

Sicherung der Humusversorgung mit Grün- und Strohdüngung

Securing humus supply with green and straw manure

FKZ: 11NA061

Projektnehmer:

Justus-Liebig-Universität Gießen
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II
Karl-Glöckner-Straße 21 C, 35394 Gießen
Tel.: +49 641 99-37731
Fax: +49 641 99-37739
E-Mail: Organ.Landbau@agrار.uni-giessen.de
Internet: www.uni-giessen.de

Autoren:

Brock, Christopher; Dannehl, Theresa

FKZ: 11NA094

Projektnehmer:

Universität Kassel, FB 11
Fachgebiet Betriebswirtschaft
Steinstraße 19, 37213 Witzenhausen
Tel.: +49 5542 98-1329
Fax: +49 5542 98-1333
E-Mail: blw@uni-kassel.de
Internet: www.uni-kassel.de

Autoren:

Möller, Detlev; Blumenstein, Benjamin

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.

BÖLN-Projekt HumuGS - Sicherung der Humusversorgung von Ackerböden mit
Gründüngung und Stroh (HumuGS)

Projektbericht

„Sicherung der Humusversorgung von Ackerböden mit Gründüngung und Stroh“

Gemeinsamer Abschlussbericht

der Teilprojekte

HumuGS (FKZ 2011NA061) und

HumuGSEcon (FKZ 2811NA094)

Inhaltsverzeichnis

1	Einführung.....	9
1.1	<i>Gegenstand des Vorhabens.....</i>	9
1.2	<i>Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN oder zu konkreten Bekanntmachungen</i>	10
1.3	<i>Planung und Ablauf des Projektes.....</i>	11
2	Wissenschaftlicher und Technischer Stand an den angeknüpft wurde	12
3	Material und Methoden	12
4	Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse	12
4.1	<i>Modul 1 Metaanalyse</i>	12
4.1.1	<i>Hintergrund & Ziele</i>	12
4.1.2	<i>Methodische Vorgehensweise.....</i>	13
4.1.3	<i>Ergebnisse & Diskussion</i>	14
4.1.4	<i>Schlussfolgerungen</i>	16
4.2	<i>Modul 2 Humusmanagement in stroh- und gründungsbasierten Produktionssystemen.....</i>	16
4.2.1	<i>Hintergrund & Ziele</i>	16
4.2.2	<i>Methodische Vorgehensweise.....</i>	17
4.2.3	<i>Ergebnisse & Diskussion</i>	17
4.3	<i>Modul 3 Empirische Arbeiten</i>	20
4.3.1	<i>Einleitung</i>	20
4.3.2	<i>Inkubationsversuch.....</i>	20
4.3.3	<i>Feldversuch.....</i>	27
4.4	<i>Modul 4 Humusbilanzierung</i>	46
4.4.1	<i>Hintergrund und Ziele.....</i>	46
4.4.2	<i>Methodische Vorgehensweise.....</i>	46
4.4.3	<i>Ergebnisse und Diskussion</i>	52
4.4.4	<i>Schlussfolgerungen</i>	57
4.5	<i>Modul 5 Erarbeitung und Bewertung von Managementoptionen für viehlose Betriebe des ökologischen und konventionellen Landbaus.....</i>	57
4.5.1	<i>Definition der Bewirtschaftungsszenarien und Humusersatzstrategien</i>	57
4.5.2	<i>Humusbilanzierung</i>	67
4.5.3	<i>Humusökonomik.....</i>	70
4.5.4	<i>Synthetische Bewertung von Humusersatzstrategien unter Berücksichtigung von Humusbilanzen und Betriebswirtschaft</i>	87
5	Diskussion der Ergebnisse	90
6	Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse.....	91
7	Gegenüberstellung der ursprünglichen geplanten zu den tatsächlichen erreichten Zielen	91
7.1	<i>Allgemeine Projektziele</i>	91
7.2	<i>Konkrete Zielstellung der einzelnen Projektmodule</i>	91

8	Zusammenfassung.....	92
9	Danksagungen.....	94
10	Literaturverzeichnis.....	95
11	Übersicht über alle im Bereichszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse	99
12	Anhang.....	100

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Projektstruktur HumuGS	11
Abbildung 2: Effektgröße D der mittleren C- und N-Bodengehalte für die verschiedenen Düngevarianten ohne Berücksichtigung der Düngemenge.	15
Abbildung 3: Boxplot CRET der Düngevarianten je Versuchsjahr und Dünger-Input-Einheit.	16
Abbildung 4: C-Abbau in Boden-Substrat-Gemischen im Inkubationsversuch	24
Abbildung 5: Retention von Substratkohlenstoff (Cret) im Boden in Abhängigkeit zu CN Verhältnis des Boden-Substrat-Gemische.	25
Abbildung 6: Korrelation zwischen C-Nutzungseffizient der Mikrobiellen Biomasse (CUE) und der Retention von C im Boden-Substrat-Gemisch (Cret).	26
Abbildung 7: Korrelation der C-Retention Werte (Cret) basierend auf C-Atmung ($Cret_{Atmung}$) und C und N Feststoffanalyse ($Cret_{Feststoff}$)	27
Abbildung 8: Versuchsdesign	28
Abbildung 9: Vorhandener Substratrest 2013 nach 194 Tagen am Standort Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof.	35
Abbildung 10: Vorhandener Substratrest 2014 nach 112 am Standort Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof.	36
Abbildung 11: Korrelation des Substratabbau in g (2013 und 2014) zu CN Substrat	37
Abbildung 12: Korrelation von Düngesubstratnutzungseffizienz ($ACUE=Cresp/Cinput$) und dem CN Verhältnis des Substrat	38
Abbildung 13: Mikrobielle Biomasse an den drei Versuchsstandorten zu Versuchsende nach der Nachfrucht Mais.	39
Abbildung 14: Mineralischer Stickstoff im Herbst an den drei Versuchsstandorten.	40
Abbildung 15: Mineralischer Stickstoff im Herbst korreliert mit dem CN Substrat, dargestellt für die Strohvarianten	41
Abbildung 16: Maisertrag in $Mg\ ha^{-1}$ zu Versuchsende an den Standorten Groß Gerau (GG), Weilburger Grenze (WG) und Gladbacherhof (GH).	42
Abbildung 17: Maisertrag in $kg\ ha^{-1}$ an den drei Standorten korreliert mit dem $Ninput$ in $kg\ ha^{-1}$ durch Düngung	43
Abbildung 18: Mineralischer Stickstoff ($Nmin$) im Boden vor der Maisaussaat im Frühjahr 2014	44
Abbildung 19: Maisertrag in $kg\ ha^{-1}$ zu $Nmin$ im Frühjahr nach allen Düngemaßnahmen	44
Abbildung 20: Mineralischer Stickstoff im Frühjahr korreliert zu CN Substrat für die Stroh- und Senfdüngervarianten	45
Abbildung 21 Berechnung der N-Verfügbarkeit ($NAV=N\ available$) aus der Mineralisierung organischer Dünger in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate auf Grundlage der Angaben bei Gutser & Ebertseder (2005).	50
Abbildung 22 (a,b): Retentionsrate von Substrat-C (CRET) aus organischen Substraten und Substratgemischen in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate und dem CN-Verhältnis im bewerteten Boden.	52
Abbildung 23: Retentionsrate von Substrat-C (CRET) aus organischen Substraten und Substratgemischen in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate bei einem Standard-CN-Verhältnis im Boden von 10:1.	53
Abbildung 24: Humusreproduktionskoeffizienten für Stroh und Gründüngung nach VDLUFA (2014) und HU-MOD in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate bzw. Substratgemische.	54

Abbildung 25(a,b): Übereinstimmung der Ausdifferenzierung von Humusbilanzsalden und a)Boden-C-Gehalten bzw. b)Boden-N-Gehalten zwischen ausgewählten Varianten von fünf Langzeit-Feldversuchen in Deutschland.....	55
Abbildung 26(a-f): Übereinstimmung der Ausdifferenzierung von Humusbilanzsalden und a,b)Boden-C-Gehalten, c,d)dem mittleren Ertragsniveau, e,f)den N-Bilanzsalden zwischen ausgewählten Varianten von fünf Langzeit-Feldversuchen in Deutschland.	56
Abbildung 27: Auswahlkriterium „Vieharmer Landbau“	59
Abbildung 28: Auswahlkriterium „Erhöhte Konzentration von Betrieben des Ökologischen Landbaus“	59
Abbildung 29: Auswahlkriterium „Boden-Klima-Räume“	60
Abbildung 30: Geographische Lage der HumuGS-Beispielregionen.....	60
Abbildung 31: Humusbilanzen für Szenarien zur ökologischen Bewirtschaftung OHNE Futter-Mist-Kooperation.	68
Abbildung 32: Humusbilanzen für Szenarien zur ökologischen Bewirtschaftung MIT Futter-Mist-Kooperation.	69
Abbildung 33: Humusbilanzen für Szenarien zur konventionellen Bewirtschaftung OHNE Futter-Mist-Kooperation.	70
Abbildung 34: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nord-Ost“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation	75
Abbildung 35: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation	76
Abbildung 36: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Süd-West“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation	77
Abbildung 37: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nord-Ost“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation	79
Abbildung 38: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation	80
Abbildung 39: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Süd-West“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation.....	81
Abbildung 40: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nordost“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation	83
Abbildung 41: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation.....	84
Abbildung 42: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Südwest“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation.....	85
Abbildung 43: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu ökologischen Betrieben ohne Futter-Mist-Kooperation (ÖKO-FMK)	88

Abbildung 44: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu ökologischen Betrieben mit Futter-Mist-Kooperation (ÖKO+FMK).....	89
Abbildung 45: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu konventionellen Marktfruchtbetrieben ohne Futter-Mist-Kooperation (KON-FMK).....	90

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausgangs C- und N-Gehalte, sowie CN-Gehalt von Boden und Düngesubstraten.....	21
Tabelle 2: C- und N-Gehalte, sowie CN- Verhältnis der Substrat-Boden-Gemische.....	21
Tabelle 3: Variantenbeschreibung zum HumuGS-Feldversuch.....	29
Tabelle 4: C- und N-Düngeinputmengen, sowie C- und N-Mengen und CN-Verhältnis im Boden-Substrat-Gemisch.....	33
<i>Tabelle 4 (Forts.): C- und N-Düngeinputmengen, sowie C- und N-Mengen und CN-Verhältnis im Boden-Substrat-Gemisch</i>	<i>34</i>
Tabelle 5: Beschreibung der einbezogenen Langzeit-Feldversuche und Versuchsvarianten im HumuGS-Projekt.....	51
Tabelle 6: Vorschlag für eine Neubewertung von Stroh und Gründüngung in der VDLUFA-Humusbilanzmethode in Abhängigkeit von der N-Verfügbarkeit als Rahmenbedingung.....	54
Tabelle 7: Charakterisierung der HumuGS-Beispielregionen	61
Tabelle 8: HumuGS-Beispielfruchtfolgen im Ökologischen Landbau für drei Beispielregionen, ohne und mit Futter-Mist-Kooperation sowie Standarderträgen.....	61
Tabelle 9: HumuGS-Beispielfruchtfolgen im konventionellen Landbau für drei Beispielregionen, ohne Futter-Mist-Kooperation sowie Standarderträgen.....	62
Tabelle 10: Übersicht über die Humusersatzstrategien im HumuGS-Projekt	63
Tabelle 11: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die ökologischen Beispielfruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation	64
Tabelle 12: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die ökologischen Beispielfruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation.....	65
Tabelle 13: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die konventionellen Beispielfruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation.....	65
Tabelle 14: Zu berücksichtigende Kosten und Leistungen der Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreien Leistung (DAKL) eines Produktionsverfahren nach KTBL-Standard ..	72
Tabelle 15: Humusersatzstrategien der ökologischen Beispielfruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation	74
Tabelle 16: Humusersatzstrategien der ökologischen Beispielfruchtfolgen, mit Futter-Mist-Kooperation	78
Tabelle 17: Humusersatzstrategien der konventionellen Beispielfruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation	82
Tabelle 18: Ergebnisse der Kohlenstoff und Stickstoffgehalte im Boden zu den Terminen 2,3 und 4 relativ gemittelt zum Startgehalt (Termin1).....	100
Tabelle 19: Ergebnisse der Nmin Analyse zu den vier Probenahmeterminen Start, Herbst, Frühjahr und Versuchsende.....	101
Tabelle 20: Bodenatmung als Cresp, sowie die Düngemengen während des Versuchszeitraums als C input und die Düngesubstratnutzungseffizient (ACUE).....	103

1 Einführung

1.1 Gegenstand des Vorhabens

Stroh und Gründüngung stellen im viehlosen Ackerbau die wesentlichen bzw. häufig einzig verfügbaren Substrate für die Versorgung der Böden mit organischer Substanz dar. In der Humusbilanzierung nach VDLUFA (Ebertseder et al. 2014) wird aufgrund der höheren Abbaustabilität des Materials angenommen, dass Stroh je Einheit Trockenmasse eine bis zu 1,5-fach höhere Leistung in der Reproduktion der organischen Bodensubstanz aufweist als grüne Pflanzenbiomasse. In Langzeit-Feldversuchen zeigt sich die Leistung beider Substrattypen jedoch sehr variabel, so dass Bedarf an einer Überprüfung und Präzisierung der Bewertung in der Humusbilanz besteht.

Die höhere Abbaustabilität von Stroh wird vor allem mit dem vergleichsweise hohen Anteil schwer umsetzbarer Bestandteile, insbesondere Lignin, begründet (Nawrath 1998). Allerdings bemerken von Lützow et al. (2008a), dass die chemische Rekalzitranz von Substraten nur in frühen Umsatzstadien relevant ist. Auch wenn manche Autoren dem Lignin eine besondere Bedeutung für die Bildung von Huminstoffen als stabilen Bestandteilen der organischen Bodensubstanz zusprechen, so ist diese Annahme nicht unumstritten. Die organische Bodensubstanz wird heute vielmehr vermehrt als Kontinuum von Bestandteilen in verschiedenen Umsatzstadien betrachtet (Lehmann und Kleber 2015). Für die Stabilisierung von C ist nach dieser Auffassung die Zugänglichkeit organischer Substanzen für Boden-Mikroorganismen von größerer Bedeutung, als chemische Eigenschaften (Gleixner et al, 1999 u. 2002). Die mikrobielle Biomasse und deren Aktivität spielt demgegenüber eine wesentliche Rolle für die Retention von Substratkohlenstoff im Boden (Six et al. 2004, Wieder et al. 2013). Die Fähigkeit der Mikroorganismen zur Retention von C durch den Einbau in die eigene Biomasse oder den Verbleib in Stoffwechselprodukten ist dabei u.a. abhängig von der Verfügbarkeit von Stickstoff (Craine et al. 2007). Die Bewertung der Leistung von Substraten in der Reproduktion der organischen Bodensubstanz ist daher nicht unabhängig von der N-Verfügbarkeit zu bewerten. Tatsächlich zeigen verschiedene Untersuchungen, dass das CN-Verhältnis von Ackerböden an einem Standort eine über die Zeit nur wenig veränderliche Bodeneigenschaft darstellt (Kirkby et al. 2011). Vor diesem Hintergrund ist zu prüfen, inwiefern die Leistung organischer Substrate in der Reproduktion der organischen Bodensubstanz an einem Standort mit Bezug auf das CN-Verhältnis im Substrat und im Boden bewertet werden kann. Dieses Vorgehen würde eine einfache Option zur mechanistischen Bewertung von Substraten in der Humusbilanzierung darstellen. Mit Blick auf die Humusreproduktionsleistung von Stroh würde dies bedeuten, dass die Bewertung in Abhängigkeit von der Stroh-Art und dem Vorhandensein anderer N-Quellen erfolgen muss. Die Leistung von Gründüngung in der Reproduktion der organischen Bodensubstanz wäre demgegenüber gerade aufgrund des engeren CN-Verhältnisses evtl. besser zu bewerten, als bisher angenommen. Allerdings muss die raschere Mineralisierung von grüner Biomasse und die damit verbundene Entstehung mobiler N-Pools berücksichtigt werden.

Mit Blick auf die Humusbilanzierung ist allerdings zu beachten, dass die im deutschen Sprachraum etablierten Humusbilanzmethoden zwei unterschiedlichen Konzepten und Zielstellungen folgen (vgl. Brock et al. 2013): Während das von Franko et al. (2011) entwickelte und seit neuestem in Österreich für die Umweltbewertung vorgeschlagene Modell CandyCarbonBalance CCB sowie das in der schweizerischen Nachhaltigkeitsbewertung SALCA (Gaillard et al. 2009) verwendet Modell nach Oberholzer et al. (2012) auf Grundlage von Neyroud (1997) tatsächlich Bezug auf die Vorräte an organischer Bodensubstanz an einem Standort und deren Beeinflussung durch die Bewirtschaftung nehmen, bewertet die in Deutschland standardmäßig verwendete Methode nach VDLUFA (Ebertseder

et al. 2014) die Leistung der organischen Düngung mit Blick auf Produktivität und potentielle Umweltwirkungen. Das Ziel der VDLUFA-Methode ist die Ermittlung der optimalen organischen Düngung in Fruchtfolgen. Als optimal wird dabei diejenige Düngung verstanden, die zu einem möglichst hohen Ertragsniveau unter Vermeidung von Umweltbelastungen (insbes. N-Emissionen) führt. Der Einfluss der Düngung auf Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz wird dabei nicht direkt bewertet, da diese wesentlich von Standorteinflüssen einschließlich der Ausgangsmengen an organischer Bodensubstanz und der Vorgeschichte der organischen Düngung beeinflusst werden. Der Einfluss dieser Faktoren wird in der Methode jedoch nicht berücksichtigt.

Bei der Überprüfung und ggf. Neubewertung organischer Dünger mit dem Ziel, auch für die Humusbilanzierung nach VDLUFA Aussagen zu erarbeiten, muss daher auch die Leistung der Substrate in der Pflanzenproduktion berücksichtigt werden.

Aufbauend auf der (Neu-)Bewertung und ggf. Neubewertung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung ist zu analysieren, wie viehlose landwirtschaftliche Betriebe die Versorgung ihrer Ackerböden mit organischer Substanz sicherstellen können und welche wirtschaftlich tragfähigen Optionen hierfür bestehen. Strategien der Humusreproduktion wie etwa der Anbau von Zwischenfrüchten oder Leguminosen in Hauptfruchtstellung verursachen in der Regel zunächst zusätzliche Arbeitserledigungs- und Betriebsmittelkosten. Daher ist ein betriebswirtschaftlicher Mehrwert solcher Maßnahmen zunächst wenig ersichtlich. Erst eine darüber hinaus gehende Berücksichtigung des Stickstoffkreislaufs und der möglichen Ertragswirkungen sowie eine marktbezogene monetäre Bewertung von Fruchtfolgeänderungen kann ein vollständiges Bild der betriebswirtschaftlichen Auswirkungen integrierter Humusersatzstrategien ergeben. Abschließend können dann in einer interdisziplinären Bewertung Humusbilanz und Ökonomie gegenübergestellt und mögliche Trade-offs oder Synergien identifiziert werden.

1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts, Bezug des Vorhabens zu den einschlägigen Zielen des BÖLN oder zu konkreten Bekanntmachungen

Die hier angeführten Fragen zur Bewertung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung sowie zur ökonomisch tragfähigen Sicherung der Versorgung von Ackerböden mit organischer Substanz wurden im BÖLN-Projekt 2011NA061 HumuGS („Sicherung der Humusversorgung von Ackerböden mit Gründüngung und Stroh“) mit einem interdisziplinären Ansatz bearbeitet. Konkret wurden die folgenden Ziele verfolgt:

- die Analyse des Umsatzes von Stroh und Gründüngung in Ackerböden und die Leistung im Aufbau organischer Bodensubstanz im Rahmen einer Metaanalyse vorliegender Ergebnisse;
- die Erfassung der Versorgung von Böden mit organischer Substanz in viehlosen und vieharmen Betrieben in der Praxis in Deutschland;
- die empirische Analyse des Umsatzes von Stroh- und Gründüngungssubstraten in Abhängigkeit von C- und N-Flüssen im System Boden-Pflanze;
- die Bewertung der Leistung von Stroh und Gründüngung in Humusbilanzen mit einem mechanistischen Modellansatz;
- die Identifikation von Optionen zur Sicherung der Versorgung von Böden mit organischer Substanz in viehlosen Betrieben unter Berücksichtigung betriebswirtschaftlicher Aspekte.

1.3 Planung und Ablauf des Projektes

Im Projekt HumuGS wurde ein modularer Ansatz verfolgt, wobei die einzelnen Module miteinander verknüpft waren bzw. aufeinander aufbauten (Abbildung 1).

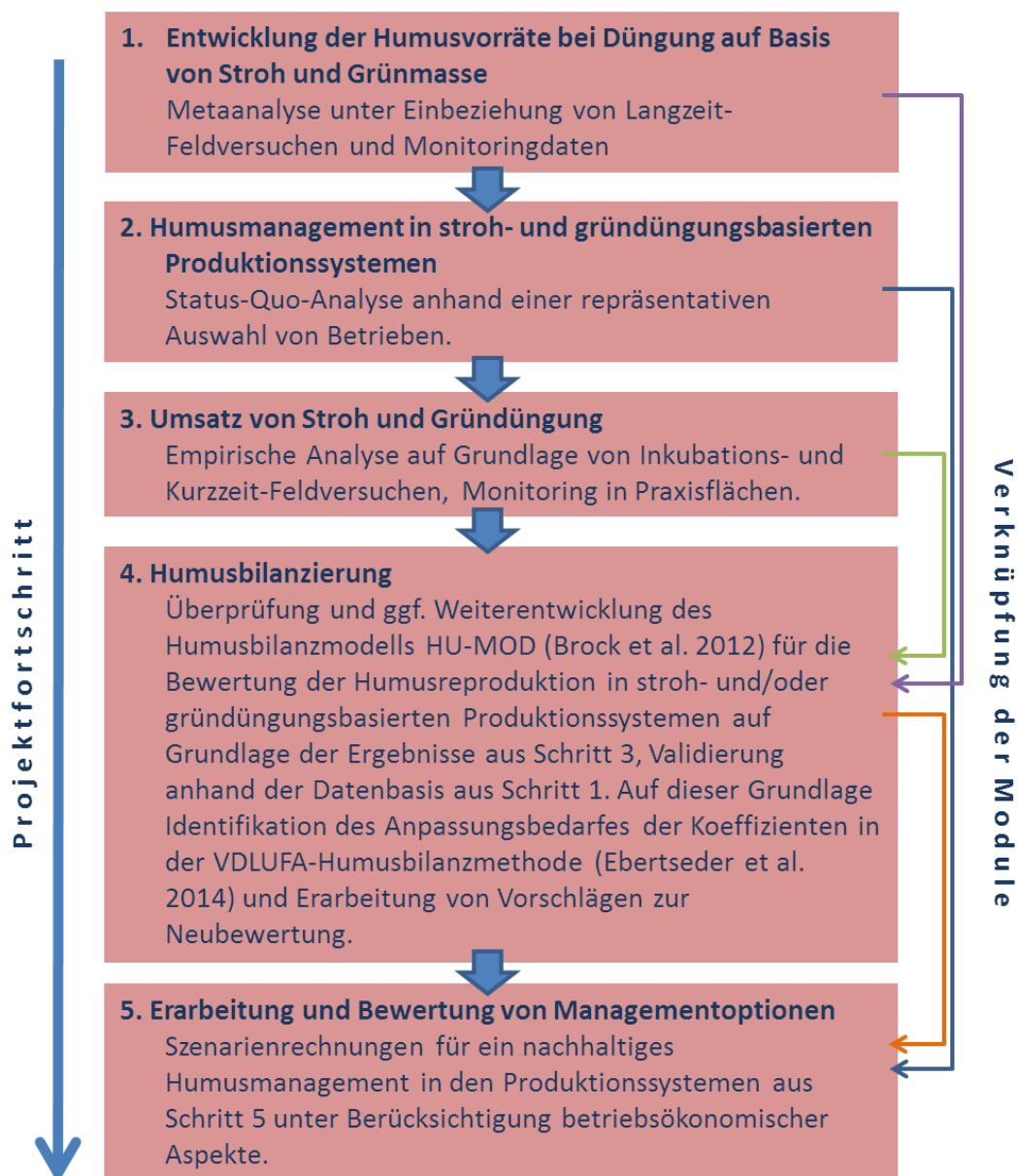


Abbildung 1: Projektstruktur HumuGS

In Modul 1 wurde eine Metaanalyse publizierter Ergebnisse zum Aufbau organischer Bodensubstanz durch Stroh und Gründüngung vorgenommen. Einbezogen wurden Ergebnisse aus Langzeit-Feldversuchen, die in wissenschaftlichen Fachzeitschriften veröffentlicht sind.

Modul 2 diente der Erfassung von Strategien zur Versorgung der Böden mit organischer Substanz in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland. Die Statusanalyse bildet eine Grundlage der Definition von Bewirtschaftungsszenarien in Modul 5.

Gegenstand von Modul 3 waren empirische Untersuchungen zum Umsatz von Stroh und Gründüngung in Abhängigkeit von Standorteinflüssen und der Verfügbarkeit von Stickstoff in den Substraten und

Substratgemischen für die Bodenmikroorganismen. Auf diesem Wege sollte weiter geprüft werden, ob eine Bewertung der Leistung von organischen Substraten im Aufbau organischer Bodensubstanz auf Grundlage des Verhältnisses der eingebrachten C- und N-Mengen möglich ist. Ein entsprechender Ansatz wird im Modell HU-MOD verwendet, das für die Berechnung der Bilanz der organischen Substanz im Boden verwendet wurde (Modul 4). Für die Analysen wurden Feld- und Inkubationsversuche durchgeführt.

Im Modul 4 wurden Vorschläge für die Bewertung von Stroh und Gründüngung in Humusbilanzen erarbeitet. Hierfür wurde eine weiterentwickelte Version des Modells HU-MOD nach Brock et al. (2012) verwendet. Das Modell erlaubt eine reproduzierbare dynamische Bewertung des Einflusses von Pflanzenproduktionssystemen auf Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz und, über die Verknüpfung mit der N-Bilanz im System Boden-Pflanze, die Ausweisung von Koeffizientenvorschlägen für die Humusbilanzierung nach VDLUFA (Ebertseder et al. 2014).

Mit dem Modul 5 wurde ein Transfer der Ergebnisse aus den Modulen 1 bis 4 in die landwirtschaftliche Praxis angestrebt. Es wurden Bewirtschaftungsszenarien zu viehlosen Betrieben des ökologischen und konventionellen Landbaus in unterschiedlichen Boden-Klima-Regionen in Deutschland erarbeitet und für diese Szenarien unterschiedliche Humusersatzstrategien überprüft. Die Bewertung der Humusersatzstrategien erfolgte mit einem interdisziplinären Ansatz, in dem sowohl die Humusbilanz als auch betriebswirtschaftliche Effekte der Strategien berücksichtigt wurden.

2 Wissenschaftlicher und Technischer Stand an den angeknüpft wurde

Beschreibung jeweils im Zusammenhang mit den einzelnen Projektmodulen (Kap. 4).

3 Material und Methoden

Beschreibung jeweils im Zusammenhang mit den einzelnen Projektmodulen (Kap. 4).

4 Ausführliche Darstellung der wichtigsten Ergebnisse

4.1 Modul 1 Metaanalyse

4.1.1 Hintergrund & Ziele

Stroh und Gründüngung stellen im viehlosen und viehschwachen Ackerbau die wichtigsten Substrate für die Versorgung der Böden mit organischer Substanz dar. Die Leistung der beiden Substrattypen in diesem Zusammenhang wird jedoch unterschiedlich bewertet. Bekannt ist, dass das CN-Verhältnis eines Substrates negativ mit dem Umsatz korreliert ist. Grüne Biomasse wird daher wesentlich schneller umgesetzt als Stroh (Springer & Lehner 1951). Weiterhin weist Stroh höhere Anteile an schwer umsetzbaren Verbindungen – vor allem Lignin- auf als Grüne Biomasse (Nawrath, 1998). Dennoch sind die Ergebnisse zum Aufbau organischer Bodensubstanz durch Strohdüngung sehr unterschiedlich. Trotz des relativ großen C-Inputs fanden Zimmer et al. (2005) keine positive Wirkung der Strohdüngung im Vergleich zur ungedüngten Kontrolle in einem Langzeit-Feldversuch. Auch andere Autoren konnten keinen signifikanten Effekt der Strohdüngung auf die Vorräte der organischen Bodensubstanz nachweisen (Thomsen 2004, Soon 2012). Jedoch zeigte sich in der bereits erwähnten Studie von Zimmer et al. (2005), dass die Strohdüngung in Versuchsvarianten mit einem höheren N-Düngungsniveau (Stroh+ Gülledüngung) die Humusvorräte in annähernd mit der Stallmistvariante vergleichbarem Umfang anheben konnte. Diese Beobachtungen deuten

möglicherweise darauf hin, dass der Stickstoff für die Leistung der Strohdüngung in der Versorgung der Böden mit organischer Substanz limitierend ist.

Vor diesem Hintergrund kann Gründüngung aufgrund des wesentlich engeren CN-Verhältnisses bei gleicher Substratmenge möglicherweise bessere Leistungen bei der Versorgung der Böden mit organischer Substanz erbringen als Stroh. Dies würde voraussetzen, dass der Umsatz von Gründüngung nur temporär intensiver verläuft als bei Stroh, dass im Endeffekt jedoch gerade aufgrund des engeren CN-Verhältnisses mehr Kohlenstoff aus dem Substrat in die organische Bodensubstanz eingebaut werden kann.

Die Frage nach der Leistung von Stroh und Gründüngung im Management der organischen Bodensubstanz sowie nach Steuerungsvariablen im Umsatz der Substrate ist für die Landwirtschaft in produktionsökologischer Hinsicht höchst relevant. Vor diesem Hintergrund wurde mit einer Metaanalyse die bisher publizierten Ergebnisse zum Umsatz von Stroh und Gründüngung hinsichtlich ihrer Aussage zu den folgenden Hypothesen ausgewertet:

- Der Beitrag organischer Substrate zum Aufbau organischer Bodensubstanz ist vom CN-Verhältnis im Substrat bzw. im Substrat-Boden-Gemisch abhängig.
- Das CN-Verhältnis in Ackerböden variiert innerhalb einer vergleichsweise engen und jeweils standorttypischen Spannweite.
- Das CN-Verhältnis von Stroh und Gründüngung ist erheblich weiter als das von Ackerböden. Der Beitrag zum Aufbau organischer Bodensubstanz ist daher N-limitiert.
- Wenn mit Stroh und Gründüngung an einem Standort jeweils die gleiche Menge an C eingebracht wird, ist aufgrund des engeren CN-Verhältnisses der Gründüngung mittelfristig mit einer gegenüber Stroh vorteilhaften Reproduktion der organischen Bodensubstanz zu rechnen.

4.1.2 Methodische Vorgehensweise

Die Meta-Analyse wurde auf Grundlage wissenschaftlicher Fachpublikationen durchgeführt. Hierfür wurde eine Online-Recherche mit verschiedenen Suchmaschinen (google Scholar, org.print und webofknowledge) durchgeführt. Folgende Schlagwörter wurden (in Deutsch und Englisch) in verschiedenen Kombinationen für die Suche verwendet: Humusgehalt, Düngungsversuch, Strohdüngung, Gründüngung, Feldversuch, Boden- Kohlenstoffgehalt. Ausgewählt wurden wissenschaftlich begutachtete Studien aus Wissenschaftszeitschriften, Konferenzbeiträge, Dissertationen und Buchkapiteln. Zeitpunkt der Recherche war Oktober 2013 bis August 2014.

Kriterien für die Aufnahme von Studien in die Metaanalyse waren a) die faktorielle Berücksichtigung von Stroh- und/oder Gründüngung im Feldversuch, b) quantitative Angaben zum C- und N- Gehalt im Oberboden zu Versuchsende bzw. am Ende der Auswertungsperiode, c) eine Kontrollvariante. Darüber hinaus wurden weitere Kriterien (Stallmistvariante als zusätzliches Referenzsystem, Versuchsdauer, Referenz-Bodentiefe, Trockenrohddichte bzw. Angaben zu Bodenmengen, Düngemengen, C-Ausgangsgehalte, N-bezogene Daten analog zu den C-bezogenen) für die Bildung detaillierter Datensätze mit möglichst hoher Informationsqualität erfasst.

Aus dem Datenmaterial wurden Teildatensätze mit gehaltsbezogenen oder massebezogenen Daten gebildet. Grundsätzlich erfolgte die Auswertung aller Teildatensätze über die unstandardisierte mittlere Differenz D zwischen Düngungsvariante und ungedüngter Kontrollvariante (vgl. Borenstein et al. 2009). Dabei gilt:

$$D = \frac{X}{\text{Düngevariante}} - \frac{X}{\text{Kontrolle}}$$

Die statistische Auswertung der Effektgröße D erfolgte über die Bildung der Konfidenzintervalle gemäß:

$$LLD = D - 1,96 \times SED \text{ bzw. } ULD = D + 1,96 \times SED$$

Demnach ist D signifikant, wenn das Konfidenzintervall den Wert D=0 (kein Unterschied) ausschließt (ausführliche Darstellung bei Borenstein et al. 2009).

Wegen der geringen Zahl an Studien, die Änderungen von C- und oder N-Gehalten oder –Mengen über die Versuchszeit mitteilten oder eine entsprechende Berechnung zuließen, wurde auf die Bildung entsprechender Teildatensätze verzichtet. Stattdessen wurden in diesen Fällen die Angaben zu Mengen- bzw. Gehaltsänderungen zur besseren Einschätzung der Differenz zwischen Versuchsvariante und Kontrolle verwendet:

$$[C, N]_{corr} = [C, N]_{end} - [C, N]_{start} + [C, N]_{control}$$

Die korrigierten C- bzw. N-Werte ([C,N]corr) wurden in die Teildatensätze zu gehalts- bzw. massebezogenen Daten eingegliedert.

4.1.3 Ergebnisse & Diskussion

Von zunächst >70 Studien erfüllen lediglich 27 die o.g. Kriterien für die Metaanalyse. Die einbezogenen Studien enthalten Daten zu insgesamt 113 Treatments. Fünfzehn Studien (32 Treatments) können in die Analyse der Wirkung von Strohdüngung auf die Boden-C-Vorräte einbezogen werden und siebzehn Studien (37 Treatments) in die Bewertung der Wirkung von Gründüngung. Lediglich 10 Studien (22 Treatments) enthalten Daten, die sowohl Stroh- als auch Gründüngung innerhalb einer Variante beinhalten.

Die 27 Studien stammen aus insgesamt 10 Ländern, wovon 6 Studien in Kanada und den USA liegen und die restlichen 21 Studien in Europa und der Schweiz durchgeführt wurden. Die Referenzbodentiefe variierte zwischen 10 und 30 cm, mit einem Mittel von 22 cm. Die Versuchsdauer der Versuche liegt zwischen 3 und 42 Jahren mit einem Mittelwert von 12 Jahren.

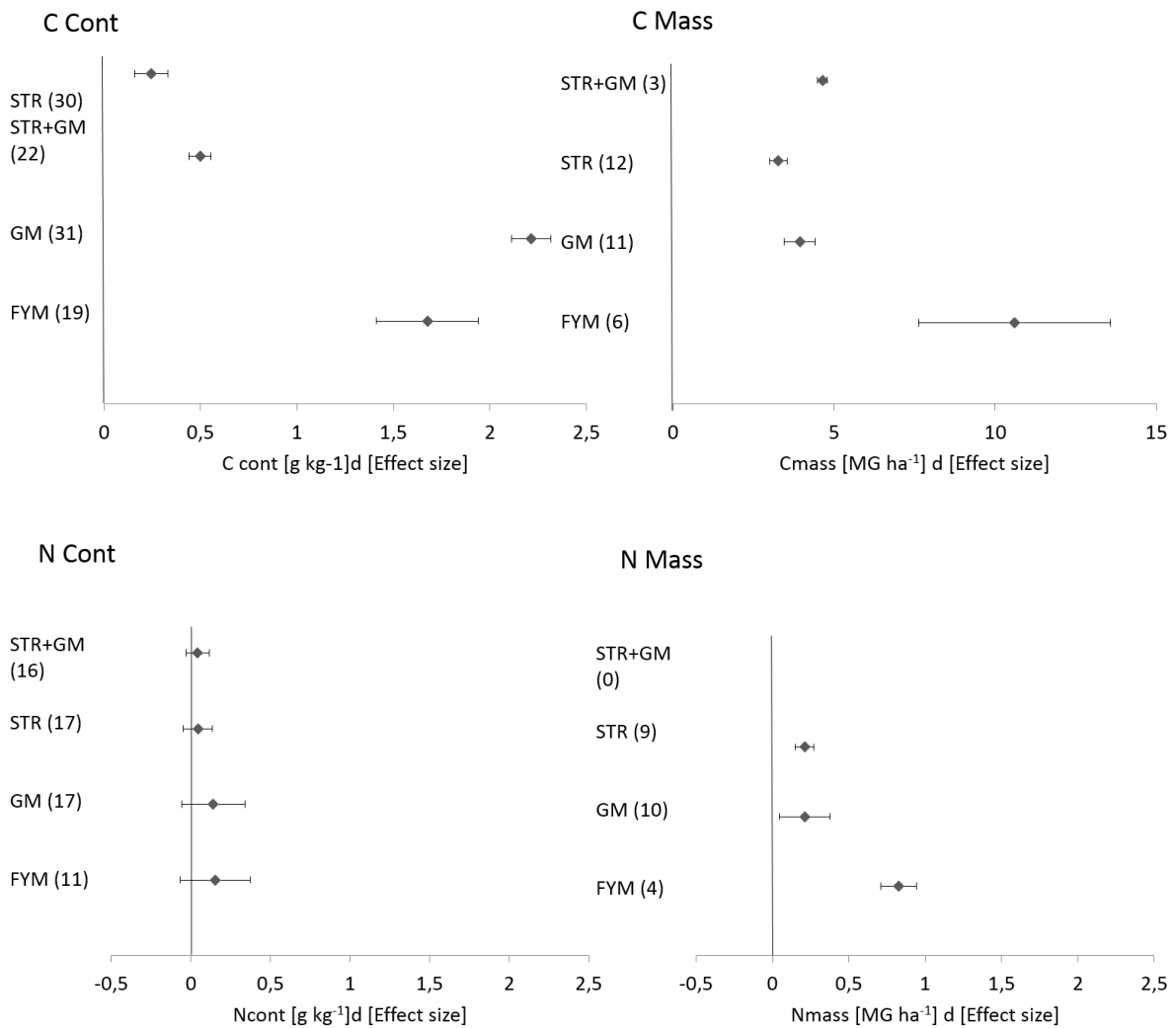


Abbildung 2: Effektgröße D der mittleren C- und N-Bodengehalte für die verschiedenen Düngevarianten ohne Berücksichtigung der Düngemenge. Anzahl einfließender Studien in Klammer nach Düngevariante STR: Stroh, GM: Gründüngung, FYM: Stallmist.

Abbildung 2 zeigt den Effekt von Stroh, Gründüngung, Stroh+ Gründüngung und Stallmist auf die C- und N-Bodengehalte und –mengen in den einbezogenen Langzeitversuchen, hier zunächst ohne Berücksichtigung der Düngemenge. Die Ergebnisse zu den C-Gehalten (Ccont) zeigen eine signifikante Zunahme an Kohlenstoff im Boden bei Stallmist und Gründüngung. Eine deutlich geringere C-Zunahme im Boden ist bei Stroh und Stroh+ Gründüngung zusehen. Demgegenüber weisen Stroh und Gründüngung bei den C-massebezogenen Daten eine Effektgröße auf ähnlichem Niveau auf. Bei den N-Gehalten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede zwischen der Kontrolle und den verschiedenen Düngevarianten. Die massebezogene Auswertung ergibt ein mit der C-massebezogenen Auswertung vergleichbares Ergebnis.

Da die Düngemengen in den verschiedenen Düngevarianten stark variieren, ist in Abbildung 3 die Retention der vier Düngevarianten in Form von Relativwerten dargestellt. Die Retention zeigt die C- und N-Zunahme in den Boden pro Düngeinputmenge.

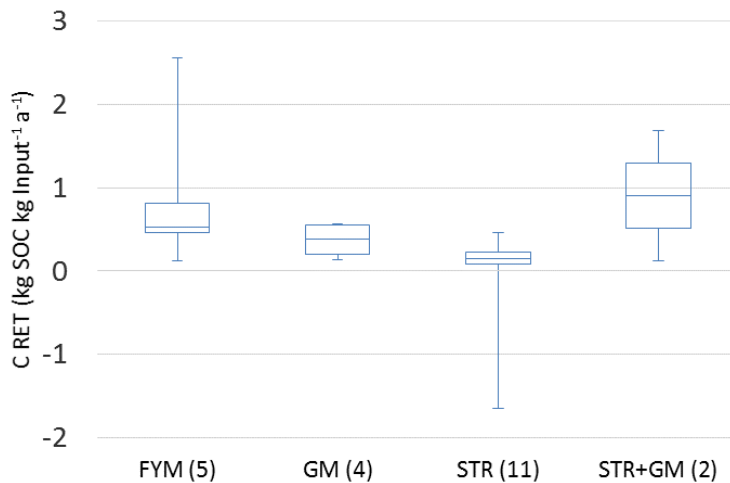


Abbildung 3: Boxplot CRET der Düngevarianten je Versuchsjahr und Dünger-Input-Einheit. Klammern in der Achsenbeschriftung: Anzahl der Studien

Wie in Abbildung 3 dargestellt, findet bei Stallmist mengenbezogen erwartungsgemäß eine höhere C-Anreicherung im Boden statt als bei Gründüngung und Stroh. Ähnlich hohe C-Inputmengen wie bei Stallmist sind bei der Gründüngung zu sehen. Im Vergleich zu Stallmist und Gründüngung sind bei Stroh geringere C-Inputmengen zu verzeichnen. Die Variante Stroh+ Gründüngung weist deutlich höhere C-Einträge auf, als Stallmist, Gründüngung und Stroh. Aufgrund der sehr geringen Studienzahl von nur zwei Studien, ist dieses Ergebnis jedoch kritisch zu betrachten.

4.1.4 Schlussfolgerungen

Im Gegensatz zur relativ gut abgesicherten positiven Wirkung der Anwendung von Stallmist oder Kompost auf die Vorräte der Böden an organischer Substanz muss die Situation bei Stroh- und Gründüngung offensichtlich weitaus differenzierter betrachtet werden. Leider erlaubt der Datensatz, der zugrundeliegenden intensiven Literaturrecherche zum Trotz, keine differenzierte Analyse für unterschiedliche Strohart (N-reich, N-arm) oder verschiedene Gründüngungsarten. Hier besteht weiterhin Forschungsbedarf.

Grundsätzlich ist angesichts der Ergebnisse festzuhalten, dass N-reichere organische Substrate, wie Stallmist und Gründüngung offensichtlich eine bessere Leistung im Humusaufbau zeigen, als Substrate mit einem weiten CN-Verhältnis. Zu vermuten ist, dass der Einbau von Stroh-C in den Boden durch die N-Verfügbarkeit limitiert wird. Die Ergebnisse deuten auf die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der N-Verfügbarkeit bei der Bewertung des Umsatzes und der Humusreproduktionsleistung von Stroh und Gründüngung hin.

4.2 Modul 2 Humusmanagement in stroh- und gründüngungsbasierten Produktionssystemen

4.2.1 Hintergrund & Ziele

Viehloser und viehschwacher Landbau sind Begriffe, die eine große Vielfalt von Ackerbausystemen und konkreten Ansätzen zur Versorgung der Böden mit organischer Substanz einschließen. Ziel des Moduls war die Erarbeitung eines Überblicks über die tatsächlichen Systeme und die Versorgung der Böden mit organischer Substanz in der Praxis dieser Bewirtschaftungsformen. Die Ergebnisse dienen als eine Grundlage für die Ausweisung von Bewirtschaftungsszenarien in Modul 5 (Kap. 4.5).

4.2.2 Methodische Vorgehensweise

Die Statusanalyse wurde als onlinegestützte BeraterInnen-Umfrage durchgeführt. Hierbei wurden deutschlandweit Experten aus Beratung, Erzeugerringen oder Landwirtschaftskammern und –ämtern kontaktiert und gebeten, sich in einem Fragebogen mit teils geschlossenen, teils offenen Antwortmöglichkeiten zu unterschiedlichen Aspekten der Grün- und Strohdüngung sowohl aus ökologischer als auch konventioneller Sichtweise zu äußern. Es wurden hierbei regionalspezifische Einschätzungen abgefragt, insbesondere mit Bezug auf die unterschiedlichen Betriebstypen „Marktfruchtbetrieb“ und „Gemischtbetrieb“. Die abgefragten Themenbereiche umfassen u.a. Fragen zu:

- Produktionsstrukturen der jeweiligen Region (Marktfrucht- oder Futterbaubetriebe)
- Charakterisierung typischer Fruchtfolgen in der jeweiligen Produktionsrichtung für Marktfrucht- bzw. Gemischtbetriebe (Getreide basierte Fruchtfolgen, Hackfruchtanteil, Integration von Klee gras, ...)
- Umfang des Strohverbleibs auf der Fläche
- Mineralische N-Düngung zum Stroh
- Anwendung organischer Düngemittel mit unterschiedlichem CN-Verhältnis zum verbleibenden Stroh
- Anbau von Gründüngungsfrüchten in Haupt- und Zwischenfruchtstellung
- Einschätzung der Leistungen und Maßnahmen der Grün- und Strohdüngung für die Versorgung der Ackerböden

4.2.3 Ergebnisse & Diskussion

Die Auswertung der Umfrageergebnisse hat gezeigt, dass die Aussagen größtenteils regionalbezogen gesehen werden müssen und eine Generalisierung einzelner Fragestellungen kaum möglich erscheint. Auch ließen teils widersprüchliche Antworten unterschiedlicher Akteure keine konsistente Zusammenstellung oder Klassifikation einzelner Elemente der Befragung zu. Im Folgenden sollen dennoch einzelne Bereiche der Umfrage, die auch später teilweise zur Definition der einzelnen Szenarien mit hinzugezogen werden konnten und welche regionalübergreifende Tendenzen feststellen lassen, in Kürze vorgestellt werden.

a) Strohverbleib auf der Fläche

Aus der Umfrage lassen sich keine regionalübergreifenden Tendenzen zum Verbleib auf oder der Abfuhr des Strohs von der Fläche ableiten. Auch Unterschiede in der Handhabung bei Marktfruchtbetrieben vs. Gemischtbetrieben sowie konventionellen vs. ökologisch wirtschaftenden Betrieben sind nicht generell festzustellen. Nach Leible et al. (2003) beträgt die jährliche auf dem Feld verbleibende Strohmenge rund 32 Mio. Tonnen und damit rund 75 % des gesamten Strohaufkommens in der Landwirtschaft. Danach stünde also ein Großteil des anfallenden Strohs für den Humusaufbau zur Verfügung. Dies wird bei der Definition der Szenarien im HumuGS-Projekt entsprechend berücksichtigt.

Obwohl dies aus den vorhandenen Umfrageergebnissen nicht direkt ersichtlich wird, könnte der Umfang des Strohverbleibs auf der Fläche oder alternativ dessen Nutzung in der Viehhaltung mit der Ausrichtung des Betriebsschwerpunkts entscheidend zusammenhängen. Demnach wird das Stroh gerade in Marktfruchtbetrieben ohne Viehhaltung nicht anderweitig genutzt und verbleibt auf dem

Feld. Nach Maaß (2016) sind die Anteile viehloser Betriebe im gesamten Bundesgebiet in den letzten Jahren kontinuierlich gestiegen auf heute etwa 30 % in der konventionellen und ca. 23 % in der ökologischen Landwirtschaft.

b) Mineralische N-Düngung zur Stroh- und Gründüngung

Nach den Umfrageergebnissen der Statusanalyse ist die Gabe mineralischen Stickstoffs zum auf dem Feld verbleibenden Stroh in den konventionell wirtschaftenden Betrieben zumeist unüblich und wird daher in den HumuGS-Szenarien entsprechend nicht berücksichtigt. Für die ökologisch wirtschaftenden Betriebe spielt der Einsatz von mineralischen N-Düngemitteln bekanntermaßen keine Rolle.

c) Gabe von organischen Düngern mit engem bzw. weitem CN-Verhältnis zur Strohdüngung bzw. Stoppelbearbeitung

Während im konventionellen Bereich also kaum eine mineralische N-Düngung zur Strohdüngung bzw. der Stoppelbearbeitung vorgenommen wird, kommen im Gegensatz dazu insbesondere nach Getreide und Raps häufig Gaben von organischen Düngern mit engem CN-Verhältnis (z.B. Gülle) zum Einsatz. Auch organische Düngemittelgaben mit weitem CN-Verhältnis sind vereinzelt in der Praxis anzutreffen.

Für Ökobetriebe spielt der Einsatz von organischen Düngern mit engem CN-Verhältnis laut Umfrageergebnissen insgesamt gesehen keine bedeutende Rolle, im Gegensatz dazu eher noch organische Düngemittelgaben mit weitem CN-Verhältnis nach Getreide oder Raps, um mögliche Reststickstoffmengen zu konservieren.

d) Einsatz von Gründüngung in Haupt- oder Zwischenfruchtstellung

Im Bereich der konventionellen Landbewirtschaftung deuten die Ergebnisse der BeraterInnen-Umfrage darauf hin, dass ein Anbau von Leguminosen oder Leguminosen-Gemengen oder auch Ackergras in Hauptfruchtstellung eher unüblich sind und sich zumeist im Bereich von unter 10 % des gesamtbetrieblichen Anbauumfangs bewegen. Der Einsatz von Gründüngungskulturen in Zwischenfruchtstellung wie z.B. Untersaaten, Sommerzwischenfrüchte oder abfrierende oder winterharte Winterzwischenfrüchte können dagegen durchaus verbreitet sein, dies wird allerdings regionalspezifisch sehr unterschiedlich gehandhabt.

Im der ökologischen Landwirtschaft ist der Anbau von Leguminosen oder Leguminosen-Gemengen und Ackergras in Hauptfruchtstellung verbreitet bis sehr verbreitet, und dies insbesondere bei den Marktfruchtbetrieben, die sich die stickstofffixierende Eigenschaft zur Aufrechterhaltung der Nährstoffversorgung entsprechend zunutze machen. Daher beträgt der Anbauumfang dieser Kulturen in Hauptfruchtstellung tendenziell zwischen 20 und 30 % der gesamtbetrieblichen Anbaufläche. Auch die Ansaat von Gründüngungskulturen in Zwischenfruchtstellung (Untersaaten, Sommerzwischenfrüchte, abfrierende/winterharte Winterzwischenfrüchte) ist nach der HumuGS-Statusanalyse tendenziell (also regionalspezifisch) wesentlich stärker verbreitet als im konventionellen Landbau.

e) Maßnahmen und Leistungen der Grün- und Strohdüngung für die Humusversorgung

Die Einschätzungen der befragten ExpertInnen zum Leistungspotenzial der Strohdüngung für den Humusersatz gehen im konventionellen Bereich von „nicht notwendig“ über „durchschnittlich“ bis hin

zu „notwendig“ und „hoch“. Tendenziell wird die Leistung als eher positiv eingeschätzt und insbesondere als Ausgleich in humuszehrenden Silomaisfruchtfolgen als sehr sinnvoll erachtet. Ein/e ExpertIn führt an, dass die Strohdüngung nur für den Erhalt des Status quo des C-Gehalts im Boden ausreicht und eine Verbesserung der Humusversorgung insbesondere durch den zusätzlichen Ninput anderer organischer Masse erzielt wird. Im Futterbaubetrieb sei die Strohdüngung nicht notwendig, da hier die Sicherstellung der Humusversorgung kein Problem sei, meint ein/e ExpertIn. Oft wird das Stroh auch aufgrund der hohen Nachfrage eher abgefahren und durch Kompost oder Champignonerde ersetzt. Als praktische Maßnahmen zur Erzielung eines guten Beitrags der Strohdüngung zur Humuswirtschaft werden eine gute Zerkleinerung des Strohs, das Häckseln der Stoppeln, eine gleichmäßige Verteilung und oberflächennahe Einarbeitung sowie ev. eine Güllegabe vor Einarbeitung bzw. eine sonstige organische Düngung mit engem CN-Verhältnis angeführt.

Die Expertenmeinungen zum Leistungspotential der Gründüngung auf die Humusversorgung im konventionellen Landbau gehen von „gering“ über „mittel“ bis zu „sehr hoch“. Teilweise wird die Humusleistung also eher verhalten bewertet, überwiegend jedoch als sehr positiv angesehen. Als positive Eigenschaften werden Stickstoffkonservierung und Erosionsschutz genannt, genauso wie die Bereitstellung von „Futter“ für das Bodenleben bzw. Gründüngung als Kohlenstoffquelle ohne externe Biomassezufuhr. Besonders positiv wird die Gründüngung bewertet, wenn kein organischer Dünger räumlich nah oder kostengünstig zur Verfügung steht. Wichtigster Faktor für eine erfolgreiche Erbringung der Gründüngung für die Humusersatzleistung stellt nach den Einschätzungen vieler ExpertInnen das Verwirklichen exzellenter Pflanzenbestände dar. Um dies zu erreichen, sei insbesondere ein früherer Saatzeitpunkt, entsprechende Düngung sowie ausreichende Wasserverfügbarkeit notwendig. Darüber hinaus sei das Vermeiden von Strohnestern der Vorfrucht wichtig, ebenso wie ein flaches Einarbeiten des (bei viel Biomasse gemulchten) Pflanzenmaterials. Abfrierende Kreuzblütler sollen teilweise ein geringeres Humuspotential als Gräser oder Leguminosen aufweisen. Mulchsaatenverfahren werden z.B. bei Rüben und Mais als sinnvoll erachtet.

Auch für den ökologischen Landbau gibt es eine große Streuung der Meinungen über die Wirksamkeit der Strohdüngung für den Humusaufbau von „gering“ bis „hoch“. Speziell im Vergleich zum Klee-Grasanbau sei die Wirkung eher gering, meint ein/e ExpertIn. Wenn möglich sollten Futter-Mist-Kooperationen eingegangen werden und ein Austausch von Stroh gegen Mist realisiert werden. Neben den auch für den konventionellen Bereich geltenden Maßnahmen wie die Zerkleinerung des Strohs etc. (s.o.) wird insbesondere auf die Vorteilhaftigkeit der Strohnutzung in der Viehhaltung mit Mistrückführung hingewiesen.

Die ExpertInneneinschätzungen bezüglich des Humusersatzpotenzials von Gründüngungskulturen im ökologischen Landbau schwanken zwischen „neutral“ und „sehr hoch“. Der Einsatz von Gründüngung wird als sehr wichtiger Bestandteil des Ökolandbaus verstanden („immer grüner Acker“). Idealweise sollten nach Aussage eine/r ExpertIn mindestens 20 % Futterleguminosen in der Fruchtfolge enthalten sein. Wenn dieser Anteil reduziert würde, dann sollte jede Möglichkeit des Zwischenfruchtanbaus genutzt werden. Eine weitere ExpertInnenmeinung ist, dass Gründüngung weniger die Humusversorgung zum Ziel hat, sondern insbesondere einen Beitrag zur Optimierung von Unkrautunterdrückung, zum Erosionsschutz und zur N-Versorgung der Folgekultur leistet. Als Maßnahmen für die Ausschöpfung der positiven Potenziale der Gründüngungskulturen werden auch im Ökolandbau eine rechtzeitige Aussaat, der Einsatz hochwertigen Saatguts, die Nutzung von Artenmischungen anstatt Reinsaaten, eine kontinuierliche Wasserversorgung, gute Bodenerwärmung sowie die Sicherstellung einer guten Durchlüftung gesehen. Hinzu kommen eine ausreichende

Standzeit zur Biomassegenerierung, der späte Umbruch der Zwischenfrucht kurz vor Einsatz der Hauptfrucht sowie der Einsatz winterharter Zwischenfrüchte vor einer Sommerung. Klee(-gras)-Untersaaten im Getreide werden als weitere Möglichkeit gesehen, die möglichen positiven Effekte einer Gründüngung möglichst effizient auszunutzen.

4.3 Modul 3 Empirische Arbeiten

4.3.1 Einleitung

Die empirischen Untersuchungen zum Umsatz von Stroh- und Gründüngung sind in Form eines Inkubationsversuchs im Phytotron in Rauischholzhausen, sowie Feldversuchen an den Versuchsbetrieben Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof der Justus-Liebig-Universität durchgeführt worden. Mittels verschiedener Parameter wird die Wirkung von Stroh- und Gründüngungsvarianten auf die organische Bodensubstanz untersucht. Dabei soll die Bedeutung des CN Verhältnis im Substrat und Substrat-Boden-Gemisch, sowie die N-Verfügbarkeit und der Einfluss der Standortbedingungen auf den Aufbau organischer Bodensubstanz und die Wirkung auf die Pflanzenproduktivität und Umwelt geklärt werden.

4.3.2 Inkubationsversuch

4.3.2.1 Hintergrund & Ziele

Die zentrale Frage dieser Studie, ob bei engerem CN-Verhältnis ein effizienterer Einbau von Kohlenstoff in die organische Bodensubstanz erfolgt, soll mit einem Inkubationsversuch nach DIN ISO 16072:2005-6 geklärt werden. Im Inkubationsversuch wurde der Umsatz von Substrat-C im Boden bei Stroh und Gründüngungsvarianten mit verschiedenen N-Gehalten in zwei verschiedenen Böden untersucht. Hierzu wurde die CO₂ Atmung verschiedener Grün- und Strohdüngevarianten erfasst. Ausgehend von den C-Verlusten durch die mikrobielle Atmung konnte die Retention des Substrat-C berechnet werden und in Beziehung gesetzt werden mit dem CN-Verhältnis im Substrat-Boden-Gemisch. Weiter wurde der C- und N-Gehalt im Boden-Substrat-Gemisch nach Versuchsende mittels Feststoffanalyse gemessen und mit den Ergebnissen der Atmungskurven verglichen. Zusätzlich wurde zur Festigung unserer Theorie, nach Beendigung des Inkubationsversuchs die Aktivität der mikrobiellen Biomasse analysiert und zusammen mit den Atmungsergebnissen in Beziehung zur C-Retention gesetzt.

4.3.2.2 Material & Methoden

Der Inkubationsversuch wurde nach DIN ISO 16072:2005-6 durchgeführt. Als Düngesubstrat wurde aus dem parallel durchgeführten Feldversuch Pflanzenmaterial von Gerstenstroh, Erbsenstroh, sowie als Gründüngungsvariante Senfstroh verwendet. Nach der Ernte im Feld wurde das frische Pflanzenmaterial bei 40°C getrocknet und auf 1mm geschnitten. Für den Inkubationsversuch wurden zwei sich in ihren Eigenschaften unterscheidende Böden verwendet. Ausgewählt wurden ein Sandboden und ein Tonboden. Der Boden wurde von den Ackerflächen des Feldversuchs aus 0 bis 30 cm Tiefe entnommen, luftgetrocknet und auf < 2mm gesiebt. Mit jeweils vier Wiederholungen wurden die insgesamt 7 Düngevarianten jeweils in den Sandboden- und Tonboden eingebracht und je nach Düngerart bei zwei unterschiedlichen Temperaturstufen (20°C und 8°C) und 40% Wasserhaltekapazität angesetzt. Verwendet wurden jeweils 100 g Boden und 1 g Substrat je verwendeten Dünger. Die Gründüngungsvarianten wurden bei niedrigerer Temperatur angesetzt als die Strohvarianten, um den Versuch den Bedingungen im Feld besser anzupassen. Nach 200 Tagen

mussten die Proben aus technischen Gründen zusammengelegt und gemeinsam weiter inkubiert werden. Hier wurde entschieden, die Inkubation bei 20°C weiterzuführen. Ein Priming der zuvor bei 8°C inkubierten Proben musste dabei in Kauf genommen werden und wird bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt.

Tabelle 1: Ausgangs C- und N-Gehalte, sowie CN-Gehalt von Boden und Düngesubstraten

Boden / Substrat	C Input [g 100 ⁻¹]	Ninput [g 100 ⁻¹]	CN
Sandboden	0,81	0,08	10,1
Ton	1,48	0,18	8,2
Mineraldünger	-	0,01	-
Biogasgülle	42	4,2	10,0
Gerstenstroh	43	0,52	82,6
Erbsenstroh	41	0,81	50,6
Senfstroh	42	1,39	30,2

Tabelle 2: C- und N-Gehalte, sowie CN- Verhältnis der Substrat-Boden-Gemische

Substrat varianten	Sandboden			Ton		
	C _t	N _t	CN	C _t	N _t	CN
20 °C	[g]	[g]		[g]	[g]	
Gerstenstroh	1,28	0,08	15,2	1,91	0,187	10,2
Gerstenstroh+ Mineraldünger	1,24	0,09	14,2	1,91	0,193	9,9
Gerstenstroh+ Biogasgülle	1,66	0,12	13,5	2,33	0,229	10,2
Erbsenstroh	1,22	0,08	14,5	1,89	0,19	9,9
8 °C/20° C						
Senf	1,23	0,09	13,7	1,90	0,196	9,7
Senf+ Gerstenstroh	1,66	0,10	17,4	2,33	0,201	11,6
Senf+Biogasgülle	1,65	0,13	12,5	2,32	0,238	9,8

Analytik C-Respiration

Zur Erfassung des Substratumsatzes von Substrat-C im Boden wurde ein Inkubationsversuch in den Klimakammern der Forschungsstation Phytotron Rauschholzhausen, unter kontrollierten Bedingungen und ohne Beleuchtung durchgeführt. Die Versuchsvarianten, sowie Kontrollen (nur Boden) wurden in einem geschlossenen Gefäß für 300 Tage inkubiert. Hierfür wurden die Bodenproben mit dem eingemischten Düngersubstrat in kleine Plastikbecher gefüllt und an den Deckel von Weck-Einmachgläsern geklebt, zur Absorption des freiwerdenden CO₂ wurde der Rand der Plastikbecher mit Löchern versehen, damit das CO₂ in das Weck-Einmachglas austreten konnte. Auf den Boden des Glases wurde während des Messzeitraums Natriumhydroxidlösung gegeben, in der das CO₂ gebunden werden konnte. Zusätzlich zu den Versuchsvarianten und Kontrollvarianten (Boden ohne Düngersubstrat) wurden auch Gefäße ohne Boden und Düngersubstrat, nur gefüllt mit

Natriumhydroxidlösung angesetzt um den möglichen Fehler bzw. Bindung von Umgebungs- CO₂ beim Wechseln der Lösung und während des Messverfahrens zu ermitteln. Der somit erfasste zusätzliche CO₂-Gehalt wurde nach jedem Messtermin von den Versuchs- und Kontrollvarianten subtrahiert.

Zu Beginn wurde die Atmung der Versuchsvarianten sehr engmaschig gemessen und im weiteren Verlauf des Versuchs mit abnehmender Atmung schrittweise reduziert auf einen 4 Wochenrhythmus. Während des Versuchs wurde das aus dem Boden-Dünger-Gemisch entweichende CO₂ der Bodenatmung in Natriumhydroxidlösung absorbiert. Nach Rücktitration der unverbrauchten Natriumhydroxidlösung durch Salzsäure bis zur Einstellung eines pH-Wertes von 8,3 (Isermeyer, 1952) konnte die C-Abgabe ermittelt werden.

Zusätzlich wurden C- und N-Mengen in den Varianten zum Ansatzzeitpunkt und (zur Absicherung der Versuchsergebnisse) auch zum Ende des Versuchs auf Grundlage von CN-Analysen aller Materialien (Boden und Düngersubstrate) und der eingesetzten TM-Mengen berechnet. Somit ist eine Gegenüberstellung der feststoffbasierten und fluxbasierten C-Retention möglich, die eine Einschätzung zur Messgenauigkeit der Methode zulässt.

Zur genaueren Bewertung der Ergebnisse wurde die C- Retention berechnet. Die C-Retention stellt den in die organische Bodensubstanz eingebautem Kohlenstoff dar. Um den Einfluss des CN-Verhältnis auf den Einbau organischer Substanz in den Boden darzustellen wurde die C-Retention mit dem CN-Verhältnis des Boden-Substrat-Gemischs zu Versuchsbeginn korreliert.

Erfassung der Mikrobiellen Biomasse

Zusätzlich zur Erfassung des Substratumsatzes mittels Inkubationsversuch wurde der mikrobiell gebundene Kohlenstoff in den Versuchsvariante zu Versuchsende gemessen. Dieser gibt Aufschluss über die Aktivität der Mikroorganismen im Boden und ermöglicht eine Aussage über die Wirkung der im Inkubationsversuch eingesetzten Düngesubstrate auf die Mikroorganismen. Der mikrobiell gebundene Kohlenstoff (Cmic) im Boden wurde mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE-Methode) bestimmt. Durch die Chloroformbegasung wird zusätzlicher Kohlenstoff extrahierbar. Dieser liegt proportional zur Menge an Cmic im Boden vor (Brookes et al., 1985; Vance et al., 1987; Turner et al., 2001).

Für die Erfassung der mikrobiellen Biomasse wurden 12,5g des feuchten Boden-Substrat-Gemischs aus dem Inkubationsversuch in Abdampfschalen eingewogen im Exsikkator mit ethanolfreiem Chloroform begast. Zum Inkubationsbeginn wurde dafür der Exsikkator solange evakuiert bis das Chloroform 2 min lang gesiedet hat, anschließend wurden die Proben im Exsikkator 24 h bei 25 °C im Dunkeln inkubiert. Nach der Inkubation wurde das Chloroform durch 6 fach-wiederholtes Evakuieren entfernt und die Probe mit 50 ml 0,5 M K₂SO₄ extrahiert.

Parallel zu den Fumigationsproben wurde 12,5g Probenmaterial eingewogen und sofort mit 50 ml 0,5 M K₂SO₄ extrahiert (Verhältnis Boden:Lösung ist 1:4). Dafür wurden sowohl die fumigierten, wie auch die unfumigierten Proben 30 Minuten auf dem Horizontalschüttler geschüttelt und anschließend durch 595 Papierfilter filtriert.

Das gewonnen Extrakt aus den fumigierten und unfumigierten Proben wurde anschließend bei 280 nm im Photometer zur Erfassung der UV-Absorption gemessen. Die Differenz von fumigiert – unfumigiert zeigt den Anstieg der UV-Absorption. Nach Ablesen der Eichgeraden (Turner et al., 2001) kann die mikrobielle Biomasse berechnet werden.

Auswertung C-Retention

Die gemessenen Ergebnisse des Inkubationsversuchs wurden wie folgt ausgewertet. Die C-Messwerte der einzelnen Messtermine (C_i) wurden in Bezug zum C-Startgehalt (C_1) gesetzt und die relative C-Abnahme im Substrat-Boden-Gemisch (C_{rel}) in $g\ 100g^{-1}$ dargestellt.

$$C_{i\ rel} = \frac{(C_1 - C_i)}{(C_1 \times 100)}$$

Zur weiteren Auswertung wurde aus den Atmungsergebnissen des Inkubationsversuchs die Retention des Kohlenstoffs (C_{ret}) berechnet. C_{ret} beschreibt die im Boden verbliebene und eventuell schon fixierte Menge an Düngesubstrat. Dargestellt wird die C-Retention als Quotient aus C_n (verbleibende C-Menge nach 300 Messtagen) und der C_1 .

$$C_{ret} = \frac{C_n}{C_1}$$

Der Einfluss des CN-Verhältnisses im Boden-Substrat-Gemisch auf die C-retention wurde mittels Regressionsanalyse untersucht. Hierbei wurde eine exponentielle Regression mit CN als unabhängiger (x) und C_{ret} als abhängiger (y) Variablen berechnet.

Auswertung Mikrobielle Biomasse

Nach Abschluss der CO_2 Bodenatmungsmessungen im Inkubationsversuch wurde die mikrobielle Biomasse in den einzelnen Versuchsvarianten erfasst. Die Mikrobielle Biomasse wird nach Turner (2001) durch Fumigation der Proben mit Chloroform, Extraktion mit Kaliumsulfat und anschließender Messung im Photometer erfasst und anschließend mit den Vergleichsproben, ohne vorangehender Fumigation verglichen.

Es wird angenommen, dass die Retention von Substrat-C im Boden von der C-Nutzungseffizienz der Mikroorganismengemeinschaft abhängt (Manzoni et al. 2012). Zur experimentellen Überprüfung wurde das Verhältnis von C-Respiration (Summe über 300 Tage) und C-Menge in der mikrobiellen Biomasse am Versuchsende berechnet und der Zusammenhang mit der C-retention analysiert (lineare Regressionsanalyse mit $C_{resp}:MBC$ -Quotient als unabhängiger (x) und C_{ret} als abhängiger (y) Variablen).

Zusätzlich zur Messung der C-Veratmung im Versuch wurden C- und N-Mengen in den Varianten zum Ansatzzeitpunkt und zum Ende des Versuchs auf Grundlage von CN-Analysen aller Materialien nach ISO 13694 (C) und ISO 11878 (N) erfasst. Es war so möglich C_{ret} auch auf dieser Basis zu berechnen und einen Vergleich der Methoden zur Erfassung der C-Änderungen anzustellen.

4.3.2.3 Ergebnisse & Diskussion C-Respiration

Die Ergebnisse des Inkubationsversuchs lassen Aussagen über die Freisetzung von CO_2 durch die mikrobielle Atmung in den Proben zu. Dargestellt sind die Ergebnisse des Inkubationsversuchs in Abbildung 4. Nach 300 Versuchstagen ist eine deutliche Ausdifferenzierung der Varianten zu sehen. Der C-Abbau auf Sandbodenboden (Boden aus Groß Gerau) liegt dabei leicht höher als der C-Abbau auf Tonboden (Aueboden von der Weilburger Grenze). Unterschiede zwischen den Warm- und Kaltvariante konnten nicht beobachtet werden, daher sind sie in Abbildung 3 nicht getrennt dargestellt. Die höchsten C-Abbauraten sind in beiden Böden bei den Strohdüngungsvarianten

Gerstenstroh und Erbsenstroh zu beobachten. Dieser Effekt ist möglicherweise auf die niedrige N-Verfügbarkeit zurückzuführen. Nach Schimmel und Weintraub (2003) ist hier eine geringe Umwandlung des eingebrachten Substratkohlenstoffs in Biomasse durch Bodenorganismen zu erwarten. Ein deutlich geringerer C-Abbau als bei den reinen Strohvarianten ist dagegen bei den Varianten Gerstenstroh+ Biogasgülle und Gerstenstroh+ Mineraldünger zu sehen. Noch ungeklärt ist der deutlich geringere Abbau der reinen Biogasgüllevariante im Vergleich zu den Strohvarianten. Hier könnte eine hemmende Wirkung der Biogasgülle auf die Mikroorganismen der Grund sein.

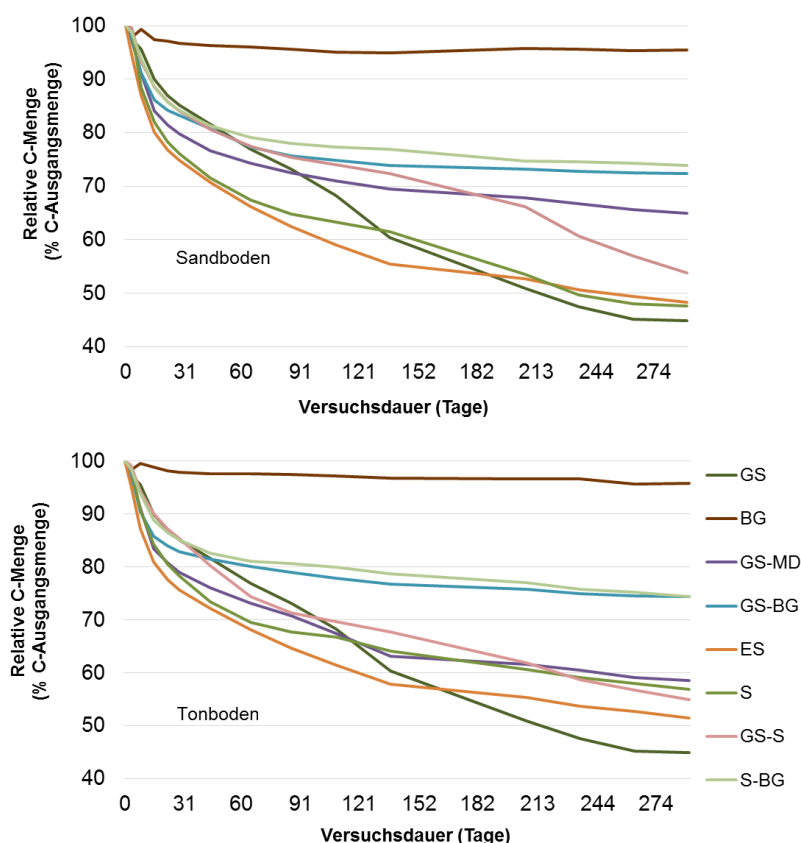


Abbildung 4: C-Abbau in Boden-Substrat-Gemischen im Inkubationsversuch (300 Tage, 20°C bzw. 8°C). C-Menge relativ zur Substrat-C-Ausgangsmenge: (Substrat C = C in Variante – C in Kontrolle (nur Boden) GS: Gerstenstroh; MD: Mineraldünger; BG: Biogasgülle; ES: Erbsenstroh, S: Senfstroh

Die Ergebnisse deuten eine Abhängigkeit des Substratumsatzes vom CN-Verhältnis an. Die Abhängigkeit ist negativ: Je weiter das CN-Verhältnis im Substrat, desto mehr Substrat-C wurde im mikrobiellen Umsatz veratmet. In der initialen Phase des Versuchs steigt der Abbau der Substratvarianten, je enger das CN-Verhältnis. Somit korreliert der Abbau negativ mit dem CN-Verhältnis.

Mittelfristig zeigen die Atmungskurven jedoch, dass durch eine zusätzliche N-Düngung und die damit einhergehende Einengung des CN-Verhältnisses eine höhere Retention von Substrat-C erreicht wird. Liegt eine N-Limitierung vor, wird somit mehr Substrat-C veratmet.

Zu vermuten ist, dass der Einbau von Stroh-C in die mikrobielle Biomasse durch die N-Verfügbarkeit limitiert wird. Die Ergebnisse deuten auf die Notwendigkeit einer Berücksichtigung der N-Verfügbarkeit bei der Bewertung des Umsatzes und der Humusreproduktionsleitung von Stroh und Gründüngung hin.

Zusammenhang zwischen C-Retention und CN-Verhältnis der Substrate

Abbildung 5 zeigt eine negative Korrelation zwischen dem CN Verhältnis und der Retention von C im Boden-Substrat-Gemisch. Zu beobachten ist: je höher der N Gehalt und das damit einhergehende engere CN Verhältnis, desto höher die Retention des Substrats C. Die Ergebnisse bestätigen die zu Beginn gestellte Hypothese, dass das CN Verhältnis Einfluss auf den Substrataufbau im Boden nimmt.

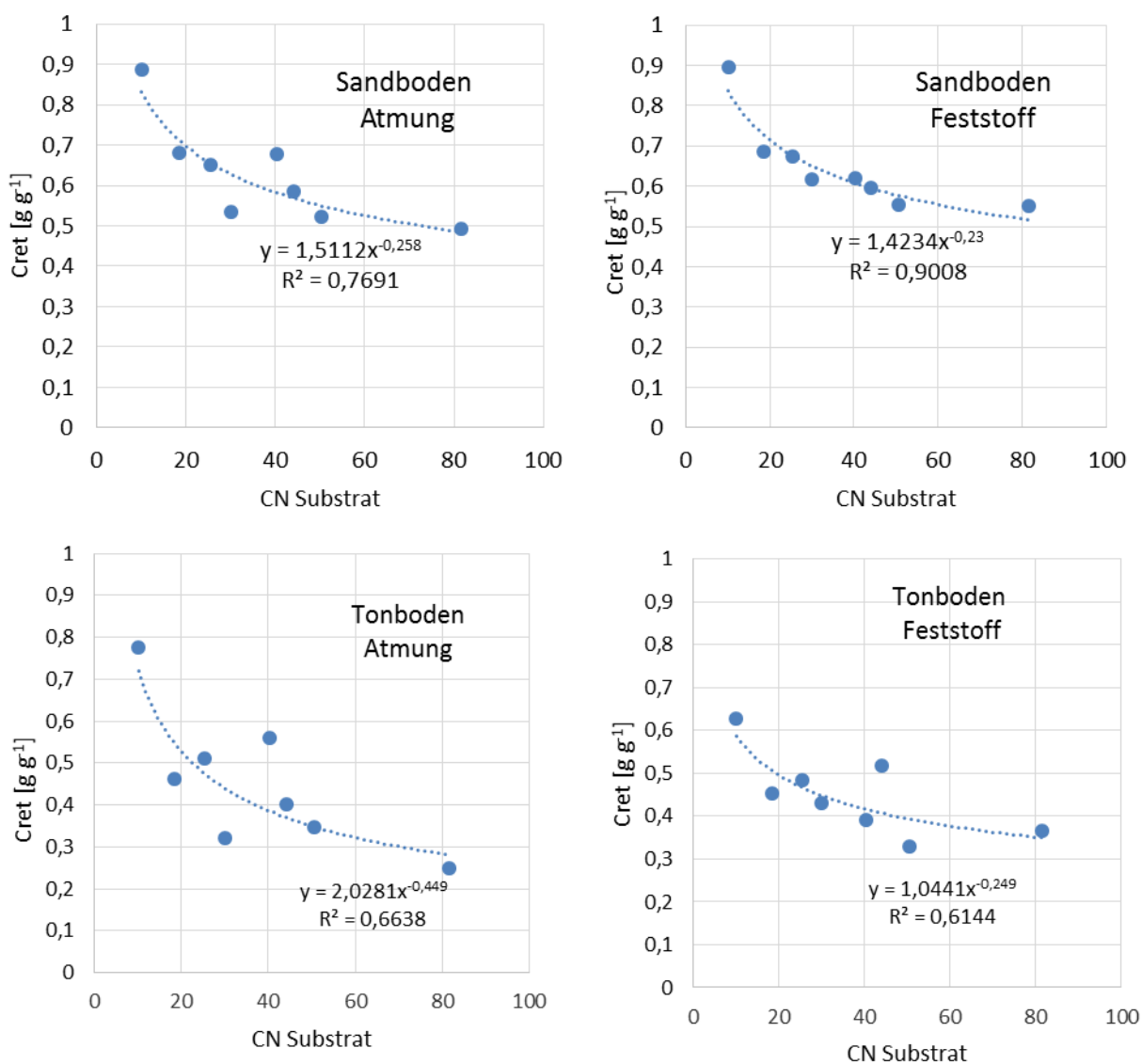


Abbildung 5: Retention von Substratkohlenstoff (Cret) im Boden in Abhängigkeit zu CN Verhältnis des Boden-Substrat-Gemische. Links: Kalkulation basierend auf C-Atmung; Rechts: Kalkulation basierend auf C und N Gehalte der Feststoffanalyse; Oben: Sandbodenboden; Untern Tonboden.

C-Nutzungseffizient der Mikrobiellen Biomasse

In Abbildung 6 ist die erwartete positive Korrelation zwischen der C-Retention und der C-Nutzungseffizient der Mikrobiellen Biomasse (CUE) nur bei Tonböden zu beobachten. Die Sandbodenvarianten zeigen dagegen keine positive Korrelation. Bei Betrachtung der Abbildung zeigt sich, dass die Zugabe von Stickstoff zu Stroh die C-Nutzungseffizient in beiden Böden reduziert, während Cret ansteigt. Der Grund könnte eine Veränderung in der Mikroorganismengemeinschaft sein entgegen einem höheren Anteil an Pilzen in den Varianten mit wenig Stickstoff. Manzoni et al. (2012) vermutet, dass Pilze offenbar eine höhere CUE aufgrund des weiteren CN Verhältnis aufweisen im Vergleich zu Bakterien. Weiter ist festzuhalten, dass die CUE von Mikroorganismen durch die N Verfügbarkeit limitiert werden kann (Schimel & Weintraub, 2003).

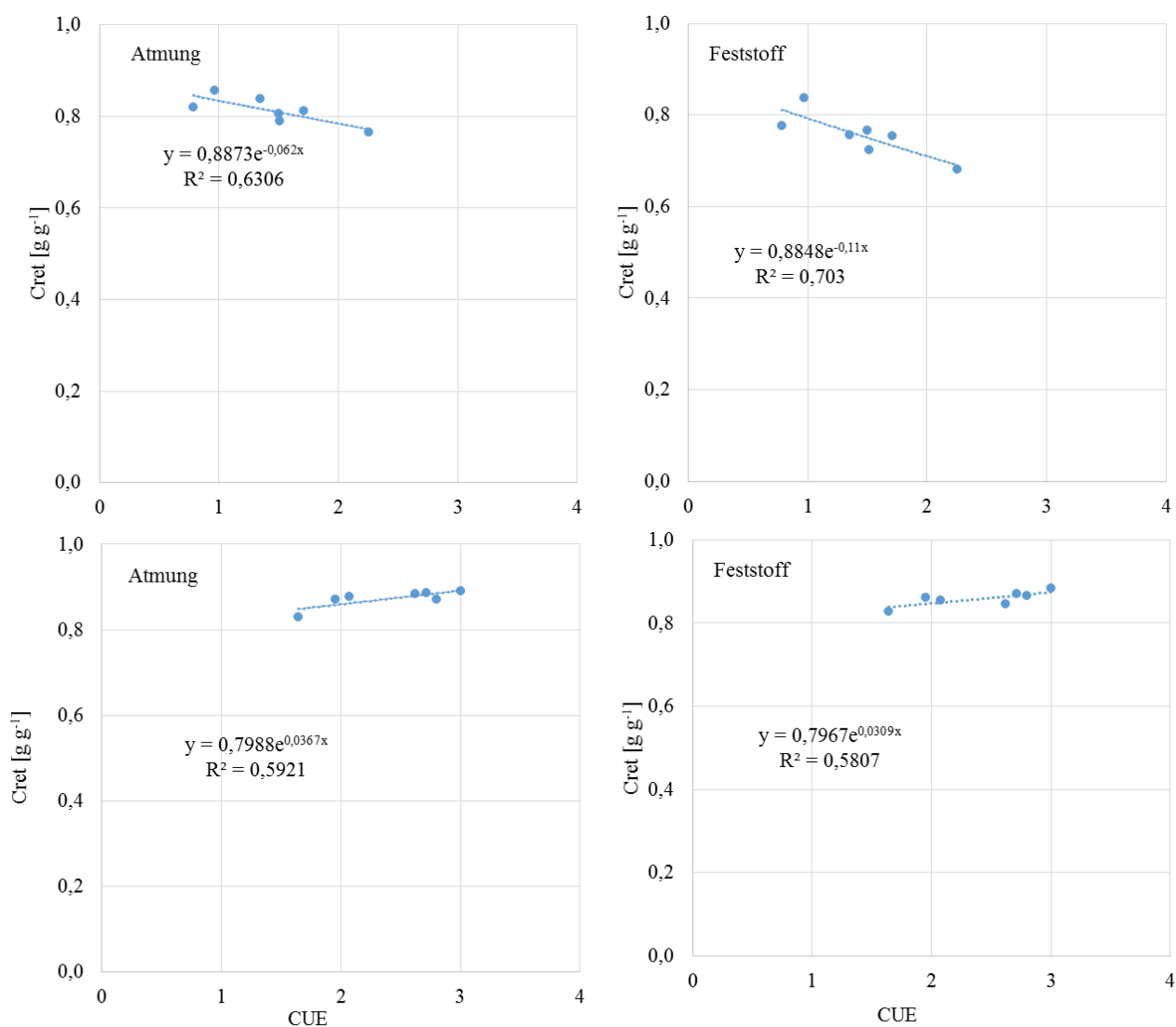


Abbildung 6: Korrelation zwischen C-Nutzungseffizient der Mikrobiellen Biomasse (CUE) und der Retention von C im Boden-Substrat-Gemisch (Cret). Links: Kalkulation basierend auf C Atmung (Atmung); Rechts: Kalkulation basierend auf C und N Gehalte der Feststoffanalyse (Feststoff); Oben: Sandbodenboden (Groß Gerau); Unten Tonboden (Weilburger Grenze).

Methodenvergleich zur Ermittlung der C-Retention

Abbildung 7 zeigt eine enorm hohe Übereinstimmung der durch Feststoffanalyse ermittelten Daten und den durch Atmung gemessenen Daten. Somit eignen sich beide Methoden zur Messung des Kohlenstoffgehalts bzw. der Kohlenstofffreisetzung in Bodenproben.

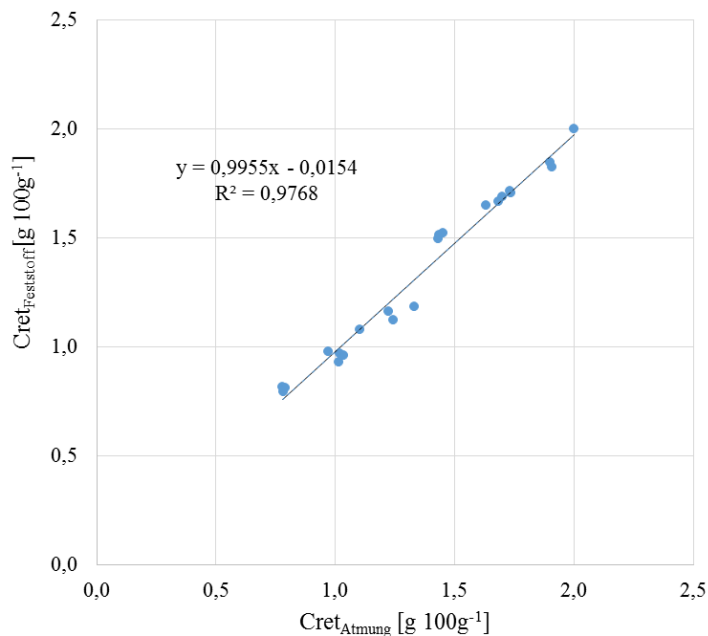


Abbildung 7: Korrelation der C-Retention Werte (Cret) basierend auf C-Atmung (Cret_{Atmung}) und C und N Feststoffanalyse (Cret_{Feststoff})

4.3.2.4 Schlussfolgerungen aus dem Inkubationsversuch

Der Inkubationsversuch weist klar auf die Bedeutung der N-Verfügbarkeit für die Retention von C aus organischen Substraten in Böden hin. Die zurückgehaltene C-Menge ist umso größer, je enger das CN-Verhältnis ist. Mit Blick auf Implikationen für die Praxis ist allerdings zu berücksichtigen, dass im vorliegenden Inkubationsversuch kein N aus den Systemen verlorengehen konnte. Abhängig von Substratart und N Verfügbarkeit sollte das Substrat CN Verhältnis für die Kalkulation der potenziellen C Retention weiter operationalisiert werden. Die unterschiedliche Dynamik von C und N verschiedener Quellen hat möglicherweise Einfluss auf die aktuelle N Verfügbarkeit für Mikroorganismen im Boden.

4.3.3 Feldversuch

4.3.3.1 Hintergrund & Ziele

In den Feldversuchen wurde der Umsatz von Substrat-C im Boden bei Stroh und Gründüngung mit verschiedenen N-Gehalten an drei Standorten mit unterschiedlichen Standortbedingungen untersucht. Im ersten Schritt wurde die Wirkung der Düngemaßnahmen auf die organische Bodensubstanz näher betrachtet. Dafür wurden die Parameter C- und N- Analysen, sowie N_{min} untersucht. Weiter wurde die partikuläre Bodensubstanz, die Aktivität der mikrobiellen Biomasse, die Bodenatmung sowie Litterbags erfasst. Im zweiten Schritt wurde Düngewirkung auf die Pflanzen untersucht. Hierfür wurden die Parameter N_{min} und der Ertrag der Nachfrucht Mais herangezogen.

Zusätzlich wurden die verschiedenen Parameter zur Festigung unserer Theorie in Korrelation zum Input und dem CN Verhältnis des Substrats gesetzt, um die Zusammenhänge zwischen N-Verfügbarkeit, CN Verhältnis und Aufbau organischer Bodensubstanz zu beleuchten.

4.3.3.2 Material & Methoden

Im Rahmen des Projekts wurde auf den drei Versuchsstandorten der Justus-Liebig-Universität Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof Feldversuche zur Stroh- und Gründüngung durchgeführt. Wie in Abbildung 8 dargestellt, wurden 17 verschiedene Düngevarianten untersucht. Dabei wurden an allen Standorten die in Tabelle 5 nicht umrandeten Varianten Kontrolle, Gerstenstroh und Körnerleguminosenstroh der Erbse angebaut. An den konventionell wirtschaftenden Versuchsbetrieben in Groß Gerau und an der Weilburger Grenze wurden zusätzlich die lila umrandeten Varianten angebaut und am ökologisch wirtschaftenden Betrieb Gladbacherhof die grün umrandeten Varianten.

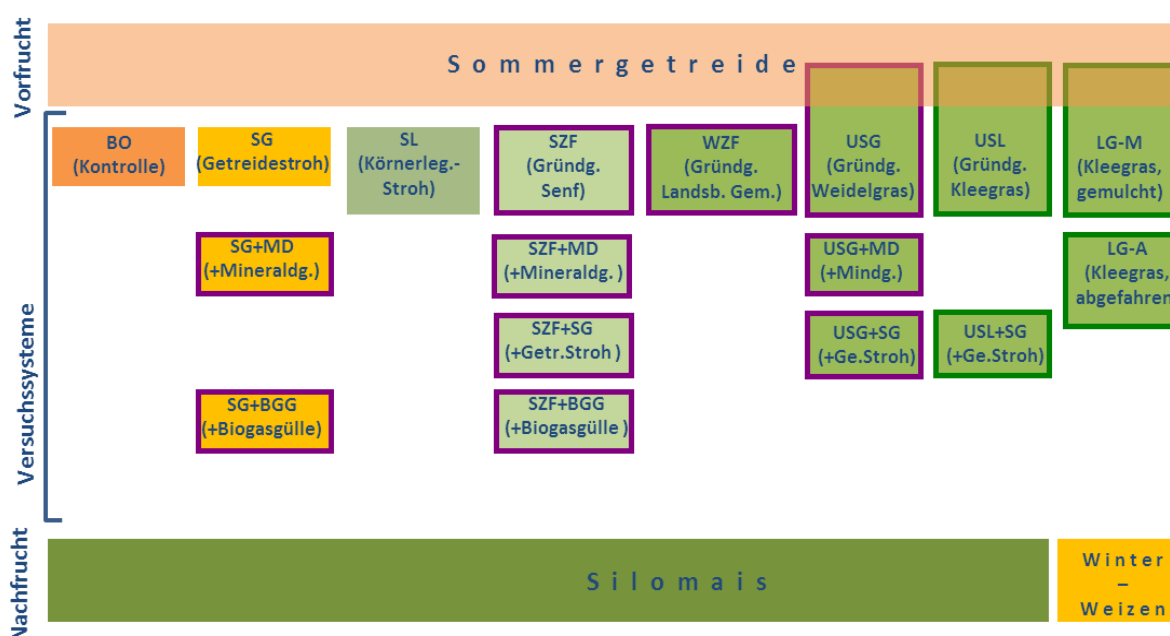


Abbildung 8: Versuchsdesign Violett umrandete Varianten wurden nur unter konventionellen Bedingungen angelegt (Standorte GG und WG), grün umrandete Varianten nur im Öko-Versuch (Standort GH). Die nicht umrandeten Varianten werden an allen drei Standorten etabliert. SFZ: Sommerzwischenfrucht, WZF: Winterzwischenfrucht, US: Untersaat, LG: überjähriges Leguminosen-Gras-Gemenge

Standort

Der Feldversuch wurde an den drei Versuchsstandorten Weilburger Grenze, Groß Gerau und Gladbacherhof durchgeführt.

Der Versuchsstandort Groß Gerau liegt in der Nähe von Frankfurt am Main auf eine Höhe von 90 m über NN. Beim Bodentyp handelt es sich um eine Parabraunerde auf leichtem Sandbodenboden, die Ackerzahl ist 25. Der Standort hat eine Jahresmitteltemperatur von 9,8° C und das langjährige Mittel der Niederschlagssumme beläuft sich auf 600 mm.

Der Versuchsstandort Weilburger Grenze liegt bei Gießen auf einer Höhe von 158 m über NN. Beim Bodentyp handelt es sich um einen Braunen Auenboden (WRB: Allochtone Vega) und die Bodenart ist ein stark schluffigen Ton (Tu 3) mit einem Tongehalt von 28 bis 33% im Oberboden, die Ackerzahl liegt

bei 60. Der Standort hat eine Jahresmitteltemperatur von 9° C und das langjährige Mittel der Niederschlagssumme beläuft sich auf 650 mm.

Der dritte Versuchsstandort Gladbacherhof befindet sich im Raum Limburg auf einer Höhe von 230 m über NN. Beim Bodentyp handelt es sich um Parabraunerden, mit Löss als Substrat und einer Ackerzahl von 63. Der Standort hat eine Jahresmitteltemperatur von 9,5° C und das langjährige Mittel der Niederschlagssumme beläuft sich auf 648 mm.

Versuchsanlage

An allen drei Standorten wurde als Vorfrucht im Frühjahr 2013 in allen Varianten bis auf Variante 5 Sommergerste gesät, bei Variante 5 wurde die Körnerleguminose Erbse als Vorfrucht gesät. Die Versuchsvarianten setzen sich wie in Tabelle 3 dargestellt aus verschiedenen Stroh- und Gründüngungsmaßnahmen, sowie verschiedenen zusätzlichen Düngeoptionen wie Mineraldünger und Biogasgülle zusammen. Als einheitliche Nachfrucht wurde im Frühjahr 2014 Silomais gesät. Die Bewirtschaftung in allen Varianten erfolgte praxisnah.

Tabelle 3: Variantenbeschreibung zum HumuGS-Feldversuch

ID Num.	Varianten-ID	Vorfrucht	Variante	Stroh-/Gründüngung	Zusätzl. Düngung	Nachfrucht
1	BO	Sommergerste	Kontrolle Schwarzbrache	-	-	Silomais
2	SG	Sommergerste	Getreidestroh	Stroh	-	Silomais
3	SG+MD	Sommergerste	Getreidestroh +Mineraldünger	Stroh	Mineraldünger	Silomais
4	SG+BGG	Sommergerste	Getreidestroh +Biogasgülle	Stroh	Biogasgülle	Silomais
5	SL	Sommererbsen	Erbsenstroh	Stroh	-	Silomais
6	SZF	Sommergerste	Sommerzwischenfrucht (SZF) Senf	Zwischenfrucht	-	Silomais
7	SZF+MD	Sommergerste	SZF +Mineraldünger	Zwischenfrucht	Mineraldünger	Silomais
8	SZF+SG	Sommergerste	SZF nach Strohdüngung	Stroh +Zwischenfrucht	-	Silomais
9	SZF+BGG	Sommergerste	SZF+Biogasgülle	Zwischenfrucht	Biogasgülle	Silomais
10	WZF	Sommergerste	Winter-Zwischenfrucht Landsberger Gemenge	Zwischenfrucht	-	Silomais
11	USG	Sommergerste	Untersaat Weidelgras (USG)	Untersaat	-	Silomais
12	USG+MD	Sommergerste	USG +Mineraldünger	Untersaat	Mineraldünger	Silomais
13	USG+SG	Sommergerste	USG +Getreidestroh	Untersaat		
+Stroh	-	Silomais				

14	USL	Sommer-Gerste	Untersaat Klee gras (USL)	Untersaat	-	Silomais
15	USL+SG	Sommer-Gerste	USL +Getreidestroh	Untersaat		
+Stroh	-	Silomais				
16	LG-M	Sommer-Gerste	Grünbrache Klee gras	Aufwuchs	-	Winterweizen
17	LG-A	Sommer-Gerste	Klee gras (Futter)	-	-	Winterweizen

Anmerkungen zur Variantenbeschreibung:

In allen Varianten mit Ausnahme von Variante 5 (SL) wird in 2013 als Vorfrucht/Basissystem Sommergerste etabliert, in Variante 5 Sommererbsen. Bei den Varianten 11 bis 17 wird jeweils eine Untersaat etabliert, und zwar Weidelgras in den Varianten 11-13, sowie Luzerne-Klee-Gras (LKG) in den Varianten 14 bis 17. Im Jahr 2014 wird in den Varianten 1 bis 15 Silomais als Nachfrucht mit geringer Wurzelmasse angebaut. In den Varianten 16 und 17 (Anlage ausschließlich am Gladbacherhof) wird kein Silomais angebaut, die Varianten bleiben bis zum Herbst 2014 als Klee gras im 1. Hauptnutzungsjahr bestehen, nach Umbruch wird Winterweizen angebaut.

Während des Projektzeitraums wurden auf den drei Versuchsstandorten alle vorgesehenen Arbeiten auf den Versuchsflächen durchgeführt. Hierzu zählt die Durchführung der Ernten mit Erntemengenerfassung, Düngemaßnahmen mit Erntegut, Mineraldünger und Biogasgülle, Bodenprobenahmen mit anschließender Aufbereitung zur Nmin-Analyse, CN-Analyse und POM-Analyse, Litterbag Ausbringung und Entnahmen, sowie Bodengasmessungen.

Der Versuchsaufbau der Feldversuche ist in Abbildung 8 dargestellt, die detaillierte Variantenbeschreibung in Tabelle 3. Bei den Versuchen handelt es sich um vollrandomisierte Blockanlagen mit vier Wiederholungen.

4.3.3.2.1 Untersuchungsmethoden

Pflanzen

Während des Versuchszeitraums wurden alle Aufwüchse von Zwischenfrüchten und Untersaaten, sowie die Erträge der Nachfrucht Mais bzw. Winterweizen zu den vorgesehenen Ernteterminen erfasst, hierfür wurden Quadratmeterschnitte durchgeführt, der Aufwuchs gewogen und anhand der ermittelten TM-Gehalte die Erntemenge je Parzelle bzw. ha erfasst. Zusätzlich wurden die C- und N-Gehalte im Pflanzenaufwuchs mit dem Elementaranalysator Vario EL cube der Firma Elementar (nach ISO 10694 (C) und ISO 13878 (N)) analysiert.

Düngesubstrate

Die verschiedenen Düngesubstrate wurden auf ihre C- und N-Gehalte analysiert. Die auszubringenden Düngemengen wurden auf Trockenmasse-Basis der jeweiligen Substrate ermittelt und nach Versuchsplan ausgebracht.

Boden

Während des Versuchszeitraums wurden an allen drei Standorten zu 4 Terminen (1: Nach der Vorfrucht Sommergerste, 2: Herbst, 3: Frühjahr, 4: Nach der Nachfrucht Mais) Bodenproben zur C- und N-Analyse, Nmin-Analyse, Partikuläre Organische Substanz (POM) und Mikrobiellen Biomasse genommen. Zusätzlich wurde einmalig die Trockenrohddichte im Herbst (0-30cm) zur Berechnung der

Bodenmengen erfasst. Weiter wurde die Bodenatmung mittels CO₂ Messungen im Versuchsjahr 2013 (100d) erfasst, sowie Litterbags sowohl in 2013 als auch 2014 eingebracht.

C- und N- Gehalte, POM und Mikrobielle Biomasse

Die Bodenprobennahme wurden mittels Rillenbohrstock (20 Einstiche pro Variante) durchgeführt. Es wurden hierfür die oberen 30 cm beprobt und pro Variante eine Mischprobe erstellt. Aus dieser Mischprobe wurde Bodenmaterial für die C- und N-Analyse, die POM Analyse, sowie die Bestimmung der Mikrobiellen Biomasse entnommen. Die Analytik des Bodenkohlenstoffs und -stickstoffs erfolgte mit einem Elementaranalysator Vario EL Cube der Firma Elementar (nach DIN ISO 10694). Um den Einfluss von Unterschieden in den Startgehalten (Messtermin 1, nach Vorfurcht) ausschließen zu können, wurde der Startmesswert durch alle Varianten gemittelt und die Delta Werte zu den weiteren Messterminen auf den mittleren Startwert addiert.

Nmin

Die Bodenprobenahme zur Erfassung des mineralisch verfügbaren Stickstoffs (Nmin) erfolgte mittels Nmin-Bohrstockset in den drei Tiefen stufen (0-30, 30-60, 60-90cm), die Extraktion und Analyse des Bodenmaterials erfolgte im Anschluss nach DIN 19746.

Partikuläre organische Substanz (POM)

Um auch geringste Veränderungen in der organischen Substanz im Boden ausmachen zu können wurde die partikuläre organische Substanz (POM) nach Magid & Kjaergaard (2001) untersucht. Die POM-Fraktionierung soll Änderungen im CN-Gehalt des Bodens viel früher anzeigen können, als eine C- und N-Gesamt-Analyse es kann. Die Analyse der partikulären organischen Substanz erfolgte mittels Nasssiebung. Hierfür wurden 100 g Boden (FM, aus 0-30 cm Bodentiefe) mit 200 ml 5 % igem Natriumpolyphosphat für 8 Stunden über Kopf geschüttelt, hierbei wird die partikuläre organische Substanz von den Bodenpartikeln gelöst. Im Anschluss wird die Probe mittels Nasssiebung durch einen Siebturm (Maschenweiten 2000 µm, 250µm und 52 µm) in drei Fraktionen getrennt. Die Fraktion > 2000µm wird isoliert und 48 h bei 40°C getrocknet und anschließend gewogen. Die Fraktionen 2 und 3 werden isoliert, bei 40° C für 48 h getrocknet, gewogen und vermahlen. Im nächsten Schritt werden von den Fraktionen 2 und 3 die C und N Gehalte analysiert und so mit Hilfe der Gewichtsrückwaagen auf die Anteile an partikulärer organischer Substanz in den Fraktionen 2 und 3 geschlossen.

Mikrobielle Biomasse

Der mikrobiell gebundene Kohlenstoff wurde einmalig zu Versuchsende gemessen. Dieser gibt Aufschluss über die Aktivität der Mikroorganismen im Boden und ermöglicht eine Aussage über die Wirkung der eingesetzten Düngesubstrate auf die Mikroorganismen. Der mikrobiell im Boden gebundene Kohlenstoff (Cmic) wurde mit der Chloroform-Fumigations-Extraktions-Methode (CFE-Methode) bestimmt. Durch die Chloroformbegasung wird zusätzlicher Kohlenstoff extrahierbar. Dieser liegt proportional zur Menge an Cmic im Boden vor (BROOKES et al. 1985, VANCE et al. 1987, Turner et al. (2001)).

Für die Erfassung der Mikrobiellen Biomasse wurden 12,5 g des feuchten Boden in Abdampfschalen eingewogen im Exsikkator mit ethanolfreiem Chloroform begast. Zum Inkubationsbeginn wurde dafür der Exsikkator solange evakuiert bis das Chloroform 2 min lang gesiedet hat, anschließend wurden die Proben im Exsikkator 24 h bei 25 °C im Dunkeln inkubiert. Nach der Inkubation wurde das Chloroform durch 6 fach-wiederholtes Evakuieren entfernt und die Probe mit 50 ml 0,5 M K₂SO₄ extrahiert.

Parallel zu den Fumigationsproben wurde 12,5g Probenmaterial eingewogen und sofort mit 50 ml 0,5 M K₂SO₄ extrahiert (Verhältnis Boden:Lösung ist 1:4). Dafür wurden sowohl die fumigierten, wie auch

die unfumigierten Proben 30 Minuten auf dem Horizontalschüttler geschüttelt und anschließend durch 595 Papierfilter filtriert.

Das gewonnene Extrakt aus den fumigierten und unfumigierten Proben wurde anschließend bei 280 nm im Photometer zur Erfassung der UV-Absorption gemessen. Die Differenz von fumigiert – unfumigiert zeigt den Anstieg der UV-Absorption. Nach Ablesen der Eichgeraden (Paper *Soil Biology & Biochemistry* 33 (2001) 913-919) kann die mikrobielle Biomasse berechnet werden.

Litterbags

Bei Litterbags handelt es sich um Netzbeutel (20*20cm) in die eine definierte Menge des Düngesubstrats gefüllt wird. Ziel ist es, den Abbau des Substrats in den Beutel kontrolliert zu beobachten. Hierfür wurde im vierwöchigen Rhythmus jeweils ein Litterbag pro Parzelle wieder aus dem Boden herausgeholt, das Düngesubstrat von Erde befreit und die genaue Reststrohmenge bestimmt. In beiden Versuchsjahren wurden Litterbags eingesetzt: 2013 in den Varianten 1,2,3,4,5 und 13 mit Gerstenstroh bzw. Erbsenstroh in Variante 5 und 2014 in den Varianten 6,7,8,9,10,12,13,14 und 15 gefüllt mit Senf bzw. Landsberger Gemenge (Variante 10) oder Klee gras (Varianten 14,15). Es wurden jeweils vier Litterbags je Variante in den Boden eingebracht.

Im Anschluss wurde durch Berechnung der exponentiellen Regressionsgeraden der relative Abbau ermittelt.

Bodenatmung

Als Indikator für den Umsatz der Substrate wurde die Boden-C-Respiration nach DIN ISO 16072 erfasst. Hierfür wurde im Anschluss an die Düngemaßnahmen im Sommer 2013 in den Varianten 1,2,3,4,5 und 13 an den Standorten Groß Gerau und Weilburger Grenze und am Standort Gladbacherhof in den Varianten 1,2,5 und 15 CO₂ Messungen durchgeführt. Hierfür wurde ein Glasgefäß mit Natriumlauge über 24 h in einer Gashaube (Ø 23cm) platziert. Freiwerdendes CO₂ wurde in dieser Zeit von der Natronlauge adsorbiert und anschließend im Labor durch Rücktitration mit Salzsäure bis pH 7 die Menge bestimmt.

Da eine kontinuierliche Messung der Bodenatmung im Feld nicht möglich war konnte die C-Respiration im Beobachtungszeitraum (100 d) nicht quantitativ erfasst werden. Stattdessen wurde die scheinbare C-Nutzungseffizienz als Verhältnis zwischen der Summe der Kohlenstoff-Veratmung und des C-Input berechnet (Cresp:Cinput). Der Indikator wurde in Verhältnis gesetzt mit dem CN Verhältnis der verschiedenen Substrate bzw. der Substratmischung, um die Möglichkeit einer semi-stoichiometrischen Bewertung der Leistung der Substrate in der Versorgung von Böden mit organischer Substanz auf Basis des CN-Verhältnisses im Boden und der eingebrachten C- und N-Mengen zu überprüfen.

Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung erfolgte mit IBM SPSS Statistics 22. Die Versuchsparameter (Crel, Nrel, Nmin, POM, Litterbags und Mikrobielle Biomasse) wurden auf Wechselwirkungen zwischen Standort und Termin, Standort und Versuchsvariante sowie Termin und Versuchsvariante getestet. Lagten in den Parametern Wechselwirkungen vor, wurde im Anschluss für jeden Parameter separat eine einfaktorielle ANOVA durchgeführt. Als *Post hoc*-Test wurde bei vorliegender Varianzhomogenität der Turkey-Test durchgeführt.

4.3.3.3 Ergebnisse & Diskussion des Feldversuchs

Im folgenden Kapitel werden die Ergebnisse der einzelnen Untersuchungsparameter des Feldversuchs vorgestellt. Die Ergebnisse des Feldversuchs sollen die Frage klären welchen Einfluss das CN-Verhältnis sowie die N-Verfügbarkeit der Stroh- und Gründüngung auf die organische Bodensubstanz haben und welchen Einfluss dabei der Standort spielt. Nach einer Übersichtstabelle (Tabelle 5) zu den Düngevarianten und den während des Versuchs erfolgten C- und N-Inputmengen folgt im nächsten Schritt die Ergebnisse zum Umsatz der Substrate und die Wirkung auf die organische Bodensubstanz und darauf folgen die Ergebnisse zur Betrachtung der Pflanzenproduktivität und Umwelt.

Tabelle 4 zeigt eine Übersicht über die Düngevarianten mit den jeweiligen C- und N- Inputmengen sowie die C- und N- Mengen im Bodensubstrat-Gemisch und das CN Verhältnis.

Tabelle 4: C- und N-Düngeinputmengen, sowie C- und N-Mengen und CN-Verhältnis im Boden-Substrat-Gemisch

Standort	Variante	ID	C-Input [kg C ha ⁻¹]	N-Input [kg N ha ⁻¹]	Spezifikation Düngung [dt TM ha ⁻¹]
Groß Gerau	Kontrolle	K	378	4,63	
	Gerstenstroh	GS	2123	26,05	50 Gerstenstroh
	Gerstenstroh+ Mineraldünger	GS+MD	2123	56,05	50 Gerstenstroh; 0,3 N -Dünger
	Gerstenstroh+ Biogasgülle	GS+BG	3180	131,05	50 Gerstenstroh; 35 Biogasgülle
	Erbsenstroh	ES	2039	40,40	50 Erbsenstroh
	Senf	S	708	23,56	17 Senf
	Senf + Gerstenstroh	S+GS	708	53,56	17 Senf; 50 Gerstenstroh
	Senf+ Mineraldünger	S+MD	2831	49,61	17 Senf; 0,3 N-Dünger
	Senf+ Biogasgülle	S+BG	1765	128,56	17 Senf; 35 Biogasgülle
	Landsberger Gemenge	LG	353	30,06	8 Landsberger Gemenge
	Weidelgras	WG	1132	49,92	26 Weidelgras
	Weidelgras+ Mineraldünger	WG+M D	1132	79,92	26 Weidelgras; 0,3 N-Dünger
	Weidelgras+ Gerstenstroh	WG+GS	3256	75,97	26 Weidelgras+ 50 Gerstenstroh

Tabelle 5 (Forts.): C- und N-Düngeinputmengen, sowie C- und N-Mengen und CN-Verhältnis im Boden-Substrat-Gemisch

Standort	Variante	ID	C-Input [kg C ha ⁻¹]	N-Input [kg N ha ⁻¹]	Spezifikation Düngung
Weilburger Grenze	Kontrolle	K	378	4,63	
	Gerstenstroh	GS	2123	26,05	50 Gerstenstroh
	Gerstenstroh +Mineraldünger	GS+MD	2123	56,05	50 Gerstenstroh; 0,3 N -Dünger
	Gerstenstroh +Biogasgülle	GS+BG	3180	131,05	50 Gerstenstroh; 35 Biogasgülle
	Erbsenstroh	ES	2039	40,40	50 Erbsenstroh
	Senf	S	1044	34,75	17 Senf
	Senf+ Mineraldünger	S+GS	1044	64,75	17 Senf; 50 Gerstenstroh
	Senf+ Gerstenstroh	S+MD	3168	60,80	17 Senf; 0,3 N-Dünger
	Senf+ Biogasgülle	S+BG	1129	139,75	17 Senf; 35 Biogasgülle
	Landsberger Gemenge	LG	2000	170,13	44,2 Landsberger Gemenge
	Weidelgras	WG	1958	86,30	44,6 Weidelgras
	Weidelgras+ Mineraldünger	WG+BG	1958	116,30	44,6 Weidelgras; 0,3 N-Dünger
	Weidelgras+ Gerstenstroh	WG+GS	2150	27,21	0,6 Weidelgras+ 50 Gerstenstroh
	Gladbacher- hof	Kontrolle	K	278	3,41
Gerstenstroh		GS	2123	26,05	50 Gerstenstroh
Erbsenstroh		ES	2039	40,40	50 Erbsenstroh
Kleegras		KG	258	23,53	31,5 Kleegras
Kleegras+ Gerstenstroh		KG+GS	2381	49,58	31,5 Kleegras; 50 Gerstenstroh
Kleegras (Grünbrache)		KG (GB)	258	23,53	31,5 Kleegras
Kleegras (Futter)		KG (Futter)	258	23,53	

Organische Bodensubstanz

Kohlenstoff- und Stickstoffgehalte im Boden

Die Analyseergebnisse des Kohlenstoffs, sowie Stickstoff im Boden korrigiert auf den Startwert ergeben keine signifikanten Unterschiede in den verschiedenen Varianten. Auch zwischen den Messterminen liegen keine signifikanten C- und N-Änderungen im Versuchszeitraum vor. Hier ist zum letzten Termin nach Ernte der Nachfrucht eine geringe Abnahme in allen Varianten sowohl im C- als auch im N-Gehalt festzustellen, dies ist auf die stark zehrende Nachfrucht Mais zurückzuführen. Signifikante Standortunterschiede liegen aufgrund der unterschiedlichen Standortbedingungen

zwischen der Weilburger Grenze und Groß Gerau sowie der Weilburger Grenze und dem Gladbacherhof vor.

Substratabbau im Boden / Litterbags

Die Ergebnisse der Litterbagversuche, dargestellt in und Abbildung 9 und Abbildung 10 zeigen den Substratabbau im Jahr 2013 und 2014. Im Jahr 2013 wurden die Strohdünungsvarianten sowie die Weidelgras+ Gerstenstroh untersucht und im Jahr 2014 die Varianten mit Gründüngung nach dem Umbruch im Frühjahr. 2013 verhalten sich die Varianten an den Versuchsstandorten sehr ähnlich. Die Variante Gerstenstroh enthält nach 194 Tagen an allen drei Standorten im Mittel 1,4 g Substratrest und die Variante Erbsenstroh im Mittel 1,7 g. Weiter ist an den konventionell bewirtschafteten Standorten Groß Gerau und Weilburger Grenze der stärkste Abbau in den Varianten Kontrolle, Stroh und Stroh+ Mineraldünger zu beobachten. Die Varianten Stroh+ Biogasgülle und Erbsenstroh zeigen eine geringere Abbaustabilität an als die Variante Weidelgras+ Stroh. Die Variante Weidelgras + Gerstenstroh weist nach 194 Tagen an beiden Standorten den größten Substratrest auf. Hierfür könnte die fehlende Stoppelbearbeitung aufgrund der stehend gebliebenen Untersaat Weidelgras eine Erklärung sein.

Weiter weist die Variante Stroh+ Mineraldünger an den konventionellen Standorten Weilburger Grenze und Groß Gerau einen höheren Substratabbau als die Variante Stroh+ Biogasgülle auf. Dies stimmt mit den Ergebnissen des Inkubationsversuchs überein, auch hier wurde der Abbau des Gerstenstrohs durch die Gabe von Biogasgülle gehemmt. Signifikante Unterschiede zwischen den Standorten liegen nicht vor.

Es scheint bei engerem CN Verhältnis des Substrats die Geschwindigkeit des Substratabbaus reduziert zu sein und eine langsamere und dafür möglicherweise effizientere Umsetzung stattzufinden. Auch der langsamere Abbau des Körnerleguminosenstrohs Erbse im Vergleich zum Gerstenstroh deutet auf einen Einfluss des CN Verhältnis hin.

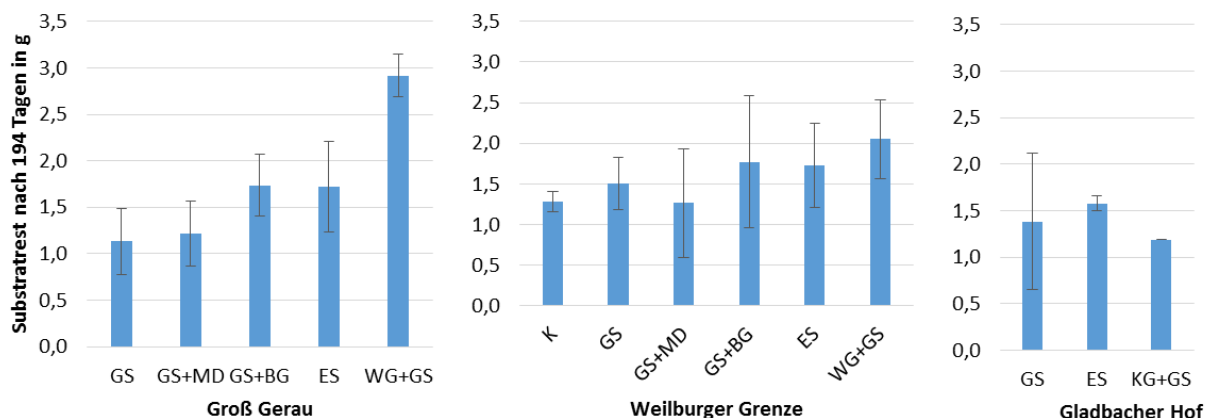


Abbildung 9: Vorhandener Substratrest 2013 nach 194 Tagen am Standort Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof K: Kontrolle; G: Gerstenstroh; GS+MD: Gerstenstroh+ Mineraldünger; GS+BG: Gerstenstroh+ Biogasgülle; ES: Erbsenstroh; WG+GS: Weidelgras + Gerstenstroh; KGKG+GS: Luzernekleegrass + Gerstenstroh.

2014 zeigen die Ergebnisse aus Groß Gerau und der Weilburger Grenze bei den Weidelgras Varianten einen höheren Zersetzungsgrad der Streu, als die Senf Varianten. Am Standort Weilburger Grenze, sowie Gladbacherhof scheinen die Varianten LG, WG, WG+MD, WG+GS und KG, KG+GS nach 112 Tagen fast vollständig zersetzt.

Dies, die Jahreszeit und der grundsätzlich stärkere Substratabbau im Jahr 2014 sind durch die unterschiedlichen Substratarten zu erklären. Die mit Stroh gefüllten Litterbags aus 2013 sind durch

den höheren Anteil an schwer umsetzbaren Verbindungen –vor allem Lignin- abbaustabiler als die 2014 mit schnell umsetzbarer Grüner Biomasse (Senfvarianten, Landsberger Gemenge und Klee gras) gefüllten Litterbags (Springer & Lehner 1951, Nawrath, 1998). Das deutsche Weidelgras scheint am leichtesten zersetzbar.

Bei Betrachtung der Senfvarianten ist in der reinen Senfvariante der geringste Substratabbau zu beobachten, der höchste Abbau findet in der Variante Senf+ Stroh statt. Dazwischen liegen die Varianten Senf+ Mineraldünger und Senf+ Biogasgülle, hier findet in der Variante Senf + Mineraldünger ein stärkerer Substratabbau statt. Auch hier zeigt sich eine höhere Substratstabilität in den Varianten mit engerem CN Verhältnis.

Aufgrund von Mäuseschäden an den Litterbags und dem damit einhergehenden Substratverlust, sowie einer grundsätzlich hohen Verlustgefahr von sehr kleinen Substratanteilen beim Auswaschen der Litterbags ist die Standardabweichung der Ergebnisse sehr hoch und die Ergebnisse kritisch zu bewerten.

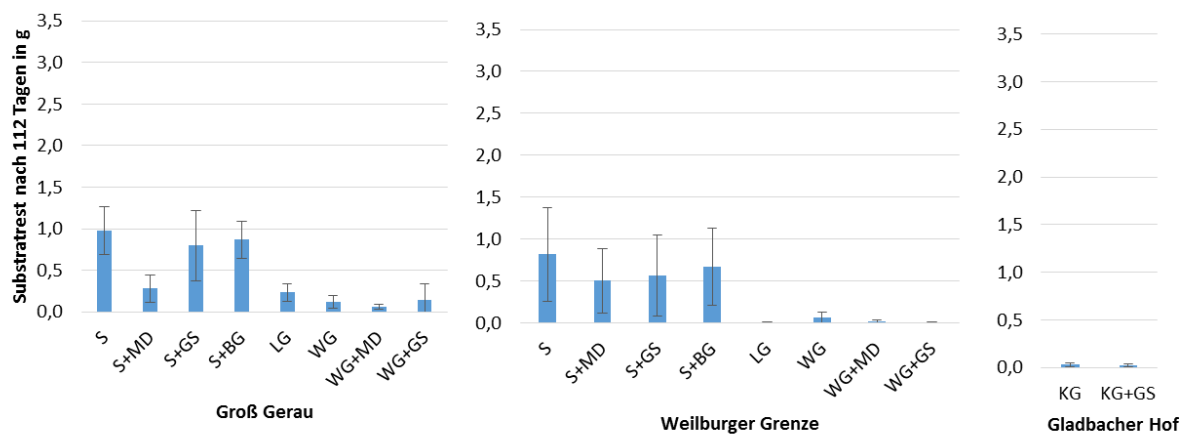


Abbildung 10: Vorhandener Substratrest 2014 nach 112 am Standort Groß Gerau, Weilburger Grenze und Gladbacherhof. S: Senf; S+MD: Senf + Mineraldünger; S+GS: Senf + Gerstenstroh; S+BG: Senf + Biogasgülle; LG: Landsberger Gemenge; WG: Weidelgras; WG+MD: Weidelgras + Mineraldünger; WG+GS: Weidelgras + Gerstenstroh; KG: Luzernekleegrass; KG+GS: Luzernekleegrass+ Gerstenstroh.

Vergleicht man die Ergebnisse der Litterbags aus den Jahren 2013 und 2014 weisen die Strohvarianten aus dem Jahr 2013 eine deutlich höhere Stabilität auf. Diese höhere chemische Rekalzitranz ist auf den hohen Anteil an stabilen Bestandteilen im Stroh wie beispielsweise Lignin zurückzuführen. Somit verläuft der Umsatz von Gründüngung deutlich schneller als der Umsatz von Stroh. Möglicherweise kann jedoch aufgrund des engeren CN Verhältnis mehr Kohlenstoff aus dem Substrat in die organische Bodensubstanz eingebaut werden.

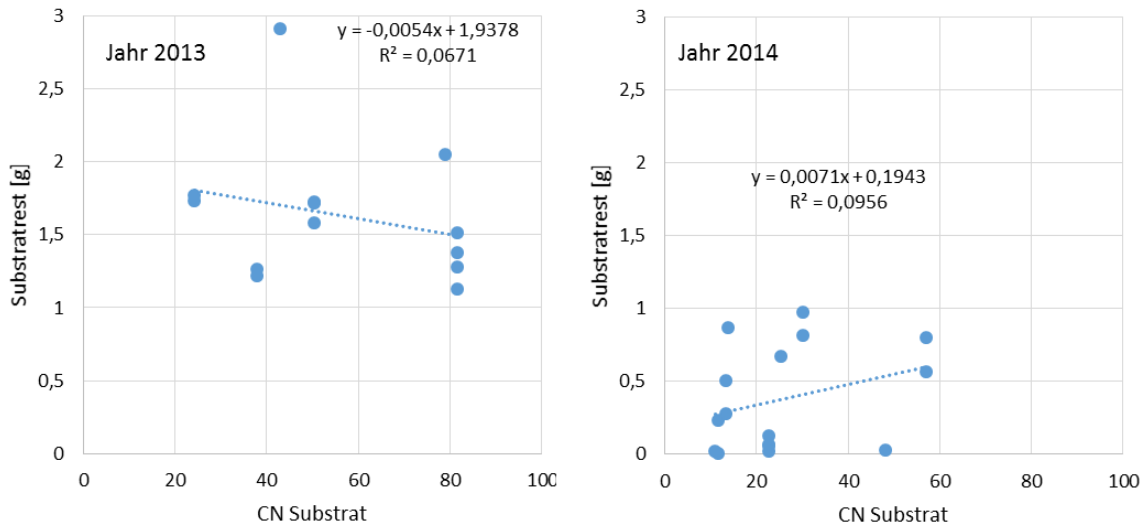


Abbildung 11: Korrelation des Substratabbau in g (2013 und 2014) zu CN Substrat

Abbildung 11 zeigt die Korrelation zwischen Substratrest und CN Verhältnis der Substrate. Die Ergebnisse aus Abbildung 11 lassen aufgrund des sehr geringen Bestimmtheitsmaß keine eindeutige Aussage zu einem Zusammenhang zwischen Substratrest und CN Verhältnis zu.

Im Jahr 2013 ist tendenziell eine negative Abhängigkeit zwischen dem Substratrest und dem CN Substrat zu beobachten. Je enger das CN Verhältnis der Substrate, desto mehr Substratrest ist im Litterbag vorhanden und desto weniger Substrat wurde im Boden umgesetzt. Dies ist in den Gründungsvarianten im Jahr 2014 nicht zu beobachten. Hier nimmt der Substratumsatz mit steigendem CN Verhältnis des Substrats zu.

Es bleibt zu klären ob trotz des schnelleren Abbaus der Gründungsvarianten im Jahr 2014 die Substratreste effizienter in die organische Bodensubstanz eingebaut werden können.

C-Respiration

Die Messung der Bodenatmung lässt Aussagen zu den Düngesubstratverlusten über den atmosphärischen Weg durch CO_2 Freisetzung zu. Es gilt je weniger C-Verluste durch die Bodenatmung erfolgen, desto mehr Kohlenstoff verbleibt zum Aufbau organischer Substanz im Boden.

Die Abbildung 12 zeigt den Einfluss des CN Verhältnis des Substrats auf die Düngesubstratnutzungseffizient (ACUE). Die Düngesubstratnutzungseffizient ist definiert als Bodenatmung je Cinput ($\text{Cresp}/\text{Cinput}$). Verglichen werden die an allen drei Standorten vorkommenden Varianten Gerstenstroh, Erbsenstroh und Weidelgras+ Gerstenstroh. An den Standorten Weilburger Grenze und Gladbacherhof zeigt sich eine positive Korrelation zwischen CN-Verhältnis des Substrats und ACUE. Je enger das CN Verhältnis, desto weniger Kohlenstoff geht (je Cinput) durch Bodenatmung bzw. CO_2 Freisetzung verloren. Somit ist bei engerem CN Verhältnis der Substrate eine höhere relative Rekalzitranz zu erwarten, das heißt eine höhere Widerstandskraft gegenüber dem mikrobiellen Abbau in den ersten 100 Tagen nach dem Düngetermin (von Lützw 2008). Am Standort Groß Gerau (Sandboden) sind die klimatischen Einflüsse vermutlich stärker als der Einfluss der Düngewarianten, so dass keine klare Aussage hinsichtlich des CN Verhältnis getroffen werden kann. Extreme Versuchsbedingungen liegen durch die gegebene Bodenart Sand, die geringeren Niederschläge sowie heißere Sommer vor.

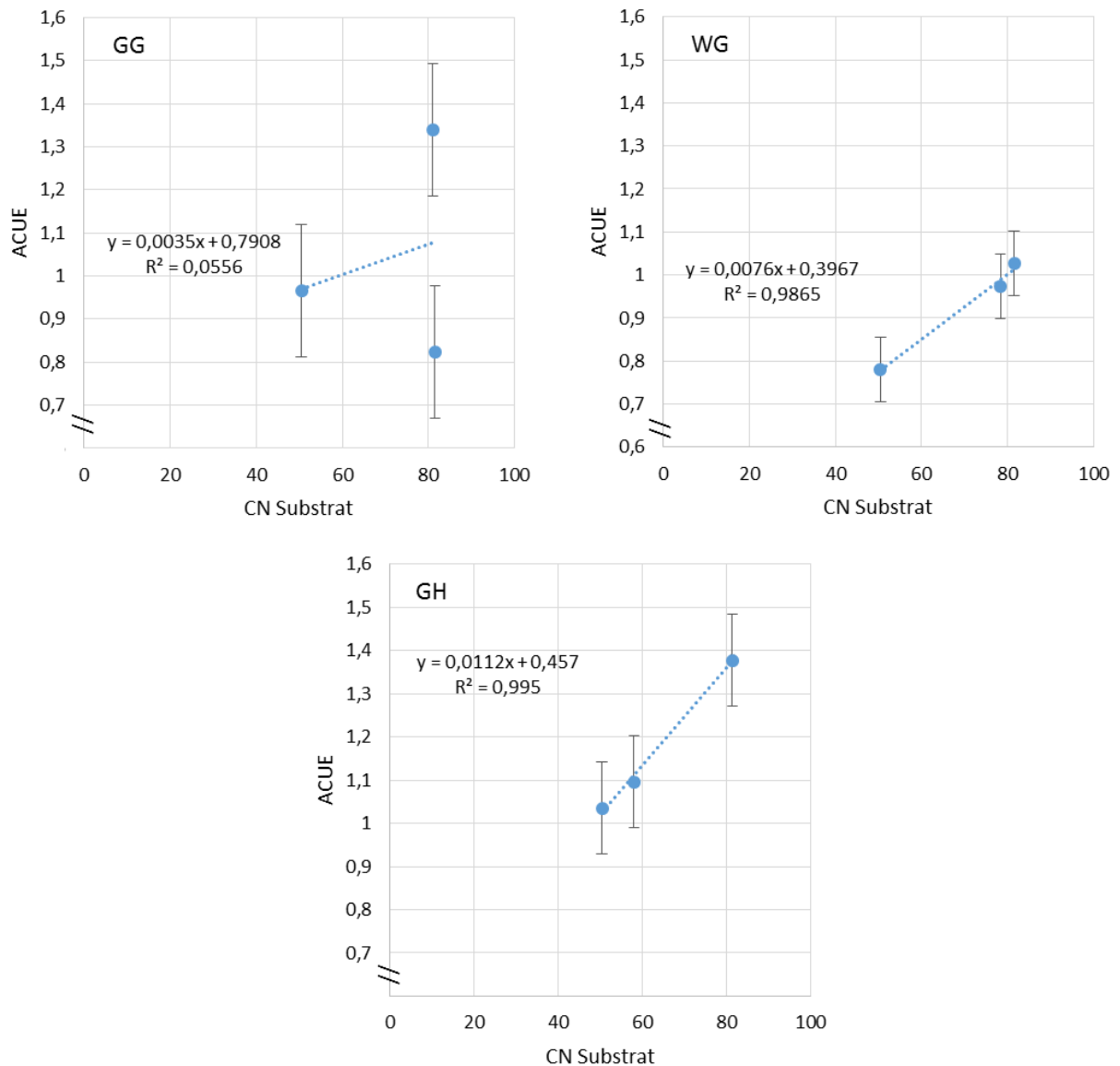


Abbildung 12: Korrelation von Düngesubstratnutzungseffizienz (ACUE=Cresp/Cinput) und dem CN Verhältnis des Substrat

Mikrobielle Biomasse

Die Erfassung der mikrobiellen Biomasse ist ein wichtiges Messelement zur Bestimmung der organischen Bodensubstanz und damit des Humusaufbaus. Nicht nur die Stabilisierung von Kohlenstoff im Boden erfolgt durch ursprünglich in der Pflanzensubstanz vorhandene hochmolekulare Verbindungen, sondern durch die von den Bodenmikroorganismen synthetisierten Proteine und Peptide (Gleixner et al, 1999 u. 2002)

So wird davon ausgegangen, dass die Bodenmikroorganismen primär für die Stabilisierung von organischer Substanz verantwortlich sind und dass der Aufbau neuer, aus mikrobieller Aktivität herrührender Moleküle für die langfristige C-Stabilisierung sorgt und nicht die originalen Verbindungen der dem Boden zugeführte Pflanzensubstanzen (vgl. Chabbi und Rumpel, 2009).

Die Ergebnisse zur Analyse der mikrobiellen Biomasse am letzten Probenahmetermin nach Ernte der Nachfrucht Mais, sind in Abbildung 13 für alle drei Standorte dargestellt. Es fällt auf, dass am biologisch bewirtschafteten Standort Gladbacherhof die höchste mikrobielle Biomasse gemessen wurde. Am Sandstandort Groß Gerau lagen die Messwerte deutlich unter denen der beiden anderen Standorte.

Dies liegt möglicherweise an den extremeren Klimabedingungen des Standorts. Durch die Bodenart Sand, die geringeren Niederschläge sowie heißere Sommer ist eine reduzierte mikrobielle Aktivität zu vermuten. Betrachtet man die Variantenunterschiede unterscheiden sich diese an den drei verschiedenen Standorten nicht signifikant. Zu beobachtende geringe Unterschiede zwischen den Varianten lassen sich nicht im Vergleich der Standorte bestätigen. So ist eine leicht höhere Mikrobielle Aktivität in den Senfvarianten im Vergleich zu den Strohvarianten am Standort Groß Gerau zu beobachten, dies zeigt sich allerdings nicht am Standort Weilburger Grenze. Es ist zu vermuten, dass die mikrobielle Aktivität deutlich stärker von Standort und Klima beeinflusst wird als von der Düngerart.

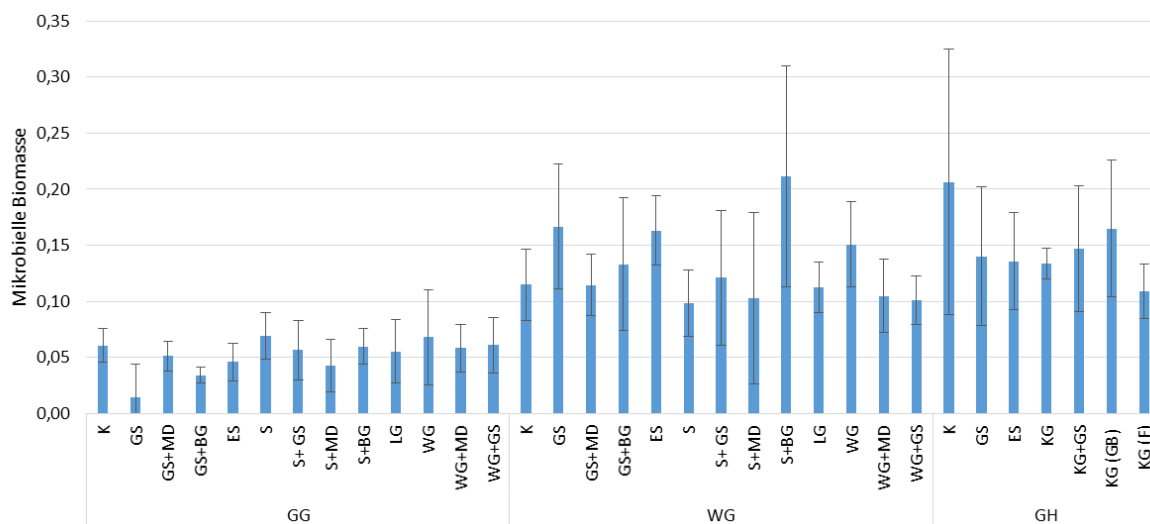


Abbildung 13: Mikrobielle Biomasse an den drei Versuchsstandorten zu Versuchsende nach der Nachfrucht Mais

Produktivität und Umwelt

N-Auswaschungspotential

In Abbildung 14 sind die Nmin Gehalte im Herbst an den drei Versuchsstandorten dargestellt. Der mineralische Stickstoff beschreibt den Npool der pflanzenverfügbar im Boden vorliegt, jedoch über den Winter auch droht ausgewaschen zu werden kann. Standortbedingt liegen die Nmin Gehalte am Standort Weilburger Grenze am höchsten und die Nmin Gehalte am Standort Groß Gerau am niedrigsten. Obwohl keine signifikanten Variantenunterschiede vorliegen, liegen die Nmin Gehalte der Strohvarianten im Vergleich zu den Zwischenfrucht- und Untersaatvarianten tendenziell höher. Dies war zu erwarten, da im Vergleich zu den Strohvarianten in den Zwischenfrucht- und Untersaatvarianten Pflanzenwuchs stattfindet und somit der Stickstoff in den Pflanzen vorliegt während in den Strohvarianten bereits eine Mineralisierung des Düngesubstrats eingesetzt hat. Ein niedriger Nmin Pool im Boden vor dem Winter in den Zwischenfrucht- und Untersaatvarianten ist jedoch sinnvoll, da so die Stickstoff-Verluste im Boden über den Winter reduziert werden (Berger et al 2008).

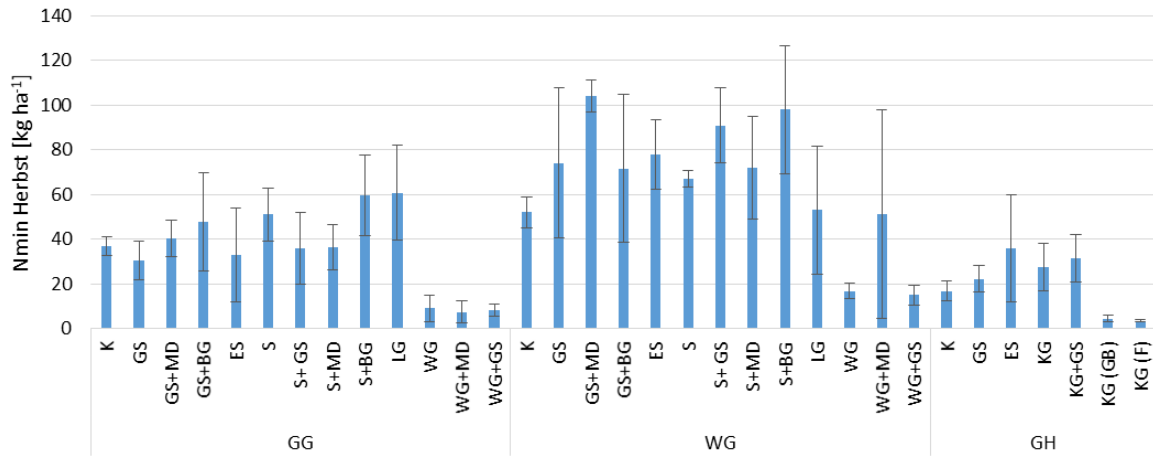


Abbildung 14: Mineralischer Stickstoff im Herbst an den drei Versuchsstandorten.

Da nur in den Strohvarianten der Mineralisierungsprozess im Herbst bereits eingesetzt hat sind in Abbildung 15 die Nmin Gehalte der Strohvarianten korreliert mit dem CN Verhältnis der Düngesubstrate dargestellt. Gut zu sehen ist hier die negative Korrelation zwischen Nmin Gehalt der Strohvarianten im Herbst und dem CN der Düngesubstrate an den beiden Standorten Weilburger Grenze und Gladbacherhof. An den beiden Standorten nimmt die Stickstoffmineralisierung zu je enger das CN Verhältnis und somit je mehr Stickstoff zur Strohdüngung hinzukommt. Es liegt somit eine N Abhängigkeit vor. Am Standort Groß Gerau liegt keine Korrelation zwischen Nmin und CN vor. Hier ist zu vermuten, dass aufgrund der Standortbedingungen wie starke Trockenheit und hohe Temperaturen kaum eine Mineralisierung des Düngesubstrats stattgefunden hat.

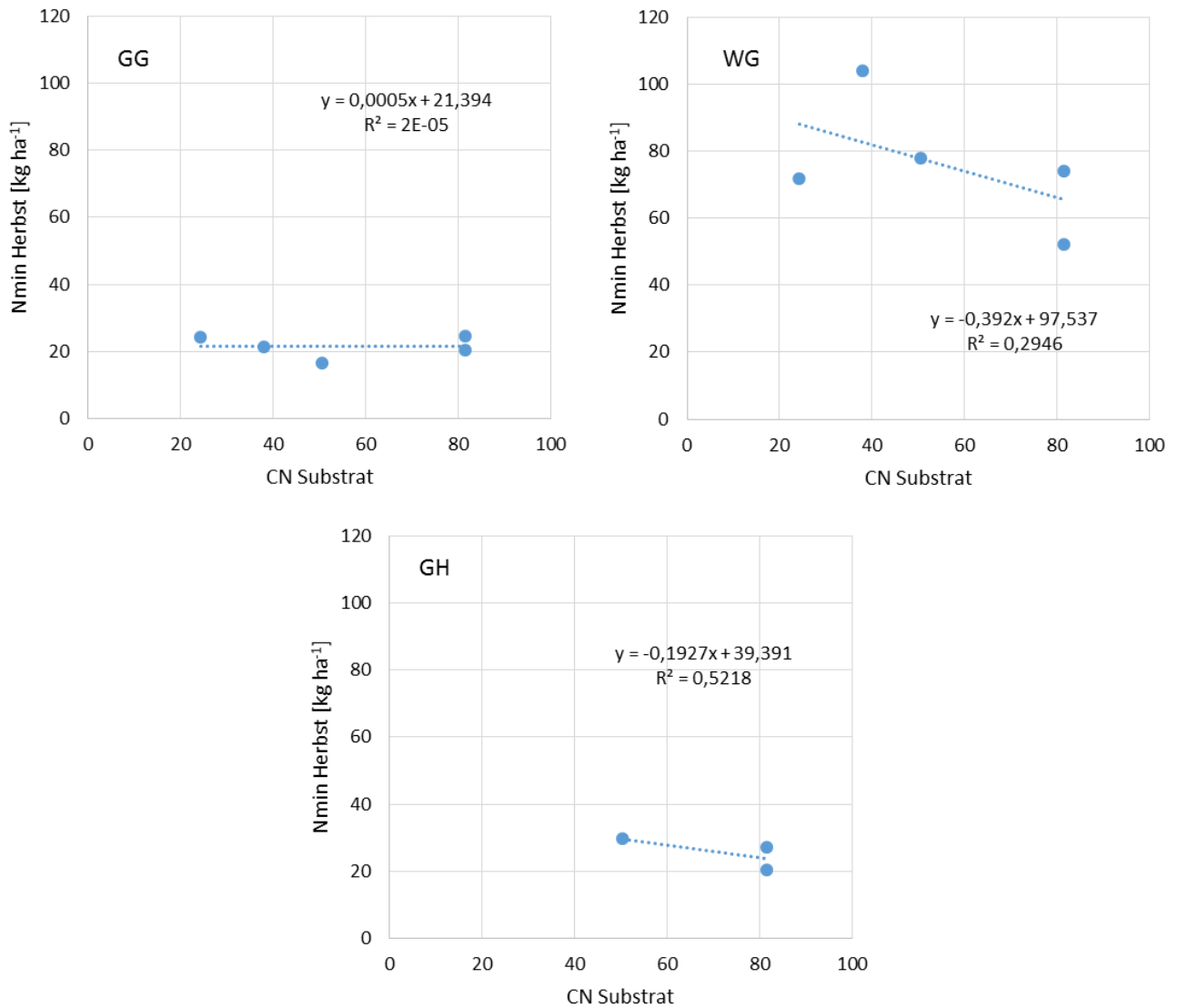


Abbildung 15: Mineralischer Stickstoff im Herbst korreliert mit dem CN Substrat, dargestellt für die Strohvarianten

Maisertrag

In Abbildung 16 sind die Erträge der Nachfrucht Mais an den drei Versuchsstandorten abgebildet. Die Standorte Groß Gerau zu Weilburger Grenze und Groß Gerau zu Gladbacherhof sind signifikant verschieden zueinander.

Während am Standort Groß Gerau einige signifikante Variantenunterschiede zu sehen sind, zeigt der Standort Weilburger Grenze kaum Unterschiede und am Standort Gladbacherhof liegen keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten im Maisertrag vor. Sowohl in Groß Gerau als auch an der Weilburger Grenze schneiden die Weidelgras Varianten signifikant schlechter ab als die ungedüngten Kontrollen, die weiteren Gründüngungsvarianten und die Strohdüngungsvarianten.

Zu vermuten ist hier ein hoher Nährstoffentzug aus dem Boden durch die Weidelgrasvarianten im Herbst und Frühjahr vor der Maisaussaat, so dass keine optimale Nährstoffversorgung des Mais aus dem Boden erfolgen konnte. Auch die Senfvarianten schneiden im Vergleich zu den Strohvarianten etwas schlechter im Ertrag ab. Vermutlich konnte nach Umbruch und Einarbeitung des Senfs im Frühjahr noch keine ausreichende Mineralisierung stattfinden, so dass weniger organische Bodensubstanz für den Mais zur Verfügung steht.

Am Standort Groß Gerau hat, mit Ausnahme der Weidelgrasvarianten, die ungedüngte Kontrollvariante ohne Nährstoffzufuhr den geringsten Maisertrag erbracht (signifikant niedriger bei: Gerstenstroh, Gerstenstroh+ Biogasgülle, Senf+ Biogasgülle und den drei Weidelgrasvarianten). Den höchsten Maisertrag verzeichnen die beiden Varianten Gerstenstroh+ Biogasgülle und Senf+ Biogasgülle sowie die Gründungsvariante Landsberger Gemenge (Signifikant verschieden zu den Varianten: Kontrolle, Erbsenstroh, Senf, Senf+ Gerstenstroh, Senf+ Mineraldünger). Während die Mineraldüngervarianten Gerstenstroh+ Mineraldünger und Senf+ Mineraldünger einen geringeren Maisertrag aufzeigen als die Varianten reines Gerstenstroh- bzw. Senf.

Am Standort Weilburger Grenze ist der Maisertrag der Kontrollvariante nicht signifikant verschieden von den Düngevarianten (bis auf die Weidelgrasvarianten). Der Ertrag der Variante Gerstenstroh+ Mineraldünger liegt im Gegensatz zum Standort Groß Gerau höher als die Variante Gerstenstroh+ Biogasgülle. Die Senfvarianten Senf+ Mineraldünger liegen dagegen wieder wie am Standort Groß Gerau niedriger als die reine Senfvariante.

Tendenziell liegen die Maiserträge an beiden Standorten bei den Strohvarianten etwas höher als bei den Gründungsvarianten. Keine Unterschiede sind in den Varianten am Gladbacherhof zu beobachten. Ein Grund hierfür könnte der notwendige Umbruch der ersten sehr schlecht aufgelaufenen Maisaussaat sein, durch die erneute Bodenbearbeitung vor der zweiten Aussaat kam es möglicherweise zu einer Homogenisierung der Parzellen. Ein weiterer Grund könnte die gute Nährstoff- und Wasserversorgung am Standort Gladbacherhof sein (Bodenzahl 63), so dass die durch den Kurzzeitfeldversuch erfolgten Maßnahmen durch die guten Bodeneigenschaften aufgefangen wurden.

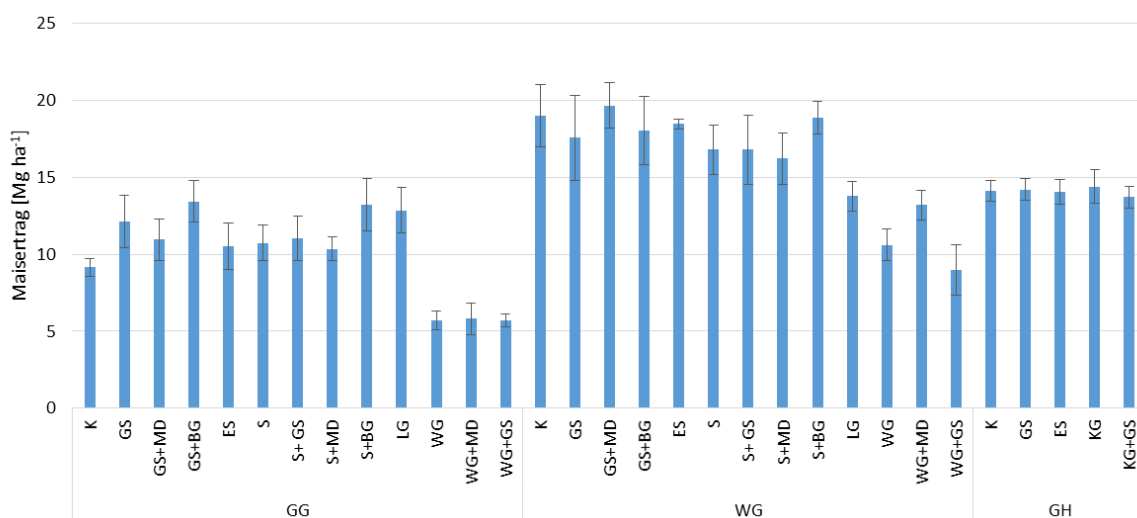


Abbildung 16: Maisertrag in Mg ha⁻¹ zu Versuchsende an den Standorten Groß Gerau (GG), Weilburger Grenze (WG) und Gladbacherhof (GH). K: Kontrolle, GS: Gerstenstroh; MD: Mineraldünger; BG: Biogasgülle; ES: Erbsenstroh, S: Senf; LG: Landsberger Gemenge; WG: Weidelgras; KG: Klee gras

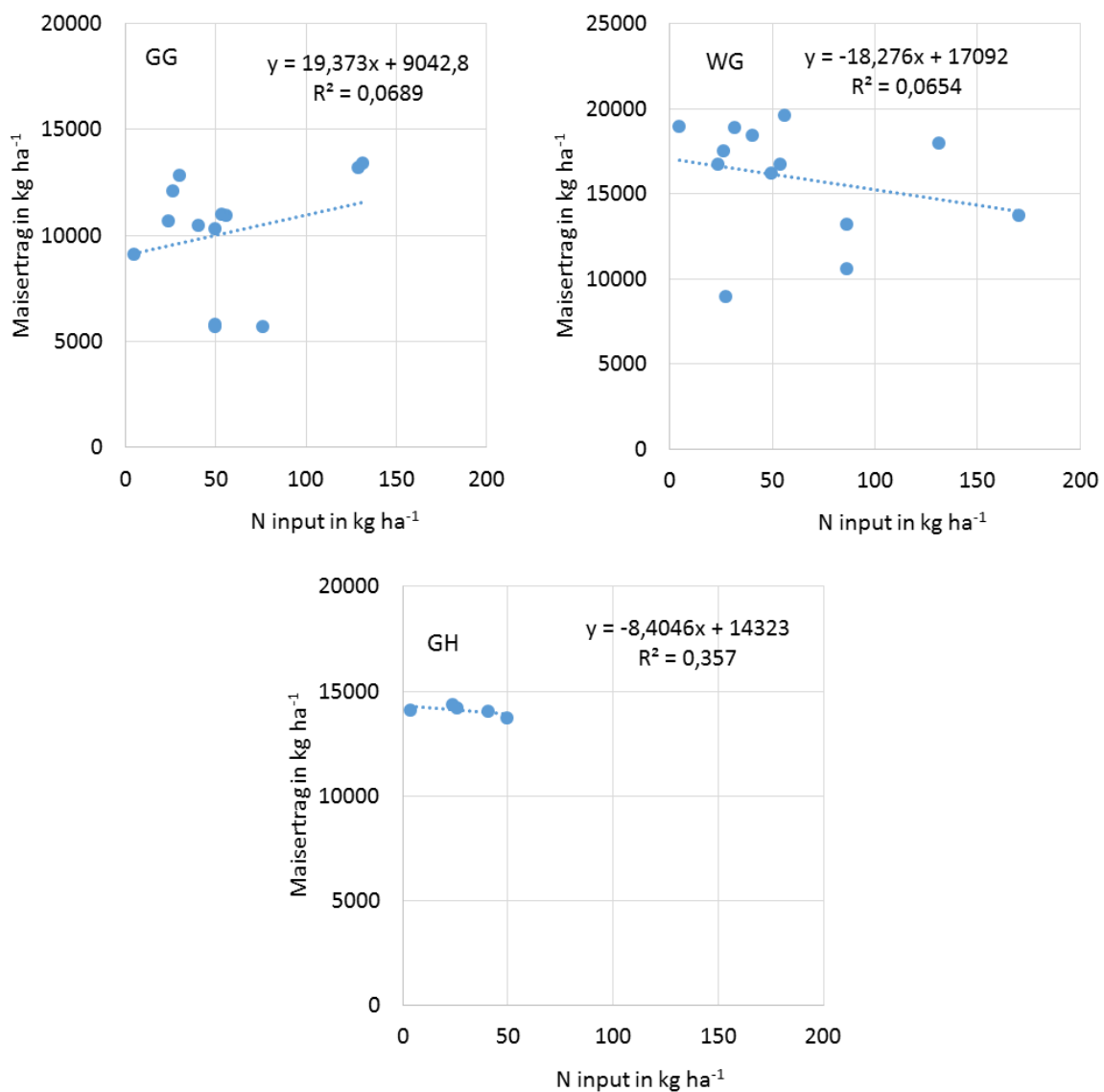


Abbildung 17: Maisertrag in kg ha^{-1} an den drei Standorten korreliert mit dem Ninput in kg ha^{-1} durch Düngung

Abbildung 17 zeigt den Maisertrag an den drei Versuchsstandorten korreliert mit dem Ninput der Düngewarianten. Obwohl das Bestimmtheitsmaß der Korrelationen sehr gering ausfällt sollten die Ergebnisse näher betrachtet werden. Grund für das geringe Bestimmtheitsmaß an den Standorten Groß Gerau und Weilburger Grenze sind die Weidelgrasvarianten. Trotz gutem Ninput konnte scheinbar kaum organische Bodensubstanz in diesen Varianten aufgebaut werden. Vermutlich lagen hier Umbruchtermin und Maisaussaat zu nah beieinander, sodass keine Mineralisierung bzw. Aufbau organischer Bodensubstanz für die Nachfrucht Mais stattfinden konnte. Am Standort Groß Gerau zeigt sich eine positive Korrelation des Maisertrag zum Ninput, je mehr Stickstoff mit den Düngemaßnahmen in den Varianten eingebracht wurde, desto höher ist der Maisertrag. Im Gegensatz dazu zeigen die Standorte Gladbacherhof und Weilburger Grenze eine negative Korrelation zum Ninput. Es ist zu vermuten, dass die Standortbedingungen einen größeren Einfluss auf den Aufbau der organischen Bodensubstanz haben als die N Gaben der verschiedenen Düngewarianten. So findet am Standort Groß Gerau scheinbar eine direkte Umsetzung des Ninput zu pflanzenverfügbarer organischer Substanz statt, während an den Standorten Weilburger Grenze und Gladbacherhof

scheinbar keine entscheidende Rolle für den Maisertrag bzw. den Aufbau pflanzenverfügbarer organischer Substanz.

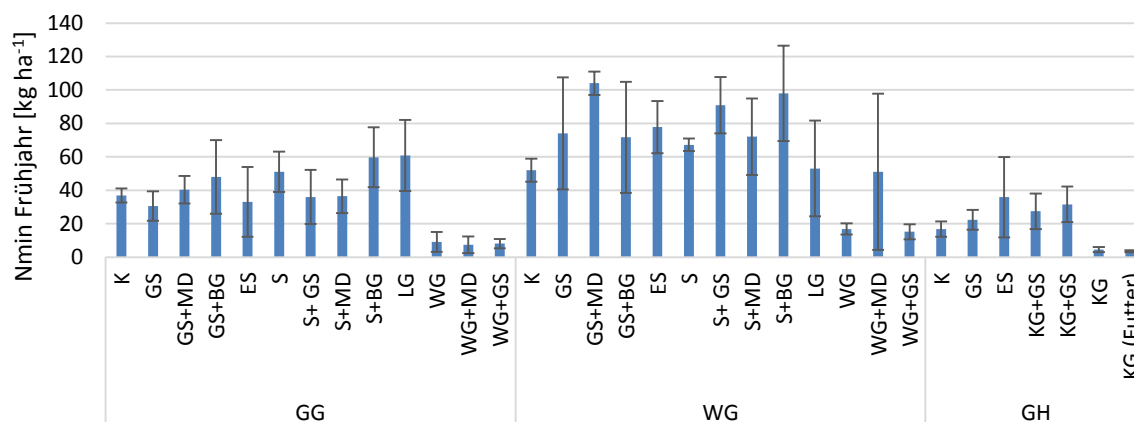


Abbildung 18: Mineralischer Stickstoff (Nmin) im Boden vor der Maisaussaat im Frühjahr 2014

Der mineralische Stickstoff im Boden beschreibt den Npool der für die Nachfrucht Mais im Frühjahr zur Verfügung steht. Aufgebaut wurde der mineralische Stickstoff durch die verschiedenen Düngemaßnahmen. In Abbildung 18 sind die Ergebnisse zum Nmin Gehalt an den drei Versuchsstandorten dargestellt. Im Vergleich zu den Nmin Gehalten im Herbst 2013 steigt der Nmin Gehalt wie auch bei Berger et al. (2008) beschrieben in den Zwischenfruchtvarianten an. Die Untersaatvarianten dagegen weisen weiterhin sehr geringe Nmin Werte auf, dies liegt an dem sehr milden Winter 2013/14. Durch fehlenden Frost konnte das Weidelgras der Untersaaten bis in den Winter hineinwachsen und somit Stickstoff aus dem Boden aufnehmen und in der Pflanze fixieren. Zum Probenahmetermin direkt nach Umbruch der Untersaat hat somit noch keine Mineralisierung bzw. ein Abbau des Substrats stattgefunden.

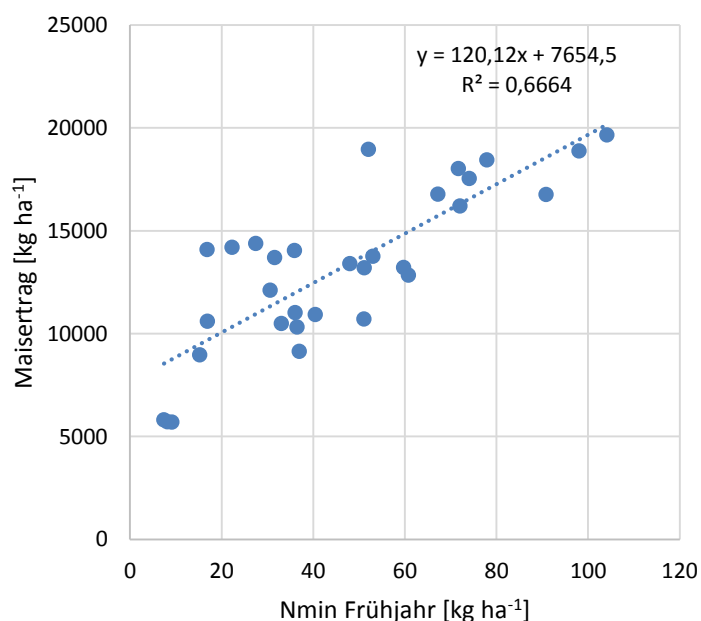


Abbildung 19: Maisertrag in kg ha⁻¹ zu Nmin im Frühjahr nach allen Düngemaßnahmen

Abbildung 19 zeigt die positive Korrelation zwischen Maisertrag und Nmin Gehalt im Frühjahr. Je mehr Nmin im Frühjahr zur Maisaussaat zu Verfügung steht, desto höher liegt der Maisertrag. Somit ist wie zu erwarten der Maisertrag abhängig von der Verfügbarkeit von mineralischem Stickstoff im Boden (Rüegg 1994).

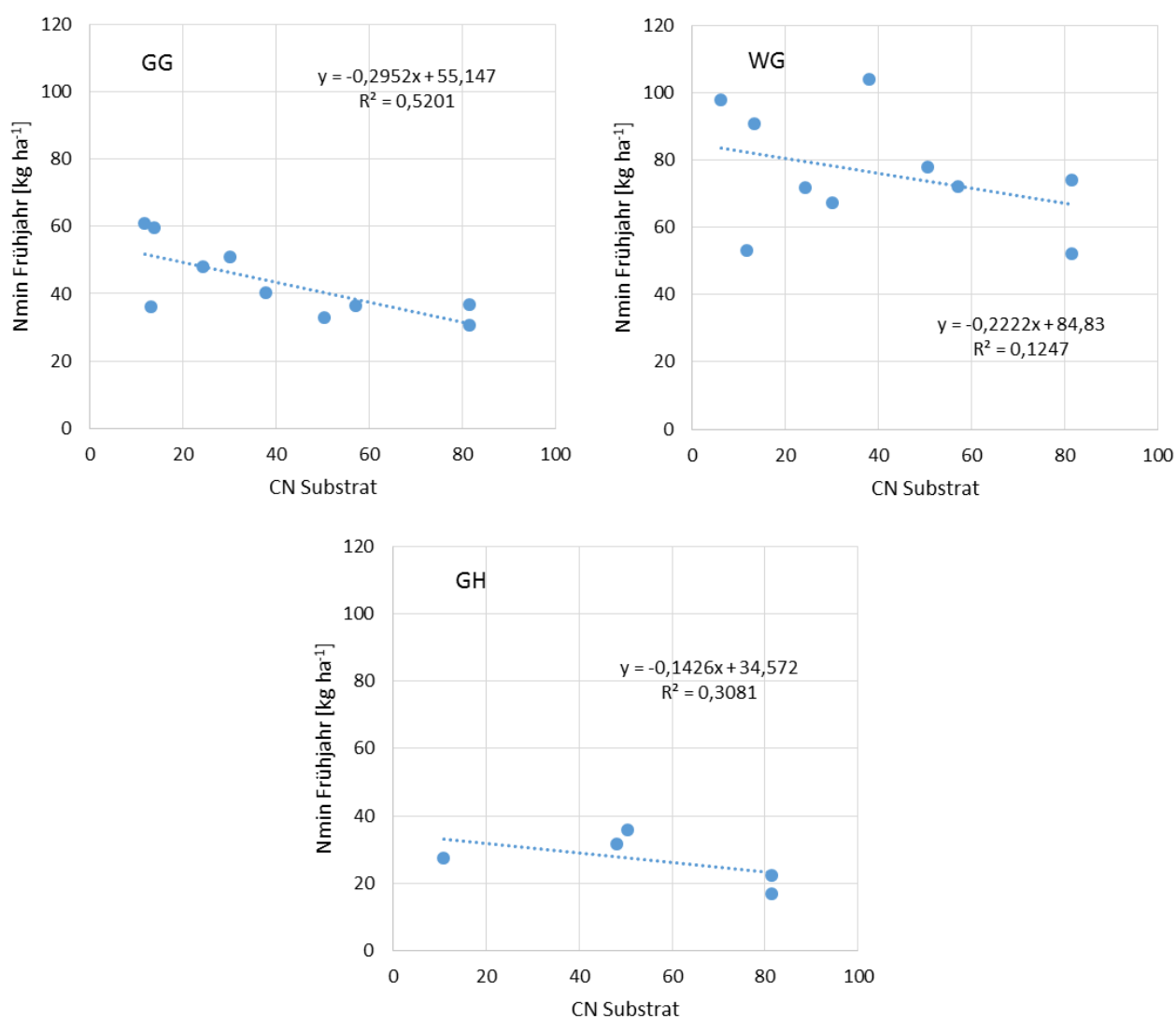


Abbildung 20: Mineralischer Stickstoff im Frühjahr korreliert zu CN Substrat für die Stroh- und Senfdüngervarianten

In Abbildung 20 ist die negative Korrelation zwischen Nmin und CN Verhältnis dargestellt. An allen drei Standorten zeigt sich in den Stroh- und Senfvarianten je enger das CN Verhältnis des Substrat, desto höher liegt der Nmin Gehalt und somit der für die Nachfrucht pflanzenverfügbare N Pool im Boden.

4.3.3.4 Schlussfolgerungen

Abschließend ist festzuhalten, dass eine klare Aussage über die Düngewirkung verschiedener Stroh- und Gründünger trotz der vielen im Feldversuch erfassten Parameter nicht getroffen werden kann. Die These, dass Gründüngung aufgrund des engeren CN-Verhältnisses möglicherweise bessere Leistungen bei der Versorgung der Böden mit organischer Substanz erbringen als Stroh, kann in diesem Feldversuch nicht klar gezeigt werden.

Bei der Betrachtung der Analysen zeigt sich, dass die Untersaat mit deutschem Weidelgras zu keinem erhöhten Aufbau der organischen Substanz bzw. zu einem erhöhten N-Pool im Boden führt. Dies bestätigt die Ergebnisse von Dachler und Köchl (1994), dass nach Stoppelsaat nur eine geringe Ertragssteigerung in der Folgefrucht zu beobachten ist. Sowohl in den Strohvarianten als auch in den Senfvarianten kristallisiert sich heraus, dass die Zugabe von Biogasgülle eine positivere Wirkung aufweist, als eine Mineraldüngergabe. Sowohl der N-Pool im Boden als auch die die Maiserträge steigen an.

Wie auch im Inkubationsversuch unterscheiden sich die Standorte im Feldversuch deutlich voneinander. So schneidet der Sandstandort Groß Gerau in allen untersuchten Parametern schlechter ab als die Standorte Weilburger Grenze und Gladbacherhof. Weiter ist eine stärkere Ausdifferenzierung der Varianten zu beobachten, dies liegt u.a. an der geringeren Nährstoff- und Wasserspeicherkapazität des Standortes Groß Gerau.

Leider konnten die Resultate des Inkubationsversuchs im Feldversuch nicht klar bestätigt werden. So scheinen die Standortbedingungen eine deutlich größere Rolle im Umsatz von Substrat zu spielen, als die N-Verfügbarkeit. Für die Untersuchung der Bedeutung der N-Verfügbarkeit für die Retention von C aus organischen Substraten in Böden waren die Ergebnisse der durchgeführten Kurzzeitfeldversuche nicht eindeutig.

4.4 Modul 4 Humusbilanzierung

4.4.1 Hintergrund und Ziele

In der Humusbilanzierung nach VDLUFA (Ebertseder et al. 2016) wird die Humusersatzleistung von Stroh mit 80-110 Humus-Äquivalenten (Häq) je t Frischmasse bewertet, diejenige von Gründüngung, je nach Trockenmasse, mit 8-16 Häq t FM-1. Bezogen auf die Trockenmasse ergibt sich dadurch eine Leistung von 93-127 Häq t TM-1 für Stroh und von 80 Häq t TM-1 für grüne Pflanzenbiomasse. Stallmist (Referenz Rinder-Rottemist) wird mit 160 Häq t TM-1 bewertet. Stallmist besitzt damit eine doppelt so hohe Humusreproduktionsleistung wie Gründüngung, während Stroh eine Leistung in Höhe von 60-80% derjenigen von Stallmist zugesprochen wird. Vor dem Hintergrund der Ergebnisse aus den Projektmodulen 1 (Metaanalyse) und 3 (Experimentelle Analyse) ist diese Bewertung jedoch differenziert zu betrachten. In der Metaanalyse konnte eine höhere Leistung von Stroh im Aufbau organischer Bodensubstanz nicht bestätigt werden. Im Inkubationsversuch im Modul 3 wurde festgestellt, dass die Retention von C aus eingebrachten Substraten durch die Verfügbarkeit von N limitiert wird. Auch wenn der Feldversuch die Bedeutung biochemischer Substrateigenschaften und anderer Faktoren im kurzfristigen Umsatz der Substrate unterstreicht scheint es gerechtfertigt, stöchiometrische Aspekte bei der Bewertung organischer Substrate in der Humusbilanzierung zu berücksichtigen. Im Modul 4 werden daher Vorschläge zur Bewertung der Leistung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung erarbeitet und diskutiert.

4.4.2 Methodische Vorgehensweise

Es wurde eine Bewertung der Humusreproduktionsleistung von Stroh und grüner Pflanzenbiomasse auf Grundlage der mit den Substraten eingebrachten C- und N-Mengen vorgenommen. Hierfür wurde das Humusbilanzmodell HU-MOD (Brock et al. 2012, Knebl et al. 2015) verwendet. Über die Berücksichtigung der N-Flüsse im System Boden-Pflanze verbindet das Modell eine quantitative Schätzung der Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz mit einer Bewertung der Versorgung der Böden mit organischer Substanz im Hinblick auf Produktivität und Umweltwirkungen. Die Ergebnisse der Modellierung können daher sowohl als Impulse für quantitative Modelle zur

Ermittlung von Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz genutzt werden, wie auch für die Ausweisung von Koeffizientenvorschlägen für die Bilanzierung nach VDLUFA.

Die Parametrisierung des Modells erfolgte mit Bezug auf die Ergebnisse aus den empirischen Untersuchungen (HumuGS-Projektmodule 1 und 3). Eine Evaluation der Modellergebnisse wurde unter Nutzung von Daten aus fünf Langzeit-Feldversuchen in Deutschland durchgeführt.

Aus den Modellierungsergebnissen wurden Koeffizienten für die Anwendung in der Humusbilanzierung nach VDLUFA abgeleitet und ebenfalls unter Nutzung des Datensatzes aus den Langzeit-Feldversuchen überprüft.

4.4.2.1 Modellbeschreibung HU-MOD

Das Modell HU-MOD bewertet Interaktionen zwischen der organischen Substanz im Boden und der Bewirtschaftung in Pflanzenproduktionssystemen. Hierfür werden C- und N-Flüsse im System Boden-Pflanze berechnet und auf dieser Grundlage die Bilanz organischer Substanz im Boden unter Annahme eines konstanten standortspezifischen CN-Verhältnisses geschätzt. Die grundlegende Modellbeschreibung findet sich bei Brock et al. (2012); später erfolgte wesentliche Änderungen im Modellalgorithmus sind in Knebl et al. (2015) dokumentiert. Im Projekt wurde eine Microsoft-Excel®-Umsetzung des Modells genutzt (HU-MODexpert, Version 2016). Die Excel-Anwendung kann auf Anfrage von den Autoren bezogen werden.

Die Ermittlung des Abbaus organischer Bodensubstanz unter Anbausystemen landwirtschaftlicher Nutzpflanzen erfolgt über die Berechnung der Inanspruchnahme von N aus der Mineralisierung organischer Bodensubstanz durch die Kulturpflanzenbestände und nicht-ertragswirksamer weiterer N-Verluste aus dem System:

$$\text{SOMNLOSS} = \text{NPB} - \text{NBNF} - \text{NFTLZ} - \text{NDEP} + \text{NYRN} \quad [1]$$

NPB bezeichnet dabei den Stickstoff in der gesamten Pflanzenbiomasse. Unter Anrechnung von N aus der biologischen Fixierung (NBNF, nur bei Leguminosen), N aus der organischen und mineralischen Düngung (NFTLZ) und N aus der atmosphärischen Deposition wird auf die Aufnahme von bodenbürtigem Stickstoff geschlossen. Im Parameter NYRN werden zusätzlich die nicht direkt ertragswirksamen Mineralisierungsvorgänge organischer Substanz geschätzt.

Die Berechnung der N-Menge in der Pflanzenbiomasse erfolgt unter Berücksichtigung verschiedener Pflanzenkompartimente:

$$\text{NPB} = \text{NMP} + \text{NSP} + \text{NSTB} + \text{NLIT} + \text{NRRZ} \quad [2]$$

Mit NMP als N-Menge im Ernte-Hauptprodukt, NSP als N-Menge im Nebenprodukt (Stroh), NSTB als N-Menge in den Stoppeln, NLIT als N-Menge im Bestandsabfall (Streu) und NRRZ als N-Menge in Wurzeln und Rhizodeposition.

Stickstoffinputs aus der symbiotischen Fixierung spielen nur bei Leguminosenbeständen oder Gemengen mit Leguminosen eine Rolle und werden über Schätzwerte zum Anteil von N_{fix} an N_{gesamt} (Parameter SNF) ermittelt.

$$\text{NSNF} = \text{NPB} * \text{SNF} \quad [3]$$

Die Anrechnung von N aus der organischen und mineralischen Düngung erfolgt über die Schätzung der Mengen von pflanzenverfügbarem N im Anwendungsjahr und dessen Ausnutzung durch die Pflanzen nach:

$$\text{NFTLZ} = \text{NFERT} * \text{NFAV} * \text{NUE} \quad [4]$$

Mit NFERT als N-Gesamtmenge im Dünger, NFAV als potentiell pflanzenverfügbarem N-Anteil im Anwendungsjahr und NUE als Ausnutzungsrate des verfügbaren Stickstoffs.

Die atmosphärische Deposition von N liegt nach Russow und Böhme (2005) in Deutschland zwischen 25...50 kg N ha⁻¹ a⁻¹, während Mulder et al. (2015) eine wesentlich geringere mittlere jährliche Deposition von knapp 15 kg N ha⁻¹a⁻¹ annehmen. Im Modell werden daher zunächst 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ als Standardwert verwendet. Im Modell wird berücksichtigt, dass Deposition auch zu Zeiten ohne bzw. ohne bedeutende N-Aufnahme durch die Pflanzenbestände stattfindet.

Nicht direkt ertragswirksame Mineralisierung von N aus organischer Substanz oder die Aufnahme von Rest-Nmin-Mengen wird im Modell mit dem Parameter NYRN berücksichtigt. Die Parametrisierung von NYRN ist noch nicht abschließend festgelegt und Gegenstand der laufenden Arbeiten zur Weiterentwicklung des Modells. Das Vorgehen im Rahmen des Projektes ist im Abschnitt „Material und Methoden“ beschrieben.

Für die Ermittlung der effektiven Nachlieferung von N für den Aufbau organischer Bodensubstanz werden die C- und N-Mengen geschätzt und über das standortspezifische CN-Verhältnis zueinander in Beziehung gesetzt:

$$\text{N}_{\text{eff}} = \text{MIN}(\text{NSUP}; \text{CSUP} / \text{SITECN}) \quad [5]$$

Dabei umfasst NSUP die Nachlieferung von N mit Ernte- und Wurzelrückständen (NHR) sowie organischen und mineralischen Düngern unter Anrechnung der Aufnahme von Dünger-N durch die Pflanzen und der Auswaschung von mobilem N aus dem System (NREM):

$$\text{NSUP} = \text{NHR} + \text{NREM} \quad [6]$$

$$\text{NREM} = \text{NFERT} * \text{NFAV} - \text{NFERT} * \text{NFAV} * \text{NUE} - \text{NLOSS} \quad [7]$$

Hierbei ist NFERT die mit Düngern insgesamt zugeführte N-Menge, während NFAV den im Anwendungsjahr verfügbaren N-Anteil bezeichnet. Die Effizienz der Pflanzen in der Aufnahme von Dünger-N hängt sowohl von physiologischen Eigenschaften der Pflanzen, wie auch von der Zugänglichkeit des Düngers für die Pflanze ab. Im Modell wird die Fähigkeit der Pflanzen zur Verwertung von Dünger-N im Parameter NUE berücksichtigt, der den maximalen Dünger-N-Anteil am Stickstoff in der Pflanzenbiomasse angibt. Verluste von Dünger-N (NLOSS) werden unter Berücksichtigung des Ausbringungszeitpunktes des Düngers, der Niederschlagsverteilung und der Bodentextur nach Burns (1976) berechnet.

Die Menge des verfügbaren Kohlenstoffs für den Aufbau organischer Bodensubstanz wird analog zur Inanspruchnahme von N für die verschiedenen Kompartimente der Ernte- und Wurzelrückstände berechnet. Weiterhin wird der C-Input mit organischen Düngern (einschl. Stroh- und Gründüngung) berücksichtigt:

$$\text{CSUP} = \text{CSTB} + \text{CLIT} + \text{CRRZ} + \text{CFTLZ} \quad [8]$$

Hier ist CSTB der C-Input mit Stoppeln, CLIT der C-Eintrag aus Bestandsabfall und CRRZ der C-Input mit Wurzeln und Wurzelausscheidungen. Der C-Input mit organischen Düngern wird im Parameter CFTLZ ausgewiesen.

In den Parametern zur C-Nachlieferung wird zunächst der gesamte C-Input mit dem jeweiligen Substrat berücksichtigt. Die Retention von Substrat-C im Boden ist im Modell vom CN-Verhältnis im Boden am jeweiligen Standort abhängig. Es wird angenommen, dass langfristig die Retention von C aus Substraten von der Verfügbarkeit von N für die Boden-Mikroorganismen bestimmt wird und dass das CN-Verhältnis am jeweiligen Standort konstant bleibt:

$$\text{CRETmax} = \text{MIN}(\text{C}; \text{N} * \text{SITECN}) \quad [9]$$

Die maximale Retention von CRETmax kann demnach sowohl durch C, wie auch durch N limitiert sein. Als Referenz wird dabei das CN-Verhältnis in der bewerteten Bodenschicht am Standort herangezogen.

4.4.2.2 Parametrisierung

Im Modell HU-MOD wird die Retention von C aus organischen Substraten im Boden in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis des Substrates sowie dem CN-Verhältnis im Boden am jeweiligen Standort berechnet. Mechanistisch ausgedrückt bedeutet dies (unter Vernachlässigung weiterer N-Quellen):

$$\text{CRetmax} = \text{CNSite} \times \text{CNSubstrat}^{-1} \quad [10]$$

Es wird angenommen, dass maximal so viel C im Boden behalten werden kann, dass das CN-Verhältnis am Standort unverändert bleibt. Zu berücksichtigen sind dabei jedoch zwei gegenläufige mögliche Einflüsse:

- a) N aus den Substraten wird mineralisiert und kann von Pflanzen aufgenommen oder aus dem System verlorengehen. CNSubstrat wird dadurch tatsächlich weiter, als im Algorithmus angenommen.
- b) Es kann N aus anderen Quellen zur Verfügung stehen. CNSubstrat ist in diesem Falle tatsächlich enger, als im Algorithmus angenommen.

Zur Berechnung der effektiven C-Retention wird daher zunächst die im Anwendungsjahr aus den Substraten mineralisierte N-Menge geschätzt. Um den Bedarf an Bodendaten im Modell mit Blick auf die Praxisanwendbarkeit gering zu halten, wird die Mineralisierung von auf Grundlage der Angaben bei Gutser und Ebertseder (2005) berechnet. Hierfür wurde aus den bei Gutser und Ebertseder (2005) veröffentlichten Daten eine funktionale Beziehung berechnet (Abb. 21). Allerdings beziehen sich die Autoren auf die Mineräldüngeräquivalenz organischer Düngersubstrate, nicht auf die Mineralisierung der Substrate insgesamt. Im Modell wird die ermittelte N-Menge jedoch vereinfachend mit der mineralisierten N-Menge gleichgesetzt. Die effektive C-Retentionsrate ist daher:

$$\text{CRETeff} = \text{CNSite} / [\text{CNSubstrat} / (1 - 1,6674 \times \text{CNSubstrat}^{-0,768})] \quad [11]$$

Das Vorhandensein weiterer N-Quellen wird im Modell dahingehend berücksichtigt, dass die nicht von Pflanzen aufgenommenen oder aus dem System verlorengegangenen C- und Mengen aus Düngungsmaßnahmen und Ernte- und Wurzelrückständen im Anbaujahr addiert werden und das CN-Verhältnis der Summen bei der Berechnung der effektiven C-Retention berücksichtigt wird. Damit wird auch den Ergebnissen des Inkubationsversuchs Rechnung getragen, wonach eine Einengung des

CN-Verhältnisses im Substrat- bzw. Substrat-Boden-Gemisch zu einer höheren C-Retention führte (vgl. Abbildung 21).

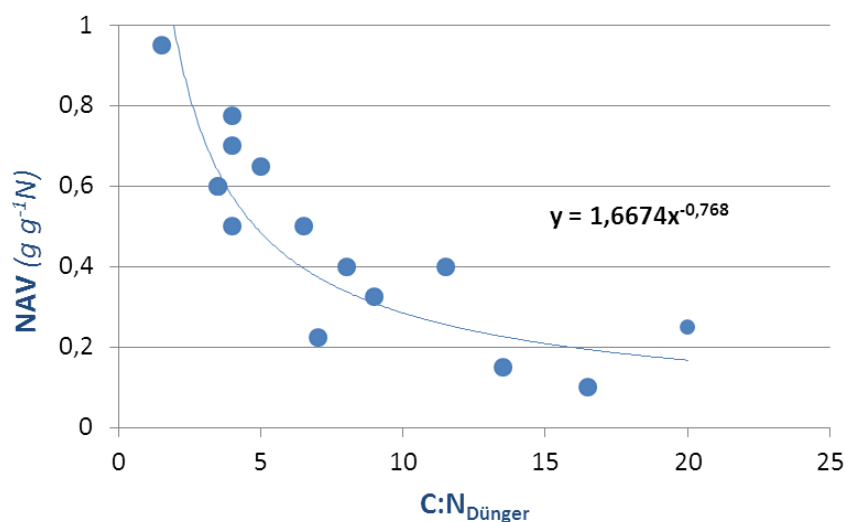


Abbildung 21 Berechnung der N-Verfügbarkeit (NAV=N available) aus der Mineralisierung organischer Dünger in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate auf Grundlage der Angaben bei Gutser & Ebertseder (2005).

4.4.2.3 Ausweisung von Koeffizienten für die Humusbilanzierung nach VDLUFA

Das Modell HU-MOD basiert auf dem von Hülsbergen (2003) weiterentwickelten Ansatz von Leithold (1982, 1991), mit dem eine reproduzierbare Berechnung von Humusbilanzkoeffizienten für die ROS-Methode von Asmus und Herrmann (1977) ermöglicht wurde. Die ROS-Methode und Koeffizienten-Modifikationen auf Grundlage des Ansatzes von Leithold bildeten die Grundlage für die erste Version der VDLUFA-Humusbilanzmethode (Körschens et al. 2004). Bei der Überarbeitung der VDLUFA-Humusbilanzmethode (Ebertseder et al. 2014) wurden bereits Modellierungsergebnisse mit HU-MOD sowie dem im Betriebsbilanzierungsmodell REPRO implementierten Ansatz von Hülsbergen (2003) berücksichtigt. Aufgrund der Verknüpfung mit der N-Bilanz im System Boden-Pflanze in den Modellen kann der Bedarf von Kulturpflanzenbeständen an organischer Düngung ermittelt werden. Gleichzeitig können potentiell umweltbelastende überschüssige N-Einträge mit der organischen Düngung erkannt werden. Das Bewertungsschema in der VDLUFA-Humusbilanzmethode kann so im Prinzip auch direkt auf mit den beiden Modellen berechnete Humusbilanzen angewendet werden. Umgekehrt können mit den Modellen berechnete Werte zum Humusbedarf oder Humusersatz im Prinzip direkt als Koeffizienten in die VDLUFA-Humusbilanzmethode aufgenommen werden. Mit Blick auf Vorschläge zur Veränderung einzelner Koeffizienten zum Humusbedarf von Fruchtarten oder zum Humusersatz durch organische Dünger ist allerdings zu berücksichtigen, dass die Werte relativ zu den Werten einer bestehenden und nicht veränderten Referenz und nicht in der absoluten, von den Modellen ausgehenden Höhe verändert werden. Im vorliegenden Fall wurde der Stallmist als Referenz verwendet:

$$\text{HBKxVDLUFA} = \text{HBKxHUMOD} / \text{HBKFYMHUMOD} * \text{HBKFYMVDLUFA} \quad [12]$$

Der vorgeschlagene Koeffizient für die VDLUFA-Humusbilanzmethode weist damit das gleiche Verhältnis zum Stallmist-Koeffizienten auf, wie in der Berechnung beider Koeffizienten nach HU-MOD, auch wenn die absoluten Werte bei VDLUFA und im Modell voneinander abweichen können.

4.4.2.4 Evaluation

Die Evaluation der Modellergebnisse erfolgte unter Nutzung von Daten aus Langzeit-Feldversuchen der IOSDV-Serie an den Standorten Puch (Bayern), Rauschholzhausen (Hessen) und Speyer (Rheinland-Pfalz), sowie aus dem Langzeit-Feldversuch L28 an den Standorten Spröda und Methau (beide Sachsen). In den Versuchen wurden in 2015 nach Getreide Bodenproben aus der Bodenschicht 0-30 cm (Ap-Horizont) in ausgewählten Versuchsvarianten entnommen. Mit der Auswahl der Varianten (Tabelle 6) soll der Vergleich von Stroh- bzw. kombinierter Stroh- und Gründüngung mit Rinder-Stallmist und einer ungedüngten Kontrolle ermöglicht werden. Innerhalb dieser Versuchsvarianten zur organischen Düngung wurden jeweils die Untervarianten ohne mineralische N-Düngung und mit mittlerer mineralischer N-Düngung einbezogen. Es wurden die C- und N-Gehalte in den Bodenproben nach DIN ISO 10694 (Corg) und 13878 (Nt) analysiert. Weiterhin wurden das mittlere Ertragsniveau der Nicht-Leguminosen, die N-Bilanz und die Humusbilanz nach HU-MOD (Brock et al. 2012) sowie VDLUFA (Ebertseder et al. 2014) in den Varianten berechnet.

Tabelle 6: Beschreibung der einbezogenen Langzeit-Feldversuche und Versuchsvarianten im HumuGS-Projekt.

Standort, Versuch	Anlagejahr	Fruchtfolge*	Düngung*
Methau (SN), L28	1966	Getreide- Kartoffel Zuckerrübe	Kontrolle (Ohne Dg.), Stallmist, Stroh; jeweils 2 Stufen der min. N-Dg.
Puch (BY), IOSDV	1984	Silomais/Zuckerrübe- Winterweizen- Wintergerste	Kontrolle (Ohne Dg.), Stallmist, Stroh+Zwischenfrucht; jeweils 2 Stufen der min. N-Dg.
Rauschholzhausen (HE), IOSDV	1984	Silomais/Zuckerrübe- Winterweizen- Wintergerste	Kontrolle (Ohne Dg.), Stallmist, Stroh+Gründüngung; jeweils 2 Stufen der min. N-Dg.
Speyer (RLP), IOSDV	1984	Zuckerrübe- Winterweizen- Wintergerste	Kontrolle (Ohne Dg.), Stallmist, Stroh+Gründüngung; jeweils 2 Stufen der min. N-Dg.
Spröda (SN), L28	1966	Getreide- Kartoffel Zuckerrübe	Kontrolle (Ohne Dg.), Stallmist, Stroh; jeweils 2 Stufen der min. N-Dg.

*bezieht sich nur auf die einbezogenen Varianten.

Da keine Zeitreihendaten vorlagen, war eine quantitative Bewertung der Modellierungsergebnisse leider nicht möglich. Stattdessen wurde in Anlehnung an das Vorgehen bei Brock et al. (2012) die Fähigkeit des Humusbilanzmodells zur Abbildung der Ausdifferenzierung der Versuchsvarianten bei den Boden-C- und -N-Gehalten mittels Regressionsanalyse bewertet. Zum Ausgleich von Niveauunterschieden in den Bodenwerten zwischen den Standorten wurden alle Parameter für diese Auswertung nach Zar (2010) z-standardisiert:

$$z = (x_i - \text{mean}) / SD \quad [13]$$

Die Standardisierung bewertet die Einzelwerte der Varianten relativ zum Versuchsmittelwert und der versuchsbezogenen Standardabweichung.

Zur Evaluation der Koeffizientenvorschläge für Stroh und Gründüngung wurden Humusbilanzen für die Versuchsvarianten nach VDLUFA unter Nutzung der bisherigen sowie der neu vorgeschlagenen Koeffizienten berechnet. Anschließend wurde, analog zum Vorgehen bei der Evaluation der Modellierungsergebnisse von HU-MOD, die Übereinstimmung der Ausdifferenzierung der Versuchsvarianten bei Corg- und Nt-Gehalten auf der einen und den Humusbilanzen auf der anderen

Seite analysiert. Weiterhin wurde überprüft, inwiefern die vorgeschlagene Anpassung der Koeffizienten für Stroh und Gründüngung die Fähigkeit der Methode verbessert, eine unzureichende bzw. überschüssige Humusversorgung zu identifizieren. Für die Bewertung der Identifikation einer unzureichenden Humusversorgung wurde die Ausdifferenzierung der Versuchsvarianten bei den Humusbilanzen derjenigen beim Ertragsniveau der Nichtleguminosen gegenübergestellt. Die Ertragsdaten wurden hierfür wiederum z-standardisiert (s.o.). Die Auswirkung der vorgeschlagenen Koeffizientenanpassung auf die Fähigkeit der VDLUFA-Methode zur Identifikation einer überschüssigen Versorgung mit organischer Substanz wurde anhand des Zusammenhangs zwischen Humus- und N-Bilanzsalden überprüft. Hierfür wurden jeweils die absoluten Werte verwendet, da der Humusbilanzsaldo eine reale Gefahr von N-Verlusten ausdrücken soll und hierbei keine standörtliche Differenzierung vorgesehen ist. Ein Ausgleich von Niveauunterschieden in den Werten zwischen unterschiedlichen Standorten ist daher nicht notwendig.

4.4.3 Ergebnisse und Diskussion

4.4.3.1 Bewertung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung

Abbildung 22 zeigt die Bewertung organischer Substrate durch HU-MOD im Vergleich mit den Ergebnissen des HumuGS-Inkubationsversuches (Kap. 4.3.6) und der Bewertung von Stroh und Gründüngung in der VDLUFA-Methode. Die in Abbildung 22 a und b ausgewiesenen Werte gelten für Standorte mit einem CN-Verhältnis im Boden von 10,7 (Abb. 22a: Sandboden) bzw. 8,15 (Abb. 22b: Lehmboden), da entsprechende Böden im Inkubationsversuch verwendet wurden. Abbildung 22 zeigt die Bewertung nach HU-MOD und VDLUFA für ein standardisiertes Boden-CN-Verhältnis von 10:1.

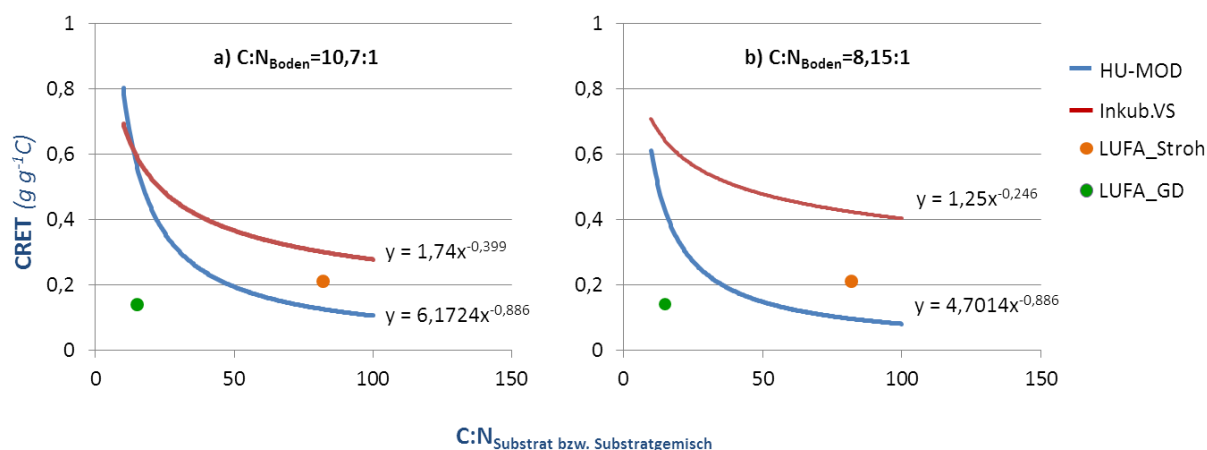


Abbildung 22 (a,b): Retentionsrate von Substrat-C (CRET) aus organischen Substraten und Substratgemischen in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate und dem CN-Verhältnis im bewerteten Boden. a=Sandboden, b=Lehmboden. HU-MOD=Modelliert mit HU-MOD, Inkub.VS=berechnet mit Daten aus dem HumuGS-Inkubationsversuch (Kap. 4.3). LUFA_[Stroh, GD]=Humusbilanzkoeffizienten für Stroh bzw. Gründüngung nach VDLUFA (Ebertseder et al. 2014).

Sowohl in der Modellierung als auch im Inkubationsversuch wird, aufgrund der negativen Korrelation mit dem CN-Verhältnis der Substrate bzw. Substrat-Gemische, im Gegensatz zu der Bewertung bei VDLUFA ein höherer CRET-Wert für Gründüngung ermittelt als für Stroh. Mit dem Modell wird allerdings eine wesentlich geringere Retention von Substrat-C berechnet, als im Inkubationsversuch beobachtet. Dies deutet auf eine mögliche Unterschätzung des Vorhandenseins anderer N-Quellen durch das Modell hin. Andererseits muss berücksichtigt werden, dass im Inkubationsversuch keine

erheblichen N-Verluste aus dem System auftraten, wodurch die Situation im Feld sicher nicht zutreffend wiedergegeben wird.

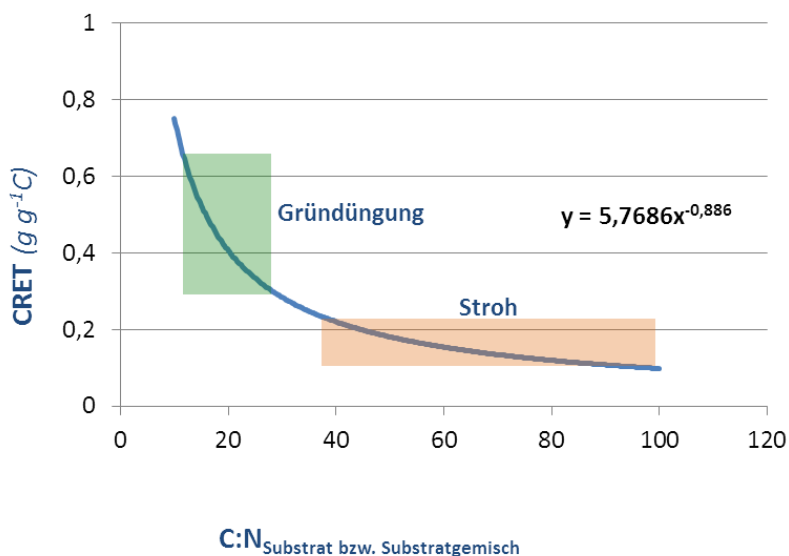


Abbildung 23: Retentionsrate von Substrat-C (CRET) aus organischen Substraten und Substratgemischen in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate bei einem Standard-CN-Verhältnis im Boden von 10:1. HU-MOD=Modelliert mit HU-MOD, HU-MOD_[Stroh, GD]=CN-Wertebereich der Substrate allein oder in Mischung mit anderen Substraten und Mineraldünger im HumuGS-Feldversuch und damit abgedeckter Bereich der CRET-Werte. LUFA_[Stroh, GD]=Humusbilanzkoeffizienten für Stroh bzw. Gründüngung nach VDLUFA (Ebertseder et al. 2014).

Bei der Bewertung von Stroh sind der niedrige N-Gehalt und das entsprechend weite CN-Verhältnis für die geringe berechnete C-Retention ausschlaggebend. Wird das CN-Verhältnis durch andere N-Gehalte im Stroh oder die Verfügbarkeit weiterer N-Quellen verengt, führt dies zu einer Erhöhung der berechneten potentiellen C-Retention im Modell. Im HumuGS-Feldversuch wurde das CN-Verhältnis der Strohdüngung durch 30 kg Mineraldünger-N ha⁻¹ von 80,1 auf 38,2 eingengt. Dadurch ergibt sich nach Abbildung 23 eine C-Retention von 0,24. Nach Standardisierung mit Bezug auf die Bewertung von Stallmist in der VDLUFA-Methode führt dies zur Ausweisung einer Humusersatzleistung von 74 Häq t FM⁻¹. Der Wert liegt nahe an der Untergrenze des in der VDLUFA-Methode angegebenen Wertebereichs für Stroh (80-110 Häq t FM⁻¹), bleibt aber noch außerhalb dieser Spannweite.

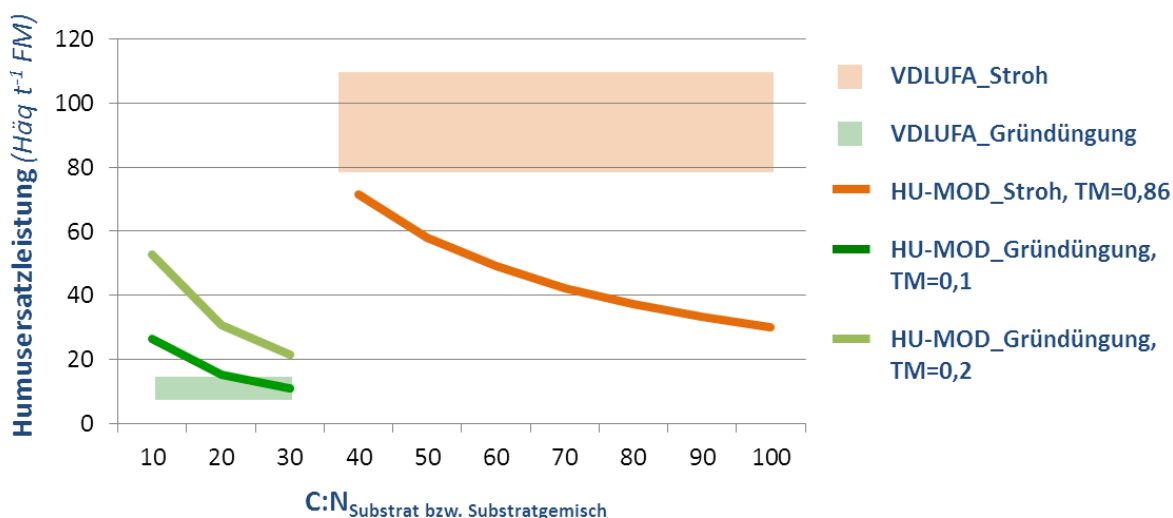


Abbildung 24: Humusreproduktionskoeffizienten für Stroh und Gründüngung nach VDLUFA (2014) und HU-MOD in Abhängigkeit vom CN-Verhältnis der Substrate bzw. Substratgemische.

Nach den Ergebnissen der Modellierung und des HumuGS-Inkubationsversuches ist weiterhin eine erhebliche Retention von C aus Gründüngung anzunehmen. Allerdings ist auch hier die breite Streuung im CN-Verhältnis zu berücksichtigen. Gutser und Ebertseder (2005) geben für Gründüngung ein CN-Verhältnis von 10...30:1 an. Im HumuGS-Feldversuch wies Senf ein CN-Verhältnis von ca. 30:1 auf, während das Landsberger Gemenge mit 10,4:1 am anderen Ende der Spannweite lag. Aus den Werten ergeben sich in der Modellierung C-Retentionskoeffizienten von 0,29...0,71 g g C⁻¹ (vgl. Abb. 23). Dies entspricht bei den VDLUFA-Bilanzkoeffizienten einer Spannweite von 10,8...52,7 Häq t FM⁻¹. Die sehr große Spannweite wird dabei nicht allein durch die Variation im CN-Verhältnis bedingt, sondern zudem durch die ebenfalls erhebliche Streuung bei den Trockenmassegehalten unterschiedlicher Gründüngungssubstrate. In Anlehnung an den Geltungsbereich der Koeffizienten in der VDLUFA-Methode werden in Abbildung 24 Werte für Trockenmassegehalte von 10...20% dargestellt. Abfrierende oder spät geerntete/umgebrochene Zwischenfrüchte können aber durchaus noch höhere Trockenmassegehalte aufweisen.

4.4.3.2 Ausweisung von Koeffizienten für die Humusbilanzierung nach VDLUFA

Vor dem Hintergrund der oben dargestellten Ergebnisse wurden für die Humusbilanzierung in den Langzeit-Feldexperimenten differenzierte Werte für Stroh und Gründüngung gemäß Tabelle 7 vorgeschlagen. Die Humusreproduktionsleistung von Stroh wird demnach gegenüber den aktuellen Werten in der VDLUFA-Humusbilanzmethode erheblich geringer bewertet, sofern es sich nicht um N-reiches Stroh handelt oder eine weitere N-Quelle zur Verfügung steht. N-reiches Stroh (v.a. Körnerleguminosenstroh, Rapsstroh) wird erheblich viel günstiger bewertet, wobei der in der VDLUFA-Methode angegebene Wertebereich der Koeffizienten dennoch nicht erreicht wird (vgl. Abb. 24).

Auch bei der Gründüngung wird eine differenzierte Bewertung nach dem CN-Verhältnis der Substrate vorgenommen (Tabelle 7). Für Gründüngung mit vergleichsweise geringen N-Gehalten beträgt die Humusersatzleistung demnach, je nach Trockenmassegehalt, 10,8...20,5 Häq t⁻¹ FM, für Substrate mit engem CN-Verhältnis 15,3...30,7.

Tabelle 7: Vorschlag für eine Neubewertung von Stroh und Gründüngung in der VDLUFA-Humusbilanzmethode in Abhängigkeit von der N-Verfügbarkeit als Rahmenbedingung.

Org. Düngesubstrat	TM-Gehalt	Humusbilanzkoeffizient (Häq t ⁻¹ FM)
Stroh, N-arm (Getreide), in Anbausystemen mit geringer N-Zufuhr (z.B. Ökolandbau, nicht-ökologischer Landbau mit niedrigem N-Düngungsniveau)	0,86	37
Stroh, N-arm, in Anbausystemen mit höherer N-Zufuhr, oder Stroh, N-reich (Raps, Körnerleguminosen)	0,86	71
Gründüngung, N-arm (ungedüngte Nicht-Leguminosen)	0,10	11
Gründüngung, N-arm (ungedüngte Nicht-Leguminosen)	0,20	22
Gründüngung, N-reich (gedüngte Zwischenfrüchte, Leguminosen, Rübenblatt)	0,10	19

Gründung, N-reich (gedüngte Zwischenfrüchte, Leguminosen, Rübenblatt)	0,20	39
---	------	----

4.4.3.3 Evaluation

Die Differenzierung der C- und N-Gehalte im Oberboden zwischen den Varianten innerhalb der einbezogenen Langzeit-Feldversuche kann mit dem Modellansatz nachvollzogen werden (Abb. 25a,b). Da keine Daten für die Berücksichtigung differenzierter C- und N-Ausgangsgehalte oder für die Berechnung von Trends im Projekt verfügbar waren, kann die erhebliche nicht mit dem Modell erklärbare Varianz sowohl durch Unzulänglichkeiten in der Modellparametrisierung, wie auch durch eine unzureichende Informationsqualität der Datenbasis bedingt sein.

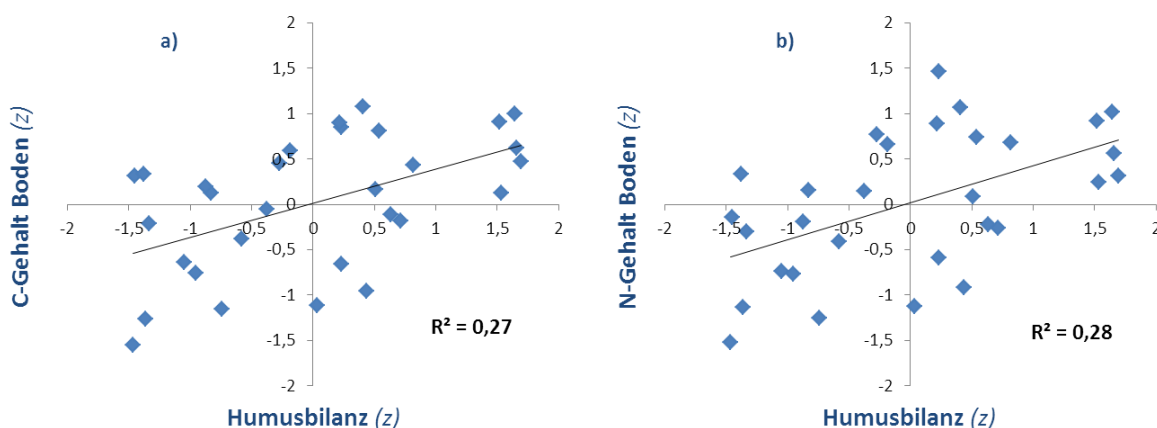


Abbildung 25(a,b): Übereinstimmung der Ausdifferenzierung von Humusbilanzsalden und a)Boden-C-Gehalten bzw. b)Boden-N-Gehalten zwischen ausgewählten Varianten von fünf Langzeit-Feldversuchen in Deutschland. Werte z-standardisiert zum Ausgleich von Niveauunterschieden.

Es zeigt sich jedoch, dass die Bewertung von Stroh und Gründüngung unter Berücksichtigung des CN-Verhältnisses bei einer Anwendung der VDLUFA-Humusbilanzmethode zu einer besseren Aussagequalität führt (Abb. 26 a-f). Dies gilt sowohl für die Erfassung der Ausdifferenzierung der Versuchsvarianten bei den C- und N-Gehalten im Boden, wie auch mit Blick auf N-Bilanzen und das Ertragsniveau der Nicht-Leguminosen.

Eine Bewertung des Zusammenhangs zwischen VDLUFA-Humusbilanzsalden und Mengenänderungen der organischen Bodensubstanz ist in der Methode mit Verweis auf die zugunsten der Praxisanwendbarkeit fehlende Beachtung wichtiger Standorteinflüsse nicht vorgesehen. Dennoch muss davon ausgegangen werden, dass ein höherer Bilanzsaldo als Ausdruck einer höheren Versorgung mit organischer Substanz unter sonst gleichen Bedingungen auch zu höheren Mengen an organischer Bodensubstanz führen muss. Die Fähigkeit zur Erfassung der Ausdifferenzierung von Versuchsvarianten in Indikatoren der OBS-Mengen (z.B. C-Gehalte, s. Abb. 26 a,b) kann daher als Kriterium in der Evaluation verwendet werden, auch wenn der Zusammenhang nicht quantifiziert werden darf.

Nach dem Bewertungsschema in der VDLUFA-Humusbilanzmethode sollte das Ertragsniveau mit den Bilanzsalden zumindest dahingehend korrelieren, dass Varianten mit unzureichender Versorgung mit organischer Substanz bei sonst gleichen Bedingungen mit der Zeit ein geringeres Ertragsniveau

entwickeln, als Varianten mit mindestens ausreichender Humusversorgung. Tatsächlich weisen die Varianten mit unterdurchschnittlichem Ertragsniveau in den Langzeit-Versuchen i.d.R. stark negative Humusbilanzsalden auf, und zwar unabhängig von einer Modifikation der Koeffizienten für Stroh und Gründüngung. Allerdings ist das sehr niedrige Niveau der Humusversorgung mit häufig stark negativen Bilanzsalden zu beachten.

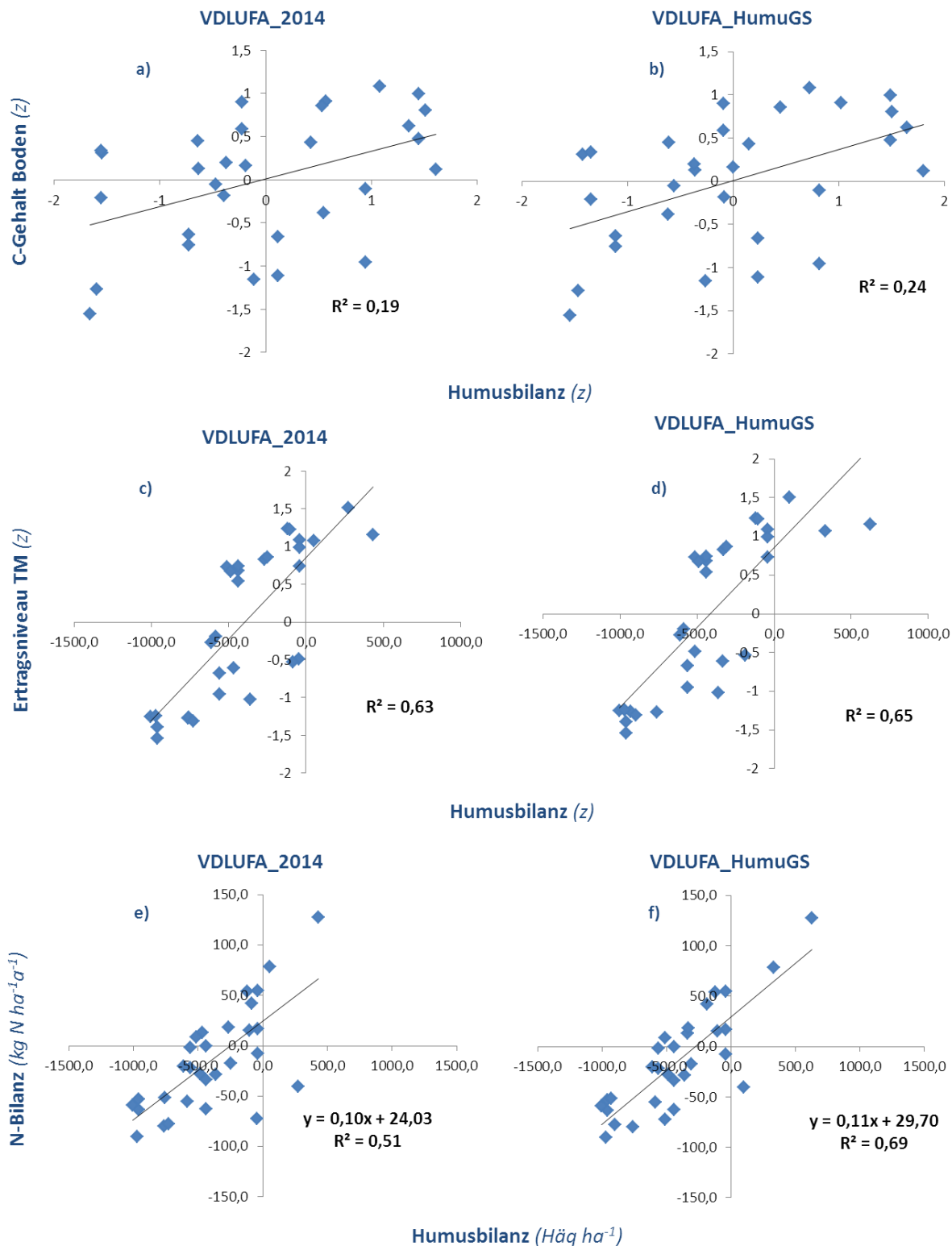


Abbildung 26(a-f): Übereinstimmung der Ausdifferenzierung von Humusbilanzsalden und a,b)Boden-C-Gehalten, c,d)dem mittleren Ertragsniveau, e,f)den N-Bilanzsalden zwischen ausgewählten Varianten von fünf Langzeit-

Feldversuchen in Deutschland. a,c,e=berechnet nach mit aktuellen Koeffizienten für Stroh und Gründüngung in der VDLUFA-Methode (Ebertseder et al. 2014), b,d,f=berechnet mit modifizierten Koeffizienten für Stroh und Gründüngung (vgl. Tab. 7). Werte z-standardisiert zum Ausgleich von Niveauunterschieden, außer bei Vergleichen von Humusbilanzsalden und N-Bilanzsalden (e,f).

Auch die Ausdifferenzierung der N-Bilanzen wird durch die Anpassung der Koeffizienten besser abgebildet, als bei Nutzung der bisherigen Werte (Abb. 26 e,f). Überschüssige N-Bilanzsalden ($>50 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) in Stroh-/Gründüngungsvarianten mit zusätzlicher mineralischer N-Düngung in den Versuchen Rauischholzhausen und Speyer werden jedoch unabhängig von der Koeffizientenanpassung nicht identifiziert. Hierbei ist zu beachten, dass die N-Bilanzsalden aus dem Zusammenwirken von organischer und mineralischer N-Düngung resultieren, während in der Humusbilanzierung die mineralische N-Düngung nicht berücksichtigt wird (VDLUFA), bzw. nur die Retention von N im Boden, nicht aber die Verluste durch die Bilanz ausgedrückt wird (HU-MOD). In der VDLUFA-Methode wird daher bei Humusbilanzen in Klasse E (überschüssige Bilanz mit potentiell verminderter N-Effizienz und erhöhtem N-Verlustpotential) zunächst die Überprüfung der N-Bilanz gefordert. Umgekehrt können Überschreitungen der N-Bilanz infolge einer ineffizienten Ausnutzung von Mineraldünger-N durch die Kulturpflanzenbestände auch bei Humusbilanzen im ausgeglichenen Bereich auftreten.

4.4.4 Schlussfolgerungen

Eine differenzierte Bewertung der Leistung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung unter Berücksichtigung des CN-Verhältnisses im Substrat bzw. Substratgemisch scheint sich in der Anwendung zu bewähren. Für eine sichere Quantifizierung der Zusammenhänge sind allerdings noch weitere Forschungsarbeiten notwendig.

4.5 Modul 5 Erarbeitung und Bewertung von Managementoptionen für viehlose Betriebe des ökologischen und konventionellen Landbaus

Insbesondere in viehlosen Betrieben können Zielkonflikte zwischen den Notwendigkeiten der Versorgung von Böden mit organischer Substanz und der betriebswirtschaftlichen Leistung der Ackerbausysteme auftreten. Maßnahmen zur Sicherung der Versorgung von Ackerböden mit organischer Substanz müssen jedoch nicht per se unrentabel sein, sondern es können möglicherweise sogar Synergien genutzt werden. Im Projekt HumuGS wurden vor diesem Hintergrund verschiedene Humusersatzstrategien für viehlose Betriebe des ökologischen und konventionellen Landbaus in unterschiedlichen Boden-Klima-Räumen definiert und mit Blick auf Humusbilanzen und die betriebswirtschaftliche Leistung ausgewertet.

4.5.1 Definition der Bewirtschaftungsszenarien und Humusersatzstrategien

Die humusbilanzielle und ökonomische Bewertung von Fruchtfolgenzenarien und Humusersatzstrategien erfolgte im HumuGS-Projekt modellhaft. Um eine realitätsnahe und vielseitige Analyse zu gewährleisten, wurden verschiedene Szenarien entwickelt, die sich hinsichtlich des Standorts (Boden, Klima), des Betriebstyps, der Fruchtfolgen und der Humusersatzstrategien unterscheiden und sowohl die konventionelle/integrierte als auch die ökologische Produktionsweise einbeziehen. Die vorgestellten Szenarien basieren auf unterschiedlichen Informationsquellen, der im

HumuGS-Projekt durchgeführten BeraterInnenumfrage (Statusanalyse, vgl. Kap. 4.2) sowie zusätzlichen Einschätzungen von Beratern, Landwirten und Wissenschaftlern.

Aufbauend auf die Statusanalyse wurden zur weiteren Verbesserung der Datengrundlage für die Definition der Szenarien weitere Berater (4), Wissenschaftler (3) und Landwirte (2) mündlich befragt. Hierbei sind insbesondere Experten aus den drei später festgelegten Beispielregionen zu typischen Beispielfruchtfolgen in ihrer jeweiligen Region sowie zu spezifischen, auch in der Praxis angewandten Humusersatzstrategien befragt worden. Wichtig war hierbei, sowohl für die konventionelle als auch die ökologische Wirtschaftsweise nachvollziehbare und realitätsnahe Fakten über Fruchtfolgen und Humusersatzstrategien zu erhalten. Die Angaben dieser weiteren Berater, Wissenschaftler und Landwirte sind maßgeblich als Grundlage in die Erstellung der Beispielfruchtfolgen und Szenarien eingeflossen und wurden im Weiteren projektintern auf Plausibilität und praktische Durchführbarkeit geprüft und ggf. angepasst. Die konkrete Vorgehensweise der Definition der HumuGS-Beispielszenarien wird im Folgenden dargestellt.

Die Definition von Szenarien ist von zwei methodischen Herausforderungen geprägt. Einerseits sollen die real zu erwartenden systemaren Zusammenhänge abgebildet und damit einer Bewertung zugeführt werden. Andererseits müssen zum Zwecke der Handhabbarkeit Rahmenbedingungen gesetzt werden, die nicht immer auf Einzelfälle zurückgeführt werden können. Die in den nächsten Abschnitten erläuterten Grundannahmen und Spezifika der Szenarien berücksichtigen diese Herausforderung, in dem einerseits wichtige und entscheidungsrelevante Unterschiede explizit modelliert werden, andererseits eine Standardisierung für Aspekte vorgenommen wird, die nicht ursächlich im Zusammenhang mit der Humusbilanzierung stehen, aber dennoch betriebswirtschaftlich von Belang sind. Beispielhaft sei hier die Betriebsgröße genannt, die wesentlich die Arbeitserledigungskosten variiert, aber keinen systematischen Zusammenhang mit Kennzahlen des Humushaushaltes aufweist.

4.5.1.1 Auswahl von Beispielregionen

Ziel der Auswahl verschiedener Beispielregionen war es, ein möglichst breites Spektrum möglicher Auswirkungen von Humusersatzstrategien aufzuzeigen. Deshalb wurden unterschiedliche Boden-Klima-Räume mit verschiedenen Voraussetzungen bezüglich Humusaufbau, Nährstoffverwertung und Ertragserwartung ausgewählt. Nach den folgenden Kriterien wurde eine Vorauswahl für drei Regionen getroffen:

- Auswahlkriterium 1: Vieharmer Landbau (Abbildung 27)
- Auswahlkriterium 2: Erhöhte Konzentration von ökologisch bewirtschafteter Agrarfläche (zur Darstellung von Vergleichsfruchtfolgen zum konventionellen Landbau) (Abbildung 28)
- Auswahlkriterium 3: Unterschiedliche Boden-Klima-Räume (Abbildung 29)

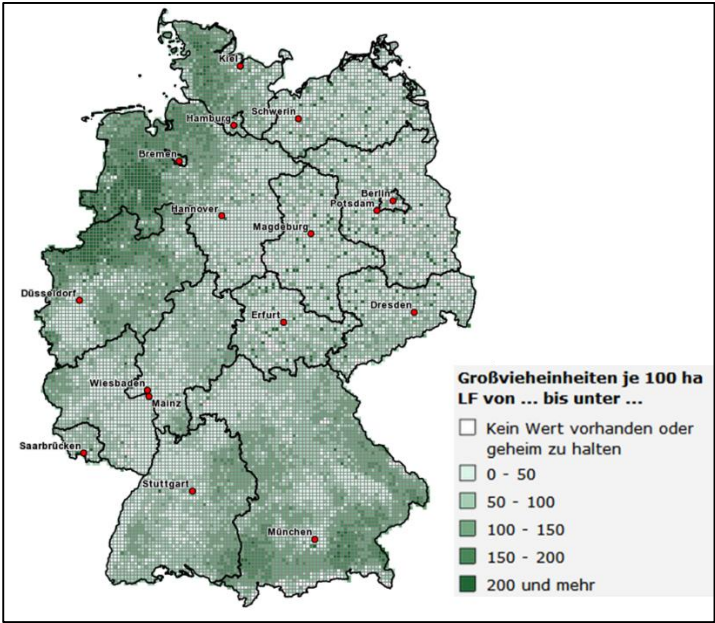


Abbildung 27: Auswahlkriterium „Vieharmer Landbau“: Großvieheinheiten je 100 ha LF (Quelle: AGRARSTATISTIK NRW, 2016)

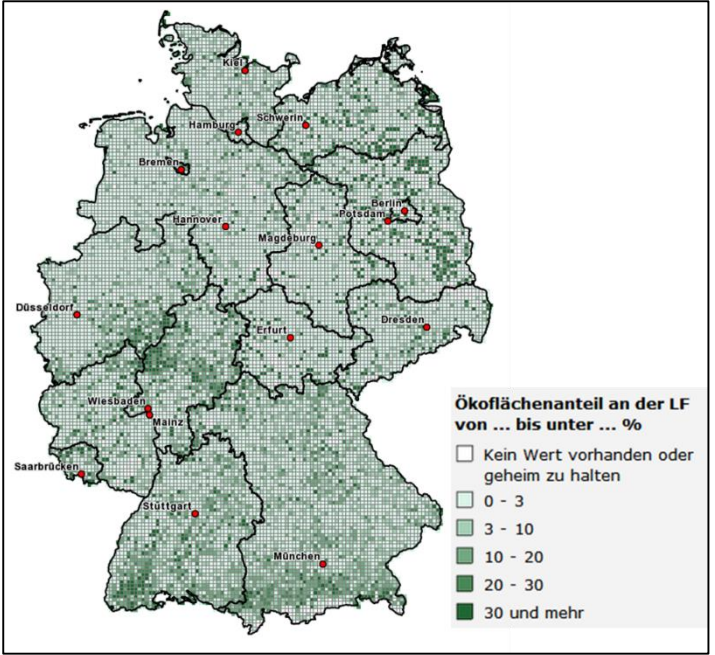


Abbildung 28: Auswahlkriterium „Erhöhte Konzentration von Betrieben des Ökologischen Landbaus“ Ökoflächenanteil an der Landfläche (%) (Quelle: AGRARSTATISTIK NRW, 2016)

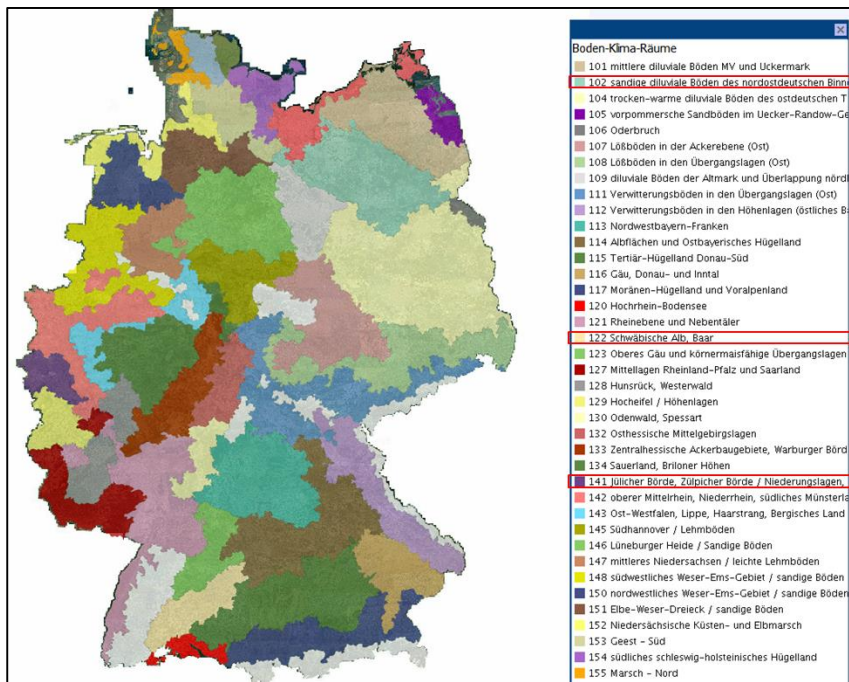


Abbildung 29: Auswahlkriterium „Boden-Klima-Räume“ (Quelle: JULIUS KÜHN INSTITUT, 2016)

Ausgehend von den drei vorgestellten Auswahlkriterien wurden im darauffolgenden Schritt die Beispielregionen Nordostdeutschland (Kreis Barnim, Brandenburg), Zülpicher Börde (Nordrhein-Westfalen) und Schwäbische Alb (Mittelgebirge, Baden-Württemberg) ausgewählt, um standorttypische Modellrechnungen für Fruchtfolgen und Humusersatzstrategien beispielhaft durchführen zu können. Abbildung 30 zeigt die geographische Lage der HumuGS-Beispielregionen.

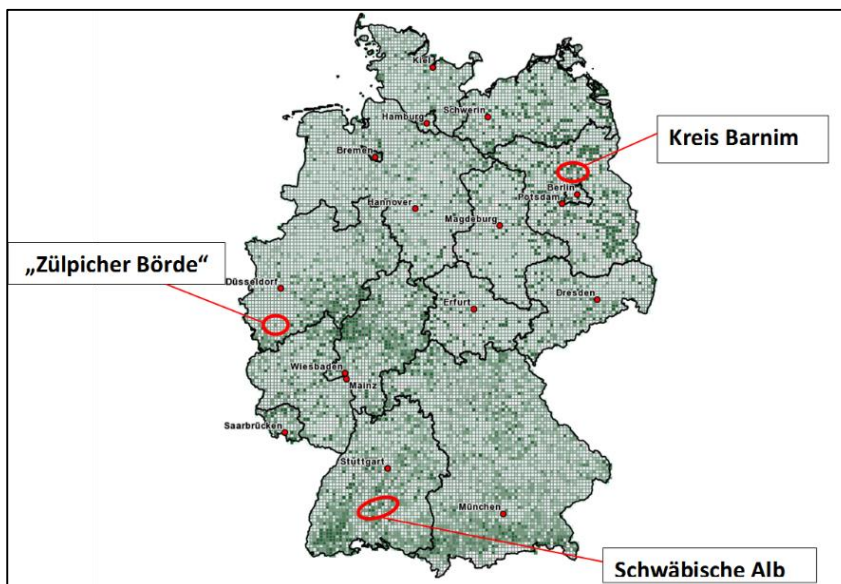


Abbildung 30: Geographische Lage der HumuGS-Beispielregionen, Kartengrundlage nach: AGRARSTATISTIK NRW, 2016

Die Regionen unterschieden sich also hinsichtlich der Bodencharakteristika und der klimatischen Bedingungen, des Ertragsniveaus und der praktizierten Fruchtfolgen (Tabelle 8). Das Ertragsniveau der

Basisszenarien richtet sich nach Standard-Daten des Kuratoriums für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL, 2016). Es wurde eine standardisierte Betriebsgröße von 200 ha unterstellt, um bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung die Überlagerung der Ergebnisse durch Größeneffekte zu vermeiden und eine interregionale Vergleichbarkeit zu gewährleisten.

Tabelle 8: Charakterisierung der HumuGS-Beispielregionen

Parameter	Einheit	Sandböden/ Nord-Ost	Börde/NRW	Mittelgebirge/ Süd-West
Region	-	Barnim, Brandenburg	Zülpich, NRW	Schwäb. Alb, BW
Vorherrschende/r Bodenart/-typ	-	Lehmiger Sand (IS)	Parabraunerde auf Löß	Braunerde/ Rendzina
Niederschlag	ml/m ² /a	600	600	800-1000
Ertragsniveau	nach KTBL	Niedrig	Hoch	Mittel
Typ. Betriebsgröße Ackerbau	ha	200	200	200
Fruchtfolgeart	-	Getreide basiert	divers	divers

4.5.1.2 Definition von Betriebstypen

Ziel der Untersuchungen im Rahmen des HumuGS-Projektes war es, den Einfluss von Grün- und Strohdüngung insbesondere im viehlosen Ackerbau darzustellen. Gängige, in der Praxis vorzufindende Betriebstypen sind Betriebe ohne jeglichen Austausch von Grüngut bzw. Futter mit tierischen Wirtschaftsdüngern sowie Betriebe, die anfallende Zwischenfrüchte oder Ackerfutter an viehhaltende Betriebe abgeben und dafür tierische Wirtschaftsdünger zurückerhalten. Um dem Rechnung zu tragen, wurden für die folgenden zwei Betriebstypen Szenarien erstellt und Modellrechnungen durchgeführt:

1. Betriebstyp Viehlos – Ohne Futter-Mist-Kooperation (-FMK)
2. Betriebstyp Viehlos – Mit Futter-Mist-Kooperation (+FMK)

4.5.1.3 Definition von Beispielfruchtfolgen

Auf der Grundlage der HumuGS-Beraterumfrage (Statusanalyse), Einschätzungen von Beratern, Landwirten und Wissenschaftlern sowie eigenen Einschätzungen wurden Beispielfruchtfolgen für die Beispielregionen definiert. Dabei wurde für die Szenarien des ökologischen Landbaus die Betriebstypen –FMK und +FMK berücksichtigt (Tabelle 9), für die Szenarien des konventionellen Landbaus lediglich Szenarien ohne FMK (Tabelle 10).

Tabelle 9: HumuGS-Beispielfruchtfolgen im Ökologischen Landbau für drei Beispielregionen, ohne und mit Futter-Mist-Kooperation sowie Standarderträgen

Fruchtfolgefeld	Ohne Futter-Mist-Kooperation		Mit Futter-Mist-Kooperation	
	Hauptfrucht	Basisertrag (t FM/ha)	Hauptfrucht	Basisertrag (t FM/ha)

Sandböden/Nord-Ost				
1	Lupine	1,97	Luzernegras	25
2	Kartoffel	20	Luzernegras	25
3	Dinkel	1,9	Dinkel	2,2
4	Ackerbohne/Erbse	1,6/1,5	Hafer	2,7
5	Winterroggen	2,9	Winterroggen	3,3
6	Hafer	2,5	Sommergerste	2,7
Börde/NRW				
1	Ackerbohne	4,7	Klee gras	62,5
2	Winterweizen	6,9	Winterweizen	7,6
3	Zuckerrübe	50	Kartoffel	38,5
4	Erbse	3,2	Ackerbohne	4,7
5	Dinkel	3,9	Hafer	4,9
6	Hafer	4,5	Winterroggen	5,9
Mittelgebirge/Süd-West				
1	Ackerbohne	3,6	Klee gras	43,7
2	Dinkel	2,9	Klee gras	43,7
3	Sommergerste	2,9	Dinkel	3,3
4	Linsen/Hafer	0,7/2,9	Kartoffel	27,5
5	Winterroggen	3,9	Triticale	4,3

Tabelle 10: HumuGS-Beispielfruchtfolgen im konventionellen Landbau für drei Beispielregionen, ohne Futter-Mist-Kooperation sowie Standarderträgen

Ohne Futter-Mist-Kooperation		
Fruchtfolgefeld	Hauptfrucht	Basisertrag (t FM/ha)
Sandböden/ Nord-Ost		
1	Kartoffel	35
2	Winterroggen	3,9
3	Erbse	13,0
4	Winterroggen	3,9
Börde/NRW		
1	Zuckerrübe	70
2	Winterweizen	9,9
3	Wintergerste	7,9
Mittelgebirge/Süd-West		
1	Winterraps	3,3
2	Winterweizen	7,9
3	Sommergerste	5,9
4	Triticale	5,9

Es wurde unterstellt, dass alle Futterleguminosen wie Klee- oder Luzernegras bzw. Klee-/Luzernegras-Gemenge bei allen vorgestellten Fruchtfolgen im Jahr vor dem Hauptertragsjahr in die vorherige Hauptfrucht untergesät werden, was sich sowohl auf Ertrag als auch Nährstofffixierung und Humusersatzleistung auswirkt.

Gegenüber den Fruchtfolgen ohne FMK wurden die Basis-Erträge aller Nicht-Leguminosen bei den Fruchtfolgen mit FMK um 10 % erhöht, da davon ausgegangen werden kann, dass eine bessere

Synchronisation von Nährstoffbedarf und Nährstoffangebot der nicht-legumen Hauptfrüchte bei Einsatz eines mobilen Düngemittels (tierischer Wirtschaftsdünger) erreicht wird.

4.5.1.4 Definition von Humusersatzstrategien

Um den Unterschied im Einsatz von Stroh- und Gründüngung in der späteren Analyse von Humusbilanzen und Ökonomie abbilden zu können, wurden, abgestimmt auf Beispielfruchtfolgen, Wirtschaftsweise (öko/konv) und +/- FMK, verschiedene Humusersatzstrategien definiert. Dazu gehören unterschiedliche Strategien zur Verwendung des Getreidestrohs (Verbleib/Abfuhr), Ausgleich der Stickstoff-(N)-Bilanz durch organische Handelsdünger (Hühnerkot; HTK), der Einsatz von Zwischenfrüchten, die vermehrte Integration von Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung, sowie unterschiedliche Nutzungsmöglichkeiten der Futterleguminosen. Dazu gehören das Mulchen und Verbleib des Pflanzenmaterials auf der Fläche, die Vergärung in der Biogasanlage mit anschließender bedarfsgerechter Rückführung über den Gärrest, die Kompostierung mit anschließender bedarfsgerechter Rückführung, sowie den direkten zeitlichen und räumlichen Transfer des Mähguts zu anderen Kulturen (Cut&carry). Eine Übersicht über die definierten Humusersatzstrategien gibt Tabelle 11.

Tabelle 11: Übersicht über die Humusersatzstrategien im HumuGS-Projekt

Humusersatzstrategie (Kurzbezeichnung)	Ökologische Fruchtfolgen		Konventionelle Fruchtfolgen	
	Ohne Kooperation	Futter-Mist-Kooperation	Mit Futter-Mist-Kooperation	Ohne Kooperation
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben		Alle Koppelprodukte verbleiben; Rückführung des Klee-/Luzernegrases über Rinder-Rottemist	Alle Koppelprodukte verbleiben
H0	Abfuhr Getreidestroh		Abfuhr Getreidestroh; Rückführung des Klee-/Luzernegrases über Rinder-Rottemist	Abfuhr Getreidestroh
H1	Ausgleich der N-Bilanz durch HTK		Ausgleich der N-Bilanz durch HTK	-
H2	Einsatz von Zwischenfrüchten		Einsatz von Zwischenfrüchten	Einsatz von Zwischenfrüchten
H3a	Integration bzw. Steigerung des Anteils von Futterleguminosen; Mulchen des Klee-/Luzernegrases		Integration bzw. Steigerung des Anteils von Futterleguminosen; Rückführung des Klee-/Luzernegrases über Rinder-Rottemist	Integration bzw. Steigerung des Anteils von Futterleguminosen; Mulchen des Klee-/Luzernegrases
H3b	Biogasnutzung des Klee-/Luzernegrases und		-	Biogasnutzung des Klee-/Luzernegrases und

	Rückführung über Biogas-Gärrest		Rückführung über Biogas-Gärrest
H3c	Kompostierung des Klee-/Luzernegrases und Rückführung	-	-
H3d	Direkttransfer des Klee-/Luzernegrases (Cut&carry)	-	-
H3e	Optimierung der Kohlen- und Stickstoff-Bilanz durch Einsatz von Zwischenfrüchten, Zukauf von HTK und Biogasnutzung des Klee-/Luzernegrases	-	-

Die Stellung und Art der integrierten Zwischenfrüchte (ZF) der Humusersatzstrategien H2 und H3e sowie die veränderte Fruchtfolge mit integrierten Futterleguminosen der Humusersatzstrategie H3a zeigen die Tabelle 12 (ökologische Anbausysteme ohne FMK), Tabelle 13 (ökologische Anbausysteme mit FMK) sowie Tabelle 14 (konventionelle Anbausysteme ohne FMK).

Tabelle 12: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die ökologischen Beispielfruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation (Änderungen im Vergleich zur Basis-Fruchtfolge in Tabelle 2 sind kursiv dargestellt).

ÖKO Ohne Futter-Mist-Kooperation				
Fruchtfolgefeld	Basis, H0, H1	ZF in H2	H3a,b,c,d	H3e
Sandböden/ Nord-Ost				
1	Lupine	<i>Winterzwischenfrucht</i>	<i>Luzernegras</i>	
2	Kartoffel		Kartoffel	
3	Dinkel		Dinkel	
4	Ackerbohne/Erbse		<i>Lupine</i>	
5	Winterroggen	<i>Untersaat Kleegras</i>	Winterroggen	<i>Winterzwischenfrucht</i>
6	Hafer		Sommergerste	
Börde/NRW				
1	Ackerbohne		<i>Kleegras</i>	
2	Winterweizen	<i>Winterzwischenfrucht</i>	Winterweizen	<i>Winterzwischenfrucht</i>
3	Zuckerrübe		Zuckerrübe	
4	Erbse		Erbse	
5	Dinkel	<i>Untersaat Kleegras</i>	Dinkel	<i>Winterzwischenfrucht</i>
6	Hafer		Hafer	
Mittelgebirge/Süd-West				
1	Ackerbohne		<i>Kleegras</i>	
2	Dinkel	<i>Winterzwischenfrucht</i>	Dinkel	<i>Winterzwischenfrucht</i>
3	Sommergerste	<i>Untersaat Kleegras</i>	Sommergerste	
4	Linsen/Hafer		Linsen/Hafer	
5	Winterroggen		Winterroggen	

Tabelle 13: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die ökologischen Beispielfruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation (Änderungen im Vergleich zur Basis-Fruchtfolge in Tabelle 10 sind kursiv dargestellt).

ÖKO Mit Futter-Mist-Kooperation			
Fruchtfolgefeld	Basis, H0, H1	ZF in H2	H3a
Sandböden/ Nord-Ost			
1	Luzernegras		Luzernegras
2	Luzernegras		Luzernegras
3	Dinkel	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	Dinkel
4	Hafer		<i>Hafer</i>
5	Winterroggen	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	Winterroggen
6	Sommergerste		Sommergerste
Börde/NRW			
1	Kleegras		Kleegras
2	Winterweizen	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	<i>Kleegras</i>
3	Kartoffel		<i>Hafer</i>
4	Ackerbohne	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	<i>Kartoffel</i>
5	Hafer		<i>Winterweizen</i>
6	Winterroggen		Winterroggen
Mittelgebirge/Süd-West			
1	Kleegras		Kleegras
2	Kleegras		Kleegras
3	Dinkel	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	Dinkel
4	Kartoffel		<i>Linsen/Hafer</i>
5	Triticale		Triticale

Tabelle 14: Veränderte Fruchtfolgen in verschiedenen Humusersatzstrategien durch Integration von Zwischenfrüchten (H2, H3e) und Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung (H3) für die konventionellen Beispielfruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation (Änderungen im Vergleich zur Basis-Fruchtfolge in Tabelle 3 sind kursiv dargestellt).

KON ohne Futter-Mist-Kooperation			
Fruchtfolgefeld	Basis, H0, H1	ZF in H2	H3a,b
Sandböden/ Nord-Ost			
1	Kartoffel		<i>Luzernegras</i>
2	Winterroggen		Kartoffel
3	Erbse		Winterroggen
4	Winterroggen	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	Erbse
5	-		Winterroggen
Börde/NRW			
1	Zuckerrübe		<i>Kleegras</i>
2	Winterweizen		Zuckerrübe
3	Wintergerste	<i>Sommer-/Winter- zwischenfrucht</i>	Winterweizen
	-		Wintergerste
Mittelgebirge/Süd-West			
1	Winterraps		<i>Kleegras</i>

2	Winterweizen	<i>Winter- zwischenfrucht</i>	Winterraps
3	Sommergerste		Winterweizen
4	Triticale		Sommergerste
	-		Triticale

Es wurden für einzelne Humusersatzstrategien der ökologischen Beispielfruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation folgende Ertragssteigerungen der nicht-legumen Marktfrüchte unterstellt:

- H1; ohne FMK: + 10 % aufgrund des zusätzlichen und mobilen N-Inputs durch HTK (Ausgleich der N-Bilanz).
- H3a; ohne FMK: + 5 % aufgrund der besseren Nährstoffverfügbarkeit durch Integration einer Futterleguminose in die Fruchtfolge (N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen, vgl. z.B. Kolbe, 2006). Allerdings erhöht das Mulchen die Lachgas-(NO₂)-Emissionen und senkt die N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen im Vergleich zur Abfuhr des Aufwuchses (Möller, Stinner, & Leithold, 2008), weswegen der Ertragszuwachs auf 5 % begrenzt wurde.
- H3b; ohne FMK: + 10 % aufgrund der Einführung eines mobilen und schnell pflanzenverfügbaren Düngemittels (Biogasgärrest aus Klee-/Luzernegras), der bedarfsgerecht den bedürftigen Kulturen zugeordnet werden kann (vgl. z.B. (Möller, Stinner, & Leithold, 2008) sowie der Abfuhr des Klee-/Luzernegras Aufwuchses mit verbesserter N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen.
- H3c; ohne FMK: + 5 % aufgrund der Verfügbarkeit des Komposts aus Klee-/Luzernegras als mobiles Düngemittel. Die Abfuhr und Kompostierung des Klee-/Luzernegrases erhöht zwar die N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen, allerdings sind höhere N-Verluste durch den Kompostierungsprozess bedingt (vgl. z.B. Hellebrand, 1998).
- H3d; ohne FMK: + 5 % aufgrund der mobilen Verfügbarkeit des Grünschnitts aus Klee-/Luzernegras. Die Abfuhr des Klee-/Luzernegrases erhöht die N₂-Fixierungsleistung der Leguminosen (STINNER ET AL., 2008), allerdings sind erhöhte Lachgas-(NO₂)-Emissionen durch die Mulchauflage des transferierten Grünaufwuchses zu erwarten (Möller, Stinner, & Leithold, 2008).
- H3e; ohne FMK: + 10 % aufgrund des Ausgleichs der N-Bilanz durch Zufuhr von HTK und Rückführung von Gärrest aus Klee-/Luzernegras.

Es wurde unterstellt, dass der Einsatz von Zwischenfrüchten allein zunächst keine Ertragserhöhungen mit sich bringt, sondern zu einer Stabilisierung von Humus-Gehalt und Erträgen beiträgt.

Für die konventionellen Fruchtfolgen wurden keine Ertragserhöhungen unterstellt, da jederzeit mineralischer Stickstoff zugekauft werden kann und es sich daher, anders als in ökologischen landwirtschaftlichen Systemen, nicht um N-limitierte Systeme handelt. Für den zusätzlichen Stickstoff, der über die Integration von Futterleguminosen in die konventionellen Betriebssysteme einfließt,

wurden allerdings Gutschriften für verminderten Bedarf mineralischer N-Düngemittel berücksichtigt, was sich insbesondere in der ökonomischen Bewertung niederschlägt.

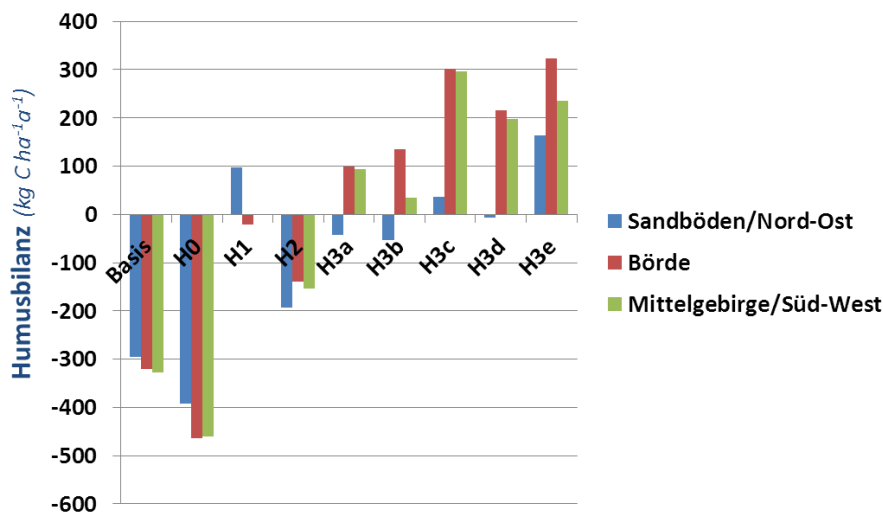
Im Falle von Austauschbeziehungen, basierend auf dem Anbau von Klee-/Luzernegras (Futter-Mist-Kooperation, Biogas-Gärrest) wurde unterstellt, dass die exportierte N-Menge im Frischmasseaufwuchs des Klee-/Luzernegrases über Rottemist und Gärrest wieder auf den Betrieb bzw. in die Fruchtfolge zurückgeführt wird.

In Anlehnung an Verbandsrichtlinien ökologischer Anbauverbände zur Zufuhr organischer Handelsdüngemittel wurde die Zufuhr von Stickstoff aus HTK auf 40 kg N/ha beschränkt.

4.5.2 Humusbilanzierung

Im Folgenden werden die Ergebnisse zur Humusbilanzierung in den Bewirtschaftungsszenarien vorgestellt. Die Berechnung der Humusbilanzen erfolgte mit dem Modell HU-MOD (Beschreibung s. Kap. 4.4.2.1).

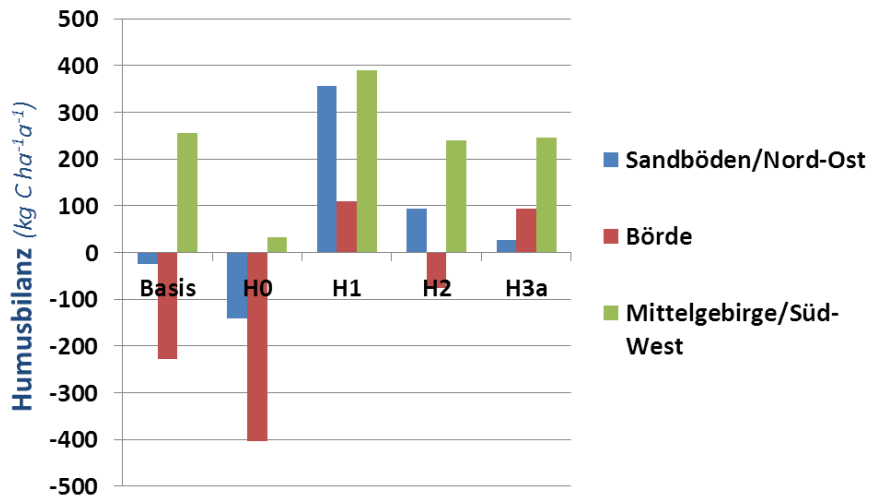
Der Verbleib der Koppelprodukte auf den Flächen (Humusersatzstrategie Basis) ist in allen ökologischen Bewirtschaftungsszenarien ohne Futter-Mist-Kooperation für den Ausgleich der Humusbilanzen unzureichend (Abbildung 31). Auch die Integration von Zwischenfrüchten (H2) erbringt keine ausreichende Verbesserung der Humusbilanzen. Ein Potential für die Entnahme und anderweitige Verwertung von Koppelprodukten (H0) besteht daher grundsätzlich nicht. Ein Ausgleich der Humusbilanz wird in erster Linie durch die Integration von Futterleguminosen in die Fruchtfolgen erreicht (H3[a...e]). An Standorten mit geringerem Ertragspotential (Sandböden/Nord-Ost) reicht aus Sicht der Bilanzierung bei der dargestellten Fruchtfolge auch ein Ausgleich der N-Bilanz mit Hühnertrockenkot aus, um die Inanspruchnahme von N aus der Mineralisierung organischer Bodensubstanz zu kompensieren.



Humusersatzstrategie			
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben	H3a	Kleegras gemulcht
H0	Strohabfuhr	H3b	Kleegras Biogas
H1	Optimierung N-Bilanz (HTK)	H3c	Kleegras Kompost
H2	Zwischenfrüchte	H3d	Kleegras Cut&carry
		H3e	Optimierung C- und N-Bilanz

Abbildung 31: Humusbilanzen für Szenarien zur ökologischen Bewirtschaftung OHNE Futter-Mist-Kooperation.

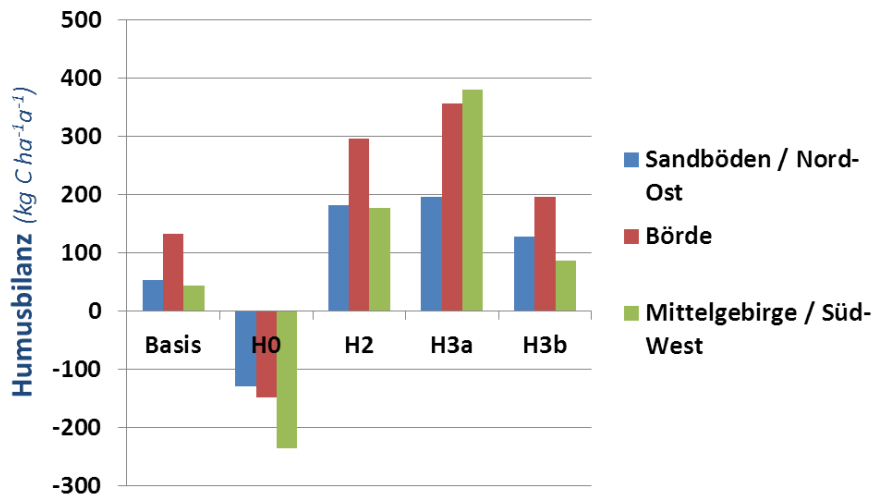
Ökologische Betriebe mit Futter-Mist-Kooperation weisen durch die bereits in den Basis-Szenarien integrierten Futterleguminosen grundsätzlich höhere Humusbilanzen auf (Abbildung 32). Für den Ausgleich der Humusbilanzen reicht der Verbleib der Koppelprodukte allein rechnerisch jedoch nur bei Standorten mit mittlerem Ertragspotential (Mittelgebirge/Süd-West) aus. In den anderen Standortszenarien führt erst die Erhöhung des Anbauumfangs von Leguminosen in Hauptfrucht- (H3a) oder, an Standorten mit geringem Ertragspotential (Sandböden/Nord-Ost), in Zwischenfruchtstellung (H2) zu positiven Humusbilanzen. Auch die Zufuhr von N über Hühnertrockenkot führt in allen Szenarien zu positiven Humusbilanzen und müsste in den Standortszenarien mit geringem (Sandböden/Nord-Ost) und mittlerem (Mittelgebirge/Süd-West) nicht in dem angenommenen Umfang erfolgen, sofern keine weitere Ertragssteigerung erreicht wird.



Humusersatzstrategie			
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben	H2	Zwischenfrüchte
H0	Strohabfuhr	H3a	Höherer Leguminosenanteil
H1	Optimierung N-Bilanz (HTK)		

Abbildung 32: Humusbilanzen für Szenarien zur ökologischen Bewirtschaftung MIT Futter-Mist-Kooperation.

Für die konventionellen Szenarien berechnet das Modell eine ausreichende Versorgung mit organischer Substanz in den Basis-Varianten (Abbildung 33). Wenn in den angenommenen Fruchtfolgen alle Koppelprodukte auf dem Feld verbleiben, besteht demnach kein weiterer Handlungsbedarf. Eine Entnahme von Stroh (H0) bzw. aller verfügbaren Koppelprodukte zur anderweitigen Verwertung ist jedoch nicht möglich. Entsprechende Möglichkeiten könnten sich jedoch ergeben, wenn weitere Maßnahmen zur Sicherung der Humusversorgung vorgenommen werden (HES H2 bis 3b).



Humusersatzstrategie			
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben	H2	Zwischenfrüchte
H0	Strohabfuhr	H3a	Kleegras gemulcht
H1	--	H3b	Kleegras Biogas

Abbildung 33: Humusbilanzen für Szenarien zur konventionellen Bewirtschaftung OHNE Futter-Mist-Kooperation.

4.5.3 Humusökonomik

Produktionsökonomische Überlegungen zur nachhaltigen Nutzung von Böden sind gekennzeichnet von hoher naturwissenschaftlicher Komplexität und Abhängigkeit von den Standortbedingungen, großen Unsicherheiten hinsichtlich der zukünftigen Stoffströme und dem immer mitschwingenden Problem, geeignete und aussagekräftige Messkonzepte zu integrieren.

Während sich neue landwirtschaftliche Managementlehrbücher mit Fragen der Humusersatzökonomik praktisch nicht mehr beschäftigen, gibt es in älteren Werken zur Produktionsökonomik ausgewiesene Kapitel, die im Zusammenhang mit der organischen Düngung auch Fragen der Humusersatzwirtschaft in den Mittelpunkt stellten (z.B. Reisch & Zeddies, 1992). Allerdings wird auch hier ein vereinfachter, isolierender Kostenminimierungsansatz zugrunde gelegt: „Ein pflanzenbaulich fixierter Zufuhrbedarf an organischem Material, im allgemeinen Sprachgebrauch ungenau als Humusbedarf bezeichnet, soll zur nachhaltigen Sicherstellung der Ertragsleistung möglichst kostengünstig gedeckt werden.“ ((Reisch & Zeddies, 1992). Die weit verbreitete Berechnung von Substitutionswerten zur Wertermittlung verschiedener Humusersatzstrategien (z.B. Steinhauser, 1992) leidet methodisch darunter, dass für Wirtschaftsdünger, Stroh und Gründünger jeweils wirkungsgleiche Mengen unterstellt werden müssen, was in Qualität und Quantität der Inhaltsstoffe schwierig zu realisieren ist.

Die Herausforderung besteht vor allen darin, den Begriff der (durch verbesserte Humushaushalte) erreichten Ertragsleistung so funktional zu definieren, dass daraus eine Entscheidungsunterstützung für landwirtschaftliche Unternehmer generiert werden kann. Leider fehlen verlässliche Messkonzepte, die dazu als Grundlage verwendet werden könnten. Die von Ökonomen zumeist herangezogene Grundrente enthält neben dem Naturalertrag auch monetäre Größen, die häufig nur

Annahmen darstellen können und je nach Marktverhältnissen sehr volatil sind. Der im Kern interessierende Naturalertrag lässt sich nicht allein aus Bodeneigenschaften ableiten, da Produktionstechnik und Witterung einen maßgeblichen Einfluss darstellen. Passgenauer sind Überlegungen zur (Veränderung der) Standortertragsfähigkeit und mathematische Produktionsfunktionen, wenn die naturwissenschaftlichen Zusammenhänge mit hinreichender Exaktheit berücksichtigt werden können (Dabbert, 1994).

Im Gegensatz zur pflanzenbaulich-ökologischen Leistung sind die Kosten verschiedener Humusersatzstrategien relativ leicht zu bestimmen, zumindest solange bestimmte Maßnahmen durchgeführt und bestimmte, in Menge und Qualität definierte, Materialien eingesetzt werden. Das oben angesprochene Problem der Wirkungsgleichheit bleibt allerdings auch hier bestehen. Schwieriger ist die Abschätzung der Opportunitätskosten, wenn etwa Fruchtfolgeanpassungen zur Verbesserung der Humusbilanz unterstellt werden. Auch diese Kosten sind dann stark von den aktuellen Marktverhältnissen abhängig.

Wünschenswert für den ökonomischen Vergleich von Kosten und Leistungen und die daraus abzuleitenden Handlungsempfehlungen wäre zukünftig eine explizite Berücksichtigung der Tatsache, dass die Kosten kurzfristig, die Leistungen jedoch erst in den Folgejahren anfallen. Produktionstechnische Maßnahmen sind also als Investition anzusehen, die sich mitunter erst im Laufe mehrerer Jahre amortisiert.

Neben der humusbilanziellen stellt also die ökonomische Bewertung im HumuGS-Projekt einen weiteren Schwerpunkt zur ganzheitlichen Beurteilung der beschriebenen Fruchtfolgeszenarien und Humusersatzstrategien dar. Auch wenn die Ökonomie bei der letztlichen Bewertung einzelner Strategien unter Einbeziehung aller ökologischer und ökonomischer Argumente nicht alleiniges entscheidungsrelevantes Instrument sein kann und sollte, so stellt sie doch auf der einen Seite gerade für praktizierende Landwirte eine wichtige Entscheidungshilfe dar und kann auf der anderen Seite für die Weiterentwicklung landwirtschaftlicher Politik- und Förderstrategien von großer Bedeutung sein.

Im Folgenden sollen zunächst die bei der ökonomischen Bewertung verwendeten Methoden sowie im weiteren Ergebnisse und Diskussion derselben vorgestellt werden. Die Ergebnisse fließen dann in die interdisziplinäre Synthese von humusbilanzieller und ökonomischer Bewertung ein (siehe Kapitel 4.5.3.3).

4.5.3.1 Methodische Vorgehensweise

4.5.3.1.1 Betriebswirtschaftliche Methodik

Grundlage der betriebswirtschaftlichen Bewertung stellt die Ermittlung der Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreien Leistung (DAKL) nach KTBL-Standard (KTBL, 2014, 2016) dar. Zu den berücksichtigten Leistungen zählen die Erlöse aus den Marktfruchtverkäufen, dem Verkauf des Kleegrases als Futter oder an die Biogasanlage sowie die Öko-Prämie bei den ökologischen Szenarien, da diese zu den systemimmanenten Leistungen gezählt werden kann (Tabelle 15). Deren Berücksichtigung verändert allerdings lediglich das Verhältnis der Ergebnisse im Vergleich zu den konventionellen Szenarien, die Aussagen zur Vorteilhaftigkeit einzelner Humusersatzstrategien werden davon nicht berührt. Auf der Kostenseite werden Direktkosten, variable und fixe Kosten der Arbeitserledigung sowie kalkulatorische Kosten wie der Zinsansatz des Umlaufkapitals und der Lohnansatz unbezahlter Familienarbeitskräfte (BetriebsleiterIn) berücksichtigt. Ein Ansatz für

Flächenkosten (Pachtansatz) erfolgt nicht, weil bei den betrachteten Szenarien keine Nutzungskosten der Fläche anfallen und sie sich demzufolge in diesem Punkt nicht unterscheiden.

Tabelle 15: Zu berücksichtigende Kosten und Leistungen der Direkt- und Arbeiterledigungskostenfreien Leistung (DAKL) eines Produktionsverfahrens nach KTBL-Standard (KTBL 2014, 2016).

DAKL eines Produktionsverfahrens =	
+ Leistungen	<ul style="list-style-type: none"> • Marktfruchterträge • Klee grasverkauf • Öko-Prämie
- Kosten	<ul style="list-style-type: none"> • Direktkosten (Saatgut, Düngemittel, Pflanzenschutz) • Variable Kosten der Arbeiterledigung (variable Maschinenkosten, Lohnarbeit) • Fixe Kosten der Arbeiterledigung (Abschreibung, Zins) • Kalkulatorische Kosten (Zinsansatz Umlaufkapital und Lohnansatz Familienarbeitskräfte)

Arbeiterledigungskosten

Arbeiterledigungskosten werden insbesondere durch die Wahl der Betriebsgröße (Hof-Feld-Entfernung, Schlaggröße), den Grad der Mechanisierung sowie die Erträge der Feldfrüchte beeinflusst. Bei den Berechnungen im HumuGS-Projekt wurde eine standardisierte Betriebsgröße von 200 ha unterstellt, um bei der betriebswirtschaftlichen Bewertung die Überlagerung der Ergebnisse durch Größeneffekte zu vermeiden und eine interregionale Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Dabei wurde davon ausgegangen, dass die Hof-Feld-Entfernung durchschnittlich 5 km und die Schlaggröße 10 ha beträgt. Als Mechanisierungsgrad wurde eine Basis-Mechanisierung mit einem 102 kW Schlepper unterstellt; abhängig von den in der KTBL-Datenbank (KTBL, 2016) vorhandenen Maschinen sind allerdings auch einzelne Arbeitsverfahren individuell angepasst worden. Zudem wurde eine ertragsabhängige Kostenanpassung der Arbeiterledigungskosten anhand verschiedener Ertragsstufen der Feldfrüchte und daraus resultierender Maschinenkosten vorgenommen.

Spezifische Unterschiede der Preis-Mengen-Gerüste ÖKO – KON

Abhängig von der Bewirtschaftungsweise (ökologisch; ÖKO/konventionell; KON) sind unterschiedliche Preis-Mengengerüste für verschiedene im Folgenden gelisteten Faktoren unterstellt worden:

- Bewertung für Pflanzennährstoff Stickstoff (N): Hier wurde für KON ein handelsüblicher Preis für mineralischen N von 0,88 €/kg unterstellt, für ÖKO ein mittlerer Preis für N von 2,50 €/kg, der durchaus je nach Düngemittel (Wirtschaftsdünger, org. Handelsdünger) stark variieren kann. Basierend auf dem Nährstoffgehalt und dem jeweiligen Preisgerüst ist demnach auch der Verkaufspreis für Stroh für ÖKO mit 30 €/t und für KON mit 20 €/t angesetzt worden.
- Kosten für Saatgut: In der Regel sind für ökologisch zertifiziertes Saatgut höhere Kosten anzusetzen als für konventionelles.
- Kosten für Düngemittel und Pflanzenschutz: Während in den HumuGS Modellrechnungen bei ÖKO lediglich organische Düngemittel (Mist, Gülle, Hühnertrockenkot) zum Einsatz

kommen, fließen bei KON die Kosten mineralisch basierter Düngemittel sowie chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel in die Berechnungen mit ein.

- Erntemengen und Marktpreise: Die Angaben für Erträge und Marktpreise richten sich nach den Daten der KTBL-Datenbank (KTBL, 2016) und berücksichtigen für ÖKO im Vergleich zu KON sowohl ein niedrigeres Ertragsniveau als auch höhere Marktpreise.
- Ökoprämie: Als systemimmanenter Bestandteil der ökologischen Wirtschaftsweise wird die Ökoprämie in den Berechnungen berücksichtigt, nicht aber die Flächenprämie, die unabhängig von der Wirtschaftsweise als Leistung vorliegt, deren Berücksichtigung im Zusammenhang der HumuGS-Berechnungen aber für die Aussagen über die Vorteilhaftigkeit einzelner Humusersatzstrategien nicht von Bedeutung ist.

4.5.3.1.2 Arten der Kosten und Leistungen der Humusersatzstrategien

Abhängig von der Humusersatzstrategie ergeben sich veränderte Kosten und Leistungen für die einzelnen, zuvor definierten HumuGS-Fruchtfolgen und Humusersatzstrategien.

Auf der Leistungsseite gehören dazu Einnahmen z.B. aus dem Verkauf des geernteten Stroh (H0), angenommenen Ertragssteigerungen (z.B. H1), Verkauf von Klee gras als Futter oder Substrat (z.B. H3b) oder für einzelne konventionelle (KON) Systeme die Gutschrift von Kosten, die durch den Ersatz von mineralischem N durch über das Klee gras ins System eingeführtes N eingespart werden.

Auf der Kostenseite fallen bei einzelnen Humusersatzstrategien z.B. Kosten an für zusätzliches Saatgut bei der Integration einer Zwischenfrucht (H2), Kosten für organische Handelsdünger (HTK; z.B. H1), die Kosten für N, das über Rindermist oder Biogasgülle in die Betriebe zurückgeführt wird (z.B. Ho +FMK, H3b) sowie zusätzlich Arbeitserledigungskosten beispielsweise durch die Integration einer Zwischenfrucht oder die Abfuhr des Klee grasses anstatt des Mulchens.

Im Falle der Varianten H3 (a bis e) fallen zusätzlich zu den veränderten Arbeitserledigungskosten gegenüber der Basisvariante Opportunitätskosten durch die Verdrängung von Marktfrüchten zugunsten von (Futter-)Leguminosen an. Diese werden in den Kosten und Salden der einzelnen Humusersatzstrategien im Folgenden graphisch mit ausgewiesen. Die Opportunitätskosten können mitunter auch als negative Kosten (Leistungen) verbucht werden, etwa wenn das neu integrierte Klee gras als zu verkaufende Marktfrucht (Biogas) höhere Leistungen generiert als die verdrängte Marktfrucht.

Es wurde generell unterstellt, dass das Klee gras in den entsprechenden Szenarien innerhalb einer außerbetrieblichen Futter-Mist-Kooperation vom erzeugenden Betrieb verkauft wird und der Stickstoff im zurückgeführten Mist bzw. der Biogasgülle wieder vom Kooperationspartner eingekauft wird.

Für die Kompostierung wurde keine Verrechnung etwaiger Kosten und Leistungen unterstellt, da der Kompost innerbetrieblich hergestellt und dann auch wiederverwendet wird.

4.5.3.2 Ergebnisse

Die Darstellung der betriebswirtschaftlichen Ergebnisse umfasst sowohl die absolute Höhe der Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreien Leistung (DAKL; €/ha) der jeweiligen Fruchtfolgen und ihrer Humusersatzstrategien, als auch die zusätzlichen Kosten und Leistungen, welche die jeweiligen Humusersatzstrategien verursachen und in den DAKL mit einbringen. Darüber hinaus sind im Weiteren auch die Salden aus Kosten und Leistungen der Humusersatzstrategien über alle Standorte hinweg noch einmal gesondert ausgeführt.

4.5.3.2.1 Ökologische Fruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation

Zum besseren Verständnis der einzelnen Humusersatzstrategien der ökologischen Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation sei an dieser Stelle erneut eine komprimierte Übersicht gegeben (Tabelle 16) (für weitere Erläuterungen zur Definition der Humusersatzstrategien siehe Berichtsteil „Vorstellung der Szenarien und Humusersatzstrategien“).

Tabelle 16: Humusersatzstrategien der ökologischen Beispielfruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation

Humusersatzstrategie	
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben
H0	Strohabfuhr
H1	Optimierung der N-Bilanz (Hühnertrockenkot)
H2	Zwischenfrüchte
H3a	Kleegras gemulcht
H3b	Kleegras Nutzung in der Biogasanlage
H3c	Kleegras Kompostierung
H3d	Kleegras Cut&carry
H3e	Optimierung C- und N-Bilanz

Ausgehend von den natürlichen Gegebenheiten und den zuvor festgelegten Fruchtfolgen lassen sich in den Basisvarianten der ökologischen Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation, abhängig vom Standort, eine DAKL von 1.123 €/ha (Sandböden/Nord-Ost), 1.353 €/ha (Börde/NRW) und 801 €/ha (Mittelgebirge/Südwest) erzielen (Abbildungen 34,35 und 36).

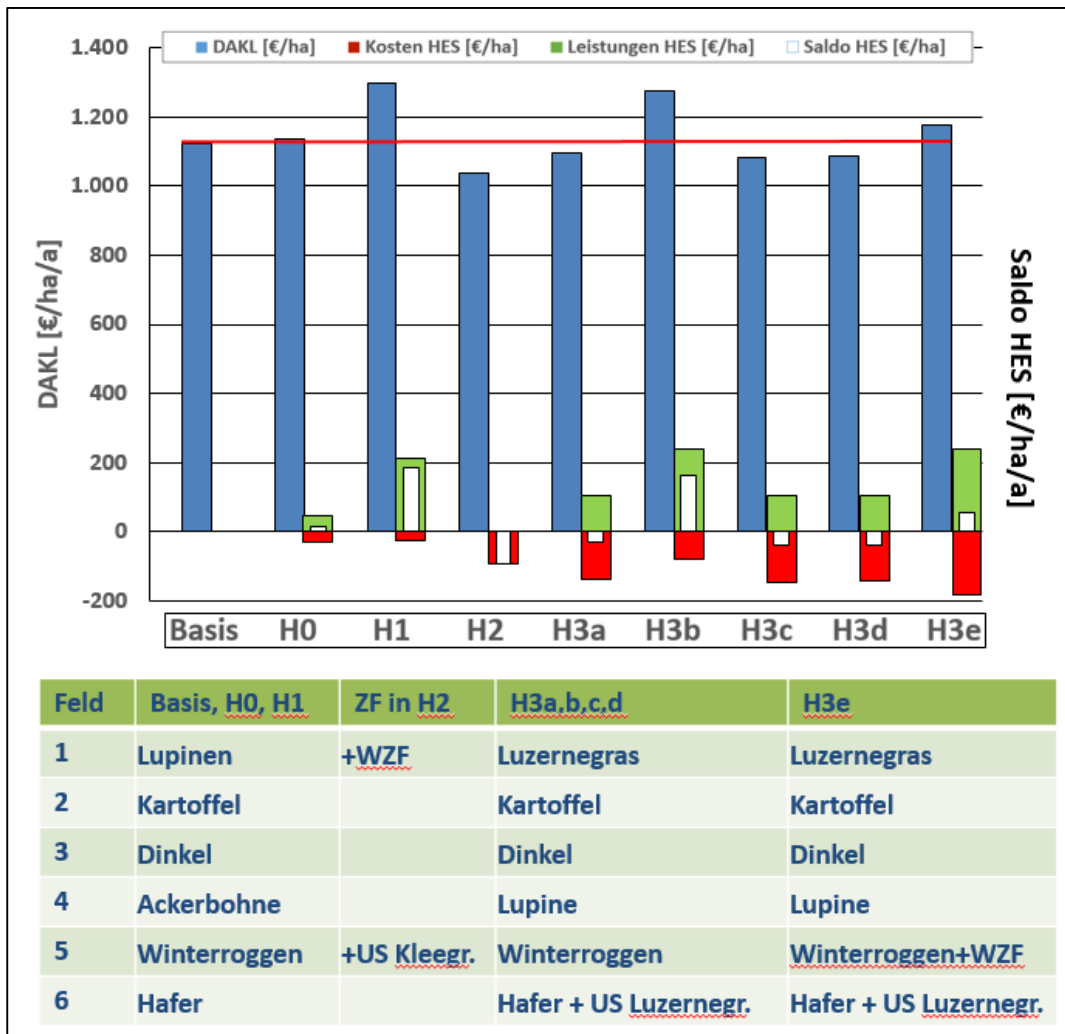


Abbildung 34: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nord-Ost“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation

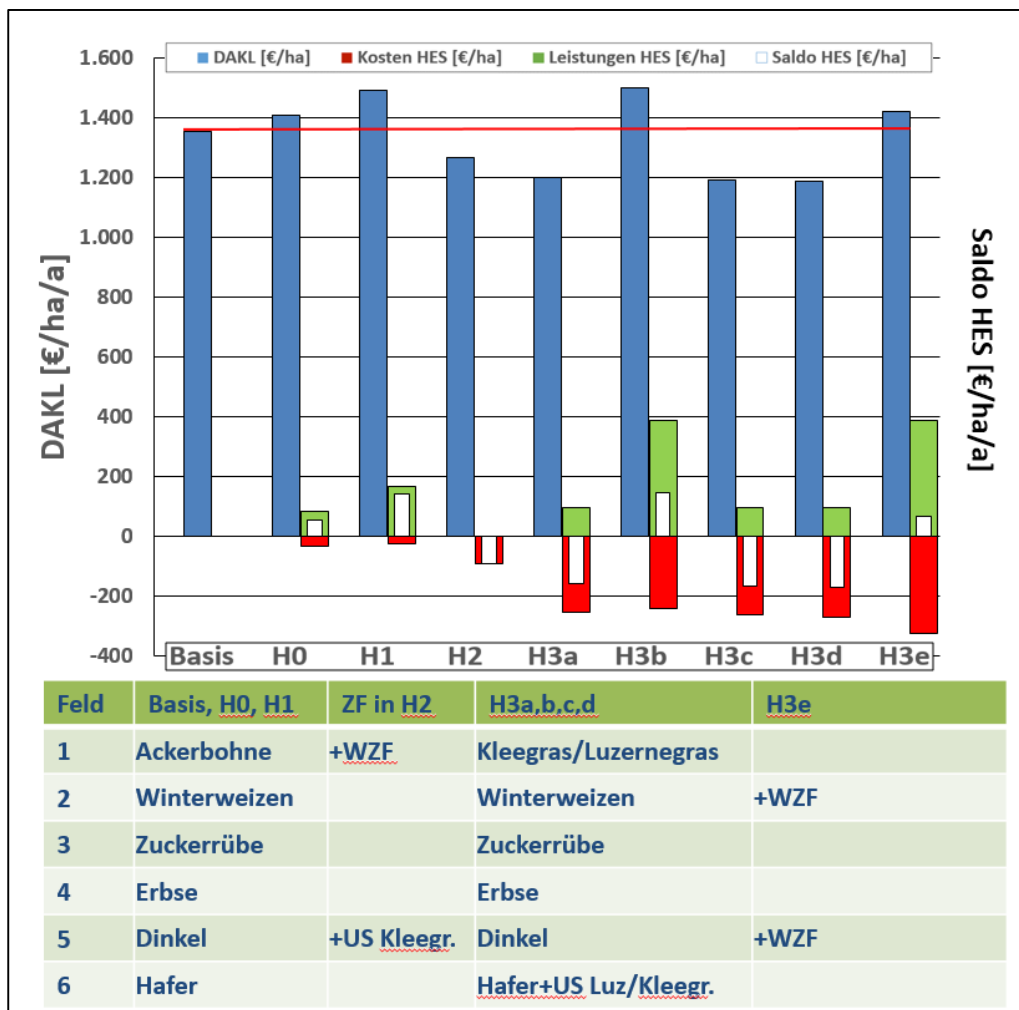


Abbildung 35: Direkt- und Arbeiterledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation

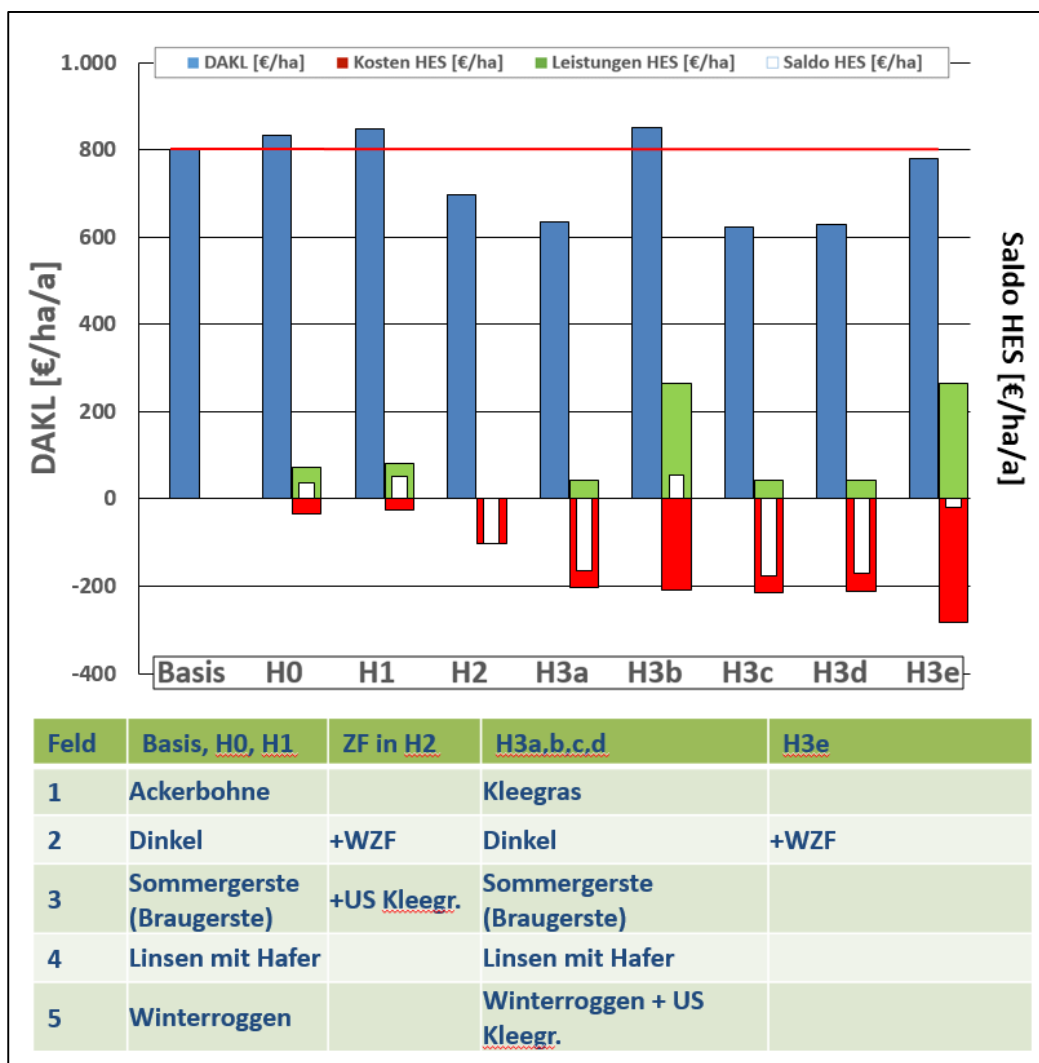


Abbildung 36: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Süd-West“, ökologisch, ohne Futter-Mist-Kooperation

Die Einnahmen aus dem Strohverkauf überwiegen bei H0 die zusätzlichen Kosten der Strohernte, wodurch auf jedem Standort jeweils eine leichte Steigerung des DAKL gegenüber der Basisvariante erzielt wird.

Auch die durch den Ausgleich der N-Bilanz erzielbaren Mehrerträge durch den Einsatz von Hühnertrockenkot (H1), sorgen in der Summe für eine Steigerung des DAKL, insbesondere im Szenario Sandboden/Nord-Ost.

Im Szenario H2 mit der Integration von Zwischenfrüchten sind gegenüber der Basisvariante Verluste hinzunehmen, da das Szenario auf die Verbesserung der Humusbilanz abzielt und hier keine Leistungen aus dem Zwischenfruchtbau unterstellt wurden. Allerdings könnten auch hier mittelfristig Ertragssteigerungen insbesondere auch durch eine aufgelockerte Fruchtfolge und die potenzielle Verhinderung von Pflanzenkrankheiten möglich sein.

Die Umstellung der Fruchtfolge zugunsten der Integration von Futterleguminosen (H3) führt zunächst einmal zu einem mehr oder weniger starken Rückgang des DAKL gegenüber der Basisvariante. Dies

trifft insbesondere dann zu, wenn das Klee- bzw. Luzernegras, das in H3 gegenüber der Basisvariante eine legume Marktfrucht (Lupine oder Ackerbohne) verdrängt, nicht weiter genutzt, sondern gemulcht wird. Dadurch entstehen lediglich Zusatzkosten für das Mulchen, sowie Kosten für entgangene Leistungen aus dem Marktfruchtverkauf. Allerdings wurde eine Ertragssteigerung der nicht-legumen Marktfrüchte gegenüber der Basisfruchtfolge von 5 % unterstellt.

Die Ernte des Kleegrases zur Biogasnutzung (H3b) führt zu erheblichen Kosten durch Mahd und Ernte des Kleegrases als Silage sowie den Rückkauf des Stickstoffs über die Biogasgülle. Der Verkauf des Kleegrases an die Biogasanlage sowie insbesondere die unterstellten Mehrerträge von zusätzlich 5 % gegenüber der Variante H3a, die durch den Einsatz flexibel einsetzbarer Biogasgülle auch in der Spätdüngung möglich sind, führen jedoch zum im Vergleich der Humusersatzstrategien höchsten Leistungsüberschuss, unabhängig vom Standort.

Einzige Mehreinnahmen durch Kompostierung bzw. Cut&carry des Kleegrases und der damit verbundenen Verbringung des Materials zu bedürftigen Kulturen entstehen durch die unterstellten Mehrerträge von 5 % gegenüber der Basisvariante. Diese sind mit der verbesserten zeitlichen und räumlichen Flexibilität des Kleegraseinsatzes in Form von Kompost oder Frischbiomasse zu begründen. Allerdings überwiegen die Mehrkosten bei diesen Verfahren jeweils die Mehreinnahmen, sodass unter dem Strich mit wirtschaftlichen Einbußen zu rechnen ist.

Auch die Optimierung der Fruchtfolge hinsichtlich ihrer C- aber auch ihrer N-Bilanz durch die Integration von Zwischenfrüchten und die Zufuhr von HTK (H3e) kann den Berechnungen zufolge zu einem positiven Saldo und einer Steigerung des DAKL gegenüber dem Mulchen des Kleegrases führen.

4.5.3.2.2 Ökologische Fruchtfolgen, mit Futter-Mist-Kooperation

Auch an dieser Stelle sei zum besseren Verständnis der einzelnen Humusersatzstrategien der ökologischen Fruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation eine komprimierte Übersicht gegeben (Tabelle 17) (für weitere Erläuterungen zur Definition der Humusersatzstrategien siehe Berichtsteil „Vorstellung der Szenarien und Humusersatzstrategien“).

Tabelle 17: Humusersatzstrategien der ökologischen Beispielfruchtfolgen, mit Futter-Mist-Kooperation

Humusersatzstrategie	
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben
H0	Strohabfuhr
H1	Optimierung der N-Bilanz (Hühnertrockenkot)
H2	Zwischenfrüchte
H3a	Höherer Anteil Futterleguminosen
H3b	-
H3c	-
H3d	-
H3e	-

Ausgehend von den natürlichen Gegebenheiten und den zuvor festgelegten Fruchtfolgen lassen sich in den Basisvarianten der ökologischen Fruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation, abhängig vom Standort, DAKL von 457 €/ha (Sandböden/Nord-Ost), 3.332 €/ha (Börde/NRW) und 2.276 €/ha (Mittelgebirge/Südwest) erzielen (Abbildungen 37, 38 und 39). Unabhängig vom Standort lassen sich – mit Ausnahme der Variante H3a – wieder gleiche Tendenzen in der Wirtschaftlichkeit der einzelnen Humusersatzstrategien wie bei den Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation feststellen.

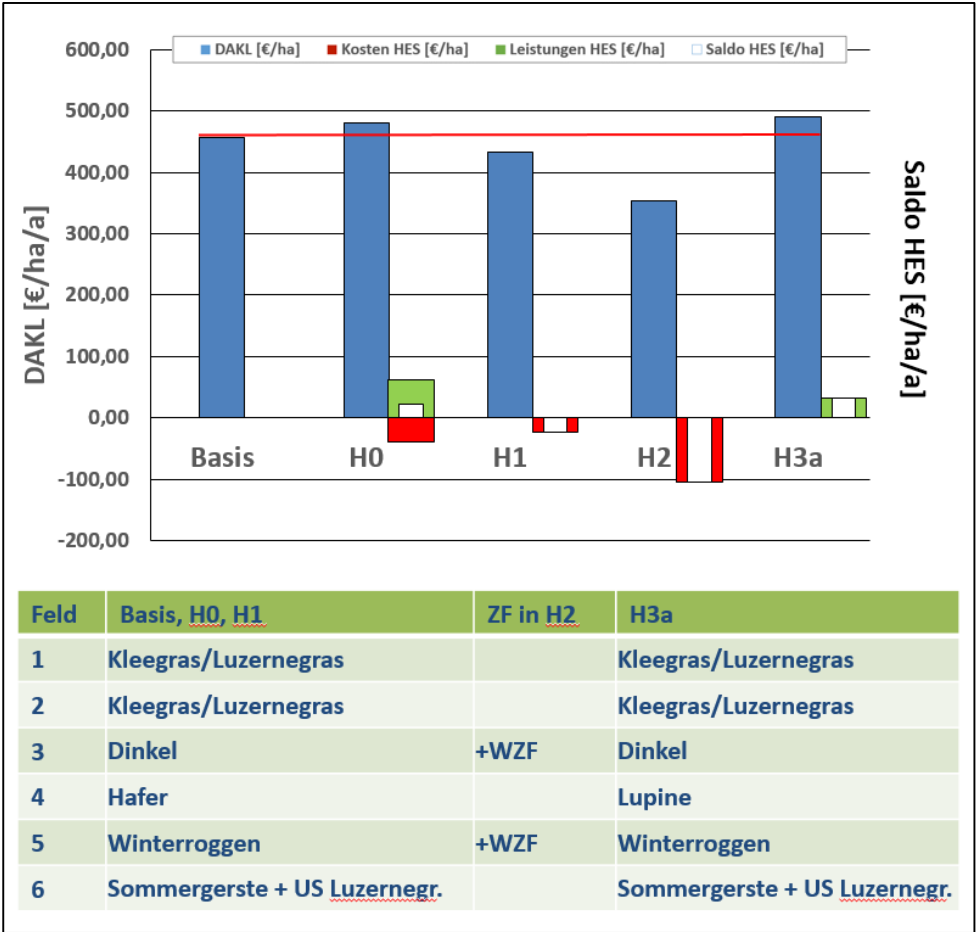


Abbildung 37: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nord-Ost“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation

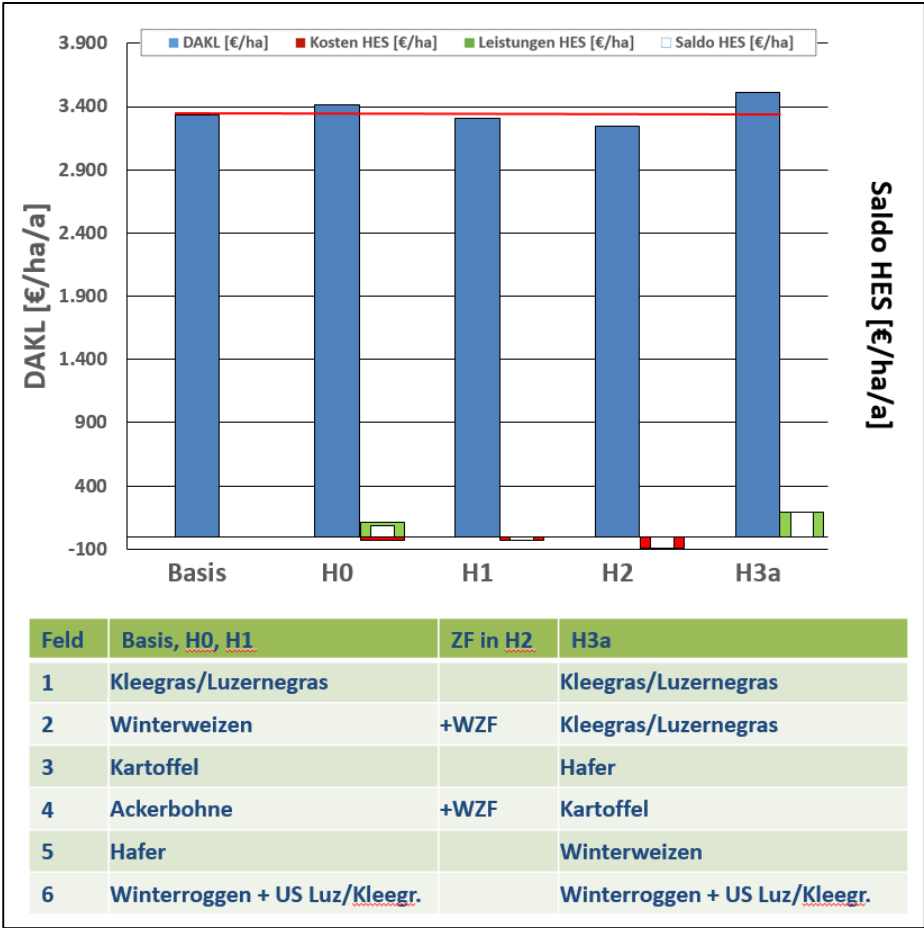


Abbildung 38: Direkt- und Arbeitsleistungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation

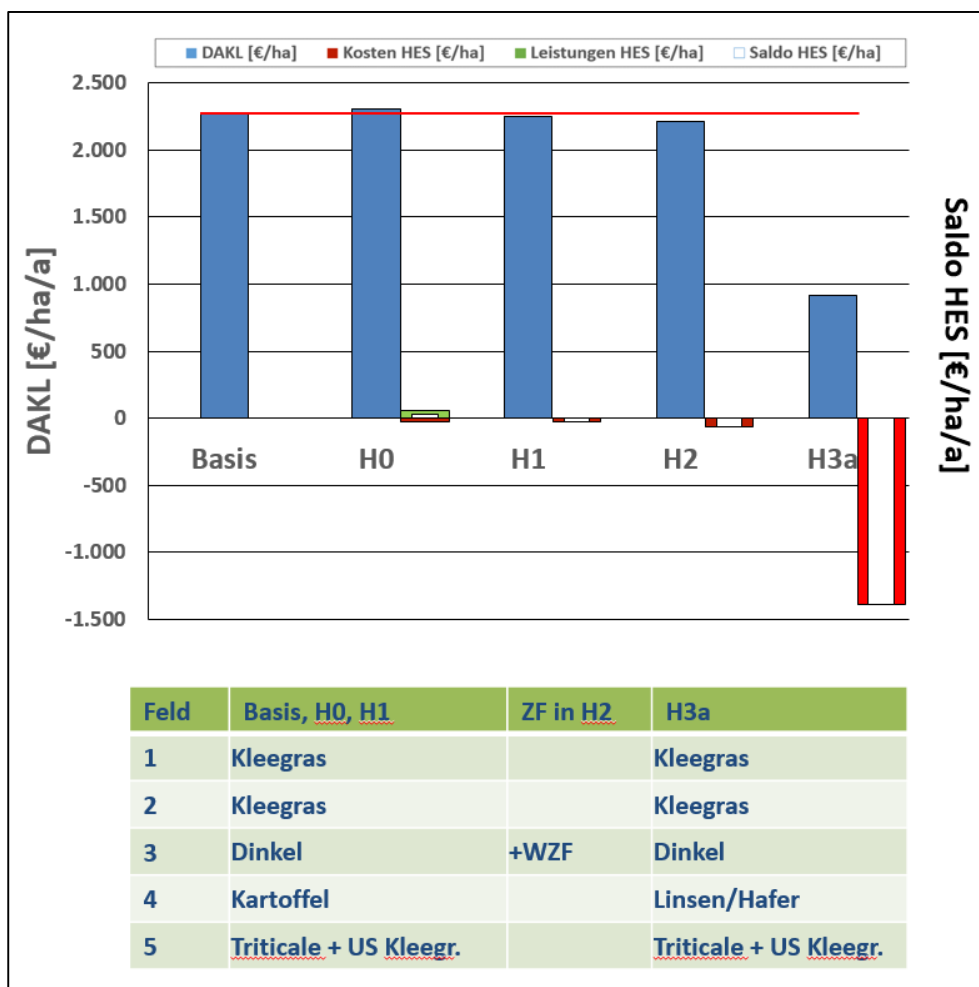


Abbildung 39: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Süd-West“, ökologisch, mit Futter-Mist-Kooperation

Auch bei den Fruchtfolgen mit integrierter Futter-Mist-Kooperation führt der Strohverkauf (H0) zu einer Steigerung des DAKL trotz Berücksichtigung der zusätzlichen Erntekosten.

Im Unterschied zu den Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation verursacht die Einfuhr von Hühnertrockenkot (H1) in den Szenarien mit Futter-Mist-Kooperation lediglich Kosten und führt damit zu einer Senkung des DAKL gegenüber der Basisvariante. Dies lässt sich insbesondere damit begründen, dass unterstellt wurde, dass aufgrund der bereits bestehenden Futter-Mist-Kooperation und der damit einhergehenden Möglichkeit des Einsatzes eines mobilen Düngemittels auch vor der Düngung mit HTK bereits eine gute Synchronisation von N-Bedarf und N-Angebot bestanden hat und deshalb keine Ertragserhöhungen unterstellt wurden.

Der Einsatz einer Zwischenfrucht (H2) führt auch bei den Fruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation zu Leistungseinbußen aufgrund der Optimierung hinsichtlich der Humusbilanz und der Unterstellung gleichbleibender Erträge.

Im Gegensatz zu den Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation wurde bei den Fruchtfolgen mit integrierter Futter-Mist-Kooperation nur in einem Fall eine zusätzliche Futterleguminoase integriert, die eine legume Marktfrucht ersetzt (Börde/NRW), in den anderen Fällen wurden nicht-legume Marktfrüchte durch legume Marktfrüchte ersetzt (H3a). Dies hat zur Folge, dass sich das betriebswirtschaftliche Ergebnis (DAKL) in diesem Fall lediglich abhängig vom Wechsel der

Marktf Frucht ändert. Während die Integration von Lupine statt Hafer (Sandböden/Nord-Ost) sowie eines Klee-/Luzernegrases statt der Ackerbohne (Börde/NRW) aufgrund der jeweiligen vorteilhafteren DAKL der neu integrierten gegenüber den verdrängten Früchten eine Erhöhung der ökonomischen Effizienz aufweist, führt die Verdrängung der Kartoffel durch ein Linsen/Hafer-Gemenge (Mittelgebirge/Süd-West) zu einer deutlichen Verschlechterung der DAKL aufgrund der wesentlich geringeren ökonomischen Leistung des Linsen/Hafer-Gemenges.

4.5.3.2.3 Konventionelle Fruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation

Auch hier sei zum besseren Verständnis der einzelnen Humusersatzstrategien der konventionellen Fruchtfolgen (ohne Futter-Mist-Kooperation) eine komprimierte Übersicht gegeben (Tabelle 18: Humusersatzstrategien der konventionellen Beispielfruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation) (für weitere Erläuterungen zur Definition der Humusersatzstrategien siehe Berichtsteil „Vorstellung der Szenarien und Humusersatzstrategien“).

Tabelle 18: Humusersatzstrategien der konventionellen Beispielfruchtfolgen, ohne Futter-Mist-Kooperation

Humusersatzstrategie	
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben
H0	Strohabfuhr
H1	-
H2	Zwischenfrüchte
H3a	Integration von Futterleguminosen (Kleegras gemulcht)
H3b	Integration von Futterleguminosen (Kleegras Nutzung in der Biogasanlage)
H3c	-
H3d	-
H3e	-

Ausgehend von den natürlichen Gegebenheiten und den zuvor festgelegten Fruchtfolgen lassen sich in den Basisvarianten der konventionellen Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation, abhängig vom Standort, DAKL von 292 €/ha (Sandböden/Nord-Ost), 673 €/ha (Börde/NRW) und 357 €/ha (Mittelgebirge/Südwest) erzielen (Abbildungen 40, 41 und 42).

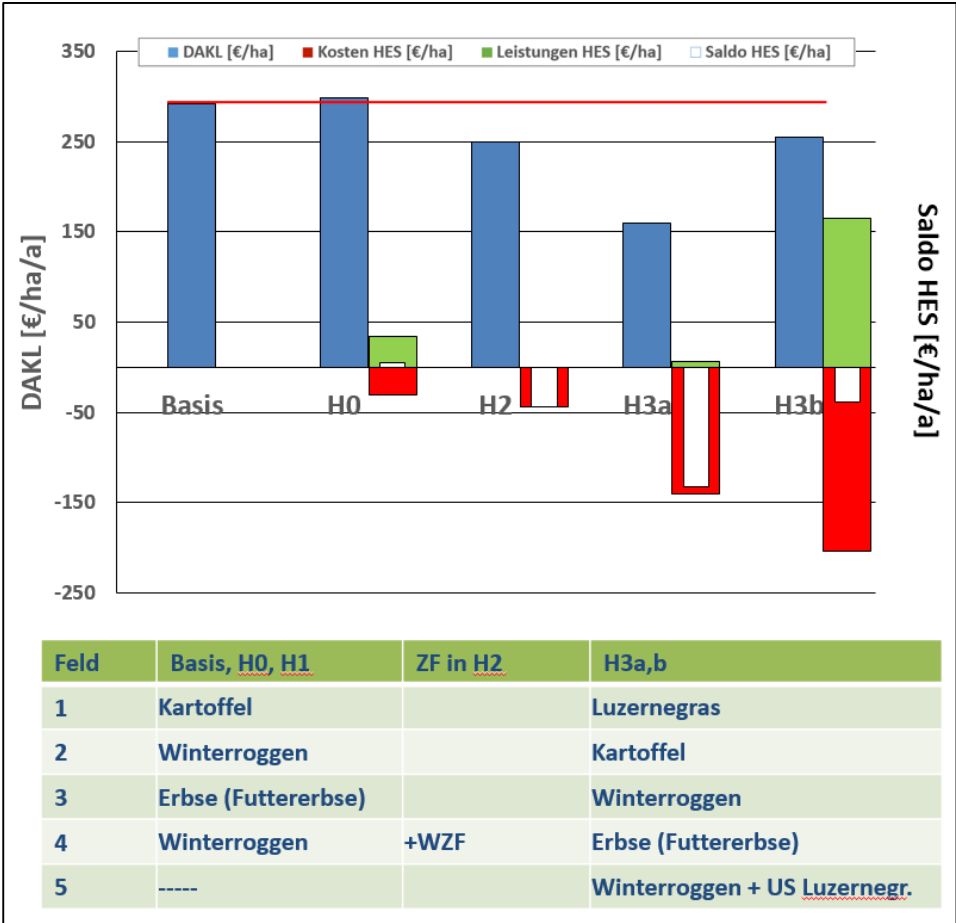


Abbildung 40: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Sandboden/Nordost“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation

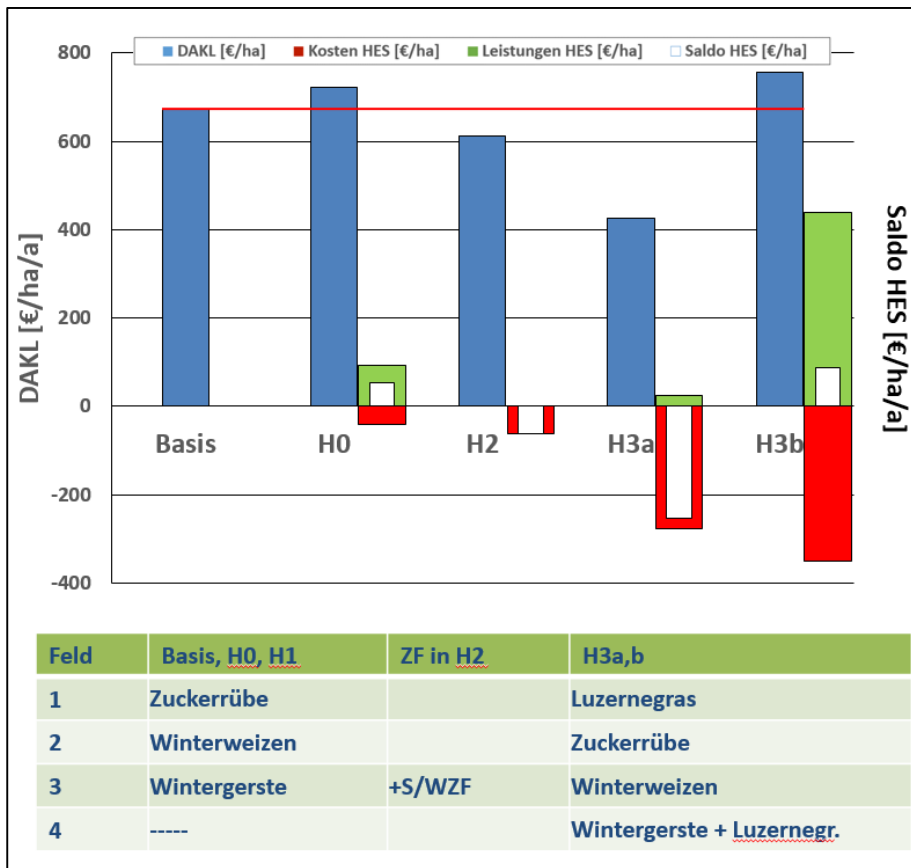


Abbildung 41: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Börde/NRW“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation

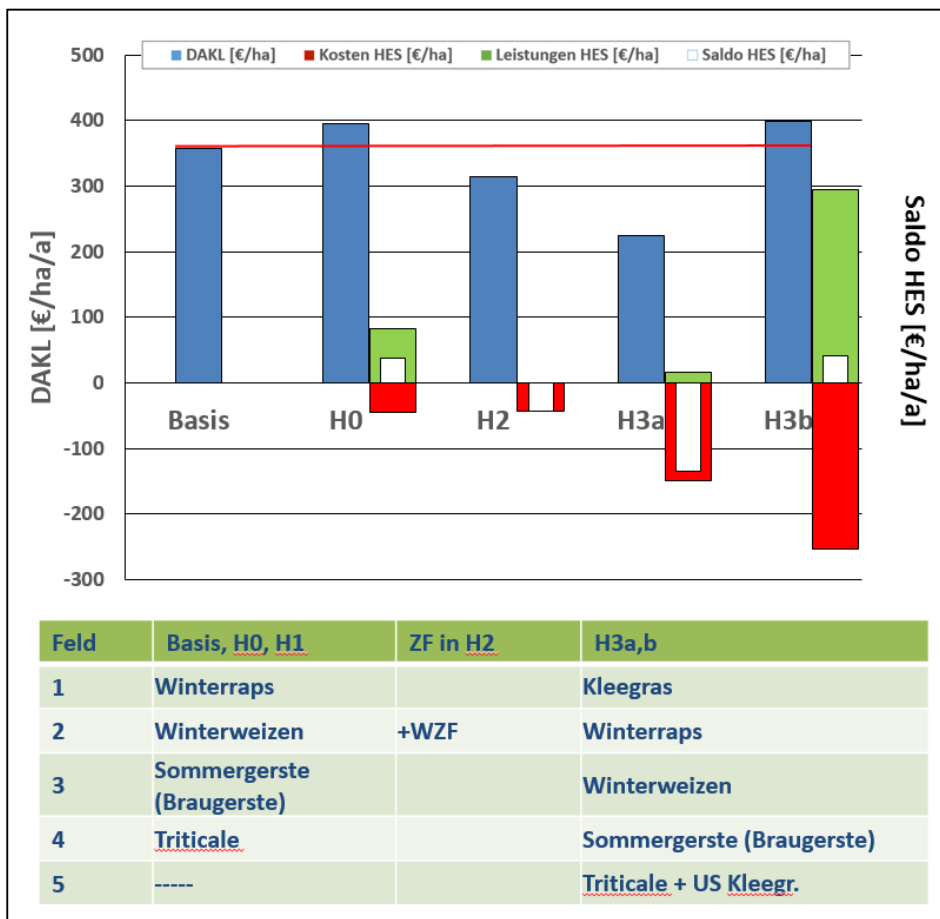


Abbildung 42: Direkt- und Arbeitserledigungskostenfreie Leistung (DAKL) (€/ha) sowie Kosten, Leistungen und Saldo der einzelnen Humusersatzstrategien (€/ha) für den Standort „Mittelgebirge/Südwest“, konventionell, ohne Futter-Mist-Kooperation

Strohverkauf (H0) und Einsatz von Zwischenfrüchten weisen in den konventionellen Beispielfruchtfolgen die gleichen Effekte wie in den ökologischen Fruchtfolgen auf, also leichte DAKL-Gewinne durch den Strohverkauf und Verluste durch die Zusatzkosten des Zwischenfruchtanbaus bei gleichbleibenden Erträgen.

Die Integration von Klee gras, das gemulcht wird (H3a), senkt das durchschnittliche Ergebnis (DAKL €/ha) über alle Fruchtfolgeglieder hinweg deutlich, da durch das Klee gras hier keine zusätzlichen Marktleistungen erzielt, sondern lediglich Kosten verursacht werden, und der durchschnittliche DAKL/ha nun auf ein weiteres Fruchtfolgefeld berechnet wird (fünf statt vier). Allerdings sind geringe Gutschriften für eingesparten mineralischen Stickstoff durch die N-Bereitstellung der Leguminosen möglich. Wird das in die Fruchtfolge integrierte Klee gras an die Biogasanlage verkauft und als Biogasgülle auf den Betrieb zurückgeführt (H3b), kann dies zu moderaten Zugewinnen der DAKL im Vergleich zur Basisvariante führen, wenn ein entsprechendes Ertragspotenzial des Klee grasses gegeben ist (z.B. nicht bei Sandboden/Nordost).

4.5.3.3 Diskussion der Ergebnisse

Direkttransfer von Klee gras

Zusätzlich zur negativen ökonomischen Bilanz des Klee gras-Transfer-Verfahrens Cut&carry ist zu vermerken, dass die Synchronisation vom Zeitpunkt der Klee grasernte mit der Bedürftigkeit des Mulchs einer Nehmerkultur in der Praxis nicht ganz einfach zu realisieren ist. Trotz der leicht schlechteren betriebswirtschaftlichen Bilanz kann die Kompostierung hier eine höhere Flexibilität bei der Applikation des Düngers ermöglichen (abgesehen von den Mulcheffekten, die der Klee graskompost im Gegensatz zum frisch gemähten Klee grasmaterial wohl kaum zu erzeugen imstande ist).

Preisansatz für Stickstoff

Der den obigen Berechnungen zugrunde gelegte Preisansatz für Stickstoff von 2,50 €/kg stellt einen Mittelwert von Preisen dar, die im ökologischen Landbau für die Erzeugung von N entweder über legume Zwischenfrüchte, Klee gras oder beim Einkauf von Handelsdüngern angesetzt werden müssen. Die Spanne ist hierbei in der Praxis sicherlich groß. Würde ein verdoppelter N-Preis von 5 €/kg angesetzt werden, so würde sich die Vorteilhaftigkeit beispielsweise des Einkaufs von HTK, aber auch der Rückkauf von Mist oder Biogasgülle senken, die betriebswirtschaftliche Effizienz der entsprechenden Humusersatzstrategien wäre erniedrigt.

Transportkosten Wirtschaftsdünger

Die Transportkosten der organischen Wirtschaftsdünger Mist und Biogasgülle sind aus Gründen der Vereinfachung und Übersichtlichkeit in den vorliegenden Berechnungen nicht berücksichtigt worden. Je weiter die Wirtschaftsdünger transportiert werden müssen, umso stärker verringert sich die Vorzüglichkeit der entsprechenden Humusersatzstrategien. Daher sind in der Praxis immer Kooperationen in möglichst unmittelbarer räumlicher Umgebung des Betriebs zu bevorzugen.

Nutzung des Klee grasses in der Biogasanlage

Die Berechnungen haben gezeigt, dass die Option der Vergärung des Kleeegrases in der Biogasanlage durchaus ökonomische Vorteile gegenüber anderen Humusersatzstrategien aufweisen kann aufgrund der guten Pflanzenverfügbarkeit des darin enthaltenen N und damit verbundener positiver Ertragseffekte, sowie einer Marktleistung, die über den Verkauf des Kleeegrases als Substrat an die Biogasanlage erzielt werden kann.

Weitere potentielle Effekte der Biogasgülle beispielsweise auf das Bodenleben und damit indirekt auf die Bodenfruchtbarkeit wurden in den ökonomischen Betrachtungen nicht berücksichtigt. In der Literatur sind hierzu verschiedentliche Einschätzungen zu finden (Ernst et al., 2008; Johansen et al., 2013; Frøseth et al., 2014; Terhoeven-Urselmans et al., 2009), die allerdings keine eindeutigen Schlüsse zulassen, ob die Effekte überwiegend positiver oder negativer Natur sein können, weshalb sie nicht in die betriebswirtschaftliche Analyse integriert wurden.

Des Weiteren wurden weder bei der Biogasgülle noch bei der Mist-Applikation Lager- oder Ausbringungsverluste berücksichtigt, die die N-Verfügbarkeit herabsenken können. Allerdings ist in der eher verhalten gewählten Annahme von Ertragssteigerungseffekten bei der Anwendung von Biogasgülle bereits ein N-Verlustpotenzial implizit berücksichtigt.

Die Nährstoffaustauschbeziehungen der vorgestellten Szenarien beziehen sich ausschließlich auf den Stickstoff (N), weil dieser der am meisten limitierende Produktionsfaktor im Ökologischen Landbau ist und ein gutes N-Management entscheidend für den agronomischen und ökonomischen Erfolg von Ökobetrieben ist. Phosphor (P) und Kalium (K) können leichter von extern zugeführt dem ökologischen Betriebssystem zugeführt werden. Daher wurden diese Makronährstoffe bewusst nicht berücksichtigt, die Kosten für einen eventuellen Ausgleich dieser Düngemittel müssten also noch zusätzlich mit einbezogen werden. Die in die Biogasanlage exportierten und später in der Biogasgülle reimportierten N-Mengen beziehen sich auf den N-Gehalt in der Klee gras-Frischmasse. Aufgrund der veränderten Nährstoffzusammensetzung in der Biogasgülle im Vergleich zur Klee grasfrischmasse kann es dabei vorkommen, dass bei Rückführung der äquivalenten N-Menge nicht auch die gesamten äquivalenten Mengen an P und K zurückgeführt werden. Diese müssten mittelfristig als Grunddünger auch im ökologischen Landbau zugekauft werden und würden das betriebswirtschaftliche Ergebnis der Biogasvariante (H3b) jeweils zusätzlich belasten.

4.5.3.4 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus betriebswirtschaftlicher Sicht

Die ökologischen Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation weisen positive ökonomische Bilanzen durch den Strohverkauf (H0), Ertragserhöhungen (N-Bilanzausgleich HTK, H1; BGA-Gülle, H3b) sowie die Optimierung der Fruchtfolge durch Zwischenfrüchte und org. N-Dünger (H3e; nicht bei Mittelgebirge) auf. Bei den ökologischen Fruchtfolgen mit Futter-Mist-Kooperation kann die Ökonomie nur durch Strohverkauf bzw. die Integration zusätzlicher Futterleguminosen und deren Verkauf verbessert werden. Allerdings hängt die Möglichkeit einer verbesserten oder verschlechterten Ökonomie maßgeblich mit den Opportunitätskosten der verdrängten Marktfrucht zusammen. Aufgrund fehlender Ertragserhöhungen fällt die ökonomische Bilanz beim N-Bilanzausgleich durch HTK (H1) bzw. dem Zwischenfruchtanbau (H2) negativ aus. Für die konventionellen Fruchtfolgen ohne Futter-Mist-Kooperation hat darüber hinaus noch die Einsparung von mineralischem N durch den Anbau von Leguminosen einen positiven betriebswirtschaftlichen Effekt. Auch hier verursacht der Zwischenfruchtanbau lediglich Kosten ohne Mehreinnahmen. Die

Biogasnutzung kann zu einer Verbesserung des betriebswirtschaftlichen Ergebnisses führen, wenn ein entsprechendes standortabhängiges Ertragspotenzial für das zu verkaufende Klee gras vorhanden ist.

Aus den gezeigten Ergebnissen der betriebswirtschaftlichen Analyse lässt sich schlussfolgern, dass aus ökonomischer Sicht bei Betrieben ohne Futter-Mist-Kooperation insbesondere eine Optimierung der N-Bilanz mittels HTK und darüber hinaus die mobile Bereitstellung organischer Düngemittel aus Biogasgülle, Kompost oder Cut&carry lohnenswert sind, da hier aufgrund der besseren Synchronisation von Nährstoffbedarf der Marktfrüchte und Nährstoffangebot Ertragssteigerungen zu erwarten sind. Allerdings sind die Zusatzkosten der Kompostierung/Cut&carry nicht zu vernachlässigen. Da die räumlich flexible Nährstoffverfügbarkeit bei Betrieben mit Futter-Mist-Kooperation bereits gegeben ist, ist der Effekt einzelner Humusersatzstrategien auf die Wirtschaftlichkeit weniger positiv, lediglich durch den Verkauf von Stroh oder Klee gras sind Leistungssteigerungen zu erwarten. Die Integration von Leguminosen in konventionelle Fruchtfolgen kann Bedarf und Kosten für mineralischen Stickstoff senken, darüber hinaus lassen sich durch für die Humusbilanz negativ wirksame Maßnahmen wie den Verkauf des Strohs oder aber des Klee grasses zur Biogasnutzung zusätzliche Leistungen erzielen.

Insgesamt lässt sich feststellen, dass – abhängig von den zugrunde gelegten Annahmen – Humusersatzstrategien nicht lediglich mit Kosten verbunden sein müssen, sondern durchaus in manchen Szenarien auch das Potenzial haben, das betriebswirtschaftliche Ergebnis einer Fruchtfolge zu verbessern. Dies kann ein wichtiges Signal an die Praxis darstellen, dass eine gute Humuswirtschaft auch kurzfristig wirtschaftlich sinnvoll sein kann. Welche Szenarien besondere win-win-Varianten im Hinblick sowohl auf Humusersatz und Ökonomie haben, wird im Syntheseteil dieses Berichts gesondert aufgegriffen und vertieft.

4.5.4 Synthetische Bewertung von Humusersatzstrategien unter Berücksichtigung von Humusbilanzen und Betriebswirtschaft

4.5.4.1 Ergebnisse

Die Auswertung der Bewirtschaftungsszenarien zeigt, dass die Direkt- und Arbeiterledigungsfreien Kosten (DAKL) von Humusersatzstrategien rechnerisch nicht unbedingt von erwarteten produktionswirksamen Leistungen kompensiert werden (Abb. 43-45). Gleichzeitig sind Maßnahmen zur Verbesserung der Versorgung der Böden mit organischer Substanz gegenüber den Basis-Szenarien aus Sicht der Humusbilanz vor allem in den ÖKO-FMK-Bewirtschaftungsszenarien unbedingt notwendig (Abbildung 43). Einen optimalen Lösungsansatz bietet hier die Integration von Futterleguminosen und Nutzung des Aufwuchses für die Biogasproduktion einschl. Rückführung der Gärreste (HES H3b). Bei geringem Ertragspotential der Futterleguminosen (Standortszenario Sandböden/Nord-Ost) sind jedoch zusätzlich möglicherweise weitere Maßnahmen notwendig.

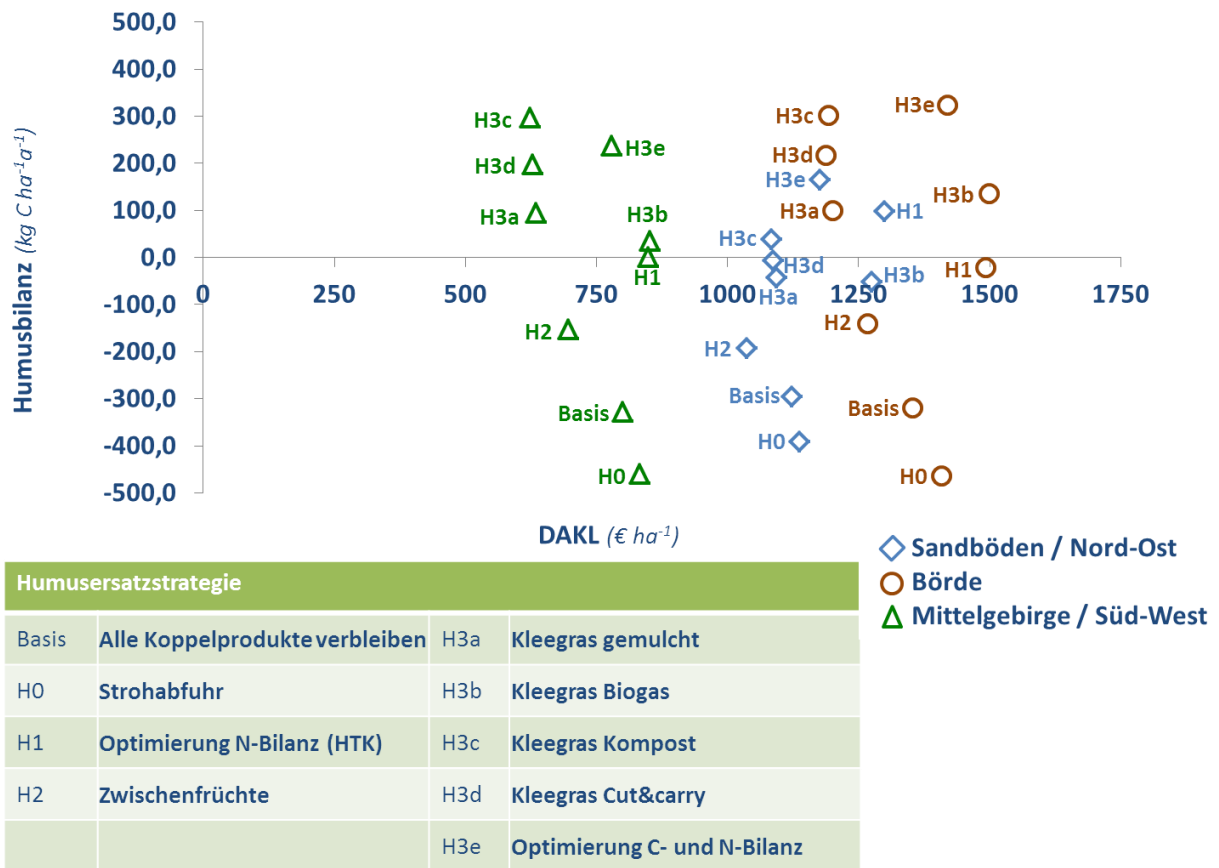
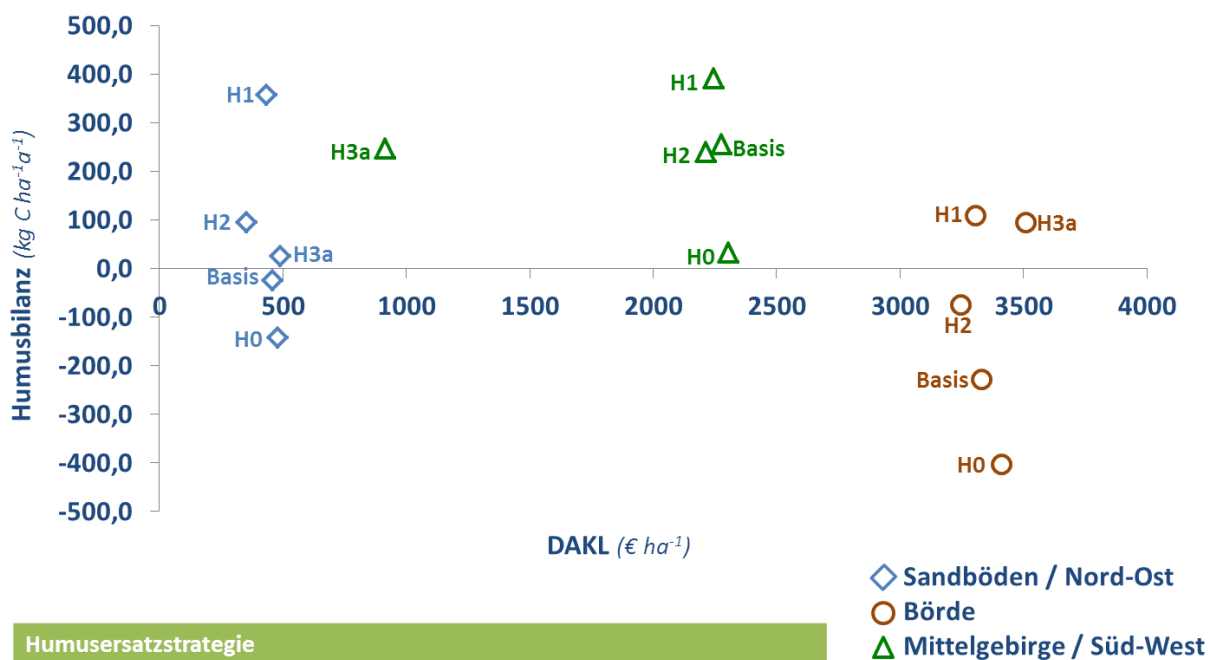


Abbildung 43: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu ökologischen Betrieben ohne Futter-Mist-Kooperation (ÖKO-FMK). Erläuterung der Humusersatzstrategien (Basis...H3e) s. Tab. 14. Humusbilanzen berechnet mit HUMANMOD (vgl. Kap. 4.4). Berechnung DAKL auf Grundlage von KTBL (2014) erläutert in Kap. 4.5.4.

In den ökologischen Bewirtschaftungsszenarien mit Futter-Mist-Kooperation sind die Humusbilanzen bereits in den Basis-Fruchtfolgen nahezu ausgeglichen (Sandböden/Nord-Ost, Fruchtfolge mit 33% Futterleg.) bzw. sogar positiv (Mittelgebirge/Süd-West, Fruchtfolge mit 40% Futterleg.), außer im Szenario für Standorte mit hohem Ertragspotential und einem vergleichsweise geringen Anbauumfang von Futterleguminosen (Börde, Fruchtfolge mit 16,7% Futterleg.). Eine betriebswirtschaftlich attraktive Lösung zum Ausgleich der Humusbilanzen ist sowohl im Szenario Sandböden/Nord-Ost wie auch im Szenario Börde die Ausweitung des Leguminosenanbaus (HES H3a). In der Fruchtfolge Sandböden/Nord-Ost-Szenarios wurde dabei eine Getreidefrucht durch Lupinen ersetzt, während im Szenario Börde die Fruchtfolge von 6 auf 7 Felder erweitert wurde, um einen zweijährigen Kleeergrasanbau zu ermöglichen und die Auswahl der Marktfrüchte nicht einzuschränken. Die Abnahme der Marktfrucht-Anbaufläche durch diesen Schritt ist in der betriebswirtschaftlichen Auswertung

berücksichtigt.



Humusersatzstrategie			
Basis	Alle Koppelprodukte verbleiben	H2	Zwischenfrüchte
H0	Strohabfuhr	H3a	Höherer Leguminosenanteil
H1	Optimierung N-Bilanz (HTK)		

Abbildung 44: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu ökologischen Betrieben mit Futter-Mist-Kooperation (ÖKO+FMK). Erläuterung der Humusersatzstrategien (Basis...H3a) s. Tab. 14. Humusbilanzen berechnet mit HUMANMOD (vgl. Kap. 4.4). Berechnung DAKL auf Grundlage von KTBL (2014) erläutert in Kap. 4.5.4.

Bei den definierten Bewirtschaftungsszenarien für den konventionellen Landbau bestehen aufgrund der geringeren Inanspruchnahme von N aus der Mineralisierung organischer Bodensubstanz infolge der mineralischen N-Düngung rechnerisch größere Spielräume bei den Humusersatzstrategien. Die Humusbilanzen sind bereits in den Basis-Varianten mit Verbleib aller Koppelprodukte auf den Flächen schwach bis mäßig positiv, die Integration von Zwischenfrüchten oder Futterleguminosen bringt zwar einen Gewinn für die Humusbilanzen, rechnet sich aber betriebswirtschaftlich nicht. Demgegenüber bietet die Integration von Futterleguminosen für die Nutzung zur Biogaserezeugung auch in den konventionellen Szenarien eine aus Sicht von Humusbilanz und Betriebswirtschaft vorteilhafte Option, zumindest auf Standorten mit mittlerem (Mittelgebirge/ Süd-West) und hohem (Börde) Ertragsniveau. Ein Verkauf der Koppelprodukte in den Basis-Varianten (HES H0) führt auch bei den konventionellen Szenarien in allen Fällen zu deutlich negativen Humusbilanzen und ist daher trotz betriebswirtschaftlicher Vorteile gegenüber den Basis-Varianten abzulehnen.

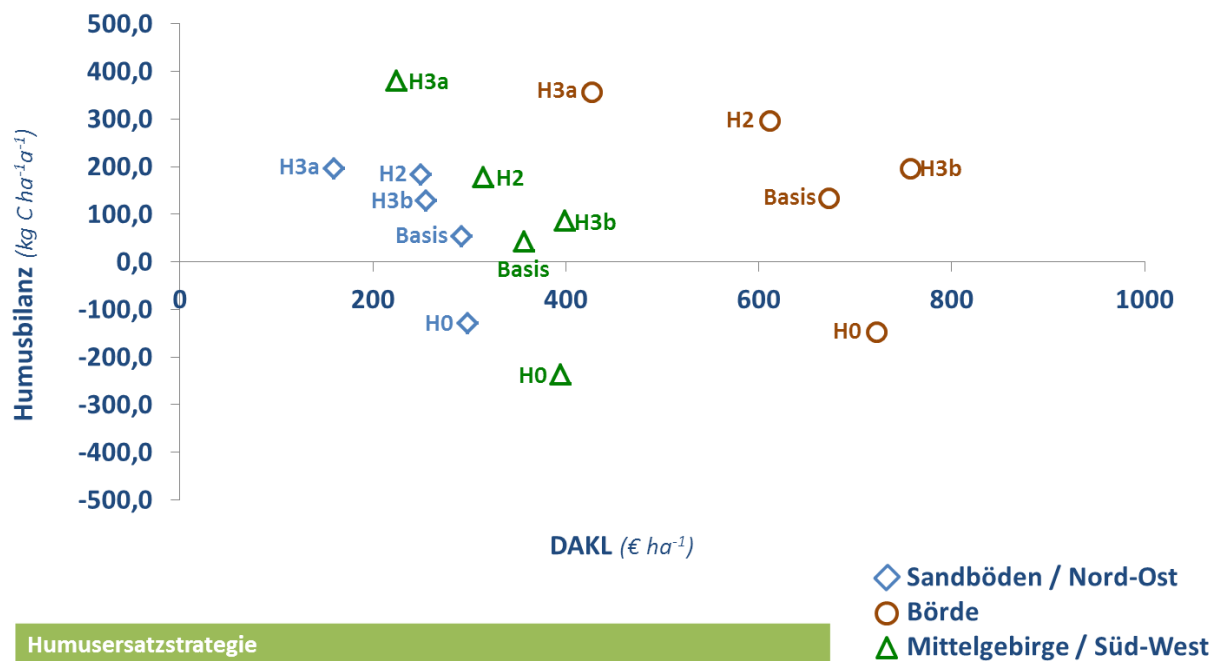


Abbildung 45: Humusbilanzen und DAKL für Bewirtschaftungsszenarien zu konventionellen Marktfruchtbetrieben ohne Futter-Mist-Kooperation (KON-FMK). Erläuterung der Humusersatzstrategien (Basis...H3b) s. Tab. 14. Humusbilanzen berechnet mit HU-MOD (vgl. Kap. 4.4). Berechnung DAKL auf Grundlage von KTBL (2014) erläutert in Kap. 4.5.4.

4.5.4.2 Schlussfolgerungen

Eine ausreichende Versorgung von Ackerböden mit organischer Substanz erfordert unter Bedingungen des ökologischen Landbaus die Integration von Futterleguminosen in die Fruchtfolgen. Dies kann trotz der abnehmenden Marktfrucht-Anbaufläche auch in viehlosen Betrieben betriebswirtschaftlich vorteilhaft umgesetzt werden. Die Lösung des scheinbaren Zielkonfliktes zwischen Humusversorgung und ökonomischer Leistung kann so durch die Nutzung von Synergien eine Win-win-Situation erzeugen.

Unter Bedingungen des konventionellen Landbaus ist die Integration von Futterleguminosen in die Fruchtfolgen aus humusbilanzieller Sicht nicht unbedingt notwendig, wobei weitere ökologische Leistungen dieser Kulturen bzw. einer Aufweitung der Fruchtfolgen davon unberührt bleiben. Die Biogas-Varianten zeigen, dass der Anbau von Futterleguminosen zur Nutzung der ökologischen Leistungen durchaus wirtschaftlich vorteilhaft sein kann, da die Kultur auf diesem Wege zur Marktfrucht wird. Eine Entnahme und Verwertung der Koppelprodukte ist in den definierten Fruchtfolgen ohne Futterleguminosen je nach Standort und Fruchtfolge nicht oder nur sehr eingeschränkt möglich sollte unterbleiben, wenn keine anderen Maßnahmen zum Ausgleich der Humusbilanz ergriffen werden.

5 Diskussion der Ergebnisse

Für eine bessere Übersichtlichkeit wurde die Diskussion der Ergebnisse in Kapitel 4 direkt angegliedert an die Ergebnisse der einzelnen Module.

6 Angaben zum voraussichtlichen Nutzen und zur Verwertbarkeit der Ergebnisse.

7 Gegenüberstellung der ursprünglichen geplanten zu den tatsächlichen erreichten Zielen

7.1 Allgemeine Projektziele

Mit dem Vorhaben sollten

- 1) die Bewertung von Gründüngung und Stroh in Humusbilanzen überprüft und ggf. Anpassungsvorschläge gemacht werden, sowie
- 2) Möglichkeiten und Anforderungen eines nachhaltigen Humusmanagements auf der Basis von Stroh- und Gründüngung definiert werden.

Ad 1: Im Projekt wurden vorliegende Ergebnisse anderer Autoren zum Umsatz von Gründüngung und Stroh im Boden und dem Beitrag der Substrate zum Aufbau organischer Bodensubstanz zusammengetragen und synthetisch ausgewertet (Modul 1: Metaanalyse). Weiterhin wurden Feld- und Inkubationsversuche zur Erweiterung des Prozessverständnisses für die Definition mechanistischer Ansätze zur Bewertung der Substrate in Humusbilanzen durchgeführt. Auf dieser Grundlage wurden die Bewertung von Stroh und Gründüngung im Humusbilanzmodell HU-MOD aktualisiert und Vorschläge für eine Anpassung der Koeffizienten in der VDLUFA-Humusbilanzmethode erarbeitet.

Projektziel 1 wurde damit erreicht. Weiterführender Forschungsbedarf wird im Projektbericht dargestellt.

Ad 2: Es wurde eine Analyse von Humusersatzstrategien in viehlosen und viehschwachen Betrieben des ökologischen und konventionellen Landbaus auf Basis von regional differenzierten Szenarien durchgeführt. Die Bewertung erfolgte interdisziplinär unter Berücksichtigung von Humusbilanzen und Betriebswirtschaft. Auf diese Weise konnten wirtschaftlich vorteilhafte Optionen zur Sicherung der Humusversorgung unter den in den Szenarien abgebildeten Bedingungen identifiziert werden.

Projektziel 1 wurde damit erreicht. Weiterführender Forschungsbedarf wird im Projektbericht dargestellt.

7.2 Konkrete Zielstellung der einzelnen Projektmodule

Im Modul 1 sollte eine Metaanalyse vorliegender Ergebnisse zum Umsatz von Stroh und Gründüngung im Boden und dem Beitrag zum Aufbau organischer Bodensubstanz durchgeführt werden. Das Ziel wurde erreicht, die vorgesehene wissenschaftliche Publikation der Ergebnisse war jedoch zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen.

Ziel von Modul 2 war eine Statusanalyse zu Strohnutzung und Gründüngung in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland als Grundlage der Definition von Managementszenarien für die interdisziplinäre Bewertung von Humusersatzstrategien (Modul 5). Leider führte die gewählte Methodik (Fragebogen) in mehreren Versionen (Verteilung auf Veranstaltungen, Online-Fragebogen) Anläufen sowie bei unterschiedlichen Zielgruppen (LandwirtInnen, BeraterInnen) nicht zu dem gewünschten Erfolg. Die Situation wurde der Mittelgeberin BLE kommuniziert. Zur Erarbeitung der Statusanalyse wurden daher ergänzend statistische Daten verwendet und Experteninterviews mit

ausgewählten Landwirten, Beratern und Wissenschaftlern geführt. Das Ziel der Erarbeitung einer aktuellen Statusanalyse zur Strohverwertung und Gründüngung in der landwirtschaftlichen Praxis wurde daher nicht in vollem Umfang erreicht. Die Erarbeitung einer Grundlage für die Ausweisung von Bewirtschaftungsszenarien in Modul 5 konnte jedoch gewährleistet werden.

Die naturwissenschaftlichen Arbeiten zur Analyse des Umsatzes von Stroh und Gründüngung im Boden und der Implikationen für Organische Bodensubstanz/Humusversorgung, Produktivität und Umwelt in Modul 3 sollten als Grundlage für die Parametrisierung der Substrate in einem Bilanzmodell und die Erarbeitung von Vorschlägen für die Bewertung in Humusbilanzmethoden, insbes. nach VDLUFA, dienen. Dieses Ziel wurde in vollem Umfang erreicht.

In Modul 4 wurde auf Grundlage der Ergebnisse aus Modul 3 und unter Berücksichtigung der Ergebnisse aus Modul 1 die Parametrisierung von Stroh und Gründüngung im Humusbilanzmodell HUMOD aktualisiert. Unter Nutzung des Modells wurden Vorschläge für eine angepasste Bewertung der Substrate in der VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung erarbeitet und in Langzeit-Feldversuchen überprüft. Das Modulziel wurde damit in vollem Umfang erreicht.

Modul 5 diente der interdisziplinären Bewertung von Humusersatzstrategien in viehlosen und viehschwachen Betrieben unter Berücksichtigung von Humusbilanzen und Betriebswirtschaft. In diesem Rahmen wurden der Handlungsspielraum und wirtschaftlich vorteilhafte Optionen zur Sicherung der Humusversorgung in den erarbeiteten Szenarien definiert. Das Modulziel wurde damit in vollem Umfang erreicht.

8 Zusammenfassung

Stroh und Gründüngung stellen in viehlosen und viehschwachen Ackerbaubetrieben die wichtigsten im Betrieb verfügbaren Substrate für die Versorgung der Böden mit organischer Substanz dar. In Langzeit-Feldversuchen zeigt sich die Leistung beider Substrattypen jedoch sehr variabel, so dass Bedarf an einer Überprüfung und Präzisierung der Bewertung in der Humusbilanz besteht. Vor diesem Hintergrund wurden im BÖLN-Projekt *HumuGS* Vorschläge für eine differenzierte (Neu-)Bewertung von Stroh und Gründüngung in Humusbilanzen auf Grundlage empirischer Arbeiten und unter Nutzung eines Modells zur C- und N-Dynamik in Pflanzenproduktionssystemen entwickelt.

Unter Nutzung der Ergebnisse zur Bewertung von Stroh und Gründüngung in Humusbilanzen wurden weiterhin Strategien zur Sicherung der Humusversorgung von Ackerböden in viehlosen und viehschwachen Betrieben unter Berücksichtigung von Humusbilanzen und Betriebswirtschaft interdisziplinär analysiert.

Das Projektbestand aus fünf miteinander verknüpften Modulen

In Modul 1 wurden publizierte wissenschaftliche Ergebnisse zum Umsatz von Stroh und Gründüngung im Boden und dem Beitrag zum Aufbau organischer Bodensubstanz in einer Metaanalyse zusammenfassen ausgewertet. Es zeigte sich, dass Gründüngungsvarianten im Mittel der ausgewerteten Langzeit-Feldversuch zu einer Erhöhung der Vorräte an organischer Bodensubstanz führten, während dies durch Strohdüngung nicht erreicht wurde. Unter Berücksichtigung weiterer Varianten (Stallmist, Stroh+Gründüngung) wurde eine negative Beziehung zwischen dem CN-Verhältnis der Substrate bzw. Substratgemische und dem Aufbau organischer Bodensubstanz beobachtet. Offensichtlich ist die Retention von Stroh-C im Boden aufgrund des weiten CN-

Verhältnisses und der damit verbundenen hohen Wahrscheinlichkeit einer N-Limitierung der mikrobiellen Biomassesynthese gering. Der vergleichsweise hohe Ligningehalt von Stroh bedingt nur temporär eine höhere Abbaustabilität des Materials gegenüber grüner Biomasse.

Modul 2 diente der Erarbeitung einer Statusanalyse zu Strohverwertung und Gründüngung in der landwirtschaftlichen Praxis in Deutschland. Das Modul diente als Grundlage für die Ausweisung von Bewirtschaftungsszenarien für die interdisziplinäre Bewertung von Humusersatzstrategien in Modul 5.

Gegenstand des Moduls 3 waren die experimentelle Untersuchung des Umsatzes von Stroh und Gründüngung im Boden und der Implikationen für Humusbilanzen, Produktivität und Umwelt, sowie die Prüfung der Möglichkeit, eine entsprechende Bewertung der Substrate auf Grundlage des CN-Verhältnisses in Substraten und Substratgemischen und im Boden am bewerteten Standort vorzunehmen. Hiermit sollte ein einfacher mechanistischer Ansatz für die Bewertung der Substrate in Humusbilanzen geschaffen werden. Tatsächlich wurde im durchgeführten Inkubationsversuch eine negative Beziehung zwischen dem CN-Verhältnis der Substrate bzw. Substratgemische und der Retention von Substrat-C im Substrat-Boden-Gemisch nachgewiesen. Die Beobachtung steht im Einklang mit den Ergebnissen der Metaanalyse in Modul 1. Im Kurzzeit-Feldversuch zeigte sich entgegen den Erwartungen keine Differenzierung der untersuchten Parameter zwischen den Varianten trotz erheblicher Unterschiede in der Düngung.

In Modul 4 wurde, unter Nutzung der Ergebnisse aus Modul 3, die Parametrisierung von Stroh und Gründüngung im Humusbilanzmodell HU-MOD aktualisiert. Das Modell schätzt C- und N-Flüsse in Pflanzenproduktionssystemen und berechnet auf dieser Grundlage die Humusbilanz. Durch den Bezug auf N-Flüsse und die damit verbundene mögliche Aussage zu potentiell umweltgefährdenden N-Überschüssen oder einer unzureichenden N-Versorgung mit der organischen Düngung können mit dem Modell konzeptionell gesehene Koeffizienten für die VDLUFA-Methode zur Humusbilanzierung generiert werden. Auf diesem Wege wurde Vorschläge für eine differenzierte Bewertung von Stroh und Gründüngung in der Humusbilanzierung nach VDLUFA erarbeitet und in Langzeit-Feldversuchen überprüft. Vorgeschlagen wurden folgende Bewertungen: Stroh (N-arm, keine zusätzliche N-Quelle)=37 Häq Mg⁻¹ FM; Stroh(N-reich oder zusätzliche N-Quelle)=71 Häq Mg⁻¹ FM; Gründüngung, geringer N-Gehalt=11 Häq Mg⁻¹ FM (bei 10% TM), 22 Häq Mg⁻¹ FM (bei 20% TM); Gründüngung, hoher N-Gehalt=19 Häq Mg⁻¹ FM (bei 10% TM), 39 Häq Mg⁻¹ FM (bei 20% TM). Die Anwendung der angepassten Koeffizienten hat sich in der Prüfung in den Langzeit-Feldversuchen bewährt.

Die interdisziplinäre Analyse von Humusersatzstrategien in viehlosen und viehschwachen Betrieben des ökologischen und konventionellen Landbaus wurde auf Grundlage regional differenzierter Szenarien in Modul 5 vorgenommen. Für die Humusbilanzierung wurde das Modell HU-MOD verwendet. Die Berechnung der Humusbilanzen erfolgt dynamisch unter Berücksichtigung von C- und N-Entzügen mit der geernteten Pflanzenbiomasse sowie C- und N-Einträgen aus verschiedenen Quellen, insbesondere Düngung und –bei Leguminosen- symbiotischer Fixierung.

In der Humusbilanzierung ergab sich insbesondere unter den N-limitierten Bedingungen in Ackerbaubetrieben des ökologischen Landbaus die Notwendigkeit, die Versorgung der Böden mit organischer Substanz durch einen ausreichenden Anbauumfang von Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung zu gewährleisten. Besonders vorteilhafte Verwertungen der Leguminosen stellen dabei Futter-Mist-Kooperationen oder die Vergärung zur Biogaserzeugung dar, da bei diesen

Nutzungen für den Humusaufbau und/oder die Pflanzenernährung besonders wertvolle Substrate verfügbar werden (Stallmist, Gärreste).

In Ackerbaubetrieben des konventionellen Landbaus kommen i.d.R. keine N-limitierten Bedingungen vor. Der Ausgleich der Inanspruchnahme von N aus der Mineralisierung organischer Bodensubstanz besitzt daher geringere Bedeutung als im ökologischen Landbau. Dennoch besteht auch in Fruchtfolgen des konventionellen Landbaus häufig Bedarf an über den Verbleib der Koppelprodukte hinausgehenden Maßnahmen zur Gewährleistung einer ausreichenden Humusversorgung. Hier bietet sich Zwischenfruchtbau, aber auch der Anbau von Futterleguminosen in Hauptfruchtstellung an.

Die betriebswirtschaftliche Analyse verschiedener Humusersatzstrategien zeigt dabei, dass diese nicht lediglich mit Kosten verbunden sein müssen oder per se unrentabel, sondern – abhängig vom Szenario und den regionalen Standortvoraussetzungen - auch das Potenzial haben können, das betriebswirtschaftliche Ergebnis einer Fruchtfolge zu verbessern. Dies ist als wichtiges Signal an die Praxis zu sehen: eine gute Humuswirtschaft kann auch kurzfristig wirtschaftlich sinnvoll sein. Dennoch wäre eine explizite Berücksichtigung der Tatsache wünschenswert, dass die Kosten von Humusersatzstrategien kurzfristig, die Leistungen jedoch oft erst in den Folgejahren anfallen. Produktionstechnische Maßnahmen sind also als Investition anzusehen, die sich mitunter erst im Laufe mehrerer Jahre amortisiert.

Im Einzelnen kann bei Betrieben ohne Futter-Mist-Kooperation insbesondere eine Optimierung der N-Bilanz mittels Hühnertrockenkot und darüber hinaus die mobile Bereitstellung organischer Düngemittel aus Biogasgülle, Kompost oder Cut&carry lohnenswert sein, da hier aufgrund der besseren Synchronisation von Nährstoffbedarf der Marktfrüchte und Nährstoffangebot Ertragssteigerungen zu erwarten sind. Da die räumlich flexible Nährstoffverfügbarkeit bei Betrieben mit Futter-Mist-Kooperation bereits gegeben ist, ist der Effekt einzelner Humusersatzstrategien auf die Wirtschaftlichkeit weniger positiv, lediglich durch den Verkauf von Stroh oder Klee gras sind Leistungssteigerungen zu erwarten. Die Integration von Leguminosen in konventionelle Fruchtfolgen kann Bedarf und Kosten für mineralischen Stickstoff senken, darüber hinaus lassen sich durch für die Humusbilanz negativ wirksame Maßnahmen wie den Verkauf des Strohs oder aber des Klee grasses zur Biogasnutzung zusätzliche Leistungen erzielen.

9 Danksagungen

Die AutorInnen danken Dr. Martin Armbruster (VDLUFA, Speyer), Dr. Michael Grunert (Sächsisches Landesamt für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie, Nossen), Prof. Dr. Bernd Honermeier (Justus-Liebig-Universität Giessen) und Dr. Matthias Wendland (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Freising) für die Bereitstellung von Daten aus den in Projektmodul 4 einbezogenen Dauerfeldversuchen.

Weiterhin gilt folgenden Personen Dank für die Unterstützung der Statusanalyse zu Stroh- und Gründüngung in der landwirtschaftlichen Praxis (Modul 2) und der Erarbeitung der Bewirtschaftungsszenarien in Modul 5: Dr. Andreas Butz (Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg), Dr. Michael Gaudchau (Justus-Liebig-Universität Giessen), Franz-Theo Lintzen und Thomas Ludwicki (beide Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen), Woldemar Mammel (Landwirt), Hanke-Carsten Meyerhoff (Landwirt), Dr. Harald Schmidt (Stiftung Ökologie und Landbau), Christoph Stumm (Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn), Hans Werner (Landwirtschaftsamt Münsingen).

10 Literaturverzeichnis

- Agrarstatistik NRW 2016. Erstellt am: 10.5.2016, Zugriff unter: <http://www.atlas-agrarstatistik.nrw.de/> (Zugriff am: 10.5.2016).
- Asmus, F., & Herrmann, V. 1977. Reproduktion der organischen Substanz des Bodens. A.L.D.D.R., Berlin.
- Berger, G., Schmalzer, K., & Richter, K. 1996. N-Aufnahme verschiedener Zwischenfrüchte und ihr Einfluss auf die winterliche N_{min}-dynamik sandiger Böden. *Archives of Agronomy and Soil Science* 40, 217–229
- Borenstein, M., Cooper, H., Hedges, L., & Valentine, J. 2009. Effect sizes for continuous data. *The handbook of research synthesis and meta-analysis*, 2, 221-235.
- Brock, C., Hoyer, U., Leithold, G., & Hülsbergen, K.-J. 2012. The humus balance model (HU-MOD): a simple tool for the assessment of management change impact on soil organic matter levels in arable soils. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 92, 239–254.
- Brookes, P.C., Landman, A., Pruden, G., & Jenkinson, D.S. 1985. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: A rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 17, 837–842.
- Burns 1976. Equations to predict the leaching of nitrate uniformly incorporated to a known depth or uniformly distributed throughout a soil profile. *Journal of Agricultural Science* 86, 305-313.
- Chabbi, A., Kögel-Knabner, I., & Rumpel, C. 2009. Stabilised carbon in subsoil horizons is located in spatially distinct parts of the soil profile. *Soil Biology and Biochemistry* 41, 256–261
- Dachler, M., & Köchl, A. 1994. Die Wirkung verschiedener Gründüngungspflanzen auf Ertrag und Erlös der Folgekultur. *Bodenkultur* 45, 139–146
- Dabbert, S. 1994. Ökonomik der Bodenfruchtbarkeit : 10 Tabellen. Ulmer, Stuttgart.
- DIN EN ISO 16072:2011-09. Soil quality - Laboratory methods for determination of microbial soil respiration (ISO 16072:2002); German version EN ISO 16072:2011.
- DIN ISO 10694:1996-08. Soil quality - Determination of organic and total carbon after dry combustion (elementary analysis) (ISO 10694:1995).
- DIN ISO 13878:1998 Soil quality - Determination of total nitrogen content by dry combustion ("elemental analysis") (ISO 13878:1998).
- Craine, J.M., Morrow, C., & Fierer, N. 2007. Microbial Nitrogen Limitation Increases Decomposition. *Ecology* 88, 2105–2113.
- Ebertseder, T., Engels, C., Heyn, J., Reinhold, J., *et al.* 2014. Humusbilanzierung – Eine Methode zur Analyse und Bewertung der Humusversorgung von Ackerland. Standpunkt des VDLUFA, Eigenverlag VDLUFA, Speyer.
- Ernst, G., Müller, A., Göhler, H., & Emmerling, C. 2008. C and N turnover of fermented residues from biogas plants in soil in the presence of three different earthworm species (*Lumbricus*

- terrestris, *Aporrectodea longa*, *Aporrectodea caliginosa*). *Soil Biology and Biochemistry* 40, 1413–1420.
- Franko, U., Kolbe, H., Thiel, E., & Ließ, E. (2011). Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma*, 166(1), 119-134
- Frøseth, R.B., Bakken, A.K., Bleken, M.A., Riley, H., Pommeresche, R., Thorup-Kristensen, K., & Hansen, S. 2014. Effects of green manure herbage management and its digestate from biogas production on barley yield, N recovery, soil structure and earthworm populations. *European Journal of Agronomy* 52, 90–102.
- Gleixner, G., Poirier, N., Bol, R., & Balesdent, J. 2002. Molecular dynamics of organic matter in a cultivated soil. *Organic Geochemistry* 33
- Gutser, R., Ebertseder, T., Weber, A., Schraml, M., & Schmidhalter, U. 2005. Short-term and residual availability of nitrogen after long-term application of organic fertilizers on arable land. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 168, 439–446A.
- Hellebrand, H.J. 1998. Emission of nitrous oxide and other trace gases during composting of grass and green waste. *Journal of Agricultural Engineering Research* 69, 365–375.
- Hülsbergen, K. J. 2003. Entwicklung und Anwendung eines Bilanzierungsmodells zur Bewertung der Nachhaltigkeit landwirtschaftlicher Systeme. Habil. *Berichte aus der Landwirtschaft. Shaker Verlag Aachen*.
- Isermeyer, H. 1952. Eine einfache Methode zur Bestimmung der Bodenatmung und der Karbonate im Boden. *Zeitschrift für Pflanzenernährung, Düngung Bodenkunde* 56, 26–38.
- Johansson, S. Carter, M.S., Jensen, E.s., Hauggard-Nielsen, H. und Ambus, P. 2013. Effects of digestate from anaerobically digested cattle slurry and plant materials on soil microbial community and emission of CO₂ and N₂O. *Applied Soil Ecology* 63: 36–44.
- Julius Kühn Institut 2016. JKI Geoportal - Boden-Klima-Räume. Erstellt am: 10.5.2016, Zugriff unter: <http://geoportal.jki.bund.de/map?app=bodenklimaraum> (Zugriff am: 10.5.2016).
- Kirkby, C. A., Kirkegaard, J. A., Richardson, A. E., Wade, L. J., Blanchard, C., & Batten, G. (2011). Stable soil organic matter: a comparison of C: N: P: S ratios in Australian and other world soils. *Geoderma*, 163(3), 197-208.
- Knebl, L., Leithold, G., & Brock, C. 2015. Improving minimum detectable differences in the assessment of soil organic matter change in short-term field experiments. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 178, 35–42.
- Kolbe, H. 2006. Fruchtfolgegestaltung im ökologischen und extensiven Landbau: Bewertung von Vorfruchtwirkungen. *Pflanzenbauwissenschaften* 10, 82–89).
- Körschens, M., Rogasik, J., Schulz, E., Böning, H., Eich, D., Ellerbrock, R., et al. und Leithold, G. (2004). Humusbilanzierung: Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Bonn: VDLUFA, 12.
- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) 2014: Betriebsplanung Landwirtschaft 2014/15 Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft Erscheinungsjahr 2014 24. Auflage.

- KTBL (Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft) 2016. Betriebsplanung Landwirtschaft 2016/17 Daten für die Betriebsplanung in der Landwirtschaft Erscheinungsjahr 2016 25. Auflage.
- Lehmann, J., & Kleber, M. (2015). The contentious nature of soil organic matter. *Nature*, 528(7580), 60-68.
- Leible, L., Arlt, A., Fürniß, B., Kälber, S., Kappler, G., Lange, S., Nieke, E. und Rösch, C. (2003): Energie aus biogenen Rest- und Abfallstoffen. Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse. Forschungszentrum Karlsruhe GmbH.
- Leithold, G. 1982. Die Verwertung des gedüngten Stickstoffs im System Boden-Pflanze als Grundlage zur Erstellung von Stickstoffbilanzen. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Halle XXXI'82M 1:61–66*
- Leithold, G. 1991. Zur Herleitung der Gleichung der „horizontalen“ Stickstoffbilanz. *Wissenschaftliche Zeitschrift der Universität Halle XXXX'91M, 6:139–145*
- von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ekschmitt, K., Matzner, E., Guggenberger, G., Marschner, B. & Flessa, H. 2008a. Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. *European Journal of Soil Science* 57, 426–445.
- von Lützw, M., Kögel-Knabner, I., Ludwig, B., Matzner, E., Flessa, H., Ekschmitt, K., Guggenberger, G., Marschner, B., & Kalbitz, K. 2008b. Stabilization mechanisms of organic matter in four temperate soils: Development and application of a conceptual model. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 171, 111–124.
- Maaß, H. 2016. Alternativen der Klee grasnutzung in vieharmen und viehlosen Betrieben. Masterarbeit im Studiengang Ökologische Landwirtschaft, Fachbereich Ökologische Agrarwissenschaften, Universität Kassel.
- Möller, K., Stinner, W., und Leithold, G. 2008. Growth, composition, biological N₂ fixation and nutrient uptake of a leguminous cover crop mixture and the effect of their removal on field nitrogen balances and nitrate leaching risk. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82 (3): 233–249.
- Mulder, C., Hettelingh, J.-P., Montanarella, L., Pasimeni, M.R., Posch, M., Voigt, W., & Zurlini, G. 2015. Chemical footprints of anthropogenic nitrogen deposition on recent soil C : N ratios in Europe. *Biogeosciences* 12, 4113–4119.
- Manzoni, S., Taylor, P., Richter, A., Porporato, A., & Ågren, G.I. 2012. Environmental and stoichiometric controls on microbial carbon-use efficiency in soils: Research review. *New Phytologist* 196, 79–91.
- Nawrath, M. 1998. Einfluss von organischer Düngung (Stroh- und Gründüngung, Stallmist) auf Humusgehalt, Humusqualität und Pflanzenertrag. E [Doktorarbeit]
- Neyroud, J.A. 1997. La part du sol dans la production intégrée. 1. Gestion de la matière organique et bilan humique. *Revue Suisse d'Agriculture* 29, 45-51.

- Oberholzer, H.R., Freiermuth Knuchel, R., Weisskopf, P. & Gaillard, G. 2012. A novel method for soil quality in life cycle assessment using several soil indicators. *Agronomy for Sustainable Development* 32, 639-649.
- Reisch, E. und Zeddies, J. 1992. Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre Band 2 Spezieller Teil: Grundlagen und Methoden der Entscheidung, Ökonomik der pflanzlichen und tierischen Produktion. UTB Agrarwissenschaften, 3. Aufl., Bd. 617, Eugen Ulmer.
- Russow, R., & Böhme, F. 2005. Determination of the total nitrogen deposition by the ¹⁵N isotope dilution method and problems in extrapolating results to field scale. *Geoderma* 127, 62–70.
- Rüegg, Willy Thaddaeus. Verfügbarkeit von Stickstoff für Silomais bei Mulchsaat in abgestorbene Zwischenfruchtbestände. (1994). <http://dx.doi.org/10.3929/ethz-a-000971768>
- Schimel, J.P., & Weintraub, M.N. 2003. The implications of exoenzyme activity on microbial carbon and nitrogen limitation in soil: a theoretical model. *Soil Biology and Biochemistry* 35, 549–563.
- Six, J., Frey, S.D., Thiet, R.K. & Batten, K.M. 2004. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Science Society of America Journal* 70, 555-569.
- Soon, Y.K., & Lupwayi, N.Z. 2012. Straw management in a cold semi-arid region: Impact on soil quality and crop productivity. *Field Crops Research* 139, 39–46.
- Springer, U. & Lehner, A. 1952. Stoffabbau und Humusaufbau bei der aeroben und anaeroben Zersetzung landwirtschaftlich und forstwirtschaftlich wichtiger organischer Stoffe I. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 58, 193-231
- Steinhauser, H. 1992. Einführung in die landwirtschaftliche Betriebslehre : 1. Allgemeiner Teil: Produktionsgrundlagen, Produktionstheorie und Rechnungssysteme mit Planungsrechnungen. 5., neubearb. Aufl. Aufl., Bd. 113, Ulmer, Stuttgart.
- Stinner, W., Möller, K. und Leithold, G. 2008. 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 (2–3): 125–134.
- Terhoeven-Urselmans, T., Scheller, E., Raubuch, M., Ludwig, B., & Joergensen, R.G. 2009. CO₂ evolution and N mineralization after biogas slurry application in the field and its yield effects on spring barley. *Applied Soil Ecology* 42, 297–302
- Thomsen, I.K., & Christensen, B.T. 2004. Yields of wheat and soil carbon and nitrogen contents following long-term incorporation of barley straw and ryegrass catch crops. *Soil Use and Management* 20, 432–438.
- Turner, B.L., Bristow, A.W., & Haygarth, P.M. 2001. Rapid estimation of microbial biomass in grassland soils by ultra-violet absorbance. *Soil Biology and Biochemistry* 33, 913–919.
- Vance, E.D., Brookes, P.C., & Jenkinson, D.S. 1987. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. *Soil Biology and Biochemistry* 19, 703–707.
- Weintraub, M.N., & Schimel, J.P. 2003. Interactions between Carbon and Nitrogen Mineralization and Soil Organic Matter Chemistry in Arctic Tundra Soils. *Ecosystems* 6, 129–143.

Wieder, R.W., Bonan, G.B. & Allison, S.D. 2013. Global soil carbon projections are improved by modelling microbial processes. *Nature Climate Change* 3, 909-912.

Zimmer, J., Roschke, M., & Schulze, D. 2005. Influence of different treatments of organic and mineral fertilization on yield, soil organic matter and N-balance of a diluvial sandy soil – results after 45 years long-term field experiment P60 (Groß Kreutz, 1959 – 2003). *Archives of Agronomy and Soil Science* 51, 135–149.

11 Übersicht über alle im Bereichszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt, bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse

Die Ergebnisse des Projektes wurden bisher bei verschiedenen Tagungen und Workshops als Poster zur Diskussion gestellt. Zusätzlich wurde ein Projekt-Abschlussworkshop durchgeführt sowie Paper erstellt.

Tagungsbeiträge

- Dannehl T, Brock C (2015): *Impact of N availability on the retention of straw and green manure carbon in soils. 2nd International Workshop SOMpatic, Rauischholzhausen, 8.-10.12.2015.*
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2015): Stabilisierung von C aus Stroh und Gründüngung im Boden – Ergebnisse eines Inkubationsversuches. In: Häring et al. (Hrsg.): Am Mut hängt der Erfolg: Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Eberswalde. pp 132-138.
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2015): C-Massenbilanzen im Umsatz von Stroh und Gründüngung – Ergebnisse eines Inkubationsversuches. (Poster) Jahrestagung der Deutschen Bodenkundlichen Gesellschaft, 05.-10.09.2015 in München.
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2015): Überprüfung der Bewertung von Grün- und Strohdüngung in der VDLUFA-Humusbilanzmethode. (Poster) 127. VDLUFA-Kongreß, 15.-18.09.2015 in Göttingen.
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2014): C-Massenbilanzen im Umsatz von Stroh- und Gründüngung – Ergebnisse eines Inkubationsversuches (Poster). Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. mit der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik VDI-MEG, vom 16.-18.09.2014 in Wien. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 284-285.
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2014): Einfluss unterschiedlicher Stroh- und Gründüngungsvarianten auf die organische Bodensubstanz – Ergebnisse einer Metaanalyse. (Poster). Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V. mit der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik VDI-MEG, vom 16.-18.09.2014 in Wien. Mitt. Ges. Pflanzenbauwiss. 26, 286-287.

Geplant für 2016 und 2017

- Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e.V., 27. Bis 29. September 2016 in Gießen, Titel: Leistung unterschiedlicher Stroh- und Gründüngungsvarianten im Aufbau

organischer Bodensubstanz – Ergebnisse eines Feldversuchs (Dannehl, T, Leithold, G und Brock, C).

- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2016): Stroh- und Gründüngung in der Humusbilanzierung. (Poster) 128. VDLUFA-Kongreß, Rostock, 13.-16.09.2016.
- Brock C, Dannehl T, Blumenstein B, Möller D (2017): Humusersatzstrategien im viehlosen Ökolandbau. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung ökologischer Landbau. (eingereicht)
- Blumenstein B, Brock C, Dannehl T, Möller D (2017): Humusersatzstrategien aus ökonomischer Perspektive: Notwendiges Übel oder gewinnbringende Investition? Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung ökologischer Landbau. (eingereicht)
- Brock C, Dannehl T, Blumenstein B, Möller D (2017): Optionen zur Sicherung der Humusversorgung im viehlosen Ökolandbau unter Berücksichtigung von Humusbilanz und Betriebswirtschaft. Beiträge zur 14. Wissenschaftstagung ökologischer Landbau. (eingereicht)

Workshop

- Humusbilanzen im Griff? Lösungsansätze für viehlose Betriebe. Abschlußworkshop zu den Projekten HumuGS und HumuGSEcon, Rauschholzhausen, 02.05.2016). Teilnehmer waren sowohl Praktiker als auch Berater und Wissenschaftler.

Wissenschaftliche Publikationen

- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2016): C mass balances in the turnover of straw and green manures - Results of an incubation experiment. Eur. J. Soil Sci. (eingereicht)
- Dannehl T, Leithold G, Brock C (2016): Meta-analysis of the impact of straw and green manure on soil organic matter levels. (in Vorbereitung)

12 Anhang

Ausführliche Ergebnisse des Feldversuchs zu Modul 3 Empirische Arbeiten

Tabelle 19: Ergebnisse der Kohlenstoff und Stickstoffgehalte im Boden zu den Terminen 2,3 und 4 relativ gemittelt zum Startgehalt (Termin1)

Variante		Termin 2	Termin 3	Termin 4	Termin 2	Termin 3	Termin 4
		Crel			Nrel		
		[g 100g ⁻¹]			[g 100g ⁻¹]		
Groß Gerau	Kontrolle	0,894	0,859	0,877	0,086	0,085	0,083
	Gerstenstroh	0,874	0,794	0,817	0,082	0,075	0,076
	Gerstenstroh+ Mineraldünger	0,875	0,687	0,851	0,083	0,082	0,079
	Gerstenstroh+ Biogasgülle	0,849	0,857	0,778	0,080	0,083	0,074
	Erbsenstroh	0,811	0,785	0,782	0,078	0,076	0,074
	Senf	0,813	0,843	0,803	0,086	0,081	0,076

	Senf + Gerstenstroh	0,838	0,863	0,854	0,078	0,081	0,077
	Senf+ Mineraldünger	0,817	0,918	0,779	0,077	0,081	0,074
	Senf+ Biogasgülle	0,826	0,840	0,832	0,076	0,080	0,073
	Landsberger Gemenge	0,840	0,993	0,834	0,085	0,100	0,080
	Weidelgras	0,847	0,925	0,819	0,078	0,080	0,076
	Weidelgras+ Mineraldünger	0,876	0,922	0,862	0,077	0,078	0,075
	Weidelgras+ Gerstenstroh	0,851	0,858	0,829	0,078	0,080	0,076
Weilburger Grenze	Kontrolle	1,565	1,609	1,531	0,181	0,193	0,189
	Gerstenstroh	1,657	1,625	1,518	0,192	0,188	0,179
	Gerstenstroh +Mineraldünger	1,483	1,588	1,471	0,171	0,194	0,183
	Gerstenstroh +Biogasgülle	1,571	1,614	1,503	0,189	0,199	0,196
	Erbsenstroh	1,543	1,488	1,465	0,172	0,182	0,178
	Senf	1,558	1,544	1,528	0,172	0,181	0,180
	Senf + Gerstenstroh	1,551	1,538	1,502	0,171	0,183	0,179
	Senf+ Mineraldünger	1,578	1,616	1,448	0,173	0,185	0,175
	Senf+ Biogasgülle	1,544	1,556	1,524	0,168	0,182	0,180
	Landsberger Gemenge	1,588	1,626	1,181	0,171	0,188	0,137
	Weidelgras	1,580	1,570	1,585	0,169	0,183	0,187
	Weidelgras+ Mineraldünger	1,590	1,664	1,542	0,172	0,188	0,181
	Weidelgras+ Gerstenstroh	1,616	1,621	1,376	0,188	0,193	0,175
Gladbacher -hof	Kontrolle	1,063	1,027	1,077	0,113	0,117	0,118
	Gerstenstroh	1,027	1,045	1,033	0,110	0,119	0,117
	Erbsenstroh	1,050	1,053	1,023	0,111	0,117	0,117
	Kleegras	1,097	1,078	1,041	0,113	0,121	0,119
	Kleegras+ Gerstenstroh	1,031	1,149	1,070	0,108	0,125	0,122
	Kleegras (Grünbrache)	1,046	1,001	0,986	0,106	0,107	0,111
	Kleegras (Futter)	1,128	1,106	1,104	0,110	0,115	0,121

Tabelle 20: Ergebnisse der Nmin Analyse zu den vier Probenahmeterminen Start, Herbst, Frühjahr und Versuchsende.

Standort	Variante	Start	Herbst	Frühjahr	Ende
----------	----------	-------	--------	----------	------

		mean	sd	mean	sd	mean	sd	mean	sd
		[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]		[kg ha ⁻¹]	
Groß Gerau	Kontrolle	15,12	4,16	24,70	4,85	36,94	4,18	9,80	1,86
	Gerstenstroh	15,90	5,72	20,46	10,54	30,60	8,77	11,49	2,81
	Gerstenstroh+ Mineraldünger	15,60	6,56	21,48	11,76	40,42	8,24	8,97	0,56
	Gerstenstroh+ Biogasgülle	20,25	3,87	24,09	6,75	47,96	22,03	10,43	1,87
	Erbsenstroh	21,03	5,23	16,39	7,68	33,01	20,91	7,19	2,44
	Senf	11,87	2,89	12,80	9,45	51,04	12,01	9,79	2,22
	Senf + Gerstenstroh	15,71	3,61	10,85	9,24	36,01	16,13	8,74	1,84
	Senf+ Mineraldünger	14,24	5,37	17,10	15,05	36,44	10,03	12,00	2,71
	Senf+ Biogasgülle	18,55	4,09	9,82	5,95	59,72	17,90	10,79	3,49
	Landsberger Gemenge	14,93	3,66	15,14	7,49	60,79	21,22	15,57	8,17
	Weidelgras	14,19	0,93	13,58	11,30	9,14	5,87	14,95	7,70
	Weidelgras+ Mineraldünger	12,14	2,56	16,33	7,68	7,38	5,02	12,47	4,89
	Weidelgras+ Gerstenstroh	16,43	2,82	13,73	9,10	8,14	2,78	12,12	1,98
Weilburger Grenze	Kontrolle	28,06	4,81	55,88	20,83	52,01	6,85	8,93	1,63
	Gerstenstroh	20,47	3,87	52,17	10,86	74,02	33,52	9,32	2,75
	Gerstenstroh + Mineraldünger	27,89	6,23	81,44	13,44	104,07	7,03	9,87	2,73
	Gerstenstroh + Biogasgülle	23,97	8,13	38,25	15,40	71,66	33,23	11,76	2,97
	Erbsenstroh	41,55	13,31	51,17	9,89	77,87	15,60	8,71	4,04
	Senf	15,97	2,86	14,42	3,22	67,23	3,68	7,22	2,19
	Senf + Gerstenstroh	27,13	8,30	15,39	2,35	90,84	16,85	7,75	2,67
	Senf+ Mineraldünger	24,84	6,36	13,62	1,86	72,04	22,92	9,32	3,52
	Senf+ Biogasgülle	24,87	12,26	22,81	6,75	97,99	28,59	28,93	39,19
	Landsberger Gemenge	25,48	4,03	34,57	4,09	53,04	28,60	7,86	5,69
	Weidelgras	18,33	5,25	24,22	3,27	16,86	3,37	9,69	2,45
	Weidelgras+ Mineraldünger	18,71	9,10	69,57	26,82	51,15	46,73	7,91	1,99
	Weidelgras+ Gerstenstroh	16,59	4,07	34,30	10,68	15,17	4,44	13,12	11,10
Gladbacherhof	Kontrolle	18,88	5,11	26,99	11,90	16,83	4,54	6,41	0,51
	Gerstenstroh	15,97	4,92	20,38	2,23	22,30	5,96	7,37	1,36
	Erbsenstroh	25,03	4,82	29,67	11,76	35,86	24,04	7,08	0,92
	Kleegrass	14,47	2,77	19,78	17,27	27,44	10,56	7,13	0,81

	Kleegras+ Gerstenstroh	17,76	4,54	13,78	1,40	31,59	10,64	8,35	1,66
	Kleegras (Grünbrache)	17,89	4,65	13,77	7,54	4,54	1,50	25,14	13,68
	Kleegras (Futter)	15,90	3,67	7,30	1,19	3,52	0,55	14,05	4,87

Tabelle 21: Bodenatmung als Cresp, sowie die Düngemengen während des Versuchszeitraums als C input und die Düngesubstratnutzungseffizienz (ACUE)

Variante		Cresp	Cinput	CN Substrat	ACUE
		mean (sd)			mean (sd)
		[g CO ₂ d ⁻¹]	[kg ha ⁻¹]		
Sandbodenboden	Gerstenstroh	3,9 (1,2)	2123	81,5	0,82 (0,29)
Groß Gerau	Gerstenstroh + Mineraldünger	4,5 (1,6)	2123	37,9	1,06 (0,44)
	Gerstenstroh + Biogasgülle	4,2 (1,2)	2201	65,1	0,82 (0,23)
	Erbsenstroh	4,5 (1,1)	2039	50,5	0,96 (0,24)
	Gerstenstroh + Weidelgrass	6,3 (1,9)	3256	42,9	1,34 (0,45)
Tonboden	Gerstenstroh	7,16 (1,0)	2123	81,6	1,03 (0,21)
Weilburger Grenze	Gerstenstroh + Mineraldünger	9,6 (2,0)	2123	37,9	1,27 (0,26)
	Gerstenstroh + Biogasgülle	8,19 (0,7)	2201	65,1	1,11 (0,11)
	Erbsenstroh	5,9 (1,2)	2039	50,5	0,78 (0,14)
	Gerstenstroh + Weidelgrass	6,67 (0,7)	2150	79,0	0,97 (0,17)
Lehmboden	Gerstenstroh	7,08 (0,6)	2123	81,5	1,38 (0,24)
Gladbacherhof	Erbsenstroh	5,37 (1,1)	2039	50,5	1,04 (0,18)
	Gerstenstroh + Kleegrass	5,86 (1,1)	2381	48,0	1,1 (0,24)

		2. Fraktion		3. Fraktion		2. Fraktion		3. Fraktion	
		Start	Ende	Start	Ende	Start	Ende	Start	Ende
		C		C		N		N	
Standort	Variante	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]	[kg ha-1]
Groß Gerau	K	1829,7	2078,1	1879,5	2279,1	70,6	78,7	118,8	139,0
	GS	2186,9	1982,1	2102,8	2100,3	85,6	69,9	158,4	134,9
	GS+MD	1959,2	1910,6	1645,9	2114,6	77,8	69,1	109,3	151,9
	GS+BG	1891,0	2189,7	1938,9	2298,5	74,1	81,2	114,9	136,5
	ES	2115,4	1869,7	2071,9	2159,7	81,7	59,1	153,5	133,6
	S	2066,8	1876,7	2059,1	2120,8	81,6	73,3	121,9	135,7

	S+MD	2077,4	1918,1	1925,7	2310,4	93,0	69,8	126,3	140,1
	S+GS	2124,9	2036,6	2038,5	2196,8	75,4	75,8	120,6	138,3
	S+BG	2087,2	1918,1	1610,6	2214,3	78,3	75,7	138,3	143,3
	LG	2271,9	1863,8	2192,1	2207,9	83,4	73,6	142,0	124,1
	WG	2219,3	1885,7	1953,1	2293,9	85,1	75,0	123,4	134,5
	WG+MD	1769,1	1992,5	2036,7	2398,5	71,9	81,2	124,5	150,2
	WG+GS	1749,9	2282,3	1927,5	2388,1	69,7	94,4	125,5	135,3
Gladbacherhof	K	1839,6	1357,2	3400,3	3068,3	91,5	70,5	233,3	210,9
	GS	2374,7	1386,2	2933,8	3422,0	97,5	75,2	200,0	247,4
	ES	2183,9	1268,2	3727,4	3390,4	106,1	66,8	266,6	236,5
	KG	2029,0	1613,8	3500,8	4413,0	90,7	79,6	246,2	310,2
	KG+GS	2347,0	1668,3	3186,0	2722,7	95,8	80,1	217,6	189,2
	KG (GB)	2280,5	1562,0	3752,2	3536,6	106,0	79,8	269,4	249,4
	KG (Futter)	2040,4	1438,4	3092,4	3138,7	100,5	76,2	218,9	221,6
Weilburger Grenze	K	34133,4	2300,1	38702,9	5659,2	1995,7	139,5	3142,0	447,3
	GS	46773,7	2335,3	41436,4	5420,2	2127,2	139,2	3150,9	431,1
	GS+MD	42030,6	2642,5	42689,1	5993,7	2113,8	147,7	3267,8	468,2
	GS+BG	42565,6	2369,7	50290,2	6066,4	2078,2	144,6	3843,5	469,5
	ES	38004,0	2176,2	47118,1	5201,5	2239,9	130,0	3522,9	414,9
	S	26946,2	1726,8	39905,1	4277,4	1606,4	110,4	3144,7	346,0
	S+MD	23460,9	1931,6	32293,9	4854,0	1554,7	120,9	2635,0	383,6
	S+GS	32919,3	1797,7	38254,0	4419,9	1646,0	108,1	2895,3	351,0
	S+BG	31879,4	2258,9	38653,3	4784,3	1788,8	126,0	2979,3	370,4
	LG	19554,4	2144,8	34956,0	4168,2	1250,7	131,0	2760,6	320,5
	WG	23287,3	2242,4	29498,8	4592,1	1364,2	131,3	2360,0	341,5
	WG+MD	21040,4	1876,4	34050,9	4221,1	1403,4	117,6	2783,9	333,4
	WG+GS	33327,1	1852,4	39909,3	4024,0	1613,1	120,0	2967,7	315,8