes [%] der Miete im Zeitraum T0-T4 (N=21)

Eine klare Bestätigung wurde auch in Bezug auf die Bedeutung der Kontrollvariable „C/N Verhältnis im Ausgangsmaterial“ aus diesem Versuch deutlich (Abbildung 9). So bestand ein hoch signifikanter Zusammenhang zwischen N Verlust zum Ende der Kompostierungszeit und dem C/N Verhältnis im Ausgangsmaterial. Je geringer das C/N Verhältnis im Ausgangsmaterial desto höher die Verlustraten im Laufe der Kompostierungszeit - wie bereits aus den anderen Daten bekannt ist. Aus den Daten lässt sich ablesen, dass ein C/N Verhältnis von 30-35 zu sehr günstigen, geringen Verlustraten führt.

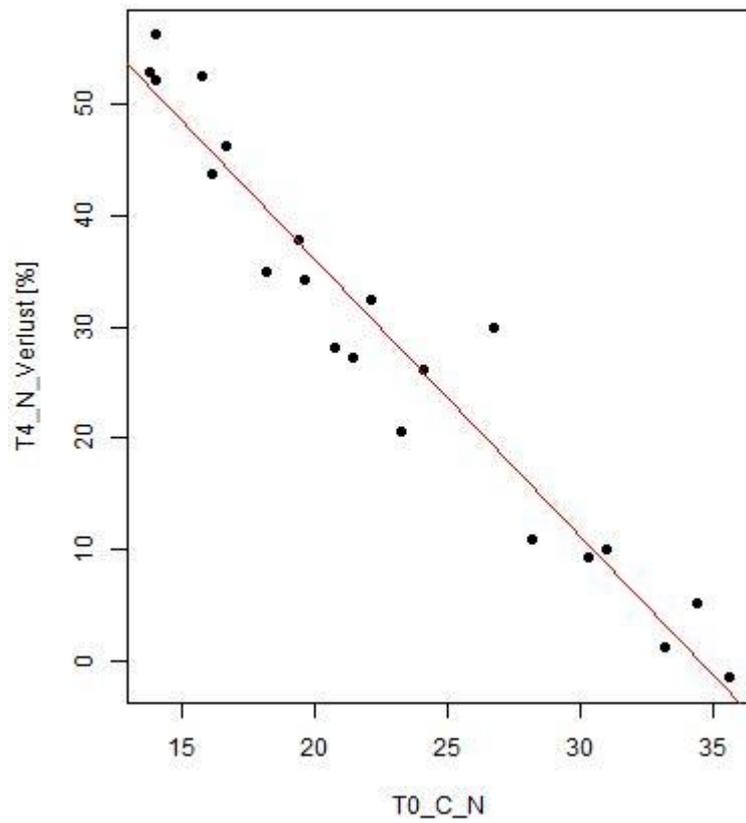


Abbildung 9: Korrelation zwischen N Verlust zum Zeitpunkt T4 - Ende des Versuches -und den C/N Verhältnis im Ausgangsmaterial

### 3.3.4 Kompostierungsversuch 3 Umsetzfrequenz und Mischung (KV 20\_3)

Im 3. Kompostierungsversuch wurden die erfolgreichen Mischungen aus dem Versuch 2 erneut nun in Kombination Faktor Umsetzhäufigkeit / Umsetzart untersucht. Es ergab sich zum einen eine sehr gute Übereinstimmung im Mittel über die Umsetz-Varianten für den Faktor Mischungen in Größenordnung von mittleren N-Verlustwerten von 6 bis 8 % N Verlust (Abbildung 10). Etwas differenzierter gestalteten sich die Ergebnisse für die N Verlustrate im Mittel über die Mischungen in Abhängigkeit des Umsatzmanagements. Hier zeigte sich, dass eine geringe bis mittlere Umsetzfrequenz von 5-10 mal (Kontrollvariable) während der Rotte von 13 Wochen unter den Bedingungen wie sie hier Bezug auf Mischungsverhältnis und Bewässerung gewählt wurden, zu Werte zwischen 5 bis 15 % an N-Verlusten führt. Statistisch abgesichert waren die etwas höhere Verlustraten durch 20-maliges Umsetzen gleichmäßigen Abständen (15%). Im Vergleich dazu hat sich das Verfahren Lübke mit einer hohen Umsetzfrequenz den ersten 14 Tagen sich in diesem Versuch günstiger ausgewirkt (7%).

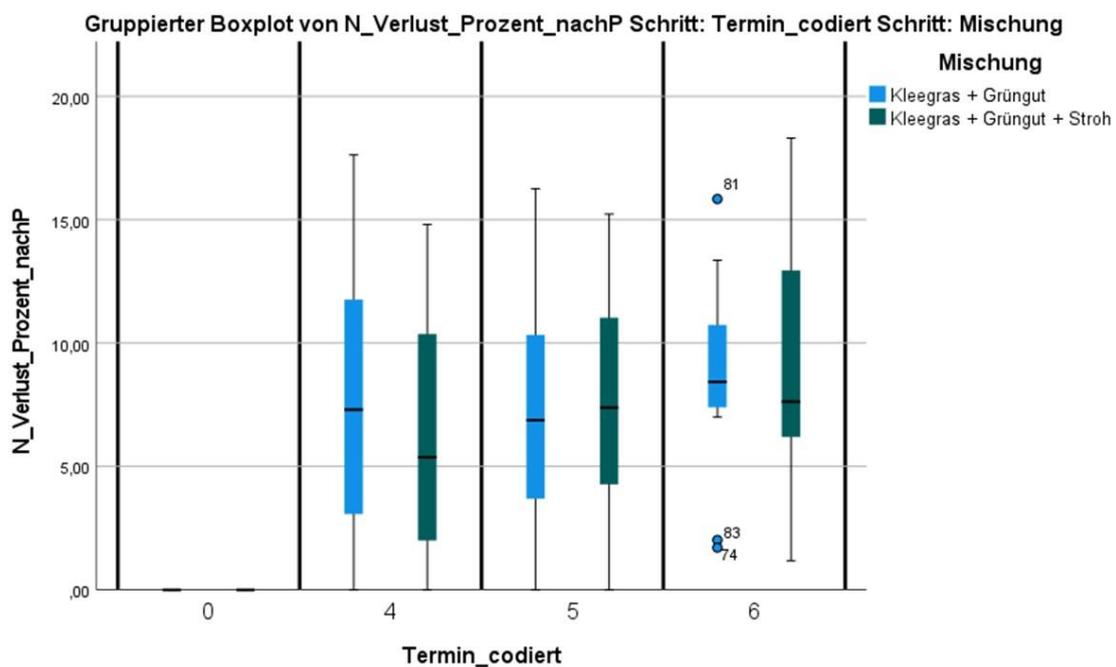


Abbildung 10: N-Verlust in % vom N-Gehalt im Ausgangsgehalt (Basierend auf N:P Verhältnis) im Mittel über den Faktor Umsatzmanagement im Kompostierungsversuch 3

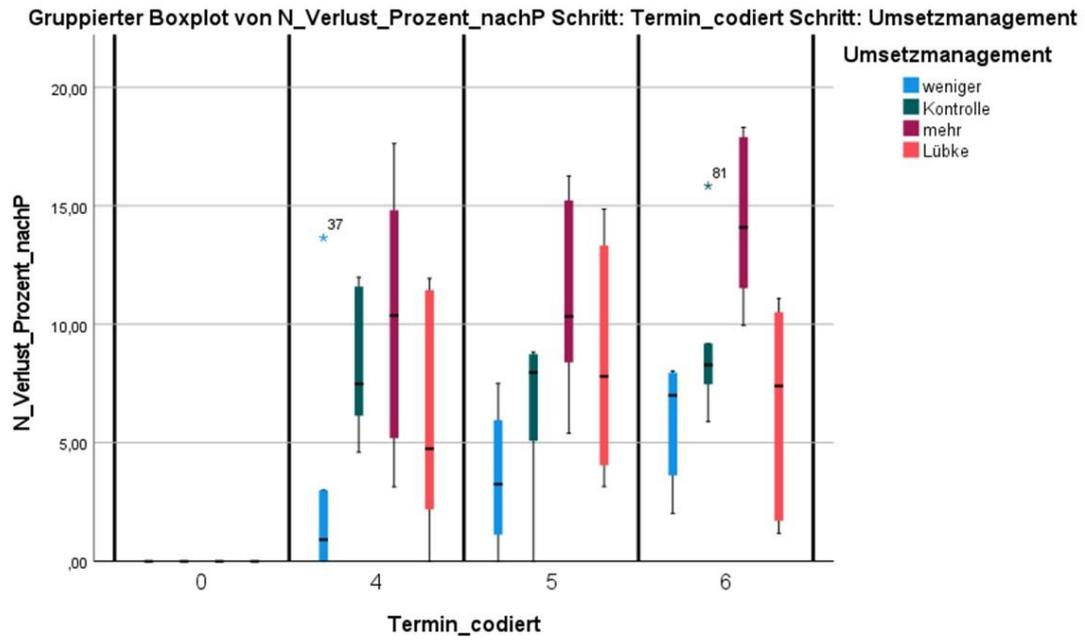


Abbildung 11: N-Verlust in % vom N-Gehalt im Ausgangsgehalt (Basierend auf N:P Verhältnis) im Mittel über den Faktor Materialmischungen im Kompostierungsversuch 3

### 3.3.5 Kompostierungsversuch 4 - Umsetzhäufigkeit und verspätete zusätzliche Kleegraszugabe (KV 21\_3)

Als weiterer Management Versuch zur Optimierung der Kleegraskompostierung wurden im Kompostierungsversuch 4 die Umsetzhäufigkeit als Faktor und eine verspätete zusätzliche Kleegras Zugabe in zwei verschiedenen Stufen untersucht. Während die Verlustraten in den Kontrollen zu Ende des Versuches mit 17,5 % vergleichbar zu den Werten der vorangegangenen Versuche lagen, ergaben sich in Abhängigkeit der Zugabemenge ein nicht ganz einheitliches Bild. Eine geringere Zugabe (50 % des Ausgangswertes) an Kleegras führte sowohl im Vergleich zur hohen Zugabe (100 % des Ausgangswertes) als auch zu der Kontrolle ohne Zugabe bei elfmaligem Umsetzen zu 33 % Verlust bzw. zu 25 % bei der höheren Umsatzfrequenz. Demgegenüber lagen die Verlustraten bei den hohen Kleegras Zugabemengen jeweils bei etwa 20 % zum Endtermin. Insofern ist es einer genaueren Analyse überlassen, inwieweit die Maßnahmen einer zusätzlichen verspäteten Kleegraszugabe sowohl Arbeitszeit als auch eine günstigere N-Bilanz erwarten lassen. Dazu müssten die Versuche zur Bestätigung nochmals durchgeführt werden. Derzeit sind die Aussagen im Versuch für Praktiker nicht noch nicht empfehlenswert, sondern müssten in einem weiteren Versuch verifiziert werden. Zusätzlich ergaben sich bei der Zugabemenge geringere Hygienisierungsleistungen. Auf den jeweiligen Kompostmieten zeigte sich eine gewisse Menge aufgelaufenen Gras.

Tabelle 24 Gehalte an Kohlestoff, Stickstoff, dem CN Verhältnis und den N Verlustraten (basierend auf Aschegehalten) im Kompostierungsversuch 4

Termin Woch	Kontrolle				11 weniger				11 viel			
	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche
02.06.2021	0,87	31,4	36,3	0	0,83	31,2	37,5	0,00	0,84	34,4	41,3	0
20.07.2021	1,14	27,8	24,3	7,3	1,11	24,9	22,6	12,9	1,14	26,8	23,4	6,5
22.07.2021	1,11	27,5	24,7	0	1,21	29,1	24,0	0,0	1,27	29,0	22,8	0,0
04.08.2021	1,10	27,7	25,2	7,8	1,18	28,3	24,2	28,9	1,26	29,3	23,3	16,7
21.09.2021	1,14	23,6	20,7	17,5	1,27	23,2	18,4	33,5	1,40	25,6	18,3	19,2

Termin Woch	Kontrolle				15 weniger				15 viel			
	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche	Nt	Ct	C/N	N-Verlust Asche
02.06.2021	0,99	32,8	33,5	0,00	0,91	32,7	35,9	0,00	0,92	34,0	37,1	0,0
20.07.2021	1,27	26,9	21,1	13,8	1,16	23,7	20,4	9,5	1,23	27,9	22,6	7,5
22.07.2021	1,19	28,7	24,3	0	1,26	28,9	23,0	0,0	1,41	30,8	21,9	0,0
04.08.2021	1,16	28,6	24,7	15,9	1,22	27,2	22,2	17,7	1,33	29,3	22,0	21,9
21.09.2021	1,17	23,1	19,7	17,5	1,30	24,3	18,7	25,5	1,51	26,2	17,4	20,1

### 3.3.6 Kompostierungsversuch 5 - Bewässerungsmanagement

Im letzten Kompostierungsversuch ergaben sich nur sehr geringe Unterschiede in Abhängigkeit von der Bewässerungsmengen bzw. Bewässerungszeitpunkte. Offensichtlich können die günstige Strukturverhältnisse die schwankenden Wassergehalte abpuffern, so dass es nicht zu einer Steigerung der N Verluste kam. So lagen die Verlustraten in einem sehr engen Bereich (Tabelle 25 und Tabelle 26).

Tabelle 25: Nt, Ct und Pt Gehalte zu den unterschiedlichen Terminen in Kompostierungsversuch 5

Variante/Termine	Nt-Gehalt	Ct-Gehalt	C/N-Verhältnis	P (mg/kg TS)
<b>Kontrolle</b>				
Anfang	1,33	37,78	28,51	1945,93
T1	1,67	34,11	20,47	2569,76
T2	1,82	31,08	17,06	2993,95
T3	1,81	31,07	17,17	3090,93
T4	1,90	28,59	15,04	3429,07
<b>zu viel/ früh</b>				
Anfang	1,33	38,59	29,15	1884,86
T1	1,66	33,91	20,40	2596,65
T2	1,77	31,98	18,05	2906,91
T3	1,79	31,07	17,32	3015,55
T4	1,88	29,61	15,73	3340,82
<b>zu viel/ spät</b>				
Anfang	1,35	39,40	29,28	1887,34
T1	1,65	35,01	21,23	2537,32
T2	1,83	31,82	17,42	3013,01
T3	1,73	31,71	18,36	2978,24
T4	1,76	31,57	17,94	3063,37
<b>zu wenig/ früh</b>				
Anfang	1,33	38,66	29,19	1852,23
T1	1,53	37,39	24,70	2267,54
T2	1,71	34,15	20,00	2652,03
T3	1,73	33,44	19,34	2717,32
T4	1,88	29,70	15,81	3288,80
<b>zu wenig/ spät</b>				
Anfang	1,32	38,13	29,04	1882,58
T1	1,69	34,21	20,26	2541,49
T2	1,81	30,52	16,84	2943,63
T3	1,82	30,80	16,92	3096,37
T4	1,94	28,61	14,75	3452,87

Tabelle 26: N<sup>t</sup>-Verlust (Basis N:P Verhältnis) im Kompostierungsversuch 5

Variante	N - Verlust (%)
<b>Kontrolle</b>	<b>18,74</b>
<b>zu viel/ früh</b>	<b>19,82</b>
<b>zu viel/ spät</b>	<b>19,49</b>
<b>zu wenig/ früh</b>	<b>20,31</b>
<b>zu wenig/ spät</b>	<b>19,56</b>

### 3.3.7 Betriebliche Versuche

#### Versuch A

Nach 60-tägiger Kompostierung ergaben sich im Mittel Stickstoffverluste von ca. 46 %. Die Kontrolle wies mit ca. 43 % die geringsten Verluste auf, gefolgt von Variante ‚Pflanzenkohle + Gesteinsmehl‘ mit ca. 45 %. Die höchsten Stickstoffverluste traten bei der Variante ‚Pflanzenkohle‘ mit etwa 50 % auf.

Es konnte kein Zusammenhang zwischen Stickstoffverlusten und den Zuschlagstoffen hergestellt werden. Vielmehr war die Kompostierung am Anfang bei allen Varianten von einem relativ niedrigen C/N-Verhältnis von 16-17 und durch hohe Temperaturen bis über 70 °C geprägt. Höhere Temperaturen der Variante Pflanzenkohle gegenüber Variante P+G und der Kontrolle erklären möglicherweise auch die höheren Stickstoffverluste durch verstärkten Ammoniak-Austrag. Die Ergebnisse bestätigen die Bedeutung eines ausgewogenen Kohlenstoff-Stickstoffverhältnisses bei volatilen Inhaltsstoffen wie Klee gras bzw. Gemüseresten wie sie auf dem Betrieb verwendet werden. Ein Erdanteil dürfte zudem dazu beitragen, dass die Kohlenstoffverhältnisse ungünstig in Bezug auf eine gute Verfügbarkeit von Kohlenstoff in der Anfangsphase des Kompostierungsprozesses sind.

#### Versuch B

Entgegen der These einer Verbesserung der Stickstoffeffizienz während der Kompostierung von einer sogenannten Klee gras-Meliorationsmischung fiel diese numerisch etwas schlechter aus. Stroh als Zuschlagstoff zeigte jedoch eine signifikante Verbesserung. Durch die Zugabe von 75 % Stroh auf das Volumen bezogen und den daraus resultierenden Effekt auf das C/N-Verhältnis und die Lagerungsdichte konnten die N<sub>t</sub>-Verluste signifikant gesenkt werden. Bei der anschließenden ökonomischen Betrachtung zeigten die beiden Kompostvarianten mit Strohzusatz deutlich geringere Bereitstellungskosten je Kilogramm N<sub>t</sub>.

## 4 Arbeitspaket 2 - Düngewirkung von Klee gras-Transferdüngern

Insgesamt sechs Feldversuche wurden im Rahmen des OPTI KG Projektes auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen in den Jahren 2021/2022 angelegt; sowohl Sommerungen (Sommerweizen und Kartoffeln) als auch Winterungen (Winterweizen) kam zum Einsatz sowie für die Versuche eins und zwei jeweils ein Nachfrucht-Versuch mit Wintergerste. **(Fehler! Verweisquelle konnte nicht gefunden werden.)**

Tabelle 27: Auflistung der mit Klee gras-Transferdüngern durchgeführten Feldversuche, eingebrachte N- Mengen und Kulturen im Rahmen des Projektes OPTI-KG

Versuch	Kultur	Dünger - Substrate	N-Mengen kg/ha	Jahr
1	Sommerweizen	4 KG-GK. Komp., Gärrest, Rindermistkomp., KL-Pellets, KG-Silage, Cut&Carry	170	2021
2	Kartoffeln	4 KG-GK. Komp., Gärrest, Rindermistkomp., KL-Pellets, KG-Silage, Cut&Carry	170	2021
3_NF	Wintergerste	siehe V 1	Nachwirkung	2021/2022
4_NF	Wintergerste	siehe V 2	Nachwirkung	2021/2022
5	Winterweizen	3 KG-GK. Komp., Gärrest, Rindermistkomp., KL-Pellets, KG-Silage, Cut&Carry	170	2021/2022
6	Sommerweizen	4 KG-GK. Komp., Gärrest, Rindermistkomp., KL-Pellets, KG-Silage, Cut&Carry	170	2022

### 4.1 Material und Methoden – Feldversuche

Die Versuchsanlage wurden als vollständig randomisiertes Blockdesign mit vier Wiederholungen der jeweiligen Düngevarianten angelegt (Abbildung 12). In der Regel hatten die Parzellen eine Größe von 18m x 3m, also 54,00m<sup>2</sup>, die Ernteparzelle hatte eine Abmessung von 1,5m x 7m für die Haupternte, einem Beprobungsbereich für die Ermittlung weiterer Parameter und einem Randbereich von je zwei Reihen.

Die Versuche waren einfaktoriell und unterschieden sich in den gedüngten Varianten nur in dem ausgebrachten Düngungsmaterial der Klee gras Transferdünger. Die Versuche enthielten eine Kontrolle [K] ohne Düngung, siliertes Klee gras [S], frisches Klee gras „Cut and Carry“ [C] und pelletierten Weißklee [P], eine Biogas-Gärrest-Variante [G], eine Rindermistkompost-Variante [RMK] und vier verschiedene Klee gras kompost-Varianten als Düngeparzellen. Die Klee gras Komposte unterschieden sich in ihren Ausgangsmaterialien und Herstellungsverfahren und sind Komposte, die aus den vorangegangenen Versuchen in Bezug auf geringe N-Verluste am besten abgeschnitten hatten.

Der Düngevarianten wurden mit zwei Ausnahmen vor der Aussaat N-äquivalent mit 170kg N/ha ausgebracht. Das frische Klee gras wurde auf Grund der Verfügbarkeit in den Sommerungen zwei Monate später und die Biogasgärreste etwa 1 Monat nach der Saat/Pflanzung ausgebracht.

Rand	Parzellennr. 17	Parzellennr. 18	Parzellennr. 19	Parzellennr. 20	Parzellennr. 21	Parzellennr. 22	Parzellennr. 23	Parzellennr. 24	Parzellennr. 25	Parzellennr. 26	Parzellennr. 27	Parzellennr. 28	Parzellennr. 29	Parzellennr. 30	Parzellennr. 31	Parzellennr. 32	Rand
	Variante 6	Variante 5	Variante 7	Variante 2	Variante 1	Variante 8	Variante 4	Variante 3	Variante 4	Variante 2	Variante 7	Variante 5	Variante 1	Variante 3	Variante 8	Variante 6	
	KG-Komp. 2	KGKomp. 1	KGKomp. 3	KG-Pellets	Kontrolle	KGKomp. 4	Silage	RMK	KG-Komp. 2	KG-Pellets	KGKomp. 3	KGKomp. 1	Kontrolle	RMK	KGKomp. 4	KG-Komp. 2	
Rand	Parzellennr. 1	Parzellennr. 2	Parzellennr. 3	Parzellennr. 4	Parzellennr. 5	Parzellennr. 6	Parzellennr. 7	Parzellennr. 8	Parzellennr. 9	Parzellennr. 10	Parzellennr. 11	Parzellennr. 12	Parzellennr. 13	Parzellennr. 14	Parzellennr. 15	Parzellennr. 16	Rand
	Variante 1	Variante 7	Variante 5	Variante 4	Variante 8	Variante 2	Variante 3	Variante 6	Variante 6	Variante 5	Variante 1	Variante 7	Variante 3	Variante 8	Variante 4	Variante 2	
	Kontrolle	KGKomp. 3	KGKomp. 1	Silage	KGKomp. 4	KG-Pellets	RMK	KG-Komp. 2	KG-Komp. 2	KGKomp. 1	Kontrolle	KGKomp. 3	RMK	KGKomp. 4	Silage	KG-Pellets	

Abbildung 12: Beispiel für einen Versuchsplan eines Feldversuches in Opti KG.

## 4.2 Ergebnisse

Die Erträge, die sowohl bei Weizen, Gerste und Kartoffeln ermittelt wurden, zeigen die Ertragsfähigkeit des besonders fruchtbaren Standortes auf der Domäne Frankenhausen, allerdings zeigte sich auch ein differenziertes Bild in Hinsicht auf die verschiedenen Transferdünger sowie bezüglich des Einsatzzeitpunktes (Tabelle 28). Die ungedüngten Kontrollen ergaben für Weizen Erträge bis zu 68 dt/ha und 294 dt /ha für Kartoffeln (Rohertrag). Durch die Düngungen lassen sich die Erträge vereinzelt deutlich steigern - Gärreste mit 120% in Kartoffeln - während im allgemein die Dünger bei Steigerungen zwischen 102 bis 112 % lagen. Auffällig ist, dass keiner der Dünger ausschließlich besonders starke Ertragswirkungen zeigte. So lagen die Komposte im Mittel bei 103% Mehrertrag, Silage bei 104% und Cut & Carry 105%.

Interessant ist eine gewisse Systemwirkung der Dünger: so war deutlich die Nachwirkung nach beiden Vorkulturen in Weizen oder Kartoffeln beobachten. So konnten nach Sommerweizen in der Wintergerste Ertragssteigerungen im Mittel von 107 % durch die Komposte erzielt werden. Etwas höher fielen noch liegen die durch Cut & Carry und die Klee gras Silage aus, auch der Pelletdünger zeigte eine hohe Nachwirkung.

Tabelle 28: Mittlere Erträge (in dt/ha, n=4) nach Düngung mit diversen Klee gras Transferbürgern (P = Pellets, C&C = Cut und Carry, KG S = Klee gras-Silage, Gärreste, RMK = Rindermistkompost und Klee graskomposte (1-4)) sowie relative Erträge im OPTI-KG Projekt in verschiedenen Kulturen auf der Domäne Frankenhausen (+/- = Standardabweichung) (SW = Sommerweizen, WW = Winterweizen, WG = Wintergerste, Kart = Kartoffeln; NF = Nachfrucht)

Versuch	Kultur		P	C&C	KG S	Komposte				GR	RMK	Kont
						1	2	3	4			
1	SW	%	99	100	106	108	110	111	103	106	110	100
		dt/ha	48,1	48,5	51,4	52,4	53,6	53,7	50,3	51,1	53,5	48,5
		+/- dt/ha	1,56	1,91	2,07	1,67	1,33	1,42	1,38	1,11	1,69	1,43
2	Kart	%	106	100	105	102	102	95	102	120	100	100
		dt/ha	314	296	309	302	300	280	302	355	295	294
		+/- dt/ha	24,4	25,2	25,5	28,4	21,6	24,2	13,8	31,1	16,5	15,9
3_NF-V1	WG	%	115	109	110	105	110	106	106	105	109	100
		dt/ha	67,2	66,6	67,5	64,1	67,3	65,0	64,5	64,9	67,1	61,2
		+/- dt/ha	2,71	1,12	0,37	4,98	2,73	1,97	2,63	6,31	2,71	1,39
4_NF-V2	WG	%	105	103	107	98	102	100	101	102	106	100
		dt/ha	69,7	68,7	71,6	65,8	68,1	66,9	67,2	68,5	70,8	66,5
		+/- dt/ha	3,13	3,12	1,96	2,55	1,59	1,38	3,13	3,61	1,17	5,79
5	WW	%	112	112	108	104	102	103	-	109	105	100
		dt/ha	76,2	76,7	73,9	71,2	70,2	70,4	-	74,6	71,9	68,3
		+/- dt/ha	0,49	1,42	0,53	2,36	1,92	2,52	-	3,11	1,08	1,27
6	SW	%	108	108	99	101	101	103	103	109	104	100
		dt/ha	72,3	72,7	66,3	67,9	67,8	69,2	69,2	73,4	70,0	67,2
		+/- dt/ha	1,12	1,68	2,41	1,71	1,41	1,53	1,22	1,93	0,86	2,06

## 5 Arbeitspaket 3 - Ökonomik von Klee gras-Transferstrategien

Im folgenden Abschnitt werden Wirtschaftlichkeits-Analysen verschiedener Klee gras-Transfer-Strategien zur Verbesserung des Nährstoffmanagements auf Basis von praxisrelevanten Herstellungs- und Einsatzverfahren vorgestellt.

Initiales Werkzeug ist dabei die systematische Analyse entsprechender Klee grasnutzungssysteme in der landwirtschaftlichen Praxis, um daraus sowohl typische Verfahrensabläufe und Handlungsalternativen als auch deren Stoffströme, Nährstoffeffizienz und Kostenstrukturen ableiten zu können. Darauf aufbauend lassen sich dann mit Hilfe von passenden ökonomischen Analysemethoden Hinweise erarbeiten, die im Idealfall einzelbetriebliche Entscheidungsunterstützung bieten können.

Landwirtschaftliche Betriebe sind allerdings als komplexe Systeme mit vielfältigen Mechanismen zu sehen, die eine isolierte Betrachtung rein ökonomischer Kennzahlen relativ wertlos erscheinen lässt. Daher ist ein Modellansatz implementiert worden, der möglichst intuitiv und praxistauglich eine einzelbetriebliche Analyse der gegenwärtigen Klee grasnutzung ermöglichen und darüber hinaus in einem planerischen Ansatz die Möglichkeit zur Optimierung einer bestehenden Klee grasnutzung bieten soll. Unter Berücksichtigung von Ergebnisspannweiten ist daher der Output dieses Arbeitspakets, sowohl szenariengestützte Aussagen zur absoluten oder relativen Vorteilhaftigkeit einzelner Klee grasnutzungsverfahren abzuleiten, als auch modellgestützt einzelbetriebliche Analysen zu ermöglichen.

### 5.1 Systemanalyse: pflanzenbauliche Effekte und Grundlage der ökonomischen Bewertung

Klee gras wird im Ökolandbau in viehlosen Betrieben vielfältig genutzt:

- Verbleib des Aufwuchses auf der Fläche (Mulchen bzw. Flächenrotte)
- Verfahren der Klee grasdüngemittel-Bereitstellung wie Direkttransfer der frischen Biomasse (Cut & Carry), Silierung und Pelletierung
- Kompostierung (Klee gras pur oder mit Ko-Substraten)
- überbetriebliche Futter-Mist-Kooperation mit Viehhaltung oder Biogasanlage

Um ein Verständnis für die Wirkungen verschiedener Klee grasnutzungsverfahren sowohl im Hinblick auf Stoffströme als auch monetäre Flüsse zu bekommen, ist es hilfreich, die jeweiligen Wirkbeziehungen schematisch in einem landwirtschaftlichen Betriebssystem abzubilden (Abbildung 13).

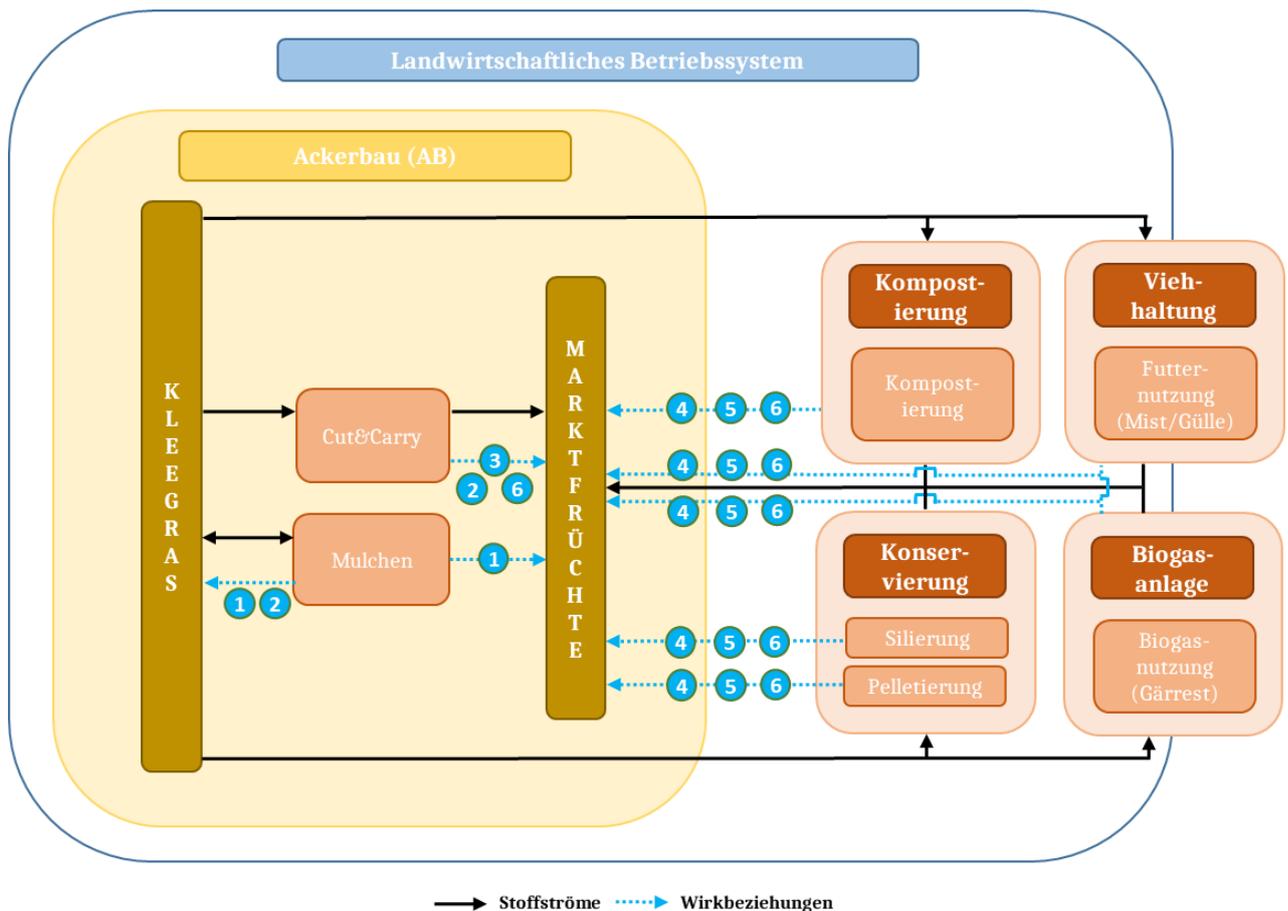


Abbildung 13: Stoffströme und Wirkbeziehungen (nummeriert) verschiedener Kleegrasnutzungsverfahren innerhalb eines landwirtschaftlichen Betriebssystems: (1) Reduzierte N-Fixierleistung, reduzierte N-Bereitstellung Marktfrüchte; (2) Erhöhte Stickstoff-Emissionen auf Feld; (3) Räumliche Flexibilität des Einsatzes (Düngung, Beikrautunterdrückung); (4) Räumliche und zeitliche Flexibilität des Einsatzes (Düngung, Unkrautunterdrückung); (5) Düngewirkung und verfahrensabhängige Nährstoffverluste (N, C); (6) Phytosanitäre Wirkungen, Wasserhaushalt, Beikrauteffekte

Die abgebildeten Wirkbeziehungen können sowohl in Bezug auf die Nährstoffeffizienz und damit einhergehende Ertragseffekte des jeweiligen Kleegrasnutzungsverfahrens als auch auf die Mechanisierung betriebswirtschaftliche Auswirkungen haben. Üblicherweise führt der Transfer von Kleegras zu einer Verbesserung der zeitlichen und räumlichen Flexibilität der Düngung, allerdings erhöhen sich damit in der Regel auch Aufwand und damit Kosten.

Mit Bezug auf die Nummerierung in Abbildung 13 lassen sich in Tabelle 29 folgende pflanzenbauliche Effekte identifizieren und teilweise auch quantifizieren. Eine Ökonomische Einordnung der Verfahren erfolgt dann im folgenden Kapitel.

Tabelle 29: Pflanzenbauliche Effekte als Grundlage darauf aufbauender ökonomischer Analysen (Systemanalyse)

Wirkung	Nutzungsvarianten	Pflanzenbauliche Effekte – qualitativ	Pflanzenbauliche Effekte - quantitativ	Quellen
(1), (2)	Mulchen, Verbleib auf der Fläche	nicht mobile Düngung, Klee gras nicht zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar in der Fruchtfolge	reduzierte N-Fixierleistung des Klee grasbestands im Vergleich zur Abfuhr (bis 32 %).  N <sub>2</sub> O-Verluste (bis -38%) der Mulchaufgabe.	Möller, 2009; Stinner et al. 2008; Hatch et al. 2007; Möller and Stinner 2009; Helmert et al. 2003
(2), (3), (6)	Transfer des Frischmaterials auf eine Nehmerfläche (Cut&Carry)	Eingeschränkte räumliche und zeitliche Einsetzbarkeit (Synchronisation von Geber- und Nehmerfläche)  Positive Effekte auf Unkrautunterdrückung, Beschattung, Wasserhaushalt, phytosanitäre Effekte, Ertrag in der Nehmerkultur  N-Überschuss, Nährstoffverluste vermeiden	Hohe Field-to-field N-Effizienz (bis zu 100 %).  Lachgasemissionen von Transfermulch vergleichbar mit Mulchen ohne Transfer (bis – 38 %)  Ertragszuwachs bei Nehmerkultur möglich (Beispiel Kartoffel bis zu + 61 % im Vergleich zur Kontrolle)	Benke et al 2017; van der Burgt et al. 2013; Stumm & Köpke 2016; Stumm & Köpke 2017
(4), (5), (6)	Kompostierung	Zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar  Düngewirkung mittel- bis langfristig  N-Verluste bei der Kompostierung stark abhängig von der Substratmischung (vgl. Kapitel 3) und vom Kompostiermanagement  Positive phytosanitäre Wirkungen erwartbar, Beikrautsamen werden bei der Kompostierung abgetötet.	Field to field N Effizienz: 50 %.  Nach den hier vorliegenden Untersuchungen bei angepasstem substratmix und guter Prozessführung N-Verluste bei lediglich 10 % möglich	Benke et al 2017  Vorliegender Opti-KG Abschlussbericht 2024
(4), (5), (6)	Silierung und Transfer des Frischmaterials auf eine Nehmerfläche	Zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar  Düngewirkung kurz-, mittel- und langfristig  Unkrautunterdrückung  Einarbeitung notwendig, daher nur vor der Saat der Nehmerkultur anwendbar	Field to field N-Effizienz Silierung: 93 %  Unkrautunterdrückung mit Ertrags effekt von bis zu + 38 % im Vergleich zur Kontrolle	Benke et al 2017; Stumm & Köpke 2016
	Pellettierung	Zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar  Düngewirkung mittel- bis langfristig  Hoher Herstellungsaufwand, daher eher für Gemüsebau geeignet	Ertrag bis zu + 79% im Vergleich zur Kontrolle	
(4), (5), (6)	Futter-Mist-Kooperation (Mist, Gülle)	Zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar  Düngewirkung kurz-, mittel- und langfristig  Teilweise erhöhte N-Verluste aufgrund Fütterung sowie Lagerung der Koppelprodukte	Field to field N-Effizienz Festmist: 35 %, Gülle: 63 %	Benke et al 2017
(4), (5), (6)	Biogasnutzung	Zeitlich und räumlich flexibel einsetzbar  Düngewirkung kurz-, bis mittelfristig  Wenig N-Prozessverluste, bei nicht sachgerechter Ausbringung des Gärrests Gefahr hoher NH <sub>3</sub> -Verluste	Field to field N-Effizienz: 92 %  Ertragseffekte Fruchtfolge: - 8 bis + 85 %	Wulf et al., 2002; Möller, 2009; Benke et al 2017; Siegmeier et al. 2015

## 5.2 Kosten verschiedener Klee gras nutzungs verfahren

Bereitstellungskosten unterschiedlicher Klee gras nutzungs verfahren sind abhängig von verschiedenen Faktoren wie der Komplexität des Bereitstellungs verfahrens, der eingesetzten Technik und insbesondere im Fall der Kompostierung von der möglichen Nutzung baulicher Anlagen. Das folgende Kapitel gibt einen Überblick über die Bereitstellungskosten verschiedener Verfahren in Bezug auf die genannten Parameter.

### 5.2.1 Prozessketten und Mechanisierung

Die Prozessketten der Klee gras düngemittel bereitstellung lassen sich in verschiedene Verfahrensschritte vom Anbau über die Werbung, den Input zusätzlicher Substrate, die Verarbeitung und Lagerung des Verarbeitungsprodukts bis hin zu Ausbringung und Einarbeitung des bereitgestellten Düngemittels einteilen. In jedem Abschnitt sind abhängig vom Verfahren unterschiedliche Möglichkeiten der Mechanisierung denkbar, die sich letztlich auch auf die Arbeitserledigungskosten auswirken können. Abbildung 14 dokumentiert unterschiedliche Mechanisierungsmöglichkeiten der Klee gras nutzungs verfahren im Detail.

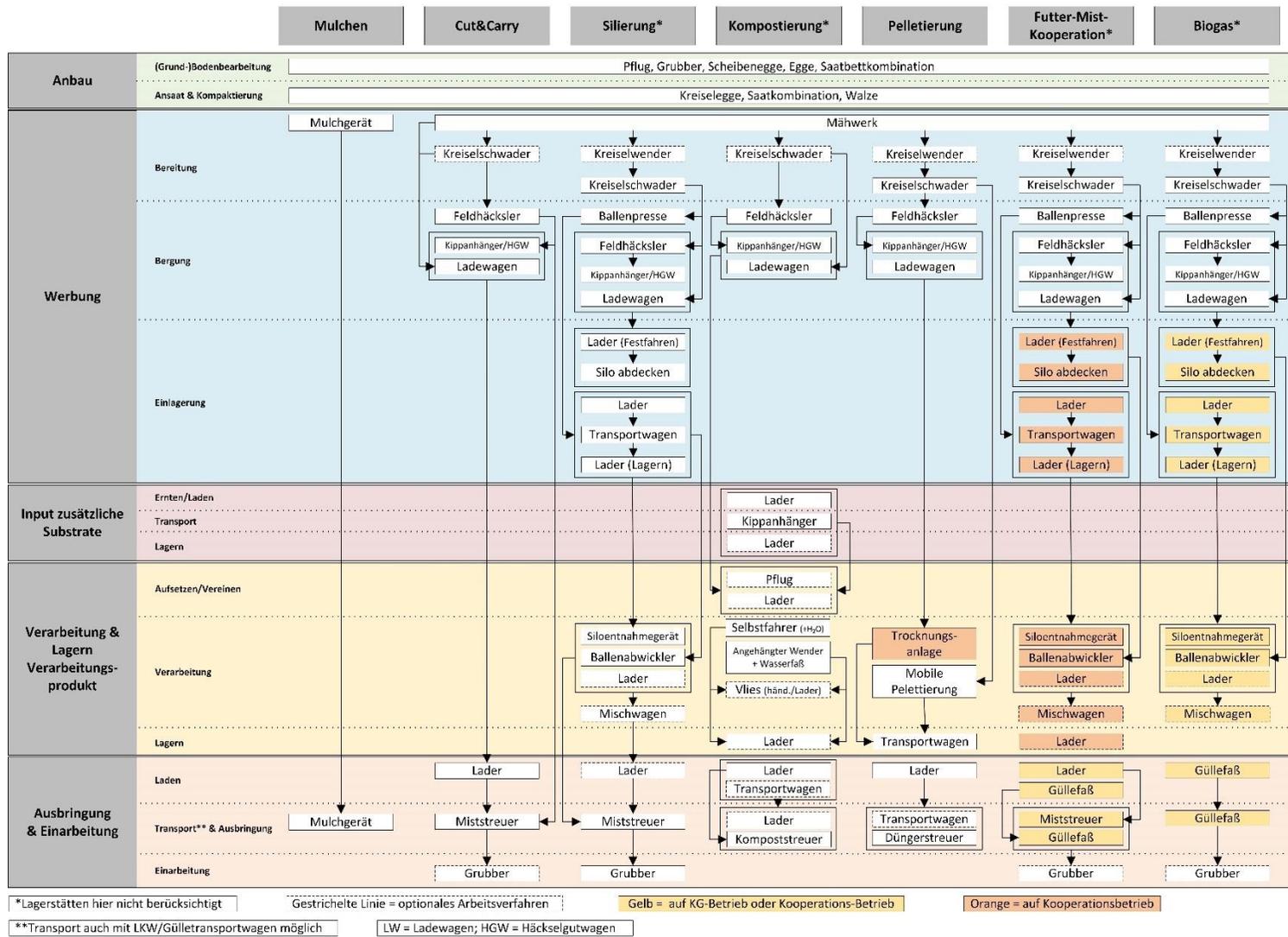


Abbildung 14: Mögliche Prozessketten der Mechanisierung verschiedener Kleeergrasnutzungsverfahren

## 5.2.2 Verfahrenskosten im Vergleich

Tabelle 30 zeigt eine beispielhafte Kalkulation der absoluten transferierten Frischmassemengen sowie den Kosten der Bereitstellung der erzeugten Düngemittel von unterschiedlichen Klee-grasnutzungsoptionen (dabei unterstellte Mechanisierung siehe Tabelle 31). Bei einer Bezugsbasis von 1 ha Klee-gras wurde ein Klee-grasertrag von 40 t FM/ha/Jahr bei viermaliger kontinuierlicher Nutzung mit dem jeweils gleichen Verfahren sowie eine standardisierte Mechanisierung (Zugmaschine angepasst an Leistungsbedarf  $\pm$  102 kW), Schlaggröße (5 ha) und innere Verkehrslage (3 km) unterstellt. Berücksichtigt sind zudem die Biomasseverluste entlang der Prozess- bzw. Verarbeitungskette von der Ernte bis zu Ausbringung des jeweiligen Düngemittels. Die entsprechenden Arbeiterledigungskosten basieren sowohl auf im Projekt erhobenen empirischen Daten und Einschätzungen von Praxisbetrieben als auch Daten des KTBL (2024) (Arbeiterledigungskosten umfassen variable und fixe Maschinenkosten sowie Kosten der Arbeit). Selbstverständlich sind Arbeiterledigungskosten stark managementabhängig und können daher größeren Schwankungen unterliegen, die vorgestellten Zahlen stellen daher Näherungswerte dar.

Bei der Variante "Kompostierung mit Substratmix" werden im Volumenverhältnis je 37,5 % Stroh und Grüngut mit 25 % Klee-gras verkompostiert, entsprechend höhere Substratmengen sowie Kosten sind berücksichtigt. Diese Kosten beinhalten bei diesem Verfahren neben den Arbeiterledigungskosten Direktkosten für die Substrate Stroh und Grüngut in Höhe von 1.063 €. Die Kooperationsverfahren Mist, Gülle und Biogas berücksichtigen hier jeweils auch die Prozessverluste insbesondere bei der Lagerung, aber auch durch die Stoffverluste während der tierischen Verdauung. Bei den Kooperationsverfahren sind die gesamten Arbeiterledigungskosten angegeben, die sich allerdings auf zwei Kooperationspartner aufteilen. Für den Klee-gras abgebenden Betrieb liegt der Kostenanteil bei ca. 25 % oder ca. 160 €/ha, die für Bodenbearbeitung, Ansaat und Wirtschaftsdüngerausbringung anfallen.

*Tabelle 30: Transferierte Frischmassemengen sowie Bereitstellungskosten unterschiedlicher Klee-grasnutzungsoptionen (pro ha Klee-gras mit Ertrag von 40 t FM/ha und Jahr bei 4 Nutzungen)*

Klee-grasnutzungs- verfahren	Mul- chen	Cut & Carry	Kom- post-ie- rung pur	Kom- post-ie- rung Substrat- mix	Silie- rung	Pel- let-ie- rung	Koop. Mist	Koop. Gülle	Koop. Gär- rest
<b>Menge Klee-gras- düngemittel (t FM)</b>	32	36	18	38	33	9	19	22	30
<b>Kosten absolut (€)</b>	220	582	788	2.615	755	1.939	667	669	677

Tabelle 31: Arbeitsvorgänge und Mechanisierung der in Tabelle 30 aufgeführten Kleeergrasnutzungsverfahren

Kleeergrasnutzungsverfahren	Arbeitsvorgang (Avg)	Eingesetzte Technik	Anzahl Avg*
<b>Mulchen</b>	Mulchen	Mulchgerät 3 m, Schlepper 67 kW	4
<b>Cut&amp;Carry</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Bergen	Feldhäcksler 300 kW; 2 Kippanhänger je 10 t, 83 kW Schl.	4
	Kleeergras frisch ausbringen	Stallungstreuer 20 t & Schlepper 102 kW; Radlader 83 kW	1
<b>Kompostierung</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen	Ladewagen 25 m <sup>3</sup> , Schlepper 83 kW	4
	Substrat laden	Teleskoplader, 3,5 t, 83 kW	
	Kompost aufsetzen	Radlader, 2,3 m <sup>3</sup> , 102 kW	1
	Kompostvlies auf- und zudecken	Teleskoplader, 3,5 t, 83 kW	7
	Kompost umsetzen	Kompostwender, angehängt & Schlepper, 120 kW	7
	Kompost bewässern	Wasser-Tankwagen, 3 m <sup>3</sup> ; Schlepper 83 kW	6
	Mieten vereinen	Teleskoplader, 3,5 t, 83 kW	1
	Kompost ausbringen, ab Hof	Stallungstreuer 20 t & Schlepper 102 kW; Radlader 83 kW	1
<b>Silierung</b>	Mähen	3 m, angehängt; 67 kW	4
	Wenden	Wender, 15 m	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen & Festfahren	Ladewagen, 25 m <sup>3</sup> & Schlepper 83 kW; Radlader 102 kW	4
	Silage entnehmen	Siloentnahme Schneidschild; Schlepper 120 kW	4
	Substrat laden	Radlader, 2,3 m <sup>3</sup> , 102 kW	4
	Silage zerkleinern	Einstreuhäcksler (Rundballen); Schlepper 120 kW	4
	Silage ausbringen, ab Hof	Stallungstreuer 20 t & Schlepper 102 kW; Radlader 83 kW	1
	Grubbern flach	Grubber 4 m, Schlepper 138 kW	1
<b>Pelletierung</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Wenden	Wender, 15 m	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen	Ladewagen 25 m <sup>3</sup> , Schlepper 83 kW	4
	Pelettierung Trocknungsanlage	Halmguttrocknung	4
		Anhängeschleuderstreuer 6m <sup>3</sup> , Schlepper 83 kW, Radlader 67 kW	
	Pellets ausbringen ab Hof		1
<b>Kooperation Mist</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Wenden	Wender, 15 m	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen & Festfahren	Ladewagen, 25 m <sup>3</sup> & Schlepper 83 kW; Radlader 102 kW	4
	Silage entnehmen	Siloentnahme Schneidschild; Schlepper 83 kW	4
	Substrat laden	Radlader, 2,3 m <sup>3</sup> , 102 kW	4
		Futtermischwagen 12m <sup>3</sup> , horizontale Schnecken; Schlepper 120 kW	
	Silage zerkleinern		4
	Festmist ausbringen, ab Feld	Stallungstreuer 20 t & Schlepper 102 kW; Radlader 83 kW	1
<b>Kooperation Gülle</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Wenden	Wender, 15 m	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen & Festfahren	Ladewagen, 25 m <sup>3</sup> & Schlepper 83 kW; Radlader 102 kW	4
	Silage entnehmen	Siloentnahme Schneidschild; Schlepper 83 kW	4
	Substrat laden	Radlader, 2,3 m <sup>3</sup> , 102 kW	4
		Futtermischwagen 12m <sup>3</sup> , horizontale Schnecken; Schlepper 120 kW	
	Silage zerkleinern		4
	Gülle ausbringen ab Hof	Pumptankwagen, 15 m <sup>3</sup> ; 102 kW, ab Hof	1
<b>Kooperation Gärrest</b>	Mähen	4,5 m, angehängt; 102 kW	4
	Wenden	Wender, 15 m	4
	Schwaden	Schwader, Zweikreiselmittelschwader, 7,5 m	4
	Bergen & Festfahren	Ladewagen, 25 m <sup>3</sup> & Schlepper 83 kW; Radlader 102 kW	4
	Silage entnehmen	Siloentnahme Schneidschild; Schlepper 83 kW	4
	Substrat laden	Radlader, 2,3 m <sup>3</sup> , 102 kW	4
		Futtermischwagen 12m <sup>3</sup> , horizontale Schnecken; Schlepper 83 kW	
	Silage zerkleinern		4
	Gärrest ausbringen ab Hof	Pumptankwagen, 15 m <sup>3</sup> ; 102 kW, ab Hof	1

\*pro Nutzung (und ha und Jahr) oder pro Kompostierdurchgang

## 5.2.3 Fokus Kompostierung von Klee gras

### 5.2.3.1 Stellschrauben ökonomischer Effekte der Klee gras-Kompostierung

Neben den in Kapitel 5.2.1 aufgeführten Unterschieden der Mechanisierung und Prozessketten spielen unterschiedlichste Aspekte bei der Kompostierung von Klee gras eine Rolle, welche die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens direkt oder indirekt beeinflussen können (vgl. Abbildung 15).

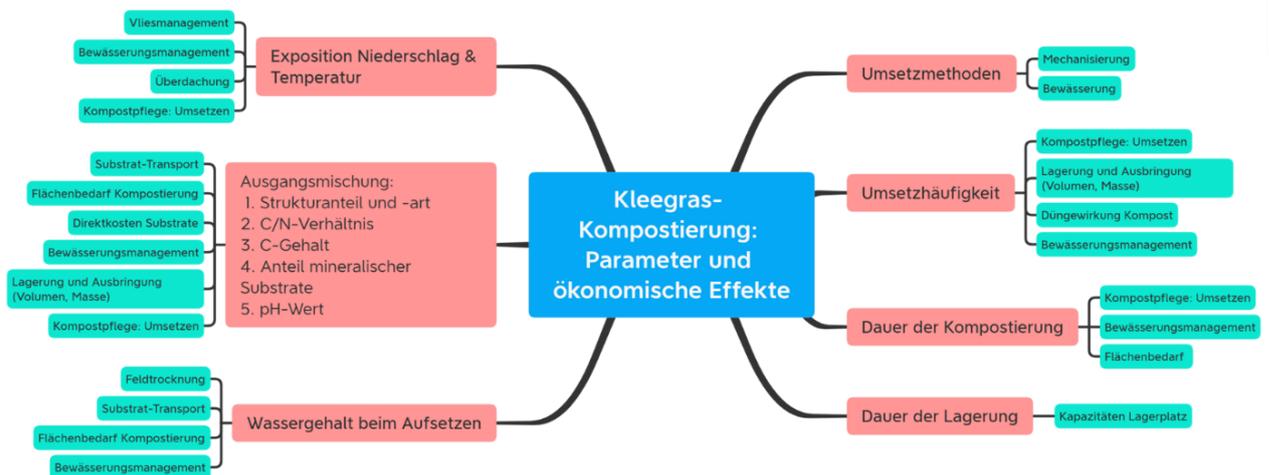


Abbildung 15: Parameter und ökonomische Effekte der Klee gras-Kompostierung

Diese Parameter lassen sich wie folgt untergliedern:

1. **Ausgangsmischung:** Die für den späteren Kompostierungsprozess wichtigen Variablen wie Strukturanteil und -art, C/N-Verhältnis oder auch der Anteil mineralischer Substrate beeinflusst beispielsweise die Substratbereitstellung (Ko-Substrate) und deren Einfluss auf Direktkosten (Zukaufkosten externe Substrate), Art und Entfernung des Substrattransports sowie abhängig von den jeweiligen Substraten und deren Volumina den Platzbedarf der Kompostierung, der insbesondere bei der Bereitstellung befestigter Untergründe signifikante Kosten hervorrufen kann. Zudem hat der Substratmix einen Einfluss auf das Bewässerungsmanagement, die Häufigkeit notwendiger Umsetzvorgänge sowie den Masseabbau bei der Kompostierung, der die später zu lagernde oder auszubringende Menge an Kompost bestimmt. Diese Faktoren beeinflussen also insbesondere die Arbeiterledigungskosten bei der Kompostherstellung und -ausbringung.
2. **Wassergehalt beim Aufsetzen:** Wird das in den Kompost eingebrachte Substrat auf dem Feld getrocknet, entstehen Arbeiterledigungskosten wie Wenden, Schwaden (grundsätzlich empfiehlt sich allerdings das Einbringen von z.B. Klee gras mit möglichst hohem Wassergehalt, da dieser im Nachhinein schwieriger zu erreichen ist). Ist der Wassergehalt in den Substraten passend, können Bewässerungskosten gespart werden.
3. **Exposition Niederschlag und Temperatur:** Ein gewisser Schutz vor Witterungseinflüssen (Niederschlag) ermöglicht eine bessere Kontrolle der Kompostierbedingungen. Daher ist zumindest ein Abdecken der Miete mit Vlies wichtig, hier fallen Investitions- und Managementkosten (je nach Umsetztechnik mehr oder weniger automatisiert an). Bei fester Überdachung erübrigt sich das Vliesmanagement, dafür sind die Investitions- bzw. Jahreskosten deutlich höher.

4. **Umsetzmethoden:** Abhängig von der eingesetzten Wendetechnik können sich Investitions- und Arbeitserledigungskosten unterscheiden. Höheren Investkosten bei selbstfahrenden Wendern (ggü. angehängten Wendern) stehen ein geringerer Flächenbedarf und eine integrierte Bewässerungstechnik gegenüber. Bei angehängtem Wender können beispielsweise zusätzliche Arbeitsgänge für Bewässerung anfallen, sofern keine separaten Wassertanks beim Wendevorgang mitgeführt werden.
5. **Umsetzhäufigkeit:** Ein intensive Kompostmanagement mit häufigen Wendevorgängen erhöht zwangsläufig die Arbeitserledigungskosten gegenüber extensivem Handling des Kompostierprozesses. Aufgrund der stärkeren Umsetzung der Materialien können allerdings bei intensivem Management die Kosten für Lagerplatz und Ausbringung sinken. Auch auf direkte Düngewirkung und Bewässerungsmanagement kann die Umsetzhäufigkeit einen Einfluss haben.
6. **Dauer der Kompostierung und Lagerung:** Je länger Kompostierung und Lagerung in Anspruch nehmen, desto größer können kostenbezogene Flächenkapazitäten ausfallen.

### 5.2.3.2 Flächenbedarf Kompostierbereich

Zu Beginn eines Kompostierdurchgangs hat die Kompostmiete einen höheren Flächenbedarf und eine andere Form als zum Ende eines Durchgangs aufgrund der Umsetzprozesse und des daraus folgenden Masse- und Volumenverlusts (Abbildung 16).

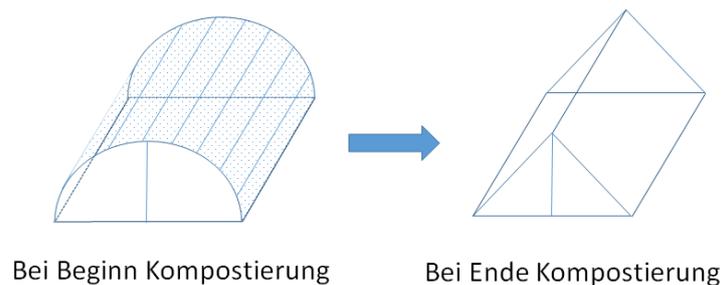


Abbildung 16: Schematische Darstellung der den Flächenbedarf beeinflussenden Mietenform zu Beginn und zum Ende eines Kompostierdurchgangs

Relevant für die Kalkulation des Flächenbedarfs ist der Zeitpunkt des größten Flächenbedarfs, nämlich zu Beginn der Kompostierung. Der Flächenbedarf ist abhängig von Mietenbreite und -höhe (also der eingesetzten Technik) sowie der Raumgewichte der eingesetzten Substrate, die sich stark unterscheiden können (z.B. frisches Klee gras vs. gehäckseltes Stroh). Dabei können sich die Raumbedarfe der einzelnen Substrate in der Mischung noch einmal stark verändern. Da dies in der Regel nicht erfasst wird, wird im Beispiel mit den Volumina der reinen Substrate gerechnet.

Zu Beginn der Kompostierung entspricht die Mietenform schematisch einer halben Ellipse (natürlich mit Abweichungen in der Praxis) (Abbildung 17). An beiden Enden der Miete entsteht ein Schüttkegel in Form eines halben Kegels. Auf der Grundlage von Mietenbreite ( $b$ ) und Mietenhöhe ( $h_M$ ) wird zunächst die Grundfläche der halben Ellipse ( $Q$ ) (Querschnitt der Miete) (Gleichung 1) sowie das Volumen der Schüttkegel ( $V_{SK}$ ) (Gleichung 2) an den Enden der Miete kalkuliert. Ausgehend vom Volumen des Substratmixes (abzüglich der Schüttkegel-Volumina) kann nun die Länge der Miete ( $L_M$ ) mittels Division des Substratvolumens durch den Querschnitt der Miete ( $Q$ ) bestimmt werden (Gleichung 3). Die Flächenbedarfe der Schüttkegel werden berücksichtigt über die Addition der Mietenhöhe zur Mietenlänge ( $2 \times$  Mietenhöhe für jedes Ende der Miete), da davon ausgegangen werden kann, dass sich das Substrat an den Mietenenden in einem Winkel von  $45^\circ$  auftürmt in einer Länge am Boden ( $h_{SK}$ ), die

etwa der Mietenhöhe entspricht. Die Gesamtlänge der Miete ( $L_{GM}$ ) ergibt sich nun aus der Addition der Mietenlänge  $L_M$  und der Länge der Schüttkegel ( $h_{SK}$ ) an beiden Enden der Mieten (Gleichung 4). Der gesamte Flächenbedarf der Kompostmiete ( $G_M$ ) errechnet sich, indem Mietengesamtlänge ( $L_M$ ) mit der Mietenbreite ( $b$ ) multipliziert werden (Gleichung 5). Bei der Flächenplanung ist dabei ein Zuschlag von 0,5 m in der Länge (zusätzlich zu  $L_M$ ) für den Versatz der Miete beim Wendevorgang ( $Z_V$ ) berücksichtigt.

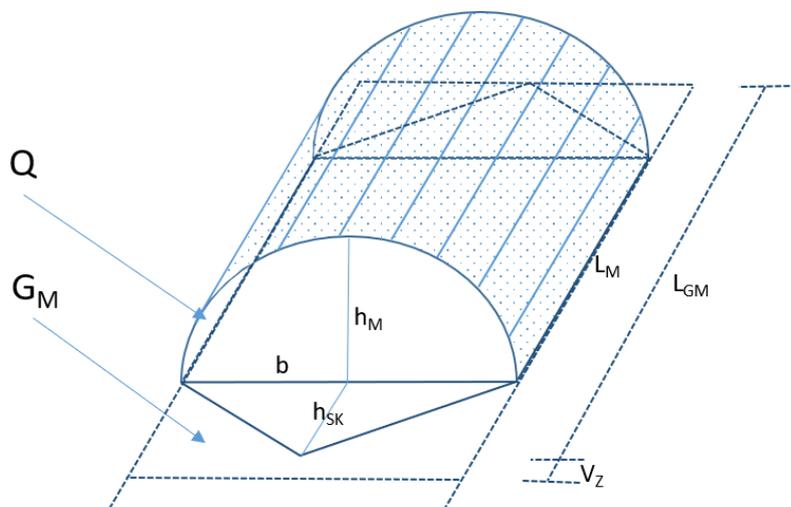


Abbildung 17: Schematische Darstellung einer Kompostmiete und Beschriftungen der Maße

### Beispielkalkulation Flächenberechnung

**Schritt 1:** Zunächst einmal muss das Volumen des Substratmixes zu Beginn der Kompostierung errechnet werden (Tabelle 32).

Tabelle 32: Beispielhafter Substratmix eines Kompostierdurchgangs

Substrat	Menge (t FM)	Raumgewicht (m <sup>3</sup> /t FM)	Volumen $V_s$ (m <sup>3</sup> )
Kleegras frisch	15	2,5	37,5
Getreidestroh gehäckselt 60 mm	3,5	20	70
Grünguthäckselt jung	20	2,4	48
Rindermist, frisch	20	1,2	24
<b>Gesamt</b>	<b>58,3</b>		<b>179,5</b>

Nun kann unter Berücksichtigung der Kompostierungstechnik und damit Mietenbreite und -höhe nach oben aufgeführtem Schema der Flächenbedarf der Kompostmiete berechnet werden. Die Mietenbreite  $b$  beträgt im Beispiel 3 m, die Mietenhöhe  $h_M$  1,60 m.

**Schritt 2:** Berechnung des Querschnitts der Kompostmiete:

$$(1) \quad \text{Querschnitt Kompostmiete (m}^2\text{):} \quad Q = \frac{\pi * h_M * \frac{b}{2}}{2} = \frac{\pi * 1,60m * \frac{3m}{2}}{2} = 3,77m^2$$

**Schritt 3:** Berechnung der Volumina der beiden halben Schüttkegel an den beiden Mietenenden:

(2) Volumen des Schüttkegels an den Mietenenden (m<sup>3</sup>) (zwei halbe Schüttkegel = ein ganzer

Schüttkegel): 
$$V_{SK} = \frac{1}{3}\pi * h_M * \frac{b}{2} * h_{SK} = \frac{1}{3}\pi * 1,60m * \frac{3m}{2} * 1,60m = 4m^3$$

**Schritt 4:** Berechnung der Mietenlänge bei gegebenen Substratvolumen, Mietenbreite und -höhe (ohne Schüttkegel und Wendeversatz):

(3) Mietenlänge (m): 
$$L_M = \frac{V - V_{SK}}{Q} = \frac{179,5m^3 - 4m^3}{3,77m^2} = 46,5m$$

**Schritt 5:** Berechnung der Gesamtmietenlänge unter Berücksichtigung von Schüttkegeln an beiden Mietenenden sowie einen Versatz von 0,5 m beim Wendevorgang:

(4) Gesamtmietenlänge (m):

$$L_{GM} = L_M + 2 * h_{SK} + Z_V = 46,5m + 2 * 1,60m + 0,5m \approx 50m$$

**Schritt 6:** Berechnung des gesamten Flächenbedarfs für die Beispielmiete:

(5) Gesamt-Flächenbedarf der Kompostmiete (m<sup>2</sup>):  $G_M = b * L_{GM} = 3m * 50m = 150m^2$

Tabelle 33: Zusammengefasste Darstellung der Parameter zur Flächenberechnung des Kompostmietenbeispiels

Kürzel	Parameter	Ausprägung
B	Mietenbreite	3 m
h <sub>M</sub>	Mietenhöhe	1,60 m
h <sub>SK</sub>	Höhe des Schüttkegels	1,60 m
V <sub>S</sub>	Substratvolumen	179,5 m <sup>3</sup>
V <sub>SK</sub>	Volumen des Schüttkegels an den Mietenenden	4,02 m <sup>3</sup>
Q	Flächen-Querschnitt der Kompostmiete	3,77 m <sup>2</sup>
L <sub>M</sub>	Mietenlänge (ohne Schüttkegel und Wendeversatz)	46,5 m
Z <sub>V</sub>	Zuschlag für Versatz beim Wendevorgang	0,5 m
L <sub>GM</sub>	Gesamt-Mietenlänge (mit Schüttkegel und Wendeversatz)	50 m
<b>G<sub>M</sub></b>	<b>Gesamtflächenbedarf der Kompostmiete</b>	<b>150 m<sup>2</sup></b>

### 5.2.3.3 Flächenbedarf Lagerbereich

Sollte der fertige Kompost nicht gleich ausgebracht werden können, kann er deutlich platzsparender als auf der Kompostmiete in umwandeten Lagerfächern gelagert werden (Abbildung 18). Die Stapelhöhe hängt dabei von der Umwandung und der eingesetzten Stapeltechnik ab und kann mehrere

Meter betragen. Aufgrund der rechteckigen Form der Lagerfächer (Quader-Volumen (m<sup>3</sup>) = Länge (m) x Breite (m) x Höhe (m)) kann der Flächenbedarf bei Kenntnis des Kompostvolumens leicht errechnet werden (Kompostvolumen dividiert durch die Lagerhöhe). Zu berücksichtigen ist hier noch der Schüttkegel am Anfang des Lagers, der der Form eines Prismas gleicht. Die benötigte Grundfläche für das Prisma lässt sich über  $g \times h_p$  ableiten, das Volumen des Prismas errechnet sich mittels der Formel:

$$V_P = \frac{g * h_p}{2} * h_p$$

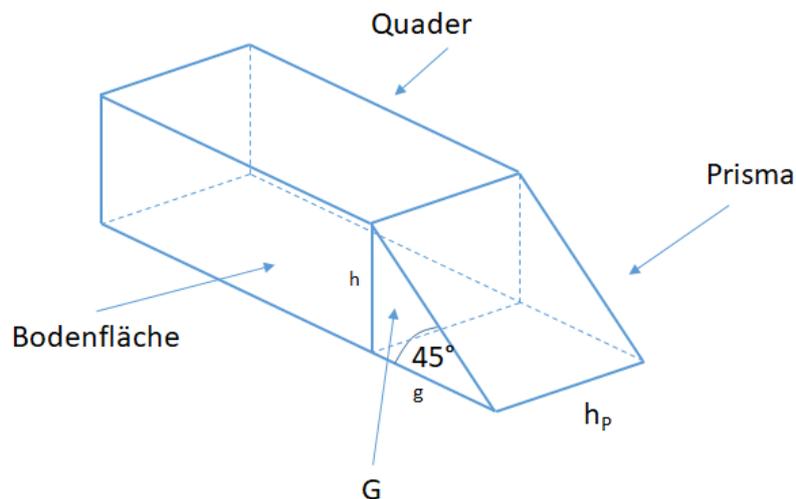


Abbildung 18: Schematische Darstellung eines Lagers für Komposte oder Lagersubstrate

#### 5.2.3.4 Flächenbedarf in der Kompostierungs-Praxis

Der tatsächliche Flächenbedarf bei der Kompostierung richtet sich nach der Wahl der eingesetzten Technik, der Anordnung der Mieten, der Beschaffenheit der Ausgangssubstrate sowie dem Kompostmanagement.

##### Technik:

Der Platzbedarf für eine befestigte Fläche bei der Kompostierung ist in großem Maße von der eingesetzten Technik anhängig. Die in der landwirtschaftlichen Kompostierung eingesetzten Kompostwender erstellen Mieten, die in der Regel zwischen rund zweieinhalb und vier Meter breit sind (Arbeitsbreite). Mit Seitenbegrenzungen und Laufrädern können Kompostwender jedoch Gesamtbreiten von bis zu ca. fünfeinhalb Metern erreichen. Bei der Flächenkalkulation ist zu berücksichtigen, ob es sich um einen gezogenen oder einen selbstfahrenden Kompostwender handelt. Beim gezogenen Kompostwender sind zusätzlich Fahrgassen für das Zugfahrzeug zu berücksichtigen, während diese in der Regel beim selbstfahrenden Wender entfallen können (siehe Schema Abbildung 19). Idealerweise werden bei der Feldrandkompostierung Mieten entlang von vorhandenen Fahrwegen angelegt, um den Platzbedarf für Fahrgassen auf der Ackerfläche oder dem Grünland einzusparen.

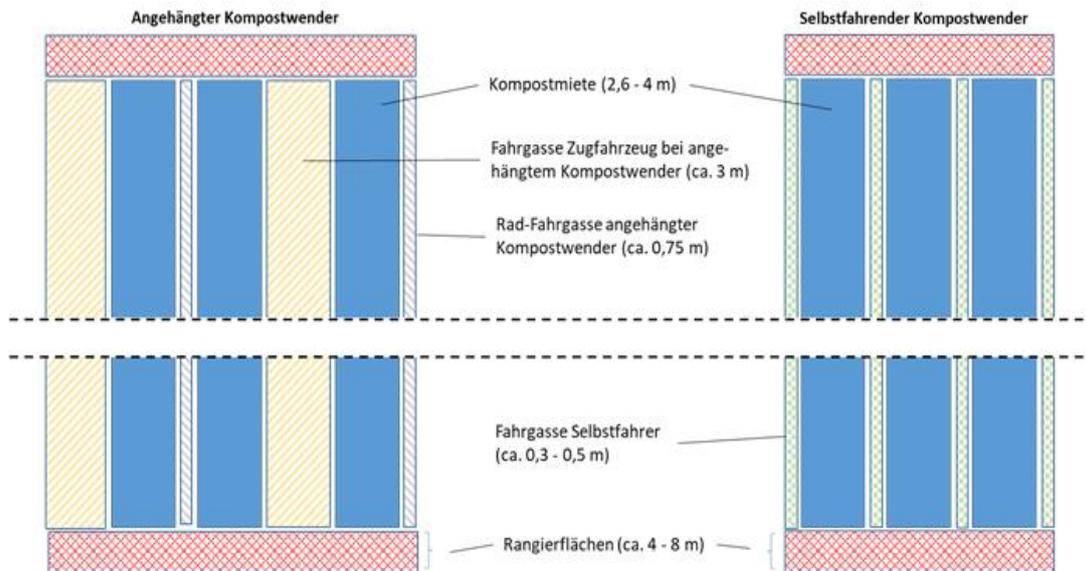


Abbildung 19: Angabe der Breite verschiedener Elemente für die Kompostierung abhängig von der Mechanisierung (angehängter oder selbstfahrender Kompostwender) (schematisch)

### Mietenanordnung:

Der Flächenbedarf richtet sich auch nach Länge und Anzahl der Mieten. Lange Mieten können den Flächenbedarf im Vergleich zu kürzeren und dafür einer höheren Anzahl an Mieten senken, da Fläche für Fahrgassen und Rangierflächen eingespart werden kann. Bei kürzeren Mieten erhöhen sich die Wendezeiten für die Technik im Vergleich zu langen Mieten. Wenige lange Mieten haben in der Regel einen geringeren Gesamtflächenbedarf im Vergleich zu mehreren kurzen Mieten. Länge und Anzahl der Mieten sind in der Regel von den örtlichen Gegebenheiten anhängig.

### Ausgangssubstrate und Kompostmanagement:

Weiterhin ist die benötigte Fläche abhängig von den gewählten Ausgangssubstraten und deren Beschaffenheit und Feinheitsgraden. Insbesondere ungehäckseltes Stroh, aber auch frische Biomasse von Getreide (Ganzpflanze) oder Klee gras weisen in der Regel niedrige Raumgewichte bzw. hohe Volumina auf. Allerdings verringert das Zerkleinern in der Regel das Volumen der Ausgangsmiete. Gleichzeitig wird für bessere Umsetzungsprozesse gesorgt, da die Substratmischungen besser homogenisiert werden können und die zersetzenden Mikroben eine höhere Angriffsfläche für ihre Verdauungsprozesse vorfinden.

Auch die Umsetzungsprozesse, die Dauer der Kompostierung und mögliche Lagerzeiten beeinflussen den Flächenbedarf. Je nach Ausgangsmischung können im Laufe der Kompostierung Volumenverluste von bis zu 60 % auftreten. Soll auf der gleichen Fläche mehrmals pro Jahr kompostiert werden, spielt auch die Dauer eines jeweiligen Kompostierdurchgangs eine Rolle. Entsprechend sollte auch Flächenbedarf abhängig von der Lagerdauer (Ausbringzeiten des Komposts in der Fruchtfolge bzw. Vorgaben der DüV beachten) einkalkuliert werden.

### 5.2.3.5 Anlagenbestandteile Kompostierung

Als **wasserundurchlässiger Untergrund** stehen analog zum Bau von Siloplaten Beton- oder Asphaltmischungen zur Verfügung (ggf. gesetzliche Vorschriften bezüglich Mischungsparametern beachten). Diese sollten an den Rändern möglichst mit einer entsprechenden Aufkantung versehen sein. Zudem kann eine Ablaufrinne vorgesehen werden, die potenziell auftretenden Sickersaft mit leichtem Gefälle zur Sickersaftgrube leitet (siehe auch Kapitel 3, Rechtliche Rahmenbedingungen). Zur Kosteneinsparung ist die Befestigung von Rangierflächen oder Fahrgassen mit Schotter denkbar.

Entsprechend den Lagerfristen für Flüssigdünger sollte ein Auffangbehälter für Regenwasser bzw. Sickersaft in ausreichender Größe eingeplant werden (Technow, 2018). Bei nicht überdachten Kompostplatten sind hierbei Niederschlagsmengen, Verdunstung und Lagerdauer in die Kalkulation der Behältergröße mit einzubeziehen.

Eine Umwandlung der Kompostplatte ermöglicht abhängig von der Wandhöhe (ca. 1 – 4 m) größere Stapelhöhen von noch nicht oder bereits verkompostiertem Material und damit eine Reduzierung des Bedarfs an Bodenflächen.

Eine **Abdeckung oder Überdachung** kann die aufzufangenden Niederschlagsmengen reduzieren. Alternativ zur vergleichsweise kostengünstigen Abdeckung von Kompostmieten mit Vlies bietet die Überdachung eine witterungsunabhängige, aber kostenintensivere Alternative für das Lager von unkompostiertem bzw. fertig kompostiertem Material, aber auch für die Kompostierung selbst. Hierbei lassen sich zwei Überdachungsvarianten – Pultdach und Rundbogendach – unterscheiden (Abbildung 19). Der Platzbedarf bei Überdachung mit Pultdach ist abhängig von der Ausrichtung der Mieten und der eingesetzten Wendetechnik. Die Dachfläche richtet sich dabei nach den jeweiligen Dachüberständen (z.B. Höhe  $\times 0,6$ ) und der Dachschräge (z.B.  $20^\circ$ ). Bei Überdachung mit einem Rundbogendach bietet sich bei befestigtem Untergrund eine seitliche Erhöhung mit einem Stahlbetonsockel an, um trotz entsprechender Dachneigung die Durchfahrt mit dem Zugfahrzeug in den Randbereichen zu gewährleisten.

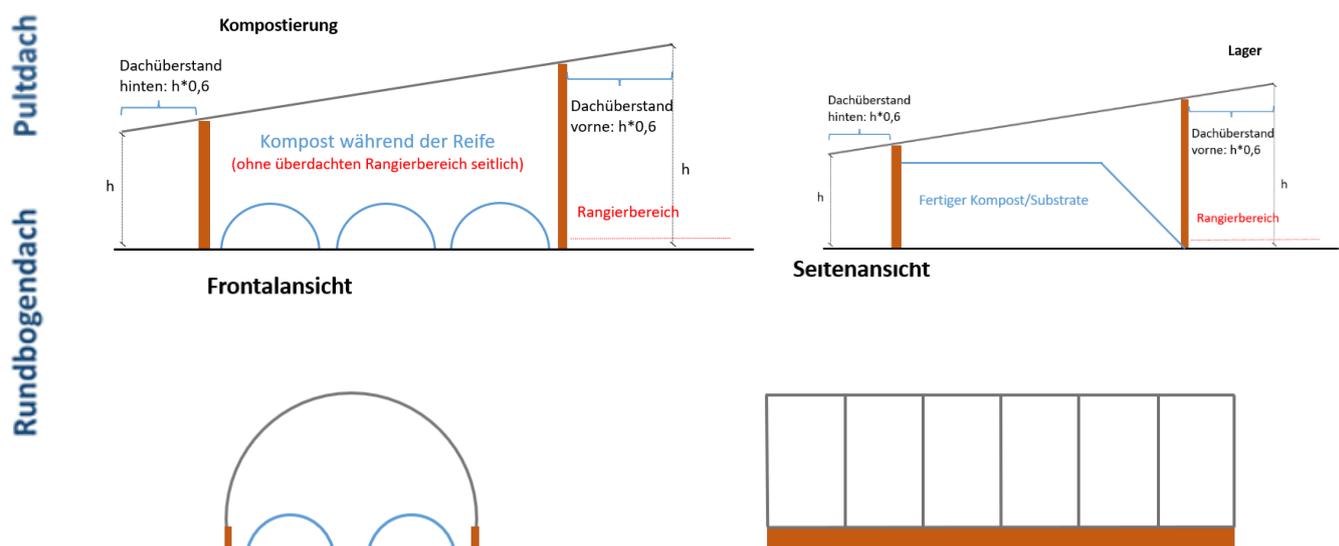


Abbildung 20: Möglichkeiten der Überdachung von Kompostmieten und Substratlagern

### 5.3 Ökonomische N-Effizienz im Verfahrensvergleich

Für eine Bewertung der ökonomischen Stickstoff-Effizienz werden sowohl die Arbeiterledigungskosten der Kleeergrasdüngemittel-Bereitstellung als auch die N-Ströme in den jeweiligen Verfahren analysiert und einander gegenübergestellt (Abbildung 21).

Die N-Stoffstrom-Analyse umfasst die N-Fixierleistung des Kleeergrases, die N-Verluste entlang der Prozesskette des jeweiligen Kleeergras-Düngemittels sowie den N-Anteil, der aus der N-Fixierung als Vorfruchtwert in den Bodenvorrat eingeht. Bei einer Bezugsbasis von 1 ha Kleeergras wurde ein Kleeergrasertrag von 40 t FM/ha/Jahr bei viermaliger kontinuierlicher Nutzung mit dem jeweils gleichen Verfahren sowie eine standardisierte Mechanisierung (Zugmaschine angepasst an Leistungsbedarf  $\pm$  102 kW), Schlaggröße (5 ha) und innere Verkehrslage (3 km) unterstellt. Die Kalkulation der Verfahrenskosten der verschiedenen Kleeergrasnutzungsverfahren ist Kapitel 5.2.2 zu entnehmen.

#### **Mulchnutzung**

Die immer noch weit verbreitete Mulchnutzung des Kleeergrases, also der Verbleib des Mulchmaterials auf der Kleeergrasfläche, ist aufgrund der einfachen Mechanisierung (Schlepper plus Mulchgerät) einerseits mit Kostenvorteilen, andererseits aber mit deutlichen Nachteilen im Hinblick auf die Stickstoff-Effizienz und den N-Input ins Ackerbausystem verbunden. Zu letzterem zählen eine Reduktion der Stickstoff-Fixierleistung des Klees von 40 % und mehr, der Rückgang des Kleeanteils und niedrigere Biomasserträge.

#### **Cut&Carry**

Der Transfer des Kleeergrases von einer Geber- zu einer Nehmerfläche (Cut&Carry) ist arbeitswirtschaftlich am günstigsten durch eine Mahd mit Schwadablage, dem Häckseln per Feldhäcksler auf ein Transportfahrzeug (Ladewagen mit Dosierwalze, Miststreuer) und dem Transport und dem anschließenden Ausbringen auf der Nehmerfläche zu bewerkstelligen. Beim Cut&Carry-Verfahren können aus der anaeroben Mulchschicht des ausgebrachten Materials ebenfalls größere N-Verluste auftreten. Jedoch ist die N-Effizienz gegenüber dem Mulchen aufgrund der Abfuhr der Biomasse deutlich erhöht, da der Kleebestand bei Abfuhr deutlich mehr N fixiert.

#### **Kompostierung**

Die Kompostierung erfordert verschiedene Mechanisierungsschritte vom Aufsetzen der Miete über das regelmäßige Wenden und Wässern bis zur Ausbringung des Komposts. Der Wendevorgang beim Kompostieren kann mit unterschiedlichen Kompostwendern, angehängten oder selbstfahrenden, bewerkstelligt werden. Die Investitionskosten liegen bei Selbstfahrern höher, die Durchführung kann dagegen meist rationeller im Vergleich zu angehängten Wendern gestaltet werden. In jedem Fall sind betriebliche Kooperationen bei der Maschinennutzung empfehlenswert. Bei der Kompostierung können die Prozess-N-Verluste bei guten Voraussetzungen (heterogener Substratmix, passendes C/N-Verhältnis, gutes Umsetz- und Wassermanagement) auf unter 10 % gesenkt werden, eine reiner Kleeergras-kompost kann dagegen N-Verluste von über 50 % aufweisen.

#### **Silierung und Pelletierung**

Die Silierung im Flachsilo bietet sich vor allem bei bereits vorhandenen baulichen Anlagen an, die Mechanisierung entspricht den bekannten Verfahren aus dem Bereich der Tierhaltung. Die Pelletierung ist bei räumlicher Nähe einer Trocknungsanlage denkbar, auch wenn eine mobile Pelletierung möglich ist, allerdings zu höheren Kosten. Bei Silierung und vor allem Pelletierung treten geringe

Stickstoffverluste auf, allerdings lohnt sich die Pelletierung aufgrund der hohen Kosten bislang lediglich meist nur in Kulturen mit hohem Umsatzpotential wie z. B. im Gemüsebau.

### **Kooperationsverfahren als Tausch von Futter gegen Mist, Gülle oder Gärrest**

Bei den Kooperationsverfahren wird das Klee gras in der Regel als Silage konserviert den jeweiligen Verfahren zugeführt und in der Tierhaltung oder der Biogasanlage verfüttert. Die Koppelprodukte sind dann als Mist, Gülle oder Gärrest dem Geberbetrieb zurückzuführen. Bei der Kooperation mit viehhaltenden Betrieben bzw. Betriebszweigen sind ebenfalls N-Prozessverluste zu verzeichnen aufgrund von Lagerung, Verdauungsprozessen in der Tierhaltung und bei der Ausbringung. Die Verlustpotentiale sind bei der Vergärung in einer Biogasanlage prozessbedingt in der Regel vergleichsweise gering, bei allen Kooperationsverfahren jedenfalls stark managementabhängig.

### **Fazit:**

Mit den Vorteilen der zeitlichen und räumlichen Flexibilität des Düngemittleinsatzes steigen auch die Bereitstellungskosten (die aber durch verbesserte Ertragswirkungen/monetäre Leistungen kompensiert werden können). Kostengünstige Verfahren wie Mulchen oder Cut&Carry sind dagegen deutlichen Einschränkungen bezüglich Einsatzflexibilität und N-Effizienz (und damit schlechterer Ertragswirkung) unterworfen. Positive Zusatzeffekte der Kompostierung und Vergärung sind eine verlustarme Verwertung sowie Hygienisierung von ohnehin (zumeist innerbetrieblich) anfallenden Materialien (Gemüsereste, Wascherde, Grünschnitt, Stroh) als Ko-Substrate bei der Klee gras konservierung bzw. der Herstellung von Klee gras-Transferdüngern.

Die einzelbetriebliche Entscheidung für den Einsatz ein oder mehrerer Klee grasdünger hängt selbstverständlich nicht allein von der ökonomischen Bewertung und den hier dargestellten Kennzahlen der N-Effizienz und (N-)Bereitstellungskosten ab. Zusätzlich zu berücksichtigen sind die jeweilige mittel- bis langfristige N-Düngewirksamkeit (N-Einbau in die organische Substanz im Klee gras transferdünger) sowie die Synchronisation von Nährstoffangebot (Düngemittel) und Nährstoffbedarf (Nehmerkultur). Darüber hinaus sind die praktischen Implikationen von Ernte- und Ausbringungszeitpunkten der Biomasse in der Fruchtfolgegestaltung sowie bezüglich der Ausbringung die Vorgaben der Düngeverordnung (vgl. DüV 2021) zu beachten. Darüber hinaus spielen in der Praxis arbeitsorganisatorische Aspekte (Vermeidung von Arbeitsspitzen) bei der Wahl des Transferdüngers eine Rolle.

## Stickstoff-Flow und (N-)Bereitstellungskosten verschiedener Klee gras-Düngemittel

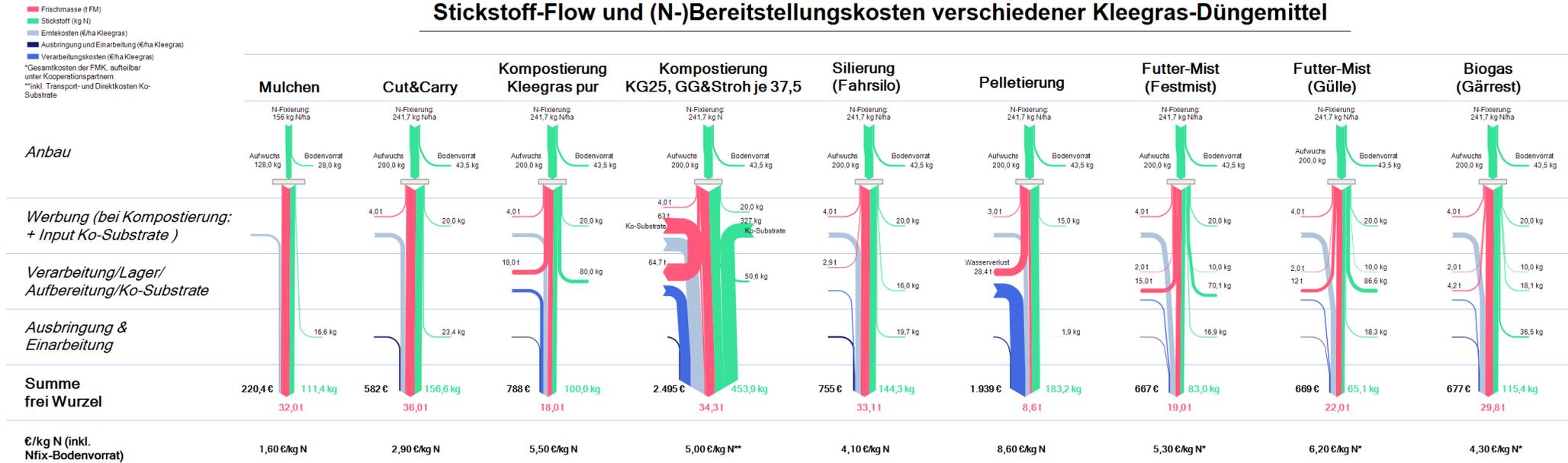


Abbildung 21: Stickstoff-Flow und (N-)Bereitstellungskosten verschiedener Klee gras-Düngemittel

## 5.4 Betriebswirtschaftliche Effekte der Düngung mit Klee gras-Transferdüngern

Die Ertragswirksamkeit von klee grasbasierten Düngemitteln (Mulch, Direkttransfer/Cut&Carry, Kompostierung, Silierung, Pelletierung, Futter-Mist-Kooperation/Rindermist, Biogasnutzung/Gärrest) wurde in Versuchen in den Jahren 2021 und 2022 bei N-äquivalenter Düngung (170 kg N/ha) mittels Ertragsmessungen in randomisierten Blockanlagen (vierfach wiederholt) auf der Hessischen Staatsdomäne Frankenhausen analysiert (vgl. Kapitel 4. Abhängig von den mit Marktpreisen für Weizen (AMI 2023) bewerteten Ertragsänderungen gegenüber der ungedüngten Kontrolle und den Bereitstellungskosten des Düngemittels lassen sich Mehr- oder Mindererträge berechnen, die notwendig wären, um die Kosten-Leistungs-Differenz (Also den Leistungen aus Ertrag x Marktpreis und den Bereitstellungskosten es Düngemittels) der jeweiligen Düngungsvariante auszugleichen.

In Tabelle 34 sind zunächst mal die Verfahrens- zw. Bereitstellungskosten (1) unterschiedlicher Klee grasdüngemittel aufgeführt. Diese sind auch abhängig von den auszubringenden Frischmassemengen der Düngemittel, bezogen auf die normierte N-Mengen von 170 kg N/ha. D.h., die benötigten Düngemittelmengen wurden auf den jeweiligen hektarbezogenen Bedarf an Klee gras umgerechnet, ausgehend vom oben definierten Standardertrag von 40 t FM/ha.

Die Mehrertragsleistung (3) ergibt sich aus den jeweiligen Mehrerträgen der Varianten gegenüber der Kontrollvariante Mulchen (2), multipliziert mit einem Weizenpreis von 44,59 €/dt (AMI 2023). Da die Bereitstellungskosten der Düngemittel die Mehrertragsleistungen hier immer übersteigen, ist das Saldo aus Kosten und Leistungen (4) jeweils negativ. Diese Mehrkosten könnten also theoretisch über einen errechneten Mehrertrag ausgeglichen werden. Dieser errechnete Mehrertrag erlaubt eine Einschätzung, ob dies realistische Ertragszuwächse bedeutet.

Der Break-even-Mehrertrag (5) ist also genau der errechnete Mehrertrag, der notwendig wäre, um die Mehrkosten der Klee grasdüngung unter Berücksichtigung der im Versuch gemessenen Mehrerträge gegenüber der Kontrolle auszugleichen. Er errechnet sich also, in dem von der Mehrertragsleistung (3) die Verfahrenskosten (1) abgezogen werden und eine Gutschrift für die Mulchkosten (Kontrollvariante) von 49 €/ha vorgenommen wird, da in jedem Fall gemulcht werden müsste, wenn keines der anderen Klee grasnutzungsverfahren angewandt wird.

Tabelle 34: Verfahrenskosten und Ermittlung notwendiger Mehrerträge verschiedener Klee grasnutzungsverfahren

		<b>Einheit</b>	<b>Kontrolle</b>	<b>Cut&amp;Carry</b>	<b>Si-lage</b>	<b>Pel-lets</b>	<b>Kom-post</b>	<b>Rinder-mist</b>	<b>Gärrest</b>
(1)	Verfahrenskosten	€ ha <sup>-1</sup>	49	409	436	1.184	715	578	754
(2)	SW-Ertrag (Mittelwert)	dt/ha <sup>1</sup>	57,8	60,6	58,7	60,2	61,4	61,7	62,3
(3)	Mehrertragsleistung <sup>1</sup>	€ ha <sup>-1</sup>	-	124	45	103	161	174	197
(4)	Saldo Kosten - MEL <sup>2</sup>	€ ha <sup>-1</sup>	-	-236	-342	-1.031	-505	-355	-508
(5)	<b>Break-even Mehrertrag</b>	<b>dt/ha<sup>1</sup></b>	-	<b>5,3</b>	<b>7,7</b>	<b>23,1</b>	<b>11,3</b>	<b>8,0</b>	<b>11,4</b>

Auch mit einer moderaten Mehrertragsleistung von 124 €/ha ist der notwendige Mehrertrag bei Cut&Carry mit 5,3 dt/ha am niedrigsten, da auch die Verfahrenskosten eher im unteren Bereich im Verfahrenvergleich liegen. Aufgrund der sehr hohen Bereitstellungskosten und einer nur mäßigen Mehrertragsleistung liegt der notwendige Mehrertrag bei der Pellet-Düngung am höchsten und bei

dem recht hohen Ertragsniveau im unter ökologischen Verhältnissen nur schwer zu erreichenden Ertragsniveau.

## 5.5 Ökonomische Bewertung von Kompost über den Nährstoff- und Humuswert

Die ökonomische Bewertung von Komposten kann einerseits direkt über eine Bepreisung der im Kompost enthaltenen Nährstoffe und andererseits indirekt über eine Inwertsetzung der Humusersatzleistung der Komposte erfolgen. Des Weiteren lassen sich potentielle bodenfruchtbarkeitsfördernde Wirkungen von Komposten wie etwa Einflüsse auf Bodenparameter wie Porenvolumen, Rohdichte oder nutzbare Feldkapazität beobachten (vgl. Tab. 1), deren ökonomischer Wert jedoch vor allem über mögliche Ertragseffekte der gedüngten Kultur bzw. Fruchtfolge monetarisiert werden kann. Allerdings ist letzteres mit größeren Unsicherheiten behaftet, da die Ursächlichkeit von Ertragswirkungen bekanntlich eher eingeschränkt verifiziert werden kann.

### 5.5.1 Nährstoffwert von Kompost

Die Bestimmung des Kompostwertes über die enthaltenden Pflanzennährstoffe erfordert einerseits die genaue Kenntnis der Inhaltsstoffe der jeweiligen Kompostcharge, hier sind abhängig von den Ausgangssubstraten und den Umsatzprozessen große Unterschiede feststellbar. Andererseits sollten die Einzel Nährstoffpreise möglichst exakt erfasst werden. Hierbei sind unterschiedliche Preise anzusetzen, je nachdem, ob die Herstellung oder der Einsatz des Komposts in einem konventionellen oder einem ökologischen landwirtschaftlichen Betriebssystem erfolgt. Konventionelle Düngemittelpreise können meist von mineralischen Einzel Nährstoffdüngemitteln abgeleitet werden. Düngerpreise von im ökologischen Landbau einsetzbaren Düngemitteln können aus vorhandenen Einzel Nährstoffdüngemitteln ermittelt werden oder müssen bei den häufig vorkommenden Mehrnährstoffdüngern beispielsweise über die Referenzierung mit anderen Mehrnährstoffdüngern abgeleitet werden.

In die vorliegende Nährstoffbewertung fließen die Nährstoffe N,  $P_2O_5$ ,  $K_2O$ ,  $MgO$ ,  $CaO$  und S ein. Außer dem Stickstoff können alle anderen vollständig als düngewirksame Pflanzennährstoffe angerechnet werden (Tab. 2). Für die Anrechenbarkeit des Stickstoffs im Kompost sind verschiedene Ansätze möglich. Bei einer eher kurzfristigen Betrachtungsweise von drei bis vier Jahren kann eine Anrechenbarkeit des düngewirksamen Stickstoffs in Höhe von 7-15 % veranschlagt werden (Reinhold 2008; LVL 2008; BGK 2013; Fuchs 2022; DüV 2021). Nach Düngeverordnung sind für Kompost beispielsweise 5 % des Stickstoffs im Ausbringungsjahr, 4 % im ersten Folgejahr und jeweils 3 % im zweiten und dritten Folgejahr anrechenbar. Bei regelmäßiger Anwendung von Komposten kann allerdings auch eine Anrechenbarkeit von 100 % angenommen werden, da sich langfristig eine gleichmäßige Versorgung über den im Kompost gedüngten Stickstoff einstellen kann (LVL 2008). In Summe ergibt sich unter Anrechnung von 15 % des Kompost-N beim Ansatz ökologischer Düngemittelpreise (Öko) ein Nährstoffwert pro Tonne Kompost (Frischmasse) von rund 28 €, beim Ansatz konventioneller Düngemittelpreise (Konv.) von rund 16 € (Tabelle 35). Wird der Stickstoff zu 100 % angerechnet, erhöht dies den Nährstoffwert auf 47,69 €/t FM (Öko) bzw. 19,75 €/t FM Kompost (Konv.).

Tabelle 35: Nährstoffwert pro Tonne Frischmasse Kompost mit Bezugsbasis von im ökologischen (Öko) oder im konventionellen (Konv.) Landbau einsetzbaren Düngemitteln

Nährstoff	kg/t FM <sup>1;2;3;4</sup>	Anrechenbarkeit [%]	Bezugsbasis Öko Nährstoffpreise		Bezugsbasis Konv. Nährstoffpreise	
			€/kg	€/t FM Kompost	€/kg	€/t FM Kompost
N	4,14	15	5,66 <sup>5</sup>	3,51	1,07	0,66
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	3,75	100	1,37 <sup>5</sup>	5,13	0,93	3,49
K <sub>2</sub> O	7,52	100	1,49 <sup>5</sup>	11,21	0,82	6,17
MgO	3,84	100	1,17 <sup>6</sup>	4,49	0,85	3,26
CaO	26,77	100	0,05 <sup>6</sup>	1,34	0,04	1,07
S	1,35	100	1,54 <sup>6</sup>	2,08	0,99	1,34
<b>Nährstoffwert, €/t Kompost</b>				<b>28</b>		<b>16</b>

Mittelwerte abgeleitet aus <sup>1</sup>Gottschall 2019; <sup>2</sup>Fuchs 2022; <sup>3</sup>Reinhold 2008; <sup>4</sup>eigene Ergebnisse

<sup>5</sup> LfL 2023, <sup>6</sup>LWK NRW 2021

### 5.5.2 Humuswert von Kompost

Zur Berechnung des Humuswerts von Komposten kann als Referenzstoff Getreidestroh mit dessen Humusersatzwert herangezogen werden. Der Humusersatzwert von Stroh ergibt sich aus der Gegenüberstellung des Markterlöses mit den Verfahrenskosten der Strohbergung frei Feldrand sowie dem Nährstoffwert des Strohs. Die verbleibende Summe wird zur Berechnung des monetären Humusersatzwerts (€/kg Humus-C) mit der Humusäquivalenz (Häq) je Tonne Frischmasse Stroh nach VDLUFA (2014) verrechnet. Analog zur Nährstoffwert-Berechnung beim Kompost werden die Nährstoffe N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, K<sub>2</sub>O, MgO, CaO und S berücksichtigt. Allerdings ist die Anrechenbarkeit von N bei der Strohdüngung auch über lange Zeiträume marginal (hier 0,1 %, nach Schubert et al. 2022), die anderen Nährstoffe werden jeweils zu 100 % angerechnet.

Abschließend kann der Humusersatzwert mit den Humusäquivalenten von Kompost multipliziert werden, um den Humuswert des Komposts zu ermitteln (Tabelle 36).

Tabelle 36: Kalkulation des monetären Humuswerts von Kompost

Variablen	Einheit	Humuswert	
		Ökolandbau	Konventioneller Landbau
Marktpreis Stroh <sup>1</sup>	€/t	90,00	90,00
Verfahrenskosten Strohernte (Rundballen Pressen, Bergen), frei Feldrand <sup>2</sup>	€/t	27,81	27,81
Nährstoffwert Stroh (Ökobasierte Nährstoffpreise)	€/t	29,91	17,53
Marktpreis abzüglich Verfahrenskosten Strohernte und Nährstoffwert	€/t	32,28	44,67
Humusäquivalente von Stroh	kg Humus-C/t	100,00	100,00
<b>Humusersatzwert</b>	<b>€/kg Humus-C</b>	<b>0,32</b>	<b>0,45</b>
Humusäquivalente von Kompost	kg Humus-C/t	50,00	50,00
<b>Humuswert Kompost</b>	<b>€/t FM</b>	<b>16</b>	<b>22</b>

<sup>1</sup>www.strohpreisrechner.de; [www.proplanta.de](http://www.proplanta.de); <sup>2</sup>unter Annahme eines Strohertrags von 5 t/ha

Die Höhe des Humuswerts von Kompost ist von der Ausprägung der Variablen Marktpreis Stroh sowie der Humusäquivalente von Stroh und Kompost abhängig. Der Marktpreis für Stroh kann größeren Schwankungen unterliegen und bewegt sich derzeit im Bereich zwischen 80 und 120 €/t für Rundballen. Bei steigendem Strohpreis erhöht sich auch der Humuswert pro Tonne Kompost. Werden höhere Humusäquivalente für Stroh angesetzt, sinkt dagegen der Humuswert pro Tonne Kompost wegen des damit sinkenden Humusersatzwertes. Für Komposte sind Schwankungsbreiten der Humusäquivalente zwischen 40 und 70 zu erwarten (VDLUFA 2014). Je höher die Kompost-Häq angesetzt werden, desto höher ist auch der Humuswert des Komposts. Bei entsprechender Kombination der genannten Variablen kann der Kompost-Humuswert zwischen rund 8 €/t und rund 55 €/t FM (Öko) bzw. zwischen rund 13 €/t und rund 65 €/t FM (Konv.) betragen.

Unter Berücksichtigung konventioneller Nährstoffpreise wird der Humuswert des Komposts monetär höher bewertet, da der Saldo aus Marktpreis, Ernte-Verfahrenskosten und Nährstoffwert höher ausfällt. In der Summe aus Nährstoffwert und Humuswert des Komposts relativiert sich dieses Verhältnis allerdings wieder (siehe Tabelle 3).

Alternativ zur Berechnung des Kompost-Humuswerts über den Humusersatzwert von Stroh kann der Humusersatzwert (€/kg Humus-C) auch über alternative Humusersatzstrategien kalkuliert werden. Liegt beispielsweise ein Humusdefizit in der Fruchtfolge vor, können die zusätzlichen Kosten von alternativen Humusersatzmaßnahmen, wie z.B. Ausweitung des Acker- bzw. Kleegrasanbaus mit den entsprechenden Humusäquivalenten zum Humusersatzwert analog zur Vorgehensweise bei Stroh verrechnet werden und damit als Grundlage des Kompost-Humuswerts dienen.

### 5.5.3 Kombiniertes Nährstoff- und Humuswert von Kompost

Der kombinierte Nährstoff- und Humuswert (Tabelle 37) ergibt sich aus der Addition der Einzelwerte Nährstoffwert und Humuswert des Komposts und beträgt im vorliegenden Beispiel bei Zugrunde legen ökobasierter Nährstoffpreise und einem mittleren Humuswert rund 44 €/t FM, je nach Ausprägung des Humuswerts (Kapitel 7.3.2) zwischen 36 bis 83 €/t. Werden konventionelle Nährstoffpreise angesetzt, liegt der kombinierte Nährstoff- und Humuswert bei 38,32 €/t FM, je nach Ausprägung des Humuswerts (Kapitel 7.3.2.) zwischen 29 bis 81 €/t.

*Tabelle 37: Nährstoff- und Humuswert von Kompost unter Berücksichtigung ökologischer und konventioneller Preise für Pflanzennährstoffe (Spannweiten in Klammern)*

		<b>Öko</b>	<b>Konv.</b>
Nährstoffwert Kompost	€/t FM	28	16
Humuswert Kompost	€/t FM	16 (8-55)	22 (13-65)
<b>Nährstoff- und Humuswert Kompost</b>	€/t FM	<b>44 (36-83)</b>	<b>38 (29-81)</b>

Der Preis, zu dem Kompost etwa von Kompostierungsanlagen bezogen werden kann, liegt in der Regel deutlich unter dem hier kalkulierten Nährstoff- und Humuswert von Kompost. Allerdings wird bei der kommunalen Kompostbereitung ein großer Teil der Produktionskosten über die Abfallgebühren abgedeckt. Dies ist bei der landwirtschaftlichen Kompostierung nicht der Fall, sodass der hier vorgestellte Nährstoff- und Humuswert zum Tragen kommen kann.

## 5.6 Betriebswirtschaftliche Optimierung und Risikoaspekte des Einsatzes von Klee-gras-Transferdüngern

### 5.6.1 Betriebswirtschaftliche Optimierung einer Beispielfruchtfolge abhängig vom Einsatz bestimmter Klee-grastransferdüngemittel

Vor dem Hintergrund des zwar kostengünstigen aber mit hohen N-Verlustpotentialen und geringer Einsatzflexibilität einhergehenden Mulchverfahrens wurde ein Vergleich des Einsatzes verschiedener Klee-grasdüngemittel anhand eines Fruchtfolgebeispiels vorgenommen. Ziel der Analyse ist es, in welcher Höhe durchschnittliche Mehrerträge der Marktfrüchte dieser Beispielfruchtfolge notwendig wären, um die höheren Kosten einer vielfältigen Klee-grasnutzung im Vergleich zur ausschließlichen Mulchnutzung auszugleichen.

Bei der Fruchtfolge handelt es sich um eine an Praxisbeispielen ausgerichtete vielfältige Fruchtfolge unter Einbeziehung von Hackfrüchten (Tabelle 37).

Tabelle 38: Beispielfruchtfolge mit IST-Erträgen und jeweiligen Marktpreisen

Kultur	Umfang Kultur-anbau [ha]	IST-Ertrag [dt FM/ha]	Marktpreis [€/dt]
Klee-Gras (70:30)	35	400	0
Weizen, Winter-	40	55	44
Gerste, Winter-	40	50	32,2
Ackerbohne	35	45	46,3
Möhren, Bundmöhren, Frischmarktware	32,5	650	27,5
Wurzelpetersilie, Speiseware	2,5	400	30
Rote Bete	5	700	16
Dinkel	20	45	43
Triticale	20	35	30,7
Hafer	40	35	30,6

Die Arbeiterledigungskosten (AEK) der ausschließlichen Mulchnutzung des Klee-grases liegen im vorliegenden Beispiel bei 7.715 €/Jahr, die Arbeiterledigungskosten einer vielfältigen Klee-grasnutzung (1. Schröpschnitt; 2. Kompostierung/Abgabe Futternutzung; 3. Cut&Carry/Kompostierung; 4. Mulchen und Einarbeitung) bei 21.566 €/Jahr, also bei Mehrkosten von fast 14.000 €/Jahr. Um diese Mehrkosten auszugleichen ist auf der Grundlage einer Optimierungsanalyse (LP-Modell) ein durchschnittlicher Mehrertrag über alle Kulturen der Fruchtfolge hinweg (ohne Klee-gras) von ca. 5,8 % notwendig.

### 5.6.2 Einfluss der Streuung des Stickstoff-Verlustpotentials auf die N-Kosten

Die Stickstoffverluste bei der Bereitstellung von Klee-grasdüngemitteln können sich Literaturangaben zufolge teils deutlich unterscheiden. Werden diese Verlustspannen basierend mittels die Verlusteintrittswahrscheinlichkeiten darstellenden Verteilungsfunktionen berücksichtigt und gemeinsam mit den in Kapitel 5.2.2 dargestellten Verfahrenskosten aufbereitet, lässt sich eine gewisse Schwankungsbreite (Risikopotential) der zu erwartenden N-Kosten abbilden (Abbildung 21).

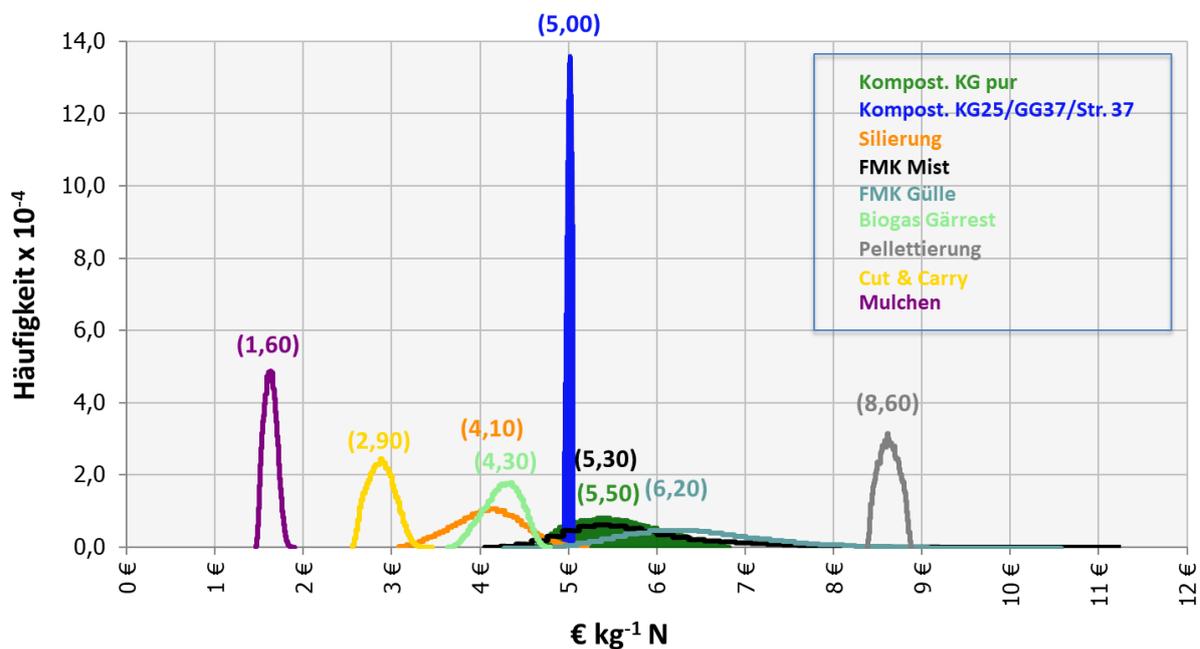


Abbildung 22: Schwankungspotential der Stickstoff-Kosten verschiedener Klee-grasdüngemittel abhängig von Verfahrenskosten und N-Verlustpotential.

Es wird deutlich, dass insbesondere bei den Kooperationsverfahren Gülle und Mist, aber auch bei der reinen Klee-graskompostierung hohe Verlustpotentiale auftreten können, die die Schwankungsbreite der N-Kosten stark erhöhen. Unter optimalen Bedingungen sind beispielsweise die N-Verluste und entsprechende Schwankungen der N-Kosten bei der Kompostierung allerdings relativ gering (Kompost KG25/GG37/Stroh37). Für die restlichen Klee-grasdüngemittelverfahren sind die N-Verlustpotentiale im ähnlichen Schwankungsbereich, allerdings unterschieden sich die N-Kosten teilweise stark abhängig von den Verfahrenskosten.

## 5.7 Opti-KG-Tool für die betriebliche Optimierung der Klee-grasnutzung

Das im Projekt entwickelte Excel-Tool soll entscheidungsunterstützend die Klee-grasnutzung in Öko-Betrieben optimieren (Abbildung 22). Es wurde auf der Grundlage der im Projekt erhobenen Daten, Standarddaten insbesondere des KTBL sowie basierend auf zahlreichen Rückmeldeschleifen von Beratung und Praxis entwickelt. Hierfür erfolgt nach einer Erfassung der betrieblichen Rahmenbedingungen (Modul A) sowie der jährlich erwartbaren Mengen an Klee-gras die Zuteilung zu verschiedenen Nutzungsoptionen der Klee-gras-Düngemittelerzeugung (Modul B). Mengen- und Stickstoffverluste der Verwertungsprozesse werden kalkuliert. Die schließlich zur Düngung bereitstehenden Düngemittelmengen können anschließend auf die betrieblichen Fruchtfolgeglieder verteilt werden (Modul B). Eine Flächenbilanz unter Berücksichtigung der eingesetzten Klee-grasdüngemittel zeigt das Nährstoffsaldo der Fruchtfolge auf (Modul C). Im Modul D können die Bereitstellungskosten der verschiedenen Klee-grasdüngemittel kalkuliert werden sowie Größe und Kosten baulicher Anlagen insbesondere der Klee-gras-Kompostierung abgeschätzt werden. Im Ergebnismodul (Modul E) können die Ergebnisse von Ist- und Plan-Varianten verglichen werden.

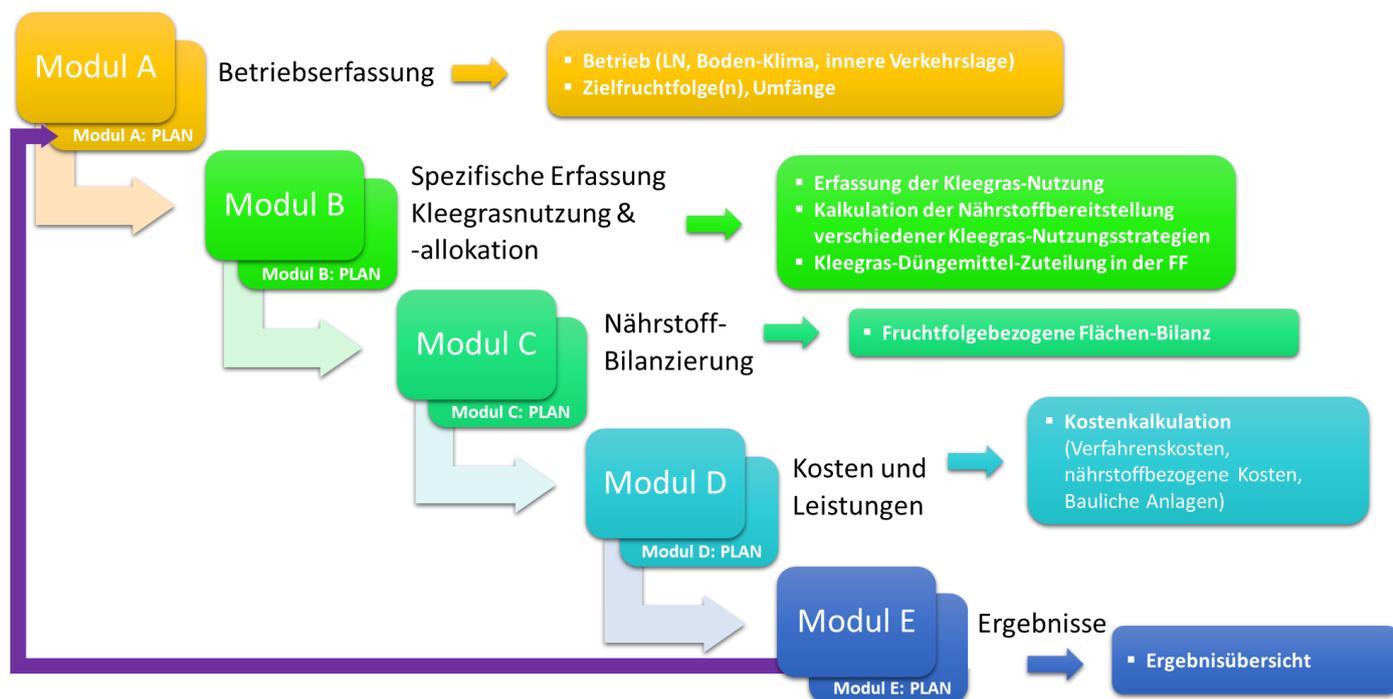


Abbildung 23: Struktur des Opti-KG-Tools

### 5.7.1 Nutzung

Der Prototyp des Tools kann derzeit potentiell insbesondere geschulten Beratungskräften zur Verfügung gestellt werden. Eine praktische Anleitung zur Nutzung des Tools kann bei den Verfassern des Abschlussberichts angefragt werden.

### 5.7.2 Mit dem Opti-KG-Tool erstellte Auswertungsbeispiele

#### 5.7.2.1 Betriebsbeispiel 1

##### Betrieb:

- 270 ha Acker, 10 ha GL
- Vorwiegend Lehm (Löss-, sandig, tonig), Ackerzahl überwiegend 65-80
- Ca. 650 mm Niederschlag, 8,7 °C

##### Fruchtfolge:

- Standortspezifisch, Wechsel Sommerung/Winterung bzw. Blatt-/Halmfrucht
- Alle 6 Jahre:
- Klee-gras 1,5 Jahre
- Ackerbohne oder Erbse
- Möhre, Rote Beete oder Wurzelpetersilie

##### Klee-grasmanagement – Art und Nutzung:

- Rotklee gras im Mischungsverhältnis 70:30
- Ertrag: 400 dt FM/ha, 35 ha Anbaufläche
- Untersaat in Vorfrucht – 1,5 Jahre
- Schröpfschnitt (April)
- 2. Schnitt: Kompostierung bzw. Futterabgabe an Rinderhalter (Ende Mai/Anfang Juni)
- 3. Schnitt: Cut&Carry (vor Wintergetreide oder ZF nach Drusch) bzw. Kompostierung
- 4. Schnitt: Flächenrotte (Mulchen und Einarbeitung mit Geohobel) bzw. Kompostierung

Tabelle 39: Mengenanfall Klee gras im Rahmen der Beispielfruchtfolge und Verteilung auf die Klee gras nutzungs verfahren (Beispiel 1)

Schnitt Nr.	Anteil (%)	dt FM/ha	t FM ge- samt	t FM f. Kompost	= Hektar	t FM für sonst. Verfahren	= Hektar
1	15	60	210	-	-	210 (Mulch)	35
2	35	140	490	167	11,9	323 (FMK)	23,1
3	25	100	350	167	16,7	183 (C&C)	18,33
4	25	100	350	167	16,7	183 (Mulch)	18,33

### Kompostierung – Input und Management:

Tabelle 40: Komponenten der Klee gras kompostierung sowie Kompostmanagement (Beispiel 1)

<b>Komponenten der Klee gras kompostierung</b>	Masseverhältnis: - 33 % Klee gras - 31,4 % Schweinemist - 23,8 % Grüngutkompost - 6,6 % Holzhack - 5,3 % Möhrenputzerde	Volumenverhältnis: - 54,9 % Klee gras - 21,7 % Schweinemist - 16,5 % Grüngutkompost - 4,6 % Holzhack - 2,4 % Möhrenputzerde
<b>Kompostmanagement</b>	- Kompostierungsdauer: 3 Monate - Umsetzen mit gezogenem Wender (6-7 mal) - Separate Bewässerung - Abdecken der Miete mit Vlies	

### Kompostierung – Output:

Tabelle 41: Mengenbezogener Output (Frischmasse; Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie Raumbedarf nach der Kompostierung (Beispiel 1)

Kompostierdurchgang	Vor Kompostierung		Nach Kompostierung						Raumbedarf gesamt (nach Kompostierung)
	Mengen Kompostsubstrate gesamt	Mengen Lagersubstrate	TS-Gehalt	Kompostmen- ge gesamt	N-Gehalt	N gesamt	P gesamt	K gesamt	
	[t FM/a]	[t FM/a]	[%]	[t FM/a]	[% der TS]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	
1	94,29	67,86	55,00	51,90	0,85	241,68	202,92	460,56	55,03
2	202,86	56,43	55,00	76,03	1,37	571,48	590,52	883,96	155,51
3	165,00	45,00	55,00	50,07	1,86	511,06	539,79	768,82	135,52
4	331,67	45,00	55,00	80,37	2,04	902,73	639,79	1.635,48	302,19
5	306,67	45,00	55,00	66,58	2,41	880,73	639,79	1.635,48	260,19
6	306,67	45,00	55,00	66,58	2,41	880,73	639,79	1.635,48	260,19
7	96,43	45,00	55,00	44,91	1,07	263,68	202,92	460,56	87,06

## Kleegras-Düngemittel-Bereitstellung (Frischmasse und Stickstoff):

Tabelle 42: Mengenbezogener Output aller produzierten Kleegrasdüngemittel (Frischmasse, Stickstoff) (Beispiel 1)

Verfahren	Produkt	Mengenbereitstellung		Stickstoffbereitstellung					
		t FM/ha/Jahr Kleegras	Gesamt, t FM/Jahr	GESAMTMENGE (bzw. N kurzfristig verfügbar)		N mittelfristig verfügbar		N langfristig verfügbar	
				kg N/ha/Jahr Kleegras	Gesamt, kg N/Jahr	kg N/ha/Jahr Kleegras	kg N/Jahr gesamt	kg N/ha/Jahr Kleegras	kg N/Jahr gesamt
Mulchen von Kleegras	KG-Mulch	8,8	356,6	70,0	1783,2	49,0	1248,2	44,1	1123,4
Cut&Carry	Cut&Carry	9,0	165,0	50,0	916,5	35,0	641,6	31,5	577,4
Kompostierung	Kompost	14,7	213,5	181,3	2664,2	126,9	1864,9	114,2	1678,4
Silierung	Silage	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Pelletierung	Pellets	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Futter-Mist-Kooperation	Festmist	12,1	280,0	63,0	1455,3	53,6	1237,0	50,3	1162,8
Futter-Mist-Kooperation	Gülle	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Biogasnutzung	Gärrest	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

## Zuteilung Kleegrasdüngemittel in der Fruchtfolge:

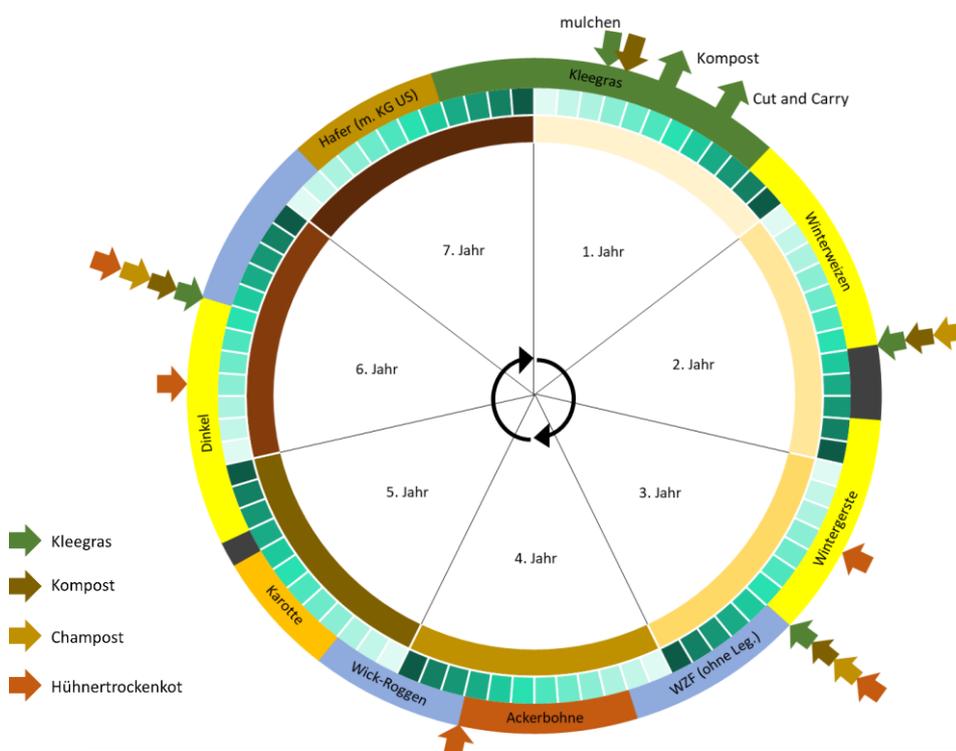


Abbildung 24: Kreisförmige Darstellung der Beispielfruchtfolge mit Düngefenstern von Kleegrasdüngemitteln und weiteren organischen Düngemitteln (Beispiel 1)

## Flächenbilanz:

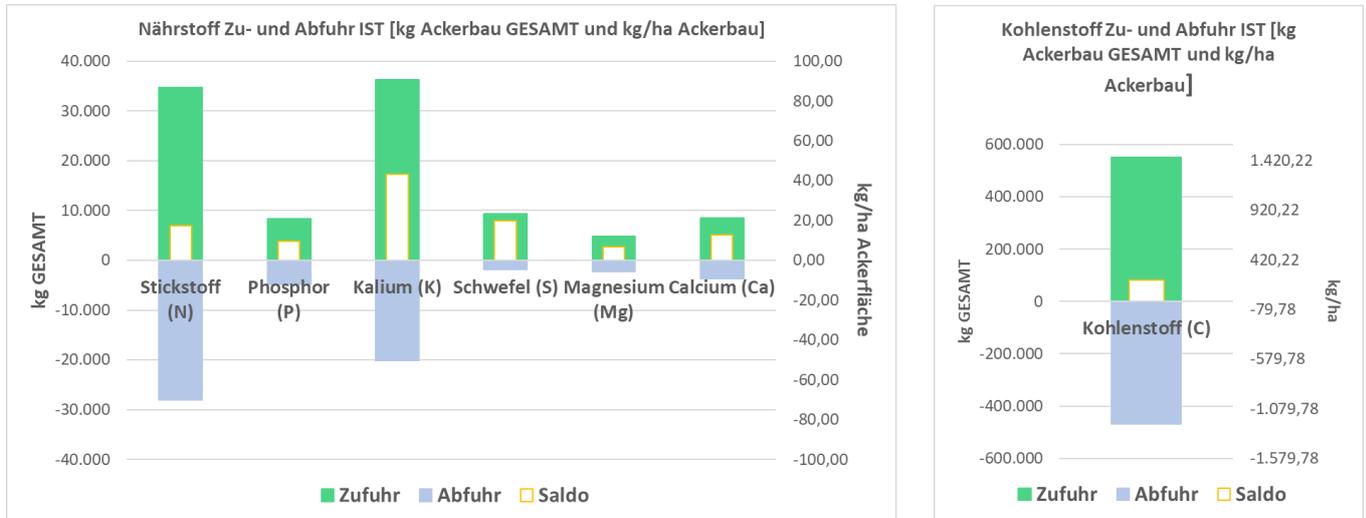


Abbildung 25: Flächenbilanzen für N, P, K, S Mg und Ca sowie Kohlenstoffbilanz (Beispiel 1)

## Kalkulation Platzbedarf und Kosten Kompostplatte:

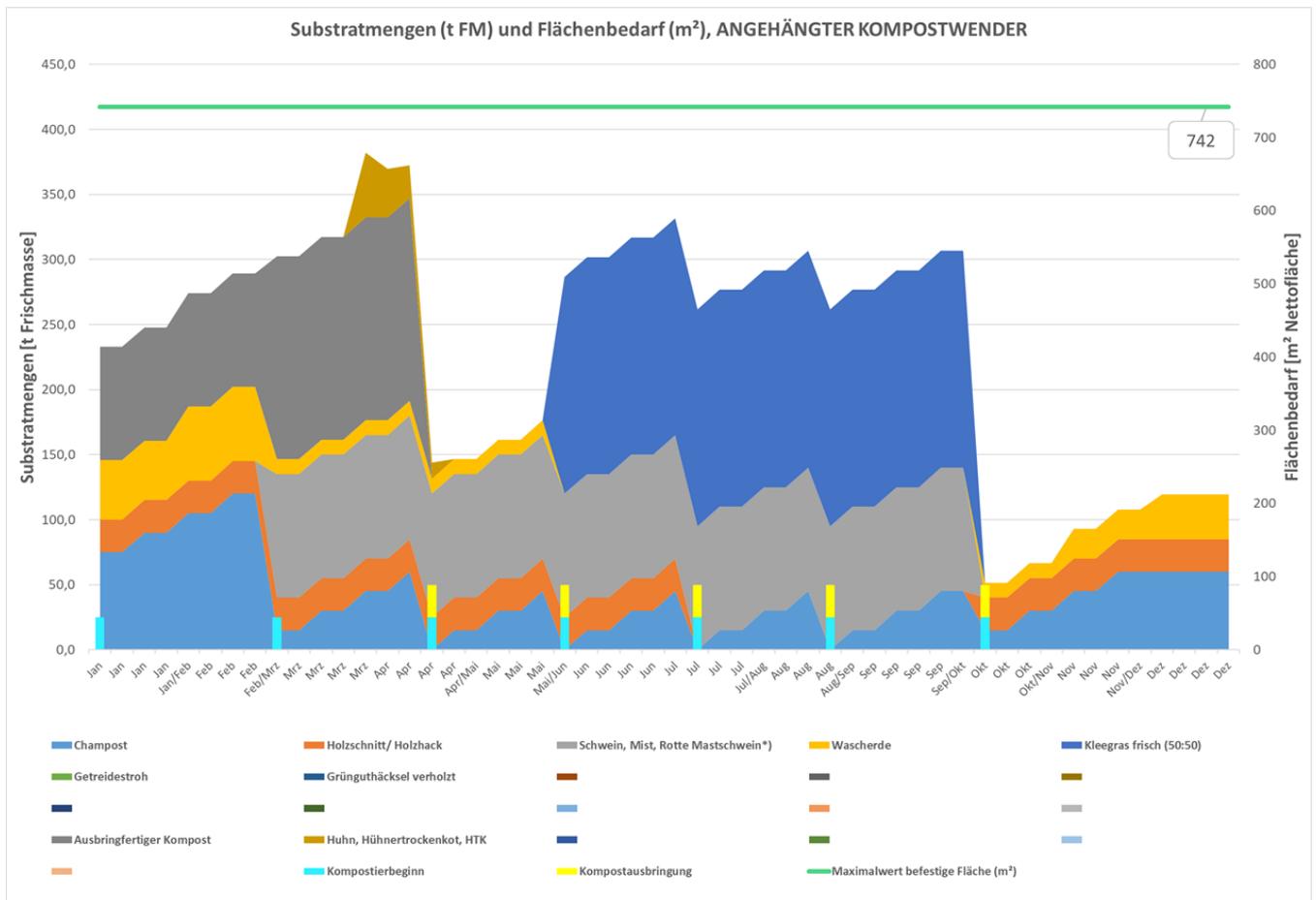


Abbildung 26: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen (Beispiel 1)

Tabelle 43: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte (Beispiel 1)

	Maximalwerte für den zu einem Zeitpunkt im Jahr höchsten Flächenbedarf	Angeh. Wender [m <sup>2</sup> ]	Selbstfahrer [m <sup>2</sup> ]	Anzusetzende Kosten [€/m <sup>2</sup> ]	Angeh. Wender, Investitionskosten [€/Jahr]	Selbstfahrer, Investitionskosten [€/Jahr]	Angeh. Wender, Jahreskosten [€/Jahr]	Selbstfahrer, Jahreskosten [€/Jahr]
INTEGRIERTER FLÄCHENBEDARF, befestigte Fläche ohne dreiseitige		742	770	80,00 €	59.350,31 €	61.594,49 €	2.387,37 €	2.477,64 €

### Kostenvergleich Kleeerasnutzungsverfahren:

Tabelle 44: Vergleich der Bereitstellungskosten (absolut, FM-bezogen, N-bezogen) verschiedener Kleeerasdüngemittel im Vergleich (Beispiel 1)

Verfahren	Produkt	Direktkosten [€/Jahr]	Arbeits-erledigungs-kosten pro Nutzung (bzw. Kompostier-Durchgang) [€/ha KG]	Gebäudekosten [€/Jahr]	Hektare KG Geberfläche je Verfahren ODER Anzahl Durchgänge Kompostierung [Anzahl]	Kosten gesamt, (DAK + Gebäudekosten*ha oder *Anzahl Durchgänge) [€/Jahr]	Mengenbezogene Kosten, [€/t FM]	N-Bereitstellung je Verfahren pro ha Kleeeras [kg N/ha]	Stickstoffbezogene Kosten [€/kg N]
Mulchen von Kleeeras	KG-Mulch		55,11 €		53,33	2.939,02 €	7,47 €	152,00	1,49 €
Cut&Carry	KG-C&C		168,88 €		18,33	3.095,57 €	18,76 €	153,00	3,75 €
Kompostierung (Arbeitse)	Kompostmischung		3.850,39 €		46,3	16.586,68 €	48,58 €	423,02	4,77 €
Kompostierung (Arbeitse)	Kompostmischung +	1.788,35 €	3.850,39 €	2.598,92 €	46,3	20.973,96 €	61,43 €	423,02	6,03 €
Futter-Mist-Kooperation,	Festmist		81,53 €		23,1	1.883,34 €	8,22 €	147,15	2,34 €

### 5.7.2.2 Betriebsbeispiel 2

#### Betrieb:

- 58 ha Gesamtfläche
- 27 ha Gemüse, 5 ha Kartoffel, 10 ha Getreide
- 14 ha Gründüngung, Kleeeras etc.

#### Kleeerasmanagement – Art und Nutzung:

- 20% der Fläche, einjährig bzw. Herbstansaat, ca. 11 ha
- Angesetzter Ertrag: 500 dt/ha
- 1. Schnitt Cut & Carry in Kohl
- 2. Schnitt Kompostierung
- 3. Schnitt Cut & Carry nach Getreide mit anschließender ZF Saat
- 4. Schnitt Mulchen und Umbruch

Tabelle 45: Mengenanfall Klee gras im Rahmen der Beispielfruchtfolge und Verteilung auf die Klee grasnutzungsverfahren (Beispiel 2)

Schnitt Nr.	Anteil (%)	dt FM/ha	t FM ge- samt	t FM f. Kompost	= Hektar	t FM für sonst. Verfahren	= Hektar
1	35	175	196	-	-	196 (C&C)	11,2
2	25	125	140	140	11,2	-	11,2
3	25	125	140	-	-	140 (C&C)	11,2
4	15	75	84	-	-	84 (Mulch)	11,2

### Kompostierung – Input und Management:

Tabelle 46: Komponenten der Klee graskompostierung für eine „Betriebsmischung“ mit 11 % Strukturträgeranteil und einer Alternativvariante „Mischung C+“ mit 20 % Strukturträgeranteil (Beispiel 2)

Substratwahl (Auswahllisten)	Betriebs- mischung	Gewichts- anteile	Betriebs- mischung C+	Gewichts- anteile
	[t FM]	[%]	[t FM]	[%]
Gemüsereste	73,68	6,31%	73,68	5,72%
Klee gras frisch (70:50)	140,00	11,98%	140,00	10,87%
Landschaftspflegematerial	98,91	8,47%	98,91	7,68%
Pferd, Mist, Rotte*)	175,00	14,98%	175,00	13,58%
Grünuthäcksel jung	36,46	3,12%	36,46	2,83%
Wascherde	642,20	54,97%	642,20	49,85%
Pflanzenkohle	0,45	0,04%	0,45	0,03%
Gesteinsmehl (CUXIN DCM Urgesteir	1,60	0,14%	1,60	0,12%
Getreidestroh			120,00	9,31%

Management: Gezogener Wender (14x wenden pro Durchgang), separate Bewässerung, Abdecken mit Vlies (mechanisiert).

Aufgrund des geringen Strukturträgeranteils in der betriebsüblichen Mischung wurde eine Alternativvariante mit 20 % Strukturträgeranteil durch Beimischung von strohhäckseln kalkuliert, um die N-Verluste während der Kompostierung zu minimieren.

### Kompostierung – Output:

Tabelle 47: Verlustraten der beiden Kompostvarianten im Vergleich (Beispiel 2)

Kompostierdurchgang Nr....	Masseverlust	N-Verlust Ausgasung	N-Verlust Auswaschung	Volumen- Verlust	TS-Gehalt fertiger Kompost
	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Betriebsübliche Mischung	58,28	46,10	0,00	74,30	73,08
Betriebsübliche Mischung C+	50,00	30,00	0,00	60,00	70,00

Tabelle 48: Mengenbezogener Output (Frischmasse; Stickstoff, Phosphor, Kalium) sowie Raumbedarf nach der Kompostierung (Beispiel 2)

Kompostierdurchgang	Vor Kompostierung		Nach Kompostierung						Raumbedarf gesamt (nach Kompostierung)
	Mengen Kompostsubstrate gesamt	Mengen Lagersubstrate	TS-Gehalt	Kompostmenge gesamt	N-Gehalt	N gesamt	P gesamt	K gesamt	
	[t FM/a]	[t FM/a]	[%]	[t FM/a]	[% der TS]	[kg/a]	[kg/a]	[kg/a]	[m³/a]
Betriebsüblich	1.028,31	322,11	73,08	430,80	0,25	796,28	376,83	2.292,99	360,60
C+	1.148,31	393,69	70,00	612,73	0,34	1.454,14	376,83	2.292,99	561,24

### Kleegras-Düngemittel-Bereitstellung (Frischmasse und Stickstoff):

Tabelle 49: Mengenbezogener Output aller produzierten Kleegrasdüngemittel (Frischmasse, Stickstoff) (Beispiel 2)

Verfahren	Produkt	Mengenbereitstellung		Stickstoffbereitstellung					
		t	Gesamt, t	GESAMTMENGE (bzw. N kurzfristig verfügbar)		N mittelfristig verfügbar		N langfristig verfügbar	
		FM/ha/Jahr Kleegras	FM/Jahr	kg N/ha/Jahr Kleegras	Gesamt, kg N/Jahr	kg N/ha/Jahr Kleegras	kg N/Jahr gesamt	kg N/ha/Jahr Kleegras	kg N/Jahr gesamt
Mulchen von Kleegras	KG-Mulch	6,0	67,2	30,0	336,0	26,4	295,7	26,4	295,7
Cut&Carry	Cut&Carry	27,0	302,4	135,0	1512,0	118,8	1330,6	118,8	1330,6
Kompostierung	Kompost	38,5	430,8	71,1	796,3	71,1	796,3	71,1	796,3
Kompostierung C+	Kompost	54,7	612,7	129,8	1454,1	129,8	1454,1	129,8	1454,1

### Flächenbilanz (betriebsübliche Düngung):

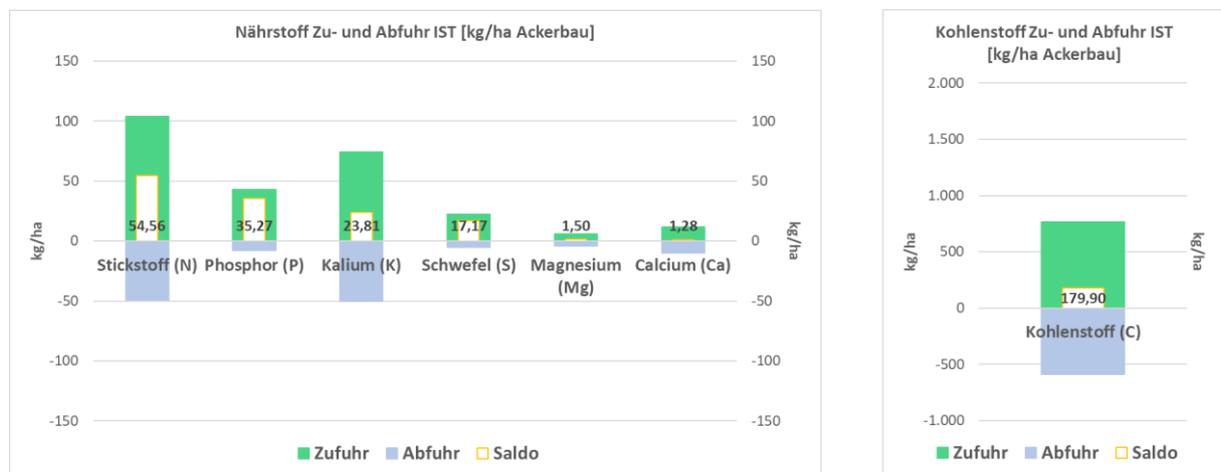


Abbildung 27: Flächenbilanzen für N, P, K, S Mg und Ca sowie Kohlenstoffbilanz (Beispiel 2)

## Kalkulation Platzbedarf und Kosten Kompostplatte:

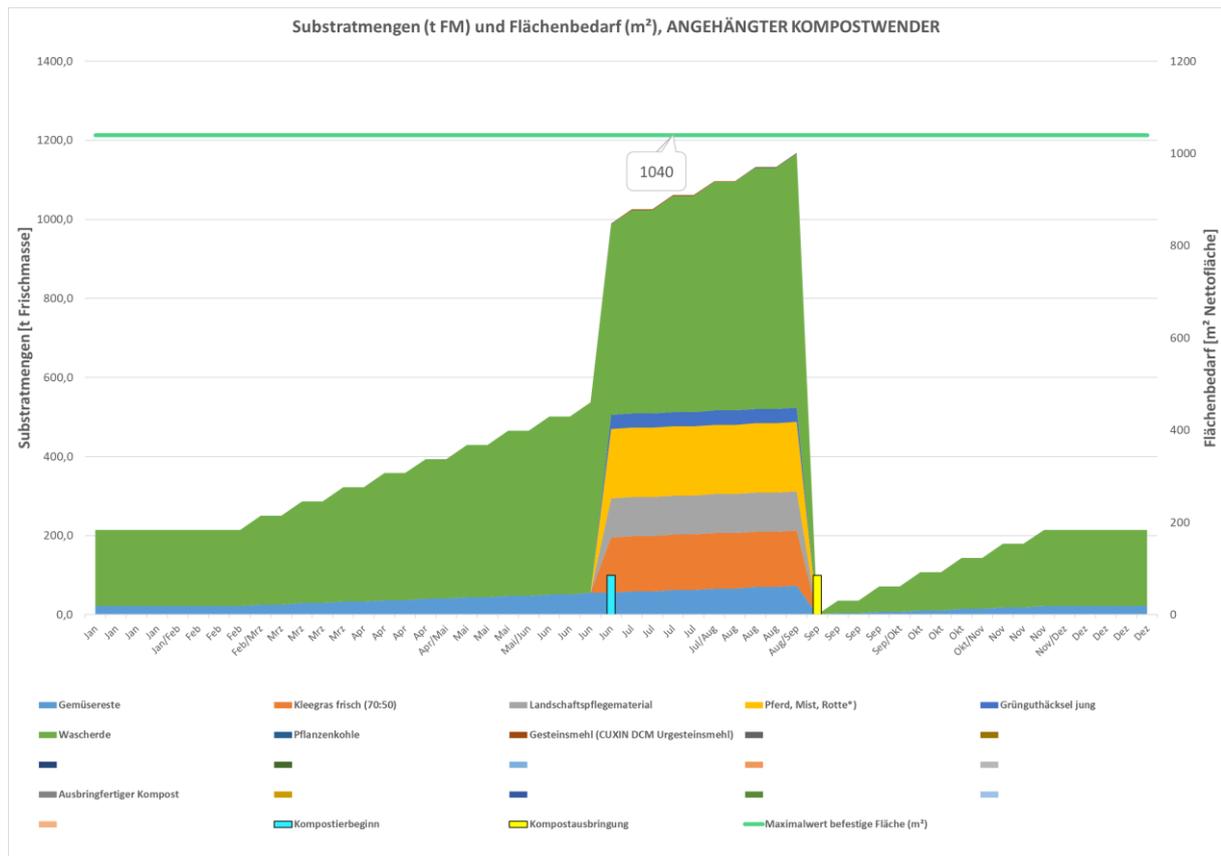


Abbildung 28: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen der „Betriebsmischung“ (Beispiel 2)

Tabelle 50: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte der Variante „Betriebsmischung“ (Beispiel 2)

Maximalwerte für den zu einem Zeitpunkt im Jahr höchsten Flächenbedarf	Angeh. Wender	Selbstfahrer	Anzusetzende Kosten	Angeh. Wender, Investitionskosten [€/Jahr]	Selbstfahrer, Investitionskosten [€/Jahr]	Angeh. Wender, Jahreskosten [€/Jahr]	Selbstfahrer, Jahreskosten [€/Jahr]
	[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	[€/m <sup>2</sup> ]				
<b>INTEGRIERTER FLÄCHENBEDARF, befestigte Fläche ohne dreiseitige</b>	<b>1040</b>	<b>1060</b>	<b>80,00 €</b>	<b>83.164,90 €</b>	<b>84.783,70 €</b>	<b>5.197,81 €</b>	<b>5.298,98 €</b>

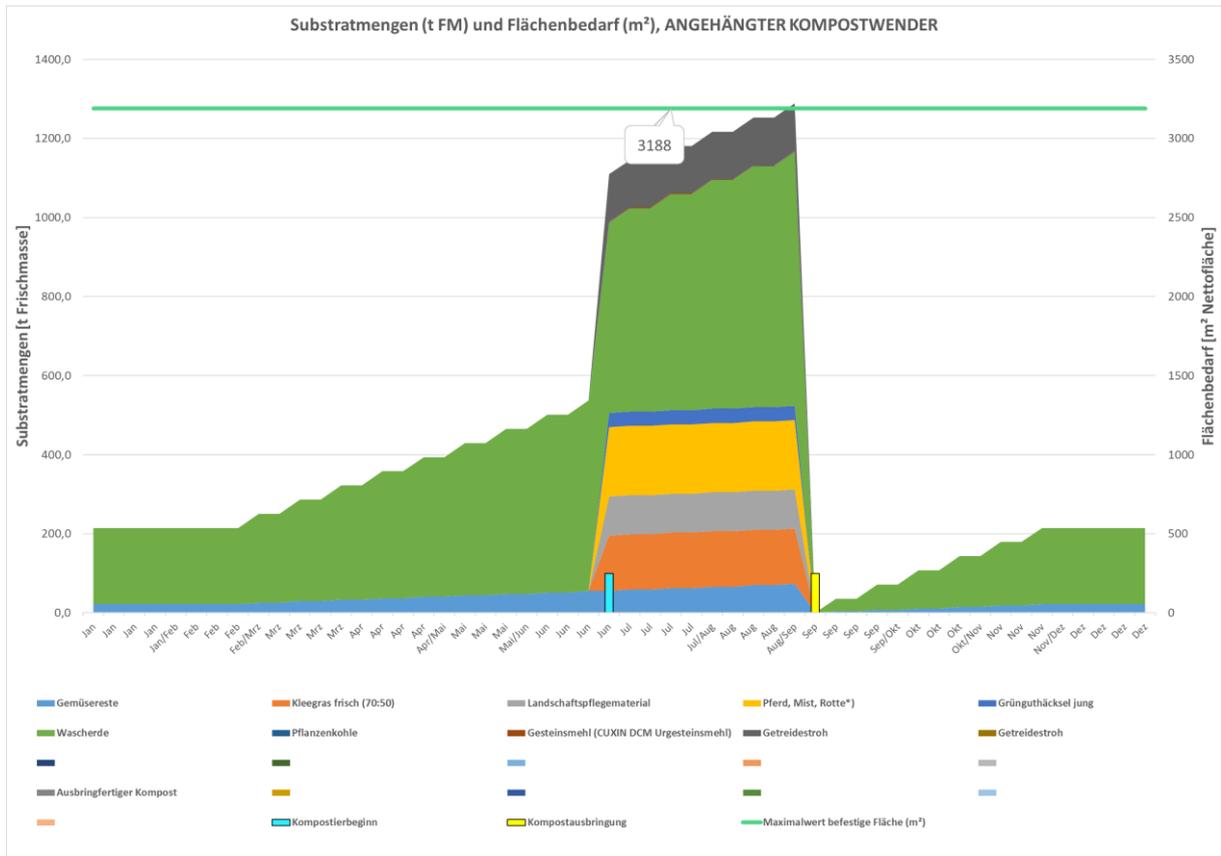


Abbildung 29: Kalkulation Flächenbedarf einer Kompostplatte basierend auf Inputsubstraten, Masseverlusten, Lagerzeiten sowie Anzahl von Kompostierdurchgängen der „Mischung C+“ (Beispiel 2)

Tabelle 51: Investitions- und Jahreskosten der flächenmäßig kalkulierten Kompostplatte der Variante „Mischung C+“ (Beispiel 2)

	Maximalwerte für den zu einem Zeitpunkt im Jahr höchsten Flächenbedarf	Angeh.	Selbstfahrer	Anzu-	Angeh. Wender,	Selbstfahrer,	Angeh. Wender,	Selbstfahrer,
		Wender	Wender	setzende	Investitions-	Investitions-	Jahres-kosten	Jahres-kosten
		[m <sup>2</sup> ]	[m <sup>2</sup> ]	Kosten	kosten [€/Jahr]	kosten [€/Jahr]	[€/Jahr]	[€/Jahr]
				[€/m <sup>2</sup> ]				
	INTEGRIERTER FLÄCHENBEDARF, befestigte Fläche ohne dreisei	3188	3240	80,00 €	255.052,24 €	259.217,52 €	15.940,76 €	16.201,10 €

### Kostenvergleich Klee grasnutzungsverfahren:

Tabelle 52: Vergleich der Bereitstellungskosten (absolut, FM-bezogen, N-bezogen) verschiedener Klee grasdüngemittel im Vergleich (Beispiel 2)

Verfahren	Produkt	Direkt-kosten	Arbeits-erledigungs-kosten pro Nutzung (bzw. Kompostier-Durchgang)	Gebäude-kosten	Hektare KG Geber-fläche je Verfahren ODER Anzahl Kompost-ierung	Kosten gesamt, (DAK + Gebäude-kosten*ha oder *Anzahl Durchgänge)	Mengen-bezogene Kosten	N-Bereitstellung je Verfahren pro ha Klee gras	Stickstoff-bezogene Kosten (BEZOGEN AUF N kurzfristig)
		[€/Jahr]	[€/ha KG]	[€/Jahr]	[Anzahl]	[€/Jahr]	[€/t FM]	[kg N/ha]	[€/kg N]
Mulchen von Klee gras	KG-Mulch	0,00 €	47,37 €		11,2	530,54 €	7,90 €	30	1,58 €
Cut&Carry	KG-C&C	0,00 €	462,00 €		22,4	10.348,84 €	34,22 €	135	6,84 €
Kompostierung Substratn	Betriebsmischung		4.477,53 €		11,2	5.607,08 €	13,02 €	71	7,04 €
Kompostierung Substratn	Mischung C+		5.662,71 €		11,2	6.792,26 €	11,09 €	130	4,67 €

## 6 Arbeitspaket 4 – Wissenstransfer

Der Wissenstransfer war integrativer Bestandteil des gesamten Projektes. Vier Betriebe waren Mitglied im Konsortium und haben sich rege an der Diskussion zur Durchführung von Praxis eingetrieben bzw. Daten für die Berechnung der Kostenstrukturen der verschiedenen Verfahren zur Verfügung gestellt. Die Ergebnisse wurden in einer ganzen Reihe von Workshops, Konferenzen, Vorträgen bzw. Publikationen in Fachzeitschriften - wie im Folgenden aufgelistet - verwertet.

Projektstartsitzung in Frankenhausen: 3. März 2020

### **Workshops: geplant vier Workshops**

#### **Durchgeführte Workshops**

- 26.2.2021 online Workshop
- 29.6.2021 online Workshop
- 25.2.2022 online Workshop in
- 10.02.2023 Abschluss Workshop Witzenhausen Hybrid

#### **Konferenzen/Workshop mit Beratern zur Vorstellung des OPTI KG Tools**

- November 2022 Toolvorstellung BiolandNaturland / BLE
- Dezember 2022 Toolvorstellung KTBL
- März 2023 Toolentwicklung Bioland

#### **Vorträge an Tagungen**

Wissenschaftstagung für den ökologischen Landbau, 2022 in Frick, Schweiz: Stickstoff-Effizienz und Stickstoff-Bereitstellungskosten von Klee gras-Transf erdüngern

Wissenschaftstagung für den ökologischen Landbau, 2024 in Gießen: Zur Wirtschaftlichkeit klee gras-basierter Düngung bei Sommerweizen (*Triticum aestivum*)

#### **Vorträge bei Landwirten / weitere**

09.03.2022 Vortrag Webinar Naturland

10.03.2022 Vortrag Webinar LTZ Augustenberg

05.12.2022 Vortrag Webinar Naturland

#### **Ökofeldtage**

2019 - Domäne Frankenhausen, Organisation des Hotspot Kompost

2022 - Gladbacher Hof, Organisation Hotspot Kompost und Kompostforum mit diversen Vorträgen aus dem OPTI KG Projekt

2023 – Ditzingen, Organisation Hotspot Kompost und Kompostforum mit diversen Vorträgen aus dem OPTI KG Projekt

## **Veröffentlichungen**

### **Medien**

- Lehr und Demonstrationsfilm: <https://www.youtube.com/watch?v=4UDM1kyD9gY> – aktuell über 30.000 Klicks
- KTBL-Broschüre Kompostierung im landwirtschaftlichen Betrieb (2024)

### **Fachzeitschriften**

- Bioland April 2021: Für hochwertigen Kleegraskompost
- Ökologie und Landbau 02/22: Königsweg der Düngung?
- Ökologie und Landbau 01/24: Klee gras ohne Vieh optimal nutzen
- Lumbrico 19/24: „Klee gras als Schlüsselfaktor“

## 7 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse

Die Ergebnisse haben maßgeblich zu einer Konsolidierung des Wissens in Bezug auf die Anwendung von Klee gras Transferstrategien beitragen können. Dabei haben insbesondere die umfangreichen Versuche zur Klee gras-Kompostierung, Impulse für eine höhere Nährstoffeffizienz auf den Betrieben ergeben, die Verbindung zwischen den Feldversuchen zur Düngewirkung und betriebswirtschaftlichen Kalkulation ein differenziertes Bild der Kostenstrukturen der Transferstrategien ermöglicht und die Bedeutung für die betriebsindividuelle Lösungen hervorgehoben, die letztlich von differenzierten Rahmenbedingungen auf den Betrieben abhängig sind. Daher wurde ein umfangreiches Excel-Tool entwickelt, das der Beratung zur Verfügung steht, um die Betriebe aus verschiedenen Blickwinkeln bei der Entscheidungsfindung zu unterstützen, welche Transferstrategien am besten im betrieblichen Zusammenhang angewendet werden können.

## 8 Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen

Die gesteckten Ziele konnten umfangreich erreicht werden. Die Datengrundlagen bzw. das betriebswirtschaftliche Excel Tool bietet hervorragende Möglichkeiten für weitere Arbeiten im Rahmen der Optimierung des Anbaus von Feinleguminosen und zwar nicht nur im Ökologischen Landbau, sondern auch darüber hinaus für konventionelle Betriebe. Dabei sollte ein Schwerpunkt auf der Bearbeitung von Grundlagen zur Monetarisierung bei bisher weniger gut quantifizierten Parametern wie dem Vorfruchtwerte gelegt werden. Ganz unmittelbar ist es sehr sinnvoll, das Excel Tool in eine anwenderfreundlichere Form zu bringen, beispielsweise in einer Access Lösung; dies allerdings erfordert die intensive Beteiligung von Programmierern.

## 9 Zusammenfassung

Das übergeordnete Ziel des Vorhabens war die Optimierung der innerbetrieblichen Klee grasverwertung viehloser Biobetriebe entlang der Bereitstellungskette vom Schnitt bis zur Anwendung. Im Zentrum sollen die verlustarme Konservierung des Klee gras, die effiziente Verwertung der Nährstoffe und die wirtschaftliche Bewertung von Klee gras-Transferverfahren stehen.

Mit fünf Kompostierungsversuchen über jeweils 13 Wochen konnten die Rahmenbedingungen für eine Minimierung der Stickstoffverluste während der Kompostierung erfolgreich definiert werden. Damit ist eine Steigerung der betrieblichen Stickstoff Effizienz bei viehlosen Betrieben, die auf die oberirdische Biomasse angewiesen sind, möglich. Entscheidend für die Kompostierung als erfolgreiche Transferstrategie mit hoher Stickstoffeffizienz, ist die Kompostierung von stickstoffreichen Klee gras mit C-reichen externen Co-Substraten wie GrünGut oder betriebsinternen wie Stroh. Damit können im Vergleich zu einer reinen Klee gras Kompostierung (50 % N Verluste) die N-Verluste bis auf weniger als 10 % abgesenkt werden. Handlungsempfehlungen flossen in Arbeitspaket 4 und Merkblätter ein.

Sechs Feldversuche wurden Pandemie bedingt verspätet mit verschiedensten Transferdünger wie Gärreste, Silage, Cut&Carry, Klee graskomposten aus den Kompostierungsversuchen, Rindermistkompost und Kleepellets N-äquivalent angelegt. Es ergaben sich je nach C/N-Verhältnis, der Höhe der Gehalt an N-Gesamt und Nmin in den Düngern zwar gewisse Steigerungen im Ertrag aber nicht so differenziert wie erwartet. Die Komposte zeigten recht ansprechende Ergebnisse, die aber in der Mehrzahl der Fälle auf gleichem Niveau wie Cut&Carry oder andere Dünger lagen. Kurzfristige Effekte zeigten sich bei Gärresten, längerfristige Effekte ergaben sich in den Nachfruchtversuchen in Komposten, Cut&Carry oder Kleepellets.

Die ökonomischen Analysen umfassten eine grundlegende wirtschaftliche Bewertung verschiedener Klee grasdüngemittel-Bereitstellungsketten sowie aufbauend auf einer integrierten Stoffstromanalyse die ökonomische Stickstoff-Effizienz der Verfahren im Vergleich. Neben einer monetären Bewertung von Klee gras-Komposten über Nährstoff- und Humuswerte erfolgte eine betriebswirtschaftliche Optimierung sowie Risikobewertung des Einsatzes von Klee gras-Transferdüngemitteln basierend auf einem Fruchtfolgemodell. Um den Praxistransfer der Ergebnisse zu verbessern, wurde ein Kalkulationstool entwickelt, das als Entscheidungsunterstützung bei der betrieblichen Klee grasnutzung in Beratung und Praxis dienen kann

Im Projektverlauf wurden umfangreiche Wissenstransfermaßnahmen durchgeführt. Hierzu sind zum einen teils öffentliche Projektworkshops zu zählen ebenso wie Workshops mit Beratungspersonen mit dem Ziel der Optimierung des Entscheidungsunterstützungs-Tools. Darüber hinaus wurden zahlreiche Vorträge sowohl bei Praxisveranstaltungen als auch auf wissenschaftlichen Tagungen abgehalten. Weitere Bausteine des Wissenstransfers waren die Auftritte auf drei verschiedenen Ökofeldtagen sowie das Verfassen von Artikeln in Praxispublikationen oder Beiträge in einer KTBL-Broschüre zum Thema Kompostierung in der Landwirtschaft sowie 35 minütiger Lehrfilm.

## 10 Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen

### **Veröffentlichungen**

#### **Medien**

- Lehr und Demonstrationsfilm: <https://www.youtube.com/watch?v=4UDM1kyD9gY> – aktuell über 30.000 Klicks
- KTBL-Broschüre Kompostierung im landwirtschaftlichen Betrieb (2024)

#### **Fachzeitschriften**

- Bioland April 2021: Für hochwertigen Kleegraskompost
- Ökologie und Landbau 02/22: Königsweg der Düngung?
- Ökologie und Landbau 01/24: Klee gras ohne Vieh optimal nutzen
- Lumbrico 19/24: „Klee gras als Schlüsselfaktor“

## 11 Literaturverzeichnis

AMI (2023): AMI Markt Bilanz Öko-Landbau 2023

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.

Berry P. M.; Sylvester-Bradley, R.; Philipps, L.; Hatch, D. J.; Cuttle, S. P.; Rayns, F. W.; Gosling, P. (2002): Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? In: *Soil Use Manag* 18 (3), S. 248–255.

Brock, C.; Hoyer, U.; Leithold, G.; Hülsbergen, K. J. (2008): Entwicklung einer praxisanwendbaren Methode der Humusbilanzierung im ökologischen Landbau. Abschlussbericht zum Projekt 03OE084 (Bundesprogramm Ökologischer Landbau). Eigenverlag Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, Bonn.

Burgt, G.J.H.M. van der; Eekeren, N.J.M. van; Scholberg, J.M.S.; Koopmans, C.J. (2013): Lucerne (*Medicago sativa*) or grass-clover as cut-and-carry fertilizers in organic agriculture  
BGK (2013): Humus- und Düngewert von Kompost und Gärprodukten. Merkblatt der Bundegütegemeinschaft Kompost (BGK) (Hrsg.)

Dreymann, S.; Loges, R.; Taube, F. (2005): Schnittgutabfuhr oder Gründüngung? Auswirkung der Klee gras-Nutzung auf Nitrat um Sickerwasser und Folgefrüchte. In: Heß, J. und Rahmann, G. (Hg.): Ende der Nische. 8. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Kassel.

DüV (2021): Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen (Düngeverordnung - DüV).

Fuchs, Jacques G. (2022): Wert der Recyclingdünger.

Gottschall, R. (2019): Was ist der Biogut-Kompost wert? Was kostet er? Vortrag im Rahmen der Fachveranstaltung "Biogut- und Grüngutkompost im ökologischen Landbau", Neustadt.

Hatch, D. J.; Goodlass, G.; Joynes, A.; Shepherd, M. A. (2007): The effect of cutting, mulching and applications of farmyard manure on nitrogen fixation in a red clover/grass sward. In: *Bioresource Technology* 98 (17), S. 3243-3248. DOI: 10.1016/j.biortech.2006.07.017.

Helmert, M.; Heuwinkel, H.; Pommer, G.; Gutser, R.; Schmidhalter, U. (2003): N-Flüsse in gemulchtem und geschnittenem Klee gras: Warum Klee gras-Brache im Ökologischen Landbau (ÖL) die Erträge der Folgefrucht nicht erhöht. In: *Mitteilungen der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft* (102)

LfL (2023): Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter <https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html>.

LVLf (2008): Datensammlung für die Betriebsplanung und betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg. Ausgabe 2008. Schriftenreihe des Landesamtes für Verbraucherschutz, Landwirtschaft und Flurneuordnung Abteilung Landwirtschaft und Gartenbau. Hrsg.: Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz des Landes Brandenburg (MLUV)

LWK NRW (2021): Kalkulation Nährstoffpreise Öko-Düngemittel. Interne Tabellenkalkulation der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen.

Kelm, M.; Loges, R.; Taube, F. (2007): N-Bilanzen ökologischer und konventioneller Praxisbetriebe in Norddeutschland - Ergebnisse aus dem Projekt COMPASS. In: Zikeli, S. et al. (Hg.): Zwischen Tradition und Globalisierung. 9. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Berlin.

Kolbe, H. (2015): Wie ist es um die Bodenfruchtbarkeit im Ökolandbau bestellt? Nährstoffversorgung und Humusstatus? In: Bundesarbeitskreis Düngung (Hg.): Bodenfruchtbarkeit - Grundlage erfolgreicher Landwirtschaft. Frankfurt am Main, S. 89–123.

KTBL (2024): Onlineangebot des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt. [www.ktbl.de](http://www.ktbl.de)

Maaß, H.; Blumenstein, B.; Bruns, C.; Möller, D. (2017): Alternativen der Klee-grasnutzung in vieharmen und viehlosen Betrieben. In: Wolfrum, S. et al. (Hg.): Ökologischen Landbau weiterdenken: Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken. 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Freising-Weihenstephan, S. 310–313.

Möller, Kurt (2009): „Influence of Different Manuring Systems with and without Biogas Digestion on Soil Organic Matter and Nitrogen Inputs, Flows and Budgets in Organic Cropping Systems“. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 84, Nr. 2

Möller, Kurt, und Walter Stinner (2009): „Effects of Different Manuring Systems with and without Biogas Digestion on Soil Mineral Nitrogen Content and on Gaseous Nitrogen Losses (Ammonia, Nitrous Oxides)“. *European Journal of Agronomy* 30, Nr. 1

Nowak, B.; Nesme, T.; David, C.; Pellerin, S. (2015): Nutrient recycling in organic farming is related to diversity in farm types at the local level. In: *Agric Ecosys Environ* 204, S. 17–26.

Reinhold, J. (2008): Monetäre Bewertung der Humusreproduktion von Kompost und Gärrückständen. In: *Humuswirtschaft und Kompost, BGK - Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V.* (2).

Schmidt, H. (2003): Viehloser Ackerbau im ökologischen Landbau. Evaluierung des derzeitigen Erkenntnisstandes anhand von Betriebsbeispielen und Expertenbefragungen. Forschungsbericht im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Schubert, David; Heigl, Lorenz; Mießl, Johanna; Dörfel, Ulrich; Diepolder, Michael (2022): Wirkung einer Strohdüngung. In: *Bayerisches Landwirtschaftliches Wochenblatt* (33), 36-38.

Schulz, F.; Brock, C.; Knebl, L.; Leithold, G. (2017): Gemischtbetrieb mit Viehhaltung vs. viehloser Ökolandbau - 3. Rotation im Dauerfeldversuch Gladbacherhof. In: Wolfrum, S. et al. (Hg.): Ökologischen Landbau weiterdenken: Verantwortung übernehmen, Vertrauen stärken. 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Freising-Weihenstephan, S. 286–289.

Siegmeier, T., Blumenstein, B. & D. Möller (2015): Farm biogas production in organic agriculture: System implications. *Agricultural Systems*, 139, 196-209

Stinner, Walter, Kurt Möller, und Günter Leithold. „Effects of Biogas Digestion of Clover/Grass-Leys, Cover Crops and Crop Residues on Nitrogen Cycle and Crop Yield in Organic Stockless Farming Systems“. *European Journal of Agronomy* 29, Nr. 2–3 (August 2008): 125–34.

Stumm, C. & Köpke, U. (2015): Optimierung des Futterleguminosenanbaus im viehlosen Acker- und Gemüsebau. In: Häring, A.M. (Hg.): Am Mut hängt der Erfolg Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Eberswalde.

Stumm, C. & Köpke, U. (2016): Ertragswirkung und Klimarelevanz alternativer Nutzungsformen von Futterleguminosen im viehlosen Acker- und Gemüsebau. In: Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften 28, S. 72-73

Stumm, C. & Köpke, U. (2017): Düngung mit Sprossmasse von Futterleguminosen: Lachgasemissionen und Nitratverluste. In: S. Wolfrum, H. Heuwinkel, H.J. Reents, u.a. (Hrsg.) (2017): Ökologischen Landbau weiterdenken - Verantwortung übernehmen - Vertrauen stärken. Beiträge der 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Freising-Weihenstephan, 7.-10. März 2017, Dr. Köster, Berlin. 206-299

Technow, H.-J. (2018): Neue Vorschriften zu JGS-Anlagen – Was ändert sich für Bau und Betrieb? 15. KTBL-Tagung. Aktuelle rechtliche Rahmenbedingungen für die Tierhaltung. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt

VDLUFA (2014): Humusbilanzierung. Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland.

Wulf, S., Jäger, P. & Döhler, H. (2002): Balancing of greenhouse gas emissions and economic efficiency for biogas-production through anaerobic co-fermentation of slurry with organic waste. Agriculture, Ecosystems & Environment 112, 178-185