



Steckbriefe zu humuserhaltenden und -mehrenden Maßnahmen auf Ackerflächen

Stand: Mai 2024

Friedrich Wüstemann^a, Lilli Aline Schroeder^b, Axel Don^c, Thomas de Witte^a, Claudia Heidecke^b

Johann Heinrich von Thünen-Institut – Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei

a Thünen-Institut für Betriebswirtschaft, Bundesallee 63 in 38116 Braunschweig

b Thünen-Institut Stabsstelle Klima & Boden, Bundesallee 49 in 38116 Braunschweig

c Thünen-Institut für Agrarklimaschutz, Bundesallee 65 in 38116 Braunschweig

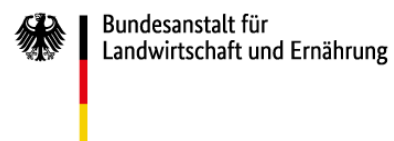
Dieser Bericht wurde im Rahmen des Modell- und Demonstrationsvorhabens „Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden – Schwerpunkt Ackerbau“ (HumusKlimaNetz) erstellt. Das Modell- und Demonstrationsvorhaben wird gemeinsam vom Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft e.V. (BÖLW) und dem Deutschen Bauernverband e.V. (DBV) geleitet sowie vom Thünen-Institut wissenschaftlich begleitet. Gefördert wird das HumusKlimaNetz aus Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Projektträger ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung.

Die Basis für diesen Projektbericht ist das Thünen Working Paper 231 vom Dezember 2023. In Abstimmung mit den Autor:innen des Thünen-Instituts, wurden für die praktische Umsetzung der Maßnahmen im MuD – HumusKlimaNetz, Anpassungen vorgenommen. Diese Änderungen sind im Text farblich markiert.

Gefördert durch



Projektträger



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis	iii
Tabellenverzeichnis	iv
Abbildungsverzeichnis	iv
Kurzfassung	vi
1 Einleitung	1
2 Hintergründe der Maßnahmenauswahl	2
2.1 Bewertungskriterien für die Klimawirkungen beim Humusaufbau	2
2.2 Nicht ausgewählte Maßnahmen	4
3 Kalkulation regionaler Prämien zur Maßnahmenentschädigung	4
4 Maßnahmen	7
4.1 Fruchtfolge	7
4.2 Zwischenfrüchte und Untersaaten	11
4.3 Mehrjährige humusmehrende Kulturen	17
4.4 Blühstreifen	25
4.5 Agroforstsysteme	26
4.6 Kurzumtriebsplantagen	31
4.7 Hecken	33
5 Weitere Maßnahmen, die erprobt werden können	36
5.1 Tiefpflügen von Sandböden	36
5.2 Pflanzenkohle	38
5.3 Reduzierte Bodenbearbeitung	39
6 Fazit	41
Literaturverzeichnis	42

Abkürzungsverzeichnis

a	-	Jahr
AUKM	-	Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen
BMEL	-	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BÖLW	-	Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft
C	-	Kohlenstoff
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
CO _{2eq}	-	Kohlenstoffdioxid-Äquivalente
DBV	-	Deutscher Bauernverband
DüV	-	Düngeverordnung
GAP	-	Gemeinsame Agrarpolitik
GAPDZV	-	GAP-Direktzahlungen-Verordnung
IPCC	-	Intergovernmental Panel on Climate Change
K ₂ O	-	Kaliumoxid (Kalidüngung)
KTBL	-	Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft
LfL	-	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
PK	-	Pflanzkohle
P ₂ O ₅	-	Diphosphorpentoxid (Phosphatdüngung)
PSM	-	Pflanzenschutzmittel
MuD	-	Modell- und Demonstrationsvorhaben
N	-	Stickstoff

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Preisannahmen für konventionelle Produktionsmittel und Produkte	7
Tabelle 2: Maßnahmensteckbrief Fruchtfolge.....	8
Tabelle 3: Kompensationshöhen Fruchtfolgeanpassungen.....	10
Tabelle 4: Maßnahmensteckbrief Zwischenfrüchte und Untersaaten	12
Tabelle 5: Kompensationshöhen Zwischenfrüchte und Untersaaten	16
Tabelle 6: Top-Ups für zusätzliche Sommerungen nach einer Zwischenfrucht.....	16
Tabelle 7: Besonders humusstarke Zwischenfruchtarten	17
Tabelle 8: Maßnahmensteckbrief mehrjähriger Kulturen	18
Tabelle 9: Maßnahmensteckbrief Wildpflanzenmischungen zur Biogaserzeugung.....	21
Tabelle 10: Kompensationshöhen für mehrjährige Kulturen.....	24
Tabelle 11: Kompensationsbedarf verschiedener Varianten von mehrjährigem Feldfutter	25
Tabelle 12: Maßnahmensteckbrief Blühstreifen.....	26
Tabelle 13: Maßnahmensteckbrief Agroforstsysteme zur Biomasseerzeugung	27
Tabelle 14: Maßnahmensteckbrief Agroforstsysteme zur Wertholzerzeugung.....	29
Tabelle 15: Kompensationshöhen für Agroforstsysteme	31
Tabelle 16: Maßnahmensteckbrief Kurzumtriebsplantagen	32
Tabelle 17: Kompensationshöhen für Kurzumtriebsplantagen	33
Tabelle 18: Maßnahmensteckbrief Neuanlage einer Hecke	34
Tabelle 19: Kompensationshöhen für die Neuanlage von Hecken	35
Tabelle 20: Maßnahmensteckbrief Tiefpflügen von Sandböden.....	37
Tabelle 21: Maßnahmensteckbrief Pflanzenkohle.....	38
Tabelle 22: Maßnahmensteckbrief reduzierte Bodenbearbeitung.....	40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Kalkulationsschema Kompensationsbeträge	5
Abbildung 2: Prüfschema Fruchtfolge-Maßnahmenvarianten.....	9
Abbildung 3: Prüfschema zur Festlegung der Kompensationshöhe für Zwischenfrüchte und Untersaaten	15
Abbildung 4: Prüfschema zur Ermittlung der Kompensation mehrjähriger Kulturen.....	22

Danksagung

Dieser Projektbericht wurde als Basis für einen Maßnahmenkatalog im Projekt HumusKlimaNetz erstellt. Das HumusKlimaNetz ist ein Modell- und Demonstrationsvorhaben zum „Humusaufbau in landwirtschaftlich genutzten Böden – Schwerpunkt Ackerbau“ und wird gemeinsam vom Bund Ökologische Lebensmittelwirtschaft e.V. (BÖLW) und dem Deutschen Bauernverband e.V. (DBV) geleitet. Die wissenschaftliche Begleitforschung erfolgt durch das Thünen-Institut. Projektträger des aus Mitteln des BMEL geförderten MuD-Vorhabens ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE).

Der Bericht basiert zum Großteil auf Vorarbeiten und Veröffentlichungen von Wissenschaftler:innen des Thünen-Instituts. Die beschriebenen Maßnahmen und Bewirtschaftungsanforderungen wurden in mehreren projektinternen Sitzungen mit Vertreter:innen der Verbände BÖLW, DBV diskutiert und weiterentwickelt.

Für die konstruktive Zusammenarbeit bedanken sich die Autor:innen bei folgenden Personen¹:

- Konstantin Aiteew
- Leonardo Amthauer Gallardo
- Hanna Anders
- Kirsten Arp
- Hannes Dettmann
- Bettina Gramberg
- Alexander Gocht
- Lena Guhrke
- Anna Hakobjanyan
- Mirjam Helfrich
- Sander Hoogendam
- Peter Jantsch
- Robert Kero
- Jonathan Krink
- Romina Mejow
- Christoph Pahn Meyer
- Uta Priegnitz
- Lukas Schütz
- Stephanie Stragies
- Simone Witzel
- Anika Zibell

¹ Die Aufzählung der beteiligten Personen erfolgt in alphabetischer Reihenfolge.

Kurzfassung

In der deutschen und europäischen Klimapolitik hat der Humusaufbau und -erhalt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. In diesem Kontext sollen in dem HumusKlimaNetz Maßnahmen zum Humusaufbau in der Praxis erprobt werden. Um den beteiligten Betrieben mögliche Maßnahmen zur Umsetzung anbieten zu können, ist es entscheidend zu bewerten, welche Maßnahmen zum Humuserhalt und zum Humusaufbau beitragen können, welche sonstigen Wirkungen die Maßnahmen mit sich bringen und wie stark die Maßnahmen aufgrund der entstehenden Kosten gefördert werden müssen. In diesem Bericht werden die wissenschaftlichen Erkenntnisse zu den genannten Fragen zusammengetragen und auf Basis der Ertragsstatistik regionsspezifische Pauschalen für eine Kompensation von Maßnahmen entwickelt. Somit ist der Projektbericht eine wissenschaftliche Arbeitsgrundlage für die Förderung von Humusmaßnahmen im Rahmen des Modell- und Demonstrationsvorhabens „HumusKlimaNetz“.

Abstract

In recent years, soil organic carbon sequestration and conservation has become increasingly important in German and European climate politics. In this context, measures to build up humus are to be tested in practice in the HumusKlimaNetz. In order to be able to offer the participating farms possible measures for implementation, it is crucial to evaluate which measures can contribute to humus sequestration and conservation, which other impacts might occur and how strongly the measures must be funded due to the costs incurred. In this report, the scientific findings on the above-mentioned questions are compiled and regional specific flat rates for compensation of measures are developed on the basis of yield statistics. Thus, the project report is a scientific working basis for the promotion of humus measures within the framework of the model and demonstration project "HumusKlimaNetz".

1 Einleitung

In der deutschen und europäischen Klimapolitik hat der Humusaufbau und -erhalt in den letzten Jahren immer mehr an Bedeutung gewonnen. Insbesondere initiiert durch die Außenwirkung der 4 per 1000 Initiative² der französischen Regierung in den internationalen Klimaverhandlungen im Jahr 2015 gewann die Sichtbarkeit der Kohlenstoffbindung in landwirtschaftlich genutzten Böden an Bedeutung. Der Name der Initiative geht auf die theoretische Berechnung zurück, dass die jährlichen globalen anthropogenen Treibhausgasemissionen kompensiert werden könnten, wenn der in den oberen 30 bis 40 Zentimetern des Bodens gespeicherte Kohlenstoffvorrat um 0,4 % (oder 4 ‰) pro Jahr erhöht würde. Diese Rechnung bezieht alle Ökosysteme ein und ist damit eine rein theoretische Betrachtung. Insbesondere Böden unter Ackernutzung haben im Vergleich zu natürlichen Ökosystemen Kohlenstoff verloren und damit ein Potential durch Humusaufbau wieder Kohlenstoff und damit Kohlendioxid (CO₂) zu binden. Global machen diese Böden 10% der Landoberfläche aus.

Die Bedeutung von Bodenkohlenstoff in der Landwirtschaft wird auch in Zahlen für Deutschland deutlich. Nach den Ergebnissen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft werden auf deutschen landwirtschaftlichen Flächen (Mineralböden und Moorböden) rund 2,5 Milliarden Tonnen Kohlenstoff im obersten Meter gespeichert, was ca. 48 % aller in deutschen Ökosystemen gespeicherten Kohlenstoff-Vorräten entspricht. Ergebnisse aus Bodendauerbeobachtungsflächen und Modellberechnungen der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (2012-2018) zeigen für Mineralböden unter Ackernutzung im Mittel einen Verlust an organischem Kohlenstoff in Höhe von 0,2 t ha⁻¹ a⁻¹. Somit gewinnt die Bodenkohlenstoffbindung und auch deren Erhalt für den Klimaschutz an Bedeutung (Jacobs et al., 2018; Höper und Meesenburg, 2021).

Neben der Bedeutung für den Klimaschutz sind weitere positive Eigenschaften von Bodenkohlenstoff bzw. Humus im Oberboden entscheidend für die Landwirtschaft. Nährstoffverfügbarkeit, Wasserhaushalt, Bodengefüge und Aktivität des Bodenlebens werden durch die Humusschicht beeinflusst und können sich positiv auf Erträge auswirken.

Viele Landwirt:innen stellen sich die Frage, wie sie über den Aufbau von Humus die Bodenfruchtbarkeit verbessern und gleichzeitig einen Beitrag für den Klimaschutz leisten können. Um hier mehr Klarheit zu schaffen, wurde vom BMEL das HumusKlimaNetz initiiert, ein Modell- und Demonstrationsvorhaben (MuD), in dem praktische Erfahrungen mit Maßnahmen zum Humusaufbau gesammelt werden sollen, die a) den Humusgehalt in Ackerböden anreichern und b) einen Beitrag zum Klimaschutz leisten.

Im folgenden Projektbericht werden der Stand des Wissens zur Wirkung von Maßnahmen zum Humuserhalt und Humusaufbau systematisch zusammengestellt und ihre Kosten auf regionaler Ebene kalkuliert. Zunächst werden in Abschnitt 2 grundsätzliche Voraussetzungen erläutert, die Maßnahmen zum Humusaufbau einhalten müssen, damit der Humusaufbau überhaupt klimawirksam ist. Danach wird in Kapitel 3 die Kalkulationsgrundlage zur Ermittlung von regionalen Pauschalen für die Entschädigung von Maßnahmen auf Ackerflächen beschrieben. Auf dieser Basis werden in Kapitel 4 für förderwürdige Maßnahmen, die die Kriterien im Kapitel 2 erfüllen, Steckbriefe erstellt und regionale Kompensationspauschalen dargestellt. Abschließend werden Empfehlungen zur Anwendung dieses Projektbericht im HumusKlimaNetz gegeben.

² <https://4p1000.org/>

2 Hintergründe der Maßnahmenauswahl

Als zentrale Leitplanke für die Auswahl von Maßnahmen in den Bewertungsrahmen gilt, dass ihre Humus- und Klimawirkung wissenschaftlich nachgewiesen sein muss. Daher wird im folgenden Abschnitt erläutert, welche Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit eine Maßnahme als klimawirksam anerkannt wird.

Grundsätzlich können auch neue, bisher wissenschaftlich nicht ausreichend untersuchte Maßnahmen zum klimawirksamen Humusaufbau und -erhalt beitragen. Derartige Maßnahmen sollten jedoch nicht direkt als Maßnahmenflächen gefördert werden, sondern im Rahmen von zusätzlichen Demoversuchen getestet werden. Hintergrund ist, dass hierfür eine aufwendigere Datenerhebung und Bodenbeprobung inklusive Referenzflächen notwendig ist. Weiterhin werden in der landwirtschaftlichen Praxis häufig Maßnahmen zum Humusaufbau angestrebt, die zwar eine Humusanreicherung auf der Einzelfläche nach sich ziehen, jedoch auf Grund von Verlagerungseffekten keine Klimawirksamkeit haben. Hierzu gehört beispielsweise die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern.

2.1 Bewertungskriterien für die Klimawirkungen beim Humusaufbau

Global betrachtet ist im Boden viermal so viel Kohlenstoff gespeichert wie sich Kohlendioxid in der Atmosphäre befindet (Ciais et al., 2013). Die Speicherkapazität von Böden ist nicht ausgeschöpft. Das gilt insbesondere für Ackerböden, die gegenüber Böden unter natürlicher Vegetation meist Kohlenstoff verloren haben. Dementsprechend kann zusätzlicher Kohlenstoff im Boden gespeichert werden (Don et al., 2018; Jacobs et al., 2018).

Damit Humus klimawirksam aufgebaut wird, müssen jedoch die **vier folgenden Grundsätze** eingehalten werden:

- (1) **Zusätzlichkeit:** Es muss zusätzlicher Kohlenstoff im Boden gespeichert werden. Das kann in der Regel durch einen größeren Biomasseeintrag (inklusive vermehrter Wurzelbildung), durch eine gesteigerte Kohlenstoffnutzungseffizienz oder verlangsamte Mineralisation durch Mikroorganismen erreicht werden. Vorhandene Bodenkohlenstoffvorräte sind nicht direkt klimawirksam (Fynn et al., 2009; Olson, 2013; Tao et al., 2023; Wiesmeier et al., 2020a).

In der Regel ist bei geeigneten Maßnahmen eine zusätzliche Kohlenstoffspeicherung möglich, wenn der Flächenumfang einer Maßnahme ausgedehnt wird (z. B. Zwischenfruchtanbau auf einer Fläche, auf der bisher keine Zwischenfrüchte angebaut wurden), ohne dass gleichzeitig auf einer anderen Fläche das Gegenteil geschieht. Somit müssen die Maßnahmen über die bisherigen Tätigkeiten hinausgehen. Diese Voraussetzung wirkt sich leider nachteilig für Betriebe aus, die in der Vergangenheit bereits sehr aktiv Humusmaßnahmen auf ihren Flächen umgesetzt haben, da sie neue zusätzlich Maßnahmen finden müssen (Allwood et al., 2014; Fynn et al., 2009; Olson, 2013; Wiesmeier et al., 2020a).

- (2) **Permanenz (Dauerhaftigkeit):** Der zusätzlich gespeicherte Kohlenstoff muss dauerhaft im Boden erhalten bleiben. In der Folge muss die Maßnahme auch dauerhaft fortgeführt werden, nachdem sich ein neues Kohlenstoffgleichgewicht im Boden eingestellt hat und kein zusätzlicher Kohlenstoff mehr im Boden gespeichert wird (Fynn et al., 2009; Thamo und Pannell, 2016; Wiesmeier et al., 2020b).

Wenn die Maßnahme nicht fortgeführt wird, verändert sich das Kohlenstoffgleichgewicht erneut und der zuvor gebundene Bodenkohlenstoff wird wieder an die Atmosphäre abgegeben, so dass die Klimaschutzwirkung verloren geht. Humusaufbau ist reversibel. Nur temporär gespeicherter Bodenkohlenstoff hat im Vergleich zur dauerhaften Speicherung eine deutlich geringere Klimawirkung (Leifeld und Keel, 2022).

- (3) **Keine Verlagerungseffekte:** Maßnahmen zum Humusaufbau dürfen nicht auf der gleichen Fläche oder an anderen Stellen zu einer Erhöhung von Treibhausgasemissionen führen, ohne dass dies eingerechnet ist. Eine Form der Verlagerung ist zum Beispiel durch organische Dünger möglich: Der Humusgehalt einer einzelnen Fläche kann durch organische Düngung erhöht werden. Allerdings handelt es sich hierbei um eine Verlagerung, die nicht klimawirksam ist, da die Organik jetzt nicht mehr auf der vorherigen Fläche ausgebracht wird. Die

Menge an Organik ist begrenzt und Flächen, die vorher organische Dünger erhalten haben, aber zukünftig nicht mehr, verlieren Humus. Es gibt auch andere Verlagerungseffekte, die z.B. durch zusätzliche Lachgasemissionen entstehen können oder indirekte Landnutzungsänderungen bei einer Absenkung des Produktionsniveaus mit der Humusaufbaumaßnahme (Fynn et al., 2009; Don et al., 2018; Wiesmeier et al., 2020b).

- (4) **Messbarkeit:** Veränderungen im Bodenkohlenstoffgehalt müssen nachweisbar sein, um die Klimaschutzwirkung zu belegen. Aufgrund der langsamen Anreicherung von Kohlenstoff im Boden, ist dies durch Bodenanalysen kurzfristig jedoch kaum möglich. Die Veränderung im Bodenkohlenstoffvorrat muss in Summe mindestens eine t C pro Hektar betragen, um mit vertretbarem Messaufwand nachgewiesen werden zu können (Schrumpf et al., 2011; Wiesmeier et al., 2020b).

Verlagerungseffekte durch Lachgasemissionen

Neben den CO₂-Emissionen, die durch die Nutzung fossiler Rohstoffe entstehen, sind im Ackerbau vor allem Lachgasemissionen, die durch bodenbiologische Prozesse entstehen, relevant. Deren Höhe hängt einerseits stark von der Stickstoffdüngung und andererseits von Standortfaktoren wie den Bodeneigenschaften (Textur, Gesamt-N) und dem Klima ab (Skinner et al., 2014). Lachgas ist etwa 300-mal so klimaschädlich wie Kohlendioxid. Daher sind die Auswirkungen von kohlenstoff-sequestrierenden Maßnahmen auch immer hinsichtlich ihrer Wirkungen auf Lachgasemissionen zu prüfen, um derartige Verlagerungseffekte zu vermeiden. Vor diesem Hintergrund wird in den Maßnahmensteckbriefen beschrieben, ob eine erhöhte Gefahr für Lachgasemissionen mit den Maßnahmen verbunden ist.

Verlagerungseffekte durch indirekte Landnutzungseffekte

Eine weitere Verlagerungsgefahr für Treibhausgasemissionen ergibt sich auch hinsichtlich der Produktion. Sobald eine Ackerfrucht auf der Maßnahmenfläche nicht mehr angebaut wird oder reduzierte Erträge verursacht, kann dies dazu führen, dass für die Deckung der Nachfrage eine andere Fläche genutzt wird. Wenn diese z.B. schlechtere Standortbedingungen vorweist, wird ggf. sogar mehr Fläche als zuvor benötigt. Je nach Umfang der Maßnahme kann es globale Folgen mit indirekten Landnutzungsänderungen in anderen Teilen der Welt geben (z.B. Entwaldung und Umwandlung in landwirtschaftliche Produktionsflächen), die wiederum zu höheren (produktbezogenen) Emissionen führen. Vor diesem Hintergrund wird in den Steckbriefen auf die Gefahr von Verlagerungseffekten eingegangen. Die Größenordnungen potenzieller Verlagerungseffekte können im Rahmen von gesamtbetrieblichen Klimabilanzen abgeschätzt werden. Dazu ist es nötig neben produktbezogenen Treibhausgasbilanzen auch den dazugehörigen Flächenbedarf zu ermitteln und in die Bewertung einzubeziehen.

Sequestrierungspotenzial & Permanenz

In den Steckbriefen zeigt sich, dass das jährliche Potenzial, zusätzlichen Kohlenstoff im Boden zu speichern, je nach Maßnahme im Mittel zwischen 0 und 0,8 t Kohlenstoff pro Hektar und Jahr in den ersten 20 Jahren der Maßnahmenumsetzung liegt. Der zu erwartende Bereich liegt für viele Maßnahmen zwischen 0,2 und 0,5 t Kohlenstoffsequestrierung pro Hektar und Jahr. Da ein 1 kg Bodenkohlenstoff 3,67 kg CO_{2eq} entspricht, können in einem Hektar Ackerboden jährlich potenziell zwischen 770 und gut 1.800 kg CO_{2eq} zusätzlich gespeichert werden. Dies entspricht einer Emissionsvermeidung, die sich alternativ ergibt, wenn die mineralische Stickstoffdüngung in der Größenordnung von 80 – 210 kg/ha/a verringert wird (eigene Kalkulation auf Basis von LfL, 2023a). Voraussetzung ist jedoch, dass sich der Bodenkohlenstoffvorrat in einem Gleichgewicht befindet und nicht einen abnehmenden Trend aufweist. Daten aus der Bodendauerbeobachtung und Modellrechnungen des Thünen-Instituts zur Bodenzustandserhebung Landwirtschaft lassen jedoch in vielen Regionen negative Trends in der Entwicklung der Bodenkohlenstoffgehalte vermuten (Jacobs et al., 2018). Die in den Steckbriefen angegeben potentiellen C-Sequestrierungsraten für die verschiedenen Maßnahmen sind Spannbreiten für Boden- und Klimabedingungen in Mitteleuropa und dienen zur vergleichenden Orientierung. Diese Raten können lokal auf einzelnen Schlägen unter-

oder auch überschritten werden. Dies hängt insbesondere an den Ausgangsbedingungen und -humusvorräten des Bodens sowie lokalen Besonderheiten, die nicht in den mittleren C-Sequestrierungsspannen eingeschlossen sind.

In der Biomasse von Agrargehölzen (Hecken, Feldgehölze, Agroforst) können dagegen bis zu sechs t Kohlenstoff pro Hektar und Jahr in deren Aufwuchsphase zusätzlich gespeichert werden (Mayer et al., 2022; Wiesmeier et al., 2020a). Allerdings wächst mit größerem Flächenumfang von Agrarholzflächen auch die Gefahr von Verlagerungseffekten (siehe oben).

2.2 Nicht ausgewählte Maßnahmen

In der Literatur und Diskussion zum Humusaufbau tauchen Maßnahmen auf, die in der weiteren Analyse nicht weiter beachtet werden. Hierunter fallen insbesondere folgende Maßnahmen:

- **Organische Düngung:** Durch den Einsatz organischer Düngemittel kann zwar auf Einzelflächen Humus aufgebaut werden, das ist aufgrund des Verlagerungseffektes jedoch nicht klimawirksam. Zusätzlicher Humus kann nur entstehen, wenn insgesamt mehr organische Masse produziert wird (siehe Diskussion zu Verlagerungseffekten oben).
- **Umstellung auf Ökolandbau:** Zwar kann durch die Umstellung von konventioneller auf ökologische Landwirtschaft, bedingt durch veränderte Anbaumethoden, zusätzlicher Humus aufgebaut werden (Gattinger et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021), hierfür sind aber tiefgreifende unternehmensstrukturverändernde Anpassungen notwendig, die über die Analysen in dieser Zusammenstellung hinausgehen. Der Ökolandbau wird zudem über die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) bereits umfangreich gefördert. Die zentrale Maßnahme, die im Ökolandbau zum Humusaufbau führt, ist die Integration mehrjähriger Leguminosen (z.B. Klee gras und Luzerne) in die Fruchtfolgen. Diese Maßnahme ist in der Zusammenstellung aufgeführt. Viele andere Maßnahmen in dieser Zusammenstellung können aber auch auf Ökobetrieben zum weiteren Humuserhalt und Humusaufbau beitragen.
- **Reduzierte Bodenbearbeitung** wird häufig als Maßnahme zum Humusaufbau gesehen. Breitere wissenschaftliche Auswertungen zeigen jedoch, dass die reduzierte Bodenbearbeitung im Mittel zu keinem Humusaufbau führt, sondern lediglich zu einer vertikalen Umverteilung des vorhandenen Humus (Hermle et al., 2008; Luo et al., 2010). Da die Vielfalt der Systeme und Wirkungen sehr groß sind, können innovative Ansätze zur reduzierten Bodenbearbeitung auf Demo-Flächen erprobt werden.
- **Wurzelstarke Sorten** könnten sich in Zukunft zu einer vielversprechenden Maßnahme zum Humusaufbau entwickeln. Leider existieren bisher nicht genügend Daten zur Wurzelmasse unterschiedlicher Sorten von Ackerkulturen, die eine gezielte Sortenauswahl und -förderung ermöglichen.
- **Beschleunigte Verwitterung (Enhanced Weathering)** ist das Aufbringen von Gesteinsmehl aus olivinreichem Gestein. Dieses reagiert mit dem CO₂ aus der Atmosphäre und bindet es in schwerlöslichen Verbindungen im Boden. Dieses Verfahren ist wissenschaftlich vor allem hinsichtlich negativer Nebenwirkungen wie der möglichen Akkumulation von Pflanzenschutzmittelresten im Boden noch nicht ausreichend untersucht. Weiterhin wird der gebundene Kohlenstoff nicht in Form von Humus gespeichert (Caldeira et al., 2013; Hartmann et al., 2013; Hepburn et al., 2019).
- **(Dauerhafte) Landnutzungsänderungen** wie die Umwandlung von Acker- in Dauergrünland bieten zwar großes Potential für positive Humus- und Klimawirkungen, sind aber oftmals aus rechtlichen Gründen nicht reversibel. Darüber hinaus zählen die geänderten Landnutzungen nicht mehr zum Ackerbau, dem Schwerpunkt dieses Projektberichtes. Daher werden (dauerhafte) Landnutzungsänderungen, mit Ausnahme der Anlage von Hecken, nicht betrachtet.

3 Kalkulation regionaler Prämien zur Maßnahmenentschädigung

Im Folgenden wird erläutert, wie die Kosten von Maßnahmen sowie mögliche Entschädigungszahlungen (Kompensationen) für landwirtschaftliche Betriebe ermittelt werden können. Dabei ist die Vorgehensweise

grundsätzlich ähnlich konzipiert, wie die Berechnung von Agrarumwelt- und Klimaschutzmaßnahmen (AUKM) im Rahmen der GAP. Da die Entschädigungszahlungen meistens aus öffentlichen Mitteln finanziert werden, sind gewisse Bewirtschaftungsanforderungen notwendig. Die Anforderungen in den Maßnahmensteckbriefen sind so gestaltet, dass Betriebe im Rahmen von Projekten Freiheitsgrade für die individuelle Ausgestaltung behalten.

Hinsichtlich der Entschädigungszahlungen wird mit den regionalen Prämien auf Basis der Anbau- und Ertragsstatistik versucht, einen Kompromiss zwischen einfacher Abwicklung und der Berücksichtigung von Standortunterschieden zu erzielen. Die regionalen Pauschalen berücksichtigen unterschiedliche Opportunitätskosten der Flächen in den Regionen sowie Verfahrenskosten der einzelnen Maßnahmen (vgl. Abbildung 1).

Abbildung 1: Kalkulationsschema Kompensationsbeträge

Opportunitätskosten (Erlösverlust der bisherigen Bewirtschaftung)
- Maßnahmen-Deckungsbeitrag (= Verfahrenskosten = Maßnahmenerlöse – variable Maßnahmenkosten)
= Kompensationsbetrag

Quelle: Eigene Darstellung.

Um die Standortbedingungen innerhalb einer Region zu harmonisieren und die Zahl der Regionen zu begrenzen, wurden ähnliche Boden-Klima-Räume (Roßberg et al., 2007) zu zehn Regionen zusammengefasst.

Verwendete Daten und getroffene Annahmen

- Als Kennzahl wird der Deckungsbeitrag verwendet. Hintergrund hierfür ist, dass davon ausgegangen wird, dass die vorgestellten Humusmaßnahmen die betrieblichen Fixkosten nicht (nennenswert) beeinflussen.
- Für die Erträge wurde der Mittelwert der Kreisertragsstatistiken für die Jahre 2016-2021 gebildet. Durch den langen Zeitraum soll der Einfluss einzelner Extremjahre reduziert werden³. Vor dem Hintergrund, dass die Grenzen der Boden-Klima-Räume auf Basis von Gemeindegrenzen definiert sind (Roßberg et al., 2007), wurde die Annahme getroffen, dass alle Gemeinden eines Landkreises den mittleren Kreisertrag erreichen. Darauf aufbauend werden die mittleren Erträge für die zehn Regionen abgeleitet. Um außerdem zu berücksichtigen, dass die Gemeinden unterschiedlich viel Ackerfläche haben, werden die Erträge entsprechend des Ackerflächenanteils der Gemeinde an der Ackerfläche der Region gewichtet.
- Im Gegensatz zu den Erträgen orientieren sich die Annahmen für die Kosten und Erlöse an den Jahren 2020-2022. Hierdurch wird das derzeit hohe Preisniveau stärker berücksichtigt, das für die künftigen Anbauentscheidungen der Landwirte relevant ist.
- Die Preisannahmen sind auszugsweise in Tabelle 1 dargestellt. Weiterhin wurden folgende Daten und Annahmen für die Kalkulation der Deckungsbeiträge berücksichtigt:
 - Kosten für Saatgut, Pflanzenschutzmittel, Versicherung und die variablen Maschinenkosten (außer Energiekosten), sind der Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau vom Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft (KTBL) (KTBL, 2023) entnommen.
 - Um verschiedene Bewirtschaftungsintensitäten abhängig vom Ertragsniveau abbilden zu können, werden in Anlehnung an die KTBL-Leistungs-Kosten-Rechnung Pflanzenbau für jede Kultur drei Ertragsniveaus angenommen. Jedes Ertragsniveau hat eine angepasste Kostenstruktur.
 - Die Preise für Energie und Nährstoffe sind dem statistischen Jahrbuch mit dem Mittel für die Ernte 2020-2022 entnommen (BMEL, 2022).

³ In einzelnen Fällen war es aufgrund fehlender Daten notwendig, Mittelwerte auf Ebene der Regierungsbezirke oder Bundesländer heranzuziehen.

- Die Energiekosten werden berechnet, indem die in der KTBL Leistungs-Kosten-Rechnung Pflanzenbau angegebenen Energieträgermengen mit dem Preis aus dem statistischen Jahrbuch multipliziert wurden. Außerdem wurde vom statistischen Dieselpreis die Dieselerückvergütung abgezogen.
- Die Nährstoffkosten werden auf Basis der Düngverordnung (DüV) und den Preisen aus dem statistischen Jahrbuch berechnet (DüV; Knöferl et al., 2022).
- Mit Ausnahme von Silomais werden deutschlandweit einheitliche Verkaufspreise angenommen. Hierfür wurden für Getreide, Ölsaaten und Hülsenfrüchte Daten von der AMI verwendet (AMI, 2022a, 2022b). Die Preise für Zuckerrüben und Kartoffeln basieren auf Daten von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) und der Landwirtschaftskammer Niedersachsen (LfL, 2023b; LWK Niedersachsen, 2022).
- Der Silomaispreis ergibt sich aus dem regionalen Vergleichspreis mit Weizen, bei dem identische Deckungsbeiträge von Weizen und Silomais erzielt werden. Hintergrund hierfür ist, dass Silomais aufgrund der geringen Transportwürdigkeit nur regional gehandelt wird und keine einheitlichen Preisinformationen vorliegen. Gleichzeitig ist in vielen Regionen Weizen eine Konkurrenzkultur zum Silomais, so dass der Mindestpreis für Silomais aus dieser Konkurrenz abgeleitet werden kann.
- Im Unterschied zur Leistungs-Kosten-Rechnung Pflanzenbau vom KTBL wurden folgende Annahmen auf Basis von Daten der LfL (2023a) für die Kalkulationen getroffen:
 - Silomais wird stehend ab Feld verkauft und die Nährstoffe werden zurückgeführt.
 - Die Gülleausbringung erfolgt durch ein Lohnunternehmen und nicht eigenmechanisiert.
 - Körnermais und Zuckerrüben werden von einem Lohnunternehmen geerntet.

Kalkulation der Opportunitätskosten

- Die regionalen Opportunitätskosten werden anhand der jeweils sieben flächenstärksten Kulturen in den Regionen abgeleitet. Die Flächenumfänge der Kulturen sind dem Thünen-Agraratlas entnommen, der auf der regionalen Anbaustatistik basiert (vgl. Gocht und Röder, 2014). Diese werden für die Deckungsbeiträge entsprechend ihres Anteils an diesen sieben Kulturen gewichtet.
- Hinsichtlich der Opportunitätskosten wird nicht zwischen konventionell und ökologisch wirtschaftenden Betrieben unterschieden. Ursache hierfür ist, dass keine verlässliche Datenbasis existiert, um deutschlandweit und regional spezifiziert Opportunitätskosten für den Ökolandbau abzuleiten. Hinzu kommt, dass zwar die Deckungsbeiträge einzelner Kulturen im Ökolandbau in der Regel höher ausfallen als im konventionellen Anbau, in vielen Fällen die Vorteile jedoch durch Nachteile beim Kleegrasanbau ausgeglichen werden. Exemplarische Kalkulationen zeigen, dass die durchschnittlichen Deckungsbeiträge von Fruchtfolgen mit Marktfrüchten in einer ähnlichen Größenordnung liegen.

Kalkulation der Maßnahmenkosten/-deckungsbeiträge

- Bei der Kalkulation der Maßnahmenkosten werden dort, wo es sinnvoll möglich ist, zwischen ökologischer und konventioneller Bewirtschaftung unterschieden, um vorhandene strukturelle Unterschiede wie z. B. höhere Saatgutkosten für Zwischenfrüchte im Ökolandbau berücksichtigen zu können.
 - Die für die entsprechenden Kalkulationen notwendigen Erzeugerpreise wurden der AMI (AMI, 2023) und der LfL (2023a) entnommen.
 - Die Bewertung von Nährstoffen im Ökolandbau ist mit Unsicherheit behaftet, weil die Märkte stark von regionalen Knappheiten geprägt sind. Das gilt insbesondere für Stickstoff. Die angenommenen Preise für Stickstoff (4,5 €/kg), P₂O₅ (1,4 €/kg) und K₂O (1,5 €/kg) basieren auf folgenden Quellen: Heise, 2021; LfL, 2022; LfL, 2023a.

- Da es keine aussagekräftige Statistik zu Erträgen im Ökolandbau gibt, mussten die Erträge auf Basis von Ertragsrelationen geschätzt werden. Die Ertragsrelationen wurden mit Daten von der LfL (2023a) berechnet.
- Für manche Maßnahmen ist es notwendig, jeweils eine Pauschale für unterschiedliche Umsetzungsvarianten zu kalkulieren. Bei Zwischenfrüchten und Untersaaten gibt es beispielsweise verschiedene Ausgangsszenarien. Bei mehrjährigen Kulturen verändert sich die Wettbewerbsfähigkeit in Abhängigkeit von der Nutzung der Kultur.
- Darüber hinaus ist es nach EU Recht grundsätzlich möglich, zusätzlich zu den kalkulierten Maßnahmenkosten einen Transaktionskostenanteil von bis zu 20 % der kalkulierten Kompensation zu berücksichtigen. Ob dies sinnvoll ist, muss im Einzelfall entschieden werden. Wenn Betriebe bereits den Aufwand für die Mitarbeit in einem Projekt vergütet bekommen, besteht diese Gefahr der Doppelförderung. Daher sind für die nachfolgend dargestellten Kompensationen keine Transaktionskosten einkalkuliert.

Tabelle 1: Preisannahmen für konventionelle Produktionsmittel und Produkte

Ausgewählte Erzeugerpreise Marktfrüchte		Einkaufspreise ausgewählter Produktionsmittel	
Winterweizen	26,2 €/dt	Diesel ¹	0,87 €/l
Roggen	21,6 €/dt	Stickstoff	1,22 €/kg
Raps	58,0 €/dt	P ₂ O ₅	0,94 €/kg
Kartoffel	10,0 €/dt	K ₂ O	0,76 €/kg
Zuckerrübe	3,7 €/dt		

¹ Die Dieselerückvergütung ist bereits einkalkuliert.

Quelle: Eigene Darstellung nach AMI (2022b), AMI (2022a), LfL (2023b), LWK Niedersachsen (2022) und BMEL (2022).

Eine Doppelförderung muss bei Maßnahmenkompensationen aus juristischen Gründen immer ausgeschlossen werden. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Maßnahmen auch über die erste oder zweite Säule der GAP gefördert werden können und somit keine weiteren öffentlichen Mittel ausgegeben werden müssen.

4 Maßnahmen

Im folgenden Kapitel werden die auf Basis der zuvor genannten Kriterien ausgewählten Maßnahmen hinsichtlich ihres C-Sequestrierungspotentials, ihrer Klimawirkungen sowie bezüglich sonstiger Umwelt- und ackerbaulicher Wirkungen detaillierter beschrieben. Es wird auf geeignete Standorte, Bewirtschaftungsanforderungen eingegangen und regionsspezifische Kompensationszahlungen werden vorgeschlagen. Für einige Maßnahmen ist weiterhin ein Prüfschema dargestellt, mit dem ermittelt werden kann, ob eine Kompensation und welche Kompensation für die ausgewählte Fläche in Frage kommt.

4.1 Fruchtfolge

Über die Fruchtfolge kann der Humusgehalt im Boden entweder durch Einbringen zusätzlicher Biomasse in den Boden oder durch Verminderung des Abbaus organischer Substanz beeinflusst werden. Hierfür muss der Anteil humusmehrender Kulturen (z. B. Körnermais oder mehrjährige Kulturen) ausgeweitet und/oder der Anteil humuszehrender Kulturen (Silomais, Kartoffeln, Zuckerrüben) verringert werden. Bei den humusmehrenden Kulturen liegt eine besondere Bedeutung im Anbau mehrjähriger Kulturen, weil diese durch ihre verstärkte Wurzelbildung sehr positiv auf den Humusgehalt wirken. Hinsichtlich der Reduktion humuszehrender Kulturen sollte der Schwerpunkt auf enge und intensive Fruchtfolgen gelegt werden, da in weiten Fruchtfolgen Änderungen innerhalb von

Projektlaufzeiten kaum messbar sein werden. Hierfür muss auf der Maßnahmenfläche vorab für die nächsten Jahre eine Fruchtfolge geplant und dieser Plan möglichst eingehalten werden. Anpassungen sollten während der Laufzeit eines Projektes möglich sein, müssen aber mit den Projektpartnern abgestimmt werden, da sich je nach Anpassung veränderte Entschädigungen ergeben können.

Darüber hinaus bringen weite Fruchtfolgen neben dem Humusaufbau weitere ackerbauliche Vorteile mit sich und verursachen meist nur geringe Produktions- und damit Treibhausgasverlagerungen.

Tabelle 2: Maßnahmensteckbrief Fruchtfolge


Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Erhöhung/Reduktion der Anbauanteile der in Tabelle 3 aufgeführten Kulturen gegenüber dem Referenzzeitraum von fünf Jahren. • Kombination mehrerer Maßnahmenvarianten im gleichen und in verschiedenen Jahren möglich (z. B. Anbau von Körnermais anstelle von Silomais). • Prüfung der Förderwürdigkeit mithilfe des Schemas in • • Abbildung 2. 		
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)		Manojlović et al., 2008; West und Post, 2002; Minasny et al., 2017; Tiefenbacher et al., 2021	
Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i> <i>Verlagerungsgefahr</i>	v. a. abhängig von Änderung der N-Düngung Gering bis mittel	Machado et al., 2021
Sonstige Umweltwirkungen	Erhalt der Bodenfruchtbarkeit, Biodiversität		Böhm et al., 2020
Ackerbauliche Wirkungen	Phytosanitäre Wirkungen, höhere Erträge durch längere Anbaupausen und Vorfruchtwirkungen, höhere Ertragsstabilität		Böhm et al., 2020
Geeignete Standorte	Alle		
Anmerkungen	Die Wirkungen können, abhängig von der betrieblichen Ausgestaltung, stark variieren. Humus kann durch reduzierten Anbau von Hackfrüchten, mehr Körnermais und/oder mehrjährige (Futter-/Energie-) Pflanzen gefördert werden. Für die mehrjährigen Kulturen gibt es jedoch eine eigene Maßnahme (siehe Kapitel 4.3). Unter Umständen können einzelne Varianten mehrjähriger Kulturen mit den hier vorgestellten Fruchtfolgemaßnahmen kombiniert werden.		

Tabelle 3: Kompensationshöhen Fruchtfolgeanpassungen

Humusregion	Zusätzlicher Anbau Körnermais		Reduktion Anteil Silomais	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
(1) Sandböden Ost	50 €/ha	130 €/ha	150 €/ha	150 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	210 €/ha	310 €/ha	90 €/ha	90 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	100 €/ha	170 €/ha	40 €/ha	50 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	150 €/ha	230 €/ha	80 €/ha	80 €/ha
(5) Löss Ost	240 €/ha	330 €/ha	40 €/ha	50 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	0 €/ha ¹	0 €/ha	80 €/ha	110 €/ha
(7) West	70 €/ha	150 €/ha	90 €/ha	90 €/ha
(8) Gäue Mitte	0 €/ha	70 €/ha	20 €/ha	40 €/ha
(9) Gäue Süd	20 €/ha	110 €/ha	0 €/ha	0 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	0 €/ha	0 €/ha	50 €/ha	70 €/ha

Humusregion	Reduktion Anteil Kartoffeln		Reduktion Anteil Zuckerrüben	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
(1) Sandböden Ost	730 €/ha	1.950 €/ha	250 €/ha	60 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	530 €/ha	1.890 €/ha	0 €/ha	120 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	1.170 €/ha	3.190 €/ha	70 €/ha	230 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	900 €/ha	2.710 €/ha	160 €/ha	380 €/ha
(5) Löss Ost	730 €/ha	2.300 €/ha	0 €/ha	0 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	800 €/ha	2.350 €/ha	250 €/ha	450 €/ha
(7) West	1.380 €/ha	3.650 €/ha	110 €/ha	310 €/ha
(8) Gäue Mitte	500 €/ha	1.770 €/ha	120 €/ha	280 €/ha
(9) Gäue Süd	1.070 €/ha	3.130 €/ha	290 €/ha	680 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	960 €/ha	2.780 €/ha	280 €/ha	540 €/ha

¹ Wenn in einer Zelle 0 €/ha stehen, dann ist auf Basis der kalkulierten Deckungsbeiträge keine Kompensation für den (Nicht-) Anbau dieser Kultur in der jeweiligen Region notwendig.

Quelle: Eigene Kalkulationen.

Exemplarische Kalkulation der Kompensationshöhe einer Maßnahmenfläche

Nachfolgend wird exemplarisch für einen konventionellen Betrieb der Region West erläutert, wie sich aus den jeweiligen Hektarbeträgen in Tabelle 3 die Kompensationshöhen für die geplante Fruchtfolge auf einer 5 ha großen Maßnahmenfläche ergeben:

- (1) Erfassung der bisherigen Fruchtfolge über die letzten 5 Jahre: Kartoffeln, Weizen, Rüben, Weizen, Wintergerste
- (2) Planung neue Fruchtfolge für die nächsten 5 Jahre: Kartoffel, Weizen, Körnermais, Weizen, Körnermais
→ Geplante und relevante Änderungen: 5 ha weniger Zuckerrüben, 10 ha zusätzlicher Körnermais
- (3) Hektarbeträge aus den Tabellen entnehmen:
Reduktion Zuckerrübe: 110 €/ha
Zusätzlicher Körnermais: 70 €/ha
- (4) Kompensationsbetrag für die gesamte Maßnahmenfläche berechnen: $5 \text{ ha} \cdot 110 \text{ €/ha} + 10 \text{ ha} \cdot 70 \text{ €/ha} = 1.250 \text{ €}$

4.2 Zwischenfrüchte und Untersaaten

Beim Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten ist die ober- und unterirdische Biomassebildung der Zwischenfrucht für den Humusaufbau entscheidend. Die Biomassebildung für den Humusaufbau kann auf unterschiedliche Weise erhöht werden:

- (1) Durch die Integration von Zwischenfrüchten an Stellen in der Fruchtfolge, an denen bisher keine Zwischenfrüchte angebaut wurden. Vor Winterungen kann es möglich sein, im Zeitraum zwischen der Ernte der Vorkultur und der Aussaat der Winterung eine Sommerzwischenfrucht anzubauen.
- (2) Bei winterungslastigen Fruchtfolgen kann es erforderlich sein den Anbau von Sommerungen aufzunehmen, um überhaupt die Möglichkeit zu schaffen, eine gut etablierte Zwischenfrucht anzubauen⁴.
- (3) Optimierung bereits angebaute Zwischenfrüchte, um höhere Biomasseerträge zu erzielen. Dies kann durch eine angepasste Artenauswahl, frühe Saattermine und optimierter Aussaattechnik erreicht werden.

Insbesondere die Frage, wie bzw. welche Zwischenfrüchte und Untersaaten mit möglichst hoher Biomassebildung an unterschiedlichen Standorten angebaut werden können, erfordert noch weitere Untersuchungen. Grundsätzlich sind viele Zwischenfruchtarten denkbar und viele Betriebe haben bereits Erfahrungen mit dem Anbau von Zwischenfrüchten gesammelt. Auf Basis aktueller Erkenntnisse und einer Literaturlauswertung ist bei den in Tabelle 7 genannten Arten von einer erhöhten Humuswirkung auszugehen. Grundlage für diese Einschätzung ist eine aktuelle Untersuchung, in der die ober- und unterirdische Biomassebildung verschiedener Zwischenfruchtarten analysiert wurde (Maack, 2022). Weiterhin wurden ältere Untersuchungen an weiteren Standorten zur oberirdischen Biomassebildung verschiedener Zwischenfrüchte für die Einschätzung herangezogen (Renius et al., 1992; Lütke Entrup, 2001).

Um in der begrenzten Zeit von Projekten die Chance zu haben, eine Humuswirkung festzustellen, sollten innerhalb der Projektlaufzeit mehrfach Zwischenfrüchte oder Untersaaten angebaut werden.

Neben dem Humusaufbau bietet der Zwischenfruchtanbau weitere positive Wirkungen (Erosionsschutz, N-Speicherung) und verursacht keine Verlagerungseffekte (LLH, 2020).

⁴ Diese Maßnahmenvariante ist vornehmlich für Betriebe mit engen und winterungslastigen Fruchtfolgen gedacht. Es gibt insgesamt auch vor Sommerungen noch ein großes Potenzial mehr Zwischenfrüchte anzubauen.

Tabelle 4: Maßnahmensteckbrief Zwischenfrüchte und Untersaaten

Bewirtschaftungsanforderungen zusätzliche Zwischenfrucht (vollständige Kompensation)	<ul style="list-style-type: none"> ● Erhöhung der Anzahl an Jahren mit Zwischenfrüchten und/oder Untersaaten auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum (unter Berücksichtigung des Prüfschemas in Abbildung 3). ● Aussaatzeitpunkt entsprechend der Empfehlung für die Arten(-mischung). ● Mischungszusammensetzung: ≥ 3 Arten. ● Aussaatstärke nach Empfehlung zur Mischung/Rücksprache mit Betriebsbegleitung. ● Einsaat mit Drillmaschine. ● Düngung entsprechend der DüV erlaubt. ● Frühester Umbruch, wenn eine Sommerung folgt: 15.01. des Folgejahres. ● Frühester Umbruch, wenn eine Winterung folgt: vier (besser frühestens sechs) Wochen nach der Aussaat. ● Prüfung der Variantenauswahl anhand des Schemas in Abbildung 3.
Bewirtschaftungsanforderungen optimierte Zwischenfrucht (Teilkostenkompensation)	<ul style="list-style-type: none"> ● Erhöhung der Anzahl an Jahren mit Zwischenfrüchten und/oder Untersaaten auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum (unter Berücksichtigung des Prüfschemas in Abbildung 3). ● Aussaatzeitpunkt entsprechend der Empfehlung für die Arten(-mischung). ● Mischungszusammensetzung: <ul style="list-style-type: none"> ○ ≥ 3 Arten, davon ≥ 2 Arten aus den Kategorien 1 und 2 (siehe Tabelle 7). ○ Entweder $\geq 55\%$ Samenanteile von Arten aus Kategorie 1 oder $\geq 70\%$ Samenanteile von Arten aus Kategorie 1 oder 2 (siehe Tabelle 7). ○ Abweichungen hiervon in sehr spezifischen Einzelfällen möglich. ● Aussaatstärke nach Empfehlung zur Mischung/Rücksprache mit Betriebsbegleitung. ● Einsaat mit Drillmaschine. ● Düngung entsprechend der DüV erlaubt. ● Frühester Umbruch, wenn eine Sommerung folgt: 15.01. des Folgejahres. ● Frühester Umbruch, wenn eine Winterung folgt: vier (besser frühestens sechs) Wochen nach der Aussaat. ● Prüfung der Variantenauswahl anhand des Schemas in Abbildung 3.

**Bewirtschaftungs-
anforderungen
Untersaaten**

- Erhöhung der Anzahl an Jahren mit Zwischenfrüchten und/oder Untersaaten auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum (unter Berücksichtigung des Prüfschemas in Abbildung 3).
- Artenauswahl gemeinsam mit der Betriebsbegleitung; hierbei Prüfung, ob Arten der Kategorien 1 oder 2 aus Tabelle 7 berücksichtigt werden können.
- Aussaatstärke nach Empfehlung zur Mischung/Rücksprache mit Betriebsbegleitung.
- Aussaat vor der Ernte.
- Düngung entsprechend der DüV erlaubt.
- Frühester Umbruch: 15.01. des Folgejahres, wenn eine Sommerung folgt.
- Frühester Umbruch, wenn eine Winterung folgt: vier (besser frühestens sechs) Wochen nach der Ernte der vorherigen Hauptkultur.
- Prüfung der Variantenauswahl anhand des Schemas in Abbildung 3.

**Bewirtschaftungs-
anforderungen
zusätzliche
Zwischenfrucht +
zusätzliche
Sommerung**

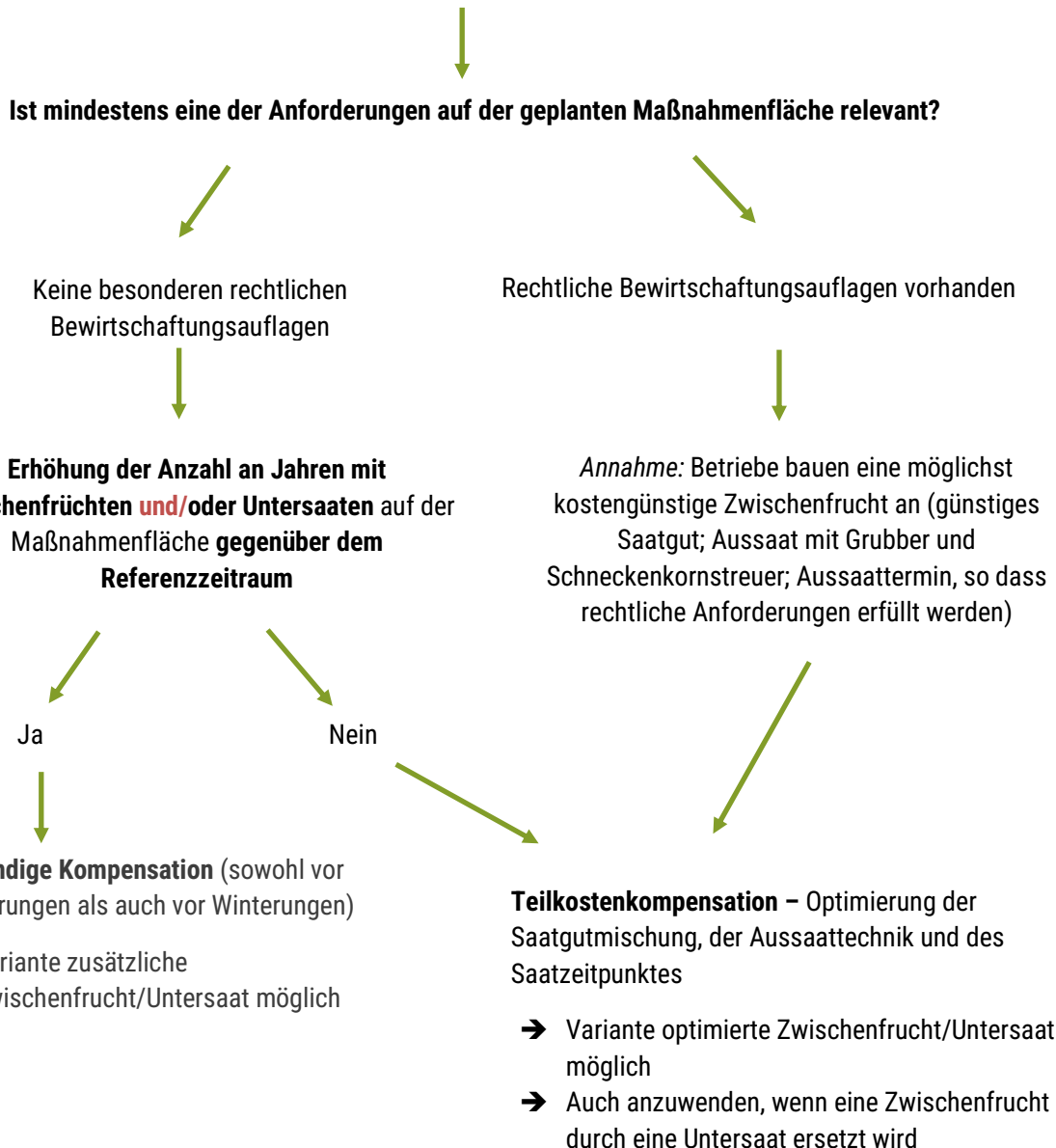
- Erhöhung der Anzahl an Jahren mit Zwischenfrüchten oder Untersaaten auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum (unter Berücksichtigung des Prüfschemas in Abbildung 3).
 - Für die Zwischenfrucht gelten die Anforderungen und Kompensationssätze der mithilfe des Prüfschemas ermittelten Variante (zusätzliche Zwischenfrucht, optimierte Zwischenfrucht oder Untersaat).
 - Erhöhung des Anteils an Sommerungen auf Maßnahmenfläche gegenüber dem Referenzzeitraum.
 - Nur auf Flächen, in denen in den vergangenen fünf Jahren maximal eine Sommerung angebaut wurde.
 - Bei den folgenden Sommerungen ist nur die Zwischenfrucht/Untersaat förderfähig: Kartoffeln, Zuckerrüben und Silomais.
 - Kompensation der zusätzlichen Sommerung mit den in Tabelle 6 dargestellten Entschädigungen. Hierbei ist zu prüfen, ob durch die Maßnahme die Anforderungen einer Ökoregelung oder AUKM erfüllt werden und ggf. kann auf diese Förderung ausgewichen werden.
-

C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)		Bolinder et al., 2020; Jian et al., 2020; McClelland et al., 2021; Poeplau und Don, 2015; Tiefenbacher et al., 2021	
Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine bis erhöhte bei leguminosenhaltigen Mischungen und bestimmten Abfrierbedingungen	Abdalla et al., 2019; Basche und DeLonge, 2017; Han et al., 2017; Muhammad et al., 2019
	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Sehr gering	Flessa et al., 2012; Olson et al., 2010; Olson et al., 2014; Poeplau und Don, 2015
Sonstige Umweltwirkungen	Erosionsschutz, Biodiversität, weniger N-Verluste, Verbesserung der Aggregatstruktur des Bodens		Blanco-Canqui et al., 2015; Abdalla et al., 2019; Valkama et al., 2015; Tonitto et al., 2006
Ackerbauliche Wirkungen	<ul style="list-style-type: none"> Keine bis positive Wirkungen auf den Ertrag der Folgekultur (v.a. Leguminosen mit positiver Wirkung) Unkrautunterdrückung möglich keine negativen Wirkungen auf die Wasserversorgung der folgenden Sommerung zwischen zwei Winterungen Wassermangel im Herbst für neue Winterung möglich 		Böttcher et al., 2015; EC, 2022; Osipitan et al., 2018
Geeignete Standorte	Nahezu alle, auf schweren Böden gibt es Herausforderungen bei der Bewirtschaftung (Frostgare)		
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> Arten sind an die Fruchtfolge und den Aussaatzeitpunkt anzupassen Samenreife sollte vermieden werden. 		LLH, 2020; Zarnik, 2017

Abbildung 3: Prüfschema zur Festlegung der Kompensationshöhe für Zwischenfrüchte und Untersaaten

Welche fachrechtlichen und GAP-Anforderungen sind für Zwischenfrüchte bzw. Untersaaten zur Vermeidung einer Doppelförderung relevant?

- GLÖZ 6: Mindestbodenbedeckung im Winter auf 80% der Ackerfläche
- DüV: verpflichtender Zwischenfruchtanbau in roten Gebieten (mit Ausnahme von nach dem 1. Oktober geernteten Vorkulturen und in Gebieten mit <550 mm Jahresniederschlag)
- Länderprogramme prüfen, z.B. Baden-Württemberg: FAKT E.1.2 (Begrünungsmischungen im Ackerbau) – keine Projektförderung möglich



Quelle: Eigene Darstellung.

Kompensationszahlungen

Die Höhe wird mithilfe des Prüfschemas (siehe Abbildung 3) festgelegt. Hierbei wird nicht zwischen Zwischenfrüchten und Untersaaten unterschieden. Die in Tabelle 5 gezeigten Kompensationssätze fallen in jedem Anbaujahr einer Zwischenfrucht oder Untersaat an und lassen sich auch für die zusätzliche Zwischenfrucht in Kombination mit einer zusätzlichen Sommerung anwenden.

Tabelle 5: Kompensationshöhen Zwischenfrüchte und Untersaaten

	konventionell	ökologisch
Zusätzliche Zwischenfrucht/Untersaat (vollständige Kompensation)	130 €/ha	175 €/ha
Optimierte Zwischenfrucht/Untersaat anstelle einer Zwischenfrucht (Teilkostenkompensation)	50 €/ha	65 €/ha

Quelle: Eigene Kalkulationen.

Die in Tabelle 6 dargestellten Kompensationssätze sind nur bei der Kombination einer zusätzlichen Zwischenfrucht mit einer zusätzlichen Sommerung entsprechend der in Tabelle 4 aufgeführten Anforderungen als Top-Up auf die Zwischenfruchtkompensation anzuwenden. Bei der Aufnahme einer zusätzlichen Sommerung in die Fruchtfolge kann davon ausgegangen werden, dass eine ökonomisch eher schwache Winterung ersetzt wird. Daher wird für die Kalkulation für konventionelle Betriebe die Wintergerste durch eine Leguminose ersetzt. Die Leguminose wurde aufgrund ihrer positiven Fruchtfolgewirkungen und ihres gleichzeitig recht hohen Förderbedarfs ausgewählt. Im ökologischen Landbau sind Körnerleguminosen dagegen weit verbreitet und ökonomisch sehr konkurrenzfähig. Darüber hinaus spielt der Anbau von Wintergerste keine große Rolle. Vor diesem Hintergrund wurde die Kompensation durch das Ersetzen von Winterweizen durch Sommergerste kalkuliert.

Tabelle 6: Top-Ups für zusätzliche Sommerungen nach einer Zwischenfrucht

Humusregion	konventionell	ökologisch
(1) Sandböden Ost	240 €/ha	290 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	190 €/ha	400 €/h
(3) Sandböden Geest/Marsch	110 €/ha	220 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	260 €/ha	280 €/ha
(5) Löss Ost	270 €/ha	80 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	230 €/ha	120 €/ha
(7) West	160 €/ha	200 €/ha
(8) Gäue Mitte	160 €/ha	30 €/ha
(9) Gäue Süd	260 €/ha	200 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	250 €/ha	50 €/ha

Quelle: Eigene Kalkulationen.

In Tabelle 7 sind Zwischenfruchtarten dargestellt, die in verschiedenen Feldversuchen ein besonders großes Humusaufbauvermögen gezeigt haben. Dabei sind in Kategorie 1 die humusstärksten Arten und in Kategorie 2 die nächststärksten Arten eingeordnet. Sie sollten daher bei der Maßnahmenumsetzung besondere Berücksichtigung

finden. Zentral für einen erfolgreichen humusaufbauenden Zwischenfruchtanbau sind aber der Aussaatzeitpunkt (je früher, desto besser) und eine Saatbettbereitung wie für eine Hauptkultur.

Tabelle 7: Besonders humusstarke Zwischenfruchtarten

Kategorie 1	Kategorie 2
Ölrettich	Rauhafer
Meliorationsrettich	Winterrübsen
Grünroggen	Weißer Senf/Gelbsenf
Lupine	Phacelia
Sonnenblume	Inkarnatklee
Weidelgras (Welsches oder Deutsches)	Triticale
Hafer	Gerste
Ackerbohne	

Quelle: Don (2024)

4.3 Mehrjährige humusmehrende Kulturen

Mehrjährige Kulturen bilden ein größeres Wurzelsystem aus als einjährige Kulturen. Die große Wurzelbiomasse wirkt sich positiv auf das Humusaufbaupotenzial aus (Poeplau et al., 2021). Als Kulturen für diese Maßnahme kommen sowohl mehrjährige Futterpflanzen wie z. B. Klee gras (-gemenge) als auch Pflanzen zur energetischen Verwertung wie z. B. Miscanthus, Durchwachsene Silphie oder Wildpflanzenmischungen in Frage. Mehrjährige Kulturen sind vor allem als Ersatz für den Silomaisanbau interessant und sie wirken sich positiv auf andere Umweltziele (z. B. Erosion) aus. Jedoch besteht aufgrund des häufig geringeren Ertragsniveaus die Gefahr einer Produktionsverlagerung an andere Standorte.

Besonders herausfordernd hinsichtlich der zu treffenden Annahmen für die Kalkulation einer Entschädigung ist das mehrjährige Feldfutter am Beispiel von Klee gras. Das hat folgende Gründe:

- Die Kalkulation basiert in jedem Fall auf zahlreichen Annahmen, weil es kaum Markt- und Ertragsdaten für erzielbare Erlöse gibt.
- Die betrieblichen Ausgangssituationen unterscheiden sich zwischen konventionellen und ökologischen Betrieben stark voneinander:
 - Im Gegensatz zum konventionellen Ackerbau ist der der Klee grasanbau im Ökolandbau fester Bestandteil der Anbausysteme. Hauptmotive vom Klee grasanbau sind Futtererzeugung, Stickstofffixierung und Reduktion des Unkrautdrucks. Weiterhin wird der Klee grasanbau grundsätzlich bereits über die Ökopremie gefördert, auch wenn es keine Vorgaben zum Klee grasanteil in ökologischen Fruchtfolgen gibt.
 - Da im Ökolandbau kaum mineralisch gedüngt werden darf, sind Nährstoffe, insbesondere Stickstoff, knapp und deutlich wertvoller als in der konventionellen Landwirtschaft. Dementsprechend ist der Wertansatz für den durch das Klee gras fixierten Stickstoff im Ökolandbau deutlich höher, sodass der Kompensationsbedarf im Ökolandbau geringer als im konventionellen Ackerbau ausfällt.
- Sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau unterscheiden sich Betriebstypen in Bezug auf die Verwertungsmöglichkeiten und demzufolge auch hinsichtlich des notwendigen Kompensationsbedarfs stark voneinander. Hier können vornehmlich drei verschiedene Szenarien unterschieden werden:
 - (1) Betriebe, die den Aufwuchs gut (oftmals innerbetrieblich) verwerten können.
 - (2) Betriebe, die den Aufwuchs zwar regional verkaufen können, hiermit jedoch geringere Erlöse als mit alternativen Kulturen erzielen.

(3) Betriebe, die zusätzliches Klee gras nicht verwerten können. In diesem Fall entspricht das Klee gras einer Brache.

Der Kompensationsbedarf zwischen den drei Szenarien und ökologisch bzw. konventionell wirtschaftenden Betrieben unterscheidet sich um bis zu 1.400 €/ha (vgl. Tabelle 11). Insbesondere für Betriebe mit innerbetrieblicher Verwertung des Klee grasses ergibt sich kein Förderbedarf im Ökolandbau (vgl. Beispielkalkulation in Anhang 1). Hauptgründe hierfür sind der hohe Nährstoffwert des fixierten Stickstoffs und die geringere Ertragsdifferenz zwischen ökologischem Klee gras und dem möglichen Substitut Silomais.


Wird dagegen ein Verkauf des Aufwuchses ohne Rückführung der Nährstoffe angenommen, ergibt sich sowohl im konventionellen als auch im ökologischen Landbau ein Kompensationsbedarf (vgl. Tabelle 11). Bei einer Klee grasbrache, ergeben sich sowohl im konventionellen als auch ökologischen Landbau hohe Förderbedarfe (siehe Tabelle 11). Da bei einer Klee grasbrache kein Aufwuchs verwertet wird ist, die Gefahr von Produktionsverlagerungen sehr groß und somit die Klimawirksamkeit sehr unsicher. Daher ist die Förderung einer solchen Maßnahme nur bedingt sinnvoll.

Somit sprechen einige Argumente gegen eine zusätzliche Förderung von Klee gras als Brache. Dennoch kann es im Rahmen von Projekten sinnvoll sein, Klee gras zu fördern. Mithilfe der gewonnenen Daten können sowohl die ökonomischen Wirkungen als auch die Effekte auf die Humus- und Treibhausgasbilanz unter Berücksichtigung von Verlagerungseffekten analysiert und bewertet werden. Das kann dazu beitragen, die Klimawirkungen von Klee gras insgesamt besser einzuschätzen und ein Bewusstsein für die skizzierten Herausforderungen in der Praxis zu fördern.

Damit negative Wirkungen und finanzielle Mitnahmeeffekte auch in Forschungs- und Demonstrationsprojekten möglichst reduziert werden, sollten sich die Bewirtschaftungsanforderungen und Kompensationsbeträge für mehrjähriges Feldfutter je nach Nutzungsart des Aufwuchses differenziert werden (vgl. Tabelle 8). Um die Komplexität von Projekten nicht unnötig zu steigern, kann mehrjähriges Feldfutter auf zwei Varianten reduziert werden: mit bzw. ohne Verwertung des Aufwuchses. In diesem Fall bietet es sich für die Variante mit Verwertung an, den Verkauf des Aufwuchses anzunehmen, weil der Anbau von mehrjährigem Feldfutter für konventionelle Betriebe in der Regel weniger attraktiv als Silomaisanbau ist. Dementsprechend besteht ein Förderbedarf. Bei ökologisch wirtschaftenden Betrieben ist davon auszugehen, dass die Klee grasfläche betrieblich optimiert ist und zusätzliches Klee gras ebenfalls ökonomisch nachteilig ist und demzufolge einen Förderbedarf hat.

Tabelle 8: Maßnahmensteckbrief mehrjähriger Kulturen

Bewirtschaftungsanforderungen mehrjähriges Feldfutter mit Verwertung des Aufwuchses	<ul style="list-style-type: none"> • Aussaat von mehrjährigen Feldfutterpflanzen(-Mischungen) auf der Maßnahmenfläche. • Die Nutzungsdauer sollte mindestens zwei Jahre betragen. • Der Anteil muss auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum erhöht werden. • Festlegung der Kompensation entsprechend des Schemas in Abbildung 4.
--	---

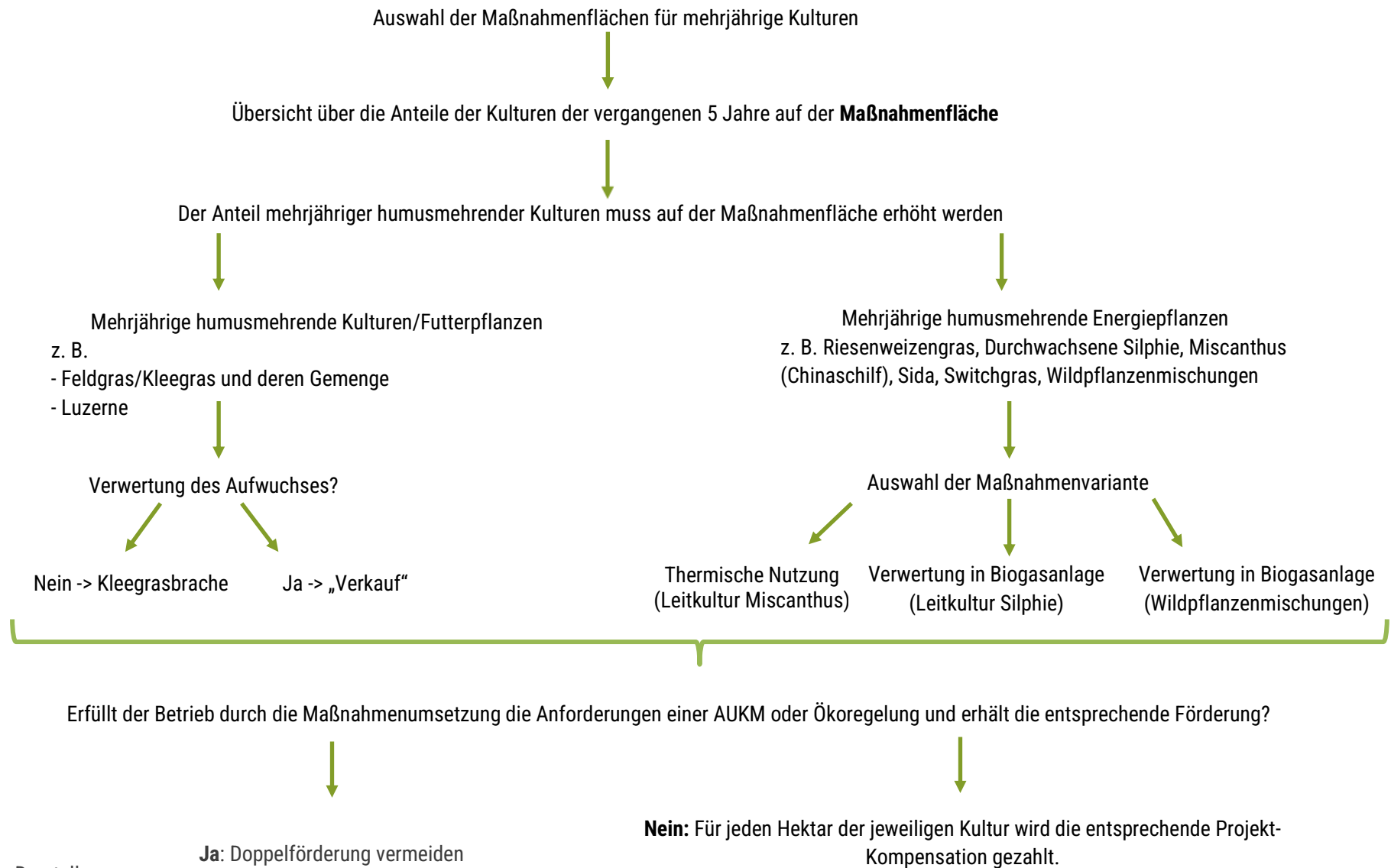
Bewirtschaftungsanforderungen mehrjähriges Feldfutter ohne Verwertung des Aufwuchses	<ul style="list-style-type: none"> • Aussaat von mehrjährigen Feldfutterpflanzen(-Mischungen) auf der Maßnahmenfläche. • Die Standdauer sollte mindestens zwei Jahre betragen. • Der Anteil von mehrjährigem Feldfutter muss sowohl auf der Maßnahmenfläche als auch gesamtbetrieblich gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum erhöht werden. • Festlegung der Kompensation entsprechend des Schemas in Abbildung 4. • Förderung nur für Ackerbaubetriebe ohne Verwertungsmöglichkeiten für den Aufwuchs.
Bewirtschaftungsanforderungen für mehrjährige Energiepflanzen zur thermischen Verwertung	<ul style="list-style-type: none"> • Aussaat von mehrjährigen Energiepflanzen wie z.B. Miscanthus. • Verbleib auf der Fläche mindestens 5 Jahre, besser länger. • Der Anteil der Kultur muss gegenüber den vorherigen 5 Jahren auf der Maßnahmenfläche erhöht werden. • Kalkulation für die Leitkultur Miscanthus, andere Kulturen können für den gleichen Kompensationsbetrag angebaut werden. • Festlegung der Kompensation entsprechend des Schemas in Abbildung 4.
Bewirtschaftungsanforderungen für mehrjährige Energiepflanzen zur Verwertung in Biogasanlagen	<ul style="list-style-type: none"> • Aussaat von mehrjährigen Energiepflanzen wie z.B. Durchwachsene Silphie. • Verbleib auf der Fläche mindestens 5, besser 6 bis 10 Jahre. • Der Anteil auf der Maßnahmenfläche muss gegenüber den vorhergehenden 5 Jahren erhöht werden. • Kalkulation für die Leitkultur Silphie, andere Kulturen können zum gleichen Kompensationsbetrag angebaut werden. • Keine Unterscheidung bei der Kompensation zwischen ökologischen und konventionellen Betrieben. • Kein Anbau mehrjähriger Wildpflanzenmischungen, weil es hierfür eine eigene Maßnahmenvariante gibt. • Festlegung der Kompensation entsprechend des Schemas in Abbildung 4.
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	 <p>Don et al., 2012; Gauder et al., 2016; Ledo et al., 2020; Ouattara et al., 2021; Poeplau und Don, 2014</p>

Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	keine bis reduzierte Emissionen durch reduzierte N-Düngung)
	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Hoch, insb. bei geringen Erträgen
Sonstige Umweltwirkungen	Erosionsschutz, Biodiversität, weniger N-Verluste	
Ackerbauliche Wirkungen	Weniger Pflanzenschutzmitteleinsatz, mehrjährige Bodenruhe, i.d.R. geringer Düngbedarf	
Geeignete Standorte	Alle, Kultur(en) können passend ausgewählt werden	
Anmerkungen	Es müssen sinnvolle Verwertungsmöglichkeiten für den Aufwuchs gefunden werden, insbesondere um Verlagerungseffekte zu vermeiden.	

Tabelle 9: Maßnahmensteckbrief Wildpflanzenmischungen zur Biogaserzeugung

Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> ● Bewirtschaftung in Anlehnung an die AUKM der Länder. <ul style="list-style-type: none"> ○ Auswahl geeigneter Mischung. ○ Kein Pflanzenschutzmitteleinsatz außer Herbiziden im Ansaatjahr. ○ Düngung nach Bedarf erlaubt. ○ Ernte nach dem 15. Juli, im ersten Standjahr nicht verpflichtend. ○ Ernteverzicht auf max. 10 % der Fläche möglich. ○ Neuansaat nach Genehmigung möglich. ● Nutzungsdauer mindestens 3 Jahre. ● Agrar-Umweltmaßnahmen haben Vorrang. Deren Anforderungen einhalten. ● Festlegung der Kompensation entsprechend des Schemas in Abbildung 4. 				
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)					
Weitere Klimawirkungen	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="446 1164 813 1209"><i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i></td> <td data-bbox="941 1131 1165 1276">Keine bis reduzierte Emissionen durch verringerte N-Düngung</td> </tr> <tr> <td data-bbox="446 1299 670 1344"><i>Verlagerungsgefahr</i></td> <td data-bbox="941 1299 1005 1344">hoch</td> </tr> </table>	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine bis reduzierte Emissionen durch verringerte N-Düngung	<i>Verlagerungsgefahr</i>	hoch
<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine bis reduzierte Emissionen durch verringerte N-Düngung				
<i>Verlagerungsgefahr</i>	hoch				
Sonstige (erwartete) Umweltwirkungen	<p>Erosionsschutz, Biodiversität, weniger N-Verluste (verbesserte Wasserqualität), Wassereinsparung, verminderter Energieverbrauch. Harbo et al., 2022</p>				
Ackerbauliche Wirkungen	<p>Ggf. Verunkrautung, häufig Ertragssteigerung auf angrenzenden Flächen durch mehr Bestäuber und Bio-Control (Nützlinge), gut geeignet für schwierige Geometrien, Waldränder, an Gewässern. Harbo et al., 2022</p>				
Geeignete Standorte	<p>Bei angepasster Saatmischung für alle Standorte geeignet.</p>				
Anmerkungen					

Abbildung 4: Prüfschema zur Ermittlung der Kompensation mehrjähriger Kulturen



Quelle: Eigene Darstellung

Kompensationszahlungen für mehrjährige Kulturen

Die in Tabelle 10 und Tabelle 11 aufgeführten Kompensationssätze zwischen den verschiedenen Maßnahmenvarianten sind nicht einfach miteinander vergleichbar. Für mehrjähriges Feldfutter und Wildpflanzenmischungen zur Verwertung in Biogasanlagen wird der jährlich fällige Kompensationsbetrag angegeben. Für mehrjährige Energiepflanzen zur thermischen Verwertung oder zur Verwertung in Biogasanlagen ist der Gesamtkompensationsbetrag je ha Maßnahmenfläche angegeben und wird entsprechend der vertraglichen Regelungen individuell über die Projektlaufzeit verteilt.

Exemplarische Kalkulation der Kompensationshöhe einer Maßnahmenfläche mit mehrjährigem Feldfutter

Nachfolgend erläutern wird exemplarisch für einen konventionellen Betrieb der Region Löss und Lehm Mitte erläutert, wie sich aus den jeweiligen Hektarbeträgen in Tabelle 11 Tabelle 10 die Kompensationshöhen für mehrjähriges Feldfutter mit Verwertung des Aufwuchses auf einer 5 ha großen Maßnahmenfläche ergibt:

- (1) Sicherstellen, dass der Anteil gegenüber den vergangenen fünf Jahren erhöht wird.
- (2) Planung, dass in den Jahren 2025 und 2026 Klee gras auf der Fläche angebaut wird.
- (3) Hektarbeträge aus den Tabellen entnehmen:
Mehrjähriges Feldfutter: **320 €/ha**
- (4) Kompensationsbetrag für gesamte Maßnahmenfläche berechnen: $5 \text{ ha} \cdot 320 \text{ €/ha} \cdot 2 \text{ Jahre} = 3.200 \text{ €}$

Exemplarische Kalkulation der Kompensationshöhe einer Maßnahmenfläche mit mehrjährigen Energiepflanzen zur Verwertung in einer Biogasanlage

Als Beispiel für die Kalkulation dient wieder der konventionelle Betrieb in der Region Löss und Lehm Mitte:

- (1) Sicherstellen, dass der Anteil gegenüber den vergangenen fünf Jahren erhöht wird.
- (2) Planung, dass im Jahr 2024 3 ha Silphie auf der Fläche angesät werden.
- (3) Hektarbeträge aus den Tabellen entnehmen:
Mehrjährige Energiepflanzen zur Verwertung in einer Biogasanlage: 2.200 €/ha.
- (4) Kompensationsbetrag für die gesamte Maßnahmenfläche berechnen: $3 \text{ ha} \cdot 2.200 \text{ €/ha} = 6.600 \text{ €}$.

Tabelle 10: Kompensationshöhen für mehrjährige Kulturen

Humusregion	Mehrjährige Energiepflanzen zur thermischen Verwertung¹	Mehrjährige Energiepflanzen zur Verwertung in Biogasanlagen¹	Wildpflanzen-mischungen zur Biogaserzeugung²
(1) Sandböden Ost	1.600 €/ha	560 €/ha	320 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	2.960 €/ha	2.070 €/ha	430 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	3.580 €/ha	2.480 €/ha	460 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	3.170 €/ha	2.200 €/ha	450 €/ha
(5) Löss Ost	3.420 €/ha	2.480 €/ha	440 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	2.400 €/ha	1.670 €/ha	370 €/ha
(7) West	3.270 €/ha	2.190 €/ha	450 €/ha
(8) Gäue Mitte	3.440 €/ha	2.380 €/ha	420 €/ha
(9) Gäue Süd	4.890 €/ha	3.470 €/ha	560 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	3.250 €/ha	2.240 €/ha	430 €/ha

¹ Der angegebene Betrag entspricht dem Kompensationsbedarf über die gesamte Nutzungsdauer (20 bzw. 16 Jahre). Er kann über die Projektlaufzeit verteilt werden. Die Kalkulation für die thermische Verwertung erfolgte anhand der Leitkultur Miscanthus und für die Verwertung in Biogasanlagen anhand der Leitkultur Durchwachsene Silphie. Es können zum gleichen Fördersatz auch andere Kulturen angebaut werden.

² Der Kompensationsbetrag gibt den während der Standzeit jährlich fälligen Kompensationsbetrag an.

Quelle: Eigene Kalkulationen.

Tabelle 11: Kompensationsbedarf verschiedener Varianten von mehrjährigem Feldfutter

Humusregion	Verkauf		Kleegrasbrache	
	konventionell	ökologisch	konventionell	ökologisch
(1) Sandböden Ost	170 €/ha	110 €/ha	870 €/ha	750 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	500 €/ha	440 €/ha	1.190 €/ha	1.080 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	200 €/ha	130 €/ha	1.240 €/ha	1.130 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	320 €/ha	260 €/ha	1.250 €/ha	1.130 €/ha
(5) Löss Ost	300 €/ha	240 €/ha	1.190 €/ha	1.070 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	20 €/ha	0 €/ha	1.110 €/ha	990 €/ha
(7) West	500 €/ha	440 €/ha	1.260 €/ha	1.150 €/ha
(8) Gäue Mitte	180 €/ha	110 €/ha	1.150 €/ha	1.030 €/ha
(9) Gäue Süd	270 €/ha	210 €/ha	1.390 €/ha	1.270 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	200 €/ha	140 €/ha	1.190 €/ha	1.070 €/ha

Quelle: Eigene Kalkulationen.

4.4 Blühstreifen

Blühstreifen fördern nicht nur die Biodiversität, sondern können auch den Humusgehalt steigern. Die C-Sequestrierung hängt stark von der ober- und unterirdischen Biomassebildung des Aufwuchses ab. Da eine hohe Biomassebildung nicht unbedingt die höchste Biodiversitätswirkung entfaltet, sind Kompromisse oder eine Priorisierung für Sortenmischungen, die mehr Biomasse bilden, gegebenenfalls notwendig. Alles in allem ist das C-Sequestrierungspotenzial vergleichsweise hoch. Ein kritischer Punkt ist jedoch die Reversibilität, denn beim Umbruch von Blühflächen (was jährlich oder spätestens nach ein paar Jahren üblich ist), wird der Kohlenstoff allmählich wieder freigesetzt (vgl. Kapitel 2.1). Eine regelmäßige Etablierung der Blühstreifen ist also anzustreben, um Humusvorräte dauerhaft zu erhöhen. Klimawirksam sind lediglich Blühstreifen, die zusätzlich angelegt werden.

Tabelle 12: Maßnahmensteckbrief Blühstreifen

Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Mindestanforderungen siehe Ökoregelungen (bundesweit) oder AUKMs (der Länder). • Erhöhung des Anteils an Jahren mit Blühmischung auf der Maßnahmenfläche gegenüber dem fünfjährigen Referenzzeitraum. 	
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	 <p style="text-align: right;">Harbo et al., 2022</p>	
Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i> Keine, stattdessen vermutlich weniger als auf Produktionsflächen, da keine N-Düngung	Harbo et al., 2022
	<i>Verlagerungsgefahr</i> Hoch	
Sonstige (erwartete) Umweltwirkungen	Erosionsschutz, Biodiversität, weniger N-Verluste (verbesserte Wasserqualität), Wassereinsparung, verminderter Energieverbrauch	Harbo et al., 2022; Wratten et al., 2012
Ackerbauliche Wirkungen	Ggf. Verunkrautung, häufig Ertragssteigerung durch mehr Bestäuber und Bio-Control (Nützlinge), gut geeignet für schwierige Geometrien, Waldränder, an Gewässern	Harbo et al., 2022; Hoffmann et al., 2018; Sutter et al., 2018
Geeignete Standorte	Bei angepasster Saatmischung für alle Standorte geeignet	
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Mischungen sollten für eine große Humuswirkung auf hohe Biomassebildung ausgelegt sein. • Empfehlung: Blühstreifen sollten mindestens drei Jahre auf einer Fläche verbleiben. • Gesamtbetriebliche Erhöhung des Flächenanteils notwendig, um zusätzlichen Kohlenstoff zu sequestrieren. 	

Kompensationszahlungen

- Da Blühstreifen über andere Programme gefördert werden, wird empfohlen keine Kompensation innerhalb von Projekten durchzuführen, sondern die Finanzierung über andere Mittel (Ökoregelungen und AUKM) abzudecken.
- Die Kompensationsbeträge anderer Förderprogramme liegen zwischen 400 €/ha und über 1.600 €/ha.

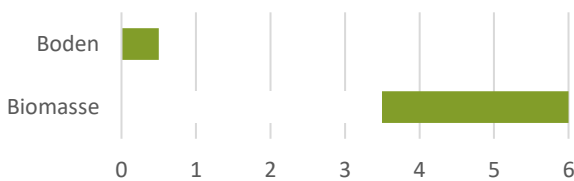
4.5 Agroforstsysteme

Agroforstsysteme kombinieren unterschiedliche Flächennutzungen auf vergleichsweise engem Raum. Hierbei sequestrieren sie Kohlenstoff in geringen Mengen als Humus im Boden und in größeren Mengen in der ober- und unterirdischen Biomasse. Abhängig vom Agroforstsystem, der Standzeit und den Standortbedingungen ergeben sich

hochvariable Humusaufbaupotentiale (Mayer et al., 2022). Agroforstsysteme produzieren nicht nur verschiedene Erzeugnisse auf einer Fläche, sondern sie können darüber hinaus Nebeneffekte wie z. B. eine verringerte Erosion oder Verschattung verursachen. Dadurch werden besonders bei Extremwitterung positive Wirkungen für den Ackerbau erwartet. Agroforstsysteme können hinsichtlich der Nutzung und des Gehölzflächenanteils sehr unterschiedlich gestaltet werden. Mögliche Nutzungskonzepte sind die Energieerzeugung (v. a. Hackschnitzel), die Wertholzerzeugung oder die Obst- und Nussproduktion. Diese Vielfalt führt nicht nur zu unterschiedlichen Klima- und Umweltwirkungen, sondern auch zu sehr variablen Kosten- und Erlösstrukturen.

Die Gesamt-Klimawirkungen von Agroforstsystemen sind stark abhängig vom konkreten System. Sowohl die Dauer der Kohlenstoffsequestrierung als auch die im neuen Gleichgewicht gespeicherte Kohlenstoffmenge kann stark variieren. So erreichen Agroforstsysteme zur Biomasseproduktion nach etwa 20 Jahren bereits ihre maximale Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse. In Wertholzsystemen ist eine Kohlenstoffsequestrierung bis zu 100 Jahre lang möglich. Durch verringerte (Nahrungsmittel-)Produktion kann es zur Verlagerung von Treibhausgasemissionen kommen. Insgesamt sind Agroforstsysteme aus Klimaschutzsicht insbesondere wegen der zu erwartenden Langfristigkeit der Systeme positiv zu bewerten.

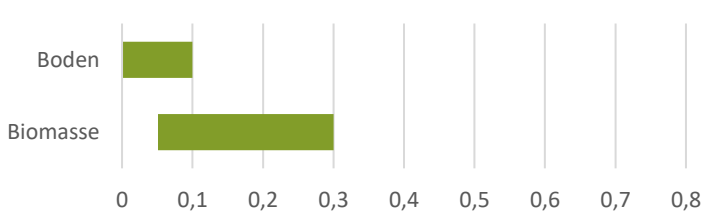
Tabelle 13: Maßnahmensteckbrief Agroforstsysteme zur Biomasseerzeugung

<p>Bewirtschaftungsanforderungen</p>	<ul style="list-style-type: none"> • Neuanlage eines Agroforstsystems. • Vorrangiges Ziel: Rohstoffgewinnung oder Nahrungsmittelproduktion. • Durch zuständige Landesbehörde oder durch eine vom Land anerkannte Institution positiv geprüfetes Nutzungskonzept für die Gehölzpflanzen. • Gehölzarten werden nicht in der Negativliste in Anlage 1 der GAPDZV aufgeführt. • Anforderungen an Gehölzflächen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mindestens zwei Streifen, die höchstens 40 % der jeweiligen Ackerfläche einnehmen oder ○ Mindestens 50 und höchstens 200 Gehölzpflanzen je Hektar über die Ackerfläche verstreut. <p>Hintergrund für die Anforderungen: § 4 GAPDZV – diese Vorgaben müssen eingehalten werden, damit eine Fläche den Status „Agroforstsystem“ erhalten kann und die Betriebe langfristig mögliche Fördermittel in Anspruch nehmen können.</p>						
<p>C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)</p>	 <table border="1"> <thead> <tr> <th>Kategorie</th> <th>C-Sequestrierung (t C ha⁻¹ a⁻¹)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Boden</td> <td>~0.5</td> </tr> <tr> <td>Biomasse</td> <td>~3.5</td> </tr> </tbody> </table>	Kategorie	C-Sequestrierung (t C ha ⁻¹ a ⁻¹)	Boden	~0.5	Biomasse	~3.5
Kategorie	C-Sequestrierung (t C ha ⁻¹ a ⁻¹)						
Boden	~0.5						
Biomasse	~3.5						

Mayer et al., 2022; Walter et al., 2015; Wiesmeier et al., 2020a; Wiesmeier et al., 2017

Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine durch geringe/keine N-Düngung auf den Gehölzflächen	Kern und Don, 2018
	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Mittel bis hoch	Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021
Sonstige Umweltwirkungen	Höhere Biodiversität als Ackernutzung, Erosionsschutz, Eutrophierungsschutz, Biotopvernetzung, Struktur in ausgeräumten Landschaften, geringere N-Verluste, erhöhter Wasserbedarf.		Dauber et al., 2018; Vanbeveren und Ceulemans, 2019; Wahren et al., 2015
Ackerbauliche Wirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • im Randbereich zu Gehölzen Wasser- und Lichtkonkurrenz möglich. • im Abstand von etwa fünf bis 30 m erhöhte Erträge möglich. <p>→ Landwirte befürchten Ertragsrückgänge der landwirtschaftlichen Nutzung, während wissenschaftliche Untersuchungen eher positive Wirkungen feststellen konnten.</p>		Weber et al., 2021; Winterling et al., 2019; Swieter et al., 2019; Tsonkova et al., 2018
Geeignete Standorte	Wasserverfügbarkeit ist wichtiger als Bodenzahl für die Ertragsbildung der Gehölzpflanzen, Flächen mit Stauwassereinfluss ungünstig, drainierte Flächen nicht geeignet.		Landgraf et al., 2018
Anmerkungen	<p>Rechtliche Absicherung des Status als landwirtschaftliche Nutzfläche über die GAP.</p> <p>Um langfristig Zugang zu möglichen Fördergeldern zu gewährleisten, wird weiterhin dringend empfohlen, die Anforderungen der Ökoregelung 3 – Beibehaltung von Agroforstsystemen – zu erfüllen (Anlage 5 der GAPDZV):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flächenanteil der Gehölzstreifen zwischen 2 und 35 % der Ackerfläche. • Gehölzstreifen müssen weitestgehend durchgängig mit Gehölzen bestockt sein. • Es gibt mindestens 2 Gehölzstreifen. • Breite der Gehölzstreifen: 3 – 25 m. • Max. Abstand zwischen zwei Gehölzstreifen sowie zwischen einem Gehölzstreifen und dem Rand: 100 m. • Min. Abstand zwischen zwei Gehölzstreifen bzw. einem Gehölzstreifen zum Rand: 20 m. In Gewässernähe sind geringere Abstände möglich. • Holzernte nur in den Monaten Dezember, Januar und Februar erlaubt. 		GAPDZV

Tabelle 14: Maßnahmensteckbrief Agroforstsysteme zur Wertholzerzeugung

Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Neuanlage eines Agroforstsystems. • Vorrangiges Ziel: Rohstoffgewinnung oder Nahrungsmittelproduktion. • Durch zuständige Landesbehörde oder durch eine vom Land anerkannte Institution positiv geprüfetes Nutzungskonzept für die Gehölzpflanzen. • Gehölzarten werden nicht in der Negativliste in Anlage 1 der GAPDZV aufgeführt. • Anforderungen an Gehölzflächen: <ul style="list-style-type: none"> ○ Mindestens zwei Streifen, die höchstens 40 % der jeweiligen Ackerfläche einnehmen oder ○ Mindestens 50 und höchstens 200 Gehölzpflanzen je Hektar über die Ackerfläche verstreut. 						
	<p>Hintergrund für die Anforderungen: § 4 GAPDZV – diese Vorgaben müssen eingehalten werden, damit eine Fläche den Status „Agroforstsystem“ erhalten kann und die Betriebe langfristig mögliche Fördermittel in Anspruch nehmen können.</p>						
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	 <p>Wiesmeier et al., 2020a; Wiesmeier et al., 2017</p>						
	<p>Annahme: 50 Bäume je ha, Sequestrierung auf gesamte AF bezogen</p>						
Weitere Klimawirkungen	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="446 1355 798 1400"><i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i></td> <td data-bbox="925 1355 1125 1500">Keine durch geringe/keine N-Düngung auf den Gehölzflächen.</td> <td data-bbox="1212 1355 1428 1422">Kern und Don, 2018</td> </tr> <tr> <td data-bbox="446 1523 670 1568"><i>Verlagerungsgefahr</i></td> <td data-bbox="925 1523 1005 1568">Mittel.</td> <td data-bbox="1212 1523 1428 1635">Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021</td> </tr> </table>	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine durch geringe/keine N-Düngung auf den Gehölzflächen.	Kern und Don, 2018	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Mittel.	Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021
<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine durch geringe/keine N-Düngung auf den Gehölzflächen.	Kern und Don, 2018					
<i>Verlagerungsgefahr</i>	Mittel.	Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021					
Sonstige Umweltwirkungen	<table border="0"> <tr> <td data-bbox="446 1668 1197 1780">Höhere Biodiversität als bei Ackernutzung, Erosionsschutz, Eutrophierungsschutz, Struktur in ausgeräumten Landschaften, erhöhter Wasserbedarf.</td> <td data-bbox="1212 1668 1428 1848">Dauber et al., 2018; Vanbeveren und Ceulemans, 2019; Wahren et al., 2015</td> </tr> </table>	Höhere Biodiversität als bei Ackernutzung, Erosionsschutz, Eutrophierungsschutz, Struktur in ausgeräumten Landschaften, erhöhter Wasserbedarf.	Dauber et al., 2018; Vanbeveren und Ceulemans, 2019; Wahren et al., 2015				
Höhere Biodiversität als bei Ackernutzung, Erosionsschutz, Eutrophierungsschutz, Struktur in ausgeräumten Landschaften, erhöhter Wasserbedarf.	Dauber et al., 2018; Vanbeveren und Ceulemans, 2019; Wahren et al., 2015						
Ackerbauliche Wirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • im Randbereich zu Gehölzen Wasser- und Lichtkonkurrenz möglich. • im Abstand von etwa fünf bis 30 m erhöhte Erträge möglich. <p>Weber et al., 2021; Winterling et al., 2019; Swieter et al., 2019;</p>						

		Tsonkova et al., 2018
Geeignete Standorte	Wasserverfügbarkeit ist wichtiger als Bodenzahl für die Ertragsbildung der Gehölzpflanzen, Flächen mit Stauwassereinfluss ungünstig, drainierte Flächen nicht geeignet.	Landgraf et al., 2018
Anmerkungen	<p>Rechtliche Absicherung des Status als landwirtschaftliche Nutzfläche über die GAP.</p> <p>Um langfristig Zugang zu möglichen Fördergeldern zu gewährleisten, wird weiterhin dringend empfohlen, die Anforderungen der Ökoregelung 3 – Beibehaltung von Agroforstsystemen – zu erfüllen (Anlage 5 der GAPDZV):</p> <ul style="list-style-type: none"> • Flächenanteil der Gehölzstreifen zwischen 2 und 35 % der Ackerfläche. • Gehölzstreifen müssen weitestgehend durchgängig mit Gehölzen bestockt sein. • Es gibt mindestens 2 Gehölzstreifen. • Breite der Gehölzstreifen: 3 – 25 m. • Max. Abstand zwischen zwei Gehölzstreifen sowie zwischen einem Gehölzstreifen und dem Rand: 100 m. • Min. Abstand zwischen zwei Gehölzstreifen bzw. einem Gehölzstreifen zum Rand: 20 m. In Gewässernähe sind geringere Abstände möglich. • Holzernte nur in den Monaten Dezember, Januar und Februar erlaubt. 	GAPDZV

Kompensationszahlungen für Agroforstsysteme

- Die Kompensationsbeträge stellen die Gesamtkompensation je Hektar Gehölzfläche dar. Die Zahlung kann über die Projektlaufzeit verteilt werden.
- Es gibt keine Unterscheidung zwischen konventioneller und ökologischer Bewirtschaftung.
- Es wird nicht zwischen verschiedenen Nutzungskonzepten hinsichtlich der Kompensation unterschieden.

Tabelle 15: Kompensationshöhen für Agroforstsysteme

Humusregion	Kompensation
(1) Sandböden Ost	11.600 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	15.300 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	16.100 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	14.600 €/ha
(5) Löss Ost	13.700 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	13.900 €/ha
(7) West	14.900 €/ha
(8) Gäue Mitte	14.500 €/ha
(9) Gäue Süd	18.600 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	13.700 €/ha

Quelle: Eigene Kalkulationen.

Exemplarische Kalkulation der Kompensationshöhe einer Maßnahmenfläche mit mehrjährigen Energiepflanzen zur Verwertung in einer Biogasanlage

Als Beispiel dient ein ökologisch wirtschaftender Betrieb in der Region Gäue Mitte:

- (1) Der Betrieb möchte im Winter 2023/2024 auf 5 ha ein Agroforstsystem anlegen.
- (2) Die Gehölzfläche umfasst 20 % der Ackerfläche.
- (3) Hektarbeträge aus den Tabellen entnehmen:
Agroforstsystem Gäue Mitte: 14.500 €/ha Gehölzfläche.
- (4) Kompensationsbetrag für die gesamte Maßnahmenfläche berechnen: $5 \text{ ha} * 20\% * 14.500 \text{ €/ha} = 14.500 \text{ €}$.

4.6 Kurzumtriebsplantagen

Kurzumtriebsplantagen sind ganzflächig mit Gehölzen bewachsen, weshalb die positiven ökologischen Wirkungen geringer als bei anderen Agroforstsystemen ausfallen. Hintergrund hierfür ist vor allem der kleinere Saum-/Übergangsflächenanteil von größeren Flächen (Baum et al., 2009; Hennemann-Kreikenbohm et al., 2015). Sie bewirken einer Meta-Analyse von Walter et al. (2015) zufolge im Mittel über die Standorte keinen Humusaufbau auf Ackerflächen. Auf einzelnen Standorten kann jedoch Humus aufgebaut werden. Die rechtlichen Rahmenbedingungen erlauben eine maximale Umtriebszeit (Nutzungsfrequenz der oberirdischen Biomasse / „auf den Stock-Setzen“) von 20 Jahren, sodass eine Wertholzproduktion in der Regel nicht möglich ist und eine C-Sequestrierung ebenfalls nur über diesen Zeitraum stattfindet. Die kurzen Erntezyklen führen nach 20 – 30 Jahren zu Ertragsrückgängen, sodass Kurzumtriebsplantagen oftmals entweder wieder zu Ackerland umgebrochen oder neu angelegt werden. Im Falle der Rückwandlung in Ackerland kann der Klimateffekt der C-Sequestrierung nur durch eine Neuanlage an anderer Stelle erhalten werden. Für möglichst langfristige Kurzumtriebsplantagen können sich z. B. kleine und schlecht zu bewirtschaftende Ackerschläge oder auch Randflächen (insbesondere mit Keilen) von Agroforstsystemen besonders eignen.

Tabelle 16: Maßnahmensteckbrief Kurzumtriebsplantagen

Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Neuanlage einer Kurzumtriebsplantage. • Anpflanzung von in Anlage 2 der GAPDZV genannten Gehölzarten. • Maximaler Erntezyklus 20 Jahre. • Ausreichende Gehölzdichte auf der Fläche erforderlich. <p>Hintergrund der Bewirtschaftungsvorgaben: § 6 GAPDZV und Anlage 2 der GAPDZV. Die Anforderungen müssen eingehalten werden, damit eine Fläche als Dauerkultur „Niederwald im Kurzumtrieb“ im Agrarantrag gemeldet werden kann.</p>						
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	Kein genereller Trend zum Humusaufbau erkennbar, Walter et al., 2015 Kohlenstoffspeicherung in der Biomasse ähnlich zu Hecken und Agroforstsystemen zur Biomasseerzeugung.						
Weitere Klimawirkungen	<table border="1"> <tr> <td data-bbox="448 869 799 902"><i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i></td> <td data-bbox="943 869 1193 936">keine, da kaum/ keine N-Düngung</td> <td data-bbox="1209 869 1430 902">Kern und Don, 2018</td> </tr> <tr> <td data-bbox="448 965 667 999"><i>Verlagerungsgefahr</i></td> <td data-bbox="943 965 1007 999">Hoch</td> <td data-bbox="1209 965 1430 1070">Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021</td> </tr> </table>	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	keine, da kaum/ keine N-Düngung	Kern und Don, 2018	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Hoch	Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021
<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	keine, da kaum/ keine N-Düngung	Kern und Don, 2018					
<i>Verlagerungsgefahr</i>	Hoch	Flessa et al., 2012; Tiefenbacher et al., 2021					
Sonstige Umweltwirkungen	<p>Höhere Biodiversität als Ackernutzung, (aber: positive Effekte von flächigen Gehölzen aus wenigen Arten sind im Vergleich zu anderen Agroforstsystemen relativ gering), Erosionsschutz, Eutrophierungsschutz, Struktur in ausgeräumten Landschaften, geringere N-Verluste, erhöhter Wasserbedarf.</p> <p>Dauber et al., 2018; Vanbeveren und Ceulemans, 2019; Wahren et al., 2015</p>						
Ackerbauliche Wirkungen	Extensives Bewirtschaftungssystem.						
Geeignete Standorte	Wasserverfügbarkeit ist wichtiger als Bodenzahl für die Ertragsbildung, Flächen mit Stauwassereinfluss sind ungünstig, drainierte Flächen nicht geeignet. Landgraf et al., 2018						
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Rechtliche Absicherung des Status als landwirtschaftliche Nutzfläche über die GAP. GAPDZV • Biomasseerträge gehen nach 20-30 Jahren zurück. Das führt oftmals zu einer Rückwandlung in Ackerland und somit zur Freisetzung des gespeicherten Kohlenstoffs. 						

Kompensationszahlungen

- Die Kompensationsbeträge stellen die Gesamtkompensation je Hektar Kurzumtriebsplantage dar. Die Zahlung kann über die Laufzeit verteilt werden.
- Es gibt keine Unterscheidung zwischen konventioneller und ökologischer Bewirtschaftung.

Tabelle 17: Kompensationshöhen für Kurzumtriebsplantagen

Humusregion	Kompensation
(1) Sandböden Ost	8.900 €/ha
(2) Lehm Böden Ostsee	12.800 €/ha
(3) Sandböden Geest/Marsch	13.700 €/ha
(4) Löss und Lehm Mitte	12.200 €/ha
(5) Löss Ost	11.200 €/ha
(6) Mittelgebirge Mitte/Bayern	11.400 €/ha
(7) West	12.400 €/ha
(8) Gäue Mitte	12.000 €/ha
(9) Gäue Süd	16.200 €/ha
(10) Voralpen und Hochlagen	11.200 €/ha

Quelle: Eigene Kalkulationen.

4.7 Hecken

Die Neuanlage von Hecken ist eine sehr wirksame Klimaschutzmaßnahme, die darüber hinaus positive Umweltwirkungen wie eine verringerte Erosion und positive Biodiversitätswirkungen mit sich bringen kann. Die hohe Klimawirksamkeit ergibt sich, weil Hecken ihren Status als landwirtschaftliche Nutzfläche verlieren, zu dauerhaften Landschaftselementen werden und nicht wieder entfernt werden dürfen. Außerdem wird auf vergleichsweise wenig Raum viel Kohlenstoff gespeichert. Allerdings ist die Zeitspanne der zusätzlichen Kohlenstoffspeicherung nach 20 Jahren nahezu abgeschlossen, weil danach keine zusätzliche Biomasse mehr gebildet wird. Aus landwirtschaftlicher Sicht besteht ein Nachteil darin, dass Kohlenstoff vor allem unter den Gehölzpflanzen und in deren Biomasse und im Humus darunter, nicht aber auf der ackerbaulich genutzten Fläche als Humus sequestriert wird und daher ackerbaulich nicht direkt von Nutzen ist. Vor diesem Hintergrund eignen sich für die Neuanlage von Hecken besonders beispielsweise ertragsschwache, winderosionsgefährdete Standorte oder Flächen, die hohe Synergien im Biodiversitätsschutz erwarten lassen.

Tabelle 18: Maßnahmensteckbrief Neuanlage einer Hecke

Bewirtschaftungsanforderungen	<ul style="list-style-type: none"> • Dauerhafte Anlage – wird Landschaftselement. • Standorttypische und einheimische Gehölzarten. • Eine regionstypische Anlage ist sicherzustellen. Daher ist während der Planung ein Austausch mit Expert:innen (z. B. aus der Naturschutzbehörde oder von Landschaftspflegeverbänden) notwendig. 						
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	 <p>Drexler et al., 2021; Mayer et al., 2022</p>						
Weitere Klimawirkungen	<table border="1"> <tr> <td><i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i></td> <td>keine, eher weniger, da keine N-Düngung</td> <td>Gross et al., 2022</td> </tr> <tr> <td><i>Verlagerungsgefahr</i></td> <td>Mittel bis hoch</td> <td></td> </tr> </table>	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	keine, eher weniger, da keine N-Düngung	Gross et al., 2022	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Mittel bis hoch	
<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	keine, eher weniger, da keine N-Düngung	Gross et al., 2022					
<i>Verlagerungsgefahr</i>	Mittel bis hoch						
Sonstige Umweltwirkungen	<p>Höhere Biodiversität und Lebensraumvernetzung, Erosions-/ Windschutz, geringere N-Verluste</p> <p>Dauber et al., 2018; DVL, 2018; Poschlod und Braun-Reichert, 2017; Schwabe et al., 2000; Tschardt et al., 2021</p>						
Ackerbauliche Wirkungen	<p>Beschattung/schlechteres Abtrocknen (Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Windschutz möglich) oder auch Wasserkonkurrenz möglich</p> <p>Schwabe et al., 2000</p>						
Geeignete Standorte	<p>Vorhandene Randstrukturen und Ackerränder, regionstypische Standorte</p> <p>DVL, 2006; Schwabe et al., 2000</p>						
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Hecken prägen das regionale Landschaftsbild und sollten sich dort entsprechend gut einfügen. • Fläche verliert Ackerstatus, bisher geringe Akzeptanz in der Praxis. • Empfehlung: Nicht direkt parallel zu Straßen, Gewässern, Wohngebieten, Schienenwegen und Waldrändern anlegen, da hier die Gefahr besteht, dass Biodiversitätswirkungen verringert werden. • Empfehlung: mindestens dreireihig bei 6-15 m Breite und ausreichend Krautsaum mit etwa 1,5 m Breite (regionstypische Abweichungen möglich). <p>DVL, 2006; ML Niedersachsen, 2022</p>						

Kompensationszahlungen

- Vergütung der Anlage- und Flächenkosten mit den in Tabelle 19 aufgeführten Pauschalen. Es wird nicht zwischen ökologisch und konventionell unterschieden.
- Die Opportunitätskosten der Fläche sind mit einem Abschlag zum mittleren Regions-Deckungsbeitrag von 25% berücksichtigt. Die ewige Rente wurde mit einem Kalkulationszinsfuß von 4 % berechnet.
- Die Auszahlung des Kompensationsbetrags kann bei Bedarf über mehrere Jahre verteilt werden.
- Die in Tabelle 19 für die Kompensation ausgewiesenen Flächen beinhalten einen in der Regel zur Hecke gehörenden Krautsaum.

Tabelle 19: Kompensationshöhen für die Neuanlage von Hecken

Humusregion	Kompensation
(11) Sandböden Ost	9,8 €/m ²
(12) Lehm Böden Ostsee	10,4 €/m ²
(13) Sandböden Geest/Marsch	10,5 €/m ²
(14) Löss und Lehm Mitte	10,5 €/m ²
(15) Löss Ost	10,4 €/m ²
(16) Mittelgebirge Mitte/Bayern	10,2 €/m ²
(17) West	10,5 €/m ²
(18) Gäue Mitte	10,3 €/m ²
(19) Gäue Süd	10,8 €/m ²
(20) Voralpen und Hochlagen	10,4 €/m ²

Quelle: Eigene Kalkulationen auf Basis von Speer (2023).

5 Weitere Maßnahmen, die erprobt werden können

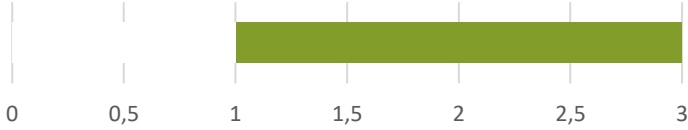
Wie in Abschnitt 2.2 beschrieben, können Maßnahmen, zu denen bisher keine gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Klimawirksamkeit vorliegen, auf Demoflächen erprobt werden. Nachfolgend werden exemplarisch derartige Maßnahmen beschrieben.

5.1 Tiefpflügen von Sandböden

Wie der Name verrät, handelt es sich um eine einmalige tief wendende Bodenbearbeitung (mindestens 60 cm), durch die der Humus aus dem Oberboden in tiefere Bodenschichten verlagert wird. Aus Klimaschutzsicht liegt der Vorteil darin, dass der in tiefere Bodenschichten verlagerte Humus langsamer abgebaut wird und im Oberboden neuer Humus aufgebaut wird (Schneider et al., 2017). Die Maßnahme ist nicht umkehrbar. Ein erneutes Tiefpflügen würde den Boden nicht in den Ausgangszustand zurückversetzen. Aufgrund unsicherer kurzfristiger Ertragseffekte wird empfohlen zunächst nur kleine Parzellen tiefzupflügen.

Um die Effekte des Tiefpflügens auf den Ackerbau zu analysieren, sollen diese mit Vergleichsflächen gekoppelt werden. Als Vergleichsflächen gelten Ackerflächen, die nicht tiefgepflügt werden, aber darüber hinaus identisch bewirtschaftet werden.

Tabelle 20: Maßnahmensteckbrief Tiefpflügen von Sandböden

Bewirtschaftungsanforderungen/-empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> Tiefpflügen: mindestens 60 cm – einmalige meliorative Maßnahme 	
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	 <p>Eigene Kalkulation auf Basis von Alcántara et al., 2016</p> <p>Die zitierte Studie bezieht sich auf 45 Jahre und deren Ergebnisse wurden mit einigen Annahmen auf 20 Jahre umgerechnet.</p>	
Weitere Klimawirkungen	<p><i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i> Nicht zu erwarten.</p> <p><i>Verlagerungsgefahr</i> Gering.</p>	
Sonstige Umweltwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> Humusgehalt im Oberboden für lange Zeit (> 45 Jahre) verringert gegenüber vergleichbaren Böden, bis neues Humusgleichgewicht erreicht ist Vergrößerung des Wurzelraums Erhöhte N-Austräge direkt nach Tiefumbruch möglich (aus dem neuen Unterboden) 	Alcántara et al., 2016
Ackerbauliche Wirkungen	<ul style="list-style-type: none"> Ertragseinbußen durch geringeren Humusgehalt im neuen Oberboden in den ersten Jahren möglich (v.a. in schluffigen Böden), langfristig keine Ertragsunterschiede oder leichte Ertragsgewinne Tiefpflügen sinnvoll/erfolgversprechend, wenn dadurch ein wurzel-undurchlässiger Horizont durchbrochen wird 	Alcántara et al., 2016; Schneider et al., 2017
Geeignete Standorte	<ul style="list-style-type: none"> Wirkung auf Sandböden größer, langsamerer Abbau des vergrabenen Humus Auf schluffigen und lehmigen Böden wird Bodenstruktur zerstört mit negativen Ertragseffekten 	Alcántara et al., 2016; Schneider et al., 2017
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> Teure Maßnahme mit hohen Kosten und unsicheren Nebenwirkungen. Maßnahme nicht reversibel und daher von großer Dauerhaftigkeit. 	

Kompensationszahlungen

- Individuell nach Angeboten von Dienstleistern, abhängig von den Ertragsrückgängen und dem Mehraufwand für Grunddüngung.

5.2 Pflanzenkohle

Pflanzenkohle besteht zu großen Teilen aus Kohlenstoff, der im Boden i.d.R. über Jahrhunderte gespeichert werden kann. Darüber hinaus kann durch die Herstellung von Pflanzenkohle weiterer Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden werden (Blanco-Canqui et al., 2020). Der Einsatz von Pflanzenkohle auf landwirtschaftlichen Flächen ist bisher wenig praxis-erprobt. Außerdem gibt es nur wenige Langzeit-Feldversuche, deren Ergebnisse oftmals keine positiven Ertragseffekte zeigen (Helfrich, 2023). Daher sind noch viele Fragen zu Applikationsmethoden und -mengen unbeantwortet. Eine großskalierte Ausbringung von Pflanzenkohle in landwirtschaftliche Böden ist nur sinnvoll, wenn die (ackerbaulichen) Vorteile durch die Verbesserung der bodenphysikalischen Eigenschaften die Kosten überwiegen. Die Kosten für die Beschaffung und Ausbringung können jedoch schnell sehr hoch ausfallen und 10.000 €/ha übersteigen. Durch die hohen Kosten, das große Potenzial und die vielen ungeklärten Fragen eignet sich diese Maßnahme sehr gut für Demoflächen.

Tabelle 21: Maßnahmensteckbrief Pflanzenkohle

Bewirtschaftungsanforderungen/-empfehlungen	<ul style="list-style-type: none"> • In Deutschland nur auf schlechten Böden (Grenzertragsstandorte/Sandige, saure- oder Minuten-Böden) wirkungsvoll bzgl. C-Sequestrierung durch Humusaufbau. • Vrstl. hohe Ausbringungsmengen nötig (30-100 t/ha); auf schlechten Böden mind. 10t/ha. • Zertifizierte PK wird ausdrücklich empfohlen. • Ausbringung mit Träger-/Nährstoffsubstanz empfohlen. 	Amthauer Galardo, 2022; Helfrich, 2023	
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	Die Höhe der potenziellen C-Sequestrierung durch Prozesse im Boden nach der Ausbringung von PK (zusätzlich zum direkt eingebrachten C aus der PK), ist wissenschaftlich noch nicht konkret abschätzbar. Eine Verdopplung des in der PK enthaltenen C wurde bereits beobachtet. Blanco-Canqui et al., 2020		
Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Keine	Borchard et al., 2019; Zhang et al., 2020
	<i>Zeitspanne der Sequestrierung (Jahre)</i>	> 100 Jahre möglich	Kuzyakov et al., 2014; Wang et al., 2016
	<i>Verlagerungsgefahr</i>	Gering	
	<i>Dauerhaftigkeit der Sequestrierung</i>	> 100 Jahre	Kuzyakov et al., 2014; Schmidt et al., 2021b
	<i>Zusätzlichkeit</i>	Kein Problem	

Sonstige Umweltwirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit besonders in armen Sandböden möglich (z.B. Wasserhaltevermögen, pH-Wert). • Adsorption von Schwermetallen im Boden. • Pestizidakkumulation (→ ggf. höhere Aufwandmengen erforderlich, jedoch ggf. auch Schutz der Grund- und Oberflächenwasser und Bodenfauna; Risiko durch Akkumulation von Metaboliten derzeit nicht sicher ausschließbar). • Verminderung von Nährstoffauswaschungen. • Derzeit unklar, wann/wie/in welchen Mengen die in PK akkumulierten PSM, Schwermetalle und Nährstoffe während des Abbaus der PK (vrstl. nach 100en Jahren) wieder freigesetzt werden. 	<p>Nitsch, 2023; Helfrich, 2023; Schmidt et al., 2021b; Graber und Kookana, 2015; Jones et al., 2011</p>
Ackerbauliche Wirkungen	<ul style="list-style-type: none"> • s.o. + vermehrtes Wurzelwachstum → Ertragssteigerungen möglich. • Verlängerung der Nährstoffverfügbarkeit im Boden. • Ggf. Nährstoffimmobilisierung. 	<p>Nitsch, 2023; Schmidt et al., 2021b; Schmidt et al., 2021a; Ye et al., 2020</p>
Geeignete Standorte	Sandige, schluffige Böden	<p>Amthauer Galardo, 2022; Helfrich, 2023</p>
Anmerkungen	<ul style="list-style-type: none"> • Ausbringtechnik in der Landwirtschaft kaum erprobt. Da PK sehr leicht ist, muss sie i.d.R. über eine Trägersubstanz ausgebracht werden (z.B. Gülle, Festmist, Kompost). • Langsame Nährstoffabgabe im Boden. • Verfügbarkeit von PK am Markt teilweise schwierig, Kosten sehr hoch • Zertifizierte PK verwenden, um die Kontamination des Bodens mit organischen Schadstoffen aus der PK zu verhindern. 	<p>Nitsch, 2023</p>

Kompensationszahlungen:

- Haupteinflussfaktoren für Kompensationshöhe:
 - Menge der ausgebrachten PK.
 - Kosten für die Ausbringung.
- Spanne Gesamtkosten: 500 €/ha bis 10.000 €/ha.
- Bei hoher Ausbringungsmenge 30.000 – 40.000 €/ha.

5.3 Reduzierte Bodenbearbeitung

Die reduzierte Bodenbearbeitung und auch Direktsaat wird in der landwirtschaftlichen Praxis bereits in vielen unterschiedlichen Formen umgesetzt und bringt viele Vorteile wie geringeren Arbeitsaufwand, geringere Wasserverluste und geringere Erosion oder ein stabileres Bodengefüge mit sich. Eine positive Humuswirkung lässt sich jedoch nicht voraussagen und wird auf vielen Standorten im gemäßigten Klima nicht erreicht. Ursache ist, dass

Humus durch reduzierte Bodenbearbeitung vertikal umverteilt wird. In den oberen 10-15 cm steigt der Humusgehalt, während er in der Tiefe zwischen 15 und 30 cm gegenüber konventioneller Bodenbearbeitung geringer ausfällt (Camarotto et al., 2020; Hermle et al., 2008; Luo et al., 2010).

Dennoch können sich aufgrund positiver Ertragseffekte der reduzierten Bodenbearbeitung indirekt positive Klima- und Humuswirkungen ergeben.

Tabelle 22: Maßnahmensteckbrief reduzierte Bodenbearbeitung

Maßnahmenanforderungen/-empfehlungen	Ergeben sich aus der Fragestellung	
C-Sequestrierung in den ersten 20 Jahren (t C ha⁻¹ a⁻¹)	Im Mittel über das gesamte Bodenprofil kein Humusaufbau, nur vertikale Umverteilung des organischen Kohlenstoffs	Hermle et al., 2008; Luo et al., 2010; Camarotto et al., 2020; Meurer et al., 2018
Weitere Klimawirkungen	<i>Zusätzliche Lachgasemissionen</i>	Möglich – insbesondere bei ausreichender N-Verfügbarkeit unter sauerstoffarmen (nassen) Böden Don, 2019; van Kessel et al., 2013; Abdalla et al., 2013; Flessa et al., 2012
	<i>Verlagerungsgefahr</i>	gering
Sonstige Umweltwirkungen	Stabiles Bodengefüge, Förderung Bodenleben, Erhöhung Infiltrationskapazität, reduzierte Bodenerosion	Duttmann et al., 2015; Flessa et al., 2012
Ackerbauliche Wirkungen	Erhöhung Tragfähigkeit des Bodens, ggf. negative phytosanitäre Wirkungen, geringerer Energie- und Arbeitszeitbedarf, ggf. Einsatz von Totalherbiziden notwendig	Duttmann et al., 2015; Buchner et al., 2010
Geeignete Standorte	Nahezu alle, tlw. ist mit Ertragseinbußen zu rechnen	Flessa et al., 2012
Anmerkungen		

Kompensationszahlungen

- Kompensationsbedarf hängt von eingesetzter Technik und schwer abschätzbaren Ertragseffekten ab. Oftmals gibt es keinen Kompensationsbedarf, weil reduzierte Bodenbearbeitung günstiger als pflügen ist und es keine negativen Ertragseffekte gibt. Außerdem ist reduzierte Bodenbearbeitung in der Praxis weit verbreitet und kann als Standardverfahren angesehen werden.
- In besonderen Einzelfällen (z. B. bei unerwartet hohen Ertragswirkungen) kann eine individuelle Kompensation erfolgen.

6 Fazit

Humusaufbau zum Klimaschutz gewinnt in der öffentlichen Debatte an Aufmerksamkeit. Viele Landwirt:innen wollen die Fruchtbarkeit ihrer Böden durch den Aufbau von Humus erhöhen und gleichzeitig Klimaschutz betreiben. Allerdings gibt es eine große Unsicherheit, welche Maßnahmen gut umsetzbar und wirklich klimawirksam sind. Daher werden in diesem Projektbericht vielversprechende Maßnahmen, ihre Wirkungen und weitere Nebeneffekte sowie eine Grundlage für die Berechnung von Kompensationszahlungen vorgestellt.

In den Steckbriefen zeigt sich, dass das jährliche Potenzial, zusätzlichen Kohlenstoff im Boden zu speichern, je nach Maßnahme zwischen 0 und 0,8 t Kohlenstoff pro Hektar und Jahr in den ersten 20 Jahren der Maßnahmenumsetzung liegt. Der realistische Bereich liegt für viele Maßnahmen zwischen 0,2 und 0,5 t Kohlenstoffsequestrierung pro Hektar und Jahr. Da ein 1 kg Bodenkohlenstoff 3,67 kg CO_{2eq} entspricht, können in einem Hektar Ackerboden jährlich potenziell zwischen 770 und gut 1.800 kg CO_{2eq} zusätzlich gespeichert werden. Das setzt aber voraus, dass der Bodenkohlenstoffvorrat sich in einem Gleichgewicht befindet und keinen abnehmenden Trend aufweist.

Für die Erprobung von Maßnahmen in der Praxis oder die Förderung von Maßnahmen in Projekten beinhaltet die Zusammenstellung zudem eine Grundlage für die Berechnung von Kompensationszahlungen. Diese Grundlage wurde für verschiedene Boden-Klima-Räume spezifiziert; es wurde aber keine betriebsindividuelle Herleitung angestrebt.

Der Kompensationsbedarf variiert zwischen den Maßnahmen sehr stark. Es gibt Maßnahmen wie den zusätzlichen Anbau von Körnermais, für die in einigen Regionen keine Entschädigungszahlungen nötig sind. Auf der anderen Seite gibt es Maßnahmen, die einen jährlichen Kompensationsbedarf von über 2.000 €/ha haben können. Einige sehr extensive Maßnahmen bergen eine vergleichsweise große Gefahr der Produktionsverlagerung wie beispielsweise die Klee grasbrache oder die Reduktion des Kartoffelanbaus.

Der Bericht diskutiert die verschiedenen Anforderungen für klimawirksame Maßnahmen (u. a. dauerhafte Umsetzung, zusätzliche Kohlenstoffeinbindung) und verweist auf weitere mögliche Probleme bei der Umsetzung von Maßnahmen, wie ein Auftreten von Verlagerungseffekten (z.B. bei der Ausbringung von organischen Düngern) oder Verursachung von anderen Emissionen (z.B. zusätzliche Lachgas-Emissionen). Zu vielen weiteren denkbaren Maßnahmen existieren keine gesicherten wissenschaftlichen Erkenntnisse zur Klimawirksamkeit. Hier wird empfohlen, die Maßnahmen zunächst hinsichtlich ihrer pflanzenbaulichen Effekte und Klimawirksamkeit im Vergleich zu Referenzflächen zu untersuchen.

Literaturverzeichnis

- Abdalla M, Hastings A, Cheng K, Yue Q, Chadwick D, Espenberg M, Truu J, Rees RM, Smith P (2019) A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Glob Chang Biol* 25(8):2530-2543. doi: 10.1111/gcb.14644
- Abdalla M, Osborne B, Lanigan G, Forristal D, Williams M, Smith P, Jones MB (2013) Conservation tillage systems: a review of its consequences for greenhouse gas emissions. *Soil Use & Management* 29(2):199-209. doi: 10.1111/sum.12030
- Alcántara V, Don A, Well R, Nieder R (2016) Deep ploughing increases agricultural soil organic matter stocks. *Glob Chang Biol* 22(8):2939-2956. doi: 10.1111/gcb.13289, zu finden in <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/gcb.13289>> [zitiert am 19.9.2022]
- Allwood JM, Bosetti V, Dubash NK, Gómez-Echeverri L, Stechow C von (2014) Glossary, Acronyms and Chemical Symbols. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (ed) *Climate Change 2014: Mitigation of Climate Change. Working Group III Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. New York: Cambridge University Press: 1249-1279, zu finden in <https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/ipcc_wg3_ar5_annex-i.pdf> [zitiert am 2.6.2023]
- AMI [Agrarmarkt Informationsgesellschaft mbH] (ed) (2022a) Einkaufspreise des Handels, der Genossenschaften und der Verarbeiter für Ölsaaten vom Erzeuger. Bonn
- AMI [Agrarmarkt Informationsgesellschaft mbH] (ed) (2022b) Einkaufspreise des Handels, der Genossenschaften und der Verarbeiter für Inlandsgetreide vom Erzeuger. Bonn
- AMI [Agrarmarkt Informationsgesellschaft mbH] (2023) Ökomarkt: Preise Deutschland. Agrarmarkt Informationsgesellschaft mbH (AMI), zu finden in <<https://www.ami-informiert.de/ami-onlinedienste/serviceportal-bund-laender/oekolandbau/preise-aktuell/getreide-futtermittel>> [zitiert am 4.5.2023]
- Amthauer Galardo L (2022) Pflanzenkohle im Ackerbau. Telefonat vom 15.11.2022
- Basche A, DeLonge M (2017) The Impact of Continuous Living Cover on Soil Hydrologic Properties: A Meta-Analysis. *Soil Science Society of America Journal* 81(5):1179-1190. doi: 10.2136/sssaj2017.03.0077
- Baum S, Weih M, Busch G, Kroiher F, Bolte A (2009) The impact of Short Rotation Coppice plantations on phytodiversity. *Landbauforschung - Applied agricultural and forestry research* 59(3):163-170, zu finden in <https://www.openagrar.de/receive/timport_mods_00032460> [zitiert am 26.5.2023]
- Blanco-Canqui H, Laird DA, Heaton EA, Rathke S, Acharya BS (2020) Soil carbon increased by twice the amount of biochar carbon applied after 6 years: Field evidence of negative priming. *GCB Bioenergy* 12(4):240-251. doi: 10.1111/gcbb.12665
- Blanco-Canqui H, Shaver TM, Lindquist JL, Shapiro CA, Elmore RW, Francis CA, Hergert GW (2015) Cover Crops and Ecosystem Services: Insights from Studies in Temperate Soils. *Agronomy Journal* 107(6):2449-2474. doi: 10.2134/agronj15.0086
- BMEL [Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft] (ed) (2022) *Statistisches Jahrbuch über Ernährung, Landwirtschaft und Forsten der Bundesrepublik Deutschland: 2021*. Berlin, Bonn, zu finden in <https://www.bmel-statistik.de/fileadmin/SITE_MASTER/content/Jahrbuch/Agrarstatistisches-Jahrbuch-2021.pdf> [zitiert am 27.9.2022]
- Böhm H, Dauber J, Dehler M, Amthauer Gallardo DA, Witte T de, Fuß R, Höppner F, Langhof M, Rinke N, Rodemann B, Rühl G, Schittenhelm S (2020) Fruchtfolgen mit und ohne Leguminosen: ein Review. *Journal für*

- Kulturpflanzen 72(10-11):489-509. doi: 10.5073/JfK.2020.10-11.01, zu finden in
<<https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal/article/view/15557>> [zitiert am 17.5.2023]
- Bolinder MA, Crotty F, Elsen A, Frac M, Kismányoky T, Lipiec J, Tits M, Tóth Z, Kätterer T (2020) The effect of crop residues, cover crops, manures and nitrogen fertilization on soil organic carbon changes in agroecosystems: a synthesis of reviews. *Mitig Adapt Strateg Glob Change* 25(6):929-952. doi: 10.1007/s11027-020-09916-3
- Borchard N, Schirrmann M, Cayuela ML, Kammann C, Wrage-Mönnig N, Estavillo JM, Fuertes-Mendizábal T, Sigua G, Spokas K, Ippolito JA, Novak J (2019) Biochar, soil and land-use interactions that reduce nitrate leaching and N₂O emissions: A meta-analysis. *Sci Total Environ* 651(Pt 2):2354-2364. doi: 10.1016/J.SCITOTENV.2018.10.060
- Böttcher F, Schmidt M, Müller E, Schmidt A, Weiske T (2015) Grünes Licht für Zwischenfrüchte: Ergebnisse von Wasserhaushaltsuntersuchungen im Zwischenfruchtanbau. *Landwirtschaft ohne Pflug (LOP)*(6):34-39
- Buchner W, Demmel M, Fühbeker A, Grube J, Schneider M, Uppenkamp N (2010) Beratungsempfehlung Bodenbearbeitungssysteme, hg. v. Verband der Landwirtschaftskammern. Berlin, zu finden in
<<http://www.landwirtschaftskammern.de/pdf/bodenbearbeitungssysteme.pdf>> [zitiert am 28.2.2023]
- Caldeira K, Bala G, Cao L (2013) The Science of Geoengineering. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.* 41(1):231-256. doi: 10.1146/annurev-earth-042711-105548
- Camarotto C, Piccoli I, Dal Ferro N, Polese R, Chiarini F, Furlan L, Morari F (2020) Have we reached the turning point? Looking for evidence of SOC increase under conservation agriculture and cover crop practices. *Eur J Soil Sci* 71:1050-1063. doi: 10.1111/ejss.12953
- Ciais P, Sabine C, Bala G, Bopp L, Brovkin V, Canadell J, Chhabra A, DeFries R, Galloway J, Heimann M, Jones C, Le Quéré C, Myneni RB, Piao S, Thornton P (2013) Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: Intergovernmental Panel on Climate Change (ed) *Climate Change 2013: The Physical Science Basis: Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, New York: Cambridge University Press: pp 465-570, zu finden in
<https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/02/WG1AR5_Chapter06_FINAL.pdf> [zitiert am 1.3.2023]
- Dauber J, Baum S, Masur D, Sevke-Masur K, Glemnitz M (2018) Agrarholzanbau und Biodiversität. In: Veste M, Böhm C (eds) *Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft: Biologie - Ökologie - Management*. Lehrbuch, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer: pp 391-433
- Don A (2019) Klimaschutz durch Pflugverzicht? Berlin, zu finden in
<<https://www.bmel.de/DE/themen/landwirtschaft/pflanzenbau/bodenschutz/klimaschutz-durch-pflugverzicht.html>> [zitiert am 28.2.2023]
- Don A (2022) Humuswirkung verschiedener Zwischenfruchtarten. Textnachricht vom 09.12.2022
- Don A, Flessa H, Marx K, Poehlau C, Tiemeyer B, Osterburg B (2018) Die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherung und Klima" - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut, 42 p. Thünen Working Paper, zu finden in
<https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060523.pdf> [zitiert am 6.9.2022]
- Don A, Osborne B, Hastings A, Skiba U, Carter MS, Drewer J, Flessa H, Freibauer A, Hyvönen N, Jones MB, Lanigan GJ, Mander Ü, Monti A, Djomo SN, Valentine J, Walter K, Zegada-Lizarazu W, Zenone T (2012) Land-use change to bioenergy production in Europe: implications for the greenhouse gas balance and soil carbon. *GCB Bioenergy* 4(4):372-391. doi: 10.1111/j.1757-1707.2011.01116.x
- Drexler S, Gensior A, Don A (2021) Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Reg Environ Change* 21(3). doi: 10.1007/s10113-021-01798-8

- Duttman R, Kuhwald M, Brunotte J (2015) Ackerbauliche Maßnahmen zum Erhalt der Bodenstruktur - Bodenschutz und Bodenschonung: Schutzmaßnahmen gegen Bodenerosion. In: Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (ed) Gute fachliche Praxis - Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz, 2. Aufl. Bonn: aid infodienst Ernährung Landwirtschaft Verbraucherschutz: pp 101-102
- DVL [Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V.] (ed) (2006) Landschaftselemente in der Agrarstruktur: Entstehung, Neuanlage und Erhalt. Ansbach. DVL-Schriftenreihe "Landschaft als Lebensraum", zu finden in <https://www.dvl.org/uploads/tx_ttproducts/datasheet/DVL-Publikation-Schriftenreihe-9_Landschaftselemente_in_der_Agrarstruktur.pdf> [zitiert am 11.7.2022]
- DVL [Deutscher Verband für Landschaftspflege e.V.] (ed) (2018) Anlage und Aufwertung von Knicks und Gehölzen: Naturschutzberatung in Schleswig-Holstein - Maßnahmensteckbrief. Kiel, zu finden in <https://www.naturschutzberatung-sh.de/fileadmin/user_upload/Anlage_und_Aufwertung_Knicks_und_Geho__lze.pdf> [zitiert am 20.10.2022]
- EC [Europäische Kommission] (ed) (2022) Single-Impact Fiche - Cover and Catch Crops: Impact: Crop Yield. Brüssel, zu finden in <https://wikis.ec.europa.eu/display/IMAP/Cover+and+catch+crops_Impacts_Crop+yield?preview=/48760577/48760576/Cover%20crops_Impacts_CROP%20YIELD.pdf>
- Flessa H, Müller D, Plassmann K, Osterburg B, Techen A-K (2012) Studie zur Vorbereitung einer effizienten und gut abgestimmten Klimaschutzpolitik für den Agrarsektor, hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig. Landbauforschung Sonderheft, zu finden in <https://www.thuenen.de/media/publikationen/landbauforschung-sonderhefte/lbf_sh361.pdf> [zitiert am 9.9.2022]
- Fynn AJ, Alvarez P, Brown JR, George MR, Kustin C, Laca EA, Oldfield JT, Schohr T, Neely CL, Wong CP (2009) Soil carbon sequestration in U.S. rangelands: Issues paper vor protocol development, hg. v. Environmental Defense Fund. New York, zu finden in <<https://citeseerx.ist.psu.edu/document?repid=rep1&type=pdf&doi=ab737f1465f27aacf2caa8344d6b4351d3e9f808>> [zitiert am 1.3.2023]
- Gattinger A, Muller A, Haeni M, Skinner C, Fliessbach A, Buchmann N, Mäder P, Stolze M, Smith P, Scialabba NE-H, Niggli U (2012) Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. Proc Natl Acad Sci U S A 109(44):18226-18231. doi: 10.1073/pnas.1209429109
- Gauder M, Billen N, Zikeli S, Laub M, Graeff-Hönninger S, Claupein W (2016) Soil carbon stocks in different bioenergy cropping systems including subsoil. Soil and Tillage Research 155:308-317. doi: 10.1016/j.still.2015.09.005
- Gocht A, Röder N (2014) Using a Bayesian estimator to combine information from a cluster analysis and remote sensing data to estimate high-resolution data for agricultural production in Germany. International Journal of Geographical Information Science 28(9):1744-1764. doi: 10.1080/13658816.2014.897348
- Graber ER, Kookana RS (2015) Biochar and retention/efficacy of pesticides. In: Lehmann J, Joseph S (eds) Biochar for Environmental Management: Science, Technology and Implementation, 2. Aufl. London, New York: Routledge: pp 655-678
- Gross CD, Bork EW, Carlyle CN, Chang SX (2022) Agroforestry perennials reduce nitrous oxide emissions and their live and dead trees increase ecosystem carbon storage. Glob Chang Biol 28(20):5956-5972. doi: 10.1111/gcb.16322

- Han Z, Walter MT, Drinkwater LE (2017) N₂O emissions from grain cropping systems: a meta-analysis of the impacts of fertilizer-based and ecologically-based nutrient management strategies. *Nutr Cycl Agroecosyst* 107(3):335-355. doi: 10.1007/s10705-017-9836-z
- Harbo LS, Schulz G, Heinemann H, Dechow R, Poeplau C (2022) Flower strips as a carbon sequestration measure in temperate croplands. *Plant Soil*. doi: 10.1007/s11104-022-05718-5
- Hartmann J, West AJ, Renforth P, Köhler P, La Rocha CL de, Wolf-Gladrow DA, Dürr HH, Scheffran J (2013) Enhanced chemical weathering as a geoengineering strategy to reduce atmospheric carbon dioxide, supply nutrients, and mitigate ocean acidification. *Rev. Geophys.* 51(2):113-149. doi: 10.1002/rog.20004
- Heise J (2021) Wirtschaftlichkeit der Umstellung auf Ökolandbau für Ackerbaubetriebe an Hohertragsstandorten, Naturwissenschaftliche Fakultät III - Institut für Agrar- und Ernährungswirtschaften, Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Masterarbeit
- Helfrich M (2023) Wirkungen von Pflanzenkohle auf Ackerflächen. E-Mail vom 22.02.2023
- Hennemann-Kreikenbohm I, Jennemann L, Kinast P, Peters W, Schöne F (2015) Naturverträgliche Anlage und Bewirtschaftung von Kurzumtriebsplantagen (KUP), hg. v. Naturschutzbund Deutschland eV. (NABU), Bosch & Partner GmbH. Berlin, zu finden in <https://www.nabu.de/imperia/md/content/nabude/landwirtschaft/160303-nabu_naturvertraegliche-anlage-kup.pdf> [zitiert am 26.5.2023]
- Hepburn C, Adlen E, Beddington J, Carter EA, Fuss S, Mac Dowell N, Minx JC, Smith P, Williams CK (2019) The technological and economic prospects for CO₂ utilization and removal. *Nature* 575(7781):87-97. doi: 10.1038/s41586-019-1681-6
- Hermle S, Anken T, Leifeld J, Weisskopf P (2008) The effect of the tillage system on soil organic carbon content under moist, cold-temperate conditions. *Soil and Tillage Research* 98(1):94-105. doi: 10.1016/j.still.2007.10.010
- Hoffmann US, Jauker F, Lanzen J, Warzecha D, Wolters V, Diekötter T (2018) Prey-dependent benefits of sown wildflower strips on solitary wasps in agroecosystems. *Insect Conserv Divers* 11(1):42-49. doi: 10.1111/icad.12270
- Höper H, Meesenburg H (2021) 30 Jahre Bodendauerbeobachtung in Niedersachsen, hg. v. Landesamt für Bergbau, Energie und Geologie Niedersachsen (LBEG). Hannover, zu finden in <https://nibis.lbeg.de/doi/DOL.aspx?doi=10.48476/geober_39_2021> [zitiert am 31.5.2023]
- Jacobs A, Flessa H, Don A, Heidkamp A, Prietz R, Dechow R, Gensior A, Poeplau C, Riggers C, Schneider F, Tiemeyer B, Vos C, Wittnebel M, Müller T, Säurich A, Fahrion-Nitschke A, Gebbert S, Hopfstock R, Jaconi A, Kolata H, Lorbeer M, Schröder J, Laggner A, Weiser C, Freibauer A (2018) Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland – Ergebnisse der Bodenzustandserhebung, hg. v. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Braunschweig, 316 p. Thünen Report, zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn060497.pdf> [zitiert am 3.3.2023]
- Jian J, Du X, Reiter MS, Stewart RD (2020) A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biology and Biochemistry* 143:107735. doi: 10.1016/j.soilbio.2020.107735
- Jones DL, Edwards-Jones G, Murphy DV (2011) Biochar mediated alterations in herbicide breakdown and leaching in soil. *Soil Biology and Biochemistry* 43(4):804-813. doi: 10.1016/j.soilbio.2010.12.015
- Kern J, Don A (2018) Emissionen von klimarelevanten Gasen aus Agrarholzanpflanzungen. In: Veste M, Böhm C (eds) *Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft: Biologie - Ökologie - Management*. Lehrbuch, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer: pp 315-333

- Knöferl R, Diepolder M, Offenberger K, Raschbacher S, Brandl M, Kavka A, Hippich L, Schmücker R, Sperger C, Kalmbach S (2022) Leitfaden für die Düngung von Acker- und Grünland: Gelbes Heft, hg. v. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL). Freising-Weihenstephan, 15. Aufl., zu finden in <https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/2022_08_iab_info_gelbes_heft.pdf> [zitiert am 20.1.2023]
- KTBL [Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V.] (2023) Leistungs-Kostenrechnung Pflanzenbau. Darmstadt: Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V. (KTBL), zu finden in <<https://www.ktbl.de/webanwendungen/leistungs-kostenrechnung-pflanzenbau>> [zitiert am 21.1.2023]
- Kuzyakov Y, Bogomolova I, Glaser B (2014) Biochar stability in soil: Decomposition during eight years and transformation as assessed by compound-specific ¹⁴C analysis. *Soil Biology and Biochemistry* 70:229-236. doi: 10.1016/j.soilbio.2013.12.021
- Landgraf D, Bärwolff M, Burger F, Pecenka R, Hering T, Schweier J (2018) Produktivität, Management und Nutzung von Agrarholz. In: Veste M, Böhm C (eds) *Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft: Biologie - Ökologie - Management*. Lehrbuch, 1. Aufl. Berlin, Heidelberg: Springer: pp 447-510
- Ledo A, Smith P, Zerihun A, Whitaker J, Vicente-Vicente JL, Qin Z, McNamara NP, Zinn YL, Llorente M, Liebig M, Kuhnert M, Dondini M, Don A, Diaz-Pines E, Datta A, Bakka H, Aguilera E, Hillier J (2020) Changes in soil organic carbon under perennial crops. *Glob Chang Biol* 26(7):4158-4168. doi: 10.1111/gcb.15120
- Leifeld J, Keel SG (2022) Quantifying negative radiative forcing of non-permanent and permanent soil carbon sinks. *Geoderma* 423:115971. doi: 10.1016/j.geoderma.2022.115971
- LEL [Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume] (2022) Kalkulationsdaten Marktfrüchte: Konventioneller und Ökologischer Landbau. Schwäbisch Gmünd: Landesanstalt für Entwicklung der Landwirtschaft und der ländlichen Räume (LEL), zu finden in <https://lel.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E-1145170592/MLR.LEL/PB5Documents/lel/Abteilung_2/Oekonomik_der_Betriebszweige/Pflanzenbau/Marktfr%C3%BCchte/extern/Downloads/Kalkulationsdaten_Marktfr%C3%BCchte.xlsx> [zitiert am 4.5.2023]
- LfL [Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft] (2023a) LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten: Konventionelle und ökologische Verfahren. Freising, zu finden in <<https://www.stmelf.bayern.de/idb/default.html>> [zitiert am 19.4.2023]
- LfL [Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft] (2023b) LfL-Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten - Zuckerrüben (Basisrüben). Freising-Weihenstephan: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), zu finden in <<https://www.stmelf.bayern.de/idb/zuckerruebe.html>> [zitiert am 21.1.2023]
- LLH [Landesbetrieb Landwirtschaft Hessen] (ed) (2020) Zwischenfrucht-Leitfaden. Kassel, zu finden in <https://cdn.llh-hessen.de/pflanze/marktfruchtbau/zwischenfruchtanbau/B_Zwischenfruechte_BF_20200625.pdf> [zitiert am 19.9.2022]
- Luo Z, Wang E, Sun OJ (2010) Can no-tillage stimulate carbon sequestration in agricultural soils? A meta-analysis of paired experiments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 139(1-2):224-231. doi: 10.1016/j.agee.2010.08.006
- Lütke Entrup N (2001) *Zwischenfrüchte im umweltgerechten Pflanzenbau*. Gelsenkirchen: Mann, 87 p. aid 1060
- LWK Niedersachsen [Landwirtschaftskammer Niedersachsen] (ed) (2022) *Richtwert-Deckungsbeiträge 2022*. Oldenburg

- Maack C (2022) Cover crop roots for soil C sequestration - optimised species selection and planting, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel. Masterarbeit
- Machado PVF, Farrell RE, Deen W, Voroney RP, Congreves KA, Wagner-Riddle C (2021) Contribution of crop residue, soil, and fertilizer nitrogen to nitrous oxide emissions varies with long-term crop rotation and tillage. *Sci Total Environ* 767:145107. doi: 10.1016/j.scitotenv.2021.145107
- Manojlović M, Aćin V, Šeremešić S (2008) Long-term effects of agronomic practices on the soil organic carbon sequestration in Chernozem. *Archives of Agronomy and Soil Science* 54(4):353-367. doi: 10.1080/03650340802022845
- Mayer S, Wiesmeier M, Sakamoto E, Hübner R, Cardinael R, Kühnel A, Kögel-Knabner I (2022) Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 323:107689. doi: 10.1016/j.agee.2021.107689
- McClelland SC, Paustian K, Schipanski ME (2021) Management of cover crops in temperate climates influences soil organic carbon stocks: a meta-analysis. *Ecol Appl* 31(3):e02278. doi: 10.1002/eap.2278
- Meurer KH, Haddaway NR, Bolinder MA, Kätterer T (2018) Tillage intensity affects total SOC stocks in boreo-temperate regions only in the topsoil—A systematic review using an ESM approach. *Earth-Science Reviews* 177:613-622. doi: 10.1016/j.earscirev.2017.12.015
- Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen Z-S, Cheng K, Das BS, Field DJ, Gimona A, Hedley CB, Hong SY, Mandal B, Marchant BP, Martin M, McConkey BG, Mulder VL, O'Rourke S, Richer-de-Forges AC, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan G, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui C-C, Vågen T-G, van Wesemael B, Winowiecki L (2017) Soil carbon 4 per mille. *Geoderma* 292:59-86. doi: 10.1016/j.geoderma.2017.01.002
- ML Niedersachsen [Niedersächsisches Ministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz] (ed) (2022) Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen (AUKM) ab 2023 in Niedersachsen, Hamburg und Bremen. Stand 02.08.2022. Hannover, zu finden in <https://www.ml.niedersachsen.de/download/182209/Kurzuebersicht_ueber_die_Auflagen_und_Foerderbedingungen_der_Agrarumwelt-und_Klimamassnahmen_Stand_02.08.2022_.pdf> [zitiert am 21.10.2022]
- Muhammad I, Sainju UM, Zhao F, Khan A, Ghimire R, Fu X, Wang J (2019) Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* 192:103-112. doi: 10.1016/j.still.2019.04.020
- Nitsch H (2023) Einsatz von Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Chancen und Herausforderungen, hg. v. Institut für Ländliche Strukturforchung e. V. an der Goethe-Universität Frankfurt am Main (ifls). Frankfurt/Main, zu finden in <https://www.ifls.de/fileadmin/user_upload/Pflanzenkohle_Bericht_ifLS_Rentenbank.pdf> [zitiert am 28.2.2023]
- Olson K, Ebelhar SA, Lang JM (2014) Long-Term Effects of Cover Crops on Crop Yields, Soil Organic Carbon Stocks and Sequestration. *OJSS* 4(8):284-292. doi: 10.4236/ojss.2014.48030, zu finden in <https://www.scirp.org/pdf/OJSS_2014082211341366.pdf> [zitiert am 22.9.2022]
- Olson KR (2013) Soil organic carbon sequestration, storage, retention and loss in U.S. croplands: Issues paper for protocol development. *Geoderma* 195-196:201-206. doi: 10.1016/j.geoderma.2012.12.004
- Olson KR, Ebelhar SA, Lang JM (2010) Cover Crop Effects on Crop Yields and Soil Organic Carbon Content. *Soil Science* 175(2):89-98. doi: 10.1097/SS.0b013e3181cf7959

- Osipitan OA, Dille JA, Assefa Y, Knezevic SZ (2018) Cover Crop for Early Season Weed Suppression in Crops: Systematic Review and Meta-Analysis. *Agronomy Journal* 110(6):2211-2221. doi: 10.2134/agronj2017.12.0752
- Ouattara MS, Laurent A, Ferchaud F, Berthou M, Borujerdi E, Butier A, Malvoisin P, Romelot D, Loyce C (2021) Evolution of soil carbon stocks under *Miscanthus × giganteus* and *Miscanthus sinensis* across contrasting environmental conditions. *GCB Bioenergy* 13(1):161-174. doi: 10.1111/gcbb.12760, zu finden in <<https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1111/gcbb.12760>> [zitiert am 5.12.2022]
- Poepflau C, Don A (2014) Soil carbon changes under *Miscanthus* driven by C 4 accumulation and C 3 decomposition - toward a default sequestration function. *GCB Bioenergy* 6(4):327-338. doi: 10.1111/gcbb.12043
- Poepflau C, Don A (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200:33-41. doi: 10.1016/j.agee.2014.10.024
- Poepflau C, Don A, Schneider F (2021) Roots are key to increasing the mean residence time of organic carbon entering temperate agricultural soils. *Glob Chang Biol* 27(19):4921-4934. doi: 10.1111/gcb.15787
- Poschold P, Braun-Reichert R (2017) Small natural features with large ecological roles in ancient agricultural landscapes of Central Europe - history, value, status, and conservation. *Biological Conservation* 211:60-68. doi: 10.1016/j.biocon.2016.12.016
- Renius W, Lütke Entrup E, Lütke Entrup N (1992) Zwischenfruchtbau zur Futtergewinnung und Gründüngung: Ein Baustein zur Bodenfruchtbarkeit und zum Umweltschutz, 3., überarb. und erw. Aufl. Frankfurt (Main): DLG-Verl., 243 p
- Roßberg D, Michel V, Graf R, Neukampf R (2007) Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. Definition of soil-climate-areas for Germany. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes (Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd.)* 59(7):155-161, zu finden in <https://www.openagrar.de/receive/openagrar_mods_00056830> [zitiert am 4.5.2023]
- Schmidt H-P, Hagemann N, Abächerli F, Leifeld J, Bucheli T (2021a) Pflanzenkohle in der Landwirtschaft: Hintergründe zur Düngertilgung und Potentialabklärung für die Schaffung von Kohlenstoff-Senken. Zürich: Agroscope. Agroscope Science, zu finden in <<https://ira.agroscope.ch/de-CH/Page/Einzelpublikation/Download?einzelpublikationId=49313>> [zitiert am 11.7.2022]
- Schmidt H-P, Kammann C, Hagemann N, Leifeld J, Bucheli TD, Sánchez Monedero MA, Cayuela ML (2021b) Biochar in agriculture – A systematic review of 26 global meta-analyses. *GCB Bioenergy* 13(11):1708-1730. doi: 10.1111/gcbb.12889
- Schneider F, Don A, Hennings I, Schmittmann O, Seidel SJ (2017) The effect of deep tillage on crop yield – What do we really know? *Soil and Tillage Research* 174:193-204. doi: 10.1016/j.still.2017.07.005
- Schrumpf M, Schulze ED, Kaiser K, Schumacher J (2011) How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories? *Biogeosciences* 8(5):1193-1212. doi: 10.5194/bg-8-1193-2011
- Schwabe M, Roth D, Berger W (2000) Leitlinie zur Anlage und Pflege von Hecken, Baumreihen, Feld- und Ufergehölzen im Agrarraum. Jena: Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL), zu finden in <<http://www.tll.de/ainfo/archiv/heck0300.pdf>> [zitiert am 20.10.2022]
- Skinner C, Gattinger A, Müller A, Mäder P, Fließbach A, Stolze M, Ruser R, Niggli U (2014) Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management--a global meta-analysis. *Sci Total Environ* 468-469:553-563. doi: 10.1016/j.scitotenv.2013.08.098
- Speer D (2023) Kostenschätzung Heckenpflanzung. E-Mail vom 25.01.2023

- Sutter L, Albrecht M, Jeanneret P (2018) Landscape greening and local creation of wildflower strips and hedgerows promote multiple ecosystem services. *J Appl Ecol* 55(2):612-620. doi: 10.1111/1365-2664.12977
- Swieter A, Langhof M, Lamerre J, Greef JM (2019) Long-term yields of oilseed rape and winter wheat in a short rotation alley cropping agroforestry system. *Agroforest Syst* 93(5):1853-1864. doi: 10.1007/s10457-018-0288-5
- Tao F, Huang Y, Hungate BA, Manzoni S, Frey SD, Schmidt MWI, Reichstein M, Carvalhais N, Ciais P, Jiang L, Lehmann J, Wang Y-P, Houlton BZ, Ahrens B, Mishra U, Hugelius G, Hocking TD, Lu X, Shi Z, Viatkin K, Vargas R, Yigini Y, Omuto C, Malik AA, Peralta G, Cuevas-Corona R, Di Paolo LE, Luotto I, Liao C, Liang Y-S, Saynes VS, Huang X, Luo Y (2023) Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature*. doi: 10.1038/s41586-023-06042-3
- Thamo T, Pannell DJ (2016) Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence. *Climate Policy* 16(8):973-992. doi: 10.1080/14693062.2015.1075372
- Tiefenbacher A, Sandén T, Haslmayr H-P, Miloczki J, Wenzel W, Spiegel H (2021) Optimizing Carbon Sequestration in Croplands: A Synthesis. *Agronomy* 11(5):882. doi: 10.3390/agronomy11050882
- Tonitto C, David MB, Drinkwater LE (2006) Replacing bare fallows with cover crops in fertilizer-intensive cropping systems: A meta-analysis of crop yield and N dynamics. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 112(1):58-72. doi: 10.1016/j.agee.2005.07.003
- Tscharntke T, Grass I, Wanger TC, Westphal C, Batáry P (2021) Beyond organic farming - harnessing biodiversity-friendly landscapes. *Trends Ecol Evol* 36(10):919-930. doi: 10.1016/j.tree.2021.06.010
- Tsonkova P, Mirck J, Böhm C, Fütz B (2018) Addressing farmer-perceptions and legal constraints to promote agroforestry in Germany. *Agroforest Syst* 92(4):1091-1103. doi: 10.1007/s10457-018-0228-4
- Valkama E, Lemola R, Känkänen H, Turtola E (2015) Meta-analysis of the effects of undersown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 203:93-101. doi: 10.1016/j.agee.2015.01.023
- van Kessel C, Venterea R, Six J, Adviento-Borbe MA, Linnquist B, van Groenigen KJ (2013) Climate, duration, and N placement determine N₂O emissions in reduced tillage systems: a meta-analysis. *Glob Chang Biol* 19(1):33-44. doi: 10.1111/j.1365-2486.2012.02779.x
- Vanbeveren SP, Ceulemans R (2019) Biodiversity in short-rotation coppice. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 111:34-43. doi: 10.1016/j.rser.2019.05.012
- DüV: Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen - Düngeverordnung (2021), zu finden in
 <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl117s1305.pdf%27%5D__1675261535865> [zitiert am 12.1.2023]
- GAPDZV: Verordnung zur Durchführung der GAP-Direktzahlungen (GAP-Direktzahlungen-Verordnung) (2022), zu finden in
 <https://www.bgbl.de/xaver/bgbl/start.xav?start=//*%5B@attr_id=%27%27%5D#__bgbl__%2F%2F*%5B%40attr_id%3D%27bgbl122s0139.pdf%27%5D__1665384389296> [zitiert am 10.10.2022]
- Wahren A, Richter F, Julich S, Jansen M, Feger K-H (2015) The Influence of More Widespread Cultivation of Short Rotation Coppice on the Water Balance: From the Site to the Regional Scale. In: Butler Manning D, Bemmam A,

- Bredemeier M, Lamersdorf N, Ammer C (eds) Bioenergy from dendromass for the sustainable development of rural areas. Weinheim, Germany: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: pp 45-61
- Walter K, Don A, Flessa H (2015) No general soil carbon sequestration under Central European short rotation coppices. *GCB Bioenergy* 7(4):727-740. doi: 10.1111/gcbb.12177
- Wang J, Xiong Z, Kuzyakov Y (2016) Biochar stability in soil: meta-analysis of decomposition and priming effects. *GCB Bioenergy* 8(3):512-523. doi: 10.1111/gcbb.12266
- Weber M, Biertümpfel A, Rudolf C, Graf T (2021) SIGNAL II - Nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft durch Agroforstsysteme, Teilprojekt F: Abschlussbericht, hg. v. Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLR). Jena, zu finden in <http://www.tll.de/www/daten/pflanzenproduktion/nawaro/feste_bio/ab_signal_II_ges.pdf> [zitiert am 7.10.2022]
- West TO, Post WM (2002) Soil Organic Carbon Sequestration Rates by Tillage and Crop Rotation. *Soil Science Society of America Journal* 66(6):1930-1946. doi: 10.2136/sssaj2002.1930
- Wiesmeier M, Burmeister J, Wolfrum S, Brandhuber R (2017) Klimaschutz durch Humusaufbau - Umsetzungsmöglichkeiten der 4 Promille-Initiative in Bayern. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed) Landwirtschaft im Klimawandel Lösungen, die Geld sparen: 15. Kulturlandschaftstag. Tagungsband. Freising-Weihenstephan: pp 21-30
- Wiesmeier M, Mayer S, Burmeister J, Hübner R, Kögel-Knabner I (2020a) Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. *Geoderma* 369:114333. doi: 10.1016/j.geoderma.2020.114333
- Wiesmeier M, Mayer S, Paul C, Helmig K, Don A, Franko U, Franko M, Kögel-Knabner I (2020b) CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen, hg. v. BonaRes-Zentrum für Bodenforschung c/o Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ. Halle (Saale), zu finden in <https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062163.pdf> [zitiert am 12.4.2023]
- Winterling A, Baur A, Borchert H, Braun J, Eckl T, Höge H, Jacob I, Salzeder G, Schmidt M, Wiesinger K (2019) Wirkung von Energieholzstreifen auf landwirtschaftliche Kulturen. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (ed) Agroforstsysteme zur Energieholzerzeugung im ökologischen Landbau. Freising-Weihenstephan: pp 56-82
- Wratten SD, Gillespie M, Decourtye A, Mader E, Desneux N (2012) Pollinator habitat enhancement: Benefits to other ecosystem services. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 159:112-122. doi: 10.1016/j.agee.2012.06.020
- Ye L, Camps-Arbestain M, Shen Q, Lehmann J, Singh B, Sabir M (2020) Biochar effects on crop yields with and without fertilizer: A meta-analysis of field studies using separate controls. *Soil Use & Management* 36(1):2-18. doi: 10.1111/sum.12546
- Zarnik S (2017) Welche Zwischenfrucht passt zu meinem Betrieb? Besonderheiten bei Etablierung und Beseitigung: Vortrag auf der Mitgliederversammlung vom Bauernverband Enzkreis am 30.03.2017. Rheinstetten-Forchheim: Landwirtschaftliches Technologiezentrum Augustenberg (LTZ), zu finden in <https://ltz.landwirtschaft-bw.de/pb/site/pbs-bw-mlr/get/documents_E1817673494/MLR.LEL/PB5Documents/ltz_ka/Kulturpflanzen/Ackerbau/Zwischenfr%C3%BCchte%20und%20Untersaaten/Votr%C3%A4ge/Welche%20Zwischenfrucht%20passt%20zu%20meinem%20Betrieb_2017_03_30.pdf> [zitiert am 22.9.2022]
- Zhang Q, Xiao J, Xue J, Zhang L (2020) Quantifying the Effects of Biochar Application on Greenhouse Gas Emissions from Agricultural Soils: A Global Meta-Analysis. *Sustainability* 12(8):3436. doi: 10.3390/su12083436

Anhang 1: Beispielkalkulation für die innerbetriebliche Verwertung von Klee gras in Region 3

	konventionell	ökologisch
Einsparung variable Kosten Silomais	-1.215 €/ha	-1.947 €/ha
davon in var. Kosten enthaltene Nährstoffkosten	(432 €/ha)	(1.072 €/ha)
+ variable Kosten Klee gras	567 €/ha	846 €/ha
+ Kosten Zukauf Maissilage (siehe unten)	947 €/ha	785 €/ha
- Wert Stickstoffnachlieferung Folgekultur	31 €/ha	113 €/ha
= Kompensationsbedarf	269 €/ha	-428 €/ha

Ableitung des zusätzlichen Futterzukaufs

Silomaisertrag	439 dt FM/ha	365 dt FM/ha
	154 dt TM/ha	128 dt TM/ha
- Grasertrag	93 dt TM/ha	89 dt TM/ha
= Bedarf Zukauf Maissilage	61 dt TM/ha	39 dt TM/ha
: TS-Gehalt Maissilage	35%	35%
= Bedarf Zukauf Maissilage (Frischmasse)	174 dt FM/ha	111 dt FM/ha
x Preis Maissilage (inkl. Transport über 10 km) ¹⁾	5,4 €/dt FM	7,1 €/dt FM
= Kosten Zukauf Maissilage (siehe oben)	947 €/ha	785 €/ha

¹⁾ Abgeleitet aus dem regionalen Gleichgewichtspreis von Silomais gegenüber Weizen

Quelle: Eigene Kalkulationen.

Die Annahme, dass eine Dezitonne Maissilage durch eine Dezitonne Grassilage ersetzt werden kann, wurde vor dem Hintergrund der sehr großen Qualitätsunterschiede in der Praxis in Anlehnung an die Kalkulation der FAKTII-Maßnahme E10 in Baden-Württemberg getroffen.