



Hochschule Neubrandenburg
University of Applied Sciences

Fachbereich Agrarwirtschaft und Lebensmittelwissenschaften

Fachgebiet Pflanzenernährung und Bodenkunde

Prof. Dr. Silvia Bachmann-Pfabe

Bachelorthesis

**“CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden –
Humusaufbau und Honorierung über CO₂-Zertifikate“**

urn:nbn:de:gbv:519-thesis2023-0661-6

Vorgelegt von

Alena Wulf

Grömitz, den 06.03.2024

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	IV
Tabellenverzeichnis	VI
Verzeichnis der Abkürzungen	VII
1 Einleitung und Problemstellung	1
1.1 Problemstellung.....	1
1.2 Zielsetzung.....	2
1.3 Vorgehensweise.....	2
2 Datengrundlagen und Methoden	3
2.1 Literatur.....	3
2.2 Status quo der landwirtschaftlich genutzten Böden.....	4
2.3 Humus und seine Funktion.....	7
2.4 Bilanzierungsmethoden.....	9
3 Möglichkeiten der CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden	13
3.1 Biokohlen.....	13
3.2 Wiedervernässung von Mooren.....	16
3.3 Landnutzungsänderung und Dauergrünlanderhalt.....	20
3.4 Agroforst.....	22
3.5 Fruchtfolgegestaltung und Einsatz von Zwischenfrüchten.....	24
3.6 Management.....	27
4 Was sind CO₂-Zertifikate?	30
4.1 Prinzip der CO ₂ -Zertifikate.....	30
4.1.1 Europäischer Emissionshandel.....	30
4.1.2 Freier Markt.....	32
4.2 Funktionsweise der CO ₂ -Zertifikate in der Landwirtschaft.....	34
4.3 Derzeitiger Stand der Nachfrage und Rechtslage.....	36
4.4 Zur Verfügung stehende Maßnahmen im Agrarbereich.....	37
4.5 Anbieter, Käufer und Honorierung.....	38
4.5.1 Anbieter.....	38
4.5.2 Käufer.....	39
4.5.3 Honorierung.....	40
5 Diskussion	42
5.1 Probleme der CO ₂ -Zertifizierung.....	42
5.1.1 Quantifizierung der C _{org} -Änderungen.....	42
5.1.2 Fairness.....	42
5.1.3 Mangelnde rechtliche Sicherheit.....	43

5.1.4	Reversibilität und Langfristigkeit	43
5.1.5	Zusätzliche Emissionen	44
5.1.6	Zusätzlichkeit.....	45
5.1.7	Verschiebungseffekt	45
5.1.8	Synergien und Trade-Offs.....	46
5.2	Verbesserungsvorschläge für den Emissionshandels in der Landwirtschaft.....	46
5.2.1	Quantifizierung der C _{org} -Änderungen	47
5.2.2	Fairness.....	47
5.2.3	Mangelnde rechtliche Sicherheit	48
5.2.4	Reversibilität und Langfristigkeit	48
5.2.5	Zusätzliche Emissionen	49
5.2.6	Zusätzlichkeit.....	49
5.2.7	Verschiebungseffekt	50
5.2.8	Sonstige Verbesserungsvorschläge.....	50
5.3	Begrenzung des maximalen Humusaufbaus.....	52
5.4	Wie sinnvoll sind die Methoden der CO ₂ -Speicherung?	55
5.4.1	Biokohlen.....	56
5.4.2	Wiedervernässung von Mooren	58
5.4.3	Landnutzungsänderung und Dauergrünlanderhalt	60
5.4.4	Agroforst.....	62
5.4.5	Fruchtfolgegestaltung und Management der Erntereste.....	63
6	Zusammenfassung	71
7	Literaturverzeichnis.....	73
A	Anhang	A-1
	Danksagung	A-10
	Eidesstattliche Erklärung	A-11

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Flussdiagramm der Literaturrecherche zum Suchbegriff "Wiedervernässung" (eigene Darstellung).....	3
Abbildung 2: Regionalisierter Vorrat an organischem Kohlenstoff in den Oberböden Deutschlands (Jacobs et al.,2018).....	7
Abbildung 3: Die Ansätze der Humusbilanzierungsmethoden und deren Aussagen (Brock et al., o.D.).....	10
Abbildung 4: Humuskoeffizienten (HÄQ) ausgewählter Fruchtarten (Kolbe und Zimmer, 2015).....	25
Abbildung 5: Deutsche Auktionspreise der CO ₂ -Zertifikate zwischen 2013-2021 (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2022).....	31
Abbildung 6: Funktionsweise CO ₂ -Zertifikate in der Landwirtschaft (vereinfachte Darstellung) (Kraft, 2021).....	34
Abbildung 7: Funktionsweise CO ₂ -Zertifikate in der Landwirtschaft (detailliert) (Wolters et al., 2018).....	35
Abbildung 8: Nicht-linearer Zusammenhang zwischen dem C-Eintrag und dem C _{org} -Aufbau (Wiesmeier et al., 2020).....	53
Abbildung 9: Linearer Zusammenhang zwischen C _{org} und MAOC (Begill et al., 2023).....	54
Abbildung 10: Humusbilanz verschiedener Fruchtfolge- und Managementvarianten (eigene Darstellung).....	65
Abbildung 11: Deckungsbeitrag verschiedener Fruchtfolge- und Managementvarianten (eigene Darstellung).....	67
Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Humusbilanz und Deckungsbeitrag (eigene Darstellung).....	68
Abbildung 13: Kostenfunktion eines zusätzlich gespeicherten Kilogrammes an Humus (eigene Darstellung).....	70
Abbildung 14: Zertifikatkauf von Klim auf der Plattform ClimateTrade (Climate Trade, 2024).....	A-1
Abbildung 15: Zertifikatkauf von Klim auf der Plattform Senken (Senken, 2023).....	A-1
Abbildung 16: Berechnung Deckungsbeitrag Standardfruchtfolge (eigene Berechnung)	A-2
Abbildung 17: Berechnung Deckungsbeitrag Standardfruchtfolge mit Einarbeitung (eigene Berechnung).....	A-3
Abbildung 19: Berechnung Deckungsbeitrag FF mit Zwischenfrucht (eigene Berechnung).....	A-4
Abbildung 20: Berechnung Deckungsbeitrag FF mit Zwischenfrucht und Einarbeitung (eigene Berechnung).....	A-5

Abbildung 21: Berechnung Deckungsbeitrag FF mit Leguminose und ZF (eigene Berechnung).....	A-6
Abbildung 22: Berechnung FF mit Leguminose und ZF und Einarbeitung (eigene Berechnung).....	A-7
Abbildung 23: Berechnung Deckungsbeitrag 5-gliedrige FF (eigene Berechnung).....	A-8
Abbildung 24: Berechnung Deckungsbeitrag 5-gliedrige FF mit Einarbeitung (eigene Berechnung).....	A-9

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Einstufung des Humusgehaltes von Böden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung (In Anlehnung an Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005)	9
Tabelle 2: Humusbilanz nach VDLUFA: Bewertung und Empfehlung bei konventioneller Bewirtschaftung (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021)	12
Tabelle 3: Auswahl von Anbietern und Initiativen auf dem deutschsprachigen Markt von CO ₂ -Zertifikaten in der Landwirtschaft (eigene Darstellung).....	38

Verzeichnis der Abkürzungen

BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
BZE-LW	Bodenzustandserhebung Landwirtschaft
C _{org}	Organischer Kohlenstoff
ETS	Emissionshandelssystem
EWR	Ernte- und Wurzelrückstände
FF	Fruchtfolge
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
LfL	Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft
LULUCF	Land Use, Land Use Change and Forestry
MAOC	Mineralassoziierter organischer Kohlenstoff
POC	Partikulär organischer Kohlenstoff
RB	Reduzierte Bodenbearbeitung
SOC	Soil Organic Carbon
THG	Treibhausgas
ZF	Zwischenfrucht

1 Einleitung und Problemstellung

1.1 Problemstellung

Der Klimawandel ist Fakt. Die Durchschnittstemperatur der Erde ist in den letzten 50 Jahren deutlich angestiegen und der erhöhte Ausstoß von CO₂ ist ein Grund hierfür. Während im Jahr 1870 die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre bei 288ppm lag, stieg dieser Wert bis in das Jahr 2016 auf 404ppm an (Kunzig, 2023). Die Menschheit muss den CO₂-Ausstoß reduzieren, denn ungebremst hätte der Klimawandel diverse negative Folgen. So hat der Weltklimarat IPCC prognostiziert, dass der Klimawandel sowohl das weltweite Wirtschaftswachstum verlangsamt als auch die Ernährungssicherheit stark gefährdet, sowie die sozialen Ungleichheiten verschärft und damit die Gefahr von Migration erheblich ansteigen lassen kann (Kraft, 2021). Ziel ist es also, die anthropogenen Quellen von Treibhausgasen, zu denen neben CO₂ weitere Gase gezählt werden, auf ein Minimum zu begrenzen bzw. auf Dauer gegen regenerative Quellen auszutauschen. Aufgrund dessen hat sich die Bundesrepublik Deutschland zur Minderung seiner Treibhausgasemissionen verpflichtet.

Im Sektor der Landwirtschaft sinken die Treibhausgasemissionen tendenziell. Von 72,6 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 1990 bis auf 55,5 Mio. t CO₂-Äquivalente im Jahr 2022 (Umweltbundesamt, 2023b). Dieser Wert entspricht ca. 7,4% der gesamten Treibhausgas-Emissionen des Jahres, die auf die Landwirtschaft entfallen. Auf der einen Seite ist die Landwirtschaft Hauptverursacher von Methan (CH₄) und Lachgas, beides Treibhausgase mit einem 25-fach (im Fall des Methans) und sogar 300-fach schädlicheren (im Fall des Lachgases) Potenzial als CO₂ (Deutscher Bundestag, 2016). Methan stellt mit 70% den Großteil der Treibhausgasemissionen in der Landwirtschaft dar. Darüber hinaus stammen 76,7% der gesamten Methan- und 77,5% der gesamten Lachgas-Emissionen Deutschlands aus der Landwirtschaft (Umweltbundesamt, 2023b). Die Landwirtschaft ist demnach Verursacher von klimaschädlichen Gasen. Auf der anderen Seite wird in der Landwirtschaft ein großes Potential gesehen, das CO₂ aus der Atmosphäre wieder zu binden, nämlich in dem Boden. Der Boden ist der größte terrestrische Speicher für C_{org}. Böden verfügen über 4-mal so viel Kohlenstoff (C) wie die oberirdische Vegetation und mehr als doppelt so viel wie die Atmosphäre (Jacobs et al., 2018). Man sagt, dass 60% des Humus aus Kohlenstoff besteht (Don et al., 2018). Grundsätzlich gilt also: Humusaufbau fördert CO₂-Speicherung im Boden. Hierbei gibt es gegenwärtig dennoch ein Problem: Die gemäßigte Zone Europas gilt als das Gebiet mit den größten Soil Organic Carbon (SOC)-Verlusten weltweit. Je nach Definition sind 7-44% der Landfläche degradiert (Don et al., 2018). Mit weitreichenden Folgen, denn gespeichertes CO₂ wird wieder freigesetzt und gelangt zusätzlich in die Atmosphäre.

Die Politik muss handeln. Aus diesem Grund hat die „Bundesrepublik Deutschland [...] sich als Unterzeichnerstaat mehrerer internationaler Vereinbarungen zum Klimaschutz verpflichtet, anthropogene Quellen und Senken von Treibhausgasen jährlich auf nationaler Skalenebene zu berichten. Dazu zählen auch CO₂-Emissionen aus Veränderungen des C_{org}-Vorrates im Boden, die durch Landnutzungsart und Flächenbewirtschaftung verursacht werden“ (Jacobs et al., 2018). Der Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung legt die Grundlage hierfür. Der Schwerpunkt im Bereich Klimaschutz in der Landwirtschaft liegt auf Maßnahmen, die die Emissionen mindern und die Ressourceneffizienz steigern sollen. Für den Land Use, Land Use Change and Forestry (kurz LULUCF) -Sektor wird einerseits der Erhalt der Senkenfunktion des Bodens für CO₂ auf längere Sicht angestrebt. Andererseits werden Klimaschutzmaßnahmen aufgrund der permanent hohen CO₂-Emissionen aus landwirtschaftlich genutzten Moorböden genannt. Hierbei sind Maßnahmen im Rahmen des Aufbaus und Erhaltes des C_{org}-Vorrates im Boden erforderlich.

1.2 Zielsetzung

Durch die Ziele des Klimaschutzplanes 2050 gewinnt das Thema der CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden weiter an Bedeutung und rückt zunehmend in den Vordergrund politischer und gesellschaftlicher Diskussionen. Maßnahmen im Rahmen des Erhalts und Aufbaus des C_{org}-Vorrates im Boden werden gesucht.

Das Hauptziel dieser wissenschaftlichen Arbeit ist es, die verschiedenen Verfahren und Maßnahmen zur CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden aufzuzeigen und die Rolle der CO₂-Zertifikate in diesem Kontext zu erläutern. Daneben werden die Probleme im Zusammenhang mit den CO₂-Zertifikaten aufgezeigt. Zudem liegt der Fokus auf der kritischen Beurteilung der ausgewählten Maßnahmen nach den Kriterien der Umweltwirkung und Langfristigkeit.

1.3 Vorgehensweise

Anhand der in *Kapitel 1.2* genannten Zielstellung sollen zu Beginn der derzeitige Bodenzustand gemäß Bodenzustandserhebung Landwirtschaft, sowie die zur Verfügung stehenden Methoden und Maßnahmen zum Humusaufbau aufgezeigt werden. Darauffolgend wird die Relevanz der CO₂-Zertifikate zum Erreichen des Humusaufbaus erklärt. Dies geschieht anhand des Prinzips und der Funktionsweise des Emissionshandels. Letztendlich sollen die dabei vorhandenen Probleme erörtert werden. Zudem soll aufgezeigt werden, welche Maßnahmen auf Dauer potenziell in der Praxis anwendbar und dabei ökologisch tragbar sind.

2 Datengrundlagen und Methoden

2.1 Literatur

Die Literaturrecherche ist der essenzielle Teil dieser Bachelorarbeit, da sie sowohl die Grundlage für die Beschaffung als auch die Auswahl der relevanten Informationen ist. Das Ziel der Literaturrecherche war es, den aktuellen Wissensstand aufzuzeigen und eine Basis zu schaffen, auf der die Problemstellung bearbeitet, die Kernfragen beantwortet und die Zielsetzung erreicht werden kann. In der vorliegenden Arbeit werden sowohl generelle als auch aktuelle Forschungsergebnisse zu den Themen der *Möglichkeiten zur CO₂-Speicherung in Böden* untersucht und analysiert. Zudem werden aktuelle Informationen zu den Themen *CO₂-Zertifikate*, *Emissionshandel* und *Methoden zur Speicherung von CO₂ im Boden außerhalb der Landwirtschaft* gegeben. Für die systematische Literaturrecherche wurden zuerst Oberbegriffe wie *Klimawandel*, *Emissionshandel* oder *Carbon Farming* zusammengestellt. Diese wurden in der Datenbank der Bibliothek der Hochschule Neubrandenburg, sowie weiteren wissenschaftlichen Datenbanken wie Google Scholar, LIVIO und Open Agrar gesucht. Die Suche nach wissenschaftlichen Texten war nötig, da das Thema des Klimawandels große Brisanz hat und viele Halbwahrheiten im Internet zu finden sind. Bei der Auswahl der Artikel, Berichte und Websites wurde auf Zuverlässigkeit, Validität und besonders Aktualität geachtet, sodass alle Informationen auf wissenschaftlichen Kenntnissen basieren.

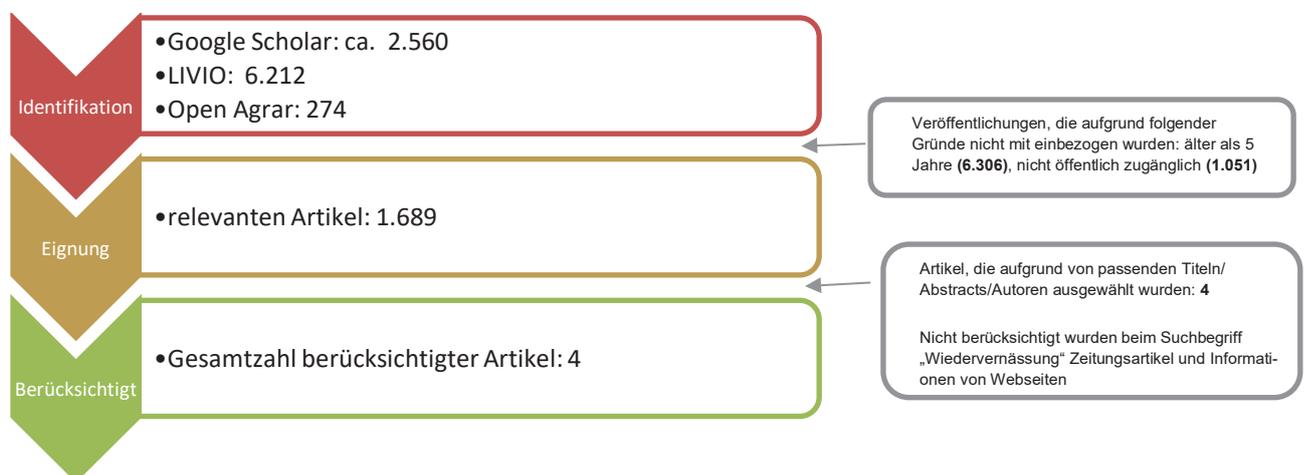


Abbildung 1: Flussdiagramm der Literaturrecherche zum Suchbegriff "Wiedervernässung"

Quelle: eigene Darstellung

2.2 Status quo der landwirtschaftlich genutzten Böden

Das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz wurde vom BMEL beauftragt, die erste Bodenzustandserhebung Landwirtschaft (BZE-LW) zu planen und durchzuführen. Übergeordnetes Ziel dieser BZE-LW war es, den C_{org} -Vorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden deutschlandweit zu erfassen. Darüber hinaus wurde der Einfluss von Standort- und Landnutzungsfaktoren bewertet. Zudem sollten Modelle zur Beschreibung der C_{org} -Dynamik, also regionale Zu- und Abnahmen des C_{org} -Vorrates, in Böden der Region Deutschland etabliert und bewertet werden. Die Maßnahmen der BZE-LW zielen darauf ab, die Treibhausgas-Emissionsberichterstattung der Bundesrepublik Deutschland in den Bereichen Landnutzung und Landnutzungsänderung abzusichern, zu verbessern und weiterzuentwickeln. Außerdem wurde mit diesen Maßnahmen die Basis für eine eventuelle Wiederholungsinventur geschaffen. Die folgenden Angaben zum Status quo der auf Skalenebene Deutschland genutzten landwirtschaftlichen Böden beziehen sich auf die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft.

Die Ergebnisse der BZE-LW sind in zwei Abschnitte unterteilt: die Mineralböden und die Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden. Generell wurde herausgearbeitet, dass der C_{org} -Vorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden sehr variabel ist. Hierbei reichen die Werte von unter 30 t C_{org} /ha in flachgründigen bzw. stark sandigen Böden bis hin zu über 500 t C_{org} /ha in Mooren und moorähnlichen Böden (Jacobs et al., 2018). Im Schnitt liegt der C_{org} -Gehalt in den oberen 100 cm Bodentiefe eines landwirtschaftlich genutzten Bodens bei 128 t C_{org} /ha (Jacobs et al., 2018). Genannte Gründe für diese starke Variabilität waren vorwiegend die Standortfaktoren, wobei die Hydromorphie der prägendste Faktor sei. Die C_{org} -Vorräte in den Böden steigen mit dem Grad der Vernässung und erreichen in tiefgründigen Moorböden den Höchststand, wobei Modelle für grundwasserferne Böden einen signifikanten C_{org} -Verlust im Oberboden aufzeigten. Ebenso ist in mineralischen Böden die Bodentextur ein entscheidender Einflussfaktor. Böden mit einem Tongehalt >45% in den obersten 30cm speicherten im Durchschnitt das 1,4-fache an C_{org} wie sandige Böden mit weniger als 12% Ton (Jacobs et al., 2018). Zudem wurde eine enge Beziehung zwischen Landnutzungsart und dem C_{org} -Gehalt aufgezeigt. Durch die intensive Durchwurzelung und das nicht Vorhandensein der Bodenbearbeitung wird erreicht, dass sich mehr C_{org} in Dauergrünlandflächen anreichert. Konkret bedeutet dies, dass Böden unter Ackernutzung einen C_{org} -Gehalt von 101 t/ha aufwiesen, wobei Dauergrünlandflächen einen Wert von 200 t/ha erzielten (Jacobs et al., 2018). Eine weitere aufgezeigte Tatsache ist, dass in landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland ein höherer C_{org} -Vorrat festgestellt wurde als in den deutschen Waldböden. Im Rahmen der Bodenzustandserhebung-Wald wurde ein durchschnittlicher Wert von ca. 100 t C_{org} /ha gemessen (Jacobs et al., 2018). Somit weist die BZE-LW nach, dass landwirtschaftlich genutzte Böden der größte terrestrische Speicher von C_{org} in Deutschland sind. Insgesamt sind in den oberen 100 cm der 16,6 Mio. ha landwirtschaftlich genutzter Böden in Deutschland zurzeit 2,5 Milliarden Tonnen

C_{org} gespeichert (Jacobs et al., 2018). Diese Erkenntnis verdeutlicht, wie wichtig die landwirtschaftlich genutzten Böden in Deutschland für die CO_2 -Speicherung sind. Im Folgenden werden nun die genauen Ergebnisse der BZE-LW in Mineral- und Moorböden aufgezeigt.

In Bezug auf die Mineralböden wurden drei wesentliche Aussagen getroffen. Zum einen zeigte sich, dass der C_{org} -Vorrat im Oberboden (0-30 cm) ohne Berücksichtigung der Landnutzungsart stark von 12-252 t/ha variierte. Im Mittel lag der Wert bei 68 t/ha (Jacobs et al., 2018). Unter Berücksichtigung der Landnutzungsart zeigte sich ebenfalls eine hohe Variabilität im gesamten Datensatz der C_{org} -Gehalte im Oberboden (0-30 cm). Sie reichten von 0,6 bis 78 g/kg Boden unter Ackernutzung und 2 bis 98 g/kg Boden unter Dauergrünlandnutzung (Jacobs et al., 2018). Hier zeigt sich zum anderen ebenfalls, dass es in Mineralböden einen deutlichen Zusammenhang zwischen Landnutzungsart und Betriebsform auf den C_{org} -Gehalt im Boden gibt. In Bezug auf die Landnutzungsart wurde dargelegt, dass Oberböden unter Ackernutzung generell einen geringeren C_{org} -Vorrat von 61 ± 25 t/ha hatten als jene unter Dauergrünlandnutzung mit 88 ± 21 t/ha (Jacobs et al., 2018). Ein Blick auf die Betriebsformen hat aufgezeigt, dass Böden unter Ackernutzung von Betrieben, die nur Futterbau auf ihren Flächen betreiben, einen signifikant höheren C_{org} -Vorrat sowohl in Ober- als auch in Unterboden aufweisen konnten als Betriebe, die reinen Marktfruchtanbau oder Mischformen betreiben. Des Weiteren wurde aufgezeigt, dass rund 64% des C_{org} s in Mineralböden im Oberboden und rund 36% im Unterboden gespeichert ist (Jacobs et al., 2018). Dies liegt daran, dass der höchste Eintrag von C_{org} in mineralische Oberböden durch Wurzel- und Erntereste, wie auch durch organische Dünger geschieht. Trotzdem wurde bestätigt, dass auch der Unterboden mit ca. 40% maßgeblich an der C_{org} -Speicherung beteiligt ist. Als zukünftige Prognose zeigten experimentelle Daten von Bodendauerbeobachtungsflächen unter Ackernutzung einen C_{org} -Verlust von knapp 0,23 t/ha und Jahr in den nächsten zehn Jahren (Jacobs et al., 2018). Für mineralische Böden unter Dauergrünlandnutzung ergaben sich keine signifikanten Trends und auch in weiteren Studien wurden jene Flächen als kohlenstoffstabil oder sogar als -anreichernd bezeichnet. Kurzgefasst kann festgestellt werden, dass die Landnutzungsart die wichtigste anthropogene Einflussgröße auf den C_{org} -Vorrat in mineralischen Böden ist.

Im Hinblick auf die Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden wurde herausgearbeitet, dass der C_{org} -Gehalt deutlich über dem der mineralischen Böden unter Dauergrünlandnutzung lag. Auch organische Böden weisen einen sehr hohen C_{org} -Vorrat im Oberboden auf. Aufgrund der stärkeren Degradierung sind diese Werte aber geringer als die C_{org} -Gehalte im Unterboden. Folgend wurden die Gehalte für Moorfolgeböden, Niedermoorböden und Hochmoorböden herausgearbeitet. Die Klasse der Moorfolgeböden ist in diesem Zusammenhang „sehr divers und umfasst alle im Vergleich zu ursprünglichen Moorböden stark C_{org} -verarmten, flachgründigen oder unsystematisch durchmischten Standorte, die ehemals eine Moorgenese durchliefen“ (Jacobs et al., 2018). Die höchsten Gehalte wurden in den Hochmooren gefunden,

gefolgt von den Niedermooren und den Moorfolgeböden. Des Weiteren wurde festgestellt, welchen Einfluss die Mächtigkeit der Überdeckung hat. Der höchste C_{org} -Vorrat in den obersten 100cm fanden sich in flach überdeckten organischen Böden mit 655 ± 230 t/ha. Gefolgt von den Niedermoorböden mit 638 ± 127 t/ha und den Hochmoorböden mit 591 ± 109 t/ha. Deutlich geringere Vorräte ließen sich in den Moorfolgeböden mit 333 ± 184 t/ha und den Treposolen mit 331 ± 113 t/ha finden (Jacobs et al., 2018). Dieser hohe Vorrat der Moor- und moorähnlichen kohlenstoffreichen Böden, ist sehr vulnerabel und hat damit eine hohe Klimarelevanz, hier zeigt sich die besondere Bedeutung der überdeckten organischen Böden mit ihren hohen C_{org} -gehalten. Die Landnutzungsart ist bei den Moorböden nur in dem Sinne entscheidend, dass sie die Grundwasserstände auf den Flächen bedingt. Die derzeit hohen Verluste von C_{org} sind demnach stark von dem Grundwasserstand und der -dynamik, sowie von den Bodeneigenschaften abhängig.

Zur Minderung dieser hohen Verluste besteht dringend Handlungsbedarf. So wurde durch den Klimaschutzplan 2050 der Bundesregierung der Schutz von Moorböden als wichtige Maßnahme im LULUCF-Sektor benannt. Eine zukünftige Entwicklung zeigt sich durch Messungen und Berechnungen der C-Gesamtbilanz aus dem Verbundprojekt „organische Böden“. Hier wurde aufgezeigt, dass organische Böden, die sich unter Acker- und Grünlandnutzung befinden, etwa $7,5$ t C_{org} /ha und Jahr verlieren (Jacobs et al., 2018). Dies würde bedeuten, dass ein solcher Standort in 20 Jahren mehr C_{org} verliert, als in einem oben beschriebenen typischen Mineralboden überhaupt gespeichert ist. Kurzgefasst kann man sagen, dass die Landnutzungsart, anders als bei den oben beschriebenen Mineralböden, keinen direkten Einfluss auf die Höhe der C_{org} -Vorräte hat. Vielmehr spielt diese indirekt eine Rolle durch den Einfluss auf die Höhe des Grundwasserstandes.

Die regionale Verteilung des Vorrates an organischem Kohlenstoff (t/ha) in den landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands ist auf Basis der BZE-LW in *Abbildung 2* dargestellt. Die weißen Flächen kennzeichnen hierbei Böden unter Waldnutzung oder Siedlungsbereiche.

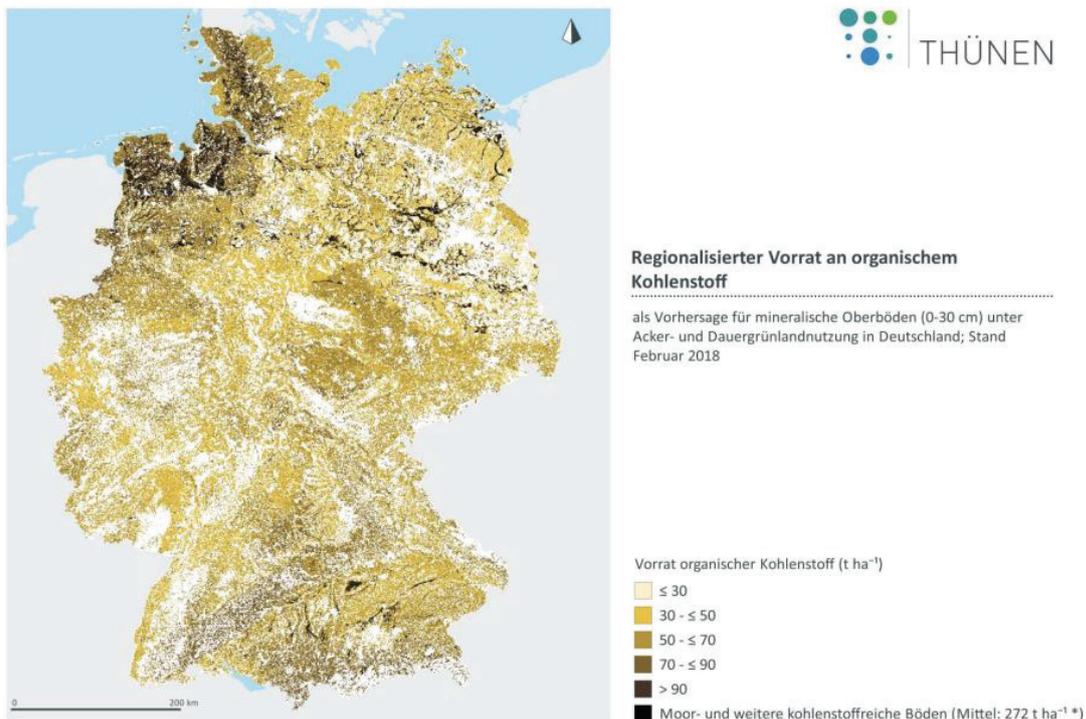


Abbildung 2: Regionalisierter Vorrat an organischem Kohlenstoff in den Oberböden Deutschlands

Quelle: Jacobs et al., 2018, S. 245

2.3 Humus und seine Funktion

Als Humus wird im Allgemeinen die Summe der unbelebten organischen Substanz tierischer, pflanzlicher und mikrobieller Herkunft im Boden bezeichnet. Der Humus entsteht durch die Zersetzung von Bodenorganismen und Pflanzenresten und unterliegt permanenten Auf-, Um- und Abbauprozessen. Anhand seiner verschiedenen Stabilitäten und Lebensdauern wird der Humus in den leicht abbaubaren Nährhumus und den stabileren Dauerhumus unterteilt. Durch diverse Stabilisierungsprozesse wird der Humus gegen einen fortschreitenden Abbau durch Mikroorganismen geschützt, wobei die Bindung an Tonminerale eine besondere Bedeutung einnehmen. Hauptbestandteil des Humus ist Kohlenstoff. Humus und C_{org} bezeichnen beide die unbelebte organische Substanz im Boden, wobei der Humus aus rund 58% C_{org} besteht (Kolbe & Zimmer, 2015). Zur Berechnung des Humusgehaltes siehe Formel:

$$C_{org} \text{ Gehalt} * 1,72 = \text{Humusgehalt}$$

Als erheblicher Einflussfaktor auf die Höhe des Humusgehaltes wird die Zufuhr an organischer Masse beschrieben. Hierbei kommt es besonders auf die Menge an Ernte- und Wurzelresten, sowie die Höhe der organischen Düngung an. Zudem spielt auch die Bodengenese eine Rolle, also beispielsweise die Bodenart, die Textur, sowie die Tatsache, dass bei steigender Ton- und Feinanteile im Boden auch die Humusgehalte steigen. Des Weiteren ist die Höhe des

Abbaus ein entscheidender Faktor. Die Abbaurate ist abhängig von der chemischen Struktur der organischen Materialien, sowie der generellen Nährstoffverfügbarkeit am Standort, dem pH-Wert, der Intensität der Bodenbearbeitung und dem Klima, also von der Temperatur und dem Niederschlag. Wie in der BZE-LW aufgezeigt, spielt auch die Form der Landnutzung und damit einhergehend die angebauten Fruchtarten eine wichtige Rolle (Kolbe & Zimmer, 2015).

Für den Boden und seine Nutzung weist der Humus entscheidende Vorteile auf. Zum einen dient er als Nährstoffspeicher, da im Zuge des mikrobiellen Abbaus der Humusbestandteile organische Stoffe, die die Pflanzen zum Wachsen benötigen, wie Sauerstoff, Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor, Schwefel und Wasserstoff in pflanzenverfügbare Verbindungen umwandelt werden (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2020). Somit dient der Humus nicht nur der Pflanzenernährung, sondern auch als Nahrungsquelle für Mikroorganismen im Boden sowie weitere Bodenlebewesen. Zum anderen bewirkt Humus eine verbesserte Bodenstruktur. Er schafft und stabilisiert das Gefüge im Boden, indem er verschiedene Bodenteilchen zu einem hohlraumreichen Bodenverband verklebt. Folglich wird nicht nur das Porensystem im Boden beeinflusst, sondern auch der Luft- und Wasserhaushalt im Boden verbessert und Erosionen können dadurch vermindert werden. Neben dem verbesserten Wasserhaushalt fungiert der Humus auch als Wasserspeicher. Diese Eigenschaft ist im Hinblick auf den Klimawandel und die damit einhergehenden prognostizierte Verringerung von Niederschlägen in der Vegetationszeit (Sommer) von großer Bedeutung. Darüber hinaus kann die im Humus gespeicherte Wassermenge das 20-fache des Humusgewichtes erreichen (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2020), was wichtig bei Starkniederschlagsereignissen werden kann.

Ein weiterer Vorteil entsteht durch die Funktion des Ionenaustausches. Hier werden die für die Pflanzen wichtigen Kationen und Anionen austauschbar gebunden und somit vor Auswaschung geschützt. Besonders auf sandigen tonarmen Böden ist diese Eigenschaft von besonderer Bedeutung. Die Proteine im Humus stellen einen wichtigen Bestandteil dessen dar. Sie fungieren als Puffer und verhindern, dass größere pH-Wert Schwankungen möglich sind, sodass biochemische Prozesse im Boden unter optimalen Bedingungen stattfinden können. Zudem hat der Humus eine Filterfunktion im Boden und schützt damit die Umwelt vor Nährstoffeinträgen. Die für diese Bachelorarbeit bedeutendste Eigenschaft des Humus ist seine Funktion als wichtige Kohlenstoffsенke. Wie bereits beschrieben ist Kohlenstoff der Hauptbestandteil von Humus. Da die Pflanzen allerdings keinen Humus-C benötigen, entziehen sie dem Humus und somit dem Boden keinen Kohlenstoff durch die Ernte. Ganz im Gegenteil: die Pflanzen geben über die Wurzeln Zucker an Symbionten im Boden ab, die organische Bodensubstanz abbauen und damit Nährstoffe pflanzenverfügbar machen (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2023). Weitere Mikroorganismen bauen Erntereste und organische Dünger ab und bilden neuen Humus. Bereits eine minimale Abnahme des Kohlenstoffreservoirs des Bodens in Europa um 0,1%, würde der Kohlenstoffemission von ca. 100

Mio. Pkw gleichen (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2020). Somit wird die enorme Bedeutung des Humus für das Klima deutlich.

Abschließend lässt sich feststellen, dass der Humus einen erheblichen Einfluss in Hinsicht auf den Klimawandel und die CO₂-Speicherung im Boden hat, da er zu 58% aus C_{org} besteht. Die wichtigste Einflussgröße auf den C_{org}-Gehalt im Boden stellt die Höhe der Zufuhr an organischem Material dar. Dieses große Potential des Humus ist schon lange bekannt, sodass die humuserhaltende Bodennutzung bereits seit 1999 im Bundes-Bodenschutzgesetz in § 17 durch „die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ gesetzlich vorgeschrieben ist (Bundesamt für Justiz, o. D.). Auf mögliche Methoden des Kohlenstoffeintrages durch organisches Material in den Boden wird in *Kapitel 3* näher eingegangen.

2.4 Bilanzierungsmethoden

Wie in *Kapitel 2.3* aufgezeigt ist eine Grundlage der CO₂-Speicherung der Aufbau von Humus in Ackerböden. Zur Bestimmung der Humusversorgung können sowohl Methoden der Bodenuntersuchung als auch der Humusbilanzierung angewandt werden. In der landwirtschaftlichen Praxis werden die Ergebnisse der Bodenuntersuchung, also der C_{org}-Gehalt, nach den Humusklassen der bodenkundlichen Kartieranleitung eingeteilt (siehe *Tabelle 1*).

Tabelle 1: Einstufung des Humusgehaltes von Böden nach Bodenkundlicher Kartieranleitung

Humusgehaltstabelle (organische Substanz)		
Kurzzeichen	Bezeichnung	In Masse-%
h0	humusfrei	0
h1	sehr schwach humos	< 1
h2	schwach humos	1 bis < 2
h3	mittel humos	2 bis < 4
h4	stark humos	4 bis < 8
h5	sehr stark humos	8 bis < 15
h6	extrem humos, anmoorig	15 bis < 30
h7	organisch, Torf	≥ 30

Quelle: In Anlehnung an *Bodenkundliche Kartieranleitung, 2005, S.112*

Zur Beurteilung der Veränderung des Humusgehaltes durch die Bewirtschaftung sind allerdings Methoden erforderlich, welche sich durch eine stärkere Sensibilität als bei der Bodenuntersuchung auszeichnen (Kolbe & Zimmer, 2015). Aus diesem Grund hat die Humusbilanzierung an Relevanz gewonnen. Durch die Humusbilanz wird das Hauptaugenmerk auf die Ermittlung des Versorgungsgrades mit organischem Material aus Fraktion des Nährhumus

gelegt (Kolbe & Zimmer, 2015). Das *Prinzip der Humusbilanz* ist, aus Humuszufuhr (aus Ernte- oder Wurzelrückständen, organischem Dünger) minus dem Humusbedarf (der angebauten Fruchtart, Fruchtfolge) das Humusbilanzsaldo zu errechnen (Kolbe, 2008). Das Ziel der Humusbilanzierungen besteht darin, die Veränderung der Humusvorräte in ackerbaulich genutzten Böden abschätzen zu können. Dies kann entweder auf Ebene des Betriebes, der Fruchtfolge oder eines einzelnen Schlages erfolgen. Aus der Humusbilanz ist folgend abzuleiten, inwiefern man Änderungen an der Bewirtschaftung vornehmen sollte, um eine an den Standort angepasste Humusversorgung generieren zu können.

Zurzeit existieren drei verschiedene Ansätze der Humusbilanzierung, welche jeweils verschiedene Faktoren berücksichtigen und sich damit in ihrer Aussagekraft unterscheiden. Wie in *Abbildung 3* gezeigt, unterscheidet man zwischen dem agronomischen, dem ökologischen und dem verbindenden Konzept (Brock et al., o. D.). Bei dem agronomischen Konzept berechnet man den Humusbedarf aus Fruchtfolge, Ertrag, N-Input und Standort zusammen und stellt diesen dem Humusersatz, berechnet aus Fruchtfolge und organischer Düngung, entgegen. Bei dem verbindenden Konzept wird die Veränderung der organischen Bodensubstanz aus C-Zufuhr, N-Zufuhr, N-Abfuhr und dem Standort berechnet. Das ökologische Konzept berechnet die Veränderung der organischen Bodensubstanz aus Bewirtschaftung, Standort und das Ausgangsgemenge der organischen Bodensubstanz. Bei der Humusbilanzierung können nur Methoden eine Veränderung der Humusvorräte aufzeigen, die sowohl Standortfaktoren als auch die Vorbewirtschaftung und die Veränderung der Humusvorräte bei gleichbeliebender Bewirtschaftung mit einbeziehen (Brock et al., o. D.). Die genannten Anforderungen erfüllen demnach nur die Methoden des ökologischen Konzeptes, sowie unter Einschränkungen die Methoden des verbindenden Konzeptes.

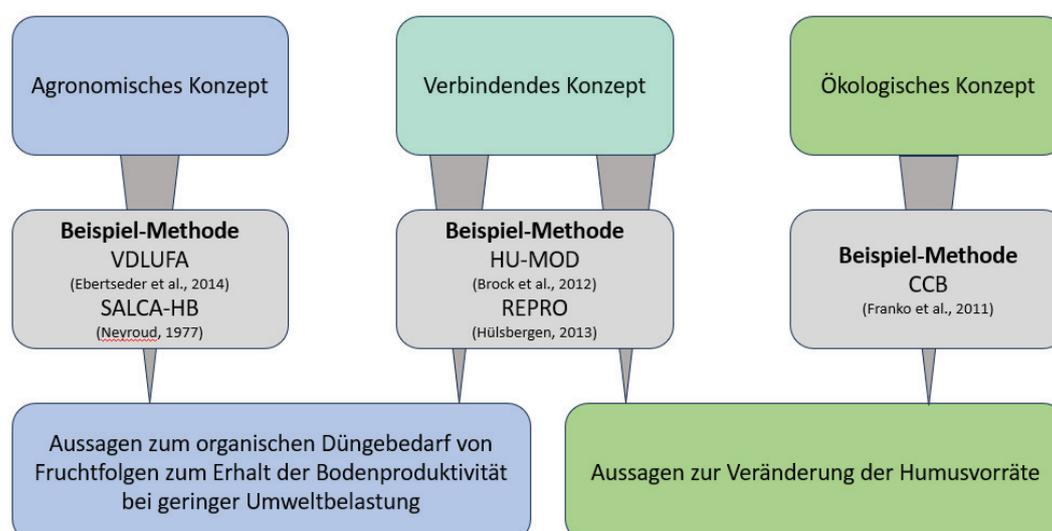


Abbildung 3: Die Ansätze der Humusbilanzierungsmethoden und deren Aussagen

Quelle: In Anlehnung an Brock et al., o.D., S.2

In Deutschland am weitesten verbreitet sind Methoden des agronomischen Konzeptes, darunter auch die Humusbilanzierung nach VDLUFA (Kolbe, 2008). Diese Methoden berücksichtigen weniger Faktoren als die beiden vorher genannten Konzepte, sodass sich keine Veränderung des Humusvorrates ermitteln lässt. Dafür bestimmen diese Methoden, welche Höhe an organischer Düngung eine Fruchtfolge benötigt, damit die Produktivität der Fruchtfolge erhalten bleibt und gleichzeitig das Risiko von Nährstoffverlusten minimiert wird. „In der landwirtschaftlichen Praxis findet insbesondere die [...] VDLUFA-Methode Anwendung“ (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021). Die alleinige Anwendung von der Humusbilanzmethode nach VDLUFA gibt ohne begleitende Boden-/Humusuntersuchung keine Auskunft darüber, wie hoch der tatsächliche Humusgehalt des Ackerbodens ist (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021).

Mit der VDLUFA-Methode kann man die schlagbezogene Humusbilanz in drei einfachen Schritten berechnen. Dazu muss stets die gesamte Fruchtfolge erfasst werden. Diese Methode kann sowohl für konventionell als auch für ökologisch wirtschaftende Betriebe angewandt werden. Zur Berechnung stehen von der LfL eine Excel-Tabelle (Beck & Rippel, 2015) als auch ein Bogen zum Ausdrucken und Selbstrechnen zur Verfügung. Um zur Humusbilanz zu gelangen, wird zuerst die Humuswirkung der angebauten Kulturen und deren Nebenprodukten berechnet (Wert 1). Angegeben wird dieser Wert in Humusäquivalenten (HÄ). Zu diesem Wert wird im zweiten Schritt, ebenfalls in HÄ angegeben, die Zufuhr von zusätzlichem organischem Material in der gesamten Fruchtfolge (Wert 2) addiert. Für das Ergebnis wird die vorherige Summe (Wert 1 + Wert 2) durch die Anzahl der Jahre der Fruchtfolge geteilt. Anhand des errechneten Wertes und den beigelegten Tabellen kann sowohl für konventionell (siehe *Tabelle 2*) als auch für ökologisch wirtschaftende Betriebe eine Handlungsempfehlung abgelesen werden.

Tabelle 2: Humusbilanz nach VDLUFA: Bewertung und Empfehlung bei konventioneller Bewirtschaftung

Bereich HÄ/(ha*Jahr)	Bewertung	Empfehlung
kleiner -200	<u>Sehr niedrige Humusbilanz:</u> Langfristig ungünstige Beeinflussung von Bodenfunktionen und Ertragsleistung möglich	Bei standorttypischem oder niedrigem Humusgehalt: weniger humuszehrende Früchte anbauen und/oder Zufuhr organischer Dünger unter Berücksichtigung des Nährstoffvergleichs erhöhen
-200 bis -76	<u>Niedrige Humusbilanz:</u> Mittelfristig tolerierbar, insbesondere auf humusreichen Standorten	Bei niedrigerem als dem standorttypischen Humusgehalt: weniger humuszehrende Früchte und/oder Zufuhr organischer Dünger unter Berücksichtigung des Nährstoffvergleichs erhöhen
-75 bis +100	<u>Ausgeglichene Humusbilanz:</u> Optimale Ertragssicherheit bei geringem Stickstoffverlust	Empfehlenswert bei standorttypischem Humusgehalt
+101 bis +300	<u>Hohe Humusbilanz:</u> Mittelfristig tolerierbar, insbesondere auf humusarmen Standorten	Bei höherem als dem standorttypischen Humusgehalt: Zufuhr organischer Substanz reduzieren
Über +300	<u>Sehr hohe Humusbilanz:</u> Erhöhtes Risiko für Stickstoffverluste und verminderte Stickstoffeffizienz	Auf Einhaltung des zulässigen N-Überschusses achten (Düngeverordnung); bei höherem als dem standorttypischen Humusgehalt: Zufuhr von organischer Substanz reduzieren

Quelle: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2021

3 Möglichkeiten der CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden

Wie in *Kapitel 2.3* aufgezeigt, fungiert der Humus als Kohlenstoffsенke und hat eine essenzielle Rolle bei der Kohlenstoffsequestrierung. Die (Kultur-) Pflanzen nehmen das CO₂ aus der Atmosphäre und das Wasser aus dem Boden auf und erzeugen unter Einfluss von Sonnenlicht sowohl energiereiche organische Stoffe als auch Sauerstoff. Sobald die Pflanzen absterben, werden sie im Boden mithilfe von Bodenorganismen in ihre einzelnen Bestandteile zersetzt. Dabei wird ein Teil des gebundenen Kohlenstoffes wieder als CO₂ in die Atmosphäre freigesetzt und ein anderer Teil wird im Humus längerfristig im Boden festgesetzt, wenn ausreichend Biomasse vorliegt. „Dabei gilt: Je mehr organische Masse im Boden, umso mehr Humus und umso mehr Kohlenstoff kann gespeichert werden“ (Ökolandbau.de - Das Informationsportal, 2022). Die aktive Humusanreicherung in landwirtschaftlichen Böden ist demnach Klimaschutz. In Bezug auf den Humusaufbau gibt es zwei gegensätzliche Annahmen. Die erste Annahme, dass der Humusaufbau einem nicht linearen Zusammenhang zwischen dem C-Eintrag in den Boden und dem C_{org}-Aufbau folgt, ist seit langem verbreitet. Dies bedeutet, dass der Boden nicht den gesamten eingetragenen Kohlenstoff in C_{org} umwandeln kann, siehe *Abbildung 8*. Neue Ergebnisse von Begill et al. (2023) zeigten auf, dass der Humusaufbau linear verläuft. Dies würde bedeuten, dass es keine nachweisbare Obergrenze für mineralassoziierten organischen Kohlenstoff gibt, siehe *Kapitel 5.3*.

Humus ist die Grundlage der Bodenfruchtbarkeit und somit liegt der Erhalt von Humus und die Förderung des Humusaufbaus im Interesse aller Landwirte (Ökolandbau.de - Das Informationsportal, 2022). Im Folgenden werden sechs Methoden aufgezeigt, die die CO₂-Speicherung in den Böden unter landwirtschaftlicher Nutzung ermöglichen und erhöhen können. Zudem entsprechen in dieser wissenschaftlichen Ausarbeitung die Begriffe Kohlenstoff (C) und SOC alle der Definition des Begriffes C_{org}, also dem organischen Kohlenstoff, der im Boden gespeichert wird. Folglich ist mit den Begriffen C-Sequestrierung und SOC-Sequestrierung die Speicherung des atmosphärischen Kohlenstoffes im Boden der landwirtschaftlichen Flächen in Form von C_{org} gemeint.

3.1 Biokohlen

Ausgangspunkt für den Einsatz von Biokohlen auf landwirtschaftlichen Böden sind Forschungen zur Terra Preta. Terra Preta sind schwarzerde-artige fruchtbare Böden im Amazonasgebiet, die nachweislich durch anthropogenen Einfluss entstanden sind (Haubold-Rosar et al., 2016). Die Terra Preta besteht zu einem hohen Anteil aus stabilen Kohlenstoffverbindungen, die der Zugabe von Holzkohlen zugeschrieben werden. Diese stabilen C-Verbindungen werden als Hauptursache für die gute Humus-, Nährstoff- und Wasserbilanz dieser Böden angeführt (Haubold-Rosar et al., 2016). Aus diesen Erkenntnissen resultiert die Bestrebung von

Deutschland und anderen Ländern, Technologien zu organischen Bodenhilfsstoffen zu entwickeln und für die Anwendung in der Praxis zugänglich zu machen. Generell lässt sich sagen, dass Kohle die stabilste Form von partikulärem Kohlenstoff auf der Erde ist (Haubold-Rosar et al., 2016) und somit erhofft man sich, einerseits dem Klima zu helfen, indem Kohlenstoff in den Boden sequestriert wird und andererseits die Ernährung der wachsenden Weltbevölkerung zu sichern, indem die Bodenfruchtbarkeit erhalten und verbessert wird.

Für den Begriff Biokohlen gibt es keine feststehende Definition. Biokohlen entstehen, wenn Biomasse mit einem hohen organischen Anteil unter Ausschluss von Sauerstoff erhitzt wird. Dabei zerfällt die Ausgangssubstanz in flüssige, feste und gasförmige Stoffe. Der dabei entstehende feste Stoff, in dem sich der Kohlenstoff angereichert hat, wird als Biokohle bezeichnet (Teichmann & Kemfert, 2014). Der Kohlenstoffgehalt kann hierbei von 50 bis hin zu 80% betragen, wodurch ein sehr enges C/N-Verhältnis entsteht (Teichmann & Kemfert, 2014). Zudem wird durch die Inkohlung die organische Primärschubstanz stabilisiert und somit wird der mikrobielle Abbau der Biokohle verhindert bzw. stark verlangsamt (Haubold-Rosar et al., 2016). Die Ausgangsstoffe der Biokohle reichen hierbei von Holz (Holzkohle) über trockene Ausgangsstoffe, wie Stroh oder Restholz, bis hin zu nassen Ausgangsstoffen, wie Gülle, Frischpflanzenmasse, Gärresten oder Klärschlamm. Für die Herstellung von Biokohlen sind verschiedene Prozesse bekannt, wobei zwischen wässrigen und trockenen Verfahren unterschieden wird. Zu den trockenen Verfahren zählt die Herstellung über die traditionelle Pyrolyse, bei der die eben aufgezeigten trockenen Ausgangsstoffe als Basis dienen. Bei diesem Verfahren können 10-35% Biokohle aus einer Einheit Biomasse gewonnen werden (Teichmann & Kemfert, 2014). Zu den wässrigen Verfahren zählt die moderne hydrothermale Karbonisierung (HTC). Bei dieser Methode können 50-80% Biokohle aus einer Einheit Biomasse gewonnen werden. Das Verfahren ist somit wesentlich effizienter als die Pyrolyse und ein weiterer Vorteil ist, dass die nasse Biomasse ohne vorherige Trocknung verwendet werden kann (Teichmann & Kemfert, 2014).

Die Eigenschaften der Biokohlen sind vielseitig. Wie bereits erwähnt, weisen sie einen großen Anteil an stabilen Kohlenstoff auf (Teichmann & Kemfert, 2014). Zudem haben sie, resultierend aus ihrer großen inneren und äußeren Oberfläche, eine hohe Kapazität Wasser zu speichern und Haupt- und Mikronährstoffe zu binden. Denn durch die Oxidation der Oberfläche entstehen funktionelle Gruppen mit negativem Ladungsüberschuss, welche viele Kationen (bspw. Ca²⁺, Mg²⁺, Na⁺, K⁺) aufnehmen können (Haubold-Rosar et al., 2016). So können Biokohlen die Bodenqualität erhöhen, was ein erhöhtes Pflanzenwachstum bedingt, was wiederum zu einer erhöhten CO₂-Aufnahme aus dem Boden führt. Diese Eigenschaft ist besonders für degradierte und von Auswaschung bedrohte Böden von Bedeutung. Zu den tatsächlichen Gehalten von pflanzenverfügbaren Nährstoffen liegen derzeit wenige Informationen vor, klar ist aber, dass die Verfügbarkeit der Nährstoffe, besonders von Stickstoff, sehr gering ist

(Haubold-Rosar et al., 2016). In Bezug auf die Wasserspeicherfähigkeit lässt sich sagen, dass im Alterungsprozess der Biokohlen im Boden der anfangs hydrophobe Charakter abnimmt und durch Bildung von funktionellen Gruppen die Benetzbarkeit steigt. Aufgrund ihrer hohen Porosität weisen Biokohlen ein hohes Wasserhaltevermögen auf (Haubold-Rosar et al., 2016). Eine weitere entscheidende Eigenschaft der Biokohle ist, dass sich der Kohlenstoff in ihr schwerer zu CO₂ abbauen lässt als in dem Ausgangsmaterial. So könnte Biokohle den Kohlenstoff langfristig im Boden speichern (Teichmann & Kemfert, 2014). Aus Radiocarbonmessungen wurde das Alter der stabilen Kohlenbestandteile der Terra Preta im Amazonasgebiet abgeleitet. Die Messungen ergaben ein Alter von 500 bis 7.000 Jahren (Haubold-Rosar et al., 2016). Für europäische Schwarzerden wurde eine durchschnittliche Verweildauer von 1.000 bis hin zu 5.000 Jahren angegeben (Haubold-Rosar et al., 2016).

Von besonderer Bedeutung im Rahmen dieser Bachelorarbeit ist der Einfluss der Biokohlen auf die Kohlenstoffsequestrierung, weswegen diese nochmal näher erläutert wird. Bei der Ausbringung auf landwirtschaftlichen Flächen fungiert Pflanzenkohle als Senke, die über längere Zeiträume den organischen Kohlenstoff effektiv speichert und verhindert, dass das CO₂ wieder in die Atmosphäre freigesetzt wird. Ebenso kann der sehr hohe C-Gehalt zu einem höheren C-Sättigungsgrad im Boden führen. Dies bedeutet, dass durch die Zugabe von Biokohlen die natürliche C-Speicherkapazität des Bodens überschritten wird und somit zu einer Erhöhung der generellen C-Vorräte im Boden führen kann (Li & Tasnady, 2023). Eine Langzeitstudie in Nordchina kam zu dem Ergebnis, dass die Einarbeitung von Biokohle zu einem erheblichen Anstieg der mittleren jährlichen SOC-Sequestrierungsraten um 31,8% bis hin zu 47,8% führt. So werden auf den Testflächen etwa 32-48% mehr SOC gespeichert als auf den Kontrollflächen. Genauer gesagt entspricht dies etwa 369,8 bis 556,6 kg SOC pro Hektar und Jahr (Li & Tasnady, 2023), das durch den Einsatz von Biokohlen gebunden werden kann. Demnach hatte dieser Anstieg einen höheren C-Gehalt im Boden der Testflächen im Vergleich zur Kontrollfläche zur Folge. Die genannte Studie gab demnach Aufschluss über die Wirksamkeit der Biokohle zur Erhöhung der SOC-Sequestrierung. Gleichzeitig wurde herausgearbeitet, dass der Einsatz regionalspezifischer Bewirtschaftungsstrategien essenziell ist, um optimale Ergebnisse zu erzielen (Li & Tasnady, 2023). Neben dem erhöhten SOC-Sequestrierungspotential stellt die Langlebigkeit der Biokohle eine zuverlässige und langfristige Variante der C-Sequestrierung dar. Diese Langlebigkeit resultiert aus der Stabilität des Kohlenstoffs, der die Bodenaggregation verbessert und dadurch vor mikrobiellen Abbau geschützt ist. Eine Feldstudie zeigte auf, dass die Mineralisation von SOC im Boden nach zwei Ausbringungen der Pflanzenkohle über ein Jahrzehnt hinweg etwa 18% verringert wurde (Li & Tasnady, 2023). Die Biokohle bietet zudem durch die poröse Beschaffenheit Lebensräume für Bodenmikroorganismen, deren Aktivität zur Bildung stabiler Bodenaggregate beiträgt. Diese Aggregate dienen ebenfalls als schützende Umgebung für den labilen SOC, indem dessen Zersetzung behindert

und seine langfristige Sequestrierung erleichtert wird. Kurzgesagt die Biokohle erhöht den organischen Kohlenstoff im Boden, hemmt den mikrobiellen Abbau von Bodenkohlenstoff und stabilisiert labilen Kohlenstoff.

Zum Einsatz von Biokohlen kann gesagt werden, dass im Hinblick auf die Einbringung in den Boden besonders die pyrolytische Biokohle geeignet ist, da diese unter Freilandbedingungen eine wesentlich höhere Verweilzeit aufweist als HTC-Kohlen (Haubold-Rosar et al., 2016). Die Stabilität der Kohlen ist von vielen Faktoren abhängig, wie der Art der Kohle, Ausgangsmaterial, Herstellungsart, Prozessführung, sowie vom Standort und Landnutzungsart. Es gibt für pflanzenbaulich genutzte Böden in den gemäßigten Breiten aktuell keine standort- und nutzungsbezogenen Aufwandsmengen, denn Untersuchungen können hierzu bislang keine hinreichenden belegbaren Empfehlungen geben (Haubold-Rosar et al., 2016). Auch lässt sich nicht sagen, welche langfristigen Effekte der Einsatz geringer oder wiederholter Gaben von Biokohlen hat. Was sich sagen lässt ist, dass erst wenn mindestens 5-10 t (TM) Biokohle pro Hektar aufgewandt werden, sich durch die bodenmeliorativen Effekte die Ertragsfähigkeit der oft sandigen Standorte zu verbessern scheinen (Haubold-Rosar et al., 2016). Der größte wirtschaftliche Nutzen von Biokohleanwendung ist einerseits im Anbau wertvoller Kulturen, wie Gemüse, Zierpflanzen oder der Pflanzenvermehrung/ -zucht zu erwarten, andererseits können ertragsschwache Böden von einer Behandlung mit Biokohlen profitieren. So ist der wirtschaftliche Einsatz von Biokohlen in der Landwirtschaft besonders für Gemüsebau- und Pflanzenvermehrungsbetriebe, sowie für ertragsschwache Standorte zu erwarten.

Abschließend ist zu sagen, dass eine Untersuchung für Deutschland von Isabell Teichmann ergeben hat, dass der Einsatz von Biokohle ab dem Jahr 2030 mit einem technischen Treibhausgasverminderungspotential von jährlich 2,8 bis 10,2 MT CO₂-Äquivalenten verbunden sein könnte (Teichmann & Kemfert, 2014). Laut Statista (2024) wurden im Jahr 2022 deutschlandweit rund 657 MT CO₂-Emissionen verursacht, sodass durch Biokohlen rund 0,43-1,55% der aktuellen CO₂-Emissionen ausgeglichen werden könnten.

3.2 Wiedervernässung von Mooren

Moore entstehen dort, wo langfristig hohe Grundwasserstände herrschen. Die durch das Wasser entstehenden anaeroben Bedingungen sorgen dafür, dass die Zersetzung von anfallendem organischem Material eingeschränkt ist. Dadurch wird das Pflanzenmaterial viel langsamer abgebaut, als neues gebildet wird. Infolgedessen entsteht Torf (Breckle, 2023), in dem Kohlenstoff dauerhaft festgelegt wird (Birr et al., 2021) und das sehr erfolgreich, denn Moore gelten als größter terrestrischer Kohlenstoffspeicher (Deutscher Bundestag, 2023). Weltweit betrachtet speichern Moore ca. 550 Mrd. Tonnen Kohlenstoff im Torf. Deutschlandweit liegt dieser Wert noch bei 1,2-1,4 Mrd. Tonnen C (Breckle, 2023). Besonders beachtlich ist, dass

somit auf nur 3% der Erdoberfläche, die die Moore bedecken, ca. 30% des weltweiten Bodenkohlenstoffes gespeichert wird (Breckle, 2023). Diese anhaltende CO₂-Senkenfunktion von natürlich vorliegenden Mooren verringert nachweislich die CO₂-Konzentration in der Atmosphäre. So haben Moore das Klima weltweit in den letzten 10.000 Jahren um ca. 0,6°C abkühlen können (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Man muss dennoch beachten, dass obwohl ein Moor CO₂ einspeichert, es trotz dessen nicht klimaneutral ist. Dies liegt daran, dass naturnahe Moore Sumpfgase (Methan) emittieren (Breckle, 2023), welche durch die anaeroben Zersetzungsprozesse freigesetzt werden.

Ein Problem im Zusammenhang mit den Mooren entsteht erst bei der Kultivierung der Flächen. Hierbei werden die Flächen für die Bewirtschaftung entwässert und einerseits wird der gespeicherte Bodenkohlenstoff wieder in die Atmosphäre abgegeben, andererseits werden aber die gebundenen Nährstoffe wieder freigesetzt. Fakt ist, dass Moore aktuell zehn-mal schneller verloren gehen als sie wachsen. Dabei ist Europa der Kontinent mit den bis dato größten Verlusten (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Hierbei verursacht 1 Hektar entwässertes Moor CO₂-Emissionen in Höhe eines PKWs, der 4,5-mal die Erde umrunden würde (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Das Ausmaß der Entwässerung deutscher Moore ist sichtbar. Vor der Industrialisierung waren ca. 5% der deutschen Flächen Moore, heutzutage sind noch 3,6% Moore, wovon wiederum >95% entwässert sind (Breckle, 2023). Konkret bedeutet dies, dass die 1,8 Mio. ha Moorböden bzw. Anmoorböden, die zum Großteil land- und forstwirtschaftlich bedingt entwässert sind, jährliche Treibhausgas-Emissionen in Höhe von 53 Mio. t CO₂-Äquivalenten erzeugen. Dies entspricht 6,7% der deutschen THG-Emissionen (Birr et al., 2021). Von der Heinrich-Böll-Stiftung et al. (2023) wird gesagt, dass die Klimafolgen in Deutschland durch landwirtschaftlich genutzte und entwässerte Moore jährlich bei ca. 7,2 Mrd. € liegen, das wäre nur geringfügig weniger als die Nettowertschöpfung der gesamten deutschen Landwirtschaft (8,1 Mrd. €). Somit sind Moore in Deutschland von CO₂-Senke zu einer CO₂-Quelle geworden.

Aus diesen Gründen und um die Ziele des Pariser Klimaabkommens für den Erhalt der natürlichen Lebensgrundlagen zu erreichen, müssten in Deutschland rund 50.000 Hektar, in der EU ca. 500.000 ha und weltweit 2 Mio. ha Moore wieder vernässt werden (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Darüber hinaus hat das Bundeskabinett im November 2022 die Nationale Moorschutzstrategie beschlossen, mit der der politische Rahmen für Moorschutz auf Bundesebene vorgegeben wird. Das Ziel ist, die jährlichen THG-Emissionen aus Moorböden bis zum Jahr 2030 um mindestens 5 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente zu senken. Das zentrale Instrument, das für das Erreichen dieses Zieles angeführt wird, ist die Wiedervernässung trockengelegter Moore (Deutscher Bundestag, 2023). Denn laut fundierten Schätzungen könnte eine klimafreundlich durchgeführte Wiedervernässung deutschlandweit etwa 35 Mio. Tonnen CO₂-Äquivalente einsparen (Breckle, 2023).

Wie bereits erwähnt ist der wichtigste Faktor, der die CO₂-, Methan- und Lachgas-Emissionen von Moorböden beeinflusst, der Wasserstand. „Wasser ist [...] das Lebenselixier des Moores“ (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). So werden Niedermoore durch das Grundwasser und Hochmoore durch Niederschlag gespeist, was für anaerobe Bedingungen im Moorboden sorgt. Wenn der Wasserstand jedoch (künstlich) abgesenkt wird, gelangt Sauerstoff in den Boden, der Torf wird durch Mikroorganismen zersetzt und das Treibhausgas (THG) CO₂ wird freigesetzt. Im Interesse des Klimaschutzes sollten Moore demnach immer „einen Wasserstand nahe der Bodenoberfläche aufweisen“ (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Da jedes Moor anderes ist, wird jede Wiedervernässung vor Ort angepasst an die Gegebenheiten geplant. Die regionalen Wasserflüsse müssen Beachtung finden, genauso wie die Höhenunterschiede im betroffenen Gelände, aber auch die Eigenschaften und Mächtigkeit der vorhandenen Torfschicht. Des Weiteren muss im Sinne des Naturschutzes darauf geachtet werden, welche Pflanzen und Tiere in dem trockengelegten Moor heimisch sind und wie deren Lebensraum durch eine Wiedervernässung beeinflusst werden würde (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Auf dieser Grundlage entsteht dann ein Plan, welche optimale Wasserhöhe angestrebt wird. Prinzipiell ist der erste Schritt der Wiedervernässung das Abstellen der Pumpen bzw. das Entfernen der Drainagen. Folgend wird abhängig vom Moortyp gehandelt. Im Allgemeinen werden bei Hochmooren meist Dämme gebaut, die dafür sorgen, dass sich Wasser auf der Fläche staut. Auf manchen Hochmoorstandorten kann es dahingegen sinnvoller sein, Teichfolien senkrecht einzuziehen, sodass das seitliche Abfließen von Wasser verhindert wird (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Bei Niedermooren hingegen muss man die umliegende Gegend großflächiger betrachten, da diese Moore durch Grund- und Oberflächenwasser gespeist werden. Es könnte beispielweise ein Bach, der durch die Niederung fließt, als Wasserquelle genutzt werden. Im optimalen Fall ist dieses Wasser nährstoffarm, sodass sich moortypische Arten wie Orchideen oder Kleinseggen wieder ansiedeln können. So sollte das nährstoffreiche Wasser, welches aus landwirtschaftlich genutzten Flächen kommt, im Randbereich des Moores angestaut werden (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Nach den ersten Schritten der Wiedervernässung, muss ein umfangreiches Monitoring stattfinden, um zu überprüfen, wie sich die gewählten Methoden auf die Flächen und deren Umgebung auswirken. Die Wiedervernässung kann entscheidend zum Klimaschutz beitragen, da durch den Sauerstoffabschluss die Torfzersetzung fast zum Erliegen kommt und somit die CO₂-Emissionen stark reduziert werden (Breckle, 2023).

Ein Problem bei der Wiedervernässung wurde durch das Faktenpapier: Die Rolle von Methan bei Moor-Wiedervernässung der Uni Greifswald und Uni Rostock beleuchtet (Deutscher Bundestag, 2023). So senken wiedervernässte Moore zwar den CO₂ Ausstoß, führen gleichzeitig dennoch zu höheren Methan-Emissionen. „Entwässerte Moore weisen nahezu keine CH₄-Freisetzung aus dem trockenen Boden auf. Allerdings werden aus den

Entwässerungsgräben oft große Mengen CH₄ freigesetzt. Außerdem kann Beweidung durch wiederkäuende Tiere, wie sie auf entwässerten Mooren in Deutschland typisch ist, erheblich zu den atmosphärischen CH₄-Flüssen des Ökosystems beitragen. Methanemissionen aus wiedervernässten Mooren sind in ihrer Höhe meist vergleichbar mit denen aus natürlichen, nicht entwässerten Mooren. Allerdings kann es direkt nach Wiedervernässung zu höheren CH₄-Emissionen kommen, insbesondere bei Überstau. Diese Emissionen sinken in den Folgejahren in der Regel jedoch rasch auf ein für nasse Standorte übliches Niveau. Sobald sich nach 5-10 Jahren eine geschlossene moortypische Vegetationsdecke gebildet hat, gleichen die Emissionen von wiedervernässten Mooren denen natürlicher Moore. Durch die CH₄-Emissionen bleibt die Klimawirkung eines wiedervernässten Moores oft leicht klimaerwärmend, ist aber insgesamt viel geringer als im vorherigen entwässerten Zustand“ (Deutscher Bundestag, 2023).

Zudem entsteht bei der Wiedervernässung ein Konflikt zur Landwirtschaft. Auf den wiedervernässten Flächen können keine typischen Kulturpflanzen wachsen. Daher müssen Landwirte auf Paludikulturen oder das Halten von Wasserbüffeln zurückgreifen, um diese Flächen bewirtschaften zu können. Die Paludikulturen ermöglichen land- und forstwirtschaftliche Produktion auf den nassen Moorböden bei gleichzeitigem Erhalt des Torfkörpers durch ganzjährig möglichst hohe Wasserstände im Moor (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Dabei werden Paludikultur-Pflanzen angebaut, die Nässe gut vertragen, Biomasse ausreichender Quantität und Qualität erzeugen und dabei zur Torfbildung beitragen (Breckle, 2023). Zu diesen zählen Schilf, Torfmoose, Rohrkolben, Erlen, Seggen sowie andere Gräser. Grundprinzip ist hierbei nur den Anteil zu ernten, der nicht für die Nettoprimärproduktion der Torfbildung benötigt wird (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Im Vordergrund steht dabei nicht die Produktion von Lebensmitteln, sondern die Herstellung von nachwachsenden Rohstoffen. Für Landwirte stellt der Wechsel der Bewirtschaftung eine enorme Herausforderung dar, da neue Pflanzenbestände angelegt, die Wasserstände angehoben und neue Maschinen gekauft werden müssen. Zudem sind häufig Baumaßnahmen nötig, die die notwendige Planung und Genehmigung bedürfen. Gleichzeitig besteht aber die Gefahr eines kleinen Marktes und schlechter Vermarktung.

Dennoch müssten jährlich 50.000 Hektar Moor wiedervernässt werden, wobei es tatsächlich zurzeit nur 2.000 Hektar sind (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Eine Möglichkeit, um das Ziel der 50.000 Hektar zu erreichen, sind CO₂-Zertifikate. Diese finanzieren freiwillige Wiedervernässungsmaßnahmen zum Torferhalt.

3.3 Landnutzungsänderung und Dauergrünlanderhalt

Dauergrünlandflächen stellen aufgrund der permanenten Bodenbedeckung einen wichtigen Beitrag für den Boden- und Gewässerschutz dar und tragen somit einen Teil zum Klimaschutz bei. Zudem lässt sich sagen, dass Grünland höhere Humusgehalte aufweist als Ackerland (Jacobs et al., 2018), sodass die Vorräte an C_{org} deutlich mit der Landnutzungsart in Verbindung gebracht werden können. So weisen „Mineralböden unter Ackernutzung in Deutschland [...] in der Bodentiefe 0–30 cm im Mittel einen Vorrat an organischem Kohlenstoff von 61 t/ha auf und haben damit 31 % weniger organischen Kohlenstoff als Böden unter Grünlandnutzung mit 88 t/ha“ (Deutscher Bundestag, 2021). Hierbei befinden sich 65% des organischen Kohlenstoffes im Oberboden und 35% im Unterboden, sodass mineralische Oberböden durch den Kohlenstoffeintrag aus organischen Düngern, sowie Wurzel- und Ernteresten kohlenstoffreicher sind als die Unterböden (Deutscher Bundestag, 2021). Demnach spielt Grünland eine wichtige Rolle bei der Kohlenstoffsequestrierung, denn Grünland speichert 34% des terrestrischen Kohlenstoffes, wovon ca. 90% des Kohlenstoffes unter der Erde als Wurzelbiomasse und organischem C gespeichert wird (Bai & Cotrufo, 2022). Die hohen Vorräte an C_{org} sind darüber hinaus sehr anfällig für menschliche Störungen und den Klimawandel. Es ist ein weltweiter Rückgang sowohl der Artenvielfalt als auch der Ökosystemfunktionen zu verzeichnen. Dies führt unter anderem zu einer Verringerung der C_{org}-Speicherung im Boden (Bai & Cotrufo, 2022). Ein bestehendes Problem ist, dass sich die Grünlandflächen zwischen 1991 und 2013 proportional zum Rückgang der landwirtschaftlichen Fläche bundesweit verringert haben. Seit 2015 gilt das Dauergrünlanderhaltungsgebot im Rahmen des Greenings, sodass die Dauergrünlandfläche wieder leicht ansteigt (Umweltbundesamt, 2019).

Wie bereits erwähnt wird C_{org} einerseits durch ober- und unterirdische Biomasse der Grünlandpflanzen (ggf. auf Feld verbleibender Mulchschnitt, absterbende oberirdische Pflanzenteile, Wurzel und Wurzelexsudate) und andererseits durch organische Düngung oder Weidetiere in den Boden eingebracht (Jacobs et al., 2018). Aktuelle Studien zeigen zudem, dass eine größere Pflanzenvielfalt auf dem Grünland die Speicherung von SOC im Boden erhöht. Auch hier wird bestätigt, dass dies einerseits durch den erhöhten Kohlenstoffeintrag der unterirdischen Biomasse und andererseits durch den Beitrag der mikrobiellen Nekromasse geschieht (Bai & Cotrufo, 2022). Bestätigt wurden die höheren Gehalte von C_{org} durch die BZE-LW. Diese hat herausgefunden, dass mineralische Böden unter Dauergrünlandnutzung C_{org} Gehalte in Höhe von 44 ± 20 g/kg in 0-10 cm bis hin zu 5 ± 10 g/kg in 70-100 cm aufweisen. Ackerböden hingegen enthielten deutlich geringe C_{org}-Gehalte in Höhe von 17 ± 9 g/kg in 0-10 cm bis zu 2 ± 3 g/kg in 70-100 cm (Jacobs et al., 2018). Neben dem erhöhten Eintrag von C_{org} spielt auch die geringere Bodenbearbeitung eine wichtige Rolle. Der Boden wird auf

Grünlandflächen nicht mechanisch gestört, sodass sich die Bodenstruktur und Aggregation entwickeln kann, die folglich zu einer Stabilisierung der organischen Substanz führt (Jacobs et al., 2018).

Im Generellen lässt sich demnach sagen, dass Landnutzungsänderungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen die Dynamik von SOC in landwirtschaftlichen Böden beeinflussen (Emde et al., 2023). Besonders die Landnutzungsänderungen zählen zu den Eingriffen, die den C_{org}-Vorrat im Boden mit am stärksten beeinflussen. So hat die Umstellung von natürlicher Vegetation auf die landwirtschaftliche Bewirtschaftung zu Verlusten von weltweit 5% des aktuellen terrestrischen Kohlenstoffbestandes geführt (Bai & Cotrufo, 2022). Der C_{org}-Vorrat ist vulnerabel und geht nach dem Grünlandumbruch schnell verloren. Zudem werden durch den Umbruch von Grünland Nitrat (NO₃⁻), Lachgas (N₂O) und Kohlendioxid (CO₂) in die Hydro- und Atmosphäre freigesetzt (Umweltbundesamt, 2023a). In einer Metaanalyse zu Landnutzungsänderungen fanden Jacobs et al. (2018) heraus, dass es durch Grünlandumbruch in der temperaten Klimazone zu einer durchschnittlichen Abnahme von 36% des C_{org}-Vorrates im Boden kam. Dieser Kohlenstoffverlust ist allerdings reversibel. Der Aufbau und die Rückgewinnung von C_{org} ist dahingegen ein langsamer und langfristiger Prozess, der länger als 100 Jahre dauern kann. Diese allgemein gültige Annahme nach dem Paradigma „langsam rein, schnell raus“ wurde durch eine Studie von (Emde et al., 2023) in Frage gestellt. In dieser Studie wurde herausgefunden, dass auf nationaler Ebene die SOC-Verluste bei Umwandlung von Grünland in Ackerland im Oberboden relativ langsam von statten gingen, während wenn Ackerland in Grünland umgewandelt wird, die SOC-Erhöhung relativ schnell geschieht (Emde et al., 2023). Dennoch ist der Schutz von Dauergrünland eine wichtige Maßnahme für den Erhalt und den Aufbau von C_{org}-Vorräten in Ackerböden, da Grasland meist ähnliche SOC-Gehalte aufweist wie die natürliche Vegetation. Die Umwandlung von Acker- in Grünland ist ebenfalls eine effektive Maßnahme zur Erhöhung der C_{org}-Vorräte. Durch eine Neuanlage von Dauergrünlandflächen kann langfristig mit einem durchschnittlichen C_{org}-Aufbau von 0,73 t/ha und Jahr zu rechnen sein (Wiesmeier et al., 2020).

In einem Bericht von Meyer, et al. (2023) wurden Maßnahmen für Kohlenstoffsequestrierung in Grünlandböden Österreichs aufgeführt. Die Grundlagen ist: keine Umwandlung von Dauergrünland zu Ackerland. Dazu sollte eine mittlere Nutzungsintensität aufrechterhalten werden, also 2-4 Nutzungen/Jahr und eine nutzungsorientierte regelmäßige Düngung mit Mist oder Stallmistkompost. Dieser sollte durch die Förderung von Tierhaltungssystemen mit Mist und Einstreumaterial aus lokalen Systemen entstammen. Ebenso kann die Ausbringung der Feststofffraktion aus der Gülleseparierung zum Einsatz kommen. Hinzu kommt ein boden- und vegetationsschonendes Weidemanagement, die Förderung der Durchwurzelung durch Vermeidung von Bodenverdichtungen und Übernutzung, sowie die Erhöhung des Deckungsgrades von Tiefwurzlern. Ebenso muss das Bodenleben durch biodiversitätsfördernde und

bodenschonende Bewirtschaftung gefördert werden und der natürliche Grundwasserstand sollte erhalten bzw. auf entwässerten Flächen angehoben werden. Zum Schluss wird den humuserhaltenden und die Humusqualität verbessernde Maßnahmen eine höhere Relevanz zugesprochen als den humussteigernden. Dies liegt daran, dass eine natürliche Humussteigerung nur sehr langsam möglich ist und der Verlust von Beginn an vermieden werden muss. „Zudem ist der positive Effekt von humussteigernden Maßnahmen auf Ertrag, Futterqualität und Ertragssicherheit in typischen Dauergrünlandböden in der Regel gering. In solchen Böden kann eine nachhaltige Steigerung der Bodenfruchtbarkeit vor allem durch Maßnahmen zur Verbesserung der Humusqualität (Optimierung des Verhältnisses von Kohlenstoff zu Stickstoff im Oberboden) und zur Beschleunigung des jährlichen Humusumsatzes im Boden erzielt werden“. (Meyer et al., 2023)

3.4 Agroforst

Auf globaler Ebene ist Agroforst in verschiedenen Formen als Landnutzungssystem verbreitet, wobei die landwirtschaftlichen Flächen mit Gehölzen kombiniert werden. Die Vorteile dieser Systeme wirken sich auf diverse Bereiche aus. So verbessern sie einerseits den Boden und erhöhen den Erosionsschutz, die Nährstoffverfügbarkeit und die Humusbildung. Andererseits wird auch die biologische Vielfalt und die Biodiversität erhöht. Zudem wird das Mikroklima nachweislich verbessert und das Landschaftsbild wird aufgewertet. Der in Bezug auf diese wissenschaftliche Arbeit spannende Aspekt ist, dass in Agroforstsystemen atmosphärischer Kohlenstoff sowohl in der Biomasse der Gehölze als auch im Boden festgelegt wird. So weisen Studien darauf hin, dass es zu einem durchschnittlichen C_{org}-Aufbau im Boden von 0,68 t/ha und Jahr kommt. (Wiesmeier et al., 2020)

Hierbei können Agroforstsysteme auf mehreren Wegen die Bindung von Treibhausgasen beeinflussen. Erstens durch die Sequestrierung im Holz, genauer der oberirdischen Biomasse. Hierbei kommt es im Inneren der Hecken aufgrund des Blattstreufalls und der nicht vorgenommenen Bodenbearbeitung zu einer nennenswerten Humusanreicherung im Boden (Zehlius-Eckert et al., 2020). Als Zweites führt neben der Bindung durch die oberirdische Biomasse auch die unterirdische Biomasse zu einem erhöhten Bindungspotential für Kohlenstoff. Studien zeigen auf, dass mit Zuwachsraten von 0,3 bis 0,6 t C/ha und Jahr für Gehölzplantagen, die im Kurzumtrieb bewirtschaftet wurden, zu rechnen ist. Dies ergibt eine Kohlendioxidbindung von 1,1 bis 2,2 t/ha und Jahr (Zehlius-Eckert et al., 2020). Wichtig in dem Kontext dieser Ausarbeitung ist der dritte Aspekt, denn durch Agroforstsysteme kommt es zur Sequestrierung von Kohlenstoff im Boden, also zu Humusaufbau.

In dem direkten Einflussbereich kommt es zur Zunahme von C_{org} im Oberboden. Allerdings können ausgelöst durch die Bodenzerstörung bei der Pflanzung der Gehölze zunächst

negative Sequestrierungsraten auftreten (Hübner et al., 2023). Im Laufe der Jahre, in denen Agroforstsysteme etabliert sind, kann allerdings ein Anstieg der C_{org}-Vorräte in Ober- und Unterböden beobachtet werden. Zurückgeführt wird dieser Anstieg auf den Eintrag von organischer Substanz der Bäume und Sträucher durch Streufall, Wurzelumsatz, Rhizodeposition und dem Unterwuchs innerhalb der Baumreihen (Hübner et al., 2023). Im direkten Einflussbereich kann es trotzdem bereits ab 10-30cm zu geringeren C_{org}-Werten kommen als auf vergleichbaren Ackerflächen. Dies lässt sich damit erklären, dass keine bodenwendende Bearbeitung mehr praktiziert wird und so der Eintrag von Ernteresten und anderer Organik in die tieferen Bodenschichten nicht mehr gegeben ist (Zehlius-Eckert et al., 2020). Ebenfalls gibt es Wechselwirkungen zwischen den Gehölz-Wurzeln und der bereits vorhandenen organischen Substanz. Durch den erhöhten Wasserentzug kann es zu einer besseren Sauerstoffversorgung in den tieferen Bodenschichten und folglich zur Oxidierung der organischen Substanz kommen (Zehlius-Eckert et al., 2020). Zudem wird die Zusammensetzung der Bodenlebewesen beeinflusst. Wie nun aufgezeigt ist die Eintragung von zusätzlichem Kohlenstoff durch organische Substanz der wichtigste Faktor für die SOC-Sequestrierung in Agroforstsystemen. Daneben wirken sich höchstwahrscheinlich weitere Aspekte positiv auf die C_{org}-Bilanz aus. Dazu zählen die „verringerte Wind-/Wassererosion oder die Deposition von erodiertem Bodenmaterial, eine verringerte Zersetzung durch abbauresistentere Streu (insbesondere Nadelbäume), verminderte Bodenstörungen und ein verbesserter physikalischer Schutz der organischen Substanz durch Aggregatbildung“ (Hübner et al., 2023). Durch diese Prozesse wird der Humusaufbau auch in den angrenzenden landwirtschaftlichen Flächen gefördert. Die Erträge und somit auch die Höhe des Kohlenstoffeintrages sind aufgrund der verbesserten mikroklimatischen Bedingungen erhöht (Hübner et al., 2023). Bei Rotationen der Gehölzflächen, deren Dauer über 25 Jahre beträgt, können die landwirtschaftlichen Nutzpflanzen auch direkt von der Humusbildung profitieren (Hübner et al., 2023). Allgemein lässt sich außerdem sagen, dass die Kohlenstoffbindung, anders als bei der Wiedervermässung, nicht mit der Bildung von Lachgas oder Methan kompensiert wird. So kann gesagt werden, dass eine bessere Treibhausgasbilanz im Vergleich zu ackerbaulich genutzten Böden entsteht, deren Quantität aufgrund der vielfältigen Einflussfaktoren allerdings schlecht kalkulierbar ist (Hübner et al., 2023). Auf Ackerböden mit Weiden- und Pappelbeständen in Mecklenburg-Vorpommern konnte nach sechs Jahren des Wachstums im Vergleich zu einer Kontrollfläche eine C-Anreicherung von 3,8 bis 4,8 t/ha in 0-10 cm Bodentiefe aufgezeigt werden (Hübner et al., 2023). Zudem können Treibhausgase durch den Wegfall von Bearbeitungsgängen und Betriebsmitteleinsatz wie Düngern vermieden werden (Zehlius-Eckert et al., 2020). Dadurch dass Grünland im Generellen einen deutlich höheren C_{org}-Vorrat aufweist, ist auf Grünlandflächen eine geringe zusätzliche Kohlenstofffixierung zu erwarten. Sodass gesagt werden kann, dass Agroforstsysteme auf Ackerland deutlich effektiver sind als auf Grünlandflächen (Wiesmeier et al., 2020).

Die Agroforstwirtschaft ist in Deutschland bislang besonders in Form von Hecken und Streuobstwiesen verbreitet, sodass moderne Energie- und Wertholzsysteme hierzulande noch keine bedeutende Rolle spielen (Wiesmeier et al., 2020). Eine Metaanalyse von 83 Standorten hat ergeben, dass sich die SOC-Gehalte in Böden unter Hecken im Vergleich zum angrenzenden Ackerboden im Durchschnitt um $32 \pm 23\%$ erhöhen. Hierbei wurde geschätzt, dass Hecken mit 104 ± 42 Mg/ha mehr Kohlenstoff speichern als Ackerland, wozu die Biomasse mit 84% und der Boden mit 16 % dazu beitragen. Diese Ergebnisse zeigen, dass die Vorräte von Kohlenstoff in Hecken etwa mit den Schätzungen für Waldböden vergleichbar sind. Als Einflussfaktoren auf die Höhe der SOC-Speicherung werden die Pflanzenzusammensetzung, die Heckeneigenschaften, sowie das Alter der Hecke genannt. In Deutschland werden Hecken zunehmend an Bedeutung gewinnen, da sie im Rahmen des Klimaschutzprogrammes 2030 der Bundesregierung als Maßnahme zur C-Sequestrierung genannt werden. Somit wird diese Maßnahme auch für die CO₂-Zertifizierung wichtig. (Drexler et al., 2021)

3.5 Fruchtfolgegestaltung und Einsatz von Zwischenfrüchten

Durch die Gestaltung der Fruchtfolge und der gezielten Bewirtschaftung lässt sich organischer Bodenkohlenstoff im Ackerboden anreichern. Hierbei kommen folgende Faktoren zum Tragen: relativ kurze Brachzeiten der Ackerflächen, große Mengen an auf der Ackerfläche verbleibender Ernte- und Wurzelrückstände (EWR), sowie die Durchwurzelungsintensität und -tiefe der jeweils angebauten Kulturen (Don et al., 2018). Insgesamt wird von Kolbe und Zimmer (2015) gesagt, dass durch den Anbau von Feldfutter, Untersaaten und Körnerleguminosen auf allen Standorten positive Humusbilanzsalden entstehen, da die EWR-Mengen dieser Kulturen im gewissen Umfang höher sind als der jährliche Humusabbau auf den Flächen. Hierbei kann man Zwischenfrüchte und Untersaaten als Maßnahme ansehen, die zusätzlich zur primären Kultur organische Masse auf die Ackerflächen einbringen. Pflanzen, die diese Merkmale erfüllen und somit einen positiven Humus-Koeffizienten aufweisen, tragen zum Aufbau der C_{org}-Vorräte auf dem Acker bei und werden als Humusmehrer bezeichnet. Zu diesen Pflanzen zählen unter anderem Gras, Klee, Leguminosen bzw. Luzernegrasgemenge und Körnerleguminosen, siehe *Abbildung 4*, in dunkelgrün dargestellt. Dabei sind die zu beobachtenden C-Sequestrierungsraten je nach Kultur sehr unterschiedlich und können von 0,15 bis 0,36t/ha und Jahr betragen (Wiesmeier et al., 2020). Im Gegensatz zu den Humusmehrern gibt es auch die humuszehrenden Kulturen, in *Abbildung 4* hellgrün dargestellt. Dabei gilt, je mehr Getreide, besonders Mais, und Hackfrüchte in der Fruchtfolge sind, desto negativer wird das Humus-saldo ausfallen (Kolbe & Zimmer, 2015).

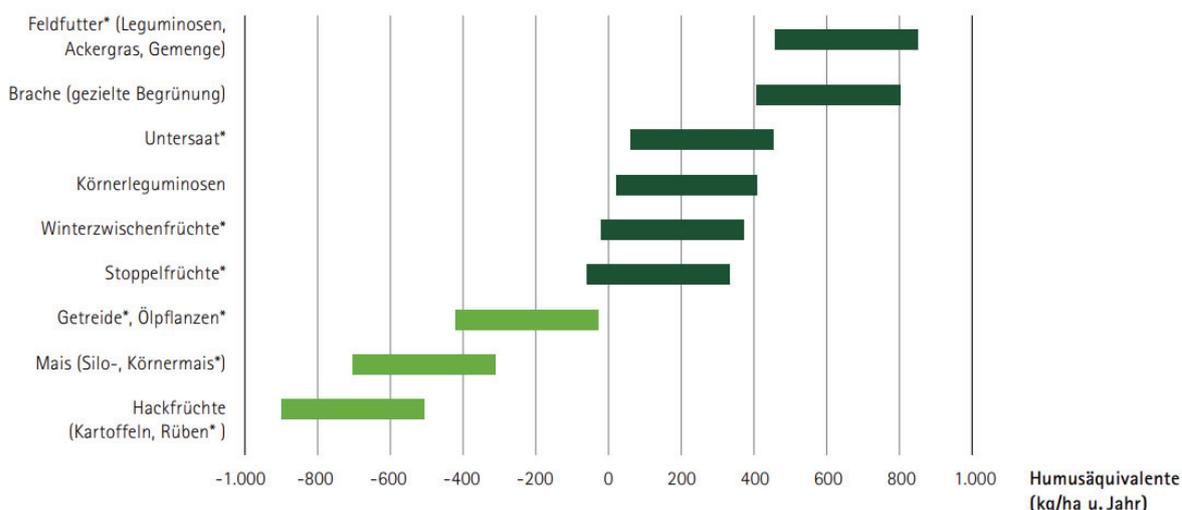


Abbildung 4: Humuskoeffizienten (HÄQ) ausgewählter Fruchtarten

Quelle: Kolbe und Zimmer, 2015, S. 14

EWR werden durch den periodischen Anbau von Fruchtarten und Zwischenfrüchten gebildet und verbleiben nach der Ernte auf dem Feld. Dahingegen weisen bspw. Körnerleguminosen, sowie Stoppel- und Hackfrüchte eher geringe EWR-Mengen auf, die nach der Ernte auf den Ackerflächen verbleiben (Kolbe & Zimmer, 2015). Mehrjährige Kulturen wie Ackerfutter, aber auch Untersaaten und Wintergetreide hinterlassen in Abhängigkeit von ihrem Ertragsniveau und verursacht durch die fehlenden Brachzeiten und die intensive Durchwurzelung relativ hohe EWR-Mengen.

Eine Studie aus Schweden hat ergeben, dass die Bodenkohlenstoffgehalte auf Ackerland, zwischen 1990 und 2010 durch den Anstieg von Ackergrasanbau von 35% auf 50% der Gesamtackerfläche, um 8% erhöht werden konnten (Don et al., 2018). Ein weiterer norwegischer Langzeitversuch über 52 Jahre hat ergeben, dass „eine Erhöhung des Bodenkohlenstoffgehalts in 0-25 cm Bodentiefe um 9%, 23% und 45% durch die Integration von zwei, drei oder fünf Jahren Ackergras in einer sechsjährigen Rotation erreicht [werden kann]“ (Wiesmeier et al., 2020). Darüber hinaus wurde in einer weiteren schwedischen Studie herausgefunden, dass sich bei zwei Jahren Ackergras in einer 5-jährigen Fruchtfolge eine jährliche Kohlenstoff-Akkumulation von 168 kg C/ha ergibt (Wiesmeier et al., 2020). Zu den EWR-Einträgen haben auch tiefwurzelnde Pflanzen eine große Bedeutung für die C-Sequestrierung. Durch sie gelangt Kohlenstoff in den Unterboden, in denen unter normaler Ackernutzung mit flachwurzelnden Kulturen niedrige Kohlenstoffgehalte vorzufinden sind. Zudem werden so auch die Nährstoffe und das Wasser aus den tieferen Bodenschichten für die Pflanzen nutzbar. Ausgehend von der heutigen Züchtung und der optimierten Düngung, wird davon ausgegangen, dass die heutigen Kulturpflanzen eine reduzierte Durchwurzelungsintensität und -tiefe haben. Die durch die tiefwurzelnden Fruchtfolgeglieder entstehenden Bioporen können der nachfolgenden Kultur helfen, das Wasser und die Nährstoffe aus dem Unterboden zu erreichen und zu nutzen.

Welchen Einfluss dies auf die zusätzliche Bodenkohlenstoffspeicherung hat, ist bislang nicht bekannt (Wiesmeier et al., 2020).

Neben der beschriebenen EWR-Quantität, also der Menge, die auf dem Acker verbleibt, sind auch die EWR-Qualität und weitere Faktoren für die Kohlenstoffbindung von Bedeutung. Hierzu zählen unter anderem: die Anbaudauer, die humifizierende Wirkung der Kulturen, die Bodenruhe, das C/N-Verhältnis der EWR, die Eigenschaften des Standortes, sprich Klima- und Bodenverhältnisse, sowie von den verschiedenen Maßnahmen der Bewirtschaftung (Kolbe & Zimmer, 2015). Insgesamt kann man sagen, dass aufgrund des Anbaus von Feldfutter, Untersaaten und Körnerleguminosen auf allen Standorten positive Humusbilanzsalden entstehen, da die EWR-Mengen dieser Kulturen im gewissen Umfang höher sind als der jährliche Humusabbau auf den Flächen (Kolbe & Zimmer, 2015). Hierbei kann man Zwischenfrüchte und Untersaaten als Maßnahme ansehen, die zusätzlich zur primären Kultur organische Masse auf die Ackerflächen einbringt.

Die einfachste Maßnahme, um Kohlenstoff über eine angepasste Fruchtfolge im Boden zu binden, ist der Einsatz von Zwischenfrüchten (ZF). Der ZF-Anbau gilt als kostengünstige Lösung zur SOC-Sequestrierung, die sich zudem nicht negativ auf die landwirtschaftliche Produktion auswirkt und somit zur Vermeidung des Leakage-Effektes beiträgt. Für eine Studie zum SOC-Sequestrierungspotential in Deutschland wurde mit Daten von 1.267 Ackerflächen ein Modell entwickelt, das den Kohlenstoffeintrag von Zwischenfrüchten abschätzen kann und gleichzeitig die Auswirkungen von Klima, Aussaatdatum, Haupt- und Zwischenfruchtart berücksichtigt. Ein Ergebnis dieser Studie ist, dass bislang nur ein Drittel der Winterbrachflächen in den deutschen Fruchtfolgen für den Zwischenfrucht-Anbau genutzt werden, sodass die ZF-Fläche in Deutschland etwa verdreifacht werden kann. Wenn die gesamte Fläche für den ZF-Anbau genutzt werden würde, erhöhe sich der Kohlenstoffeintrag um 12% und die SOC-Vorräte würden sich innerhalb von 50 Jahren um 35 Tg ($\approx 35.000.000$ t) erhöhen (Seitz et al., 2022). Jährlich bedeutet dies ein Anstieg von 0,06 t C/ha oder 2,5 Tg ($\approx 2.500.000$ t) CO₂, oder 0,8 ‰ der aktuellen SOC-Vorräte. Auf den jeweiligen Flächen, auf denen mit Zwischenfrüchten gearbeitet wird, würden innerhalb von 50 Jahren durchschnittlich 0,28-0,33 t C/ha und Jahr gespeichert werden (Seitz et al., 2022). Auch in Wiesmeier et al. (2020) heißt es, dass durch einen jährlichen Zwischenfruchtanbau mit Gründüngung im Mittel 0,32 t C/ha und Jahr aufgebaut werden könnten. Die Simulationen von Seitz et al. (2022) zeigten zudem auf, dass auch wenn das volle Potential für das ZF-Wachstum ausgeschöpft werden würde, es trotzdem zu einem Rückgang der SOC-Bestände in deutschen Ackerflächen kommen wird. Die Schlussfolgerung ist, dass der Zwischenfruchtanbau allein es nicht schaffen wird, das Ackerland von einer C-Quelle zu einer C-Senke zu verwandeln. Trotzdem ist es Fakt, dass Zwischenfrüchte die Brachzeit und die SOC-Verluste reduziert und demnach wirkungsvoll gegen den Klimawandel sind (Seitz et al., 2022). Denn der zusätzliche Kohlenstoffeintrag aus den

Zwischenfrüchten erhöht die SOC-Vorräte im Vergleich zu den Fruchtfolgen „as usual“ und einem Anbau komplett ohne Zwischenfrucht. Zudem bietet der ZF-Anbau weitere positive Auswirkungen auf das Ökosystem (*siehe Kapitel 5.4.5*).

3.6 Management

Als Managementmaßnahmen zur Erhöhung des C-Eintrages in den Boden werden im Folgenden die Einflüsse von organischer Düngung, sowie von reduzierter Bodenbearbeitung und vom Management der Erntereste kompakt beschrieben.

Wie in *Kapitel 3.5* erläutert, kann es durch die Anpassung der Fruchtfolge zu einer Erhöhung der Erntereste kommen. Dabei sind Erntereste einerseits die oberirdischen Pflanzenteile wie bspw. die Stoppeln, das Stroh oder die Rübenblätter und andererseits die unterirdischen Pflanzenteile (Wurzeln). Diese spielen bei Verbleib oder Rückführung auf die Fläche eine zentrale Bedeutung für die Erhöhung des Eintrages von organischer Substanz und dem Anstieg der C_{org}-Vorräte. Etwa 5t C/ha werden durch Weizen jedes Jahr als Erntereste gebildet, wobei 50% als Wurzeln anfallen (Don et al., 2018). Diese tragen im Vergleich zu der oberirdischen Biomasse stärker zur Bildung von C_{org} im Boden bei als die oberirdisch gebildeten Erntereste. Die Höhe der Produktion von Ernteresten wird durch nachhaltig hohe Erträge und die Sortenwahl beeinflusst (Wiesmeier et al., 2020). „Bei gleichem Management der Erntereste steigt der Bodenkohlenstoffvorrat daher mit dem Ertrag an“ (Don et al., 2018). In diesem Zusammenhang ist zu erwähnen, dass sich durch die Züchtung und den Einsatz von Halmverkürzern die Menge an Ernteresten gleichgeblieben ist bzw. sich verringert hat, obwohl die Erträge zeitgleich gestiegen sind. Bei dem Versuch den Humus auf den Flächen zu erhalten bzw. zu erhöhen sollte man bei der Optimierung des Managements von den Ernteresten auf einige Aspekte achten. Dazu zählt zum einen der generelle Verbleib aller Erntereste auf dem Acker oder ggfs. eine Rückführung von organischer Substanz durch Stallmist, Gülle et cetera. Zum anderen muss durch die Gestaltung der Fruchtfolge oder Sortenwahl erreicht werden, dass sich der Anteil unterirdischer Biomasse erhöht, die nach der Ernte auf der Fläche verbleibt. So ist die Produktion von Ernteresten abhängig sowohl von einer Steigerung der Erträge als auch von der Sorten- und Fruchtfolgewahl.

Als letztes kommt es, wie in *Kapitel 3.5* beschrieben, durch einen standortangepassten Anbau von Zwischenfrüchten und Untersaaten zu einer Erhöhung der auf dem Feld verbleibenden Erntereste. Kurzgesagt sind Körnermais und Futterbau mit Luzerne oder Ackergras Ackerpflanzen, die große Mengen an Ernteresten erzeugen (Don et al., 2018). Hierbei bedarf es weiterer Forschung, um die Stabilisierungswege der verschiedenen Erntereste zu verstehen. In Deutschland kommt es zunehmend zu einer energetischen Nutzung der Erntereste, wodurch diese der Fläche entzogen werden. Dies kann unter Umständen dazu führen, dass

das Ziel, die C_{org}-Vorräte auf den landwirtschaftlichen Flächen zu erhöhen, nicht erreicht werden kann. Dem hingegen ist zu erwähnen, dass die energetische Nutzung der Erntereste und die anschließende Rückführung auf die Flächen in einem ähnlichen Umfang auf den Humushaushalt auswirken wie der direkte Verbleib der Erntereste auf der Fläche (Wiesmeier et al., 2020). Dies liegt daran, dass Gärreste ein höheres Humusproduktionspotential haben als die ursprüngliche Biomasse (Don et al., 2018).

Neben dem Management von den Ernteresten hat auch das Management der Düngung einen Einfluss auf den Humusaufbau. Eine besondere Bedeutung hat hierbei die organische Düngung, zu welcher Gülle, Stallmist, aber auch andere Dünger wie Komposte oder Klärschlämme zählen. Diese sorgen für eine Rückfuhr von bei der Ernte entzogener Nährstoffe und organischem Material auf die Ackerflächen und sind demnach nach den Vorgaben der Düngeverordnung anzuwenden (Wiesmeier et al., 2020). Durch die organische Düngung kann der C_{org}-Vorrat in den landwirtschaftlichen Böden deutlich erhöht werden. Die verschiedenen Auswirkungen der organischen Dünger auf den Humusgehalt werden als Humusreproduktionspotential bezeichnet. So wurde in europäischen Dauerversuchen herausgefunden, dass sich die Vorräte an organischem Bodenkohlenstoff unter Stallmistdüngung im Vergleich zu einer rein mineralisch gedüngten Varianten durchschnittlich um 6 t/ha erhöht hat (Jacobs et al., 2018). Dieser Wert entspricht einer jährlichen C-Sequestrierungsrate von 160kg C/ha über einen Versuchszeitraum von 42 Jahren und einer jährlichen Ausbringung von 5-10t Stallmist. "Der kumulative C_{org}-Eintrag führt also linear zu einer Erhöhung des C_{org}-Vorrates" (Jacobs et al., 2018). Wichtig hierbei ist, dass die Effekte der organischen Düngung abhängig sind von der Art des ausgebrachten Düngers und der Bodeneigenschaften (Don et al., 2018). Bei der Auswertung von Fragebögen zur Flächenbewirtschaftung im Rahmen der BZE-LW kam heraus, dass auf 69% aller Flächen unter Acker- und auf 80% aller Flächen unter Grünlandnutzung organische Dünger eingesetzt wurden (Jacobs et al., 2018). Dass nicht alle Flächen organisch gedüngt werden, liegt an der räumlichen Trennung von Marktfrucht- und Tierhaltungsbetrieben. So werden in Regionen, die vom Marktfruchtanbau dominiert sind, nur etwa 40% aller Äcker organisch gedüngt. Dabei spielt die organische Düngung eine wichtige Rolle im Nährstoffrecycling und Humusaufbau. Die mechanische Einarbeitung der organischen Dünger kann ebenfalls wichtig sein, da sie hilft, das Kohlenstoffspeicherungs-Potential der Unterböden zu erschließen (Don et al., 2018). So können durch Tiefpflügen auf lehmigen und sandigen Böden die C_{org}-Vorräte langfristig um 40% erhöht werden (Don et al., 2018). Durch den Eintrag von externen Kohlenstoffquellen kann es zum Verlagerungseffekt kommen, sodass das Humusreproduktionspotential an anderer Stelle fehlt. Sinnvoll kann diese Verlagerung nur sein, wenn organische Dünger aus Regionen mit Nährstoffüberschüssen exportiert werden und auf anderen landwirtschaftlichen Flächen effizient eingesetzt werden (Wiesmeier et al., 2020). Kurzgefasst ist der Humusaufbau durch die organischen Dünger nur dann sinnvoll, wenn die in ihm

enthaltenen Nährstoffe durch die Kulturpflanzen genutzt werden können.

Die letzte wichtige Maßnahme, die zu einer Anreicherung von C_{org} auf landwirtschaftlichen Flächen führt, ist die reduzierte Bodenbearbeitung (RB). Diese beschreibt alle Verfahren ohne den Einsatz des wendenden Pfluges. Demnach sind es die Mulchsaat, sprich die Aussaat der Kultur in eine leicht bearbeitete Mulchschicht und die Direktsaat, wobei direkt und in den unbearbeiteten Boden ausgesät wird. Manche Quellen zählen zu der RB auch die allgemeine Reduktion der Arbeitstiefe (Forschungsinstitut Für Biologischen Landbau, o. D.). Beide Verfahren haben positive Auswirkungen auf die Bodenfauna und sind darüber hinaus eine wichtige Komponente für den Erosionsschutz (Wiesmeier et al., 2020). Durch die RB reichert sich die anfallende organische Substanz im Oberboden an, sodass auch die mikrobielle Umsetzung und das gesamte Bodenleben vermehrt in dieser Schicht stattfindet und ein Boden mit „stratifizierter organischer Substanz“ erzeugt wird (Fließbach et al., 2017). Eine Humusanreicherung bzw. -mehrerung kann mithilfe der RB allerdings nicht erreicht werden. Es geschieht lediglich eine vertikale Umverteilung der C_{org}-Vorräte in den Oberboden (Wiesmeier et al., 2020). So kommt es durch die reduzierte Bodenbearbeitungstiefe im Oberboden (0-10 cm) zwar zu einem C_{org}-Anstieg, in tieferliegenden Bereichen nehmen die C_{org}-Vorräte hingegen ab, da weniger organische Substanz eingetragen wird. Insgesamt betrachtet kommt es auch nach Jahrzehnten der RB zu keiner signifikanten Änderung der C_{org}-Vorräte im Vergleich zur Bodenbearbeitung mit dem Pflug (Wiesmeier et al., 2020). Es kann ausschließlich durch den indirekten Einfluss der Steigerung der Erträge durch die RB zur Erhöhung der C_{org}-Vorräte kommen. Hier würde demnach das Management der Erntereste und die Wahl der Fruchtfolge zum Tragen kommen.

In der BZE-LW wurde aufgezeigt, dass die Verfahren der Mulch- und Direktsaat in den USA und Südamerika etablierte Verfahren sind und auf 40-50% der Ackerflächen stattfinden, dahingehend ist die Direktsaat in Deutschland unüblich und gerade mal auf 25% der Flächen etabliert (Jacobs et al., 2018). Auch wurde gesagt, dass „der Effekt von reduzierter Bodenbearbeitung auf den C_{org}-Vorrat im Boden [...] jedoch vielfach überschätzt [wird]“ (Jacobs et al., 2018). Dies wird auf den oben genannten Effekt der C_{org}-Verlagerung zurückgeführt. In einer Metaanalyse, in der Langzeitfeldversuche in der temperaten Klimazone betrachtet wurden, fand man heraus, dass unter Berücksichtigung der gesamten Krumentiefe des Ackerbodens der C_{org}-Vorrat sich nur um $+0,15 \pm 0,11$ t/ha und Jahr erhöht hat (Jacobs et al., 2018), bezogen auf das Direktsaatverfahren im Vergleich zu der konventionellen Bodenbearbeitung. Passend zu diesen Ergebnissen führte die RB in Langzeitversuchen mit $+0,16 \pm 0,10$ t C_{org}/ha und Jahr zu keiner signifikanten Änderung der C_{org}-Vorräte (Jacobs et al., 2018). Zusammenfassend kann man also sagen, dass RB auf dem Großteil der Standorte lediglich eine Umverteilung der Bodenkohlenstoffvorräte bewirkt und nur dies der Grund für eine Zunahme der Bodenkohlenstoffvorräte im Oberboden um 160kg C/ha und Jahr ist.

4 Was sind CO₂-Zertifikate?

Der Handel von CO₂-Zertifikaten findet in der EU seit Jahrzehnten statt. Seit dem Jahr 2005 zählt das Emissionshandelssystem (ETS) zu den kostengünstigen Instrumenten, welche die Treibhausgasemissionen mindern sollen (European Commission, 2016). Hierbei gilt der EU ETS als weltweit erster großer Kohlenstoffmarkt, der mit $>3/4$ des internationalen CO₂-Handels bis heute mit Abstand der größte geblieben ist und ca. 45% der Treibhausgasemissionen der EU abdeckt (European Commission, 2016). So können die politisch festgelegten Einsparungsziele in Bezug auf die Treibhausgasemissionen im ETS-Bereich bereits erreicht werden, wohingegen sie im non-ETS-Bereich bislang nicht erreicht werden können. In diesem EU ETS fehlen zum Beispiel Emissionen aus bestimmten Industrieprozessen, aber auch die Emissionen aus den Sektoren Landwirtschaft und Landnutzung werden von dem EU ETS nicht abgedeckt. Der Handel von CO₂-Zertifikaten findet im Bereich Land- und Forstwirtschaft bislang auf Grundlage des Prinzips des freiwilligen/ freien Marktes statt. Im Folgenden wird sowohl auf die Prinzipien des europäischen Emissionshandels, des freien Marktes sowie auf die Funktionsweise der CO₂-Zertifikate in der Landwirtschaft eingegangen.

4.1 Prinzip der CO₂-Zertifikate

4.1.1 Europäischer Emissionshandel

Das EU ETS ist ein im Jahr 2005 eingeführtes zentrales Klimaschutzelement, das zur Umsetzung des internationalen Klimaschutzabkommens von Kyoto einen Beitrag leisten soll. Dieses zentrale Klimaschutzelement soll THG-Emissionen von Energie- und Industrieanlagen und von dem innereuropäischen Luftverkehr effizient reduzieren. Um dieses Ziel zu erreichen, werden alle Emissionen erfasst, die europaweit in ca. 10.000 Anlagen der Energiewirtschaft und der energiereichen Industrie anfallen. Insgesamt verursachen diese 10.000 Anlagen etwa 36% der THG-Emissionen in Europa. Dies entspricht rund 1,31 Milliarden Tonnen CO₂-Äquivalenten im Jahr (Stand 2021), die von diesen Anlagen emittiert werden. Neben den 27 Mitgliedsstaaten der EU beteiligen sich auch Island, Norwegen und Liechtenstein (EU 30) am EU ETS. In Deutschland ist die Deutsche Emissionshandelsstelle im Umweltbundesamt für die Angelegenheiten des EU ETS zuständig. (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2017)

Beim EU ETS sind unter anderem verpflichtet mitzumachen: große Energieanlagen (ab 20 MW Feuerungswärmeleistung), energieintensive Industrieanlagen (Hochöfen, Raffinerien etc.) und seit 2012 der Luftverkehr im europäischen Wirtschaftsraum. Jeder Betreiber einer solchen Anlage/ eines solchen Unternehmens gilt als handelspflichtig und muss Berechtigungen abgeben, genauer gesagt, es muss für jede emittierte Tonne CO₂-Äquivalente eine Emissionsberechtigung abgegeben werden. Für diese Transaktionen hat jeder Betreiber einer handelspflichtigen Anlage ein Emissionsrechte-Konto im EU-Emissionshandelsregister. Das gesamte System der EU ETS basiert auf dem Konzept „Cap&Trade“, zu Deutsch: begrenzen und

handeln. Dabei wird für jede Handelsperiode ein neues Emissionsminderungsziel festgelegt, welches eine Menge an Berechtigungen festlegt, die maximal an Unternehmen ausgegeben werden dürfen, das sogenannte „Cap“. Dieses Cap wird jährlich um einen festgelegten Betrag gekürzt, was zur Folge hat, dass die Anzahl der Berechtigungen im Laufe der Handelsperioden stetig reduziert wird und somit weniger CO₂ emittiert werden darf. Den Unternehmen werden aus der Anzahl der verfügbaren Caps eine begrenzte Anzahl an Berechtigungen kostenlos zur Verfügung gestellt, wenn sie darüber hinaus mehr CO₂ emittieren, müssen sie sich zusätzliche Emissionsberechtigungen kaufen. Das Cap sorgt dafür, dass das CO₂ zu einem knappen Gut wird und sich durch den Handel (dem Trade) am Emissionsmarkt ein Auktionspreis für CO₂ bildet. Der durch die stetig zunehmende Begrenzung an Caps steigende Preis für CO₂ soll Unternehmen dazu animieren, in den Klimaschutz zu investieren. (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2017)

Diese stetig steigenden Auktionspreise der CO₂-Zertifikate aus dem EU-ETS sind in *Abbildung 5* zu sehen. Der niedrigste Wert ist rot markiert und lag im Jahr 2013 bei 2,95€/ Tonne CO₂ und der höchste erzielte Auktionswert im Jahr 2021 ist grün markiert und lag bei 82,25€/ Tonne CO₂.

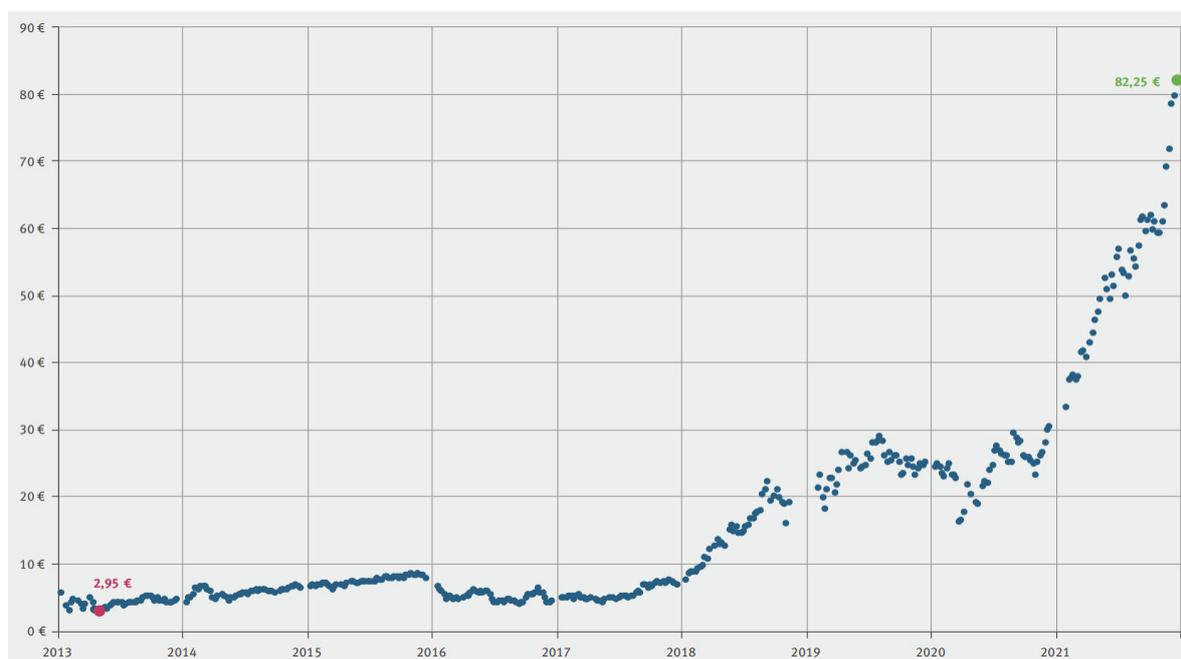


Abbildung 5: Deutsche Auktionspreise der CO₂-Zertifikate zwischen 2013-2021

Quelle: Deutsche Emissionshandelsstelle, 2022, S. 8

Durch die Maßnahme der EU ETS sanken die Emissionen der europäischen ETS-Anlagen von 2005 bis 2021 um ca. 38%. Die deutschen Auktionseinnahmen aus dem EU ETS gehen seit 2012 in den Energie- und Klimafond, in dessen Rahmen die Gelder für die Umsetzung der Energiewende genutzt werden. (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2017)

4.1.2 Freier Markt

In dem in *Kapitel 4.1.1* genannten System des Emissionshandels der EU fehlen die Bereiche der Landwirtschaft und Landnutzung. Trotzdem wächst der Emissionshandel im Bereich der Landwirtschaft seit Beginn der Klimakrise stetig. Grund dafür ist der Fakt, dass der Humusaufbau auf den landwirtschaftlichen Flächen die Speicherung von C_{org} im Boden erhöht und somit CO₂ aus der Atmosphäre wieder im Boden gebunden werden kann. Um die in *Kapitel 3* beschriebenen teilweise freiwilligen Maßnahmen in der Praxis umzusetzen, müssen allerdings Anreizsysteme geschaffen werden, die den Humusaufbau für die Landwirte wirtschaftlich attraktiv machen. Zu diesen Anreizsystemen zählen die sogenannten Humusaufbau-Zertifikate (kurz: Humuszertifikate), die CO₂-Zertifikate für den Aufbau von C_{org} im Ackerboden. Wie bereits beschrieben sind diese Humuszertifikate kein Teil der EU ETS, sondern werden von privatwirtschaftlichen Initiativen bzw. Firmen in dem Bereich des freiwilligen CO₂-Marktes vergeben. (Wiesmeier et al., 2020)

Das Prinzip des freiwilligen CO₂-Marktes beruht auf dem Gedanken, dass es für das Klima nicht relevant ist, wo und an welcher Stelle Treibhausgase ausgestoßen oder vermieden werden. Konkret bedeutet dies, dass es nicht entscheidend ist, ob Treibhausgase an derselben Stelle eingespart werden, an der sie auch freigesetzt wurden. Von daher ist es für Unternehmen und Privatpersonen möglich, CO₂ an anderer Stelle auszugleichen, wie beispielsweise die Emissionen eines Kurzstreckenfluges auf dem Acker der Landwirte. Der Grundgedanke ist zudem, dass zuerst das klimabewusste Handeln angestrebt werden sollte und schlussendlich nur die unvermeidbar ausgestoßenen THG kompensiert werden (Wolters et al., 2018). So sollten Unternehmen die freiwillige Kompensation als letzte Maßnahmen für klimabewusstes Handeln wählen. (Wolters et al., 2018)

Bei CO₂-Zertifikaten und somit auch bei den Humuszertifikaten wichtig zu beachten ist, dass die für den Humusaufbau zur Verfügung stehenden Maßnahmen international anerkannte Kriterien erfüllen müssen. Erst dann werden sie als klimawirksam anerkannt und die Landwirte können sich die entsprechenden Maßnahmen durch die Zertifikate finanzieren lassen. Laut dem Thünen Faktencheck zum Thema „Klimaschutz durch CO₂-Zertifikate für Humus“ (Kraft, 2021) muss ein CO₂-Zertifikat des freien Marktes vier Kriterien erfüllen, um als klimawirksam zu gelten. Erstens muss die Wirkung des Projektes nachweisbar sein. Konkret bedeutet dies, dass die Menge des Kohlenstoffes, der zusätzlich gebunden wird, nachgewiesen werden muss. Dies kann beispielsweise über Bodenuntersuchungen geschehen. Zweitens muss die Speicherung von C_{org} dauerhaft sein. So wird Humus nur als Klimaschutzmaßnahme angesehen, wenn der C_{org} dauerhaft in dem Boden gespeichert werden kann. Andernfalls würde der gespeicherte Kohlenstoff wieder in die Atmosphäre freigesetzt. Da genau diese Dauerhaftigkeit und die Höhe der Humusspeicherung unsicher sind, gibt es zurzeit Zweifel an der Eignung von Humuszertifikaten zur CO₂-Kompensation, siehe *Kapitel 5.1*. Drittens muss ein

Projekt einen zusätzlichen Effekt aufweisen. Konkret bedeutet dies, dass ein Feld mit Humusaufbaumaßnahme eine zusätzliche C-Sequestrierung im Vergleich zu einem Feld ohne Humusaufbaumaßnahme vorweisen muss. Zudem können für bereits durch die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) finanziell geförderte Maßnahmen, wie beispielweise dem Anbau von Klee-gras in der üblichen Fruchtfolge im Ökolandbau, keine CO₂-Zertifikate vergeben werden. Als viertes Kriterium muss durch eine Maßnahme der CO₂-Zertifikate ein Verlagerungseffekt (Leakage-Effekt) ausgeschlossen werden können. Kompost zum Beispiel führt zu einem schnellen Humusaufbau, sodass diese Maßnahme oft durchgeführt wird. Das Problem, das hierbei nicht entstehen darf, ist dass der ausgebrachte Kompost andernorts nicht mehr verfügbar ist und dort nicht mehr für den Humuserhalt genutzt werden kann. So darf der Humusgehalt auf der Zertifizierungsfläche nicht steigen, während er an anderer Stelle aufgrund der Maßnahme sinkt. So ist Humusaufbau nur klimawirksam, wenn er aus zusätzlich ausgebrachten Pflanzen- und EWR möglichst des gleichen Standortes resultiert. (Kraft, 2021)

Auf dem freiwilligen CO₂-Kompensationsmarkt werden verschiedene Projekttypen angeboten. Dazu zählen neben Energieprojekten auch Projekte zur Reduzierung oder Einbindung von CO₂, Projekte zur Verringerung von Emissionen aus Entwaldung und weitere Emissionsminderungsprojekte in der Abfallwirtschaft, in der Industrie und im Transport. Die Projekte der Landwirtschaft zählen hierbei in den zweit genannten Projekttyp und machen ca. 17% der durch freiwillige CO₂-Zertifikate finanzierte Maßnahmen aus. (Wolters et al., 2018)

4.2 Funktionsweise der CO₂-Zertifikate in der Landwirtschaft

Kurzgesagt gibt es die privaten CO₂-Zertifikate schon lange, mit dem Zweck Unternehmen und Privatpersonen zu ermöglichen, die Höhe ihres CO₂-Fußabdruckes zu kompensieren. Die Landwirte, die CO₂-Zertifikate verkaufen wollen, wenden sich an die spezialisierten Zertifizierungsunternehmen (Anbieter) und vereinbaren mit diesen einen Vertrag über eine bestimmte Laufzeit (in der Regel beträgt diese zwischen 5-20 Jahre). Mit diesem Vertrag verpflichten sich die Landwirte dazu, den Humusgehalt ihrer Böden im vereinbarten Zeitraum zu erhöhen. Als Maßnahmen zur Erhöhung des Humusgehaltes können die in *Kapitel 3* und *Kapitel 4.3* genannten regenerativen Methoden angewandt werden. Zum Ende der Vertragslaufzeit messen manche Zertifizierer die tatsächliche CO₂-Bindung (die C_{org}-Anreicherung) auf den Acker- und Grünlandflächen und zertifizieren diese. Andere Zertifizierer messen die tatsächliche Anreicherung von C_{org} im Boden nicht nach, sondern berechnen die anzunehmende Kohlenstoffspeicherung für die Maßnahmen auf Basis von wissenschaftlichen Studien, wodurch geringere Kosten durch wegfallende Bodenprobennahmen entstehen. Erst dann bezahlen die Unternehmen den Landwirten eine Prämie. Die auf diese Weise entstandenen CO₂-Zertifikate verkaufen die Zertifizierungsunternehmen (Anbieter) dann weiter an Unternehmen oder Privatpersonen, die Interesse an einer solchen Art der THG-Kompensation haben. Diese bezahlen die Zertifizierungsunternehmen, die das gezahlte Geld vorher in Klimaschutzprojekte im Bereich der Landwirtschaft gesteckt haben. Die zur Verfügung stehenden Projekte im Sektor der Agrarwirtschaft werden von Zertifizierern begutachtet und auf ihre Klimawirksamkeit überprüft. Der Vorgang des Handels von privaten CO₂-Zertifikaten ist in *Abbildung 6* veranschaulicht. Dabei finden nur Projekte statt, wenn sie die in *Kapitel 4.1.2* beschriebenen vier Kriterien der Nachweisbarkeit, Dauerhaftigkeit, Zusätzlichkeit und dem Ausschluss des Verlagerungseffektes aufweisen. (Ökolandbau.de - Das Informationsportal, 2022)

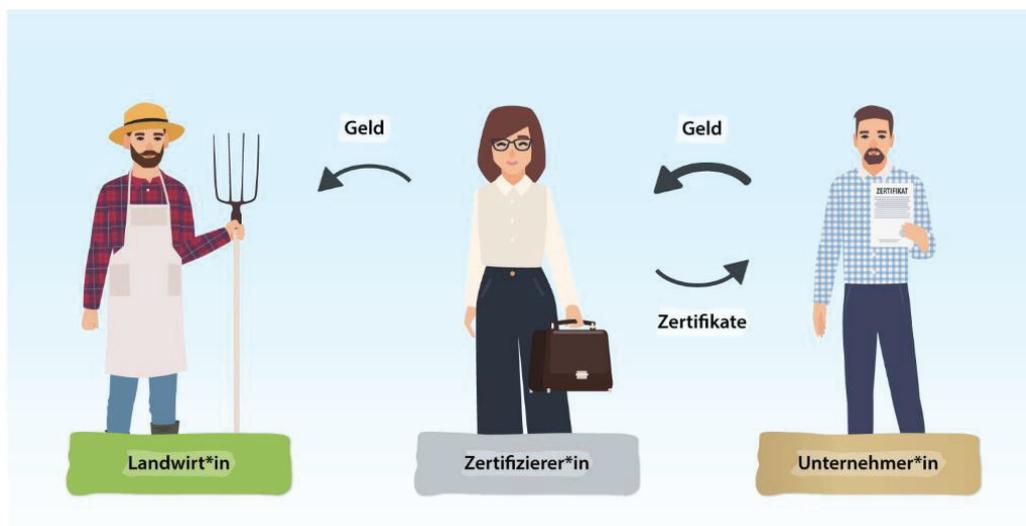


Abbildung 6: Funktionsweise CO₂-Zertifikate in der Landwirtschaft (vereinfachte Darstellung)

Quelle: Kraft, 2021

Die vereinfachte Darstellung des freiwilligen Handels mit CO₂-Zertifikaten ist in den meisten Fällen durch weitere Beteiligte beeinflusst, wie in *Abbildung 7* veranschaulicht wird. Manche Zertifizierer/Anbieter beauftragen externe Institutionen mit der Aufgabe, neue Projekte zu entwickeln und die Erzeugung der Zertifikate zu überwachen. Des Weiteren benutzen Anbieter meist Zertifikate eines Qualitätsstandards. Diese Qualitätsstandards garantieren, dass die Projekte gewisse Qualitätskriterien einhalten, zu welchen beispielsweise der Clean Development Mechanism (CDM), der Verified Carbon Standard (VCS), ISO 14064, oder der Gold Standard zählen. Zudem kooperieren manche Anbieter mit Drittanbietern. Ein Beispiel hierfür sind Flug- und Busgesellschaften oder Reiseportale, die auf ihren Webseiten anbieten beim Buchen einer Reise mit einem Klick eine CO₂-Kompensation dazu zu buchen. Teilweise sind diese CO₂-Kompensationen aber auch bereits im Angebot enthalten. Einige dieser Plattformen kalkulieren die bei der gebuchten Reise entstehenden CO₂-Emissionen und bieten passende Kompensationszertifikate an. Andere Webseiten arbeiten mit zusätzlichen Beratungsunternehmen zusammen, die den CO₂-Fußabdruck berechnen und die dazu passende Kompensation abwickeln. (Wolters et al., 2018)

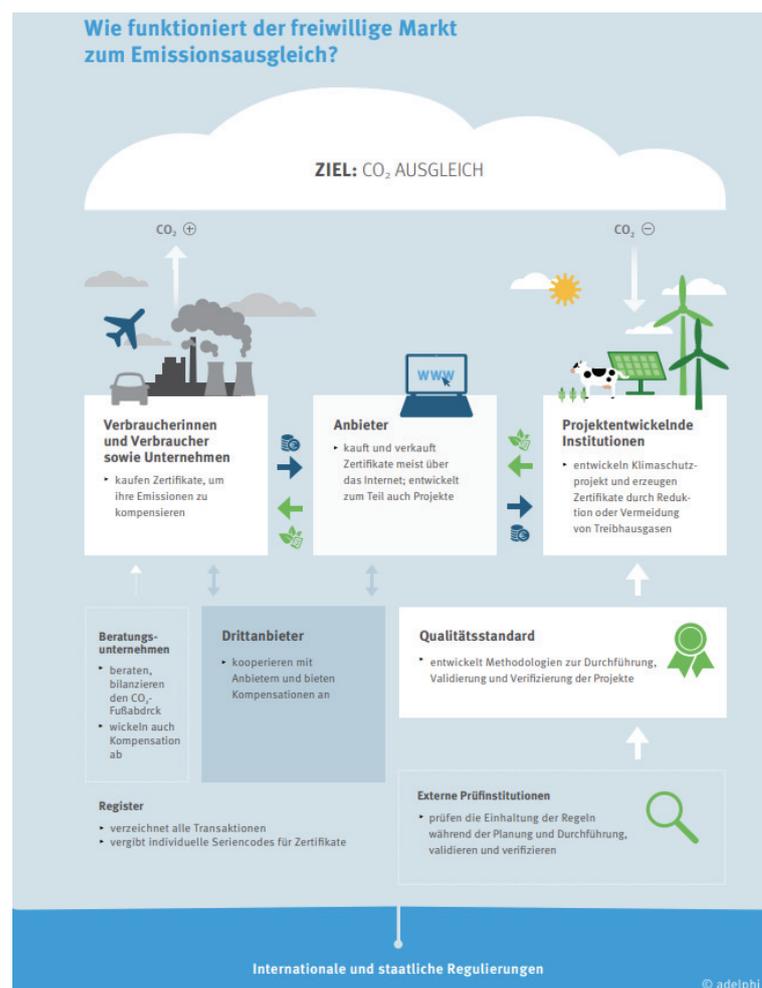


Abbildung 7: Funktionsweise CO₂-Zertifikate in der Landwirtschaft (detailliert)

Quelle: Wolters et al., 2018, S.17

Als Privatperson, die CO₂-Zertifikate zur Kompensation erwerben möchte, sollte man hierbei auf ein paar Punkte achten. Der Ausgangspunkt sollte immer die realistische Emissionsberechnung sein. Dabei gilt: „je detaillierter und differenzierter die Berechnung erfolgt, desto genauer werden grundsätzlich die tatsächlich verursachten Treibhausgasemissionen erfasst“ (Wolters et al., 2018). Der zweite Punkt, der Beachtung finden sollte, ist die Anbietersauswahl. Wichtig ist dies, da es große Unterschiede in der Qualität der Zertifikate gibt. Als seriös gelten unter anderem Kompensationsanbieter, die potenzielle Kunden darüber aufklären, dass Emissionen möglichst vermieden, statt kompensiert werden sollten und somit einen „ganzheitlichen Blick auf Klimaschutz und Nachhaltigkeit“ (Wolters et al., 2018) legen. Zudem sollte der verwendete Qualitätsstandard für den Verbraucher transparent genannt werden. So sind bei der Auswahl von Zertifikaten für den Verbraucher drei Aspekte von besonderer Bedeutung: Erstens die Qualitätssicherung durch den Standard, zweitens projektspezifische Aspekte und ggfs. eigene Präferenzen in welchem Bereich man Kompensationen unterstützen möchte.

4.3 Derzeitiger Stand der Nachfrage und Rechtslage

Wie in *Kapitel 4.1.2* bereits erwähnt, machen die Projekte aus der Landwirtschaft mit zurzeit rund 17% etwa ein Fünftel der angebotenen Projekte am freiwilligen CO₂-Kompensationsmarkt aus (Wolters et al., 2018). Die Nachfrage nach Humuszertifikaten ist somit derzeit groß. Auf der anderen Seite nimmt auch das Interesse der Landwirte an dieser Art des Geschäftsmodells zu. Auch die EU-Kommission sah im Jahr 2022 Potential in der Methode und wollte den Humuszertifikat-Handel fördern, indem sie bis zum Ende des Jahres einen Rechtsrahmen für die Zertifizierung schafft (Ökolandbau.de - Das Informationsportal, 2022). Im Folgenden wird kurz auf die Vorschläge der EU-Kommission eingegangen. So heißt es in dem Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Unionrahmens für die Zertifizierung von CO₂-Entnahmen (Europäische Kommission, 2022): In dem „Zertifizierungsrahmen sollten die unterschiedlichen zu berücksichtigenden Arten des CO₂-Abbaus und solide Anforderungen in Bezug auf die Qualität der Messung, Überwachung, Berichterstattung und Überprüfung festgelegt werden“. In Hinblick auf die Rechtslage heißt es in Artikel 8 der genannten Verordnung, dass jeder Betreiber/Betreibergruppe selbst die einschlägigen Zertifizierungsmethoden anzuwenden hat, um die zuvor in Artikel 4-7 genannten Kriterien zu erfüllen. Zu diesen Kriterien zählen die in dieser Arbeit bereits genannte Zusätzlichkeit, Langfristigkeit und Nachhaltigkeit, aber auch die Quantifizierung über die Höhe der CO₂(C_{org})-Speicherung. Zudem muss jede(r) Betreiber(-gruppe) einen Antrag bei Zertifizierungssystemen einreichen, um die Konformität zu der Verordnung sicherzustellen. Nachdem dieser Antrag angenommen wurde, muss der Betreiber eine umfassende Beschreibung der CO₂-Entnahmetätigkeit vorlegen, einschließlich der Zertifizierungsmethode zur Bewertung der Konformität mit den Artikeln 4-7, der erwarteten CO₂-Entnahmen und des erwarteten Nutzens

der Netto-CO₂-Entnahmen. Die Zertifizierungsstelle muss dann eine Zertifizierungsprüfung durchführen und bestätigen, dass die CO₂-Entnahmetätigkeiten den Artikeln 4-7 entsprechen. Nationale Akkreditierungsstellen sollen folgend noch die Zertifizierungsstellen akkreditieren, um für mehr Sicherheit zu sorgen. Diese Verordnung gibt demnach der in *Abbildung 7* zu sehenden Funktionsweise des freiwilligen Zertifikathandels einen Rechtsrahmen, an den sich gehalten werden muss. Etwaige Probleme, die bei diesem System entstehen könnten, werden in *Kapitel 5.1* aufgezeigt.

4.4 Zur Verfügung stehende Maßnahmen im Agrarbereich

Maßnahmen, um CO₂ aus der Atmosphäre zu entnehmen und im Boden zu speichern, sind im Folgenden aufgelistet. Die wichtigsten Maßnahmen sind bereits in *Kapitel 3* dieser Arbeit ausführlich beschrieben worden.

Maßnahmen im Bereich der Landwirtschaft:

- Fruchtfolgegestaltung (siehe Kapitel 3.5)
- Zwischenfruchtanbau (siehe Kapitel 3.5)
- Mischkultursysteme und Untersaaten
- Verzicht auf Brache und aktive Begrünung
- Management von EWR (siehe Kapitel 3.6)
- Agroforstsysteme (siehe Kapitel 3.4)
- Wiedervernässung von Mooren (siehe Kapitel 3.2)
- Anbau mehrjähriger Kulturarten (siehe Kapitel 3.5)
- Landnutzungsänderung (siehe Kapitel 3.3)
- Einsatz von Biokohle (siehe Kapitel 3.1)
- Reduzierte Bodenbearbeitung (siehe Kapitel 3.6)
- Anlage von Blühstreifen

Maßnahmen außerhalb der Landwirtschaft:

- Geologische CO₂-Speicherung

4.5 Anbieter, Käufer und Honorierung

4.5.1 Anbieter

Bislang ist das System des freiwilligen CO₂-Kompensationsmarktes ein undurchsichtiges Konstrukt. Es gibt keine Informationsquelle, in der die aktuell am Markt verfügbaren Anbieter von Humuszertifikaten aufgezeigt oder verglichen werden. Man findet die Anbieter folglich nur, wenn man gezielt nach ihnen sucht, dies setzt voraus, dass man von dem jeweiligen Anbieter über andere Wege bereits erfahren hat. Die Transparenz in diesem Bereich ist zurzeit demnach nicht gegeben. Der in Deutschland bekannteste Anbieter von Humuszertifikaten ist das Unternehmen CarboCert. Im Zuge der Recherche für diese Arbeit ist die Autorin auf folgende Unternehmen/Initiativen gestoßen, die es Landwirten ermöglicht CO₂-Zertifikate zu verkaufen:

Tabelle 3: Auswahl von Anbietern und Initiativen auf dem deutschsprachigen Markt von CO₂-Zertifikaten in der Landwirtschaft

Anbieter/ Initiativen	Angebotene Maßnahmen	Verwendeter Standard
CarboCert GmbH https://www.carbocert.de/fuer-unsere-landwirte-in-de-und-ch (CarboCert, 2020)	Regenerative Landwirtschaft (ständige Bodenbedeckung, Zwischenfrüchte, Untersaaten, ständige Bodenbedeckung mit lebenden Wurzeln, Integration von Tieren) und Agroforst	DIN/ISO 14064 & BSI PAS 2060
Carbon by INDIGO https://www.indigoag.de/carbon-programm (Indigo Ag, 2024)	Regenerative Landwirtschaft	VCS
Circular Carbon https://circular-carbon.com/co2-zertifikate (Circular Carbon, 2024)	Regenerative Landwirtschaft (Einsatz von Pflanzen-/ Biokohlen)	Nicht auf Webseite ablesbar (intransparent)
First Climate https://www.firstclimate.com/co2-speicherung-durch-pflanzenkohle (First Climate Ag, 2024)	Einsatz von Pflanzen-/ Biokohlen	CDM Gold Standard, VCS
Klim https://www.klim.eco/co2-zertifikate (Klim, 2023)	Regenerative Landwirtschaft (ganzjährige Bodenbedeckung, diverse Fruchtfolgen, Erhalt lebender Wurzeln, Reduzierung von Bodenstörungen, Integration von Tieren)	DIN/ISO 14064
KlimaHumus https://www.klimahumus.de (KlimaHumus, 2022)	Regenerative Landwirtschaft und Bodenbearbeitung (Fruchtfolgeausweitungen, Dauerbegrünung, Einsatz von organischer Düngung, Agroforstsysteme, reduzierte Bodenbearbeitung)	Gold Standard, VCS, DIN/ISO 14064

Quelle: eigene Darstellung auf Basis von Informationen der angegebenen Webseiten

4.5.2 Käufer

Die Käufer von Humuszertifikaten sind sowohl Industrieunternehmen, Nichtregierungsorganisationen (NGOs), Privatpersonen als auch ganze Regierungen (Bockholt, 2020). Der Konzern *Indigo* zählt folgende Branchen und Unternehmen zu den ersten, die landwirtschaftliche CO₂-Zertifikate gekauft haben. Im Bereich der Finanzdienstleistungen sind dies die Unternehmen Barclays, JPMorgan und Chase. In der Branche der Lebensmittel und Getränke zählen die Dogfish Head-Brauereri und die New Belgium Brauerei zu den Kunden von *Indigo*. Auch auf dem Gebiet der Technologie kaufen Unternehmen wie IBM, Givewith und Barclays Humuszertifikate. Zuletzt zählen Unternehmen wie Shopify und die Boston Consulting Group aus dem Bereich der Dienstleistungen zu ihren Kunden. (Bockholt, 2020)

Auch das Unternehmen *CarboCert GmbH* zählt unterschiedliche Unternehmen aus diversen Branchen zu ihren Kunden. Laut Angaben auf ihrer Internetseite zählen z.B. der Landkreis Rottweil, Sparkassen aus unterschiedlichen Landkreisen (Ulm, Ravensburg, Schwarzwald-Baar, Coburg-Lichtenfels) und die Wirtschaftsprüfer der DOSU AG zu den Käufern der Humuszertifikate von *CarboCert*. Zudem gehören Unternehmen aus der Getränkebranche zu ihren Kunden, wie bspw. die Urwasser GmbH, die Heckengäu-Brennerei, die Gropper Fruchtsaft GmbH&Co. KG und Hofbräu München. Darüber hinaus zahlen das Berghotel Rehlegg, ein Unternehmen aus der Werkzeug- und Maschinenbaubranche, Neos Film und ein eingetragener Verein, der Schachclub Viernheim 1934 e.V. für die Humuszertifikate von *CarboCert*. (CarboCert, 2021)

Zu den Kunden von *Klim* zählen Unternehmen wie die Bäckerei Die Lohners, das Franchise-Unternehmen Pottsalat, die Plattform Trainline, die Deutsche Kreditbank (DKB) und Yuicy. Des Weiteren finanzieren WEFRA LIFE, die Syzygy Group und sogar der Deutsche Landwirtschaftsverlag (DLV) Maßnahmen über Humuszertifikate von *Klim*. (Klim, 2023)

Kurzgesagt, die Käufer von Humuszertifikaten sind im wesentlichen Unternehmen, also THG-Emittenten, die die durch sie verursachten Treibhausgasemissionen ganz oder zu einem Teil kompensieren möchten.

4.5.3 Honorierung

Genau wie die Suche nach Anbietern (*Kapitel 4.5.1*), die in Zusammenarbeit mit Landwirten CO₂-Zertifikate verkaufen, ist auch die Recherche der Honorierung und der Kosten solcher Zertifikate intransparent. Auf den wenigsten Internetseiten oder in Broschüren der Anbieter werden offen die tatsächliche Preise oder gar die Honorierung der Landwirte pro gebundener Tonne CO₂ im Boden angegeben. Die Bezahlung scheint zudem in Abhängigkeit der Anbieter zu variieren.

Der Anbieter *CarboCert* ist der Einzige, der in *Tabelle 3* aufgeführten Anbieter, welcher sowohl den Preis für eine zusätzlich gebundene Tonne CO₂ als auch die Formeln für die Berechnung transparent offenlegt. Die Grundlage, auf der die Berechnung basiert, sind Bodenuntersuchungen, welche den gesamten organischen Kohlenstoffanteil im Ackerboden bestimmen. Diese werden sowohl vor Beginn der humussteigernden Maßnahmen als auch nach drei Jahren durchgeführt. Die Differenz der berechneten Kohlenstoffgehalte der Erst- und Folgeuntersuchung bietet die Basis für die Honorarauszahlung. Im Folgenden wird kurz die Berechnungsmethode von *CarboCert* für den CO₂-Gehalt pro Schlag aufgezeigt. (*CarboCert*, 2020)

1. Berechnung des Kohlenstoffgehaltes im Humus

Das Ergebnis des Gehaltes an organischer Substanz im Untersuchungsbericht wird durch den Faktor 1,721 geteilt, um zu dem Kohlenstoffgehalt im Boden zu gelangen.

Beispiel: Humusgehalt 2,0% : 1,721 = 1,16% Kohlenstoffgehalt

2. Berechnung Kohlenstoffgehalt in Tonnen pro Schlag

$$\text{Fläche in m}^2 \times \text{Entnahmetiefe} = \text{m}^3 \text{ Boden}$$

$$\text{m}^3 \text{ Boden} \times \text{spezifisches Gewicht} = \text{Trockenmasse (in Tonnen)}$$

$$\text{Trockenmasse (in Tonnen)} \times \text{Kohlenstoffgehalt} = \text{Kohlenstoff pro Schlag (in Tonnen)}$$

Beispiel: 10.000 m² Boden x 0,25 m = 2.500 m³

$$2.500 \text{ m}^3 \text{ Boden} \times 1,25 = 3.125 \text{ Tonnen Trockenmasse an Boden}$$

$$3.125 \text{ t} \times 2\% \text{ Humusgehalt} = 62,5 \text{ t Humus}$$

$$62,5 \text{ t Organik} : 1,721 \approx 36 \text{ t Kohlenstoff}$$

3. Berechnung des CO₂-Gehaltes in Tonnen pro Schlag

Zum Schluss folgt die Umrechnung von Kohlenstoff (C) zu CO₂. Hierbei entspricht ein Teil Kohlenstoff aufgrund der jeweiligen Atommassen 3,67 Teilen CO₂.

$$\text{Kohlenstoff pro Schlag (in Tonnen)} \times 3,67 = \text{gespeicherter CO}_2 \text{ pro Schlag}$$

Beispiel: 36 t Kohlenstoff * 3,67 ≈ 132 t gebundenes CO₂

Die Honorarauszahlung basiert folglich auf den Ergebnissen der Bodenuntersuchung und der positiven Differenz der berechneten CO₂-Gehalte der Erst- und Folgeuntersuchung. Laut dem Anbieter *CarboCert* ist ein Humusaufbau um 0,1-0,2% pro Jahr realistisch, sofern die regenerativen Bewirtschaftungsmaßnahmen konsequent umgesetzt werden. Nach der Folgeuntersuchung werden 80% der nachweislich gebundenen CO₂-Menge zum Verkauf angeboten. Die übrigen 20% der Menge verbleiben in einem Pool, falls es auf dem Acker in den folgenden Jahren zu einem Humusabbau kommt. Jede Tonne CO₂ wird dem Landwirt mit aktuell ca. 30€ vergütet. Zu beachten ist allerdings, dass er die Kosten für die Bodenproben der Folge-, sowie der Kontrolluntersuchung bezahlen muss und diese mit der Emissionsgutschrift verrechnet werden. Der Anbieter *CarboCert* gibt an, dass ein CO₂-Kompensationspotential von ca. 3-5t CO₂ pro Hektar und Jahr möglich ist. (CarboCert, 2020)

Im Gegensatz zu *CarboCert* ist der Anbieter *Klim* nicht transparent. Man findet keine konkreten Preise, die ein Unternehmen für die Kompensation für eine Tonne CO₂ bezahlen muss oder die Landwirte für eine Tonne gebundenes CO₂ erhalten. Diese Preise werden von den Anbietern nur preisgegeben, wenn man mit einer konkreten Nachfrage und dem Namen seines Unternehmens Informationen anfragt. Auf Plattformen von Drittanbietern werden die Zertifikate von *Klim* angeboten. Die Preise variieren hier allerdings auch bei den unterschiedlichen Plattformen. So bietet *Climate Trade* Zertifikate von *Klim* für 62,50€/to CO₂ (ClimateTrade, 2024) an und die Plattform *Senken* verkauft Zertifikate des Anbieters für 49€/to CO₂ (Senken, 2023), siehe *Anhang*.

Auch auf den Webseiten der anderen in *Tabelle 3* aufgeführten Anbieter legt keiner transparent dar, wo der Preis für eine Tonne CO₂ liegt oder wie hoch die Honorierung für den Landwirt ist. Auch bei diesen Anbietern bekommt man nähere Informationen nur dann, wenn man sich mit seinem konkreten Anliegen und seinen Unternehmensdaten in einem Kontaktformular meldet. Das dänische Unternehmen *Agreena* ist ein weiterer Anbieter, welcher die Honorierung offen darlegt. So wird ein Landwirt beim Verkauf ihrer Zertifikate unterstützt, wenn dieser eine Verkaufsgebühr in Höhe von 15% an *Agreena* zahlt. Zudem zeigt das Unternehmen auf, dass beim Verkauf die Marktentwicklung sowie Angebot und Nachfrage die Höhe der Auszahlung regeln. Dabei sucht das Unternehmen laut eigenen Angaben nach dem höchstmöglichen Preis, welcher derzeit zwischen 25-50€ pro Zertifikat (für jede gespeicherte Tonne CO₂) beträgt (Agreena, 2024). Auch die Initiative *KlimaHumus* macht die Angabe, dass sich die Vergütung nach dem Verkaufspreis der CO₂-Zertifikate richtet und die Landwirte zwei Drittel dieses Preises als Humusaufbauprämie erhält (KlimaHumus, 2022). Zudem sind laut KlimaHumus, 2022 die Beprobungen des Bodens immer durch die Landwirte selbst zu bezahlen.

5 Diskussion

5.1 Probleme der CO₂-Zertifizierung

Mithilfe von Humuszertifikaten sollen Landwirte dabei unterstützt werden, den Humusaufbau auf ihren Flächen zu finanzieren, um dadurch THG-Emissionen kompensieren zu können. Trotz der auf den ersten Blick erkennbaren positiven Merkmale, wird der freiwillige Emissionshandel und vor allem der Handel mit Humuszertifikaten kritisch betrachtet. So haben sich beispielsweise mehr als 30 Institutionen und Personen (WWF Deutschland, 2021) sowohl aus Landwirtschaft, der Wissenschaft als auch aus Klima- und Umweltschutz in einem Positionspapier gemeinsam gegen die Kompensation von Treibhausgasen durch die Humuszertifikate ausgesprochen. Probleme, die an dem System der Generierung von CO₂-Zertifikaten für die Sequestrierung von Kohlenstoff in Böden Beachtung finden sollten, sind im Folgenden näher erläutert.

5.1.1 Quantifizierung der C_{org}-Änderungen

Änderungen der C_{org}-Vorräte im Boden müssen stets zuverlässig quantifiziert werden. Dabei gilt es, die zeitliche und räumliche Variabilität der C_{org}-Bestände zu beachten, da es bereits innerhalb eines Feldes zu großen Schwankungen kommen kann. Zudem müssen bei der Bestimmung der C_{org}-Vorräte Faktoren, wie die Art der Kulturpflanze, ihr Entwicklungsstadium und die Zeit seit der letzten Düngung berücksichtigt werden. Durch die genannten Faktoren kann es bereits zu Mess- und Modellierungsunsicherheiten kommen, sodass eine zuverlässige Messung kleiner Änderungen der C_{org}-Vorräte verhindert wird. (Paul et al., 2023)

5.1.2 Fairness

Das Potential, um C_{org} im Boden anzureichern, ist höher, wenn die Ausgangsgehalte niedrig sind. Dies bedeutet, dass Betriebe, bei denen aufgrund ihrer bisherigen Bewirtschaftungspraxis der Humusgehalt im Boden gering ist, stärker vom Handel mit Humuszertifikaten profitieren, da sie ein höheres Potential haben, Humus im Boden anzureichern, welchen sie sich folglich finanzieren lassen können. Landwirte, die ihr Management einem C_{org}-Aufbau angepasst haben und bereits vergleichsweise viel Humus im Acker angereichert haben, können nur wenig bis gar nicht von Humuszertifikaten profitieren. Das liegt daran, dass nur jede zusätzlich gespeicherte Tonne CO₂ vergütet wird und der Humusaufbau laut nicht-linearem Zusammenhang begrenzt ist, siehe *Kapitel 5.3*. Durch den Landwirt bereits erfolgte Klimaschutzmaßnahmen würden damit nicht gewürdigt (Wiesmeier et al., 2020). Infolgedessen können diese Landwirte nicht von einem zusätzlichen Einkommen profitieren, obwohl sie über längere Zeit bereits die zu honorierenden Maßnahmen umgesetzt haben. Somit werden die Pioniere benachteiligt. Es ist daher wichtig, dass Landwirte bereits im Vorhinein in Hinblick auf die zu erwartende Effektivität der von ihnen angestrebten Maßnahmen für den C_{org}-Aufbau durch die

Anbieter der Humuszertifikate beraten werden. Die in *Kapitel 3* aufgeführten humusfördernden Maßnahmen bringen zudem weitere positive Aspekte. Es ist nicht fair, wenn Bewirtschafter erst finanziell vom Humusabbau profitieren und im Zuge der Humuszertifikate dann am Humusaufbau wieder Geld verdienen (Paul et al., 2023).

5.1.3 Mangelnde rechtliche Sicherheit

Ein weiterer Kritikpunkt am System der Humuszertifikate ist die mangelnde rechtliche Sicherheit für den Landwirten. Sollte ein Landwirt es nicht schaffen, die im Vertrag mit dem Anbieter vereinbarte Menge CO₂ im Boden zu speichern, besteht die Gefahr, dass der Anbieter nicht erfüllte Ansprüche geltend machen kann (WWF Deutschland, 2021). Wie in *Kapitel 5.1.4* aufgezeigt kann dies durch diverse Faktoren, die der Landwirt nicht beeinflussen kann, geschehen. So können eine humusabbauende Bewirtschaftung und Witterungsextreme bereits dazu führen, dass Rückzahlungsforderungen vom Anbieter geltend gemacht werden können. Wenn im Vertrag nicht explizit ausgeschlossen, können die Anbieter mögliche Strafzahlungen, die bei nicht Erreichen der Klimaziele fällig sind, auf den Landwirten übertragen. All dies bedeutet, dass es bei einigen Anbieter der Fall sein kann, dass das Risiko für nicht erbrachte Leistungen ausschließlich bei den Landwirten/ landwirtschaftlichen Betrieben liegt.

5.1.4 Reversibilität und Langfristigkeit

Laut Wiesmeier et al. (2020) ist „im Gegensatz zu einer direkten Vermeidung von THG-Emissionen [...] der Aufbau von C_{org} als Klimaschutzmaßnahme nur wirksam, wenn die C-Speicherung dauerhaft erfolgt und die entsprechende CO₂-Menge somit auf absehbare Zeit der Atmosphäre entzogen bleibt“. Bei der C-Speicherung im Boden besteht demnach folgendes Problem: der positive Effekt des C_{org}-Aufbaus ist bei einer Änderung/Verschlechterung der Bewirtschaftungsmaßnahmen vollständig reversibel. Ausschließlich die Menge an C_{org}, welche in Form von Dauerhumus gespeichert ist, kann unter guten Bedingungen längerfristig im Boden festgelegt werden. Neben den beeinflussbaren Faktoren wie den eben genannten Bewirtschaftungsmaßnahmen haben zudem externe Einflüsse, wie die Folgen des Klimawandel Auswirkungen auf die Höhe der Verluste von bereits im Boden gespeichertem C_{org}. Zum aktuellen Zeitpunkt gibt es keine zuverlässigen Prognosen, wie der Klimawandel sich genau auf die C_{org}-Speicherung im Boden auswirkt (Wiesmeier et al., 2020). Es ist wahrscheinlich, dass C_{org} in Anbetracht der Klimaerwärmung verloren gehen kann, auch ohne eine Veränderung der Bewirtschaftungsmaßnahme. Somit ist kein mittel- oder langfristiger Klimanutzen durch Humusaufbau garantiert (WWF Deutschland, 2021). Selbst wenn die Berechnungsgrundlage der Humuszertifikate Abzüge und Puffer mit einbezieht, um Unsicherheiten in der Kohlenstoffbindung und -messung auszugleichen, kann keine langfristige Kohlenstoffbindung garantiert werden. Sofern Humuszertifikate dafür genutzt werden sollen, unvermeidbare Emissionen aus anderen Sektoren zu kompensieren, müssen die Landwirte eine dauerhafte Verpflichtung

eingehen, die humusmehrenden Bewirtschaftungsmaßnahmen über den Vertragszeitraum hinaus fortzuführen oder andernfalls durch Kauf anderer Zertifikate auszugleichen. Demnach müssten die Verträge von den Anbietern Ewigkeitsklauseln enthalten, die bewirken, dass auch bei späteren Bewirtschaftungswechsel die Wirkung des Zertifikates aufgehoben werden kann (Wiesmeier et al., 2020). Die dabei entstehenden rechtlichen Probleme sind in *Kapitel 5.1.3* kurz beschrieben. Folglich würden Zertifikate unter dem Motto: Dauerhafter Aufwand, begrenzte Vergütung verkauft werden. Dies würde eine Aufrechterhaltung der humusmehrenden Maßnahmen über Generationen hinweg und ohne weitere finanzielle Gegenleistung bedeuten. Selbst wenn es gelingt, den Humusvorrat über die Maßnahmen aufrecht zu erhalten, können die externen Faktoren gespeicherten Kohlenstoff freisetzen. Generell ist eine erneute Freisetzung von CO₂ aus dem Boden, wenn auch nur zu Teilen, sehr wahrscheinlich.

5.1.5 Zusätzliche Emissionen

Laut Paul et al. (2023) können die in *Kapitel 3* genannten Maßnahmen zum Humusaufbau nicht nur zur Emissionsreduzierung führen, sondern im Gegenteil auch zusätzliche Emissionen verursachen, welche aus diversen Quellen entstehen können. Ein Beispiel ist zusätzlich freigesetztes CO₂, das bei der Verbrennung von Dieselkraftstoff entsteht, welcher bei zusätzlicher Arbeit mit dem Schlepper notwendig ist. Des Weiteren wird mehr Methan durch eine größere Anzahl an Wiederkäuern, die organische Düngemittel liefern sollen, freigesetzt. Es kann aber auch zusätzlich N₂O durch die eventuelle Ausbringung von Düngemitteln für Zwischenfrüchte freigesetzt werden.

Grundsätzlich lässt sich sagen, dass die organische Bodensubstanz einen Beitrag zur Pflanzenernährung leistet. „Dies gilt jedoch nur, solange der wachsende Pflanzenbestand die freiwerdenden Nährstoffe aufnimmt“ (Wiesmeier et al., 2020). Auf lange Sicht kann der leicht verfügbare C_{org} in Form von Nährhumus ebenfalls zu steigenden N₂O-Emissionen führen. Die Höhe dieser Lachgasemissionen ist allerdings schwer vorherzusagen, da diese von diversen Faktoren abhängt. Beispielsweise haben die hohen Umsatzraten aufgrund der sehr hohen Humusversorgung, die Temperatur, dem pH-Wert des Bodens, der Bodenfeuchte und/ oder -textur einen Einfluss auf die Lachgasemissionen. So ist zu sagen, dass Humus nur bis zu einem bestimmten Anteil im Boden eine Klimaschutzwirkung hat, bei zu hohen Werten steigen die N₂O-Emissionen, sodass die Klimaschutzwirkung wieder sinkt.

5.1.6 Zusätzlichkeit

Für einen effektiven Klimaschutz ist es notwendig, sowohl die Reduzierung von THG-Emissionen durch den Menschen als auch die Rückbindung von bereits freigesetztem CO₂ aus der Atmosphäre zu fördern. Diese beiden Bereiche werden durch den Handel mit den Humuszertifikaten allerdings vermischt, was dazu führt, dass der Klimaschutz erschwert wird (WWF Deutschland, 2021). Im Gedanken der Zusätzlichkeit stellen humusaufbauende Maßnahmen, welche generell im Anbau erfolgen, keine Kompensationsmaßnahmen dar. Die Motivation und Finanzierung für den Aufbau von zusätzlichem C_{org} sollte stets über die Humuszertifikate erfolgen. Speziell sollte die Umsetzung der humusaufbauenden Maßnahmen ohne finanzielle Förderung durch die Zertifikate unwirtschaftlich sein. Hier zeigt sich ein weiteres Problem, da ein Landwirt in die Entscheidung über seine Management-Maßnahmen nicht ausschließlich ökonomische, sondern auch soziale und ökologische Aspekte mit einfließen lässt. Ein weiterer Kritikpunkt ist, dass Doppelförderungen für eine Fläche vermieden werden müssen, da dies den Effekt des Klimaschutzes sonst reduzieren würde (Wiesmeier et al., 2020). Außerdem ist es kritisch zu betrachten, dass eine Maßnahme, die zum Zeitpunkt der Förderung das Kriterium der Zusätzlichkeit erfüllt, dies zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund wechselnder Vorschriften oder fehlender Planungssicherheit eventuell nicht mehr tut. Schlussendlich lässt sich sagen, dass durch den vorgeschriebenen Aspekt der Zusätzlichkeit einige grundlegende Probleme entstehen.

5.1.7 Verschiebungseffekt

Der sogenannte Leakage-Effekt kann sowohl innerhalb eines Betriebes als auch in einer Region auftreten. Dabei treten interne Leakage-Effekte immer dann auf, wenn ein Landwirt angetrieben durch die Finanzierung der Zertifikate dazu veranlasst wird, humusaufbauende Maßnahmen wie bspw. Anbau von Zwischenfrüchten oder organische Düngung auf die Zertifizierungsflächen zu beschränken. Externe Leakage-Effekte können immer dann auftreten, wenn der Landwirt durch die Zertifizierung dazu motiviert wird, bspw. organische Düngung (Gülle, Mist) von anderen Betrieben zuzukaufen. Dazu ist der Aspekt, dass die humusaufbauenden Bewirtschaftungsmaßnahmen (wie bspw. die großflächige Umwandlung von Ackerland in Kurzumtriebsplantagen) zu verringerten Erträgen führen können ein Problem, da so indirekte Landnutzungsänderungen (iLUC) in Betracht gezogen werden könnten. Als Vorsichtsmaßnahme zielt der in *Kapitel 4.2* genannte Gold Standard darauf ab, Projekte gezielt auszuschließen, welche nachweislich die Produktivität der Ackerfläche reduzieren (Paul et al., 2023). Im Generellen lässt sich dennoch sagen, dass die Vorkehrungen, die den Leakage-Effekt vermeiden sollen, bis dato unzureichend sind.

5.1.8 Synergien und Trade-Offs

Bei der Bewertung einer humusaufbauenden Maßnahme zur Kompensation von THG-Emissionen müssen neben der angestrebten Klimawirkung zudem zusätzliche positive (Synergien) wie negative (Trade-Offs) Auswirkungen auf andere Schutzgüter berücksichtigt werden. Laut Wiesmeier et al. (2020) werden hierbei die „Steigerung der Ertragsstabilität und der biologischen Aktivität im Boden, sowie eine Steigerung der oberirdischen Biodiversität durch erweiterte Fruchtfolgen und Agroforst-Systeme, eine Reduzierung des mineralischen Stickstoffdüngerbedarfs durch Leguminosen, sowie eine Reduzierung von Bodenerosion durch verstärkten Einsatz von Zwischenfrüchten und reduzierter Bodenbearbeitung“ (Wiesmeier et al., 2020) als Synergien angesehen. Besonders positiv zu betrachten ist, dass eine verbesserte Wasserinfiltration und -speicherkapazität aus dem Aufbau von Humus resultiert, was besonders für die zukünftig zunehmende Dürreperioden und Starkniederschläge von Bedeutung ist. Als Trade-Offs wird in diesem Zusammenhang das Abwägen zwischen Vor- und Nachteilen der humusaufbauenden Maßnahmen bezeichnet. Der größte Trade-Off in diesem Zusammenhang ist die verringerte Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen, die C_{org} im Boden aufbauen sollen. An dieser Stelle setzen folglich auch die Humuszertifikate an. Zudem gelten die Zunahme der N_2O -Emissionen mit steigendem C_{org} -Gehalt auf den Flächen sowie eine Reduzierung der Biomasseproduktion für menschliche Ernährung und Energie bei Umstellung auf ökologische/regenerative Bewirtschaftung als Trade-Off. Wie bereits in *Kapitel 5.1.7* erwähnt, können Trade-Offs auf einer Zertifizierungsfläche zum Leakage-Effekt führen und somit zum Problem werden. (Wiesmeier et al., 2020)

5.2 Verbesserungsvorschläge für den Emissionshandels in der Landwirtschaft

Aus den oben in *Kapitel 5.1* genannten Gründen ist eine Generierung von CO_2 -Zertifikaten, die landwirtschaftlichen Betrieben den Humusaufbau honorieren sollen, nicht das geeignete Instrument, um Klimaschutz zu betreiben. Denn „[der] Handel mit CO_2 -Zertifikaten darf die europäischen Klimaschutzbemühungen nicht unterminieren“ (WWF Deutschland, 2021). Wie in *Kapitel 5.1* aufgezeigt, können Humuszertifikate zurzeit z.B. nicht die Kriterien der Langfristigkeit und Zusätzlichkeit garantieren. Zudem stellt der Leakage-Effekt eine Gefahr dar und die einmalige Bezahlung für eine dauerhafte Maßnahme ist den Landwirten gegenüber nicht fair. Daher ist der Klimanutzen der Humuszertifikate deutlich geringer als es die zertifizierten Kohlenstoffanreicherungen anpreisen. Ganz im Gegenteil, sie können dem Klima sogar zusätzlich schaden, indem Käufer der Humuszertifikate weniger in die Emissionsvermeidung investieren oder die vom Staat bereitgestellten Gelder nicht in klimawirksame Maßnahmen fließen lassen. Zu diesem Zweck werden im Folgenden Verbesserungsvorschläge für das System des

Humuszertifikathandels genannt und erläutert, wobei zuerst auf die in *Kapitel 5.1* benannten Probleme und folgend auf weitere Verbesserungsmöglichkeiten eingegangen wird.

5.2.1 Quantifizierung der C_{org} -Änderungen

Änderungen der C_{org} -Vorräte im Boden müssen stets zuverlässig quantifiziert werden. Um die methodischen Anforderungen an die Bodenprobennahme gewährleisten zu können, müssen diverse Faktoren gleichbleibend bei jeder Messung berücksichtigt werden. So müssen die C_{org} -Vorräte zuverlässig und repräsentativ für die gesamte Fläche durch die Bestimmung des C_{org} -Gehaltes im Boden, der Lagerungsdichte und des Steinanteils bestimmt werden. Hierbei sollte die repräsentative Probennahme im Frühjahr vor der Bodenbearbeitung und Düngung oder erst im Herbst erfolgen. Sollten bereits Dünge- oder Bodenbearbeitungsmaßnahmen vorgenommen worden sein, sollten mindestens 6 Wochen bis zur Probennahme gewartet werden. Die Tiefe der Beprobung sollte zudem abhängig von der Bearbeitungstiefe des Bodens gewählt werden. Trotz des Einhaltens dieser Vorgaben, bleiben die Aussagen zu der C_{org} -Entwicklung auf der Ackerfläche unsicher, sodass es sich bei den Messergebnissen der C_{org} -Gehalte nur um eine Annäherung an die Realität handelt. Laut Krämer (2022) kann den Unsicherheiten „mit mathematischen Methoden z. B. über die Bildung eines Deltas verschiedener Datenpunkte genügend begegnet werden, um die C_{org} -Entwicklungen einer Fläche aussagekräftig zu beschreiben“. Neben diesen rein mathematischen Methoden gibt es bereits diverse Methoden der Humus- bzw. C_{org} -Bestimmungen. Eine davon integriert mithilfe künstlicher Intelligenz die systematischen Fernerkundungsdaten mitsamt schlagspezifischen Bodenproben und Nutzungsdaten. Weitere Technologien funktionieren mithilfe von Infrarotspektroskopie, Isotopentechnologie, Metabarcoding und auch tragbare Feldscanner existieren bereits. Diese Technologien haben den Nutzen, dass sie die Laboranalysen in gewissen Aspekten ergänzen oder sogar ersetzen können und auf diese Weise sowohl die Kosteneffizienz als auch den funktionellen Informationsgehalt von Bodenproben im Sinne der Landwirte verbessern können. (Krämer, 2022)

5.2.2 Fairness

Um den Aspekt der Fairness zu verbessern, könnte der Finanzierungsrahmen verändert werden, sodass nicht nur die Erhöhung des C_{org} -Gehaltes, sondern auch der Erhalt des standort- und nutzungsspezifisch optimalen Humusgehalt bezahlt wird. Das Problem hierbei ist wiederum, anspruchsvolle Mindeststandards zu entwickeln, welche sich nach Landnutzungsart und Region unterscheiden sollten. So würden Pioniere nicht mehr benachteiligt werden, während zeitgleich Landwirte, welche noch keine humusaufbauenden/ -erhaltenden Maßnahmen angewendet haben, ebenfalls profitieren. Zudem sollte man, wie in *Kapitel 5.1.6* beschrieben, dem

Aspekt der Zusätzlichkeit weniger Gewichtung zukommen lassen, damit alle Landwirte von den Erlösen der Humuszertifikate profitieren können.

5.2.3 Mangelnde rechtliche Sicherheit

Über alle Kritikpunkte hinweg lässt sich sagen, dass ein ganzheitliches staatliches Förder- und Regulierungsprogramm eingeführt werden müsste, welches Standards in Bezug auf die in *Kapitel 5.1* genannten Probleme einführt. Im Bereich der rechtlichen Sicherheit muss dieses Programm den Anbietern Vorgaben für einen Vertragsabschluss machen. Dazu muss geregelt werden, was im Fall eines CO₂-Abbaus im Boden während und nach der Vertragslaufzeit geschieht. Die Verantwortung sollte zudem nicht zu 100% bei den Landwirten liegen, da auch der externe Faktor Klimawandel einen Einfluss auf den Humusabbau hat. Vielmehr sollten auch die Anbieter einen Teil der Verantwortung mittragen. Ganzheitlich betrachtet muss dieser Vertrag dann, wie in *Kapitel 5.2.4* aufgezeigt, langfristig gestaltet sein, wobei gleichzeitig der Erhalt und nicht die Speicherung von zusätzlichem CO₂ im Boden finanziert wird.

5.2.4 Reversibilität und Langfristigkeit

Auf lange Sicht und um beispielsweise die Reversibilität zu vermeiden, sollte das Carbon Farming durch staatliche Förder- und Regulierungsprogramme umgesetzt werden. Hierbei sollten sowohl die in *Kapitel 5.2.2* erwähnten standort- und nutzungsspezifischen C_{org}-Veränderungen reguliert, sowie der Erhalt der C_{org}-Vorräte und der Ausbau von Biodiversität honoriert werden. Nur solche Förder- und Regulierungsprogramme, welche die Bodengesundheit als oberstes Ziel sehen, können Landwirte die essenzielle Planungssicherheit garantieren. Wichtig hierbei ist, dass die Maßnahmen langfristig angelegt werden müssen und nicht ausschließlich auf die Klimawirkung abzielen, sondern die gesamten Bodenfunktionen und Zusammenhänge mit einbeziehen. Damit Landwirte über das Wissen der Bodenbildung verfügen, muss die Lehre hierüber in der landwirtschaftlichen Ausbildung verstärkt werden. Laut Krämer (2022) ist lebendiger Humusaufbau, der „auf der reflexiven Bildung der Landnutzer*innen basiert, [...] ein erheblicher Faktor, um den Problemen der Reversibilität und Langfristigkeit begegnen zu können. Darüber hinaus [seien] Lerneffekte bei Landnutzer*innen einer der wichtigsten Hebel, um die Transformation unserer Landnutzung zu inkubieren“. Darüber hinaus kann die Langfristigkeit nur über dauerhafte Verträge erreicht werden.

Trotzdem muss beachtet werden, dass die Sequestrierung von C_{org} im Ackerboden trotz allen Bemühungen nie langfristig sichergestellt werden kann, sodass die großen Kohlenstoffsenken (Moore, Grünland, Wälder, Feldgehölze etc.) besonderen Schutz unterliegen müssen (WWF Deutschland, 2021). Hierbei könnte finanzielles Engagement aus der Privatwirtschaft über

Humuszertifikate von Bedeutung sein. Trotzdem muss die mögliche Reversibilität immer mit einkalkuliert werden.

5.2.5 Zusätzliche Emissionen

Insgesamt und unter ganzheitlicher Betrachtung ist es sinnvoller, die Vermeidung von Emissionen voranzutreiben, anstatt das Hauptaugenmerk auf Kompensationsmöglichkeiten zu legen. So sollte ein Ausgleich von Treibhausgasemissionen durch CO₂-Zertifikate die letzte Option sein und nur als Lösung für nicht weiter vermeidbare Emissionen genutzt werden. Im Bereich der Landwirtschaft wären dies die Humuszertifikate, die vor allem auf der Wiedervernässung von Flächen basieren sollte. Somit könnten zum einen die durch die Entwässerung entstehenden Kohlenstoffverluste gestoppt und zeitgleich Emissionen reduziert werden. Denn wie in *Kapitel 3.2* erläutert, sind landwirtschaftlich genutzte Moore trotz des geringen Flächenanteils, neben den Emissionen aus Düngung und Tierhaltung, eine der größten Kohlenstoffquellen im Bereich der Landwirtschaft. Aus diesem Grund sollte die Wiedervernässung von Moorflächen als Maßnahme für den Klimaschutz vorrangig gefördert werden (WWF Deutschland, 2021). Wichtig für die betroffenen Landwirte ist, dass diese mit in die Planung der Wiedervernässung einbezogen werden und diese Pläne für jede Region einzeln entwickelt werden. Wenn man auf das große Ganze schaut, bedeutet Klimaschutz in der Landwirtschaft nicht die Sequestrierung von CO₂ im Boden, sondern primär die Vermeidung und Reduzierung der Emissionen aus Tierhaltung und Düngung und vorerst den derzeit weltweit weitesten Abbau der Humusvorräte zu stoppen, statt zusätzlichen Humusaufbau zu fördern. Anstelle von mineralischen Düngern, welche bei der Herstellung sehr energieintensiv sind und viele Emissionen freisetzen, sollte besonderes Augenmerk auf den Anbau von stickstoffbindenden Leguminosen und Verwendung von Wirtschaftsdüngern gelegt werden (WWF Deutschland, 2021).

5.2.6 Zusätzlichkeit

Auch in Hinblick auf die geforderte Zusätzlichkeit wäre ein ganzheitliches staatliches Förder- und Regulierungsprogramm sinnvoll. So muss der Aspekt der Zusätzlichkeit aus den Anforderungen für Humuszertifikate rausgestrichen werden. Dies ist vor allem dann nötig, wenn zukünftig der Erhalt und nicht der zusätzliche Aufbau von Humus gefördert werden soll, damit alle Landwirte von den Erlösen aus Humuszertifikaten profitieren können und die Fairness unter dem Aspekt der Zusätzlichkeit leidet. Über verbesserte Verträge mit den Anbietern muss geregelt werden, wie die langfristigen humuserhaltenden Ziele aussehen. Falls die Zusätzlichkeit ein wichtiges Kriterium für die Humuszertifikate bleibt, muss durch das staatliche Förder- und Regulierungsprogramm sichergestellt sein, wie mit der Finanzierung der Maßnahmen umgegangen wird, wenn diese Maßnahme, die zum Zeitpunkt der Förderung das Kriterium der Zusätzlichkeit erfüllt, dies zu einem späteren Zeitpunkt aufgrund wechselnder Vorschriften

oder fehlender Planungssicherheit eventuell nicht mehr tut. Da dies aber sehr individuell und kompliziert umzusetzen wäre, ist eine Streichung um den Aspekt der Zusätzlichkeit simpler.

5.2.7 Verschiebungseffekt

Laut WWF Deutschland (2021) kann man dem Verschiebungseffekt besonders durch das Verständnis über die große „Bedeutung des Kohlenstoffpfads in den Dauerhumus durch die biodiversitätsreiche Rhizosphäre“ vorbeugen. Somit wäre auch in Anbetracht der Vermeidung des Verschiebungseffekts die Schulung und die gesamtbetriebliche Beratung der Landwirte in Hinblick auf die Boden- und Humusbildung essenziell. Einen besonderen Einfluss auf die Reduzierung der Gefahr des Verschiebungseffekt hätte zudem eine Einbindung besonders vieler Flächen einer Region und eines Betriebes in das System des Zertifikathandels. So könnte vermieden werden, dass Wirtschaftsdünger von anderen Betrieben abgekauft werden oder ein Betrieb sich nur auf die Zertifizierungsfläche konzentriert. Demnach würde je nach Region der Humusgehalt auf allen Flächen aufrechterhalten oder sogar erhöht werden können, was in Anbetracht auf die Ganzheitlichkeit positive Auswirkungen auf die gesamte Region hätte.

5.2.8 Sonstige Verbesserungsvorschläge

Neben den Verbesserungsvorschlägen in Hinblick auf die in *Kapitel 5.1* genannten Probleme der CO₂-Zertifizierung in der Landwirtschaft gibt es noch weitere wichtige Gesichtspunkte, die in Anbetracht der Ganzheitlichkeit zu berücksichtigen sind. Wie bereits erläutert, ist es sinnvoll, die Bezahlung über Humuszertifikate an den Erhalt des standort- und nutzungsspezifischen Humusgehaltes zu knüpfen, statt nur den neu angereicherten Humus zu honorieren. Daneben sollte die Erhöhung der Biodiversität nicht nur eine verpflichtende Nebenleistung darstellen, sondern sie sollte in Hinsicht auf die essenzielle Ganzheitlichkeit mit in die Maßnahmen integriert werden. Hierbei müssen die humusaufbauenden und -erhaltenden Maßnahmen verstärkt in politischen Entscheidungen berücksichtigt werden. Hierzu sollten auf lange Sicht gesehen umweltschädliche Agrarsubventionen durch die Förderung nachhaltiger Produktionsweisen, wie bspw. ganzjährige Bodenbedeckung, Förderung der Biodiversität, vielfältige Fruchtfolgen und Agroforstsysteme, ausgetauscht werden. Dabei müssen stets die Planungssicherheit und die Umstrukturierung der landwirtschaftlichen Betriebe gegeben und gefördert werden. Um die in *Kapitel 5.1.6* genannten Doppelförderungen zu vermeiden, müsste beim Verkauf der Zertifikate sichergestellt werden, dass diese Flächen nicht bereits zur Kompensation genutzt werden. Dies muss entweder durch den Anbieter selbst oder den Zwischenhändler geschehen. Zudem ist es wichtig, den Käufern von Humuszertifikaten aufzuzeigen, dass sie sich keine Klimaneutralität erkaufen können. So sollte es verboten werden mit dem Claim „Klimaneutralität“ zu werben. Laut Paul et al. (2023) könnten die Käufer der Klimazertifikate mit Sätzen wie „Mit meiner Finanzierung helfe ich der EU dabei, ihre Klimaschutzziele zu erreichen“ auf ihren Beitrag zum Klimaschutz hinweisen. Um das Ziel des Humusaufbaus zu

erreichen, kann es des Weiteren hilfreich sein, Ernährungsgewohnheiten zu unterstützen, welche die Nachfrage nach Agrarprodukten erhöhen, die nachweislich zum Humusaufbau führen. Beispielsweise wäre dies die Förderung der pflanzlichen Ernährung. Mit dieser werden zum einen die Emissionen aus der Tierhaltung reduziert und zugleich wird der Anbau von eiweißreichen Pflanzen wie beispielweise Leguminosen gefördert. Im Bereich der Tierhaltung sollte demnach auch die Fütterung mit regionalen Eiweißpflanzen vorangebracht werden. In Hinblick auf die Bezahlung der Landwirte durch die Humuszertifikate ist zu nennen, dass anstelle der maßnahmenbasierten Zahlungen die ergebnisorientierten Bezahlungen, wie im gesamten *Kapitel 5.2* aufgezeigt, diverse Vorteile aufweisen. Weitere Verbesserungsvorschläge zielen darauf ab, die Einstiegskosten für die Landwirte zu reduzieren. Dies kann erreicht werden, indem die Bodenproben für die Zertifikate die Proben für die Düngedbedarfsermittlung ersetzen. Zum anderen können die Käufer von Zertifikaten in regionalen Partnerschaften die Kosten für die notwendigen Bodenproben oder mögliche Schulungen der Landwirte mitfinanzieren. So würden die Humuszertifikate neben der Klimawirkung auch eine soziale Komponente enthalten, was im Sinne der angeführten Ganzheitlichkeit wäre.

Auch der NABU hat mit Krämer (2022) Empfehlungen an die Politik für biodiversitätsfördernde Carbon-Farming Ansätze geliefert. Wie bereits aufgeführt sieht auch der NABU Vorteile in dem Aufbau von einem staatlichen Förder- und Regulierungsprogramm, welches standort- und nutzungsspezifisch die relativen C_{org} -Veränderungen reguliert, den Erhalt bzw. die Erhöhung der optimalen C_{org} -Vorräte honoriert und langfristige Bodenbiodiversitätsindikatoren mit in das bisherige System der Humuszertifikate einbezieht. Darüber hinaus sieht der NABU Schulungen und Beratungen der Landwirte als sinnvoll an und sieht vor, dass die Förderung von „Forschungs- und Entwicklungsinvestitionen in Technologielösungen für Bodenanalyse und -nutzung, die [...] Handlungsautonomie und Selbstlernförderung von Landwirt*innen unterstützen“. Als letzten wichtigen Punkt zählt Krämer (2022) die Integration aller Treibhausgasemissionen landwirtschaftlicher Betriebe in Carbon-Farming-Ansätze auf.

5.3 Begrenzung des maximalen Humusaufbaus

Im Zuge der Problematik der Effektivität der C-Sequestrierung stellt sich die Frage, wie lange und in welchem Ausmaß Humus aufgebaut werden kann oder ob sich mit der Zeit ein Gleichgewicht einstellt, das dazu führt, dass der Humusaufbau stagniert und somit eine Höchstgrenze von C_{org} im Boden erreicht werden kann. Im Folgenden werden die wesentlichen Aspekte, die zur Beantwortung dieser Frage beitragen, aufgezeigt.

Die Höhe des Humusgehaltes wird, wie bereits kurz in *Kapitel 2.3* aufgezeigt, durch 2 wesentliche Faktoren beeinflusst. Kurzgesagt durch die Höhe des Humusaufbaus und durch die Höhe des Humusabbaus. Hierbei haben das geologische Ausgangsmaterial, die Textur des Bodens und besonders der Feinanteil, das Klima, Grund- und Stauwasser, sowie die Landnutzungsart, die Fruchtfolge und die Art und Intensität der Bewirtschaftung Einfluss auf die Höhe des Humusaufbaus (Kolbe & Zimmer, 2015). Es wird bislang davon ausgegangen, dass die C_{org} -Anreicherung besonders durch den Feinanteil im Boden begrenzt wird (Begill et al., 2023). Generell liegen die Einflüsse auf den Humusaufbau durch das Klima bei ca. 50%, die Eigenschaften des Bodens machen einen Anteil von 20-30% aus und lediglich 5-30% des Humusaufbaus werden durch die Bewirtschaftung beeinflusst (Kolbe & Zimmer, 2015). Somit hat man durch die Umsetzung der in *Kapitel 3* genannten Maßnahmen lediglich einen geringen Einfluss auf den Humusaufbau. Die Höhe des Humusabbaus ist sowohl von der biochemischen Zusammensetzung und Abbaustabilität der organischen Substanz, als auch von der Nährstoffverfügbarkeit für die Bodenlebewesen und von chemischen und physikalischen Stabilisierungsprozessen des Bodens (wie beispielsweise der Bindung zwischen organischen und mineralischen Bestandteilen, dem Einschluss in Bodenaggregate und der Gehalte an Sauerstoff), sowie von klimatischen und hydrologischen Einflussgrößen des Standortes abhängig (Kolbe & Zimmer, 2015). Im Allgemeinen lässt sich sagen, dass alle Einflussgrößen optimal zusammenspielen müssen, damit ein optimaler Humusaufbau gewährleistet werden kann, wobei die Landwirte mit den humusaufbauenden Maßnahmen nicht mehr als 5-30% Einfluss nehmen können.

Um den Humusaufbau besser zu verstehen, muss man die Dynamik von C_{org} (im Kontext dieser Bachelorarbeit synonym zu dem Begriff SOC verwendet) im Boden kennen. Aktuell wird davon ausgegangen, dass sich der C_{org} im Boden in zwei Fraktionen unterteilen lässt. Erstens in den partikulären organischen Kohlenstoff (POC) und zweitens in den mineralassoziierten organischen Kohlenstoff (MAOC). Der POC entsteht durch Fragmentierung und Translokation von strukturellen Ernteresten, hat geringe Umsatzzeiten von einigen Jahren bis hin zu wenigen Jahrzehnten und gleicht somit dem labilen Teil des Humus (Nährhumus). Demnach ist der POC nicht entscheidend für die langfristige Speicherung von C im Boden, welche wir durch die in *Kapitel 3* genannten Maßnahmen erreichen wollen. Dennoch ist der POC einerseits wichtig für die Bodenstruktur und andererseits dient er als Nährstoff- und Energiequelle für die

Mikroorganismen (Begill et al., 2023). Im Gegenteil zum POC entsteht der MAOC meist durch die direkte Sorption von pflanzlich gelöstem C_{org} an die Mineraloberflächen im Boden und entspricht damit dem im Feinanteil des im Boden gespeicherten C_{org} . Der MAOC weist im Gegensatz zum POC sowohl längere Umsatzzeiten von einigen Jahrzehnten bis hin zu Jahrhunderten (Dauerhumus), als auch niedrigere C:N-Verhältnisse auf (Begill et al., 2023). In Hinblick auf den Klimawandel und die langfristige C-Sequestrierung sollte demnach besonders der MAOC Beachtung finden.

Bisher wird davon ausgegangen, dass die Fähigkeit des Bodens, zusätzlichen Kohlenstoff als MAOC zu stabilisieren, durch die Höhe des Feinanteils im Boden und seine mineralische Oberfläche begrenzt ist. So wird angenommen, dass die Feinfraktion im Boden ab einem bestimmten Punkt gesättigt ist und keinen weiteren C_{org} speichern kann. Dies begrenzt die Höhe des Humusaufbaus und gleichzeitig würden sich nach dieser Annahme die Maßnahmen zur C-Sequestrierung auf kohlenstoffuntersättigte Böden beschränken. Dieser nicht lineare Zusammenhang zwischen C-Eintrag in den Boden und C_{org} -Aufbau (MAOC-Aufbau) ist in *Abbildung 8* zu sehen. Die Effektivität der humusaufbauenden Maßnahmen würde in den ersten Jahren und Jahrzehnten wesentlich höher sein als nach einigen Jahrzehnten. Bei gleichbleibenden Umweltbedingungen und Vegetationsverhältnissen würde sich nach einigen Jahrzehnten ein Fließgleichgewicht zwischen Humusaufbau und Humusabbau einstellen, was zum Erreichen eines standorttypischen Humusgehaltes führen würde. In welcher Höhe sich dieser standorttypische Humusgehalt befindet, ist abhängig von den anfangs genannten Faktoren und somit unter anderem von Klima und Boden beeinflusst. Nach dem nicht-linearen Konzept des Humusaufbaus würde die Effektivität der humusaufbauenden Maßnahmen (siehe *Kapitel 3*) mit den Jahren sinken.

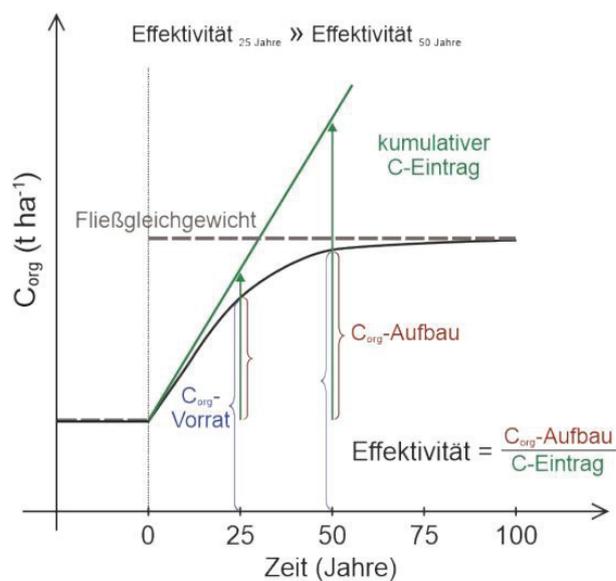


Abbildung 8: Nicht-linearer Zusammenhang zwischen dem C-Eintrag und dem C_{org} -Aufbau

Quelle: Wiesmeier et al., 2020, S.4

Neue Studien von Begill et al. (2023) zeigen hingegen auf, dass ein linearer Aufbau von MAOC möglich sein kann. Dies würde bedeuten, dass unbegrenzter Humusaufbau in Form des stabileren langfristigen MAOC theoretisch möglich wäre. In ihren Studien haben Begill et al. (2023) sowohl für Ackerland- als auch für Grünlandböden lineare Beziehungen zwischen MAOC und C_{org} aufgezeigt. Hierbei speicherten intensiv bewirtschaftete gemäßigte Ackerböden etwa 86% des gesamten C_{org} als MAOC und 14% als POC und dies unabhängig von den Bodeneigenschaften und den C_{org} -Vorräten. Dahingegen wiesen Grünlandböden eine größere Streuung und damit eine höhere Variabilität der Anteile von MAOC und POC auf. Die Neigung der Grünlandböden den Kohlenstoff in Form von MAOC zu speichern ist etwas geringer. So wurden 72% des C_{org} s als MAOC und 18% als POC gespeichert. Diese nachgewiesenen hohen Mengen an MAOC werden laut Begill et al. (2023) aber sicherlich nicht unter allen Bedingungen erreichbar sein.

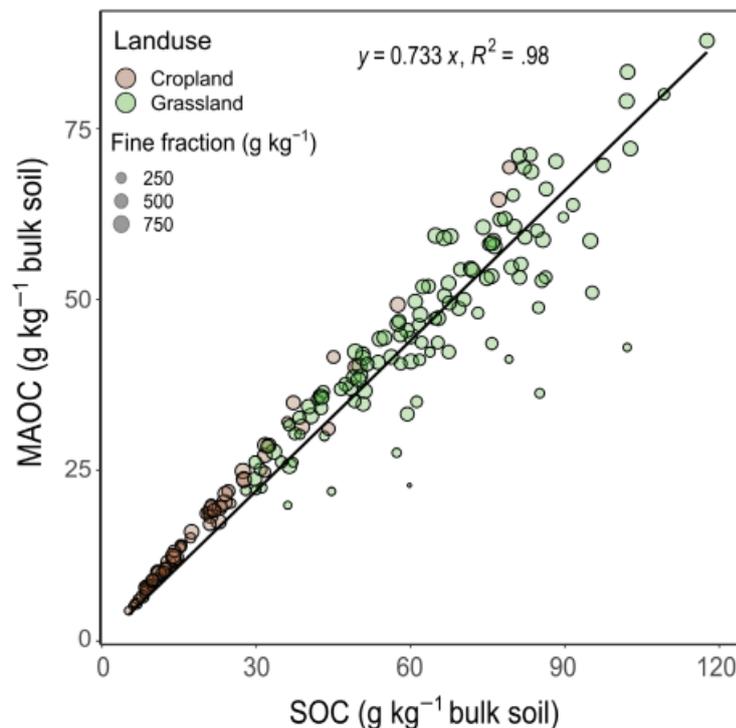


Abbildung 9: Linearer Zusammenhang zwischen C_{org} und MAOC

Quelle: Begill et al., 2023, S. 4665

Nach Betrachtung der beiden Varianten des möglichen Humusaufbaus lässt sich sowohl die Frage nach dem maximalen Humusaufbau als auch die Frage nach der Effektivität des Humusaufbaus im Zeitverlauf nicht konkret beantworten. Beide aktuell diskutierten Varianten sind gegensätzlich zueinander und gegenwärtig ist wissenschaftlich nicht geklärt, welche der beiden Varianten den tatsächlichen Humusaufbau beschreibt. Dazu ist die Höhe des Humusgehaltes abhängig von Klima, Bodenart und Bewirtschaftung, was eine allgemeine Aussage über den maximalen Humusgehalt aller landwirtschaftlicher Flächen unmöglich macht, da auf jeder

Fläche individuelle (maximale) Humusgehalte erzielt werden können. Wenn der Humusaufbau dem nicht-linearen Zusammenhang folgen würde, wären die in *Kapitel 3* genannten Maßnahmen mit dem Ziel des Humusaufbaus nur auf Böden sinnvoll, die nicht mit Humus gesättigt sind. Die humusaufbauenden Maßnahmen wären nur bis zu dem Zeitpunkt geeignet, an dem sich ein Fließgleichgewicht eingestellt hat. Ab diesem Zeitpunkt, also auf humusgesättigten Böden, muss das Ziel der Humuserhalt sein und die Maßnahmen müssten in Anbetracht des Kosten-Nutzen-Verhältnisses gegebenenfalls angepasst werden. Ausgehend von der Theorie des linearen Humusaufbaus wäre es möglich permanent das Ziel des Humusaufbaus, bzw. dem langfristigen Aufbau von C_{org} in Form von MAOC zu verfolgen.

5.4 Wie sinnvoll sind die Methoden der CO₂-Speicherung?

Neben einer klimaeffizienteren Landwirtschaft sind zudem industrielle Lösungen notwendig, damit jedes Jahr mehrere hundert Millionen Tonnen CO₂ aus der Atmosphäre gebunden werden können. Beide Möglichkeiten sind sehr wichtig, um das EU-Ziel der Klimaneutralität bis 2050 zu verwirklichen. Um besser verstehen zu können, welchen Beitrag die in *Kapitel 3* aufgeführten Maßnahmen im ganzheitlichen Kontext auf landwirtschaftliche Böden haben, wird im Folgenden sowohl auf die Umweltwirkung als auch auf die Langfristigkeit der Maßnahmen kritisch eingegangen. Dafür wird in Hinblick auf die Umweltwirkung auf weitere Ökosystemdienstleistungen der Maßnahmen neben dem reinen Humusaufbau und je nach Maßnahme auf eventuell zusätzlich emittierte Treibhausgase eingegangen. Um die Langfristigkeit bewerten zu können wird auf die für die Maßnahmen typischen gemessenen Humusgehalte eingegangen, beziehungsweise wenn Forschungsergebnisse es ermöglichen, wird eine Aussage über die jährlich speicherbare Menge von C_{org} getroffen. Darüber hinaus werden zu den Maßnahmen der Wiedervernässung, der Biokohlen und dem Dauergrünlanderhalt die Stabilität des Humus bewertet. Der Forschungsstand ist nicht für jede der zur Verfügung stehenden humusaufbauenden Maßnahme gleich. Demnach können zum derzeitigen Zeitpunkt keine vergleichenden Aussagen für jedes genannte Kriterium in Bezug auf die verschiedenen Maßnahmen getroffen werden.

Ergänzend wurde für die Maßnahme der Zwischenfrüchte erstens die Humusbilanz mithilfe einer Excel-Tabelle der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) nach der VDLUFA-Methode berechnet und zweitens die Wirtschaftlichkeit über die Berechnung des Deckungsbeitrags (bzw. die Direkt- und arbeitskostenfreie Leistung) mithilfe der Datensammlung Brandenburg, dem Strohpreisrechner der Landwirtschaftskammer Niedersachsen und dem GAP-Kalkulator der LFA Mecklenburg-Vorpommern ermittelt. Zudem wurde in diesem Zuge kurz auf die Maßnahme des Managements eingegangen, indem die Auswirkung auf Deckungsbeitrag und Humusbilanz der Einarbeitung der Strohreste berechnet wurde.

5.4.1 Biokohlen

Biokohlen sind eine bis dato umfangreich untersuchte Maßnahme für die C-Sequestrierung, wodurch man gut Aussagen über die Langfristigkeit und die Umweltwirkungen treffen kann.

Aus der Sicht der Landwirte haben Biokohlen viele positive Auswirkungen auf die Ackerböden, wie in diesem Kapitel beschrieben wird. Der Einsatz ist allerdings teuer, wodurch die Finanzierung über die Humuszertifikate eine Möglichkeit der Bezahlung darstellen.

5.4.1.1 Langfristigkeit

Die Stabilität der Biokohlen ist sehr hoch, da Kohle im Allgemeinen aus sehr stabilen Kohlenstoffverbindungen besteht. Auf die Frage der langfristigen Stabilität von Biokohlen gibt es bislang keine sichere Antwort. Die Lebensdauer des Kohlenstoffes kann in Abhängigkeit von der Art der Kohle, dem Klima, dem Bodentypen und der Landnutzung stark variieren. Konkret lässt sich die Stabilität der Biokohlen sowohl durch das H/C- als auch durch das O/C-Verhältnis näher bestimmen. Hierbei korreliert das O/C-Verhältnis mit dem Anteil an flüchtigen Verbindungen in der Kohle und spiegelt so das Ausmaß der Abbaubarkeit wider, sodass mit zunehmendem Alter und damit zunehmender Oxidation der Oberflächen der Biokohlen die H/C- und O/C-Verhältnisse steigen (Haubold-Rosar et al., 2016). Neben der Stabilität der Kohlen hat auch der Abbau der Biokohlen einen Einfluss auf die Langfristigkeit. Die Schnelligkeit des Abbaus hängt von folgenden Faktoren ab: physikalische Zersetzung bzw. mechanische Verwitterung, chemische Oxidation bzw. Mineralisierung und der biologische Abbau durch Bakterien und Pilze. Nach Einbringung der Biokohle in den Boden wird diese mit der Zeit in die Bodenaggregate und an mineralische Bodenbestandteile gebunden und wird somit vor weiterem Abbau geschützt. Wie gut die Biokohlen sich binden können, hängt von der Oxidation ihrer Oberflächen und damit von der Bildung funktioneller Gruppen ab. Zeitgleich wird dadurch aber auch die Löslichkeit in Wasser erhöht und somit die Mobilität der Kohlepartikel im Boden. Daraus resultierend kann die Biokohle gut in tiefere Bodenschichten gelangen, wodurch sie vor schnellem Abbau geschützt ist. Laut Haubold-Rosar et al., 2016 unterliegt die Abbaukinetik einer nicht linearen Funktion. In Untersuchungen konnte herausgefunden werden, dass Pyrolyse-Kohlen unter Freilandbedingungen eine durchschnittliche Verweilzeit von mehreren 100 Jahren bis über 1.000 Jahre aufweisen, während HTC-Kohlen deutlich instabiler sind und nur wenige Jahrzehnte im Boden verbleiben. Weitergehend findet man in der Literatur Angaben für die jährliche Sequestrierungsraten, laut Li und Tasnady (2023) können durch den Einsatz von Biokohlen etwa 369,8 bis 556,6 kg SOC pro Hektar und Jahr gespeichert werden. Diese Angabe sollte aber mit Vorsicht betrachtet werden, da aufgrund von mangelnden Langzeitversuchen bislang keine zuverlässigen Sequestrierungsraten für den Kohlenstoff aus Biokohlen genannt werden können (Wiesmeier et al., 2020). Insgesamt lässt sich sagen, dass Biokohle eine Möglichkeit darstellt, Kohlenstoff langfristig im Boden zu speichern, was man auch aus

dem Beispiel der Terra Preta ableiten kann. Somit ist der Einsatz von Biokohle in Hinblick auf die Langfristigkeit eine sinnvolle Maßnahme.

5.4.1.2 Umweltwirkung

Neben der C-Sequestrierung bietet der Einsatz von Biokohle weitere positive Umweltleistungen. Studien haben aufgezeigt, dass Biokohlen aufgrund ihrer mechanischen Festigkeit nach der Inkohlung als Pseudokörner die Korngrößenverteilung beeinflussen könnten. Zudem wird die Trockenrohdichte des Bodens verringert, wodurch sich das Gesamtporenvolumen des Bodens erhöht. So kann es zu einem verbesserten Luft- und/ oder Wasserhaushalt kommen. Bei der Anwendung von 9 Tonnen Biokohle pro Hektar auf einem Schlufflehm kann die Wasserhaltekapazität um 11% erhöht werden (Haubold-Rosar et al., 2016). Ebenfalls konnte eine signifikante Verbesserung der Aggregatstabilität festgestellt werden, sodass man zu dem Schluss kam, dass diese Tatsache und die erhöhte nutzbare Feldkapazität zu der verringerten Erosionsanfälligkeit, der mit Biokohle behandelten Böden, führt (Haubold-Rosar et al., 2016). Diese Eigenschaften werden im Laufe der Zeit und in Hinblick auf den Klimawandel immer relevanter werden.

Über die verbesserten bodenphysikalischen Eigenschaften hinaus haben Biokohlen indirekt, aufgrund ihrer Porosität und großen inneren Oberfläche, eine große Nährstoff-Speicherkapazität. Hierbei weisen Pyrolysekohlen oder HTC-Kohlen aus basischen Ausgangsstoffen einen hohen pH-Wert auf, was zu einer pH-Wert-Anhebung im Boden führt, wodurch dann die chemischen Lösungs- und Fällungsreaktionen beeinflusst werden. Auch direkt kommt es durch den Einsatz von Biokohlen zum Eintrag von Makro- und Mikronährstoffen in den Boden. Des Weiteren gibt es Hinweise darauf, dass Biokohlen die Verfügbarkeit von organischen Schadstoffen im Boden verringern kann, was positiv zu betrachten ist. Allerdings kann sich dies negativ auf die Wirkung von ausgebrachten Pflanzenschutzmitteln auswirken. So können die Biokohlepartikel zwar dafür sorgen, dass ungewollte Pflanzenschutzmittel nicht in Pflanzen oder Grundwasser gelangen, auf der anderen Seite wird aber auch die erwünschten Wirkungen von applizierten Pflanzenschutzmitteln verringert. Dies würde dazu führen, dass die ausgebrachte Menge entgegen dem Konzept des integrierten Pflanzenschutzes erhöht werden muss, wobei sich die Pflanzenschutzmittel gleichzeitig im Boden anreichern würden. Weitere positive Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Produktion können die Biokohlen im Bereich Pflanzenwachstum und Ertrag aufweisen. So kann der Einsatz der Biokohle ertragsbegrenzende Eigenschaften, wie bereits aufgezeigt, verbessern. Auf guten Böden kann es allerdings auch keine Wirkung oder sogar Mindererträge geben. Im Durchschnitt ist dennoch mit einer Steigerung der Erträge nach Einsatz der Biokohle zu rechnen (Haubold-Rosar et al., 2016).

In Hinblick auf die Treibhausgase Methan und Lachgas, welche hohe Treibhausgaspotentiale aufweisen, zeichnet sich bisher kein eindeutiges Bild ab. So können sich die Emissionen dieser

Treibhausgase nach Biokohle-Applikation erhöhen aber auch vermindern. Da die Wirkmechanismen noch nicht bekannt sind und um gezielt Aussagen über diese Emissionen treffen zu können, sind Langzeitversuche notwendig.

Im Gesamten lässt sich sagen, dass Biokohlen wertvolle Eigenschaften haben, die bei der Anpassung an den Klimawandel nützlich sind. Um zu garantieren, dass die Anwendung von Biokohlen in Hinblick auf die gesamten Umweltwirkungen sinnvoll ist, muss der Einsatz geplant werden. Es müssen in Hinblick auf die stark steigenden Resistenzen von Schädlingen, Krankheiten und Beikräutern verhindert werden, dass sich die Wirkung der Pflanzenschutzmittel verringert oder sich diese im Boden ansammeln.

5.4.2 Wiedervernässung von Mooren

Moore sind in Anbetracht der C-Sequestrierung besonders wertvoll, da sie großes Speicherpotential aufweisen und gleichzeitig viele wichtige Ökosystemdienstleistungen erbringen. Bestätigt wurde dies durch die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft. Laut Jacobs et al. (2018) beträgt der C_{org} -Vorrat in dem obersten Meter der Moorböden rund 515 t/ha und ist somit um ein Vielfaches höher als die C_{org} -Speicherung in mineralischen Böden. Aus der Sicht der Landwirte ist die Umsetzung der großflächigen Wiedervernässung allerdings kritisch zu betrachten, da somit ein Teil der Flächen für die Nahrungsmittelproduktion verloren gehen. So sollte die Wiedervernässung immer nur auf geeigneten Flächen (bspw. Grenzstandorte) und vor Ort individuell geplant werden.

5.4.2.1 Langfristigkeit

Der wichtigste Faktor in Bezug auf die Langfristigkeit der C-Speicherung nach der Wiedervernässung ist der Wasserstand auf der Fläche. Der Kohlenstoff wurde durch Pflanzen aus der Atmosphäre entzogen und dieser wird im Moor in Form von Torf dauerhaft festgelegt. Die einzigen Wege wie der Kohlenstoff wieder entweichen kann, ist zum einen durch erhöhte Methan-Emissionen, resultierend aus Überstau direkt nach der Wiedervernässung. Wobei diese erhöhten Methan-Emissionen den Emissionen von natürlichen Mooren gleichen, sobald sich nach 5-10 Jahren die moortypische Vegetation ausgebreitet hat. Die zweite Möglichkeit wie der Kohlenstoff wieder entweichen kann, ist durch Freisetzung aus dem Torf. Unter anaeroben Bedingungen ist der Torf stabil, sobald aber Sauerstoff in den Boden gelangt, wird der Torf wieder mikrobiell zersetzt, wie auch bei entwässerten Mooren der Fall (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023). Eine mögliche Gefahr, die hierbei besteht, ist, dass in Deutschland und auch weltweit die Grundwasserstände in Folge des Klimawandels sinken werden. Dadurch entsteht das Problem, dass die Grundwasserstände unterhalb der Bäche, Flüsse und Feuchtgebiete sinken, wodurch diese nicht mehr durch das Grundwasser gespeist werden, sondern aufgrund der Erdanziehungskraft natürlich entwässert werden (Goethe-Universität, 2022). Dies könnte

in Zukunft ein großes Problem darstellen. Um diese Gefahr zu verringern, gehören Wiedervernässungen genaustens vor Ort und an die Gegebenheiten angepasst geplant, sodass eine erneute Trockenlegung ausgeschlossen werden kann. Denn nur wenn eine erneute Trockenlegung ausgeschlossen werden kann, ist die Maßnahme der Wiedervernässung sinnvoll.

In Bezug auf die jährlich gespeicherte Menge C_{org} pro Hektar im Humus bzw. Torf nach der Wiedervernässung gibt es keine verlässlichen Daten. Der Deutschen Emissionshandelsstelle (2023) zufolge könnten Wiedervernässungen im Mittel rund 20 Tonnen CO_2 -Äquivalente pro Hektar und Jahr einsparen. Dies würde auf den ca. 1,8 Mio. ha Moorfläche (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2023) eine Einsparung von 36 Mio. Tonnen CO_2 -Äquivalenten entsprechen. Auch fundierten Schätzungen zufolge könnten eine Wiedervernässungen der gesamten deutschen Moorflächen ca. 35 Mio. Tonnen CO_2 -Äquivalente einsparen (Breckle, 2023). Insgesamt lässt sich dennoch sagen, dass durch die Wiedervernässung aller Moore in Deutschland 1,8 Mio. Hektar an landwirtschaftlicher Fläche verloren gehen, bzw. nicht mehr für die Lebensmittelproduktion genutzt werden können. Es kann demnach das Problem entstehen, dass zusätzliche Lebensmittel importiert werden, die im Ausland auf Moorböden oder unter schlechten Bedingungen in Hinblick auf die CO_2 -Freisetzung/-Speicherung produziert werden.

5.4.2.2 Umweltwirkung

Neben dem großen Potential, Kohlenstoff aus der Atmosphäre im Torf zu binden (*siehe Kapitel 3.2*), bietet die Wiedervernässung weitere positive Auswirkungen auf die Ökosysteme. Zum einen werden durch die anaeroben Bedingungen der CO_2 -Ausstoß aus dem Boden reduziert. Darüber hinaus bieten wiedervernässte Moore im Hinblick auf den Klimawandel gleich mehrere Vorteile für den Wasserhaushalt. Zum einen halten Moore Hochwasser zurück und schützen bedrohte Gebiete auch in Deutschland vor Überschwemmungen. So können Moore auch bei Starkniederschlägen die Wassermengen speichern und langsam ablaufen lassen. Zum anderen haben Moore auch eine große Bedeutung in Gebieten, welche von Trockenheit bedroht sind. Des Weiteren kühlen Moore durch die Verdunstung von Wasser das Klima regional ein wenig ab, was zum Vorteil in Hitzewellen wird. Darüber hinaus ist der Erhalt der Moore essenziell für die Artenvielfalt. Etwa 40% aller Arten weltweit leben oder brüten in Feuchtgebieten. Zudem sind die Tier- und Pflanzenarten, die sich an die Bedingungen der Moore angepasst haben, hochspezialisiert und viele von ihnen kommen nur in Mooren vor. Folglich führt die Trockenlegung der Moore zur Zerstörung der Artenvielfalt und dazu, dass Arten vom Aussterben bedroht sind. Außerdem werden Moore als die Nieren der Erde bezeichnet, da sie als natürlicher Filter Pestizide und Chemikalien aufnehmen und gleichzeitig Nährstoffe wie Nitrat und Phosphor aus dem Wasser entfernen und somit der Eutrophierung der Gewässer entgegenwirken. (Heinrich-Böll-Stiftung et al., 2023)

Wie bereits erwähnt, können wiedervernässte Moore den Ausstoß von CO₂ senken. Wichtig zu beachten ist, dass in diesem Zuge gleichzeitig die Emissionen von Methan ansteigen. Trotzdem ist das wiedervernässte Moor meist klimaneutral (Deutsche Emissionshandelsstelle, 2023). Und bereits nach einigen Jahren nimmt das Moor bereits mehr CO₂ auf als es neuen Kohlenstoff freisetzt. Zu beachten ist dennoch, dass (teil-) wiedervernässte Böden oft für die Haltung von Wiederkäuern genutzt werden, sodass diese indirekt bedingt durch ihre Verdauung zusätzlich Methan freisetzen (Deutscher Bundestag, 2023). Nähere Informationen zu den erhöhten Emissionen durch die Wiederkäuerhaltung in *Kapitel 5.4.3*.

Dennoch kann allgemein gesagt werden, dass die Wiedervernässung einen sehr großen Teil zur CO₂-Speicherung und zur Aufrechterhaltung der Artenvielfalt beitragen kann. Gleichzeitig gehen mit der Wiedervernässung aber auch ein Wandel der landwirtschaftlichen Verwendung und ein Rückgang der Lebensmittelproduktion einher, welche sowohl finanziell als auch durch Beratung unterstützt werden muss.

5.4.3 Landnutzungsänderung und Dauergrünlanderhalt

Wie bereits in *Kapitel 5.4.2* aufgezeigt, treten die höchsten Humusgehalte auf grundwasserbeeinflussten Standorten auf. Durch Entwässerung trägt die Landnutzung also einen Teil zu der Höhe der Humusgehalten bei. Dabei kann grundsätzlich gesagt werden, dass Grünland höhere Humusgehalte von durchschnittlich 4-15% im Vergleich zu Ackerböden haben, welche im Schnitt 1-4% Humus aufweisen (Kolbe & Zimmer, 2015). So wird besonders dem Dauergrünlanderhalt eine wichtige Bedeutung zugeschrieben, dennoch kann die Erhöhung der Grünlandfläche auch eine Erhöhung der Viehbestände bewirken. Dies hätte wiederum negative Auswirkungen auf das Klima.

5.4.3.1 Langfristigkeit

Die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft hat aufgezeigt, dass der mittlere C_{org}-Vorrat von Ackerböden bei 101 t/ha (0-100cm) und unter Dauergrünlandnutzung bei 200t/ha (0-100cm) liegt (Jacobs et al., 2018). Ebenso wurde herausgestellt, dass es eine sehr enge Beziehung zwischen der Landnutzungsart und dem typischen C_{org}-Vorrat gibt. Gründe dafür sind die intensive und permanente Durchwurzelung des Bodens und das Fehlen der Bodenbearbeitung. Wiesmeier et al. (2020) führten auf, dass bei der Neuanlage von Grünland langfristig mit einem durchschnittlichen C_{org}-Aufbau von 0,73 t/ ha und Jahr zu rechnen sei.

Die gängige Annahme in Bezug auf den Aufbau und Verlust von Humus ist, dass sich Humus sehr langsam aufbaut aber schnell durch beispielsweise eine Landnutzungsänderung wieder abgebaut werden kann. Daher ist es sehr wichtig, dass man auf Grünlandumbruch verzichtet und Dauergrünland erhält und pflegt. Hingegen dieser gängigen Meinung haben Bai und

Cotrufo (2022) mit neuen Ergebnissen aufgezeigt, dass SOC-Verluste des Oberbodens langsam vonstattengehen, wenn Grünland in Ackerland umgewandelt wird und die Erhöhung nach der Umwandlung von Ackerland zu Grünland relativ schnell erfolgen kann. Trotzdem wird davon ausgegangen werden, dass die nachhaltige Erhöhung des Humusvorrates nur sehr langsam vonstattengeht, weswegen humuserhaltende und die Humusqualität verbessernde Maßnahmen im Dauergrünland wichtiger sind als humusaufbauende (Meyer et al., 2023).

Insgesamt kann festgehalten werden, dass sich auf Flächen unter Dauergrünlandnutzung langfristig ein höherer Humusgehalt aufbauen und somit Kohlenstoff gespeichert werden wird.

5.4.3.2 Umweltwirkung

Neben den aufgezeigten höheren Humusgehalten im Vergleich zu Ackerböden haben Dauergrünlandflächen weitere positive Auswirkungen auf die Umwelt. Zum einen bietet es Gewässer- und Erosionsschutz, besonders in steilen Hanglagen und in Überschwemmungsgebieten von bspw. Flusstälern. Hierbei kann es ähnlich wie bei den Moorböden zum Wasserrückhalt bei Starkniederschlägen kommen. Darüber hinaus bieten Grünlandflächen Trinkwasserschutz, da der Boden das durchsickernde Oberflächenwasser filtert und es anders als auf Ackerflächen kaum Probleme mit erhöhten Nährstoffeinträgen, wie beispielweise mit Nitrat, gibt. Des Weiteren wird die Biodiversität und Artenvielfalt gefördert und die Bodenfruchtbarkeit erhalten. Neben diesen positiven Auswirkungen ist aber kritisch zu betrachten, dass sich mit Erhöhung der Dauergrünlandflächen auch die Viehbestände erhöhen werden, da Wiederkäuer anders als die Menschen Gras verdauen können. Diese Erhöhung führt folglich aber zu weiteren THG-Emissionen. Hierbei ist besonders kritisch zu betrachten, dass die Landwirtschaft bereits jetzt, unter anderem durch die Haltung von Wiederkäuern, der Hauptverursacher von Methan und Lachgas in Deutschland ist. Besonders kritisch zu betrachten ist dabei, dass beide Treibhausgase deutlich klimaschädlicher sind als CO₂ (Deutscher Bundestag, 2016).

Aus Sicht der Landwirte ist diese Maßnahme vermutlich nur so lange sinnvoll, wie das Dauergrünland auf Böden mit geringen Bodenpunkten umgesetzt wird und diese Flächen gleichzeitig für die weitere Nahrungsmittelproduktion eingesetzt werden kann. Eine Option könnte es sein, die Flächen aus der Wiedervernässung als Dauergrünland zu nutzen, was allerdings nur so lange möglich ist, bis die Wasserstände eine kritische Höhe erreichen. Selbst dann wäre die extensive Haltung von beispielweisen Wasserbüffeln eine Option.

5.4.4 Agroforst

Bislang spielen Gehölzstrukturen in der konventionellen Landwirtschaft in Deutschland keine nennenswerte Rolle. Die Etablierung kann aber zahlreiche positive Umweltwirkungen mit sich bringen. Agroforstsysteme bieten dem Boden Erosionsschutz vor Wasser und Wind und wirken Bodenverdichtungen entgegen. Hierbei gilt: je länger die Umtriebszeiträume, desto geringer die Bodenverdichtungen. Ebenfalls können wie in *Kapitel 3.4* aufgezeigt, Treibhausgase vermieden und C im Boden gespeichert werden. So ist mit einem mittleren C_{org} -Aufbau von 0,68 t/ha und Jahr zu rechnen (Wiesmeier et al., 2020). Allgemein kann gesagt werden, dass die Anlage von Agroforstsystemen auf Ackerland deutlich effektiver ist als auf Grünland, da aufgrund der bereits höheren C_{org} -Vorräte eine deutlich geringere Kohlenstofffixierung zu erwarten ist (Wiesmeier et al., 2020). Auch auf das Bodenwasser haben Agroforstsysteme positive Auswirkungen. So ist aufgrund des fehlenden Düngemittleinsatzes im Bereich der Gehölze und der tiefen Wurzeln die Gefahr der Nährstoffauswaschung (besonders wichtig: des Nitrats) deutlich geringer (Zehlius-Eckert et al., 2018). Dasselbe gilt für die Auswaschung von Pflanzenschutzmitteln. Diese werden durch die Streuschicht unter den Agrarholzbeständen gebunden, durch geringere Sickerwassermengen unter den Beständen vermieden und durch die stärkere Aufnahme durch die Wurzeln der Gehölze vermindert (Zehlius-Eckert et al., 2018). Des Weiteren führen Agroforstsysteme auch zu einer erhöhten Habitatvielfalt und Biodiversität. Hierbei werden aber weniger gefährdete Arten gefördert, sondern vielmehr wird Arten, die nicht auf den landwirtschaftlich genutzten Flächen überleben können, ein Auftreten in Agrarlandschaften ermöglicht. Als letzte positive Auswirkung ist das verbesserte Mikroklima zu nennen (Zehlius-Eckert et al., 2018).

Wie bereits erwähnt, wird durch Agroforstsysteme CO_2 aus der Atmosphäre in Form von C_{org} im Boden sequestriert. Darüber hinaus weisen Gehölzstreifen aufgrund geringer Düngung deutlich geringere Lachgasemissionen auf. Zehlius-Eckert et al. (2018) sprechen von einer Entlastung bei den Lachgasemissionen auf der Gehölzfläche zwischen 50% und mehr als 90% im Vergleich zur konventionell bewirtschafteten Ackerfläche.

Neben all diesen positiven Auswirkungen darf aber nicht außer Acht gelassen werden, dass es für die Landwirte ohne Humuszertifikate wenig Anreize gibt, Agroforstsysteme zu etablieren. Zum einen gibt es schwierige Rahmenbedingungen seitens der Politik, hohe Investitionskosten sowie langfristig schwer kalkulierbare Kosten. Darüber hinaus ist die Ertragssituation in dem Gesamtnutzungszeitraum von etwa 20 Jahren schwer abzuschätzen. Hier wäre der Ansatz der Bezahlung über die in *Kapitel 4* genannten CO_2 -Zertifikate eine Lösung, sodass die Risiken der Investition und Erlöse verringert werden würden. Ein weiterer Nachteil ist, dass die Flächen, auf welchen Agroforstsysteme angelegt werden, aus der Nutzung für bspw. der Getreideproduktion genommen werden. So kann es zur Konkurrenz mit heimischen Nahrungs- oder Futtermitteln kommen. Ein Lösungsansatz hierfür wäre die Anlage von Knicks bzw.

Hecken, Sträuchern und Bäumen an der Feldgrenze bzw. zwischen den Feldern, sodass die Flächen nicht oder nur zu einem kleinen Teil aus der Nutzung genommen werden müssten. Hübner et al. (2023) zeigten zudem auf, dass wenn Agroforstsysteme auf Grünland angelegt werden, die Gefahr des vorübergehenden Abbaus von Bodenkohlenstoff besteht. Wichtig zu beachten ist zudem also, dass das Vorgehen gut geplant wird.

5.4.5 Fruchtfolgegestaltung und Management der Erntereste

Zwischenfrüchte stellen, im Vergleich zu den anderen Methoden, eine leicht umsetzbare und kostengünstige Alternative zur Erhöhung der Kohlenstoff-Vorräte im Boden über die Fruchtfolgeanpassung dar, die zudem diverse positive Umweltwirkungen aufweisen. Aus diesem Grund wird in diesem Kapitel spezifischer auf den Einsatz von Zwischenfrüchten in der Fruchtfolge (FF) eingegangen. Dafür ist sowohl die Humusbilanz nach VDLUFA-Methode (Beck & Rippel, 2015) als auch der durchschnittliche Deckungsbeitrag (nach Schroers und Krön (2019) die direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung) pro Hektar und Jahr bei verschiedenen Fruchtfolgen berechnet worden. In dieser theoretischen Betrachtung ist wichtig zu beachten, dass das Stroh verkauft wurde und nur die Zwischenfrüchte und die EWR der Sonderkulturen (Erbsen, Lupine) eingearbeitet worden sind.

Die Standardfruchtfolge in den Berechnungen besteht aus: Winterraps, Winterweizen und Wintergerste.

In die zweite Option der Fruchtfolge wurde eine Zwischenfrucht integriert, sodass diese Fruchtfolge wie folgt aussieht: Winterraps, Winterweizen, ZF, Sommergerste.

Die dritte Fruchtfolge-Option wurde mit einer Leguminose erweitert und besteht aus folgenden Kulturen: Winterraps, Winterweizen, ZF, Körnererbse, Wintergerste.

Als letzte Fruchtfolge-Variante wurde eine 5-gliedrige Fruchtfolge bestehend aus Winterraps, Winterweizen, ZF, Körnererbse, Wintergerste, ZF und Körnerlupine betrachtet.

Um zusätzlich den Einfluss des EWR-Managements auf die Humusbilanz und den durchschnittlichen Deckungsbeitrag zu ermitteln, sind beide Werte für die 4 Fruchtfolgevarianten ohne Verkauf des Strohs und stattdessen mit Einarbeitung der EWR und Zwischenfrüchte berechnet worden.

5.4.5.1 Langfristigkeit

Die Humusbilanz gibt Aufschluss darüber, inwiefern die Fruchtfolge und die Bewirtschaftung die Humusvorräte im Boden langfristig verändern können. Die Berechnungen der Humusbilanz wurden mithilfe des Humusbilanzrechners der LfL berechnet, siehe Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2021). In den Ergebnissen der Berechnung, welche in *Abbildung 10* zu sehen sind, wurde von einer gleichbleibenden Bewirtschaftung ohne Ausbringung organischer Dünger ausgegangen.

Es ist zu sehen, dass die Standardfruchtfolge mit $-400 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$ sehr niedrig ist. Bei diesem Wert werden die Bodenfunktion und Ertragsleistung langfristig ungünstig beeinflusst. Allein durch das Einarbeiten der Stoppelreste wird bewirkt, dass die Humusbilanz dieser Fruchtfolge mit $12 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$ leicht positiv wird. Dieser Wert wird durch die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (2021) als ausgeglichene Bilanz beschrieben, bei der langfristig mit einer optimalen Ertragssicherheit gerechnet werden kann. Ausgehend von der Standardfruchtfolge ohne Einbringung der Erntereste kann durch die alleinige Integration der Zwischenfrucht in die Fruchtfolge lediglich ein Wert von $-287 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$ erreicht werden, was die Humusbilanz zwar erhöht, aber dennoch nicht zu einer langfristigen Kohlenstoffspeicherung führt. Auch hier erreicht die Humusbilanz erst einen positiven Wert von $85 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$, wenn das Stroh der Hauptkulturen eingearbeitet wird. Eine weitere Option, um über die Fruchtfolge mehr Kohlenstoff in dem Boden zu speichern, ist der Anbau von Leguminosen. Aus diesem Grund wurde eine weitere Variante der Standardfruchtfolge mit Integration einer Leguminose berechnet. Hierbei kam der Wert $-175 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$ heraus, welcher auf der einen Seite ebenfalls sehr niedrig, auf der anderen Seite aber schon deutlich höher ist als bei der Standardfruchtfolge. Wie bereits bei den ersten beiden Fruchtfolgevarianten wird die Humusbilanz auch bei dieser Fruchtfolge erst positiv, sobald das Stroh von Raps, Weizen und der Gerste eingearbeitet wird ($134 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$). Ein positives Ergebnis der Humusbilanz rein über die Veränderung der Fruchtfolge wird in dieser Berechnung erst durch die 5-gliedrige Fruchtfolge erreicht. Erst hier ist die Kohlenstoffsequestrierung rein über die Fruchtfolgeanpassung langfristig möglich. Hier liegt der Wert bei $53 \text{ HÄ/ (Hektar * Jahr)}$. Auch hier lässt sich die Humusbilanz durch die Änderung des EWR-Managements erhöhen. Der höchste Wert, der in *Abbildung 10* aufgezeigten Fruchtfolge- und EWR-Managementvarianten, wurde bei der 5-gliedrigen Fruchtfolge mit Einarbeiten des Strohs von Raps, Weizen und Gerste erreicht.

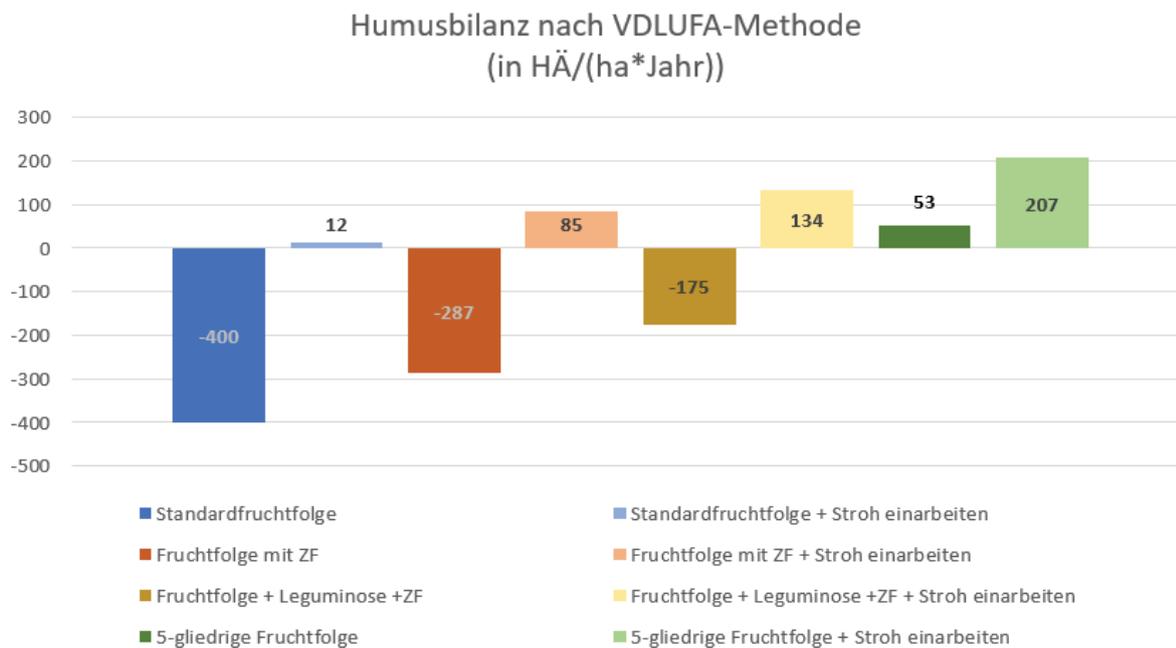


Abbildung 10: Humusbilanz verschiedener Fruchtfolge- und Managementvarianten

Quelle: eigene Darstellung

In Anlehnung an die Ergebnisse ist demnach festzuhalten, dass der Anbau von Zwischenfrüchten zu einer verbesserten Humusbilanz führt, der Anbau allein allerdings nicht sofort eine Kohlenstoffsequestrierung bedeuten muss. Zudem ist zu beachten, dass aufgrund von phytosanitären Gründen nicht in alle Fruchtfolgen die gleichen Zwischenfrüchte integriert werden können. Erst durch Erweiterung der Fruchtfolge mit 5 FF-Gliedern wird die Humusbilanz der gesamten Fruchtfolge positiv. Der Anbau von Zwischenfrüchten erhöht die Humusbilanz zwar, in vielen Fällen reicht die reine Integration einer Zwischenfrucht in die Fruchtfolge allerdings nicht aus, um eine negative Humusbilanz auszugleichen. Im Gegenteil, es muss über eine gesamte Fruchtfolgeanpassung im Allgemeinen mehr Kohlenstoff in den Boden gelangen. Neben den Zwischenfrüchten kann demnach auch der Anbau von Leguminosen oder Ackergras die Humusbilanz positiv beeinflussen. Ebenso ist anzumerken, dass das Management der EWR einen Einfluss auf die Humusbilanz hat. Wenn das Ziel eines Betriebes ist, zusätzlichen Humus zu speichern, sollte auf den Verkauf von Stroh verzichtet werden und dieses sollte stattdessen auf der Fläche verbleiben.

5.4.5.2 Umweltwirkung der Zwischenfrüchte

Neben der eben aufgezeigten positiven Wirkung auf die Humusbilanz nennt das Bundesinformationszentrum Landwirtschaft (2024) weitere Vorteile des Zwischenfruchtanbaus. Wie in *Kapitel 3.5* beschrieben und in *Abbildung 10* aufgezeigt, haben Zwischenfrüchte eine positive Auswirkung auf den Humushaushalt. Darüber hinaus verbessern sie zudem die Wasserhaltefähigkeit im Boden, bieten durch die Begrünung Schutz vor Erosion durch Wind und Wasser und schützen den Boden vor Witterungseinflüssen. Darüber hinaus wird der Boden durch Krümelung, die Wurzelmasse und den -tiefgang stabilisiert. Ebenso wird das Bodenleben gefördert, Unkraut wird unterdrückt, der Unterboden kann durch tiefwurzelnde Zwischenfrüchte erschlossen werden und die biologische Aktivität kann verbessert werden. Des Weiteren kann die Selbstreinigungskraft der Fruchtfolge durch die Förderung spezifischer Antagonisten von Krankheitserregern erhöht werden. Besonders wertvoll ist der Anbau von Zwischenfrüchten auch, da diese Nährstoffe in ihrer Biomasse zwischenspeichern und die Nährstoffverfügbarkeit besonders für den Stickstoff erhöhen können. Dies hat wiederum positive Auswirkungen auf die Folgekultur. Ebenfalls kommt es durch die Speicherung von Nährstoffen über Winter zu weniger Austrägen von zum Beispiel dem Makronährstoff Phosphor. Dies wirkt der Eutrophierung von Gewässern entgegen. Ebenso wird weniger Nitrat ausgewaschen, was ebenfalls positiv für das Grundwasser ist. Darüber hinaus können ähnlich wie bei den Agroforstsystemen Pflanzenschutzmittel durch die erhöhte biologische Aktivität abgebaut werden und gelangen somit nicht in das Grundwasser. Wenn die Zwischenfrüchte nicht zum Humusaufbau eingearbeitet werden, können Sie wiederum für die Gewinnung von hochwertigem und günstigem Wirtschaftsfutter genutzt oder als Biomasse für Biogasanlagen weiterverwendet werden. (Bundesinformationszentrum Landwirtschaft, 2024)

5.4.5.3 Wirtschaftlichkeit

Um neben der Wirkung auf den Humusgehalt und die Umwelt auch die Wirtschaftlichkeit der aufgezeigten Fruchtfolge- und Managementvarianten bewerten zu können und so die Maßnahme des Zwischenfruchtanbaus besser im ganzheitlichen Kontext bewerten zu können, wurde der Deckungsbeitrag für alle FF-Varianten ermittelt. Laut KTBL (Schroers & Krön, 2019) lautet die genaue Definition des ermittelten Wertes „direkt- und arbeitserledigungskostenfreie Leistung“, der Begriff Deckungsbeitrag wird in diesem Kontext für das einfachere Verständnis synonym verwendet. Die für die Rechnung nötigen Daten über Ertrag (dt/ha), Preis (€/dt), eventuelle Prämien (€/ha) und die anfallenden variablen Kosten (€/ha) wurden aus der *Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg* (Hanff & Lau, 2022) entnommen. Die Preise für das Stroh (€/ha) wurden mithilfe des Strohpreisrechners der Landwirtschaftskammer Niedersachsen berechnet (Harms, 2023). Die erhöhten Prämien für die 5-gleidrige Fruchtfolge wurde mithilfe des GAP-

Kalkulators der LFA-MV ermittelt (Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern, 2022).

Die verwendeten Werte und die Berechnung der in *Abbildung 11* aufgezeigten Deckungsbeiträge, ist im Anhang zu finden.

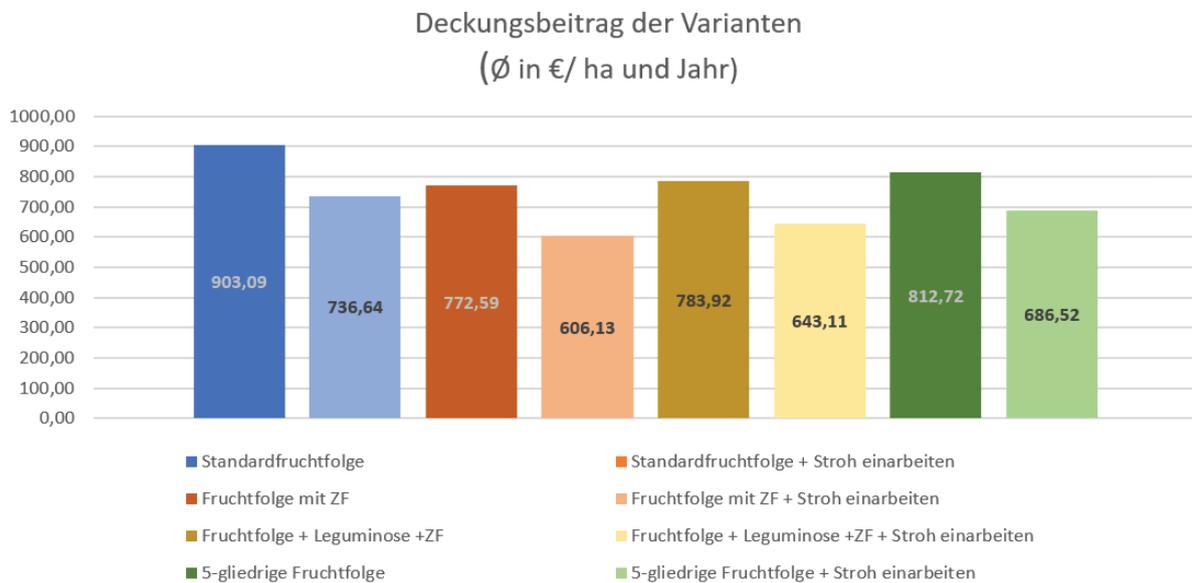


Abbildung 11: Deckungsbeitrag verschiedener Fruchtfolge- und Managementvarianten

Quelle: eigene Darstellung

Den höchsten Deckungsbeitrag weist die Standardfruchtfolge mit Verkauf des Strohs auf, der Wert liegt bei 903,09€ pro Hektar und Jahr. Durch den Wegfall des Verkaufes und die Einarbeitung des Strohs in den Boden sinkt der Deckungsbeitrag auf 736,64€ pro Hektar und Jahr. Die niedrigsten Werte des Deckungsbeitrages werden mit der zweiten Variante, durch den Einsatz von Zwischenfrüchten in der Standardfruchtfolge, erreicht. Hier sinkt der Deckungsbeitrag auf 772,59€ pro Hektar und Jahr mit Verkauf des Strohs bzw. auf 606,13€ pro Hektar und Jahr bei Einarbeitung des Strohs. Dies liegt daran, dass die Zwischenfrüchte durch das Einarbeiten in den Boden zusätzliche Kosten verursachen und gleichzeitig kein Erlös erwirtschaftet werden kann. Die Integration der Leguminose (Körnererbse) in der dritten Fruchtfolgevariante dient dazu, zusätzlich zu der Wirkung der Zwischenfrucht Humus im Boden aufzubauen und gleichzeitig durch den Verkauf der Körnererbsen den Deckungsbeitrag zu erhöhen. So wird mit dieser Fruchtfolgevariante ein Deckungsbeitrag von 783,92€ pro Hektar und Jahr erreicht, der durch das Einarbeiten des Strohs auf 643,11€ pro Hektar und Jahr sinkt. Für die 5-gliedrige Fruchtfolge werden den Landwirten aufgrund der Erhöhung der Biodiversität auf dem Acker erhöhte Prämien gezahlt. Diese machen sich auch bei dem Deckungsbeitrag bemerkbar, welcher im Vergleich zu den vorherigen zwei Varianten wieder gestiegen ist. Ohne das Einarbeiten der Strohreste von Raps, Weizen und Gerste wird ein Deckungsbeitrag von

812,72€ pro Hektar und Jahr erreicht und mit Einarbeitung der EWR sinkt der Deckungsbeitrag auf 686,52€ pro Hektar und Jahr.

Insgesamt lässt sich in Hinblick auf die Wirtschaftlichkeit sagen, dass die Standardfruchtfolge ohne Einarbeitung der angebauten Kulturen mit 903,09€ pro Hektar und Jahr den höchsten Deckungsbeitrag erzielt und so aus Sicht der Gewinnmaximierung die sinnvollste der gezeigten Fruchtfolgen ist. Gefolgt wird diese Variante von der 5-gliedrigen Fruchtfolge ebenfalls ohne Einarbeitung des Stroh von Raps, Weizen und Gerste. Dennoch ist bei dieser Variante der Deckungsbeitrag mit 812,72€ fast 100€ pro Hektar und Jahr niedriger. Am schlechtesten aufgestellt ist, in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit, die Variante mit der Integration der Zwischenfrucht in die Standardfruchtfolge mit Einarbeitung des Stroh.

5.4.5.4 Ganzheitliche Betrachtung

In Bezug auf diese Bachelorarbeit ist die ganzheitliche Betrachtung und somit der Zusammenhang zwischen Humusaufbau und Finanzierung wichtig. Es soll die Variante ermittelt werden, welche sowohl eine positive Humusbilanz aufweist als auch einen hohen Deckungsbeitrag hat. Dieser Zusammenhang zwischen Deckungsbeitrag und Humusbilanz ist in *Abbildung 12* in einem Streudiagramm dargestellt.

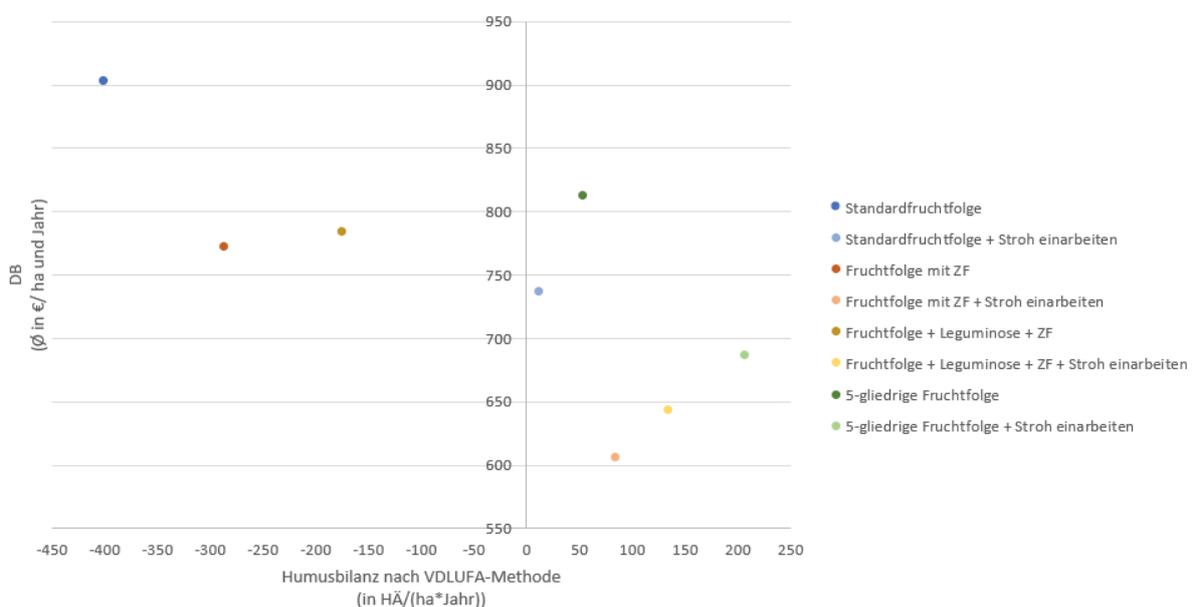


Abbildung 12: Zusammenhang zwischen Humusbilanz und Deckungsbeitrag

Quelle: eigene Darstellung

Da das Hauptaugenmerk in dieser Bachelorarbeit auf dem Humusaufbau liegt, sind nur jene Fruchtfolgen sinnvoll, welche in *Abbildung 12* einen positiven x-Wert aufweisen. Aus diesem Grund werden im Folgenden nur diese Werte beachtet. Zu diesen zählen die beiden Varianten der 5-gliedrigen Fruchtfolge, sowie die Varianten der anderen 3 Fruchtfolgen mit Einarbeiten

des Strohs. Die in *Kapitel 5.4.5.3* ermittelte und wirtschaftlich effizienteste Variante (Standardfruchtfolge) fällt somit aus der Betrachtung raus. Wie bereits aufgezeigt ist der Wert der Humusbilanz bei der 5-gliedrigen Fruchtfolge mit Einarbeiten des Strohs am höchsten, dennoch ist der Deckungsbeitrag im Vergleich zu der 5-gliedrigen Fruchtfolge ohne Einarbeiten und der Standardfruchtfolge mit Einarbeiten geringer. Keine der aufgezeigten Fruchtfolgevarianten kann als die Sinnvollste hervorgehen. Es ist immer ein Ermessen der wirtschaftenden Landwirte zwischen hohem Humusaufbau und hohem Deckungsbeitrag zu entscheiden. Eine gangbare Variante ohne die zusätzliche Finanzierung über Humuszertifikate ist in diesem Beispiel die 5-gliedrige Fruchtfolge, da man einen positiven Wert der Humusbilanz hat und zusätzlich einen hohen Deckungsbeitrag erzielen kann. Aus Sicht des gesellschaftlichen Zieles, möglichst viel CO₂ im Boden zu speichern, ist die hellgrüne FF-Variante die sinnvollste, da sie die höchste Humusbilanz aufweist. Aus wirtschaftlicher Sicht würde der Landwirt allerdings nicht diese hellgrüne FF-Variante wählen, obwohl diese eine deutlich höhere Humusbilanz aufweist als die dunkelgrüne FF-Variante. An diesem Punkt kommen die Humuszertifikate zum Tragen.

Es wird angenommen, dass die Landwirte sich im Regelfall für die dunkelgrüne FF-Variante entscheiden würden, da diese den höchsten Deckungsbeitrag aufweist, aber gleichzeitig Humus aufgebaut werden kann. Humusaufbau liegt immer im Sinne der Landwirte, da die Fruchtbarkeit des Bodens die Grundlage ihres Wirtschaftens ist. Im konkreten Fall dieser Berechnung müsste den Landwirten die Differenz zwischen dem höchsten Deckungsbeitrag im positiven Bereich der x-Achse (Humusbilanz), also der dunkelgrüne FF-Variante und der Variante mit dem höchsten Humusaufbau (hellgrüne FF-Variante) finanziert werden. Dies würde die negative Differenz ausgleichen und mehr Landwirte motivieren in zusätzlichen Humusaufbau über die Fruchtfolgegestaltung zu investieren, da sie gleichzeitig keine Verluste machen würden. In der Theorie kann man für einen einzelnen Betrieb mit etwas Aufwand die Differenz berechnen, die pro Hektar und Jahr gezahlt werden müsste, unabhängig wie viel Humus in diesem Jahr aufgebaut wird.

Da die Finanzierung über Humuszertifikate aktuell allerdings abhängig vom Humusaufbau ist, wurden aus den gewonnenen Daten die Kosten eines Kilogramms Humus berechnet, die über die Humuszertifikate finanziert werden müssen. Der in *Abbildung 13* aufgezeigten Funktion kann entnommen werden, dass die Speicherung eines zusätzliche Kilogrammes Humus in den angenommenen FF-Beispielen circa 0,35€ kostet. Da Humuszertifikate pro Tonne zusätzlich gespeicherten CO₂ honorieren, werden die Werte im Folgenden direkt in der Einheit Tonnen angegeben. Folglich müssen in diesem Beispiel über Humuszertifikate pro zusätzlich gespeicherter Tonne Humus 350€ gezahlt werden. Basierend auf der Formel aus *Kapitel 4.5.3* entspricht eine Tonne Humus 2,13 Tonnen CO₂. So müssten pro zusätzlich gespeicherter Tonne CO₂ im Boden 164,32€ durch die Humuszertifikate honoriert werden.

Gemessen an dem Anbieter *Klim*, der unter anderem Maßnahmen für diverse Fruchtfolgen unterstützt, sind diese Preise auf dem derzeitigen Kohlenstoffmarkt nicht realisierbar. Wie bereits in *Kapitel 4.5.3* aufgezeigt, können Humuszertifikate von *Klim* auf der Plattform von *Climate Trade* für 62,50€ pro Tonne CO₂ gekauft werden (ClimateTrade, 2024) und auf der Plattform *Senken* wird ein Humuszertifikat von *Klim* für nur 49€ pro Tonne CO₂ angeboten (Senken, 2023). Dabei ist zu beachten, dass nicht der volle Verkaufspreis an die Landwirte bezahlt wird, sodass laut Agreea, 2024 den Landwirten im Schnitt zwischen 25-50€ pro zusätzlich gespeicherter Tonne CO₂ gezahlt wird.

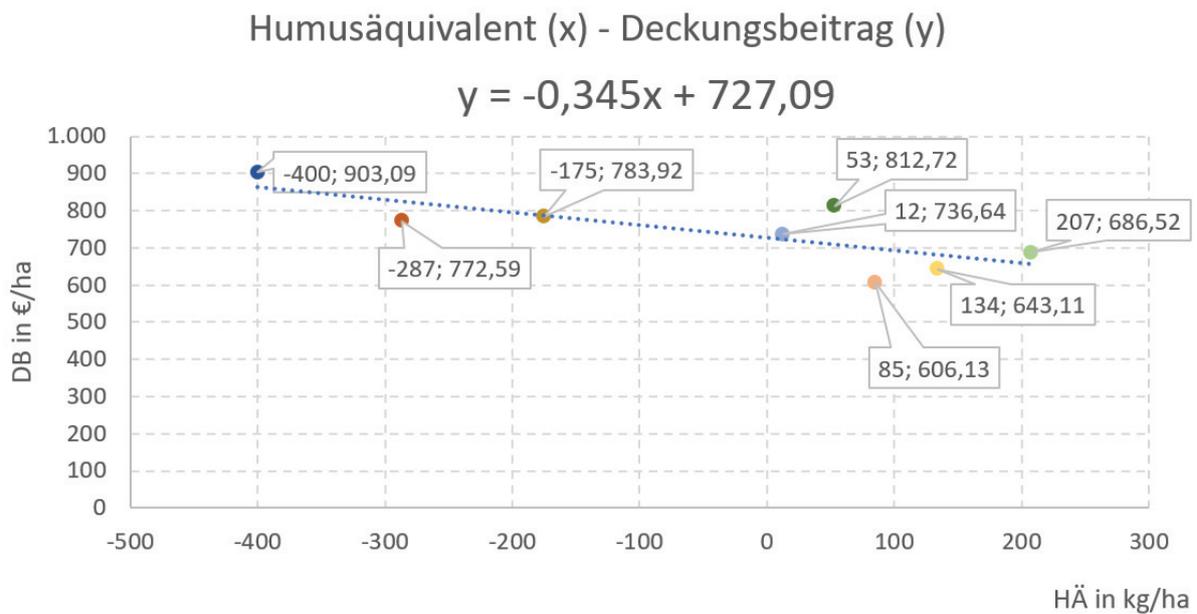


Abbildung 13: Kostenfunktion eines zusätzlich gespeicherten Kilogrammes an Humus

Quelle: eigene Darstellung

Insgesamt lässt sich demnach sagen, dass über die Maßnahmen der Fruchtfolgenanpassung, des Zwischenfruchtanbaus und des Managements der Erntereste wirksam und langfristig Humus aufgebaut und die Umwelt positiv beeinflusst werden kann, allerdings sind nicht alle Methoden wirtschaftlich sinnvoll. Hier kommt die Bezahlung über Humuszertifikate zum Tragen. Die Fruchtfolgen müssen zudem immer auf den Betrieb, die technischen Gegebenheiten und die bisherige Fruchtfolge angepasst werden. Schlussendlich müsste die Höhe der Honorierung an den jeweiligen Betrieb individuell angepasst werden und im Falle des aufgezeigten Beispiels liegt die Honorierung deutlich unter dem berechneten Preis für eine zusätzlich gespeicherte Tonne CO₂.

6 Zusammenfassung

Obwohl die humuserhaltende Bodennutzung bereits seit 1999 im Bundes-Bodenschutzgesetz in § 17 durch „die gute fachliche Praxis in der Landwirtschaft“ gesetzlich vorgeschrieben ist, mangelt es offensichtlich an der Umsetzung, wie unter anderem die Bodenzustandserhebung des Thünen-Instituts nahelegt. Dabei ist der Boden der größte terrestrische Speicher für C_{org} und verfügt über viermal so viel Kohlenstoff wie die oberirdische Vegetation und mehr als doppelt so viel wie die Atmosphäre, siehe *Kapitel 1.1*. Dabei wird das CO_2 aus der Atmosphäre im Boden in Form von Humus gespeichert, sodass gesagt werden kann, dass Humus einen Einfluss in Hinsicht auf die Eindämmung des Klimawandels hat. Generell wurde durch die BZE-LW herausgearbeitet, dass der C_{org} -Vorrat in landwirtschaftlich genutzten Böden sehr variabel ist und der C_{org} -Gehalt in den oberen 100 cm Bodentiefe eines landwirtschaftlich genutzten Bodens im Schnitt bei 128 t C_{org}/ha liegt, siehe *Kapitel 2.2*. Um den Humusaufbau im Boden weiterhin zu fördern, gibt es vielfältige Maßnahmen, siehe *Kapitel 3*, zu denen unter anderem der Einsatz von Biokohlen, die Wiedervernässung von trockengelegten Ackerflächen, die Landnutzungsänderung bzw. der Dauergrünlanderhalt, das Anlegen von Agroforstsystemen, sowie die Fruchtfolgegestaltung mitsamt dem Einsatz von Zwischenfrüchten und die Änderungen des Managements von bspw. den EWR, dem Einsatz von organischen Düngern oder eine reduzierte Bodenbearbeitung, gehören. Da sich diese Maßnahmen wirtschaftlich meist nicht für die Landwirte rentieren und bislang nur im geringen Ausmaß von der Politik gefördert werden, muss der Humusaufbau über eine externe Quelle mitfinanziert werden. Hierbei ist eine zurzeit viel diskutierte Methode die Nutzung von CO_2 - bzw. Humuszertifikaten.

Bislang sind die Humuszertifikate noch kein Teil des Europäischen Emissionshandels Systems (ETS), sondern werden auf dem freien Markt gehandelt. Das Prinzip des freiwilligen CO_2 -Marktes basiert hierbei auf dem Gedanken, dass es für das Klima nicht relevant ist, wo und an welcher Stelle Treibhausgase ausgestoßen oder vermieden werden. Ausgehend von diesem Prinzip ist es für Unternehmen oder Privatpersonen von daher möglich, CO_2 an anderer Stelle auszugleichen. Ein Beispiel ist die Kompensation von privaten Emissionen durch einen Kurzstreckenflug, indem humusaufbauende Maßnahmen auf dem Acker der Landwirte unterstützt werden. Dabei liegt die Höhe des jährlich realisierbaren CO_2 -Kompensationspotentials eines Bodens laut dem Anbieter *CarboCert* bei ca. 3-5t CO_2 pro Hektar, siehe *Kapitel 4.5.3*. Hierbei wird den Landwirten pro Tonne zusätzlich gespeichertem CO_2 laut *Agreena*, 2024 zwischen 25-50€ ausgezahlt, sodass mit diesen Angaben davon ausgegangen werden kann, dass im Gesamten ca. 75 bis 250€ pro Hektar und Jahr ausgezahlt werden könnten.

Trotz des positiven Aspektes des Humusaufbaus ist das System des freiwilligen Emissionshandels im Allgemeinen sehr umstritten, siehe *Kapitel 5.1*. So haben sich beispielsweise mehr als 30 Institutionen und Personen sowohl aus Landwirtschaft, der Wissenschaft als auch aus Klima- und Umweltschutz in einem Positionspapier gemeinsam gegen die Kompensation von

Treibhausgasen durch die Humuszertifikate ausgesprochen. Die schwerwiegendsten Probleme werden hierbei in der Zusätzlichkeit, der Fairness, sowie der Reversibilität und Langfristigkeit der Maßnahmen gesehen. Um das System des freiwilligen Emissionshandels zu verbessern, ist unter anderem sowohl die ganzheitliche Betrachtung der Maßnahmen zum Humusaufbau wichtig als auch das Umdenken hin zum Humuserhalt, statt den Fokus ausschließlich auf den Humusaufbau zu legen. Dabei müssten die humusaufbauenden und -erhaltenden Maßnahmen verstärkt in politischen Entscheidungen berücksichtigt werden, sodass es auf lange Sicht gelingen kann, umweltschädliche Agrarsubventionen durch die Förderung nachhaltiger Produktionsweisen, wie bspw. ganzjährige Bodenbedeckung, Förderung der Biodiversität, vielfältige Fruchtfolgen und Agroforstsysteme, auszutauschen. Wichtig ist, dass dabei stets die Planungssicherheit und die Umstrukturierung der landwirtschaftlichen Betriebe gegeben und gefördert werden müssen.

Bei allen humusaufbauenden Maßnahmen muss zudem stets beachtet werden, dass sich die Stabilität des Humus in Zukunft durch den Klimawandel oder durch das Einstellen der humusaufbauenden Maßnahmen ändern kann. Auch die Höhe der zusätzlichen Speicherung ist immer abhängig von der Bodenart, den klimatischen Gegebenheiten, der Nutzungsart, der Bewirtschaftungsmaßnahmen und Nutzungsintensität. Demnach kann keine pauschale Aussage getroffen werden, welche der genannten humusaufbauenden Maßnahme auf jedem beliebigen Standort gleich funktioniert und zuverlässig die gleiche Menge an zusätzlichem CO₂ sequestrieren kann. Außerdem ist noch nicht abschließend geklärt, ob der Humusaufbau einer linearen oder nicht linearen Funktion folgt, sodass nicht gesagt werden kann, ob endlos Humus aufgebaut werden kann oder ob sich mit der Zeit ein Fließgleichgewicht zwischen Humusaufbau und Humusabbau im Boden einstellt.

Schlussendlich kann gesagt werden, dass jede humusaufbauende Maßnahme diverse Vorteile für die Ökosysteme mit sich bringt und die Umsetzung demnach in Zukunft gefördert werden sollte, ob durch ein verbessertes System der Humuszertifikate oder durch die Politik. Auch wenn eine Maßnahme, wie beispielweise die Wiedervernässung sehr effektiv CO₂ sequestriert, muss stets beachtet werden, dass die Landbewirtschaftung und Lebensmittelerzeugung die steigende Weltbevölkerung ernähren muss. Eine für die Landwirte leicht umsetzbare Methode, die zudem die Nahrungsmittelproduktion weiterhin ermöglicht, stellt die Fruchtfolgeanpassung bzw. -erweiterung hin zu einer größeren Biodiversität auf dem Acker dar. Dennoch ist wichtig anzumerken, dass die aufgezeigten Maßnahmen trotz des Humusaufbaus nie zu 100% klimaneutral sind. So wird es auch nach Umsetzen der meisten Maßnahmen weiterhin zum Einsatz von Düngern und/oder Pflanzenschutzmitteln kommen, durch deren Produktion weiterhin viel CO₂ freigesetzt wird. Trotz all dieser negativen Aspekte muss der Humusaufbau gesamtgesellschaftlich weiterhin gefördert werden, ob über einen verbesserten freiwilligen Markt, durch die Aufnahme in das EU-ETS oder durch politische Änderungen.

7 Literaturverzeichnis

- Agreena. (2024). *Preisgestaltung für Ihr Einkommen aus der Kohlenstofferte*. Abgerufen am 15. Januar 2024, von <https://agreena.com/de/>
- Bai, Y. & Cotrufo, M. F. (2022). Grassland Soil carbon sequestration: current understanding, challenges, and solutions. *Science*, 377(6606), 603–608. <https://doi.org/10.1126/science.abo2380>
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2020). *Bedeutung des Humus für die Bodenfruchtbarkeit*. Abgerufen am 21. November 2023, von <https://www.lfl.bayern.de/cms07/iab/boden/031125/index.php>
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2021). *Humusbilanzierung*. Abgerufen am 23. November 2023, von <http://www.lfl.bayern.de/cms07/iab/boden/031164/index.php>
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. (2023). *Humus – Bedeutung und Funktion*. Abgerufen am 23. November 2023, von <http://www.lfl.bayern.de/cms07/iab/boden/094487/index.php>
- Beck, R. & Rippel, R. (2015). *Humusbilanzierung „Schlag/Fruchtfolge“* (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Hrsg.) [Datensatz; MS Excel-Tabelle].
- Begill, N., Don, A. & Poeplau, C. (2023). No detectable upper limit of mineral-associated organic carbon in temperate agricultural soils. *Global Change Biology*, 29, 4662–4669. <https://doi.org/10.1111/gcb.16804>
- Birr, F., Abel, S., Kaiser, M., Närmann, F., Oppermann, R., Pfister, S., Tannenberger, F., Zeitz, J. & Luthardt, V. (2021). *Zukunftsfähige Land- und Forstwirtschaft auf Niedermooren: Steckbriefe für klimaschonende, biodiversitätsfördernde Bewirtschaftungsverfahren*. Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde und Greifswalder Moorzentrum.
- Bockholt, K. (2020, 27. Oktober). *Carbon Farming: Mit Humus CO2 binden, mit Zertifikaten Geld verdienen*. Agrarheute. Abgerufen am 12. Januar 2024, von <https://www.agrarheute.com/pflanze/getreide/carbon-farming-humus-co2-binden-zertifikaten-geld-verdienen-574343>
- Bodenkundliche Kartieranleitung*. (2005). Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Geologischen Diensten.
- Breckle, S. (2023). Wiedervernässungen und Renaturierung der Moore als Beitrag zum Klimaschutz. In J. Lozán, H. Graßl, S. Breckle, D. Kasang & M. Quante (Hrsg.), *Warnsignal Klima Hilft Technik gegen die Erderwärmung* (S. 57–64). <https://www.klimawarnsignale.uni-hamburg.de/buchreihe/climate-engineering/>
- Brock, C., Morgner, M., Spiegel, A. K., Wilbois, K. P. & Brühl, K. (o. D.). Neues aus Praxisforschungsprojekten: Die Humusbilanz. In *Agrarpraxisforschung*. Verbund Ökologische Praxisforschung und FiBL.

- Bundesamt für Justiz. (o. D.). § 17 BBoDSchG - *Einzelnorm*. Abgerufen am 12. Februar 2024, von https://www.gesetze-im-internet.de/bbodschg/__17.html#:~:text=Gesetz%20zum%20Schutz%20vor%20sch%C3%A4dlichen, die%20gute%20fachliche%20Praxis%20erf%C3%BCllt.
- Bundesinformationszentrum Landwirtschaft. (2024). *Zwischenfrüchte: Vorteile für Betrieb und Umwelt*. Abgerufen am 29. Januar 2024, von <https://www.praxis-agrar.de/pflanze/ackerbau/zwischenfruechte>
- CarboCert. (2020). *So funktioniert das CarboCert Humusaufbauprogramm*. Abgerufen am 15. Januar 2024, von <https://www.carbocert.de/fuer-unsere-landwirte-in-de-und-ch>
- CarboCert. (2021). *Unsere Käufer der CO2-Zertifikate*. Abgerufen am 12. Januar 2024, von <https://www.carbocert.de/fuer-unterstuetzer/unsere-zertifikatekaeuer>
- Circular Carbon. (2024). *CO2-Zertifikate*. Abgerufen am 2. Januar 2024, von <https://circular-carbon.com/co2-zertifikate>
- ClimateTrade. (2024). *Projekt an Germany: Soil Carbon Removal and Enhanced Biodiversity*. Abgerufen am 15. Januar 2024, von <https://market.climatetrade.com/projects/de/soil-carbon-removal-and-enhanced-biodiversity/?id=566>
- Deutsche Emissionshandelsstelle. (2017). *Den Europäischen Emissionshandel verstehen*. Abgerufen am 22. September 2023, von https://www.dehst.de/DE/Europaeischer-Emissionshandel/EU-Emissionshandel-verstehen/eu-emissionshandel-verstehen_node.html
- Deutsche Emissionshandelsstelle (Hrsg.). (2022). *Auktionierung (EU-ETS) Deutsche Versteigerungen von Emissionsberechtigungen: Jahresbericht 2021*.
- Deutsche Emissionshandelsstelle. (2023, Juli). *Factsheet: Moorschutz ist Klimaschutz*.
- Deutscher Bundestag. (2016). *Dokumentation: Statistische Angaben zu Treibhausgasen aus Landwirtschaft und Forstwirtschaft (WD 5-3000-068/16)*.
- Deutscher Bundestag. (2021). *Dokumentation: Speicherung von CO2 in Böden (WD 8-3000-061/21)*.
- Deutscher Bundestag. (2023). *Dokumentation: Zur Wiedervernässung von Mooren (WD 8-3000-020/23)*.
- Don, A., Flessa, H., Marx, K., Poeplau, C., Tiemeyer, B. & Osterburg, B. (2018). Die 4-Prozente-Initiative „Böden für Ernährungssicherung und Klima“: wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. *RePEc: Research Papers in Economics*. <https://doi.org/10.3220/wp1543840339000>
- Drexler, S., Gensior, A. & Don, A. (2021). Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21(3). <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>

- Emde, D., Don, A., Poeplau, C. & Schneider, F. (2023, 15. Mai). *Long-term impact of land-use change on soil organic carbon in German agriculture*. General Assembly. <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu23-5703>
- Europäische Kommission. (2022). Vorschlag für eine Verordnung des europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Unionrahmens für die Zertifizierung von CO₂-Entnahme. In *EUR-Lex* (Nr. 2022/0394). <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/?uri=CELEX%3A52022PC0672>
- Europäische Kommission. (2023). *Zertifizierung von Maßnahmen zur Entfernung von CO₂ - EU-Vorschriften*. Abgerufen am 11. Januar 2024, von https://ec.europa.eu/info/law/better-regulation/have-your-say/initiatives/13172-Zertifizierung-von-Ma%C3%9Fnahmen-zur-Entfernung-von-CO2-EU-Vorschriften_de
- European Commission. (2017). *The EU Emissions Trading System (EU ETS)*. <https://doi.org/10.2834/6083>
- First Climate Ag. (2024). *CO₂-Speicherung durch Pflanzenkohle*. Abgerufen am 2. Januar 2024, von <https://www.firstclimate.com/co2-speicherung-durch-pflanzenkohle>
- Fließbach, A., Krauss, M., Maurer, C., Dierauer, H. & Mäder, P. (2017). Reduzierte Bodenbearbeitung reichert Humus und mikrobielle Biomasse oberflächlich an. In *Ökologischen Landbau weiterdenken - Verantwortung übernehmen - Vertrauen stärken. Beiträge der 14. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau* (S. 304–307).
- Forschungsinstitut Für Biologischen Landbau. (o. D.). *Wissenswertes zur reduzierten Bodenbearbeitung*. FiBL. Abgerufen am 23. Dezember 2023, von <https://www.fibl.org/de/themen/reduzierte-bodenbearbeitung-info/reduzierte-bodenbearbeitung-hintergrund#:~:text=Die%20reduzierte%20Bodenbearbeitung%20bietet%20eine,und%20das%20Bodenleben%20wird%20gef%C3%B6rdert.>
- Goethe-Universität. (2022, 30. August). *Klimawandel: sinkt das Grundwasser, versickern Bäche und Flüsse und verschmutzen das Trinkwasser*. Aktuelles aus der Goethe-Universität Frankfurt. Abgerufen am 25. Januar 2024, von <https://aktuelles.uni-frankfurt.de/forschung/klimawandel-sinkt-das-grundwasser-versickern-baeche-und-fluesse-und-verschmutzen-das-trinkwasser/>
- Hanff, H. & Lau, H. (2022). *Datensammlung für die betriebswirtschaftliche Bewertung landwirtschaftlicher Produktionsverfahren im Land Brandenburg* (Landesamt für Ländliche Entwicklung, Landwirtschaft und Flurneuordnung, Hrsg.) [Datensatz; MS-Excel-Version].
- Haubold-Rosar, M., Heinkele, T. & Rademacher, A. (2016). Chancen und Risiken des Einsatzes von Biokohle und anderer „veränderter“ Biomasse als Bodenhilfsstoffe oder für die C-Sequestrierung in Böden. In *Umwelt Bundesamt* (UBA-FB 002191).

- Heinrich-Böll-Stiftung, Bund für Umwelt und Naturschutz Deutschland e.V. & Michael Succow Stiftung, Partner im Greifswalder Moorzentrum. (2023). *Mooratlas: Daten und Fakten zu nassen Klimaschützern* (1. Aufl.).
- Hübner, R., Böhm, C., Eysel-Zahl, G., Kudlich, W., Kürsten, E., Lamersdorf, N., Meixner, C., Morhart, C., Peschel, T., Tsonkova, P. & Wiesmeier, M. (2023). Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft?: Potentiale, Erfassung und Handlungsempfehlungen. In *Berichte über Landwirtschaft - Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft* (Bd. 100, Nummer 2).
- Indigo Ag. (2024). *Was ist Carbon bei Indigo?* Abgerufen am 2. Januar 2024, von <https://www.indigoag.de/carbon-programm>
- 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., . . . Freibauer, A. (2018). Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland: Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. *Thünen Report 64*. <https://doi.org/10.3220/rep1542818391000>
- Klim. (2023, 9. November). *CO2 Zertifikate durch regenerative Landwirtschaft*. Abgerufen am 12. Januar 2024, von <https://www.klim.eco/co2-zertifikate>
- KlimaHumus. (2022). *Fördermöglichkeiten für Unternehmen, Kommunen und weitere Interessierte: Diese Möglichkeiten gibt es, die regenerative Landwirtschaft zu fördern*. Abgerufen am 15. Januar 2024, von <https://www.klimahumus.de/#startpunkt>
- Kolbe, H. (2008). Einfache Verfahren zur Berechnung der Humusbilanz für konventionelle und ökologische Anbaubedingungen. *Organic eprints*. <https://orgprints.org/13626/>
- Kolbe, H. & Zimmer, J. (2015). *Leitfaden zur Humusversorgung. Informationen für Praxis, Beratung und Schulung*. <https://orgprints.org/29534/>
- Kraft, N. (2021, 20. Dezember). *Thünen-Faktencheck*. Klimaschutz durch CO2-Zertifikate für Humus. Abgerufen am 16. November 2023, von <https://thuenen.pageflow.io/klimaschutz-durch-co-zertifikate-fur-humus#291242>
- Krämer, S. (2022). *NABU Standpunkt Carbon Farming*. NABU.
- Kunzig, R. (2021, 25. März). *7 Fakten zum Klimawandel*. National Geographic. Abgerufen am 16. November 2023, von <https://www.nationalgeographic.de/7-fakten-zum-klimawandel>
- Landesforschungsanstalt für Landwirtschaft und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern (Hrsg.). (2022). *GAP-Kalkulator: Berechnung der voraussichtlichen Direktzahlungen entsprechend der europäischen Agrarpolitik nach 2023* [Datensatz; MS-Excel Tabelle].

- Li, S. & Tasnady, D. (2023). Biochar for soil carbon sequestration: Current knowledge, mechanisms, and future perspectives. *C Journal of Carbon Research*, 9. <https://doi.org/10.3390/c9030067>
- Libra, J. A., Ro, K. S., Kammann, C., Funke, A., Berge, N. D., Neubauer, Y., Titirici, M., Fühner, C., Bens, O., Kern, J. & Emmerich, K. (2011). Hydrothermal Carbonization of Biomass residuals: A comparative review of the chemistry, processes and applications of wet and dry pyrolysis. *Biofuels*, 2(1), 89–124. <https://doi.org/10.4155/bfs.10.81>
- Meyer, I., Sinabell, F., Streicher, G., Spiegel, H. & Bohner, A. (2023). Kohlenstoffsequestrierung in Österreichs Acker- und Grünlandböden: Bedeutung und ökonomische Effekte ausgewählter Maßnahmen. *WIFO Monatsberichte*, 96(3/2023), 189–199.
- Ökolandbau.de - Das Informationsportal. (2022, 23. Februar). *Carbon Farming: Handel mit Humuszertifikaten*. Abgerufen am 27. November 2023, von <https://www.oekolandbau.de/landwirtschaft/betrieb/oekonomie/diversifizierung/carbon-farming-handel-mit-humuszertifikaten/>
- Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., Weigl, S., Wiesmeier, M., Wolf, A. & Helming, K. (2023). Carbon Farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>
- Schroers, J. & Krön, K. (2019). *Methodische Grundlagen der Datensammlung „Betriebsplanung Landwirtschaft“* (KTBL, Hrsg.).
- Seitz, D., Fischer, L. M., Dechow, R., Wiesmeier, M. & Don, A. (2022). The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant and Soil*, 488, 157–173. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05438-w>
- Senken. (2023). *Germany Regenerative Agriculture*. Abgerufen am 15. Januar 2024, von <https://app.senken.io/projects/818?tradeType=spot>
- Statista. (2024, 2. Januar). *Höhe der CO₂-Emissionen in Deutschland in den Jahren 1990 bis 2022*. Abgerufen am 8. Januar 2024, von <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/2275/umfrage/hoehe-der-co2-emissionen-in-deutschland-seit-1990/>
- Teichmann, I. & Kemfert, C. (2014). Biokohle in der Landwirtschaft als Klimaretter. *RePEc: Research Papers in Economics*. https://www.econstor.eu/bitstream/10419/111828/1/DIW_Roundup_47_de.pdf
- Umweltbundesamt. (2019, 26. November). *BO-R-2: Dauergrünlandfläche*. Abgerufen am 16. Dezember 2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/bo-r-2-das-indikator#bo-r-2-dauergrunlandflache>
- Umweltbundesamt. (2023a, März 28). *Grünlandumbruch*. Abgerufen am 15. Dezember 2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/gruenlandumbruch#gefahrung-des-grunlands>.

- Umweltbundesamt. (2023b, April 11). *Beitrag der Landwirtschaft zu den Treibhausgas-Emissionen*. Abgerufen am 16. November 2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/land-forstwirtschaft/beitrag-der-landwirtschaft-zu-den-treibhausgas#treibhausgas-emissionen-aus-der-landwirtschaft>
- Umweltbundesamt. (2023c, April 11). *Emissionen der Landnutzung, -änderung und Forstwirtschaft*. Abgerufen am 5. Dezember 2023, von <https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland/emissionen-der-landnutzung-aenderung#bedeutung-von-landnutzung-und-forstwirtschaft>
- Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Steffens, M. & Kögel-Knabner, I. (2020). CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes*.
<https://doi.org/10.20387/bonares-f8t8-xz4h>
- Wolters, S., Schaller, S. & Götz, M. (2018). *Freiwillige CO₂-Kompensation durch Klimaschutzprojekte* (Umweltbundesamt, Hrsg.).
- WWF Deutschland (Hrsg.). (2021). *Position zur Festlegung von Kohlenstoff in Böden und ihrer möglichen Honorierung mittels CO₂-Zertifikaten*.
- Zehlius-Eckert, W., Tsonkova, P. & Böhm, C. (2018). *Umweltleistungen von Agroforst-Systemen*.

A Anhang

Projekt an Germany
Soil Carbon Removal and Enhanced Biodiversity

BEITRAG

Contribute to carbon removals that promote soil health and local climate protection.

Preisgestaltung **62,50 € /Einheit**

Menge: - 1 +

Lagerbestand: 3.000 Einheiten
Mindesteinkäufe: 1 Einheiten

Transaktionsgebühr: 0,30 €
VAT: 2,68 €
Gesamt: 65,48 €

Jetzt kaufen 65,48 €

In den Warenkorb legen +

Bezeichnung

Regenerative Landwirtschaft ist eine der wirksamsten Lösungen zur Bekämpfung des Klimawandels.

Fast ein Viertel aller globalen Emissionen wird heute durch die Land- und Forstwirtschaft verursacht. Landwirtschaftliche Aktivitäten wie Viehzucht und Nahrungsmittelproduktion sowie Landnutzungsänderungen, Wasserverbrauch und Entwaldung setzen erhebliche Mengen an Treibhausgasen wie CO₂, Methan und Lachgas frei, was zur globalen Erwärmung beiträgt und natürliche Ökosysteme zerstört. Die Folgen dieser Aktivitäten sind auch vor unserer Haustür spürbar.

Darüber hinaus können nicht nachhaltige landwirtschaftliche Praktiken wie übermäßiger Einsatz von Düngemitteln und intensive Bodenbearbeitung zu einer Verschlechterung des Bodens führen, wodurch die Fähigkeit des Bodens, Kohlenstoff zu speichern, verringert wird und gespeicherter Kohlenstoff an die Atmosphäre abgegeben wird.

Andererseits sind unsere Böden die zweitgrößte Kohlenstoffsänke der Welt und können mehr Kohlenstoff speichern als die Atmosphäre und alle Pflanzen zusammen! Die oberste Bodenschicht, Humus genannt, besteht zu 60 % aus Kohlenstoff.

Abbildung 14: Zertifikatkauf von Klim auf der Plattform ClimateTrade

Quelle: Climate Trade, 2024

Germany Regenerative Agriculture

Germany 2023 Regenerative Agriculture Klim

TÜVRheinland

Buy and Retire Carbon Credits

Get started today! Buy carbon credits and get a retirement certificate.

Buy from **49.00 € / tCO₂**

Buy credits

About

Klim is leading the regenerative agriculture movement, striving for a fully regenerative agricultural system in which farmers and society work together to protect the world's most precious resource: soil. Bringing together companies and farmers, Klim drives regenerative transformation at speed and scale....

[Read More](#)

Sustainable Development Goals SDG 2 SDG 3 +5

2 ZERO HUNGER
3 GOOD HEALTH AND WELL-BEING
8 DECENT WORK AND ECONOMIC GROWTH
12 RESPONSIBLE CONSUMPTION AND PRODUCTION
13 CLIMATE ACTION
14 LIFE BELOW WATER
15 LIFE ON LAND

Abbildung 15: Zertifikatkauf von Klim auf der Plattform Senken

Quelle: Senken, 2023

Hektar gesamt	100								
Fruchtart	Winterraps	Winterweizen	Wintergerste	Stillegung/ gezielte Begrünung					
Fruchtfolgeanteil (%)	32	32	32	4					Gewogenes Mittel
<i>Leistungen</i>									
Ertrag (dt/ha)	39	74	73						
Preis (€/dt)	52,17	23,27	19,5						
Gesamterlös (Ertrag x Preis) in €/ha	2035	1722	1424						
Erlös aus Strohverkauf (€/ha)	316,18	108,1	95,89	0					
Prämien (€/ha)	156	156	156	200					
Summe Leistungen (€/ha)	2507,18	1986,1	1675,89	200					1982,13
<i>variable Kosten</i>									
Saatgut (€/ha)	75	84	71	50					
Dünger (€/ha)	583	579	541						
PSM (€/ha)	173	123	99						
Zinssatz (€/ha)	8,64	5,76	5,88	0,19					
Arbeitsleistungskosten inklusive Trocknung (€/ha)	326	365	347	64					
Summe variable Kosten (€/ha)	1165,64	1156,76	1063,88	114,19					1088,18
DB (€/ha)	1341,54	829,34	612,01	314,19					903,0924
Stroh	verkauft	verkauft	verkauft						€ ∅/ ha und Jahr
Humusbilanz (HÄ/(ha*Jahr))									
Bewertung/lauf Lfi		Bilanz sehr niedrig							

Abbildung 16: Berechnung Deckungsbeitrag Standardfruchtfolge

Quelle: eigene Berechnung

		100						Gewogenes Mittel	
Hektar gesamt	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht	Sommergerst	Stillelegung/ gezielte Begrünung				
Fruchtart	32	32	32	32	4				
Fruchtfolgeanteil (%)									
Leistungen									
Ertrag (dt/ha)	39	74	0	42					
Preis (€/dt)	52,17	23,27	0	19,5					
Gesamterlös (Ertrag x Preis) in €/ha	2035	1722	0	819					
Erlös aus Strohverkauf	316,18	108,1	0	95,89	0				
Prämien (€/ha)	156	156	0	156	200				
Summe Leistungen (€/ha)	2507,18	1986,1	0	1070,89	200	1788,5344			
variable Kosten									
Saatgut (€/ha)	75	84	50	57	50				
Dünger (€/ha)	583	579	0	329					
PSM (€/ha)	173	123	0	71					
Zinssatz (€/ha)	8,64	5,76	0	1,71	0,19				
Arbeitsleistungskosten inklusive Trocknung (€/ha)	326	365	64	294	64				
Summe variable Kosten (€/ha)	1165,64	1156,76	114	752,71	114,19	1025,08			
DB (€/ha)	1341,54	829,34	-114	318,18	314,19	772,59			
Stroh	verkauft	verkauft	einarbeitet	verkauft		€ Ø/ ha und Jahr			
Humusbilanz (HÄ/(ha*Jahr))									
Bewertung lauf Lfi						-287			
						sehr niedrig			

Abbildung 18: Berechnung Deckungsbeitrag FF mit Zwischenfrucht

Quelle: eigene Berechnung

Hektar gesamt	100	Winterweizen	Zwischenfrucht	Körnererbse	Wintergerste	Stillelegung/ gezielte Begrünung	gewogenes Mittel
Fruchtart	Winterweizen	27	30	15	24	4	
Fruchtfolgeanteil (%)							
<i>Leistungen</i>							
Ertrag (dt/ha)	39	74	0	32	73		
Preis (€/dt)	52,17	23,27	0	26,17	19,5		
Gesamterlös (Ertrag x Preis) in €/ha	2035	1722	0	837	1424		
Prämien (€/ha)	156	156	0	156	156	200	
Summe Leistungen (€/ha)	2191	1878	0	993	1580	200	1691,12
<i>variable Kosten</i>							
Saatgut (€/ha)	75	84	50	116	71	50	
Dünger (€/ha)	583	579	0	182	541		
PSM (€/ha)	173	123	0	71	99		
Zinssatz (€/ha)	8,64	5,76	0	1,29	5,88	0,19	
Arbeitsleistungskosten inklusive Trocknung (€/ha)	326	365	64	305	347	64	
Summe variable Kosten (€/ha)	1165,64	1156,76	114	675,29	1063,88	114,19	1057,1431
DB (€/ha)	1025,36	721,24	-114	317,71	516,12	314,19	643,1121
Stroh	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	/	Ø/ ha und Jahr
Humusbilanz (HÄ/(ha*Jahr))		134					
Bewertung laut Lfi		hoch					

Abbildung 21: Berechnung FF mit Leguminose und ZF und Einarbeitung

Quelle: eigene Berechnung

Hektar	100											Gewogenes Mittel
Fruchtart	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht	Körnererbse	Wintergerste	Zwischenfrucht	Körnerlupine	Stillegung/ gezielte Begrünung				
Fruchtfolgeanteil (%)	25	25	25	25	15	21	25	10	4			
Leistungen												
Ertrag (dt/ha)	39	74	0	32	73	0	0	32	0			
Preis (€/dt)	52,17	23,27	0	26,17	19,5	0	0	26,17	0			
Gesamterlös (Ertrag x Preis) in €/ha	2035	1722	0	837	1424	0	0	837,44	0			
Erlös aus Strohverkauf	316,18	108,1	0	0	95,89	0	0	0	0			
Prämien (€/ha)	248	248	0	248	248	0	0	248	200			
Summe Leistungen (€/ha)	2599,18	2078,1	0	1085	1767,89	0	0	1085,44	200			1819,87
variable Kosten												
Saatgut (€/ha)	75	84	50	116	71	50	50	33	50			
Dünger (€/ha)	583	579	0	182	541	0	0	169	0			
PSM (€/ha)	173	123	0	71	99	0	0	41	0			
Zinssatz (€/ha)	8,64	5,76	0	1,29	5,88	0	0	2,07	0,19			
Arbeitsaufwandskosten inklusive Trocknung (€/ha)	326	365	64	305	347	64	64	249	64			
Summe variable Kosten (€/ha)	1165,64	1156,76	114	675,29	1063,88	114	114	494,07	114,19			1016,28
DB (€/ha)	1433,54	921,34	-114	409,71	704,01	-114	-114	591,37	314,19			812,72
	verkauft	verkauft	einarbeitet	einarbeitet	verkauft	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	/			
Humusbilanz (HÄ/(ha*Jahr))												
Bewertung lauf Lfi		53										
		ausgeglichen										

Abbildung 22: Berechnung Deckungsbeitrag 5-gliedrige FF

Quelle: eigene Berechnung

Hektar	100											Gewogenes Mittel
Fruchtart	Winterraps	Winterweizen	Zwischenfrucht	Körnererbse	Wintergerste	Zwischenfrucht	Körnerlupine	Stillelegung/ gezielte Begrünung				
Fruchtfolgeanteil (%)	25	25	25	15	21	25	10	4				
<i>Leistungen</i>												
Ertrag (dt/ha)	39	74	0	32	73	0	32	0				
Preis (€/dt)	52,17	23,27	0	26,17	19,5	0	26,17	0				
Gesamterlös (Ertrag x Preis) in €/ha	2035	1722	0	837	1424	0	837,44	0				
Prämien (€/ha)	248	248	0	248	248	0	248	200				
Summe Leistungen (€/ha)	2283	1970	0	1085	1672	0	1085,44	200	1693,66			
<i>variable Kosten</i>												
Saatgut (€/ha)	75	84	50	116	71	50	33	50				
Dünger (€/ha)	583	579	0	182	541	0	169	0				
PSM (€/ha)	173	123	0	71	99	0	41	0				
Zinssatz (€/ha)	8,64	5,76	0	1,29	5,88	0	2,07	0,19				
Arbeitsleistungskosten inklusive Trocknung (€/ha)	326	365	64	305	347	64	249	64				
Summe variable Kosten (€/ha)	1165,64	1156,76	114	675,29	1063,88	114	494,07	114,19	1016,28			
DB (€/ha)	1117,36	813,24	-114	409,71	608,12	-114	591,37	314,19	686,52			
Stroh	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet	einarbeitet				
Humusbilanz (HÄ/(ha*Jahr))	207											
Bewertung laut Lfi	Bilanz hoch											

Abbildung 23: Berechnung Deckungsbeitrag 5-gliedrige FF mit Einarbeitung

Quelle: eigene Berechnung

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich herzlich bei allen bedanken, die mich während der Anfertigung dieser Bachelorarbeit unterstützt und motiviert haben.

Zuerst gilt Frau Prof. Dr. Silvia Bachmann-Pfabe mein besonderer Dank. Ihre wertvollen Anregungen, konstruktive Kritik und Literaturvorschläge haben mich sehr unterstützt. Zudem danke ich meinem Zweitkorrektor Prof. Dr. Clemens Fuchs, der ebenfalls wertvolle Literaturvorschläge und Ideen angebracht hat und mich bei meinen Berechnungen unterstützt hat. Vielen Dank, dass Sie mich auf meinem akademischen Weg begleitet haben.

Ebenfalls möchte ich mich bei allen bedanken, die auch im Hintergrund geholfen haben. Sei es durch Ermutigungen weiterhin dranzubleiben oder durch das Korrekturlesen dieser Arbeit.

Abschließend möchte ich meiner Familie danken, die mir das Studium durch ihre Unterstützung ermöglicht haben.

Mit freundlichem Dank,

Alena Wulf

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, Alena Wulf, an Eides statt, dass ich die vorliegende Arbeit zum Thema „CO₂-Speicherung in landwirtschaftlichen Böden – Humusaufbau und Honorierung über CO₂-Zertifikate“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt habe. Die aus fremden Quellen direkt oder indirekt übernommenen Gedanken sind als solche kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde bisher in gleicher oder ähnlicher Form keiner anderen Prüfungsbehörde vorgelegt.

Grömitz, den 06. März 2024

Alena Wulf