



AgEcon SEARCH
RESEARCH IN AGRICULTURAL & APPLIED ECONOMICS

The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

BEWERTUNG DER ZERTIFIZIERUNGSFÄHIGKEIT AUSGE-
WÄHLTER CARBON FARMING MASSNAHMEN HINSICHT-
LICH IHRES KLIMASCHUTZEFFEKTES MIT ÖKONOMISCHER
ANALYSE AM BEISPIEL VON DREI LANDKREISEN BADEN-
WÜRTTEMBERGS

Cecilia Roxanne Geier, Christian Sponagel, Elisabeth Angenendt,
Enno Bahrs

cecilicaroxanne.geier@uni-hohenheim.de

Landwirtschaftliche Betriebslehre

Universität Hohenheim

Schloss Hohenheim 1, 70599 Stuttgart



2022

*Vortrag anlässlich der 62. Jahrestagung der GEWISOLA
(Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues e.V.)*

*Resilienz von regionalen und globalen Wertschöpfungsketten
der Agrar- und Ernährungswirtschaft
07. bis 09. September 2022*

BEWERTUNG DER ZERTIFIZIERUNGSFÄHIGKEIT AUSGEWÄHLTER CARBON FARMING MASSNAHMEN HINSICHTLICH IHRES KLIMASCHUTZEFFEKTES UND ÖKONOMISCHE ANALYSE AM BEISPIEL VON DREI LANDKREISEN BADEN-WÜRTTEMBERGS

Cecilia Roxanne Geier, Christian Sponagel, Elisabeth Angenendt, Enno Bahrs

Zusammenfassung

Die steigende Nachfrage nach CO₂-Zertifikaten verleitet derzeit eine Vielzahl an Unternehmen dazu, den möglichen Klimaschutznutzen von C-Sequestrierungsmaßnahmen im Landnutzungssektor zu THG-Kompensationszwecken marktfähig zu machen. Vor diesem Hintergrund untersucht dieser Beitrag exemplarische Maßnahmen wie Zwischenfruchtanbau, vielfältige Fruchtfolgen, Umwandlung von Acker- in extensives Dauergrünland und Integration von Agroforstsystemen auf ihre Richtlinienkompatibilität anerkannter Zertifizierungsstandards für THG-Emissionsreduktionen. Darüber hinaus werden Deckungsbeitragsveränderungen und erwartbare CO₂-Vermeidungskosten am Beispiel der landwirtschaftlichen Produktion in den Landkreisen Reutlingen, Rhein-Neckar und Ludwigsburg in Baden-Württemberg kalkuliert. Der Beitrag stützt sich dabei auf eine breit angelegte Literaturrecherche anerkannter Bewertungsstandards sowie einer Kalkulation der Mehraufwendungen und Mindererträge durch die Etablierung der betrachteten Maßnahmen mithilfe eines modellierten Vergleichs von regional differenzierten Deckungsbeiträgen typischer Fruchtfolgen. Die Analysen dieser C-Sequestrierungsmaßnahmen zeigen, dass diese die Anforderungen bisheriger Zertifizierungsstandards lediglich zu 50-71 % erfüllen könnten und damit deren Eignung zur THG-Kompensation infrage zu stellen ist. Darüber hinaus sind diese Maßnahmen auch aus ökonomischer Sicht fragwürdig. Die Analyse der mittleren Deckungsbeitragsveränderungen in Höhe von -1.535 bis +165 €/ha zeigen stark von den Standort- und insbesondere Fruchtfolgebedingungen abhängige Effekte. Die mittleren CO₂-Vermeidungskosten der betrachteten Maßnahmen liegen mit bis zu 1.408 €/t CO₂ im Vergleich zu anderen Klimaschutzmaßnahmen des Landwirtschaftssektors im mittleren bis oberen Bereich und ließen sich nur unter Einbezug weiterer positiver Nebeneffekte wie z. B. verminderte Erosion, verbesserte Nährstoffexploration und erhöhte Biodiversität rechtfertigen, könnten aber an wenigen Standorten auch Vermeidungsgewinne bis 521 €/t CO₂ erzielen.

Keywords

C-Sequestrierung, Vermeidungskosten, Zertifizierungsstandards, Carbon Farming.

1 Einleitung

Durch die Sequestrierung von Kohlenstoff aus der Atmosphäre kommt den Böden eine relevante Bedeutung als Senkenfunktion im Rahmen des Klimaschutzes zu. Von Pflanzen aus der Atmosphäre im Laufe der Photosynthese absorbiertes und bspw. in Form toter organischer Masse in den Boden abgegebenes CO₂ kann bei geeigneter Bodenart, Standortfaktoren und Bewirtschaftung über einen langen Zeitraum aus der Atmosphäre entzogen werden (LÜTZOW et al. 2006; KELL 2012; WIESMEIER et al. 2013). Durch diesen stetigen Eintrag an organischem Kohlenstoff (C_{org}) stellen Böden heute den hierfür größten terrestrischen Speicher dar und enthalten doppelt so viel Kohlenstoff, wie die gesamte irdische Atmosphäre (CIAIS et al. 2013).

Durch dieses Potential entwickelt sich zunehmend ein eigener Markt. Seit einigen Jahren drängen vermehrt privatwirtschaftliche Unternehmen auf den freiwilligen CO₂-Kompensationsmarkt, um sogenannte „Carbon Farmer“ und CO₂-emittierende Unternehmen

zusammenzuführen. Entlohnt werden die LandwirtInnen über einen Anteil des erzielten Verkaufserlös‘ der Humus- oder CO₂-Zertifikate, um die Mehrkosten für die Etablierung C-bindender Maßnahmen zu decken.

Dieser Beitrag untersucht, inwiefern die häufig geförderten Maßnahmen des Zwischenfruchtanbaus, der vielfältigen Fruchtfolgen, der dauerhaften Umwandlung von Acker- in extensives Grünland und der Integration von Agroforst die Kriterien anerkannter Standards zur Zertifizierung der THG-Emissionsreduktion erfüllen könnten, und betrachtet die durch die Etablierung für LandwirtInnen erwartbaren Deckungsbeitragsveränderungen und Vermeidungskosten. Folgende Forschungsfragen sollen hierfür beantwortet werden:

1. Erfüllen die ausgewählten Maßnahmen die Kriterien zur Zertifizierung der THG-Emissionsreduktion anerkannter Standards, um deren Klimaschutzbeitrag in Form einer THG-Emissionskompensation sicherzustellen?
2. In welcher Größenordnung liegen die für LandwirtInnen erwartbaren Deckungsbeitragsveränderungen und die daraus resultierenden Vermeidungskosten der ausgewählten Maßnahmen in den betrachteten Gebieten?

2 Hintergrund

Die Erarbeitung von Systemen ergebnisbasierter Zahlungen zur Förderung klimapositiver Landnutzung sind derzeit von zentraler Bedeutung für die Europäische Kommission, wenngleich deren Ausgestaltung zur Implementierung bisher nicht abgeschlossen ist (COWI, ECOLOGIC INSTITUTE UND IEEP 2021). Eine Möglichkeit ergebnisbasierter Zahlungen bieten die sogenannten Humusaufbauprojekte, die sich am Vorbild der bereits existierenden CO₂-Märkte orientieren und die Menge des im Boden durch Anwendung humusfördernder Maßnahmen gebundenen, mithilfe von Bodenproben gemessenen CO₂ und in Form von an Unternehmen zu Kompensationszwecken verkauften Zertifikaten vergüten. Jedoch weisen wissenschaftliche Studien zunehmend auf die mangelhafte Effektivität dieser Maßnahmen in Bezug auf den Klimaschutz hin (DON ET AL. 2018; BONARES-ZENTRUM FÜR BODENFORSCHUNG 2020). Zwar existieren bereits landwirtschaftliche Humusaufbauprojekte in Deutschland, jedoch ist von diesen keines in einem offiziellen Projektregister anerkannter Standards wie Verra, Gold Standard oder Plan Vivo gelistet und demnach nicht als unabhängig geprüfetes Klimaschutzprojekt zertifiziert (vgl. VERIFIED CARBON STANDARD 2021; GOLD STANDARD 2021; PLAN VIVO 2022). Demnach kann nicht sicher davon ausgegangen werden, dass eine Zertifizierung solcher Maßnahmen ihrer Förderprojekte nach anerkannten Standards in Deutschland überhaupt möglich ist. Darüber hinaus weisen Untersuchungen eine unzureichende Höhe der monetären Vergütung der Humuszertifikate nach. PUUPPONEN et al. (2022) zeigen, dass viele Landwirte der Etablierung klimafreundlicher Landnutzungsmaßnahmen kritisch gegenüberstehen, weil sie deren Rentabilität infrage stellen.

Zur Reflexion dieser Problemstellung und Beantwortung der Forschungsfragen, wurde eine Zusammenfassung der wichtigsten Kriterien von anerkannten Standards zur Verifizierung der Klimaschutzwirkung von C-Sequestrierungsmaßnahmen angefertigt. Anhand von Literaturanalysen wurden die vier im weiteren Verlauf näher beleuchteten Maßnahmen ausgewählt, sowie ein Referenzwert für deren C-Sequestrierungspotential ermittelt. Die Kalkulation der Deckungsbeitragsveränderung der implementierten Maßnahmen wurden am Beispiel typischer Fruchtfolgen der Landkreise Reutlingen, Ludwigsburg und Rhein-Neckar, die sich durch drei unterschiedliche Ertragsniveaus auszeichnen, anhand von Standarddaten berechnet.

3 Empirische Methoden und Analyserahmen

3.1 Auswahl C-bindender Maßnahmen und Begründung

Die Auswahl der vier untersuchten Maßnahmen erfolgte auf Grundlage der im Technischen Leitfaden (COWI, ECOLOGIC INSTITUTE UND IEEP 2021) innerhalb des EU-Kontextes als relevant eingestuften und auf der Studie nach MARTINEAU et al. (2016) basierenden Maßnahmen zur C-Sequestrierung. Diese waren anhand vergangener Studien in Bezug auf ihre Klimaschutzwirksamkeit bereits als vielversprechend eingestuft, jedoch nicht auf Kriterienkonformität zu einem anerkannten Standard überprüft worden. Dies umfasst die Umwandlung von Acker- zu extensivem Dauergrünland, die eine sehr effektive Maßnahme zur Erhöhung der C-Vorräte in Böden darstellt. Ebenso weist die Integration von Zwischenfrüchten ein vergleichsweise hohes Bindungspotential auf, wenngleich sie nicht in jede Fruchtfolge integriert werden können (DON et al. 2018). Ausgewählt wurde auch die Etablierung von Agroforstsystemen, die in globalen Fallstudien zu einer signifikanten Erhöhung der Bodenkohlenstoffvorräte geführt hat (STEFANO UND JACOBSON 2018). Schwedische Langzeitversuche haben aufgezeigt, dass vielfältige Fruchtfolgen die Bodenkohlenstoffvorräte in den oberen 25 cm signifikant steigern konnten (BOLINDER et al. 2012; POEPLAU und DON 2015).

3.2 Erstellung der Kriterienliste

Die Kriterienliste basiert auf den ausgewählten Standards Verra, Gold Standard und Plan Vivo, welche über eine für Landnutzungsprojekte angepasste Methodologie verfügen und auch für Landnutzungsbedingungen in Deutschland anwendbar sind. Zudem werden diese als geeignete Standards für freiwillige Kompensationsprojekte ausgewiesen (z.B. UNGER et al. 2018; UMWELTBUNDESAMT 2015). Um die Vollständigkeit der aus den Standards herausgearbeiteten Kriterien in Hinblick auf die Klimawirksamkeit überprüfen zu können, wurden diese mit weiteren Literaturquellen verglichen und ergänzt (s. Tabelle 2). Dabei stellte sich heraus, dass eine Hierarchisierung der Kriterien nach Projekt, Zertifikaten und Maßnahmen sinnvoll ist. Projekte bilden den administrativen Rahmen zur Umsetzung einer Maßnahme und können Kriterien der Verlässlichkeit, Resilienz, Stakeholder-Einbindung, holistische Betrachtungsweise, Konservativität und Fairness erfüllen. Zertifikate hingegen stellen den monetarisierten und einem Käufer zugeordneten Klimaschutznutzen dar und können insbesondere die Gefahr der Doppelzählung vermeiden. Permanenz, Zusätzlichkeit, Leakage-Effekte, Nachhaltigkeit, Relevanz, Anwendbarkeit, Legalität und Kosteneffizienz stellen wiederum Anforderungen an eine Maßnahme zum Nachweis der THG-Reduktionswirkung dar und werden im weiteren Verlauf näher betrachtet. Die Bewertung der Maßnahmen erfolgte auf Grundlage der Studien von LEIFELD et al. 2019, BONARES-ZENTRUM FÜR BODENFORSCHUNG 2020, DON et al. 2018 und weiteren (s. Tabelle 2), um deren jeweilige Ansichten sowie Kritikpunkte in Bezug auf das entsprechende Kriterium zusammenzufassen und damit eine möglichst fundierte Begründung der Erfüllung oder Nicht-Erfüllung des Kriteriums durch die Maßnahme geben zu können.

3.3 Ermittlung der Deckungsbeitragsveränderung und Vermeidungskosten

Für die Ermittlung des veränderten Deckungsbeitrags (DB) wurden zunächst typische Fruchtfolgen für die drei Landkreise Ludwigsburg, Rhein-Neckar-Kreis und Reutlingen, basierend auf den Daten des Gemeinsamen Antrags abgeleitet. Diese dienen als Basisfruchtfolge zur Bewertung der C-Sequestrierungsmaßnahmen. Die einzelnen Landkreise wurden anhand der mittleren Hektarerträge der Jahre 2018 und 2019 von Winterweizen in drei Ertragsstufen eingeteilt, da diese für alle Landkreise verfügbar sind (STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG 2020). Dem Rhein-Neckar-Kreis wurde ein hohe, Ludwigsburg eine mittlere und Reutlingen eine niedrige Ertragsstufe zugeordnet. Basierend auf der Nutzung der Ackerfläche gemäß den Daten des Gemeinsamen Antrags aus dem Jahr 2021 wurden mit Hilfe des

Fruchtfolgemodells CropRota (SCHÖNHART et al. 2011) typische Fruchtfolgen und deren Flächenanteile für jeden Landkreis abgeleitet. Anschließend wurden für diese Fruchtfolgen Deckungsbeiträge kalkuliert. Dazu wurden betriebswirtschaftliche Kalkulationsdaten sowie einzelne Veröffentlichungen für jede Kulturart in drei Bewirtschaftungsintensitäten entsprechend der genannten Ertragsstufen untergliedert (LEL 2021; KTBL 2021; LFL 2021; AMI 2020, 2021, 2019). Die resultierenden Deckungsbeiträge stellen das Referenzniveau dar.

Die Ermittlung des C-Bindungspotentials im Boden ist von einer Vielzahl von Faktoren auch abseits des Landnutzungsmanagements abhängig (JACOBS et al. 2018), weshalb eine exakte Kalkulation derselben für spezifische Standorte sehr schwierig ist. Vor dem Hintergrund der Zielsetzung des Beitrags werden hier deshalb Orientierungswerte basierend auf einer aktuellen Studie von WIESMEIER et al. (2020) genutzt, die mittlere C-Sequestrierungsraten für gemäßigte Klimazonen aus der Literatur abgeleitet haben.

Zur Bestimmung der Deckungsbeitragsveränderungen, die sich durch die Etablierung der vier ausgewählten Maßnahmen ergeben, wurden zunächst die Deckungsbeiträge für diese Maßnahmen auf Grundlage der Kalkulationsdaten des KTBL (2021) und der LFL (2021) ermittelt. Die Kosten für die Etablierung von Zwischenfrüchten – in der Annahme Senf als integrierte Zwischenfrucht – belaufen sich auf 104 €/ha*a). Zur Kalkulation des Szenarios vielfältiger Fruchtfolgen wurde der Deckungsbeitrag in Höhe von 204 €/ha*a) basierend auf dem Anbau von Futtererbsen herangezogen und je nach Anzahl der Fruchtfolgeglieder verhältnismäßig berücksichtigt. Für die Ermittlung der Deckungsbeiträge von Agroforstsystemen in Höhe von - 6 €/ha*a) wurden die Daten der LfL für Kurzumtriebsplantagen verwendet. Der Deckungsbeitrag für Grünland lag bei 83 €/ha*a), der anhand des Veredlungswertes in der Tierhaltung entsprechend nach dem Gehalt an MJ NEL mit 0,22 € je 10 MJ NEL in Anlehnung an den Preis für Maissilage ermittelt wurde.

Die Vermeidungskosten resultieren aus dem Verhältnis der Deckungsbeitragsveränderung zum in WIESMEIER et al. (2020) ermittelten C-Sequestrierungspotential (vgl. Tabelle 1).

Tabelle 1: Durchschnittliche Sequestrierungspotentiale der ausgewählten Maßnahmen sowie bei Einbindung in die Basisfruchtfolge

Maßnahme	potentielle C-Sequestrierung	Sequestrierungspotential bei Einbindung in die Basisfruchtfolge	Herleitung
ZF	0,32 t C _{org} /ha*a	0-0,32 t C _{org} /ha*a	Abhängig von Verhältnis Zwischenfrucht zu Fruchtfolge
VF	0,15 t C _{org} /ha*a	0,03-0,04 t C _{org} /ha*a	Abhängig von Anzahl Fruchtfolgegliedern
GL	0,73 t C _{org} /ha*a	-0,73 t C _{org} /ha*a	-Basisfruchtfolge fällt weg
AF	0,68 t C _{org} /ha*a	0,27 t C _{org} /ha*a	Max. Anteil an Agroforst an Acker beträgt 40 % nach GAPDZV §4 Abs. 2

Quelle: eigene Darstellung nach WIESMEIER et al. (2020) und BMEL (2021)

4 Ergebnisse

4.1 Ergebnisse der Kriterienkonformität

Die zusammenfassende Bewertung der Kriterienkonformität (KK) „integrierter Zwischenfrüchte“, „Verbesserung von Fruchtfolgen“, „Umwandlung Acker- in extensives Dauergrünland“ und „Integration von Agroforstsystemen“ ist in Tabelle 2 aufgeführt. Ein Wert von 1 illustriert die Konformität einer Maßnahme mit dem jeweiligen Kriterium, während ein Wert von 0 die Nicht-Erfüllung desselben bedeutet. Der Kriterienkonformitätsgrad (KKG) stellt den durch die Maßnahme erfüllbaren Anteil des Zertifizierungskriteriums in Prozent dar.

Tabelle 2: Übersicht der Kriterienkonformität einzelner Maßnahmen und ihrer Bewertung in Prozent

Kriterien der zertifizierten Klimaschutzwirkung	Etablierung von Zwischenfrüchten (ZF)	KK	Verbesserte Fruchtfolgen (VF)	KK	Umwandlung von Acker- zu extensivem Dauergrünland (GL)	KK	Integration von Agroforstsystemen (AF)	KK
Maßnahme (ist)								
permanent	Σ	0	0	0	1	1	1	1
kann C _{org} unabhängig vom Bodenmanagement speichern	C-Bindung reversibel ^{1;12}	0	C-Bindung reversibel ^{1;12}	0	C-Bindung reversibel ^{1;12}	0	C-Bindung reversibel ^{1;12}	0
im Fortbestehen gesichert durch politische Auflagen oder sonstige Hürden	nicht gesichert	0	nicht gesichert	0	Grünlandumbbruchverbot ⁵	1	Beseitigung ausgewachsener Baumbestände aufwendig	1
resistent gegen sich verändernde Klimaeinflüsse	Resistenz nicht gesichert ^{1; 9; 12; 13}	0	Resistenz nicht gesichert ^{1; 9; 12; 13}	0	Resistenz nicht gesichert ^{1; 9; 12}	0	Resistenz nicht gesichert ^{1; 9; 12}	0
zusätzlich	Σ	3	3	3	4	4	4	4
ökonomisch/ finanziell unattraktiv oder unpraktikabel	i.d.R. finanziell unattraktiv ³	1	i.d.R. finanziell unattraktiv ³	1	i.d.R. finanziell unattraktiv ³	1	i.d.R. finanziell unattraktiv ³	1
nicht gesetzlich vorgeschrieben	nicht gesetzlich vorgeschrieben	1	nicht gesetzlich vorgeschrieben	1	nicht gesetzlich vorgeschrieben	1	nicht gesetzlich vorgeschrieben	1
nicht üblich (common practice)	Als common practice definiert nach ZINNGREBE et al. ⁴	0	als nicht common practice definiert nach ZINNGREBE et al. ⁴	1	Grünlandflächen haben um 1,6 % zugenommen (2010-2021) ¹⁶	1	als nicht common practice definiert nach ZINNGREBE et al. ⁴	1
mit Umsetzungsbarrieren konfrontiert, aber in der Lage, diese zu überwinden	nicht immer in Fruchtfolge integrierbar ¹	1	-	0	Mangelndes Interesse der Landwirte ¹⁵	1	Mangelnde Akzeptanz und Kenntnis der Landwirte ¹⁹	1
non-leaking	Σ	1	2	0	3	3	3	3
verursacht keine Aktivitätsverschiebung auf andere Flächen (Activity-Leakage)	nicht erkennbar	1	nicht erkennbar	1	mögl. Produktionsverlagerung durch Flächenverlust	0	Produktivitätsverlust durch Flächenverlust nicht erwartbar ^{z.B. 20}	1
verursacht keine Angebotsverschiebung (Market-Leakage)	Verschiebung des Anbauspektrums zugunsten von Sommerungen	0	-	1	Nahrungsmittelverlust	0	nicht erkennbar	1
verursacht keine höheren Emissionen inner-/außerhalb des Projektgebietes (Ecological Leakage)	mögl. erhöhte N-Emissionen bei Einsatz von Leguminosen ⁶	0	mögl. erhöhte N-Emissionen bei Einsatz von Leguminosen ⁶	0	mögl. erhöhte Emissionen durch Beweidung ^{17;6}	0	nicht erkennbar	1
relevant	Σ	1	1	1	1	1	1	1
führt zu geringeren THG-Emissionen als das Basisszenario	Potential für Deutschland nachgewiesen ¹	1	Potential für Deutschland nachgewiesen ¹	1	Potential für Deutschland nachgewiesen ¹	1	Potential für gemäßigte Zonen nachgewiesen ²¹	1
nachhaltig	Σ	1	1	1	1	1	1	1
Leistet einen Beitrag zur Erreichung der SDGs durch weitere positive ökologische und sozio-ökonomische Nebeneffekte	Beitrag zu SDG 2, 13, 15 ¹¹ z.B. durch verbesserte Bodeneigenschaften ⁷	1	Beitrag zu SDG 2, 13, 15 ¹¹ z.B. durch verbesserte Wasser- und Nährstoffexploration ¹	1	Beitrag zu SDG 13, 15 ¹¹ z.B. durch verbesserten Erosionsschutz und Biodiversität ¹⁸	1	Beitrag zu SDG 2, 12, 13, 15 ¹¹ z.B. durch Erosionsschutz ¹⁴	1
messbar	Σ	0	0	0	0	0	0	0
C-Vorratsänderungen gegenüber einer verlässlichen Baseline kosteneffizient messbar	Messungen aufwendig und wenig praktikabel ^{8;9;10}	0	Messungen aufwendig und wenig praktikabel ^{8;9;10}	0	Messungen aufwendig und wenig praktikabel ^{8;9;10}	0	Messungen aufwendig und wenig praktikabel ^{8;9;10}	0
kosteneffizient	Σ	1	0	0	0	0	0	0
nicht doppelt gefördert	-	1	mögl. über Eco-Schemes ¹⁴	0	mögl. über Eco-Schemes ¹⁴	0	über Eco-Schemes ¹⁴	0
KKG (%)	Σ	50	50	50	50	50	50	71

¹ DON et al. 2018; ² POEPLAU UND DON 2015; ³ KTBL 2021; ⁴ ZINNGREBE et al. 2017; ⁵ VERORDNUNG (EU) NR. 1307/2013, ART. 42; ⁶ GU et al. 2017; ⁷ ADETUNJI et al. 2020; ⁸ GUBLER et al. 2019; ⁹ BONARES-ZENTRUM FÜR BODENFORSCHUNG 2020; ¹⁰ LEIFELD et al. 2019; ¹¹ BUNDESUMWELTMINISTERIUM 2021; ¹² JACOBS ET AL. 2018; ¹³ SIEBERT UND EWERT 2012; ¹⁴ GAPDZV; ¹⁵ KNUTH et al.; ¹⁶ STATISTISCHES BUNDESAMT 2021b; ¹⁷ WEN et al. 2021; ¹⁸ BENGSSON et al. 2019; ¹⁹ COWI, ECOLOGIC INSTITUTES UND IEEP 2021; ²⁰ OLLINHAHO UND KRÖGER 2021; ²¹ MAYER et al. 2022;

Wie in Tabelle 2 ersichtlich, kann keine der Maßnahmen alle Zertifizierungskriterien für Klimaschutzwirksamkeit vollständig erfüllen, sie weisen aber in Summe eine ähnlich hohe Kriterienkonformität zwischen 50 % für vielfältige Fruchtfolgen (VF), die Umwandlung von Acker- zu extensivem Grünland (GL) und für die Etablierung von Zwischenfrüchten (ZF) und 71 % für die Integration von Agroforstsystemen (AF) auf. Als Hauptgründe sind hierzu die nicht garantierte Permanenz, mögliche Verlagerungseffekte sowie die diffizile Quantifizierung des Beitrags zum Klimaschutz zu nennen. Die höchstmögliche Permanenz bieten die Maßnahmen

GL und AF, da ihre Umkehrung gesetzlich verboten bzw. sehr aufwendig ist. Bei drei von vier Maßnahmen handelt es sich um unübliche, landwirtschaftliche Praktiken, lediglich die ZF wird bereits auf mehr als 10 % der Gesamtackerfläche umgesetzt (STATISTISCHES BUNDESAMT 2021). Zudem wird die Erweiterung von Fruchtfolgen durch Integration von Leguminosen, sowie die Extensivierung von Grünland oder die Integration von Agroforstsystemen in Ackerland nach der GAP-Reform 2023 über die Eco-Schemes abgedeckt. Die Maßnahmen VF, GL und AF könnten theoretisch doppelt gefördert werden, denn es gibt derzeit keine Instanz, die verhindert, dass LandwirtInnen sowohl staatliche Prämien als auch Einnahmen aus Zertifikatverkäufen für dieselbe Maßnahme beziehen könnten. Darüber hinaus ist erwartbar, dass sich die Maßnahmen durch weitere Förderung stärker etablieren und damit zukünftig nicht mehr zusätzlich sind. Leakage-Effekte in Form erhöhter N-Emissionen, Nahrungsmittelverluste oder Produktionsverlagerung können grundsätzlich durch unterschiedliche Maßnahmen hervorgerufen werden, für einige basieren diese jedoch auf theoretischen Annahmen, da hierzu kaum Literatur vorliegt. Die Reduktion von THG-Emissionen ist für jede Maßnahme im Rahmen verschiedener Studien nachgewiesen. Zudem leisten alle Maßnahmen einen Beitrag zur Erreichung der Sustainable Development Goals (SDG) durch Erzielen zahlreicher weiterer ökologischer und sozio-ökonomischer Nebeneffekte. Derzeit besteht aber für keine Maßnahme ein valides Verfahren zur Messung der tatsächlichen CO₂-Reduktion, da deren Quantifizierung in entsprechender Größenordnung aufwendig und teuer ist (GUBLER et al. 2019; LEIFELD ET AL. 2019).

4.2 Ergebnisse der Deckungsbeitragsveränderung und der Vermeidungskosten

Abbildung 1 zeigt die Deckungsbeitragsveränderungen (DB-Veränderungen) einzelner Fruchtfolgen in Form von Boxplots durch die Etablierung von Zwischenfrüchten (ZF), vielfältige Fruchtfolgen (VF), Umwandlung von Acker- in extensives Dauergrünland (GL) und Integration von Agroforstsystemen (AF) in den unterschiedlichen Landkreisen Ludwigsburg (LB), Rhein-Neckar-Kreis (HD) und Reutlingen (RT).

Abbildung 1: DB-Veränderungen (Boxplots) in den Landkreisen LB und RT sowie HD durch Integration der ausgewählten Maßnahmen mit Median (--) und Durchschnitt (x)

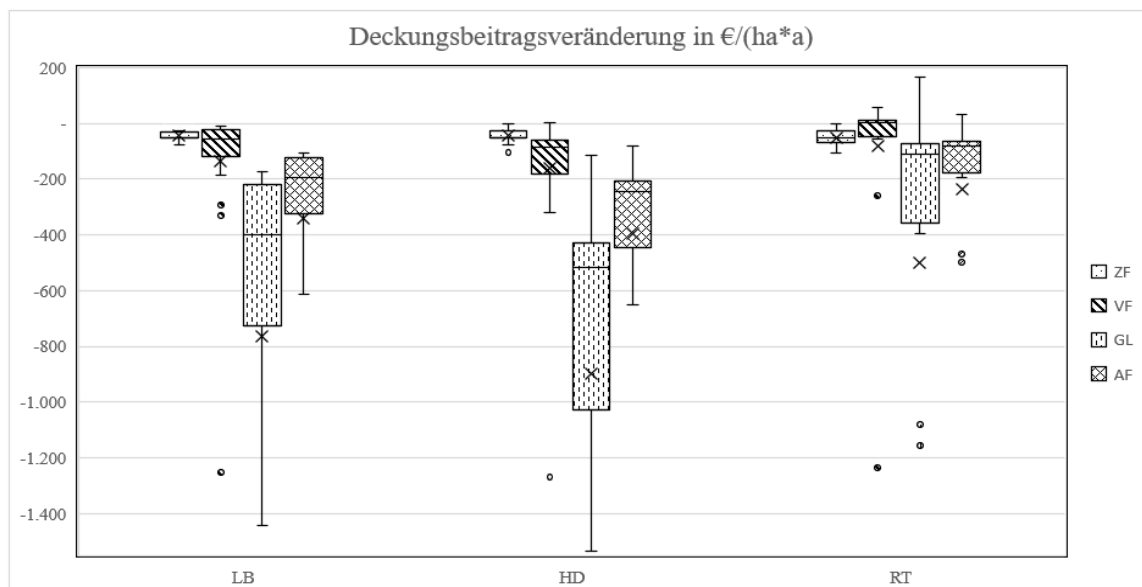


Abbildung 1 zeigt, dass durch die Etablierung der Maßnahmen für den überwiegenden Teil der betrachteten Fruchtfolgen in den Landkreisen LB, HD und RT ein mitunter erheblicher Deckungsbeitragsverlust entsteht. Die Deckungsbeitragsrückgänge in RT, das durch niedrige Ertragsstufen gekennzeichnet ist, fallen bei allen betrachteten Maßnahmen am niedrigsten aus. Analog hierzu weist LB höhere DB-Veränderungen auf als der Landkreis RT, liegt jedoch im Vergleich zu HD moderater, wo die vergleichbar besten Ackerbaubedingungen der

ausgewählten Untersuchungsregionen vorherrschen. Vergleicht man die Maßnahmen untereinander, so verursacht die Etablierung der Maßnahmen ZF und VF deutlich geringere, mediane Deckungsbeitragsveränderungen als die Maßnahmen GL und AF. Während die Deckungsbeitragsveränderungen für die Maßnahmen ZF und VF in einem Bereich zwischen -104 (RT) und 0 €/ha*a (RT) bzw. -320 (HD) und +57 €/ha*a (RT) liegen, umfassen die DB-Veränderungen für GL und AF mit -1.535 (HD) und 165 €/ha*a (RT) bzw. -650 (HD) und +30 €/ha*a (RT) eine deutlich größere Wertespanne. An den Standorten HD und LB verursachen vor allem die Maßnahmen Umwandlung von Acker- in Grünland und Agroforst sehr hohe DB-Verluste mit bis zu -1.535 (GL in HD) und -650 €/ha*a (AF in HD).

Abbildung 2 zeigt die THGE-Vermeidungskosten oben genannter Maßnahmen in den Landkreisen LB, HD und RT in €/t CO₂. Zur Ermittlung dieser wurden die Deckungsbeitragsveränderungen der verschiedenen Maßnahmen in Relation zum C-Sequestrierungspotential gesetzt.

Abbildung 2: Vermeidungskosten (Boxplots) in den Landkreisen LB und RT sowie HD durch Integration der ausgewählten Maßnahmen mit Median (--) und Durchschnitt (x)

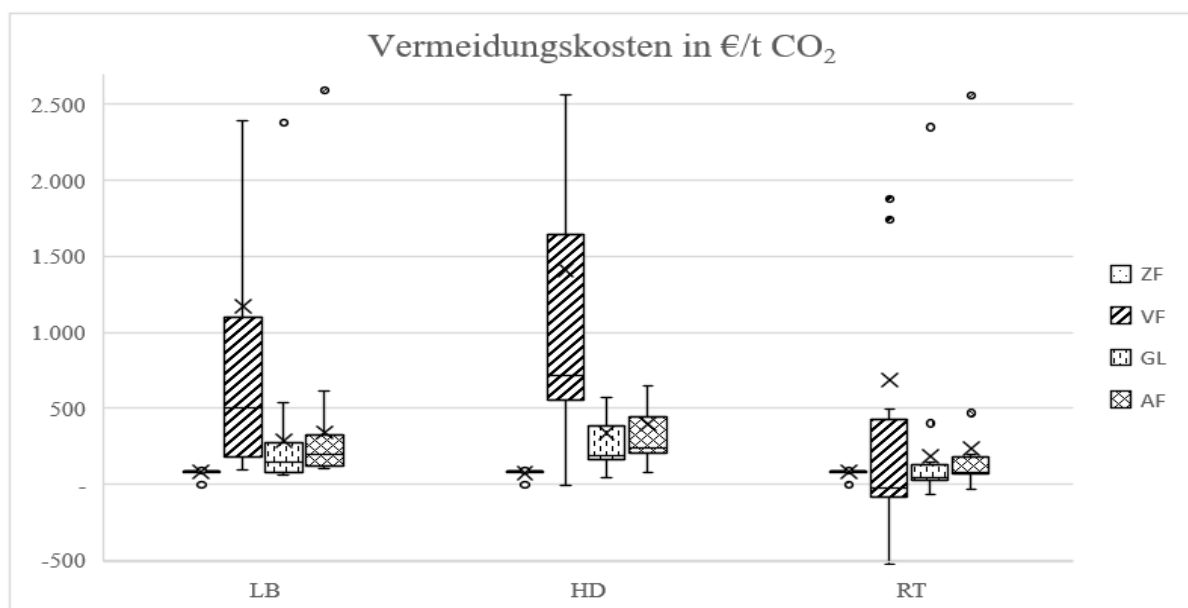


Abbildung 2 zeigt, dass durch die Etablierung der Maßnahmen für den überwiegenden Teil der betrachteten Fruchtfolgen in den Landkreisen LB, HD und RT z. T. erhebliche Vermeidungskosten entstehen. RT hat jedoch das Potenzial bei bestimmten Basisfruchtfolgen, für alle Maßnahmen auch Vermeidungsgewinne zu erzielen. Zudem fallen hier die Vermeidungskosten mit max. 497 €/t CO₂ vergleichsweise gering aus. Parallel zu den DB-Veränderungen liegen auch die Vermeidungskosten für LB niedriger als in HD, jedoch deutlich höher als dieselben in RT. Die aus Abbildung 1 gewonnenen Erkenntnisse scheinen sich in Bezug auf die Höhe der Vermeidungskosten in Abbildung 2 umzukehren. Vergleicht man die Maßnahmen untereinander, so verursacht die Verbesserung der Fruchtfolgen eine extreme Schwankungsbreite der Vermeidungskosten von 2.567 (HD) bis -521 €/t CO₂ (RT), während die Vermeidungskosten für Grünland mit 572 (HD) und -61 €/t CO₂ (RT) und Agroforst mit 613 (LB) bis -30 €/t CO₂ (RT) deutlich geringer ausfallen. Dieser Umstand ist auf die unterschiedliche Effizienz bzw. Effektivität der Maßnahmen zurückzuführen. Während die Umwandlung von Acker- und extensives Dauergrünland hohe DB-Veränderungen verursacht, relativieren sich die Vermeidungskosten der Maßnahme aufgrund des hohen C-Sequestrierungspotentials. Die Verbesserung der Fruchtfolgen wiederum verursacht geringere DB-Veränderungen, muss aber aufgrund des sehr geringen C-Sequestrierungspotentials von 0,03-0,04 t C/(ha*a) auf einer breiten Fläche etabliert werden und verursacht so insbesondere bei Gemüsebaufruchtfolgen immense Vermeidungskosten.

5 Diskussion und Schlussfolgerung

5.1 Diskussion der Ergebnisvalidität

Der vorliegende Beitrag soll eine Einordnung von zwei Aspekten im Bereich des neuen Geschäftsfelds des Carbon Farming beleuchten. Dieses ist zum einen die Einordnung der Kriterienkonformität ausgewählter und für die C-Sequestrierung im Landnutzungssektor relevanter Maßnahmen im Kontext der Zertifizierbarkeit. Zum anderen die Analyse der Wirtschaftlichkeit der Maßnahmen aus der Sicht der landwirtschaftlichen Produktion, aber auch im Kontext der gesamtwirtschaftlichen Vorzüglichkeit in Form der CO₂-Vermeidungskosten im Vergleich zu anderen hier nicht beleuchteten Maßnahmen, die potentiell klimawirksam sind. Hierzu zählt die in Bezug auf den Klimaschutz äußerst wirkungsvolle Wiedervernässung von Moorböden (BIANCHI et al. 2021), welche jedoch an landwirtschaftlich genutzte Moorstandorte gebunden und daher nicht flächendeckend bzw. insbesondere in den ausgewählten Kreisen RT und LB nicht anwendbar ist (LUBW 2021). Zudem sind viele Moorschutzprojekte bereits unter anerkannten Standards wie MoorFutures, Max.Moor und Peatland Code zertifiziert. Ebenfalls ausgeschlossen wurden die Maßnahmen „Unterlassen des Verbrennens von Ernteresten“, da dies in Deutschland gesetzlich verboten ist (§ 7 AgrarZahlVerpflV). Auch der Verzicht auf Bodenbearbeitung ist nicht relevant, da dieser Maßnahme häufig unterstellt wird, dass sie nicht zu einer Akkumulation sondern lediglich zu einer Umverteilung von organischem Kohlenstoff im Boden führt (z.B. BAKER et al. 2007). Der Verbleib von Ernteresten wiederum wird als weniger klimaschutzwirksam angesehen als deren energetische Nutzung, weshalb auch diese von einer engeren Betrachtung ausgeschlossen wurden (POWLSON et al. 2008).

Des Weiteren basiert die Bewertung der Kriterien teilweise auf Annahmen, für deren Nachweis weitere Forschungsarbeit notwendig ist. So könnten durch die Integration aller Maßnahmen Leakage-Effekte entstehen, auch wenn diese im vorliegenden Beitrag als nicht erkennbar gewertet wurden, da sie methodisch nicht einzuordnen waren und auch insgesamt schwer zu erfassen sind (THAMO UND PANNELL 2016). Auch die Verschiebung des Anbauspektrums durch die Integration von Zwischenfrüchten hin zu Sommerungen ist nicht durch Studien belegbar. Sollte dies der Fall sein, könnten damit aber Nahrungsmittelverluste einhergehen, da Sommerungen im Vergleich zu Winterungen durchschnittlich geringere Erträge erzielen (vgl. STATISTISCHES BUNDESAMT 2019).

Darüber hinaus kann der Anbau von Zwischenfrüchten entgegen der hier vorgenommenen Bewertung gesetzlich vorgeschrieben sein und wäre in manchen Fällen nicht als zusätzlich zu werten (§ 13a Abs. 2 der DüV 2020). Ebenso besteht laut Wasserrahmenrichtlinie Anspruch auf Förderung von Zwischenfrüchten in Wasserschutzgebieten. Die Fruchtfolgendiversifizierung ist ebenso wie Grünland nur förderfähig, wenn diese mindestens 5-gliedrig ist bzw. dieses extensiv bewirtschaftet wird (Anl. 5 Abs. 2 und Anl. 4 Nr. 4 GAPDZV). Da es aber derzeit keine Instanz gibt, die die Doppelförderung, d.h. Bezug von Prämien sowie privatwirtschaftlicher Finanzfördermittel für denselben Klimaschutznutzen verhindert, wurde in diesem Beitrag davon ausgegangen, dass grundsätzlich beide Fördermöglichkeiten in Anspruch genommen werden könnten. Grundsätzlich schmälert die Doppelförderung nicht die Klimawirksamkeit einer Maßnahme, beeinflusst aber deren Kostenwirksamkeit: Für den/die einzelne LandwirtIn wird die Umsetzung der Maßnahme dadurch attraktiver, während sie aus volkswirtschaftlicher Sicht ineffizienter wird, da diese Mittel zur Finanzierung weiterer Klimaschutzmaßnahmen fehlen.

Die Ermittlung des C-Sequestrierungspotentials erfolgte nicht standortspezifisch, sondern auf Basis der in WIESMEIER ET AL. (2020) für Bayern errechneten Werte, die wiederum selbst auf Meta-Analysen beruhen. Das Bindungsvermögen eines Standortes ist sehr stark variabel und von einer Vielzahl von Faktoren abhängig, wie die Bodenzustandserhebung Landwirtschaft zeigt (JACOBS et al. 2018). Das Sequestrierungspotential könnte daher für die jeweiligen Standorte höher oder niedriger liegen, wodurch sich die Kostenstruktur der Maßnahmen verändern

könnten. Zudem erfolgen Humusauf- und -abbau als nichtlineare Größen und die Effektivität des C-Eintrags sinkt über die Jahre bzw. zur Aufrechterhaltung der Akkumulationsintensität wird mit anhaltender Dauer eine höhere Zufuhr notwendig (POEPLAU et al. 2011; CHENU et al. 2019). Erkenntnisse aus JACOBS et al. 2018 und BONARES-ZENTRUM FÜR BODENFORSCHUNG 2020 weisen darauf hin, dass sich Humusgehalte einem Fließgewicht nähern, sodass der jährliche zusätzliche C-Eintrag in Form von Humusaufbau tendenziell sinkt und die Vermeidungskosten im Verlauf der Jahre steigen. Diese Umstände wurden jedoch vor dem Hintergrund vernachlässigt, dass zunächst eine Größenordnung für zu erwartende DB-Veränderungen und Vermeidungskosten ermittelt werden sollte, die in weiteren Forschungsarbeiten zu spezifizieren ist. Dennoch sind die vorgenommenen, vereinfachenden Annahmen geeignet, grundsätzliche Trends abzubilden. Diese zeigen eindrücklich, dass die Etablierung solcher C-Sequestrierungsmaßnahmen vor dem Hintergrund des Zertifikatehandels bis auf wenige Ausnahmen weder rentabel sind, noch den Ansprüchen anerkannter Zertifizierungsstandards genügen können und daher in dieser Form nicht als Klimaschutz- oder Kompensationsmaßnahme geeignet sind.

5.2 Einordnung der Ergebnisse zu anderen THG-Minderungsmaßnahmen im Landwirtschaftssektor und Schlussfolgerungen

Im Vergleich zu anderen Klimaschutzmaßnahmen in der Landwirtschaft liegen die Vermeidungskosten für die Maßnahmen Zwischenfruchtanbau, vielfältige Fruchtfolgen, Umwandlung von Acker- zu extensivem Dauergrünland und Agroforst in einem mittleren bis hohen Bereich. Eine Studie zur Kalkulation von Vermeidungskosten durch Moorschutz in Süddeutschland errechnete durchschnittliche Vermeidungskosten zwischen 22 und 92 €/t CO₂ (KRIMLY et al. 2016). Die durchschnittlichen Vermeidungskosten der betrachteten Maßnahmen des vorliegenden Beitrags variieren je nach Standort zwischen 88 und 1.408 €/t CO₂ und liegen damit um bis zu 64-mal höher als die Vermeidungskosten durch Moorschutz. Die Senkung der Stickstoffüberschüsse in der Landwirtschaft etwa durch angepasste Düngetechnik oder reduziertem Düngereinsatz würde Vermeidungskosten in Höhe von 150 €/t CO₂-Äquivalente für die THG-Emissionen in der Landwirtschaft bzw. 100 €/t CO₂-Äquivalente unter Berücksichtigung der Emissionsminderung bei der Düngerproduktion verursachen (THÜNEN-INSTITUT 2019). Alle im Beitrag betrachteten Maßnahmen ließen sich bis zu einem gewissen Grad und in Abhängigkeit der Fruchtfolge in diesem Rahmen umsetzen, auf einem Großteil der Fläche würden aber höhere Vermeidungskosten anfallen. Für die Ausweitung des ökologischen Landbaus belaufen sich diese unter Berücksichtigung der THG-Wirkung des Humusaufbaus auf ca. 140 €/t CO₂-Äquivalente, könnten aber unter Einbezug der Leakage-Effekte bis zu 410 €/t CO₂-Äquivalente betragen (THÜNEN-INSTITUT 2019) und liegen damit in einem mittleren Bereich im Vergleich zu den hier betrachteten Maßnahmen. Allerdings könnten durch die teilweise Etablierung der Maßnahmen bereits nicht unerhebliche Mengen CO₂ eingespart werden. Würde das gesamte, additive Sequestrierungspotential zu Vermeidungskosten in Höhe von bis zu 100 €/t CO₂ berücksichtigt werden, könnten insgesamt 42.529 t CO₂ sequestriert werden. Dabei entfielen ein Anteil von 11.462 t auf Agroforst, 3.479 t auf Grünland und 27.577 t CO₂ auf Zwischenfrüchte. Der vorliegende Beitrag verdeutlicht, dass eine Förderung allein durch die derzeit üblichen Zertifikatspreise von 30 bis 60 €/t CO₂ (z.B. Humusprojekt Ökoregion Kaindorf, CO₂-Land) nicht ausreichen, um die entstehenden Vermeidungskosten zu decken, insbesondere vor dem Hintergrund, dass keine der betrachteten Maßnahmen die Anforderung an relevante Zertifizierungskriterien vollständig erfüllen kann. Wir erachten daher die Etablierung von C-Sequestrierungsmaßnahmen in der Landwirtschaft zum Zwecke der THG-Emissionskompensation sowohl aus ökonomischer als auch aus rechtlicher Perspektive als fragwürdig, sofern dieses Urteil anhand von lediglich drei exemplarischen Landkreisen Baden-Württembergs getroffen werden kann. Gleichwohl bilden diese eine große Bandbreite der landwirtschaftlichen Nutzung Deutschlands ab. Eine staatliche und/oder privatwirtschaftliche Förderung kann nur dann angezeigt sein, wenn weitere positive Externalitäten wie z. B. verminderte Erosion, verbesserte

Nährstoffexploration und erhöhte Biodiversität mit den skizzierten Maßnahmen berücksichtigt würden, die im Rahmen dieser Studie nicht gemessen wurden. Dafür sind im Rahmen weiterer Forschungsarbeiten komplexere Ökosystemmodelle erforderlich.

Literaturverzeichnis

- ADETUNJI, A. T.; NCUBE, B.; MULIDZI, R.; LEWU, F. B. (2020): Management impact and benefit of cover crops on soil quality: A review. In: *Soil and Tillage Research* 204, S. 104717. DOI: 10.1016/j.still.2020.104717.
- AMI (2019; 2020; 2021): Verkaufspreise für Grundfutter. In: *Bauernzeitung* 60; 61; 62 (several editions).
- BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. (2007): Tillage and soil carbon sequestration—What do we really know? In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 118 (1-4), S. 1–5. DOI: 10.1016/j.agee.2006.05.014.
- BENGTSSON, J.; BULLOCK, J. M.; EGOH, B.; EVERSON, C.; EVERSON, T.; O'CONNOR, T. ET AL. (2019): Grasslands-more important for ecosystem services than you might think. In: *Ecosphere* 10 (2), e02582. DOI: 10.1002/ecs2.2582.
- BIANCHI, A.; LARMOLA, T.; KEKKONEN, H.; SAARNIO, S.; LÅNG, K. (2021): Review of Greenhouse Gas Emissions from Rewetted Agricultural Soils. In: *Wetlands* 41 (8). DOI: 10.1007/s13157-021-01507-5.
- BOLINDER, M. A.; KÄTTERER, T.; ANDRÉN, O.; PARENT, L. E. (2012): Estimating carbon inputs to soil in forage-based crop rotations and modeling the effects on soil carbon dynamics in a Swedish long-term field experiment. In: *Can. J. Soil. Sci.* 92 (6), S. 821–833. DOI: 10.4141/CJSS2012-036.
- BONARES-ZENTRUM FÜR BODENFORSCHUNG (HG.) (2020): CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. Online verfügbar unter https://literatur.thuenen.de/digbib_extern/dn062163.pdf, zuletzt geprüft am 30.10.2021.
- BUNDESUMWELTMINISTERIUM (2021): 17 Nachhaltigkeitsziele – SDGs. Online verfügbar unter <https://bmuv.de/ytu7>, zuletzt aktualisiert am 05.03.2022, zuletzt geprüft am 05.03.2022.
- CHENU, C.; ANGERS, D. A.; BARRÉ, P.; DERRIEN, D.; ARROUAYS, D.; BALESSENT, J. (2019): Increasing organic stocks in agricultural soils: Knowledge gaps and potential innovations. In: *Soil and Tillage Research* 188, S. 41–52. DOI: 10.1016/j.still.2018.04.011.
- CIAIS, P.; SABINE, C.; BALA, G.; BOPP, L.; BROVKIN, V.; CANADELL, J.; CHHABRA, A.; DEFRIES, R.; GALLOWAY, J.; HEIMANN, M.; JONES, C.; LE QUÉRÉ, C.; MYNENI, R. B.; PIAO, S.; THORNTON, P. (2013): Carbon and Other Biogeochemical Cycles. In: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. IPCC. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- COWI, ECOLOGIC INSTITUTE UND IEEP (2021): Technischer Leitfaden – Einrichtung und Umsetzung ergebnisbasierter Programme für eine klimaeffiziente Landwirtschaft in der EU. Bericht an die Europäische Kommission, GD Klimapolitik. COWI. Kongens Lyngby (under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007.). Online verfügbar unter <https://ec.europa.eu/4pbr>, zuletzt geprüft am 13.01.2022.
- DON, A.; FLESSA, H.; MARX, K.; POEPLAU, C.; TIEMEYER, B.; OSTERBURG, B. (2018): die 4-Promille-Initiative "Böden für Ernährungssicherung und Klima" - Wissenschaftliche Bewertung und Diskussion möglicher Beiträge in Deutschland. Thünen Working Paper 112. Online verfügbar unter <https://Thuenen-Institut.de/xuuq>, zuletzt geprüft am 02.11.2021.
- GOLD STANDARD (HG.) (2021): Gold Standard. GSF Registry. Online verfügbar unter <https://registry.goldstandard.org/projects?q=&page=1>, aktualisiert 30.11.2021, zuletzt geprüft 11.01.2022.
- GU, J.; YUAN, M.; LIU, J.; HAO, Y.; ZHOU, Y.; QU, D.; YANG, X. (2017): Trade-off between soil organic carbon sequestration and nitrous oxide emissions from winter wheat-summer maize rotations: Implications of a 25-year fertilization experiment in Northwestern China. In: *The Science of the total environment* 595, S. 371–379. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2017.03.280.

- GUBLER, A.; WÄCHTER, D.; SCHWAB, P.; MÜLLER, M.; KELLER, A. (2019): Twenty-five years of observations of soil organic carbon in Swiss croplands showing stability overall but with some divergent trends. In: *Environmental monitoring and assessment* 191 (5), S. 277. DOI: 10.1007/s10661-019-7435-y.
- JACOBS, A.; FLESSA, H.; DON, A. (2018): Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland. Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Braunschweig, Germany: Thünen-Institut (Thünen-Report, 64). Online verfügbar unter <https://Thuenen-Institut.de/uq6f>, zuletzt geprüft 08.11.2021.
- KELL, D. B. (2012): Large-scale sequestration of atmospheric carbon via plant roots in natural and agricultural ecosystems: why and how. In: *Philosophical transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological sciences* 367 (1595), S. 1589–1597. DOI: 10.1098/rstb.2011.0244.
- KNUTH, ULRIKE; AMJATH-BABU, T. S.; KNIERIM, ANDREA (2018): Adoption of Farm Management Systems for Cross Compliance - An empirical case in Germany. In: *Journal of environmental management* 220, S. 109–117. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.04.087.
- KRIMLY, T.; ANGENENDT, E.; BAHRS, E.; DABBERT, S. (2016): Global warming potential and abatement costs of different peatland management options: A case study for the Pre-alpine Hill and Moorland in Germany. In: *Agricultural Systems* 145, S. 1–12. DOI: 10.1016/j.agsy.2016.02.009.
- KTBL (2021): Leistungs-Kostenrechnung-Pflanzenbau. Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e. V. Online verfügbar unter bit.ly/3rSMwKx, zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- LEIFELD, J.; MÜLLER, A.; STEFFENS, M. (2019): Kriterien für die Zertifizierung von Kohlenstoff-senken in Landwirtschafts-böden. In: *Agrarforschung Schweiz* 10 (9), S. 346–349. Online verfügbar unter <https://Agrarforschung-Schweiz.de/uw6f>.
- LEL (2021): Kalkulationsdaten Marktfrüchte - konventioneller und Ökologischer Landbau. Landesanstalt für Land-wirtschaft, Ernährung und Ländlichen Raum. Schwäbisch Gmünd. Online verfügbar unter bit.ly/3rSPNJW, zuletzt aktualisiert am 2021, zuletzt geprüft am 02.03.2022.
- LFL (2021): LfL Deckungsbeiträge und Kalkulationsdaten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Online verfügbar unter bit.ly/3HODQdP, zuletzt geprüft am 31.01.2022.
- LUBW (2021): Moorkarte Baden-Württemberg. Online verfügbar unter <https://udo.lubw.baden-wuerttemberg.de/xlbe>, zuletzt aktualisiert am 03.03.2022, zuletzt geprüft am 03.03.2022.
- LÜTZOW, M. V.; KÖGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; MATZNER, E.; GUGGENBERGER, G.; MARSCHNER, B.; FLESSA, H. (2006): Stabilization of organic matter in temperate soils: mechanisms and their relevance under different soil conditions - a review. In: *European Journal of Soil Science* 57 (4), S. 426–445. DOI: 10.1111/j.1365-2389.2006.00809.x.
- MARTINEAU, H.; WILTSHIRE, J.; WEBB, J.; HART, K.; KEENLEYSIDE, C.; BALDOCK, D. ET AL. (2016): Effective performance of tools for climate action policy - meta-review of Common Agricultural Policy (CAP) (40202/2014/688088/SER/CLIMA.A.2).
- MAYER, S.; WIESMEIER, M.; SAKAMOTO, E.; HÜBNER, R.; CARDINAEL, R.; KÜHNEL, A.; KÖGEL-KNABNER, I. (2022): Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 323, S. 107689. DOI: 10.1016/j.agee.2021.107689.
- OLLINAHO, O. I.; KRÖGER, M. (2021): Agroforestry transitions: The good, the bad and the ugly. In: *Journal of Rural Studies* 82, S. 210–221. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2021.01.016.
- PLAN VIVO (HG.) (2022): Plan Vivo Foundation. Projects. Online verfügbar unter <https://www.planvivo.org/Pages/Category/projects?Take=27>, aktualisiert 11.01.2022, zuletzt geprüft 11.01.2022.
- POEPLAU, C.; DON, A. (2015): Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 200, S. 33–41. DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.024.
- POEPLAU, C.; DON, A.; VESTERDAL, L.; LEIFELD, JENS; VAN WESEMAEL, B. A.S.; Schumacher, J.; Gensior, Andreas (2011): Temporal dynamics of soil organic carbon after land-use change in the temperate zone - carbon response functions as a model approach. In: *Glob Change Biol* 17 (7), S. 2415–2427. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2011.02408.x.

- POWLSON, D. S.; RICHE, A. B.; COLEMAN, K.; GLENDINING, M. J.; WHITMORE, A. P. (2008): Carbon sequestration in European soils through straw incorporation: limitations and alternatives. In: *Waste management (New York, N.Y.)* 28 (4), S. 741–746. DOI: 10.1016/j.wasman.2007.09.024.
- PUUPPONEN, A.; LONKILA, A.; SAVIKURKI, A.; KARTTUNEN, K.; HUTTUNEN, S.; OTT, A. (2022): Finnish dairy farmers' perceptions of justice in the transition to carbon-neutral farming. In: *Journal of Rural Studies* 90, S. 104–112. DOI: 10.1016/j.jrurstud.2022.01.014.
- SCHÖNHART, M.; SCHMID, E.; SCHNEIDER, U. A. (2011): CropRota – A crop rotation model to support integrated land use assessments. In: *European Journal of Agronomy* 34 (4), S. 263–277.
- SIEBERT, S.; EWERT, F. (2012): Spatio-temporal patterns of phenological development in Germany in relation to temperature and day length. In: *Agricultural and Forest Meteorology* 152, S. 44–57. DOI: 10.1016/j.agrformet.2011.08.007.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2019): Wachstum und Ernte -Feldfrüchte - Fachserie 3 Reihe 3.2.1 - August/September 2019. Online verfügbar unter <https://destatis.de/v4og>, zuletzt geprüft 12.03.2022.
- STATISTISCHES BUNDESAMT (2021B): Dauergrünland nach Art der Nutzung im Zeitvergleich. Online verfügbar unter <https://destatis.de/m413>, aktualisiert 22.11.2021, zuletzt geprüft 06.03.2022.
- STATISTISCHES LANDESAMT BADEN-WÜRTTEMBERG (2020): Hektarerträge der Feldfrüchte seit 1988 - 2020. Online verfügbar unter <https://statistik-bw.de/ssdt>, zuletzt geprüft am 05.03.2022.
- STEFANO, A. DE; JACOBSON, M. (2018): Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. In: *Agroforestry Systems*, 92, S. 285–299.
- THAMO, T.; PANNELL, D. J. (2016): Challenges in developing effective policy for soil carbon sequestration: perspectives on additionality, leakage, and permanence. In: *Climate Policy* 16 (8), S. 973–992. DOI: 10.1080/14693062.2015.1075372.
- THÜNEN-INSITUT (2019): Folgenabschätzung für Maßnahmenoptionen im Bereich Landwirtschaft und landwirtschaftliche Landnutzung, Forstwirtschaft und Holznutzung zur Umsetzung des Klimaschutzplans 2050. Thünen Working Paper 137
- UMWELTBUNDESAMT (HG.) (2015): Aktualisierte Analyse des deutschen Marktes zur freiwilligen Kompensation von Treibhausgasemissionen. adelphi; sustainable. Online verfügbar unter <https://umweltbundesamt.de/cim7>, zuletzt geprüft am 11.01.2022.
- UNGER, M. VON; EMMER, I.; JOOSTEN, H.; COUWENBERG, J. (2018): Designing an International Peatland Carbon Standard: Criteria, Best Practices, and Opportunities. Hg. v. German Environment Agency. Online verfügbar unter <https://umweltbundesamt.de/j6od>, zuletzt geprüft 31.01.2022.
- VERIFIED CARBON STANDARD (HG.) (2021): REGISTRY - VERIFIED CARBON STANDARD. Verra Search Page. Online verfügbar unter <https://registry.verra.org/app/search/VCS/All%20Projects>, zuletzt aktualisiert am 16.12.2021, zuletzt geprüft am 11.01.2022.
- WEN, Y.; FREEMAN, B.; HUNT, D.; MUSARIKA, S.; ZANG, H.; MARSDEN, K. A. et al. (2021): Livestock-induced N₂O emissions may limit the benefits of converting cropland to grazed grassland as a greenhouse gas mitigation strategy for agricultural peatlands. In: *Resources, Conservation and Recycling* 174, S. 105764. DOI: 10.1016/j.resconrec.2021.105764.
- WIESMEIER, M.; HÜBNER, R.; BARTHOLD, F.; SPÖRLEIN, P.; GEUB, U.; HANGEN, E. et al. (2013): Amount, distribution and driving factors of soil organic carbon and nitrogen in cropland and grassland soils of southeast Germany (Bavaria). In: *Agriculture, Ecosystems & Environment* 176, S. 39–52. DOI: 10.1016/j.agee.2013.05.012.
- WIESMEIER, M.; MAYER, S.; BURMEISTER, J.; HÜBNER, R.; KÖGEL-KNABNER, I. (2020): Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. In: *Geoderma* 369, S. 114333. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114333.
- ZINNGREBE, YVES; PE'ER, GUY; SCHUELER, STEFAN; SCHMITT, JONAS; SCHMIDT, JENNY; LAKNER, SEBASTIAN (2017): The EU's ecological focus areas – How experts explain farmers' choices in Germany. In: *Land Use Policy* 65, S. 93–108. DOI: 10.1016/j.landusepol.2017.03.027