



Berichte über Landwirtschaft

Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft

BAND 100 | Ausgabe 2

Agrarwissenschaft
Forschung

Praxis

Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft?! Potentiale, Erfassung und Handlungsempfehlungen

Von Rico Hübner, Christian Böhm, Georg Eysel-Zahl, Wolfram Kudlich, Ernst Kürsten, Norbert Lamersdorf, Christoph A. Meixner, Christopher Morhart, Tobias Peschel, Penka Tsonkova, Martin Wiesmeier

Abkürzungen

AFS	-	Agroforstsystem(e)
AUKM	-	Agrarumwelt- und Klimamaßnahmen
BMEL	-	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
C	-	Kohlenstoff (Carbon)
C _{org}	-	Organischer Kohlenstoff
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
CO _{2eq}	-	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent
C/N	-	Kohlenstoff-Stickstoff Verhältnis
EUETS	-	<i>EU Emissions Trading Systems</i>
FaST	-	EU-supported digital service platform for farmers
F2F	-	<i>Farm-to-Fork-Strategie</i>
GAPDZG	-	GAP-Direktzahlungen-Gesetz
GAPDZVO	-	GAP-Direktzahlungen-Verordnung
InVeKoS	-	Integriertes Verwaltungs- und Kontroll-System
IPCC	-	<i>The Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
LER	-	<i>Land Equivalent Ratio</i>
LPIS	-	<i>Land Parcel Identification System</i>
N ₂ O	-	Distickstoffmonoxid (Lachgas)
PSM	-	Pflanzenschutzmittel
t _{atro}	-	Tonne Trockenmasse (Wassergehalt=0%)
THG	-	Treibhausgas(e)
TLS	-	terrestrisches Laserscanning

Präambel

Mit Blick auf die zusätzliche Speicherung von CO₂ aus der Atmosphäre zielt das vorliegende Positionspapier „Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft?!“ auf die Beantwortung der Frage, welche Potentiale die Landnutzungsform Agroforstwirtschaft unter einer gezielten Erfassung und Förderung als Klimaschutzmaßnahme bieten kann.

Dieses Grundlagenpapier richtet sich an die verschiedenen Akteure, die sich der gezielten Kohlenstoffspeicherung durch agroforstwirtschaftliche Methoden widmen bzw. sich mit der Entwicklung von Planungs-, Mess- und Honorierungsansätzen im Rahmen einer Zertifizierung befassen.

Für die Bewertung der Möglichkeiten und Herausforderungen von Zertifikaten für die Anlage und die Erhaltung von Agroforstsystemen (AFS) wird dabei ein interdisziplinärer Ansatz verfolgt. Die Vielfalt der AFS bildet hierbei eine Brücke zwischen Fachdisziplinen und war Grundlage der Zusammenstellung des Autorenkollektivs aus Wissenschaft, Verwaltung und Praxis. Die Expertenbewertung wurde nach den derzeit verfügbaren Erkenntnissen erstellt und stellt die aktuelle Sicht des Deutschen Fachverbandes für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V. dar.

Aufgrund der dynamischen Weiterentwicklung des Themas „Kohlenstoffzertifizierung“ in der Landnutzung wird das Positionspapier in Zukunft fortgeschrieben. Aus diesem Grund können die AutorInnen sowie der DeFAF e.V. für die Aktualität, Richtigkeit und Vollständigkeit der Angaben keine Gewähr übernehmen.

Einleitung

Die EU hat sich im Rahmen des europäischen Green Deals das Ziel gesetzt, bis 2050 die Klimaneutralität zu erreichen. Das zwischenzeitliche Klimaziel wurde daraufhin erhöht und die Emissionen sind bis 2030 um mindestens 55% zu senken. Diverse Maßnahmen im Bereich THG Netto Einsparung im Landnutzungssektor sind in diesem „Fit for 55“ Gesamtpaket vorgesehen. Die Agroforstwirtschaft wird schon lange als eine geeignete Klimaschutz- und Anpassungsstrategie in der Landnutzung gesehen (Nair 2012) und rückt im Kontext von „Carbon Farming“ aktuell wieder verstärkt in den Fokus. Agroforstsysteme bieten die Chance, durch die vermehrte Speicherung von Kohlenstoff, einen aktiven Beitrag zum Klimaschutz im Landnutzungssektor zu leisten. International wird in der Agroforstwirtschaft als Klimaschutzinstrument ein großes Potential zur Kompensation von Treibhausgasen (THG) gesehen. Das IPCC erwähnt in ihrem Sonderbericht „Klimawandel und Landsysteme“ den Begriff Agroforstwirtschaft sehr prominent an mehr als 200 Stellen und sieht in dieser Form der Landnutzung eine vielversprechende Option im Kampf gegen die Klimakrise und in der Anpassung an deren Auswirkungen (IPCC 2019).

Neben dem Klimaschutz wird die Agroforstwirtschaft als eine der 15 Komponenten der Mehrgewinnstrategien für den Agrarsektor im Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) „Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration“ gelistet (WBGU 2020).

Auf die Agrarpolitik in Deutschland bezogen wird der Agroforstwirtschaft bisher noch vergleichsweise wenig Aufmerksamkeit geschenkt. Im Gutachten des Wissenschaftlichen Beirats Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz (WBAE) beim BMEL (WBAE 2019) „Zur effektiven Gestaltung der Agrarumwelt- und Klimaschutzpolitik im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU nach 2020“ wird die Agroforstwirtschaft nicht erwähnt. Auch die Zukunftscommission attestiert lediglich Forschungsbedarf (Zukunftscommission Landwirtschaft 2021). Zwar wurden mit den Bundestags- und Bundesratsbeschlüssen die politischen Weichen gestellt, die Umsetzungsstrategien auf Bundes- und Landesebene sind teilweise jedoch noch im Aufbau. Allerdings ist davon auszugehen, dass im Zuge der Verabschiedung der EU-Verordnung zum *Carbon Farming* (COWI et al. 2021, McDonald et al. 2021, Nyssens 2021), die Entwicklungen in diesem Bereich auch in Deutschland verbindlicher werden. Bereits jetzt wird die Agroforstwirtschaft von der EU Kommission und EU Parlament in der Revision der LULUCF Regelungen vom 08. Juni 2022 an erster Stelle geeigneter Maßnahmen genannt (Änderungsantrag Nr. 24), insbesondere aufgrund der positiven Effekte bezüglich der Biodiversität (Nr. 28) und daher auch „priorisiert“ werden (Nr. 57) (European Parliament 2022).

Der entscheidende Vorteil der Agroforstwirtschaft gegenüber anderen diskutierten Klimaschutzstrategien in der Landnutzung ist die Permanenz des Systems, d.h. die Dauerhaftigkeit der Veränderungen, was sie für die langfristige Speicherung von Kohlenstoff „C“ verlässlicher macht als sonstige Acker- oder Grünlandmaßnahmen (Jacobs et al. 2020). Bäume, Hecken, Sträucher, quasi das Gesamtsystem, sind auf Zeiträume von 20 Jahren und länger ausgelegt, ohne dass diese Flächen aus der Nutzung genommen werden müssen. Als Form der produktiven und zugleich nachhaltigen Landnutzung helfen agroforstliche Praktiken der Natur, sparen Ressourcen und sind Gestaltungselement für eine lebenswerte Umwelt.

Als Klimaschutzmechanismus steht die Senkenfunktion durch den Entzug von CO₂ aus dem globalen Kohlenstoffkreislauf und die mittel- bis langfristige Festlegung als Kohlenstoff im Boden und der in der Biomasse im Vordergrund. Grundsätzlich wird dabei in C-Vorräte (*carbon stocks*), d.h. der im AFS zu einem bestimmten Zeitpunkt gespeicherte Kohlenstoff (Vorrat; erfasst in Tonnen pro Hektar) und in C-Sequestrierung unterschieden (Speicherleistung; erfasst in Tonnen pro Hektar und Jahr).

C-Sequestration kann laut IPCC (2007) als die Aufnahme verschiedener Substanzen, die Kohlenstoff enthalten, insbesondere CO₂, in ein anderes Reservoir mit längerer Verweildauer verstanden werden.

Im bodenwissenschaftlichen Kontext bezeichnet der Begriff C-Sequestrierung die langfristige Festlegung von CO₂ im Boden (Lorenz et al. 2014). Diese Langfristigkeit der C-Bindung – über Jahrhunderte oder Jahrtausende – stellt gegenüber einer eher temporären Akkumulation (z.B. Blattstreu) oder einer Verschiebung von einem in ein anderes C-Reservoir einen qualitativen Unterschied dar. Allerdings sind mit dem Auftauen des Permafrostbodens im Hohen Norden und in den Hochgebirgen, sowie der allgegenwärtigen Zunahme der C-Mineralisation aufgrund der Temperaturerhöhung und Ertragsstagnation (Wiesmeier et al. 2015) fraglich, inwiefern eine Langfristigkeit in Zeiten der Klimakrise generell gegeben ist. Ein temporärer Entzug von C aus der Atmosphäre leistet zumindest für diesen Zeitabschnitt einen Beitrag zur Verminderung der C-Konzentration in der Atmosphäre und damit einen temporären Beitrag zum Klimaschutz. Dieser Beitrag verlängert sich insofern die Landnutzung langfristig darauf ausgerichtet wird. Es hat sich daher etabliert, von C-Sequestrierung zu sprechen, sobald ein Beitrag zum Klimaschutz geleistet wird (Powlson et al. 2011).

Hinsichtlich der Quantifizierbarkeit des C-Speicherpotentials der Agroforstwirtschaft bestehen allerdings noch weitere Herausforderungen in der Wirkungsabschätzung. Je nach Gestaltung der AFS, im Hinblick auf u. a. Bodentyp, Klimazone oder Agroforstsystemtyp (z.B. silvo-pastorales System, silvo-arables System), sind die Schwankungsbreiten enorm (Hübner et al. 2021a). In Europa liegen die jährlichen Sequestrierungsraten zwischen 0,09 t C je Hektar für Dehesa-Systeme – eine extensives traditionelles agro-silvo-pastorales Agroforstsystem in Spanien mit 25-50 Steineichen je Hektar, Beweidung und gelegentlichem Ackerbau – und 7,3 t C für die vergleichsweise intensive Stammholzproduktion mit 200 Pappeln je Hektar (Kay et al. 2019). Dies entspricht einer Menge von 0,3 bis 26,8 t CO₂ je Hektar und Jahr. Nachdem die Agroforstwirtschaft allerdings noch vergleichsweise wenig in Europa verbreitet ist, ergeben sich durch die vermehrte Etablierung von AFS auf dafür geeigneten Flächen enorme Potentiale zum Klimaschutz. Aertsens et al. (2013) schätzen das Minderungspotential neu angelegter AFS in der EU auf 1,5 Mrd. t CO₂-Äquivalente. Weltweit betrachtet veranschlagt Hawken (2017) in seinem viel beachteten Werk „*Carbon Drawdown*“ das Minderungspotential auf 80 Mrd. t CO₂-Äquivalente bis 2050.

In der gegenwärtig praktizierten Landwirtschaft stellen AFS – abgesehen von der traditionellen Bewirtschaftung von z.B. Streuobstwiesen, Wallhecken oder Knicks – eine Landnutzungsinnovation dar (Böhm et al. 2020a). Allerdings erfordert die Etablierung von AFS eine langfristige diesbezügliche Auslegung des Betriebskonzeptes. Sie ist mit einer fachgerechten Planung und mit Investitionskosten und späten Kapitalrückflüssen verbunden, was viele Landwirte von diesem Schritt abhält. Eine Möglichkeit, die Investitionskosten der Agroforstwirtschaft zumindest teilweise über den Gesamtzeitraum zu diskontieren, ist die Finanzierung durch die Ausgabe von sog. Klima- bzw. CO₂-Zertifikaten, die sich primär auf den Beitrag zum Klimaschutz stützen. Die Einführung von CO₂-Zertifikaten kann die Betriebe somit finanziell unterstützen und damit die Anlage von AFS wirtschaftlich attraktiver machen,

insbesondere in den ersten Jahren, in denen noch kein finanzieller Rückfluss aus der Investition in die Agroforstwirtschaft erwartet werden kann. Diese Finanzierungsmöglichkeit wird bei der Aufforstung von Wäldern in der Entwicklungszusammenarbeit seit vielen Jahren praktiziert und gewinnt derzeit weiter an Popularität. Klimazertifikate, also Bestätigungen für die Klimawirksamkeit, können auf dem freiwilligen Markt und teilweise auch auf dem Verpflichtungsmarkt gehandelt werden. Dabei erfolgt die Ausstellung der Zertifikate entweder *ex-ante*, als Vorschuss für geplante Emissionsminderungen auf Grundlage einer Planung und Berechnung der zu erwarteten Emissionsminderungen – oder, *ex-post*, nachdem die antizipierten Ziele der Kohlenstoffbindung bzw. Emissionseinsparung erreicht und überprüft wurden (Hartmann et al. 2011).

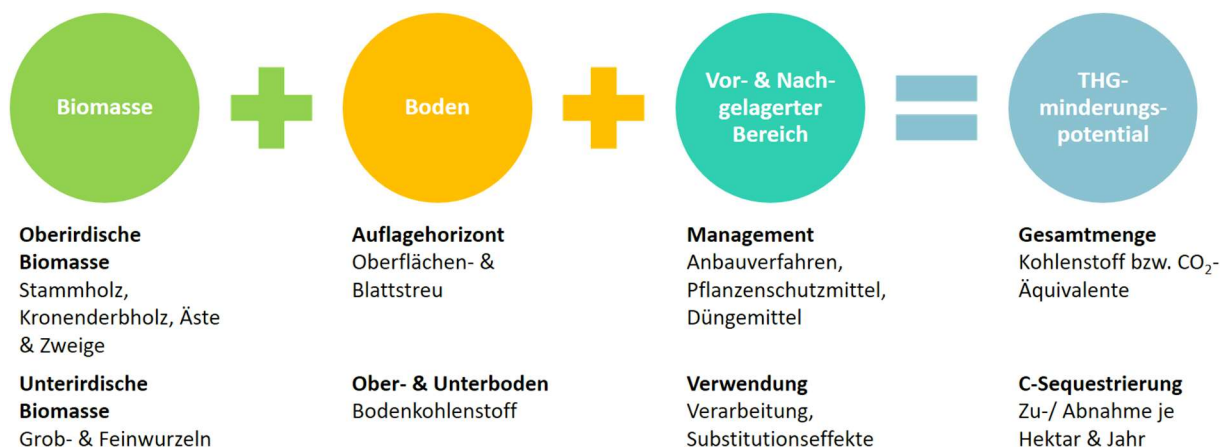


Abbildung 1: Teilbereiche für die Ermittlung von Kohlenstoffgehalten und -minderungspotentialen im Rahmen einer Honorierung durch Zertifizierungssysteme

Klimazertifikate können im Kontext der Agroforstwirtschaft prinzipiell in drei Bereichen zur Anwendung kommen:

- 1) über das Anrechnen von Kohlenstoffspeicherungseffekten in der lebenden Biomasse (ober- und unterirdisch),
- 2) durch den Aufbau von Kohlenstoff im Boden, bspw. durch Streu, Aggregatbildung oder
- 3) im Vor- und nachgelagerten Bereich der Agroforstwirtschaft. Damit ist z.B. die Vermeidung von THG bei der Düngung, die langfristige Speicherung in Holzwerkstoffen, oder die Substitution klimaschädlicher Energieträger gemeint (Abbildung 1).

Aufgrund der Komplexität der Zertifizierung, speziell im Zusammenhang mit den teils sehr unterschiedlichen Herangehensweisen der Zertifizierer, werden zur Bewertung zehn Kriterien näher betrachtet. Diese orientieren sich an einem weltweit etablierten Zertifizierungssystem der Gold Standard Foundation (2021), einem Standardisierungsgremium, das sich bereits seit 2003 für mehr Nachhaltigkeit in den Projekten zur Kohlenstoffemissionsreduktion einsetzt und u.a. vom Umweltbundesamt empfohlen wird (Wolters et al. 2018).

Hintergrund und Einordnung

Signale aus der Politik

Auf Initiative Frankreichs wurde im Rahmen der COP21 in Paris die sog. 4-Promille-Initiative gestartet. Die Logik dahinter ist, dass durch eine jährliche Erhöhung der Kohlenstoffvorräte im Oberboden um 4 Promille, d.h. um 0,4 % pro Jahr, die jährlich anthropogen verursachten THG-Emissionen kompensiert werden könnten (Wiesmeier et al. 2020a). Auch die EU sieht im sogenannten „*Carbon Farming*“ eine geeignete Maßnahme im ambitionierten Plan, die Klimaziele zu erreichen, d.h. einer 55-prozentigen Treibhausgasreduktion bis 2030 im Vergleich zu 1990 (COWI et al. 2021). Dabei wurde am Runden Tisch zum Carbon Farming auch intensiv diskutiert, welchen Teil die Agroforstwirtschaft hierbei leisten kann (European Commission – DG CLIMA 2020). Im Zuge der GAP-Reform 2022 greift die europäische Agrarpolitik das Thema Agroforstwirtschaft ebenso auf, so in der EU Farm-to-Fork-Strategie (F2F), dem „European Green Deal“, und der EU GAP-Strategieplanverordnung. Mit den Bundestags- und Bundesratsbeschlüssen wurden auch in Deutschland fraktionsübergreifend entsprechende Weichen gestellt, die Agroforstwirtschaft zukünftig verstärkt umzusetzen und die Rahmenbedingungen zu verbessern. So ist im nationalen GAP-Strategieplan-Entwurf 2023 bis 2027 die Agroforstwirtschaft einerseits in der 1. Säule als sog. „EcoScheme“ mit einer Flächenprämie von 60€ für den Gehölzflächenanteil vorgesehen. Kombiniert werden soll diese mit der freiwilligen Teilnahme der LandwirtInnen an sog. „Interventionen“, die aus dem Budget der 2. Säule finanziert werden, beispielsweise als Agrar-, Umwelt- und Klimamaßnahme (AUKM) oder als investive Förderung (Hübner 2021). Im finalen Beschluss zum GAP-Direktzahlungen-Gesetzes (GAPDZG) wurde die Öko-Regelung Agroforst auf Grünlandflächen und Dauerkulturflächen erweitert und in der GAP-Direktzahlungenverordnung (GAPDZVO) sowie im nationalen GAP-Strategieplan konkretisiert.

Die Speicherung von Kohlenstoff im Holz und im Boden von Agroforstsystemen und in anderen Feldgehölzen wird im Nationalen Inventar als sogenannte Senke im Sektor für Treibhausgasemissionen aus Landnutzung, Landnutzungsänderungen und Forstwirtschaft (LULUCF) erfasst und somit dem Sektor der Land- und Forstwirtschaft zugeordnet. Zusätzliche Effekte von Agroforstprodukten, wie zum Beispiel die langfristige Kohlenstoffbindung im Bausektor oder die Substitution von fossilen Einsatzstoffen im Energiesektor werden den jeweiligen Sektoren auf nationaler Ebene zugeschlagen. Um Doppelzahlungen zu vermeiden, ist (analog zur Klimaschutzleistung von Wald und Boden) deshalb eine direkte CO₂-Kompensation einzelner Emittenten bzw. der Sektoren (Verkehr, Industrie...) derzeit (noch) nicht möglich. Auch im Europäischen Emissionshandel (EU ETS) können etwaige CO₂-Zertifikate aus hiesigen Agroforstsystemen nicht angerechnet werden.

Die fehlenden direkten Kompensations- und Honorierungsoptionen durch Wald, Boden oder Agroforstwirtschaft sind der Europäischen Kommission bekannt und sollen erst im Rahmen der

anstehenden EU Verordnung zum *Carbon Farming* angegangen werden. Somit beschränken sich Klimazertifikate derzeit lediglich auf den privatwirtschaftlichen Bereich und werden in Bereich des freiwilligen CO₂-Markts gehandelt (Wiesmeier et al. 2021, Wiesmeier et al. 2020b). Einige Akteure am Markt sprechen daher von „*Contribution Credits*“, die dazu beitragen sollen, die Gesellschaft bzw. einzelne Sektoren, zu dekarbonisieren.

Erkenntnisse der Wissenschaft

Abschätzung der oberirdischen Biomasse

In Agroforstsystemen stellt der Gehölzbereich eine maßgebliche Kohlenstoffsенке dar (Montagnini et al. 2004). Für *ex-ante* Abschätzungen, d.h. Abschätzungen der zukünftig zu erwartenden C-Sequestrierungsraten, können jährliche Zuwachsraten der Biomasse in AFS überschlägig anhand von Erfahrungswerten erfolgen (Aertsens et al. 2013), insofern die Standortbedingungen, erwartete Wuchsform, Bewirtschaftungsform, sortenspezifische Zuwachsleistung, Ausfallraten, etc. im Zeitverlauf eingeordnet werden können.

In bestehenden AFS lässt sich die oberirdische Gehölzbiomasse relativ einfach und hinreichend exakt erfassen. Erhebungen dieser Parameter erfolgen typischer Weise mit den aus der Forstwirtschaft bekannten Methoden (Kramer et al. 1982, Pretzsch 2019). Hierfür werden Anzahl der Bäume bzw. Sträucher, die Gehölzart und deren Dimension bzw. typische Dimensionsparameter wie beispielsweise der Brusthöhendurchmesser oder ergänzend die Höhe der Bäume, gemessen (Pretzsch 2019). Unter Nutzung allometrischer Funktionen kann die trockene Biomasse des Holzes abgeleitet werden (Grote et al. 2003, Pretzsch 2019, Twistel et al. 2000). Die gemittelten Einzelbauminformationen werden auf die jeweilige Gesamtzahl der Gehölze im AFS übertragen. Bei bekanntem Alter der Anlage kann so auch der durchschnittliche Trockenmassezuwachs pro Hektar und Jahr errechnet werden. Daran orientiert sich auch die Methodik des IPCC (2006) bei der Ermittlung der oberirdischen Biomasse pro Hektar Gehölzfläche. Allerdings wird hier lediglich das Derbholzvolumen, d.h. Holz mit einem Durchmesser größer 7 cm berücksichtigt und mittels des Volumenexpansionsfaktors auf das Gesamtvolumen umgerechnet. In Kombination mit der baumspezifischen Raumdichte kann daraus die Trockenmasse des Holzes ermittelt werden. Die Biomasse von Gehölzen mit vergleichsweise dünnen Trieben (Weiden, Hecken, etc.) werden bei dieser Methode unterschätzt.

Weiterhin kann bei der Verwertung des Holzes als Stammholz oder Hackschnitzel die Bestimmung des Kohlenstoffbestands *ex-post* über die Trockenmassebestimmung des Ernteguts erfolgen. Aus der Trockenmasse des Holzes kann der Kohlenstoffgehalt und damit die CO₂-Sequestrierungsleistung berechnet werden. Überschlägig lässt sich sagen, dass 1 t_{atro} Holz über alle Baumarten gemittelt ca.

0,5 t Kohlenstoff speichert (Trendelenburg 1939), was bei einem CO₂-Äquivalent von 3,67 einer Speicherleistung von ca. 1,84 t CO₂ t_{atro} Holz entspricht.

Im Bereich der Schnellwachsenden Gehölze im Kurzumtrieb stoßen Abschätzungen anhand von forstlichen Ertragstafeln nur bedingt, da diese zumeist für Gehölze über 20 Jahren vorliegen. Hier bieten sich die Vollerntemethode (Wägung ganzer Parzelle), ein Probeflächenverfahren oder die Stichprobenhafte Ernte an (Röhle et al. 2010). Die Regressionsmethode beruht auf dem Zusammenhang zwischen BHD – vor Ort gemessen – und dem Biomassegewicht einzelner Gehölze. Die hiervon abgeleitete Regression ermöglicht die Berechnung der oberirdischen Biomasse aller Gehölze (Röhle et al. 2010).

Neben den oben erwähnten klassischen Methoden der Abschätzung der oberirdischen Biomasse existieren moderne *ex-post* Aufnahmetechniken wie z.B. das terrestrische Laserscanning (TLS), das eine exakte 3D-Erfassung des oberirdischen Volumens erlaubt. Diese Geräte können in kurzer Zeit den gesamten Bestand exakt erfassen. Anschließend können softwaregestützt unterschiedliche Baumparameter wie der Durchmesser, die Höhe oder das Volumen ermittelt werden (Hackenberg et al. 2014). Diese Parameter erlauben zusammen mit Informationen über die Dichte des Holzes die exakte Berechnung der stehenden Biomasse (Klemmt et al. 2011). Zukünftig werden auch Methoden der Fernerkundung weiter an Bedeutung gewinnen (Zepp et al. 2021).

Das UBA (2021) setzt in den nationalen THG-Bilanzen für Deutschland auf Basis umfangreicher Literaturauswertungen einen durchschnittlichen jährlichen oberirdischen Biomasseertrag von 9,05 (-6,0 % / +9,9 %) t_{atro} ha⁻¹ a⁻¹ für Kurzumtriebsplantagen an, was einer CO₂-Speicherleistung von rd. 16,6 t entspricht (systembedingte Emissionen unberücksichtigt).

Abschätzung der unterirdischen Biomasse

Der unterirdische Anteil an der Biomasse sollte bei der Quantifizierung ebenfalls mit einbezogen werden, denn die Wurzelbiomasse entspricht ca. 20-40 % der oberirdischen Biomasse (Dieter et al. 2002, Offenthaler et al. 2006). Durch die Agroforstwirtschaft kommt es zu einer charakteristischen Verteilung der Feinwurzeln, bedingt durch die Konkurrenz mit Nutzpflanzen im Oberboden sowie durch bewirtschaftungsbedingtes *Root pruning* bzw. *-trimming*, d.h. dem Einkürzen der oberflächennahen Wurzeln der Gehölze durch Pflügen der angrenzenden Ackerfläche bis 50 cm an den Stamm (Cardinael et al. 2015). Die Wurzelsysteme von Bäumen in AFS werden dahingehend erzogen, verstärkt in die Tiefe zu wachsen um die oberflächige Konkurrenz mit den Ackerkulturen zu vermindern und gleichzeitig die Standfestigkeit zu fördern. Durch die mindestens gelegentliche Bodenbearbeitung wird beim Absterben von Feinwurzeln organische Substanz auch in tiefere Bodenbereiche eingelagert (Germon et al. 2015, Shi et al. 2018). Die Verteilung der Wurzelbiomasse bis in größere Bodentiefen,

die von korrekten Messungen zumeist nicht erfasst werden können, erklärt gleichzeitig die Schwierigkeiten deren Berücksichtigung. Wurzelbiomasse kann nur durch sehr aufwendige und destruktive Verfahren vollumfänglich ermittelt werden (Axe et al. 2017). Eine Annäherung bietet stattdessen die Erfassung des Feinwurzelanteils in Bodenkernen, allerdings ist damit ebenfalls eine Störung der Gehölze verbunden. Studienergebnisse zur unterirdischen Biomasse sind nur wenige vorhanden, für Hecken wurde ein Durchschnittswert von 44 ± 28 t C pro Hektar ermittelt, allerdings mit großen Unsicherheiten (Drexler et al. 2021). Nach der Rückumwandlung von schnellwachsenden Gehölzen konnte der Kohlenstoffgehalt in tieferen Bodenschichten mehr als verdoppelt werden, wobei insbesondere der mit der Rotationsdauer ansteigende Grobwurzelanteil durch langsame Verrottung längerfristig Kohlenstoff speichert (Fiege et al. 2022).

Allometrische Funktionen, die in gleicher Weise wie bei der Bestimmung der oberirdischen Biomasse einfach zu erfassende Parameter wie z.B. den Wurzelhalsdurchmesser verwenden, sind für die Wurzelbiomasse bisher nur für wenige Arten und daher nur in begrenztem Umfang vorhanden. Die Ableitung der Wurzelmasse kann jedoch kennzahlenbasiert mittels des Wurzel-Spross-Verhältnisses von der oberirdischen Biomasse abgeleitet werden. Die von Mokany et al. (2006) ermittelten Durchschnittswerte für das Wurzel-Spross-Verhältnis von Laubwäldern der gemäßigten Klimazone liegen dabei zwischen 0,23 und 0,45. Das bedeutet, dass die Wurzelbiomasse zwischen 23% der oberirdischen Biomasse (überirdische Biomasse <75 t ha⁻¹) und 45 % (überirdische Biomasse zwischen 75 und 150 t ha⁻¹) entspricht. Diese Werte werden auch für das Nationale THG-Inventar des UBA (2021) zugrunde gelegt. Grundsätzlich sollte bei einer Berücksichtigung der Wurzelbiomasse eher zurückhaltend gerechnet werden, da die Verifizierung sehr schwierig ist.

Abschätzung Bodenkohlenstoff

In AFS kommt es langfristig überwiegend zu einem Aufbau von organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Boden (Albrecht et al. 2003, Lorenz et al. 2014, Montagnini et al. 2004, Ramachandran Nair et al. 2009, Schoeneberger 2008, Stavi et al. 2012). In zahlreichen Metastudien wurden Belege für die C_{org}-Bindung durch AFS gefunden, sowohl in tropischen/subtropischen als auch temperierten Regionen (Cardinael et al. 2018, Chatterjee et al. 2018, De Stefano et al. 2017, Drexler et al. 2021, Feliciano et al. 2018, Hübner et al. 2021a, Kim et al. 2016, Mayer et al. 2022, Shi et al. 2018).

Insbesondere bei Graslandböden sind aber gewisse Einschränkungen bezüglich der Speicherpotentiale zu beachten. Graslandböden der Gemäßigten Breiten liegen nahe ihrer Kohlenstoffsättigung, sodass das Sequestrierungspotential im Boden geringer ausfällt (Wiesmeier et al. 2014). Im Zuge der Pflanzung der Gehölze kommt es zunächst zur Bodenstörung, sodass kurzfristig negative Sequestrierungsraten auftreten. Besonders ausgeprägt haben sich Kohlenstoffverluste bei Moorböden gezeigt. Bei Mayer et al. (2022) zeigten rd. 28 % der Gesamtbeobachtungen in Agroforstsystemen der

gemäßigten Breiten negative C_{org} -Sequestrierungsraten im Oberboden (0-20 cm) und immerhin noch in rd. 19 % der Untersuchungsflächen im Bereich von 20-40 cm Tiefe, überwiegend in der Anlage silvo-pastoraler Systeme die vorher Graslandflächen waren. Daher sind die Störungen auf ein Minimum zu beschränken und der Gehölzstreifen möglichst schmal zu gestalten. Entscheidend sind in diesem Zusammenhang vor allem die Betrachtungszeiträume (Feliciano *et al.* 2018). AFS markieren eine Übergangsphase von Böden mit einem niedrigeren C-Gehalt hin zu einem vergleichsweise hohen Bereich, wobei sich die Werte asymptotisch annähern und anfängliche Störungen erst nach gewisser Zeit ausgeglichen werden.

Der im Laufe mehrerer Jahre zu beobachtende Anstieg der C_{org} -Vorräte in Ober- und Unterböden in Agroforstsystemen kann auf mehrere Prozesse zurückgeführt werden. Bäume und Sträucher können den ober- und unterirdischen C-Eintrag in den Boden durch Streufall, Wurzelumsatz und Rhizodeposition erhöhen, hauptsächlich im direkten Einflussbereich der Bäume (Cardinael *et al.* 2018, De Stefano *et al.* 2017, Kim *et al.* 2016). Neben der Verteilung der Wurzelbiomasse der Bäume und Sträucher bis in größere Bodentiefen (Germon *et al.* 2015, Shi *et al.* 2018), können die C-Einträge durch den Unterwuchs innerhalb der Baumreihe eine wichtige Rolle spielen (Cardinael *et al.* 2017, Cardinael *et al.* 2018, D'Hervilly *et al.* 2021, Shi *et al.* 2018). Allerdings gibt es nur wenige Messdaten zum ober- und unterirdischen C-Eintrag aus den verschiedenen Eintragsquellen innerhalb des AFS.

Neben dem C_{org} -Anstieg im direkten Einflussbereich der Bäume kann es zu einem C_{org} -Aufbau in den angrenzenden landwirtschaftlich genutzten Flächen kommen, da Erträge und damit der C-Eintrag aufgrund verbesserter mikroklimatischer Bedingungen, wie z.B. verringerte Windgeschwindigkeiten, erhöht sind (Lorenz *et al.* 2014). Obwohl zusätzliche C-Einträge der wichtigste Faktor für die C_{org} -Sequestrierung in AFS sind (Ma *et al.* 2020), wirken sich vermutlich weitere Prozesse positiv auf die C_{org} -Bilanz aus, wie etwa eine 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 (Kim *et al.* 2016, Lorenz *et al.* 2014, Shi *et al.* 2018). Eine messtechnische Herausforderung bleibt die flächenhafte Hochrechnung der Anreicherung in den für die Hauptkultur genutzten Fläche zwischen den Gehölzen, da diese in Abhängigkeit der Entfernungen zu den Baumkomponenten variiert (Bambrick *et al.* 2010, Cardinael *et al.* 2017, Stavi *et al.* 2012). Hierfür ist eine repräsentative Erhebungsmethode bzw. -modell notwendig.

Klassische Bodenprobennahmen unter Beachtung der Lagerungsdichte mit anschließender Laboranalyse sind aufwendig und letztlich ein Kostenfaktor der Kohlenstoffzertifizierung. Aktuell schreitet die Forschung zur Bilanzierung mittels neuartiger Bodensensoren weiter voran, sodass zukünftig mit neuen und einfacheren Möglichkeiten der Kohlenstoffbestimmung in Böden zu rechnen ist (Gholizadeh *et al.* 2021).

Abschätzung des vor- und nachgelagerten Bereiches

Vorgelagerter Bereich

In der Agroforstwirtschaft werden die Gehölze in der Regel extensiv bewirtschaftet. Damit kann in den Gehölzflächen auf Düngemittel und Pflanzenschutzmittel gänzlich verzichtet oder zumindest deren Einsatz stark vermindert werden. Dabei werden nicht nur die THG-Emissionen infolge des reduzierten Kraftstoffeinsatzes landwirtschaftlicher Maschinen und Fahrzeuge, sondern auch die N₂O-Emissionen als Folge des geringen Stickstoffeinsatzes bei der Düngung reduziert. So liegen die THG-Emissionen aus Agrarholzpflanzungen in der Regel deutlich niedriger als die Emissionen von annuellen Ackerkulturen (Hellebrand et al. 2008, Kern et al. 2018). Mit Hilfe von Energie- und THG-Bilanzen kann die Menge der eingesparten fossilen Energie im Vergleich mit konventioneller Landwirtschaft ermittelt werden (Kanzler et al. 2021).

Nachgelagerter Bereich

Für die Biomasse aus Agroforstgehölzen kommen verschiedene Verwendungsrichtungen in Betracht, die jeweils unterschiedliche Effekte hinsichtlich ihrer Klimawirkung haben. Die Holzbiomasse kann für die Erzeugung von Energie genutzt werden. Hierbei werden THG-Emissionen aus fossilen Energiequellen substituiert (Burschel et al. 1993). Diese Effekte können – neben anderen Umweltauswirkungen – mit Hilfe der Ökobilanzierung (*Life-Cycle-Assessment* – LCA) erfasst werden (Burger et al. 2018, Roedl 2010, Wilhelm et al. 2015). Die Höhe der THG-Emissionen und damit des Substitutionspotenzials sind u.a. von der Energieintensität des Brennstoffes sowie von der Anlagentechnologie und ihrem spezifischen Wirkungsgrad abhängig (Weisser 2007). In der Regel ist die Reduzierung der THG-Emissionen durch die Substitution von Kohle, die eine vergleichsweise geringe Nutzungseffizienz aufweist, höher als bei Erdgas (vgl. Nabuurs et al. 2017).

Holz kann in der stofflichen Nutzung andere Roh- bzw. Werkstoffe ersetzen. Die Menge der THG-Emissionen, die bei Materialsubstitution vermieden werden kann, wird mit Hilfe des Verdrängungsfaktors bewertet (Rüter 2017, Sathre et al. 2010, Schlamadinger et al. 1996). Dieses Potenzial kann erheblich sein, allerdings sind die Werte des Verdrängungsfaktors stark vom Studiendesign abhängig. Wenn das Holz der Agroforstgehölze für die Erstellung von Produkten wie Möbel genutzt wird, bleibt der Kohlenstoff sogar über lange Zeiträume gebunden. Die Dauer der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten ist ebenfalls von vielen Faktoren abhängig und beruht auf Modellierungsansätzen (Rüter et al. 2016). Das bedeutet, je nach Verwendung ließe sich C langfristig festlegen und dem Kohlenstoffkreislauf der Atmosphäre entziehen.

Zukunftschancen für die Landwirtschaft und Zertifizierer

AFS sind derzeit aufgrund vergleichsweise schwieriger Rahmenbedingungen (u.a. Agrarpolitik, Pachtrecht, etc.), der hohen Investitionskosten sowie der langfristigen und damit schwer kalkulierbaren Kosten-Ertragssituation, beispielsweise durch eine sich ändernde Absatz-, Preis- und Kostensituation in einem Gesamtnutzungszeitraum von 20 Jahren und mehr, derzeit noch zu wenig attraktiv für die Praxis (Böhm *et al.* 2020a). Die Aussicht auf verlässliche, kontinuierliche Erlöse über CO₂-Zertifikate bietet daher LandwirtInnen eine Chance, entsprechende Investitions- und Erlösr Risiken etwas einzugrenzen.

Aktuell gibt es in der Gesellschaft auch eine konkrete Nachfrage nach Kompensationsleistungen. Ein Großteil der im freiwilligen Markt angebotenen Klimazertifikate werden im globalen Süden generiert. Dies sind häufig technische Projekte, welche beispielsweise bei der Umstellung von fossilen Energien zu regenerativen Energien unterstützend wirken¹. Aber auch Aufforstungs- und Agroforstprojekte werden mittlerweile durch international tätige Organisationen bzw. Unternehmen für CO₂-Kompensation verifiziert und gegenfinanziert.

Mit der stärkeren Etablierung der Agroforstwirtschaft in Deutschland würde sich jedoch ein lokaler Kompensationsmechanismus anbieten, der auch weitere positive Effekte – quasi vor Ort – generiert. Hier ist ein deutlicher Vorteil für die VerbraucherInnen gegeben, auch bezüglich der Transparenz.

Nachdem verschiedene Praktiken der Landwirtschaft zum Humusaufbau durch verbesserte Fruchtfolgen, Zwischenfrüchte oder Zwischen- oder Untersaaten, bereits von verschiedenen Anbietern mit finanziellen Anreizen versehen werden, rückt nun das Thema Agroforstwirtschaft zusehends ins Interesse.

Mehrere Unternehmen möchten Kohlenstoffzertifikate im Bereich Agroforstwirtschaft ausstellen. Bisher haben keine der weltweit etablierten Standards geeignete Lösungen oder Methodiken entwickelt, die eins-zu-eins für Europa anwendbar sind. Die Anbieter europäischer bzw. regionaler (Humus-)Zertifikate haben ihre Methodiken selbst entwickelt, sind zum Teil sehr vereinfacht und manipulationsanfällig.

Aus technischer Sicht liegen die größten Herausforderungen sicherlich in der Variabilität der Messergebnisse aus der Forschung, den unterschiedlichen AFS-Typen, in den standörtlichen Besonderheiten sowie in unterschiedlichen Nutzungsformen. Daher erscheint eine „*One-size-fits-all*“-Lösung

¹ Der Fokus auf technische Projekte und den Ausschluss von Maßnahmen im Landnutzungssektor (LULUCF), sind historisch im Zuge des Kyoto-Protokolls gewachsen. Bis zum Auslaufen dieser Mechanismen im Jahr 2020 war es möglich, Minderemissionen aus Projekten im globalen Süden zu erwerben und im EU-Emissionshandelssystem (EU ETS) anzurechnen (Joint Implementation – JI, Clean Development Mechanism – CDM). Die Vorbereitung der Nachfolgeregelung wurde mit dem Paris-Agreement angestoßen.

wenig zielführend, sondern es sollte das spezifische System mit den genannten Einflussfaktoren einbezogen werden.

Diese notwendige Spezifität und fehlende Standardisierung erschweren eine simple Skalierung, wie es Plattform-Unternehmen wünschen. Die größte Chance einer Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft ist, dass Unternehmen mit AFS ein lokal verortetes, langfristig angelegtes und dadurch verifizierbares System unterstützen können, das neben der CO₂-Bindung viele weitere positive Wirkungen entfaltet. Das emotional äußerst positiv besetzte „Bäume pflanzen“ kann hierbei als Vehikel genutzt werden. Die „Geldgeber“ können die Ergebnisse ihrer Investitionen direkt sehen und vorzeigen. Bei der Konzeption von Kompensationsangeboten sollte jedoch beachtet werden, dass diese Minderungs- und Speicherpotentiale üblicherweise den Sektoren bzw. Akteuren des nachgelagerten Bereiches angerechnet werden.

Bewertung nach zehn Kriterien

Hintergrund

Damit der zukünftige Kohlenstoffmarkt die Integrität der erteilten Zertifikate aus agroforstlichen Maßnahmen bzw. die hierfür ausgezahlten Gutschriften gewährleisten kann, müssen diese mit international etablierten Grundsätzen etablierter Zertifizierer konform sein (z.B. *Gold Standard*, *Verified Carbon Standard* (VCS) von Verra) und dabei auch die Anforderungen internationaler Abkommen und politischer Entwicklungen berücksichtigen (z.B. Übereinkommen von Paris zum Klimaschutz COP21 von 2015, zukünftige EU *Carbon Farming*-Verordnung). Wissenschaftliche Veröffentlichungen zur Methodik wurden für die Zusammenstellung der zehn folgenden Kriterien herangezogen (Lawson 2022, Leifeld et al. 2019, Wiesmeier et al. 2020c). Diese sind:

- 1) Zusätzlichkeit,
- 2) Quantifizierbarkeit,
- 3) Verschiebungseffekte,
- 4) Beitrag zur Nahrungssicherheit,
- 5) Zusätzliche Emissionen,
- 6) Langfristigkeit und Dauerhaftigkeit,
- 7) Nachweisbarkeit,
- 8) Transaktions- und Opportunitätskosten,
- 9) Synergien und Kompromisse mit anderen Zielen, sowie
- 10) Sicherheit, Vertrauen und Transparenz.

1. Zusätzlichkeit

Für die Kompensation von THG-Emissionen durch eine finanzielle Honorierung über Klimazertifikate muss der Klimaeffekt zusätzlich zu den Effekten der bisherigen Anbaupraxis nach den Grundsätzen der „Guten Fachlichen Praxis“ erfolgen. Zukünftig dürften die Anforderungen an die Landwirtschaft jedoch allgemein weiter ansteigen. Da die Anpflanzung von Agroforstgehölzen auf landwirtschaftlichen Flächen eine langjährige Festlegung auf ein Anbausystem impliziert, in denen, verglichen zur Kultivierung einjähriger Ackerkulturen oder Grünland, häufig maßgeblich Kohlenstoff festgelegt wird, ist das Kriterium „Zusätzlichkeit“ durch die Agroforstwirtschaft verglichen zu einjährigen oder kurzfristig angelegten Maßnahmen leicht zu erfüllen, selbst bei substantiellen Anhebungen der Klimaschutzanforderungen in der Landwirtschaft allgemein. Durch ein erhöhtes *Land-Equivalent-Ratio* (LER >1) und die überjährige Festlegung von Kohlenstoff in der Gehölzbiomasse wird ober- und unterirdisch kontinuierlich CO₂ gebunden sowie Bodenkohlenstoff aufgebaut (Böhm et al. 2020b).

2. Quantifizierbarkeit

2.1 Quantifizierung der Biomasse

Für die Planung von AFS zur Etablierung neuer Flächen ist vor allem die *ex-ante* Quantifizierung von Kohlenstoff-speicherungseffekten relevant. Die Zuwächse der oberirdischen Biomasse stellen dabei den vergleichsweise einfachsten Teil einer Quantifizierung dar. Die Abschätzung der Wurzelbiomasse mittels Wurzelbohrer ist technisch aufwändiger und mit größeren Unsicherheiten verbunden.

Die Abschätzung der zukünftig zu erwartenden C-Sequestrierungsraten anhand jährlicher Zuwachsraten in der ober- und unterirdischen Biomasse der Bäume oder Sträucher auf Basis von Literaturangaben sind v.a. in Zeiten der Klimakrise mit zunehmenden Unsicherheiten behaftet. So ist beispielsweise die Anwendung von Verhältnisfaktoren für Wurzel und Spross praktisch, bergen aber zusätzliche Ungenauigkeiten bzw. sind unvollständig vorhanden. Die vielfältigen und teilweise voneinander abhängigen Einflussfaktoren machen die Abschätzung der Biomasse generell nicht einfach. Da sich AFS in ihrem Aufbau und ihrer Zusammensetzung stark voneinander unterscheiden können, muss diesem Umstand bei der Quantifizierung entsprechend Rechnung getragen werden. Mit Blick auf die Vielfalt unterschiedlicher AFS mit jeweils individuell verschiedenen Wuchsbedingungen, Pflanzdichten, Nutzungszeiträumen und Baumarten und -sorten ist eine pauschale Quantifizierung der Biomasse *ex-ante* daher nicht zu empfehlen. Aufgrund der hohen Varianz muss das spezifische System auf der betrachteten Fläche individuell analysiert werden. Dies ist insbesondere für sehr divers aufgebaute AFS der Fall, bei welchen eine hohe Sortenvielfalt sowie u. U. stattfindende Änderungen in der Gehölzzusammensetzung oder verschiedene Ernteintervalle mit daraus resultierender gemischter Altersstruktur die Prognostizierbarkeit und Vergleichbarkeit mit anderen Systemen erschweren. Für

weiter verbreitete Systeme, wie z.B. Streuobstwiesen oder *Alley Cropping* mit Pappeln oder Weiden im Kurzumtrieb lassen sich ggf. vergleichbare Referenzsysteme in der Literatur finden, auf deren Basis eine *ex-ante* Abschätzung vorgenommen werden kann. Dabei müssen jedoch die Rahmenbedingungen, wie z.B. Baumarten, Sorten, Veredelungsunterlagen, Umtriebszeiten und Bewirtschaftungsformen kohärent sein. Bei der *ex-ante* Bewertung der Klimaschutzwirkung können prinzipiell unterschiedliche Ansätze gewählt werden. Bei Klimaschutzprojekten im globalen Süden wird häufig die mittlere CO₂-Bindeleistung in der Biomasse über den Betrachtungszeitraum als Kompensationsvolumen genutzt. Weiterhin gibt es den Ansatz, die gesamte, kulminierte C-Bindungsleistung über den Betrachtungszeitraum einzubeziehen. Bei diesem Ansatz können die nachgelagerten Prozesse einfacher einbezogen werden, um die Klimaschutzwirkung vollständig zu bewerten. Hier sollte der Holzaufwuchs der im Sinne des Klimaschutzes genutzt wird, z.B. Substitution fossiler Rohstoffe, langfristige Verwendung als Baumaterial oder Holzwerkstoff berücksichtigt werden. Aber auch hier müssen die Bilanz-, Sektoren- und Eigentumsgrenzen beachtet werden, um eine Doppelzählung zwischen diesen Grenzen auszuschließen.

2.2 Quantifizierung des Bodenkohlenstoffs

Für die Vergabe von CO₂-Zertifikaten auf Basis von C_{org}-Veränderungen im Boden ist es erforderlich, C_{org}-Vorräte mit Proben vor Beginn der Maßnahme (*ex-ante*) oder mit Proben aus Kontrollflächen (*ex-post*) zu vergleichen. Dies erfordert eine Bestimmung des C_{org}-Gehalts, der Lagerungsdichte (Trockenroh-dichte) und des Steinanteils mittels einer repräsentativen, tiefenbezogenen Beprobung der Fläche (Wiesmeier *et al.* 2021, Wiesmeier *et al.* 2020b). Die Probenahme sollte im Frühjahr vor einer Bodenbearbeitung und Düngung oder im Herbst erfolgen. Bei bereits erfolgter Bodenbearbeitung oder Düngung ist unbedingt ein großer zeitlicher Abstand (mindestens 6 Wochen) einzuhalten, da sonst die Ergebnisse der Bestimmung der Lagerungsdichte und der C_{org}-Gehalte verfälscht werden. Für die Beprobung sind sowohl die Gehölzareale als auch die Ackerfrucht- bzw. Grünlandbereiche einzubeziehen und flächenanteilig zu gewichten. Die Beprobungstiefe sollte den gesamten Oberboden erfassen, kann aber auch auf den Unterboden ausgedehnt werden. Die gewählte Beprobungstiefe muss bei Wiederholungsbeprobungen auch bei verringerten Bodenbearbeitungstiefen eingehalten werden, da es sonst zu einer Fehlinterpretation der Ergebnisse kommen kann. Der C_{org}-Gehalt der Probe wird am Feinboden bestimmt. Er ergibt sich aus der Differenz zwischen dem Gesamt-C und dem Carbonat-C des Feinbodens. Der Gesamt-C des Bodens wird hierfür mittels Verbrennung in C/N-Analysegeräten bestimmt. Der Carbonat-C wird meist gasvolumetrisch bestimmt. Die Bestimmung der Lagerungsdichte erfolgt üblicherweise als ungestörte Probe mittels Stechzylindern oder anderen geeigneten Probenahmegeräten. Der Steinanteil der Probe sollte bei mengenmäßig bedeutsamen

Anteilen anhand der entnommenen Proben ermittelt werden. Der C_{org} -Vorrat wird aus dem C_{org} -Gehalt des Feinbodens, der Lagerungsdichte, der Beprobungstiefe sowie dem Steinanteil berechnet. Eine Abschätzung der Lagerungsdichte, z.B. anhand von Pedotransferfunktionen kann fehlerbehaftet sein und sollte deshalb unterbleiben.

Das zusätzlich im Boden gespeicherte C_{org} wird analog zum Biomasse-C in CO_2 -Äquivalente umgerechnet. Eine Beprobung in zeitlichen Abständen von 5 Jahren wird – analog zur Biomasse – als sinnvoll angesehen. Aus den Referenzflächen sollten Rückstellproben vorgehalten werden, im Falle sich zukünftig neue Analyse- oder Prüfmethode etablieren. Alternative Möglichkeiten der Ermittlung von C_{org} -Vorratsänderungen über sensor- oder modellbasierte Ansätze sind im Kontext der Kohlenstoffzertifizierung bislang zu ungenau bzw. liegen nur unzureichende Erkenntnisse hinsichtlich ihrer Eignung vor. Die Quantifizierung der organischen Auflage soll nach etablierten Standardmethoden erfolgen.

2.3 Quantifizierung im vor- & nachgelagerten Bereich

Vorgelagerter Bereich

Die THG-Emissionsreduzierung der partiell extensivierten Bewirtschaftung in AFS kann mittels Energie- und THG-Bilanzen erfasst werden. Dafür sind betriebsspezifische Daten zu den einzelnen Aktivitäten (z.B. Maschinen- und Düngereinsatz) für die Produktion der Ackerkulturen und die Bewirtschaftung der Agroforstgehölze erforderlich. Aus der Differenz der THG-Emissionen in der Agroforstwirtschaft von jenen der konventionellen Landwirtschaft kann berechnet werden, welche Menge an CO_2 -Äquivalenten durch die Bewirtschaftung von Agroforstgehölzen vermieden werden können. Eine einfachere Methode in Anlehnung an Millar et al. (2013) beruht darauf, lediglich die Durchschnittsmenge der N-Dünger in der Ackerkultur, z.B. in den letzten fünf Jahren pro Hektar, als Vergleich zur Gehölzfläche anzusetzen. Eingesparte N-Düngemittel werden mit relevanten Emissionsfaktoren multipliziert und ergeben die Reduzierung der N_2O -Emissionen im AFS. Die N_2O -Emissionen werden in CO_2 -Äquivalente umgerechnet, wofür CO_2 -Zertifikate erteilt werden könnten.

Nachgelagerter Bereich

Um den Substitutionseffekt im nachgelagerten Bereich zu quantifizieren, sind umfangreiche Datengrundlagen und die Anwendung von Modellierungsansätzen, wie die Erstellung von Ökobilanzen, erforderlich. Für die Energiesubstitution werden die THG-Emissionen im Lebenszyklus der Bioenergie mit den THG-Emissionen durch fossile Energiequellen verglichen. Indem pro Hektar Gehölzfläche eine bestimmte Menge an kWh Wärme oder Strom erzeugt wird, können die reduzierten THG-Emissionen unter Betrachtung der Nutzungseffizienz der Anlage berechnet werden. Der

Energiesubstitutionseffekt ist dabei vom aktuellen Energiemix abhängig, wobei bei konkreten Projekten, beispielsweise Biomasseheizwerke, die tatsächlich vermiedenen THG Emissionen angesetzt werden. Der Substitutionseffekt kann mittels Verdrängungsfaktor und Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten anhand des Modells *WoodCarbonMonitor* quantifiziert werden (Rüter 2017). Die Ermittlung des Substitutionseffekts und der Kohlenstoffspeicherung in Holzprodukten ist generell mit einem hohen Aufwand verbunden. Einige Anbieter aus dem Bereich von Aufforstungsprojekten nach dem Gold Standard berücksichtigen beispielsweise nur das im stehenden Holz und im Boden gebundene C, nicht aber das Holz nach der Ernte. Solange die Bilanz- und Sektorengrenzen sauber berücksichtigt werden und Doppelzählungen in anderen Sektoren ausgeschlossen werden können, sollte der nachgelagerte Bereich durchaus in Betracht gezogen werden, da die Vergrößerung des Kohlenstoffspeichers in einem Bestand stets nur bis zu einer gewissen Grenze möglich ist, während sich die Substitutionseffekte auf eine unbegrenzte Zeit akkumulieren.

2.4 Verschiebungseffekte

Eine Verlagerung von Emissionen (engl. *Leakage*) entsteht, wenn die Durchführung eines Projekts an anderer Stelle THG-Emissionen erhöht und damit die im Grunde zu vermeidenden Emissionen doch auftreten (Wolters *et al.* 2018).

Auch in der Agroforstwirtschaft ist darauf zu achten, dass keine Maßnahmen honoriert werden, die auf Verschiebungseffekten beruhen. *Leakage Effekte* – d.h. die räumliche Umverteilung von Emissionen einerseits wie auch die Festlegung von Kohlenstoff andererseits, müssen nachvollziehbar bleiben und gänzlich vermieden werden, so sie dem Ziel einer Entlastung des Klimas entgegenstehen.

3. Beitrag zur Nahrungssicherheit

Der Anbau von Gehölzen auf landwirtschaftlichen Flächen nach agroforstlichen Prinzipien steht nicht per se im Konflikt mit der Nahrungsmittelproduktion. Bei der Agroforstwirtschaft geht es nicht primär darum, Nutzflächen für rein ökologische Zwecke anzulegen, sondern darum, resilientere und produktivere Landnutzungssysteme zu schaffen, die in Zeiten des Klimawandels erforderlich werden. Die Gehölze in Agroforstsystemen nehmen in der Regel nur einen flächenmäßig kleinen Anteil von der Gesamtfläche ein – der gesetzlich geforderte Mindestanteil für die Anerkennung ist 2% – und können, wenn richtig geplant, zu einer Verbesserung der Produktivität beitragen. Der Einfluss auf den Ertrag wird mittels dem *Land Equivalent Ratio* (LER) erfasst. Studien konnten belegen, dass die Produktivität in Agroforstsystemen höher als die Produktivität im reinen Ackerbau liegt (Böhm *et al.* 2020b, Lehmann *et al.* 2020, Seserman *et al.* 2019).

Zudem werden durch Agroforstsysteme viele zusätzliche Ökosystemleistungen erbracht, die mit positiven Effekten für die Landbewirtschaftung verbunden sein können, z.B. eine erhöhte Habitatvielfalt für die Biodiversität (vgl. Boinot et al. 2019) oder positive Effekte auf das Landschaftsbild (Hübner et al. 2021b).

4. Zusätzliche Emissionen

Im Bereich der Gehölzpflanzungen findet während der Wuchsdauer keine Bodenbearbeitung und meist kein Einsatz von Dünge- oder Pflanzenschutzmitteln mehr statt. Der Einsatz letzterer könnte ggfs. auch auf der verbliebenen landwirtschaftlichen Fläche verringert werden, wenn durch die Gehölze Nützlinge gefördert werden (Kühne 2018). Die Einsparung von Agrarchemikalien erspart auch ihre energieaufwändige Produktion (Kürsten et al. 1993) sowie Ausbringung. Agroforstspezifische Aufwendungen für die Pflege und Ernte der Gehölze müssen natürlich gegengerechnet werden, dürften aber in den meisten Fällen geringer sein als beim normalen Ackerbau.

5. Langfristigkeit und Dauerhaftigkeit

Von besonderer Bedeutung ist neben den gesteckten Systemgrenzen die Abhängigkeit der THG-Minderung vom gewählten Betrachtungszeitraum. Positiv wirkt sich aus, dass die Laufzeit der Agroforstwirtschaft verglichen zu anderen Maßnahmen in der Landwirtschaft vergleichsweise lang ist (Jacobs *et al.* 2020). Da die Anlage eines Agroforstsystems diverse wirtschaftliche Ziele verfolgt, ist davon auszugehen, dass nach einer erfolgreichen Etablierungsphase (richtiges Design, gute Bestandesentwicklung) die Nutzer ein großes Eigeninteresse an einem langfristigen Erhalt hegen.

Dennoch bleibt anzumerken, dass es gerade in der Etablierungsphase durch die Bodenstörung zu einer Freisetzung von THG kommen kann, die zunächst wieder erreicht werden müssen. Wenngleich die bodenbürtigen Prozesse langsamer verlaufen, wird während der gesamten Wuchsdauer Kohlenstoff in der Biomasse festgelegt. Dabei sind die Erfahrung zum durchschnittlichen jährlichen Zuwachs im Zeitverlauf zu berücksichtigen. Sowohl der Verra Standard als auch die nationale Bilanzierung für Systeme mit regelmäßigen Beerntungen/Umtrieben einen mittleren Biomassebestand über den Lebenszyklus an (UBA 2021).

Eine große Befürchtung ist sicherlich die Möglichkeit einer „*slow in – fast out*“-Problematik (Jacobs *et al.* 2020). Ein über viele Jahre aufgebauter C-Vorrat würde durch eine Änderung in der Bewirtschaftung in kurzer Zeit wieder als CO₂ freigesetzt werden. Diese Interpretation geht jedoch davon aus, dass keine Verbesserung des Bodenkohlenstoffgehaltes stattgefunden hat der aus stabilen C-Verbindungen und bis in große Bodentiefen reicht. Ebenso wenig wird berücksichtigt, dass die angrenzenden Flächen bspw. durch den Winderosionsschutz profitieren, der Wasserhaushalt verbessert und die Produktivität

des Gesamtsystems steigt. Darüber hinaus, verbleiben auch nach der Rückumwandlung größere Mengen an Wurzelbiomasse im Boden, die sich langsam zersetzt. Von besonderer Bedeutung ist die Berücksichtigung des erzeugten Produktes, bspw. die Stammholzerzeugung als Baustoff, die Substitution fossiler Energieträger, oder die stoffliche Verwendung in der Holzwerkstoff- bzw. Möbelindustrie. Die Verwendung hat maßgeblichen Einfluss auf die Klimawirksamkeit.

Für die Agroforstwirtschaft mit Gehölzen im Kurzumtrieb würde der Nachweis der Dauerhaftigkeit entfallen, wenn lediglich die im Rahmen der Substitution klimaschädlicher Energieformen eingesparten THG angerechnet würde, somit die Effekte auf der unmittelbaren Reduzierung von THG-Emissionen basieren.

Eine Garantie für die Langfristigkeit kann prinzipiell nicht gegeben werden, da beispielsweise eine Nutzungsänderung der Fläche oder ein Pächter- bzw. Besitzerwechsel stattfinden kann. Bei Inanspruchnahme von Kompensationszahlungen kann der Bewirtschafter über vertragliche Klauseln verpflichtet werden, eine Mindestnutzungsdauer des Agroforstsystems o.ä. zu gewährleisten. bzw. Nutzungsänderungen zu vermeiden. Das mittel- bis langfristige Management ist ein wesentlicher Erfolgsfaktor von AFS, insbesondere bei Obstgehölzen und Werthölzern. Diese Aspekte sollten daher ein elementarer Bestandteil von Verträgen zum Zertifikatehandel sein, Anforderungen, die über eine bloße Vereinbarung über die Nutzungsdauer hinausgehen.

In der Wissenschaft herrscht große Einigkeit darüber, dass es durch die Klimakrise grundsätzlich zu einem Rückgang der Kohlenstoffgehalte in den Böden der gemäßigten Breiten kommt. Somit gerät ein bereits erfolgter Bodenkohlenstoffaufbau zukünftig stärker unter Druck, sodass klimawandelbedingte Risiken in die Maßnahmenanforderungen einbezogen werden müssen. Zwar hat der Klimawandel einen großen Effekt auf die Böden, allerdings können dadurch das AFS in verschiedenen Segmenten positiv im Sinne der Klimaresilienz sind, Risiken besser abgefedert werden, als bspw. Maßnahmen, die nur auf den Boden abzielen. Um dennoch unvorhersehbare Risiken zu puffern, kann im Projekt ein bestimmter Anteil der CO₂-Zertifikate als Risiko-Puffer zurückgehalten werden (Hartmann et al. 2011). Sollte es notwendig werden, CO₂-Zertifikate aus dem Puffer zu entnehmen, müsste dieser wieder aufgefüllt werden.

6. Nachweisbarkeit

Die Nachweisbarkeit der C-Bindung ist mit Blick auf die oberirdische Biomasse der Gehölze wesentlich einfacher als beim Bodenumus: sie ist deutlich sichtbar und auch auf Luft- bzw. Satellitenbildern gut erkenn- und überprüfbar. Im Bereich des Bodens wird auf die größeren Herausforderungen der Nachweisbarkeit hingewiesen, wenngleich die Überprüfung auf Landschaftsebene wiederum gewisse

Erleichterungen im Monitoring oder der Kontrolle durch Verwaltungen mit sich bringen, verglichen zu Maßnahmen auf Feldblockebene (Jacobs *et al.* 2020).

Während des Qualifizierungszeitraumes, z.B. 20 Jahre (Jacobs *et al.* 2020), ist der Erfolg der Maßnahme durch eine fachgerechte stichprobenhafte Bestimmung der oberirdischen Biomasse an vorher zu definierenden Zeitpunkten, beispielsweise nach 5, 10, 15 Jahren, zu überprüfen und die *ex-ante*-Schätzungen ggf. zu korrigieren.

Letztmalig nach Ende der Vertragslaufzeit ist auch die Verwertung nachzuweisen, insofern für den nachgelagerten Bereich ebenfalls THG-Reduktionen angesetzt wurden. Die abschließenden Überprüfungen sind durch die Zertifizierer je nach gewähltem Anrechenmodell, den getroffenen Annahmen und dem vertretbaren Aufwand der Erhebung entsprechend zu entwickeln, transparent darzulegen und letztlich vertraglich festzuhalten.

7. Transaktions- und Opportunitätskosten

Für die Etablierung, die Pflege und die Bewirtschaftung von Agroforstsystemen ist zusätzliches Wissen erforderlich. Hinzu kommt ein höherer Aufwand für die Kontrollierbarkeit eines Agroforstsystems durch die Behörden. Dafür wurden bereits Konzepte erarbeitet, z.B. das Konzept zur Förderung von Agroforstflächen als Agrarumwelt- und Klimamaßnahme in Brandenburg (Böhm *et al.* 2020c). Diese Konzepte können genutzt werden, um die mit der Verwaltung der Agroforstflächen verbundenen Transaktionskosten zu reduzieren. Zudem werden kostenfreie Beratungsleistungen als Teil der Programgestaltung in der Agrarpolitik derzeit zwischen den Bundesländern diskutiert.

Unter der Maßgabe, dass ein etabliertes AFS wirtschaftlich betrieben werden kann, treten Opportunitätskosten lediglich bei kurzer Betrachtungsweise auf. Gerade die Zusatzfinanzierung, wie sie mit Klimazertifikaten erreicht werden kann, dient daher der Abfederung kurzfristiger Opportunitätskosten. Je nach Methode und gewähltem Ansatz im Zertifikatehandel, unterscheiden sich die Transaktionskosten. Es obliegt zunächst den Anbietern, hieraus ein geeignetes Geschäftsmodell zu entwickeln. Die Anforderungen und die Qualität der Messungen bzw. der Belastbarkeit der Modelle müssen jedoch den Mindestanforderungen entsprechen.

8. Synergien und Kompromisse mit anderen Zielen

Agroforstsysteme stellen neben Klimaschutz zahlreiche Ökosystemleistungen, wie die Boden-erosionsminderung, die Verbesserung der Wasserqualität, die Erhöhung der Habitatvielfalt sowie die Aufwertung des Landschaftsbildes, bereit (Kaeser *et al.* 2010, Torralba *et al.* 2016, Tsonkova *et al.* 2019, Unseld *et al.* 2011). Außerdem können die Gehölze zur Verbesserung des Mikroklimas auf der Fläche beitragen, wodurch die Ertragsstabilität erhöht wird (Kanzler *et al.* 2021, Reyes *et al.* 2021). Dieser

Effekt tritt vor allem auf Standorten mit hohen Temperaturen und geringen Niederschlagsmengen auf und gewinnt insbesondere in Anbetracht der Anpassung der Landwirtschaft an die Effekte der Klimakrise an Bedeutung. Die Verzögerung und Verringerung des Abflusses von Regenwasser durch die erhöhte Interzeption und Versickerung auf den Gehölzflächen kann die Hochwasserspitzen nach Starkregenereignissen reduzieren.

9. Sicherheit, Vertrauen und Transparenz

Der gesamte Prozess der Quantifizierung einschließlich der zeitlichen Dimension sollte vom Händler bzw. Zertifizierer transparent nach außen kommuniziert werden, um das Vertrauen der Zertifikats-erwerber und der Öffentlichkeit in diesen freiwilligen Rechtehandel zu schaffen und langfristig zu erhalten. Gegenüber den Käufern der Kompensationsrechte sollten die Händler als Vertragspartner des Kunden haften und ggf. nachbessern. Ein Zertifikatehändler müsste über die gesamte Vertragsdauer nachweisen können, dass die verkaufte Leistung auch erbracht wurde. Dies ist insbesondere durch *Business-to-Consumer*-Geschäft wichtig und auch durch das BGB nochmal besonders gefordert. Gegebenenfalls müssten hierfür Rücklagen, Rückstellungen oder Treuhandkonten eingerichtet werden, um im Fall einer späten Insolvenz des Händlers das Recht des Kunden zu wahren. Wie die Händler, Zertifizierer und Landwirte untereinander das Risiko aufteilen, sollte den Wirtschaftsakteuren überlassen werden, wobei für alle Vertragsparteien ein angemessenes Chance-Risiko Verhältnis – wie bei allen Verträgen üblich – gefordert werden.

Fazit und Empfehlungen

Im Bereich der zukünftigen Kohlenstoffzertifizierung in der Landnutzung herrscht derzeit eine hohe Dynamik. Insbesondere die Agroforstwirtschaft wird hierfür als eine besonders geeignete Landnutzungsform gesehen. Da es sich hierbei um teils grundlegende Änderungen in der Betriebsführung und teilweise Neuausrichtung in der Produktion handelt, verbunden mit einem finanziellen Mehraufwand in der Etablierungsphase, sind finanzielle Anreize notwendig, um diese Veränderungen anzustoßen. Ein Baustein ist dabei eine Zusatzfinanzierung durch Kohlenstoff- oder Klimazertifikaten.

Das Interesse in der Gesellschaft und von Seiten der Praxis ist stark gestiegen. Anbieter von Zertifikaten sehen hierbei auch ein neues Geschäftsfeld wobei bisher hier recht unterschiedliche Ansätze verfolgt werden. Fest steht, dass für eine transparente und sinnhafte Zertifizierung des Klimaschutzpotentials aus der Agroforstwirtschaft, wie aus der Landnutzung allgemein, entsprechende Mindeststandards gelten sollten.

Welche Methodik zur Bestimmung der Klimaschutzwirkung von AFS anzuwenden ist, obliegt letztlich den zertifizierenden Unternehmen. Diese haben Sorge zu tragen, dass deren Methodik, einfach nachvollziehbar, transparent, realistisch, validierbar und dem Stand der Wissenschaft und Technik entspricht. Messmethoden, Messwerte, Annahmen und Berechnungswege sollten transparent und öffentlich kommuniziert werden. Insbesondere bei der Kommunikation mit Endkunden – die letztlich die Zertifikate gegenfinanzieren – sollte darauf geachtet werden, dass die getroffenen Aussagen leicht verständlich und nicht missinterpretiert werden können. Das Autorenkollektiv schlägt für die Umsetzung von Zertifizierungslösungen daher unter Berücksichtigung der obigen Ausführungen ein abgestuftes Modell vor (Abbildung 2), wobei sowohl einzelne als auch zugleich alle Komponenten einbezogen werden können.

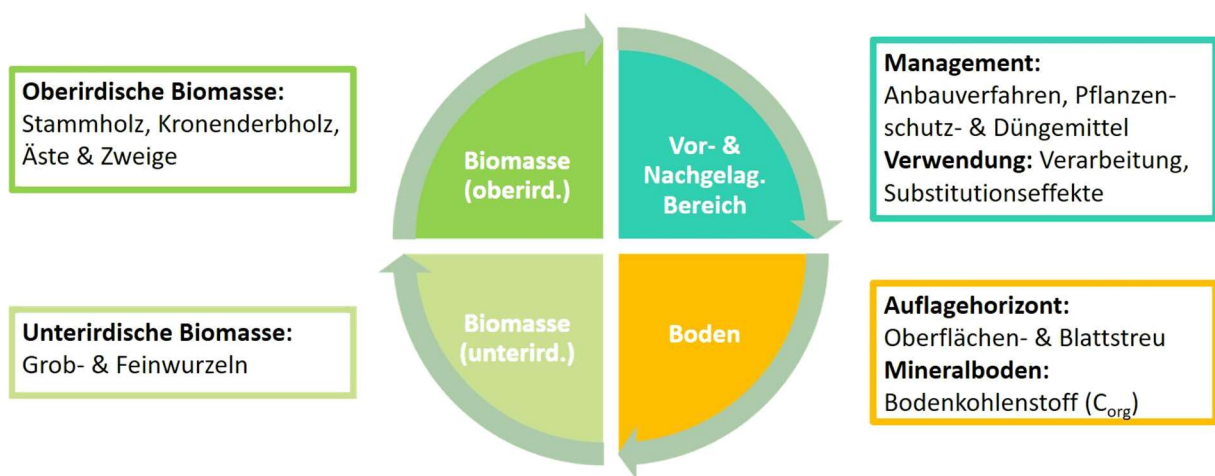


Abbildung 2: Staffelmodell einer CO₂-Zertifizierung im Bereich Agroforstwirtschaft

So lange die Anrechnung der Kohlenstoffsinkenfunktion von AFS im Rahmen der Agrar- und Klimaschutzpolitik in Deutschland nicht förderpolitisch verankert ist, obliegen die diskutierten Kriterien der Freiwilligkeit der Anbieter. Die Situation könnte sich ändern, wenn die Kosten der Anlage und Pflege von AFS über die Agrarförderung tatsächlich ausgeglichen werden. Dann könnten auch entsprechende Kriterien verbindlich aufgestellt werden, um eine staatliche (Teil-)Förderung (1./2. Säule) mit zusätzlichen Einkommen durch den privaten Zertifikatehandel zu synchronisieren. Wird dagegen ein staatliches Förderinstrument im Rahmen des *Carbon Farming* aufgelegt, so wird dieses sicherlich mit der geplanten Agroforstwirtschaftsförderung, zur Vermeidung einer Doppelförderung, abzustimmen sein. Die Vergangenheit hat gezeigt, dass beispielsweise Erneuerbare Energien, die aus Biomasse aus dem Anbau mit Energiepflanzenprämie gewonnen wurde, im Rahmen des EEG vermindert vergütet wurde.

Bezüglich der zukünftigen Ausgestaltung der Agroforstförderung oder der möglichen Einführung eines staatlichen CO₂-Handelssystems besteht daher zunächst Abstimmungsbedarf mit den Behörden,

inwiefern Konflikte zwischen staatlicher Förderung im Zuge der geplanten Einführung der Agroforstwirtschaft in Deutschland ab Januar 2023 und dem freiwilligen Zertifikatemarkt zu erwarten sind. Hierbei muss vom Gesetzgeber auch Rechtssicherheit für die LandwirtInnen gewährt werden, sodass staatliche Zahlungen (1./2. Säule Maßnahmen) nicht durch die Teilnahme an einem Zertifikatsprogramm in Gefahr gebracht werden.

Auch auf Ebene der EU empfiehlt die EURAF (Lawson 2022) die Vorgabe einer Reihe von politischen Maßnahmen, um die verschiedenen Rahmenbedingungen und Standards der Mitgliedsstaaten zu vereinfachen und zu bündeln. Einerseits sind für landwirtschaftliche Betriebe Erfassungsmöglichkeiten zu schaffen, die insbesondere mit dem Integrierten Verwaltungs- und Kontroll-System (InVeKoS) und dem EU-weiten *Land Parcel Identification System* (LPIS) konformgehen. Hinsichtlich der Entwicklung robuster Kohlenstoffzertifizierungsmethoden sollte die Kommission die bisher bewährten Zertifizierungsmethoden des freiwilligen Kohlenstoffmarktes nutzen, könnte jedoch den bürokratischen Aufwand und damit die Transaktionskosten durch eine engere Verzahnung mit bestehenden Systemen des InVeKoS, dem LPIS, und der FaST-Plattform verringern. Bei letzterem handelt es sich um eine innovative digitale Service Plattform der Europäischen Kommission, mit dem Ziel, Daten aus der Fernerkundung besser in der Landwirtschaft zu integrieren.

Als Fazit zu den „Möglichkeiten Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft ?!“ bleibt auf jeden Fall festzuhalten, dass sich im Bereich der Gehölze die langfristige C-Speicherung in der Biomasse deutlich gegenüber der reinen Acker- und wahrscheinlich auch Grünlandnutzung bis zu einem von der Nutzungsart und -periode abhängigen Durchschnittswert erhöht. Diese Chance sollte als Beitrag der Landwirtschaft zur Abmilderung und Anpassung an die Klimakrise genutzt werden. Letztlich bleibt abzuwarten, inwiefern die Höhe der geplanten Förderung die tatsächlichen Kosten der Flächenanlage deckt, da dann die Bedingung der Zusätzlichkeit nach wie vor gewährt sein kann, wenn das Finanzinstrument der Zertifikate unabdingbar für die Umsetzung wäre.

Zusammenfassung

Kohlenstoffzertifizierung in der Agroforstwirtschaft?!

Potentiale, Erfassung und Handlungsempfehlungen

Die Agroforstwirtschaft wird seit langem dafür geschätzt, dass sie ein großes Potenzial zur Akkumulation und langfristigen Speicherung von Kohlenstoff besitzt, sowohl in der Biomasse als auch im Boden. Der Weltklimarat (IPCC), der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU), die Europäische Kommission und das Parlament sehen in der Agroforstwirtschaft ebenfalls eine sehr geeignete Option im Kampf gegen die Klimakrise und bei der Anpassung an ihre Auswirkungen. Von neuerlichem Interesse ist dabei die Finanzierung im Rahmen marktbasierter Instrumente wie Klima- bzw. Kohlenstoffzertifikate. Angesichts der angekündigten EU-Carbon-Farming-Richtlinie, der Fit-for-55-Debatte sowie der Reform der GAP- und LULUCF-Mechanismen besteht ein dringender Bedarf an spezifischen Leitlinien zu Klimazertifikaten bei Agroforstprojekten und welche Rolle diese in Zukunft spielen können.

Das in diesem Artikel behandelten Kohlenstoffreduktionspotentiale der Agroforstwirtschaft und deren Erhebungsmethoden erstrecken sich auf vier Sektoren – vergleichbar mit anderen landnutzungs-basierten Strategien. 1) die oberirdische Biomasse, 2) die unterirdische Biomasse, 3) der Boden und 4) der vor- und nachgelagerte Bereich. Die Empfehlungen decken zehn häufig diskutierte Themen bzw. Anforderungen ab. Diese sind 1) Zusätzlichkeit, 2) Quantifizierbarkeit, 3) Verschiebungseffekte, 4) Beitrag zur Nahrungssicherheit, 5) Zusätzliche Emissionen, 6) Langfristigkeit und Dauerhaftigkeit, 7) Nachweisbarkeit, 8) Transaktions- und Opportunitätskosten, 9) Synergien und Kompromisse mit anderen Zielen, sowie 10) Sicherheit, Vertrauen und Transparenz.

Werden die erarbeiteten Empfehlungen berücksichtigt, kommen die AutorInnen zu dem Schluss, dass die Klimaschutz- und Minderungsleistungen der Agroforstwirtschaft in Form von Kohlenstoffreduktionspotenzialen mit Hilfe von Klima- oder Kohlenstoffzertifikaten honoriert werden können und sollten. Einerseits könnte dies eine innovative und vielversprechende Möglichkeit zur Finanzierung zukünftiger Agroforstsysteme werden; Andererseits muss sichergestellt werden, dass die Maßnahmen wissenschaftlichen und gesellschaftlichen Mindestanforderungen genügen. Wenn wissenschaftlich fundiert, verlässlich, transparent und ethisch gerecht geplant, besteht eine gute Chance, mit Klimazertifikaten für die Agroforstwirtschaft einen Beitrag zum ehrgeizigen Klimazielprogramm der EU, einer Treibhausgasreduktion von 55 Prozent bis 2030 gegenüber 1990, zu leisten.

Summary

Carbon certification through agroforestry?!

Potential, accounting and recommendations

Agroforestry has long been appreciated for having a great potential for increasing and, above all, permanently storing carbon in the biomass and the soil. The Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), the German Advisory Council on Global Change (WBGU), the European Commission and Parliament recognise agroforestry as a very suitable option in the fight against the climate crisis and in adaptation to its impacts. Of recent interest is financing such climate adaptation with market-based instrument like climate- or carbon certificates. In light of the upcoming EU Carbon Farming-Directive, the Fit-for-55-debate as well as the revision of the CAP and LULUCF-mechanisms, there is an urgent need for some guidelines for climate certificates within agroforestry measures and which role these may play in the future.

The carbon reduction potential and accounting principles in agroforestry outlined in this article cover four sectors – comparable to other land use-based strategies. 1) above-ground biomass, 2) below-ground biomass, 3) the soil, and 4) the up- and downstream sector. The recommendations cover ten frequently discussed topics and concerns, namely 1) additionality, 2) quantifiability, 3) displacement effects, 4) contribution to food security, 5) additional emissions, 6) longevity and durability, 7) traceability, 8) transaction and opportunity costs, 9) synergies and compromises with other goals, and 10) security, trust and transparency.

If the recommendations developed are taken into account, the authors conclude that the climate protecting and mitigation services of agroforestry in the form of carbon reduction potential can and should be rewarded by climate or carbon certificates. On the one hand, this could be seen as an innovative and promising way of financing future agroforestry systems; on the other hand, it must be ensured that the measures meet minimum scientific and social requirements. If planned scientifically sound, reliable, transparent and ethically just, there is a good chance to create with climate certificates for agroforestry some contributing solutions for EUs ambitious climate target plan, a 55 percent greenhouse gas reduction by 2030 compared to 1990.

Literatur

1. Aertsens, J., De Nocker, L. & Gobin, A. (2013): Valuing the carbon sequestration potential for European agriculture. *Land Use Policy*, 31, 584-594, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2012.09.003>.
2. Albrecht, A. & Kandji, S. T. (2003): Carbon sequestration in tropical agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 99, 15-27, [https://doi.org/10.1016/s0167-8809\(03\)00138-5](https://doi.org/10.1016/s0167-8809(03)00138-5).
3. Axe, M. S., Grange, I. D. & Conway, J. S. (2017): Carbon storage in hedge biomass – A case study of actively managed hedges in England. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 250, 81-88, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.08.008>.
4. Bambrick, A. D., Whalen, J. K., Bradley, R. L., Cogliastro, A., Gordon, A. M., Olivier, A. & Thevathasan, N. V. (2010): Spatial heterogeneity of soil organic carbon in tree-based intercropping systems in Quebec and Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 79, 343-353, <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9305-z>.
5. Böhm, C. & Hübner, R. (Hrsg.): (2020a): Bäume als Bereicherung für landwirtschaftliche Flächen: Ein Innovationskonzept für die verstärkte Umsetzung der Agroforstwirtschaft in Deutschland, Cottbus: IG AUFWERTEN.
6. Böhm, C., Kanzler, M. & Pecenka, R. (2020b): Untersuchungen zur Ertragsleistung (Land Equivalent Ratio) von Agroforstsystemen. In: Böhm, C. (Hrsg.): AUFWERTEN Loseblattsammlung, Cottbus: BTU Cottbus-Senftenberg.
7. Böhm, C., Tsonkova, P., Mohr, T., Schröder, C., Lorenz, C., Ludewig, M., Bösel, B., Dommel, J., Wagner, N. & Domin, T. (2020c): Konzept zur Förderung von Agroforstflächen als Agrarumwelt- und Klimamaßnahme (AUKM) im Rahmen des Kulturlandschaftsprogramms (KULAP) des Landes Brandenburg.
8. Boinot, S., Poulmarc'h, J., Mézière, D., Lauri, P.-É. & Sarthou, J.-P. (2019): Distribution of overwintering invertebrates in temperate agroforestry systems: Implications for biodiversity conservation and biological control of crop pests. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 285, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106630>.
9. Burger, F. & Schweier, J. (2018): Energieeffizienz und Ökobilanz, In: Veste, M. & Böhm, C. (Hrsg.): Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Springer Verlag.
10. Burschel, P., Kürsten, E. & Larson, B. C. (1993): Die Rolle von Wald und Forstwirtschaft im Kohlenstoffhaushalt – Eine Betrachtung für die Bundesrepublik Deutschland. *Forstl. Forschungsberichte München*, 126, 135.
11. Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B. G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E. & Chenu, C. (2017): Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 236, 243-255, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>.
12. Cardinael, R., Mao, Z., Prieto, I., Stokes, A., Dupraz, C., Kim, J. H. & Jourdan, C. (2015): Competition with winter crops induces deeper rooting of walnut trees in a Mediterranean alley cropping agroforestry system. *Plant and Soil*, 391, 219-235, <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2422-8>.
13. Cardinael, R., Umulisa, V., Toudert, A., Olivier, A., Bockel, L. & Bernoux, M. (2018): Revisiting IPCC Tier 1 coefficients for soil organic and biomass carbon storage in agroforestry systems. *Environmental Research Letters*, 13, <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab5f>.
14. Chatterjee, N., Nair, P. K. R., Chakraborty, S. & Nair, V. D. (2018): Changes in soil carbon stocks across the Forest-Agroforest-Agriculture/Pasture continuum in various agroecological regions: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 266, 55-67, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.07.014>.
15. COWI, Ecologic Institute & IEEP (2021): Technical Guidance Handbook – setting up and implementing result-based carbon farming mechanisms in the EU Report to the European Commission, DG Climate Action, under Contract No. CLIMA/C.3/ETU/2018/007. In: COWI (Hrsg.), Kongens, Lyngby.

16. D'Hervilly, C., Marsden, C., Capowiez, Y., Béral, C., Delapré-Cosset, L. & Bertrand, I. (2021): Trees and herbaceous vegetation strips both contribute to changes in soil fertility and soil organism communities in an agroforestry system. *Plant and Soil*, 463, 537-553, <https://doi.org/10.1007/s11104-021-04932-x>.
17. De Stefano, A. & Jacobson, M. G. (2017): Soil carbon sequestration in agroforestry systems: a meta-analysis. *Agroforestry Systems*, 92, 285-299, <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>.
18. Dieter, M. & Elsasser, P. (2002): Carbon Stocks and Carbon Stock Changes in the Tree Biomass of Germany's Forests. Kohlenstoffvorräte und -veränderungen in der Biomasse der Waldbäume in Deutschland. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 121, 195-210, <https://doi.org/10.1046/j.1439-0337.2002.02030.x>.
19. Drexler, S., Gensior, A. & Don, A. (2021): Carbon sequestration in hedgerow biomass and soil in the temperate climate zone. *Regional Environmental Change*, 21, <https://doi.org/10.1007/s10113-021-01798-8>.
20. European Commission – DG CLIMA (2020): Agroforestry and woody landscape features – a case study on carbon farming – draft case study. Kongens Lyngby: COWI A/S.
21. European Parliament (2022): AMENDMENTS 001-082 by the Committee on the Environment, Public Health and Food Safety, Report - Ville Niinistö A9-0161/2022 - Land use, land use change and forestry (LULUCF) - Proposal for a regulation (COM(2021)0554 – C9-0320/2021 – 2021/0201(COD)).
22. Feliciano, D., Ledo, A., Hillier, J. & Nayak, D. R. (2018): Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 254, 117-129, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.11.032>.
23. Fiege, C., Germer, S., Pecenka, R., Schwarz, A. & Bischoff, W.-A. (2022): Rückbau von Kurzumtriebsplantagen in Ackernutzung: Bewertung der Kohlenstoffsenkenfunktion. *Feldtag ATB Potsdam*.
24. Germon, A., Cardinael, R., Prieto, I., Mao, Z., Kim, J., Stokes, A., Dupraz, C., Laclau, J.-P. & Jourdan, C. (2015): Unexpected phenology and lifespan of shallow and deep fine roots of walnut trees grown in a silvoarable Mediterranean agroforestry system. *Plant and Soil*, 401, 409-426, <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2753-5>.
25. Gholizadeh, A., Neumann, C., Chabrilat, S., van Wesemael, B., Castaldi, F., Borůvka, L., Sanderman, J., Klement, A. & Hohmann, C. (2021): Soil organic carbon estimation using VNIR–SWIR spectroscopy: The effect of multiple sensors and scanning conditions. *Soil and Tillage Research*, 211, <https://doi.org/10.1016/j.still.2021.105017>.
26. Gold Standard Foundation (2021): Homepage [Online]. URL: <https://www.goldstandard.org/> [Abfragedatum: 03.08.2021].
27. Grote, R., Schuck, J., Block, J. & Pretzsch, H. (2003): Oberirdische holzige Biomasse in Kiefern-/Buchen- und Eichen-/Buchen-Mischbeständen. *Forstwissenschaftliches Centralblatt*, 122, 287–301, <https://doi.org/10.1007/s10342-003-0006-2>.
28. Hackenberg, J., Morhart, C., Sheppard, J., Spiecker, H. & Disney, M. (2014): Highly Accurate Tree Models Derived from Terrestrial Laser Scan Data: A Method Description. *Forests*, 5, 1069-1105, <https://doi.org/10.3390/f5051069>.
29. Hartmann, T., Vöhringer, M., Mielke, S., Mannigel, E. & Hörmann, S. (2011): Investieren in Waldklimaprojekte – Leitlinien für Unternehmen und private Investoren. OroVerde – Die Tropenwaldstiftung, Global Nature Fund (GNF).
30. Hawken, P. (Hrsg.): (2017): Project Drawdown: The most comprehensive plan ever proposed to reverse global warming, New York: Penguin Books.
31. Hellebrand, H., Scholz, V. & Kern, J. (2008): Fertiliser induced nitrous oxide emissions during energy crop cultivation on loamy sand soils. *Atmospheric Environment*, 42, 8403-8411, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2008.08.006>.
32. Hübner, R. (2021): Den Wald aufs Feld holen: Agroforstwirtschaft als Option für die Landwirtschaft der Zukunft auch in Deutschland, *Der kritische Agrarbericht 2021*. ABL Verlag.

33. Hübner, R., Kühnel, A., Lu, J., Dettmann, H., Wang, W. & Wiesmeier, M. (2021a): Soil carbon sequestration by agroforestry systems in China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 315, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107437>.
34. Hübner, R., Zehlius-Eckert, W. & Augenstein, I. (2021b): Agroforst und Landschaftsbild – Teil 2: Expertensicht – Expertenbasierte Bewertung der visuellen Auswirkungen nach der Methode Wöbse. In: Böhm, C. (Hrsg.): AUFWERTEN Loseblattsammlung, Freising: Technische Universität München.
35. IPCC (2006): IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories – Volume 4. Agriculture, Forestry and Other Land Use.
36. IPCC (2007): Climate change 2007: synthesis report, In: Core Writing Team, Pachauri, R. K. & Reisinger, A. (Hrsg.): Contribution of working groups I, II and III to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change. Geneva: IPCC.
37. IPCC (2019): Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems. In: Shukla, P. R., Skea, J., Buendia, E. C., Masson-Delmotte, V., Pörtner, H.-O., Roberts, D. C., Zhai, P., Slade, R., Connors, S., Diemen, R. v., Ferrat, M., Haughey, E., Luz, S., Neogi, S., Pathak, M., Petzold, J., Pereira, J. P., Vyas, P., Huntley, E., Kissick, K., Belkacemi, M. & Malley, J. (Hrsg.).
38. Jacobs, A., Heidecke, C., Jumshudzade, Z., Osterburg, B., Paulsen, H. M. & Poeplau, C. (2020): Soil organic carbon certificates – potential and limitations for private and public climate action. *Landbauforschung-Journal of Sustainable and Organic Agricultural Systems*, 70, 31-35, <https://doi.org/10.3220/Lbf1605778405000>.
39. Kaeser, A., Palma, J., Sereke, F. & Herzog, F. (2010): Umweltleistungen von Agroforstwirtschaft. ART-Bericht, 736.
40. Kanzler, M., Böhm, C., Domin, T. & Freese, D. (2021): Energy balance and greenhouse gas emissions in an agroforestry system - a case study from Eastern Germany. *Agroecology and Sustainable Food Systems*, 45, 868-891, <https://doi.org/10.1080/21683565.2021.1871697>.
41. Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J. H. N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M. L., Paris, P., Roces-Díaz, J. V., Rolo, V., Rosati, A., Sandor, M., Smith, J., Szerencsits, E., Varga, A., Viaud, V., Wawer, R., Burgess, P. J. & Herzog, F. (2019): Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy*, 83, 581-593, <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>.
42. Kern, J. & Don, A. (2018): Emissionen von klimarelevanten Gasen aus Agrarholzanpflanzungen, In: Veste, M. & Böhm, C. (Hrsg.): Agrarholz – Schnellwachsende Bäume in der Landwirtschaft. Berlin, Heidelberg: Springer Spektrum.
43. Kim, D.-G., Kirschbaum, M. U. F. & Beedy, T. L. (2016): Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 226, 65-78, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.04.011>.
44. Klemmt, H.-J., Seifert, S. & Seifert, T. (2011): Baumbeschreibung per Laserstrahl – Forstwissenschaftler erfassen mit Hilfe terrestrischer Laserscanner Formmerkmale von Bäumen. *LWF aktuell*, 81, 25.
45. Kramer, H. & Akça, A. (1982): Leitfaden für Dendrometrie und Bestandesinventur, Frankfurt, Sauerländers Verlag.
46. Kühne, S. (2018): Hecken und Raine in der Agrarlandschaft - Bedeutung - Anlage - Pflege, BLE.
47. Kürsten, E. & Burschel, P. (1993): CO₂-mitigation by agroforestry. *Water, Air and Soil Pollution*, 70, 533-544.
48. Lawson, G. (2022): 8. Agroforestry for Carbon Farming – EURAF Policy Briefing No 8, September 2020, Sections 3 and 4 added April 2022.
49. Lehmann, L. M., Smith, J., Westaway, S., Pisanelli, A., Russo, G., Borek, R., Sandor, M., Gliga, A., Smith, L. & Ghaley, B. B. (2020): Productivity and Economic Evaluation of Agroforestry Systems for Sustainable Production of Food and Non-Food Products. *Sustainability*, 12, <https://doi.org/10.3390/su12135429>.

50. Leifeld, J., Müller, A. & Steffens, M. (2019): Kriterien für die Zertifizierung von Kohlenstoffsinken in Landwirtschaftsböden. *Agrarforschung Schweiz*, 10, 346-349.
51. Lorenz, K. & Lal, R. (2014): Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34, 443-454, <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-Y>.
52. Ma, Z., Chen, H. Y. H., Bork, E. W., Carlyle, C. N., Chang, S. X. & Fortin, J. (2020): Carbon accumulation in agroforestry systems is affected by tree species diversity, age and regional climate: A global meta-analysis. *Global Ecology and Biogeography*, 29, 1817-1828, <https://doi.org/10.1111/geb.13145>.
53. Mayer, S., Wiesmeier, M., Sakamoto, E., Hübner, R., Cardinael, R., Kühnel, A. & Kögel-Knabner, I. (2022): Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>.
54. McDonald, H., Frelih-Larsen, A., Lóránt, A., Laurens Duin, Andersen, S. P., Costa, G. & Bradley, H. (2021): Carbon farming – Making agriculture fit for 2030 – Study for the committee on Environment, Public Health and Food Safety (ENVI). Luxembourg: Policy Department for Economic, Scientific and Quality of Life Policies, European Parliament.
55. Millar, N., Robertson, G. P. & Diamant, A. (2013): Quantifying N₂O emissions reductions in US agricultural crops through N fertilizer rate reduction. Verified Carbon Standard - Michigan State University.
56. Mokany, K., Raison, R. J. & Prokushkin, A. S. (2006): Critical analysis of root : shoot ratios in terrestrial biomes. *Global Change Biology*, 12, 84-96, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2005.001043.x>.
57. Montagnini, F. & Nair, P. K. R. (2004): Carbon sequestration: An underexploited environmental benefit of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 61-62, 281-295, <https://doi.org/10.1023/b:Agfo.0000029005.92691.79>.
58. Nabuurs, G.-J., Arets, E. J. M. M. & Schelhaas, M.-J. (2017): European forests show no carbon debt, only a long parity effect. *Forest Policy and Economics*, 75, 120-125, <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2016.10.009>.
59. Nair, P. K. R. (2012): Climate Change Mitigation: A low-hanging fruit of agroforestry, In: Nair, P. K. R. & Garrity, D. (Hrsg.): *Agroforestry – The Future of Global Land Use*. Dordrecht: Springer.
60. Nyssens, C. (2021): *Carbon Farming for Climate, Nature, and Farmers*. EEB.
61. Offenthaler, I. & Hochbichler, E. (2006): Estimation of root biomass of Austrian forest tree species. *Austrian Journal of Forest Science*, 123, 65-86.
62. Powelson, D. S., Whitmore, A. P. & Goulding, K. W. T. (2011): Soil carbon sequestration to mitigate climate change: a critical re-examination to identify the true and the false. *European Journal of Soil Science*, 62, 42-55, <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2010.01342.x>.
63. Pretzsch, H. (2019): *Grundlagen der Waldwachstumsforschung*.
64. Ramachandran Nair, P. K., Mohan Kumar, B. & Nair, V. D. (2009): Agroforestry as a strategy for carbon sequestration. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 172, 10-23, <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>.
65. Reyes, F., Gosme, M., Wolz, K. J., Lecomte, I. & Dupraz, C. (2021): Alley Cropping Mitigates the Impacts of Climate Change on a Wheat Crop in a Mediterranean Environment: A Biophysical Model-Based Assessment. *Agriculture*, 11, <https://doi.org/10.3390/agriculture11040356>.
66. Roedel, A. (2010): Production and energetic utilization of wood from short rotation coppice—a life cycle assessment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 15, 567-578, <https://doi.org/10.1007/s11367-010-0195-0>.
67. Röhle, H., Ali, W., Hartmann, K.-U. & Steinke, C. (2010): Wachstum und Biomasseproduktion schnellwachsender Baumarten im Kurzumtrieb., In: Bemann, A. & Knust, C. (Hrsg.): *AGROWOOD - Kurzumtriebsplantagen in Deutschland und europäische Perspektiven*. Berlin: Weißensee Verlag.
68. Rüter, S. (2017): *Der Beitrag der stofflichen Nutzung von Holz zum Klimaschutz – Das Modell WoodCarbonMonitor*. PhD, Technische Universität München.

69. Rüter, S., Werner, F., Forsell, N., Prins, C., Vial, E. & Levet, A.-L. (2016): ClimWood2030 'Climate benefits of material substitution by forest biomass and harvested wood products: Perspective 2030' Final Report. Thünen Report, Braunschweig: Johann Heinrich von Thünen-Institut.
70. Sathre, R. & O'Connor, J. (2010): Meta-analysis of greenhouse gas displacement factors of wood product substitution. *Environ Sci Policy*, 13, 104–114.
71. Schlamadinger, B. & Marland, G. (1996): The role of forest and bioenergy strategies in the global carbon cycle. *Biomass and Bioenergy*, 10, 275–300.
72. Schoeneberger, M. M. (2008): Agroforestry: working trees for sequestering carbon on agricultural lands. *Agroforestry Systems*, 75, 27-37, <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9123-8>.
73. Seserman, D.-M., Freese, D., Swieter, A., Langhof, M. & Veste, M. (2019): Trade-Off between Energy Wood and Grain Production in Temperate Alley-Cropping Systems: An Empirical and Simulation-Based Derivation of Land Equivalent Ratio. *Agriculture*, 9, <https://doi.org/10.3390/agriculture9070147>.
74. Shi, L., Feng, W., Xu, J. & Kuzyakov, Y. (2018): Agroforestry systems: Meta-analysis of soil carbon stocks, sequestration processes, and future potentials. *Land Degradation & Development*, 29, 3886-3897, <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>.
75. Stavi, I. & Lal, R. (2012): Agroforestry and biochar to offset climate change: a review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33, 81-96, <https://doi.org/10.1007/s13593-012-0081-1>.
76. Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P. J., Moreno, G. & Plieninger, T. (2016): Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 230, 150-161, <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>.
77. Trendelenburg, R. (1939): *Das Holz als Rohstoff*, München, Lehmanns Verlag.
78. Tsonkova, P., Böhm, C., Hübner, R. & Ehritt, J. (2019): Assessing multiple ecosystem functions of linear woody-features in the agricultural landscape. In: Dupraz, C., Gosme, M. & Lawson, G. (Hrsg.): *Agroforestry: strengthening links between science, society and policy*, Montpellier, France.
79. Twistel, G. & Röhricht, C. (2000): Erfassung des Potenzials an land- und forstwirtschaftlicher Biomasse zur stofflich/energetischen Nutzung für unterschiedliche Verwaltungseinheiten des Freistaates Sachsen. Schriftenreihe der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft: Sächsische Landesanstalt für Landwirtschaft.
80. UBA (2021): *Berichterstattung unter der Klimarahmenkonvention der Vereinten Nationen und dem Kyoto-Protokoll 2021 - Nationaler Inventarbericht zum Deutschen Treibhausgasinventar 1990 – 2019*. In: Günther, D. & Gniffke, P. (Hrsg.), Dessau-Roßlau: Umweltbundesamt.
81. Unseld, R., Reppin, N., Eckstein, K., Zehlius-Eckert, W., Hoffmann, H. & Huber, T. (2011): *Leitfaden Agroforstsysteme – Möglichkeiten zur naturschutzgerechten Etablierung von Agroforstsystemen*. Bundesamt für Naturschutz.
82. WBAE (2019): *Zur effektiven Gestaltung der Agrarumwelt- und Klimaschutzpolitik im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik der EU nach 2020 - Stellungnahme des Wissenschaftlichen Beirats für Agrarpolitik, Ernährung und gesundheitlichen Verbraucherschutz beim Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft*.
83. WBGU (2020): *Landwende im Anthropozän: Von der Konkurrenz zur Integration*. In: *Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg.)*, Berlin: WBGU.
84. Weisser, D. (2007): A guide to life-cycle greenhouse gas (GHG) emissions from electric supply technologies. *Energy*, 32, 1543-1559, <https://doi.org/10.1016/j.energy.2007.01.008>.
85. Wiesmeier, M., Baumert, V., Bull, I., Flaig, H., Koch, D., Ullmann, E., Wulffen, U. v., Zederer, D. P. & Zimmer, J. (2021): Grundsätze der Humuswirtschaft – Humuszertifikate. In: Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) (Hrsg.): *Arbeitsfeld „Pflanzenbauliche Aspekte der Humusproduktion“ im Verbund der Landesanstalten und Landesämter für Landwirtschaft*.
86. Wiesmeier, M., Hubner, R. & Kogel-Knabner, I. (2015): Stagnating crop yields: An overlooked risk for the carbon balance of agricultural soils? *Sci Total Environ*, 536, 1045-1051, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.07.064>.

87. Wiesmeier, M., Hübner, R., Spörlein, P., Geuß, U., Hangen, E., Reischl, A., Schilling, B., von Lützw, M. & Kögel-Knabner, I. (2014): Carbon sequestration potential of soils in southeast Germany derived from stable soil organic carbon saturation. *Glob Chang Biol*, 20, 653-65, <https://doi.org/10.1111/gcb.12384>.
88. Wiesmeier, M., Mayer, S., Burmeister, J., Hübner, R. & Kögel-Knabner, I. (2020a): Feasibility of the 4 per 1000 initiative in Bavaria: A reality check of agricultural soil management and carbon sequestration scenarios. *Geoderma*, 369, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114333>.
89. Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Steffens, M. & Kögel-Knabner, I. (2020b): CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes Series*.
90. Wiesmeier, M., Mayer, S., Paul, C., Helming, K., Don, A., Franko, U., Steffens, M. & Kögel-Knabner, I. (2020c): CO₂ certificates for carbon sequestration in soils: methods, management practices and limitations. <https://doi.org/10.20387/BonaRes-NEOG-CE98>.
91. Wilhelm, E.-G., Mähler, P., Nych, F. & Winter, S. (2015): Kurzumtriebsplantagen im Spannungsfeld erneuerbarer Energien. *NuL*, 47, 037-042.
92. Wolters, S., Schaller, S. & Götz, M. (2018): Freiwillige CO₂-Kompensation durch Klimaschutzprojekte. In: Umweltbundesamt (Hrsg.).
93. Zepp, S., Heiden, U., Bachmann, M., Wiesmeier, M., Steininger, M. & van Wesemael, B. (2021): Estimation of Soil Organic Carbon Contents in Croplands of Bavaria from SCMaP Soil Reflectance Composites. *Remote Sensing*, 13, <https://doi.org/10.3390/rs13163141>.
94. Zukunftskommission Landwirtschaft (2021): Zukunft Landwirtschaft. Eine gesamtgesellschaftliche Aufgabe Empfehlungen der Zukunftskommission Landwirtschaft.

Anschrift der AutorInnen

Dr. Rico Hübner

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung, Technische Universität München (TUM)

Emil-Ramann-Straße 6

85354 Freising

E-Mail: rico.huebner@tum.de

Dr. Christian Böhm

Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg (BTU)

Konrad-Wachsmann-Allee 6

03046 Cottbus

E-Mail: boehmc@btu.de

Dr. Georg Eysel-Zahl

VRD Stiftung für Erneuerbare Energien

Heinrich-Fuchs-Str. 94

69126 Heidelberg

E-Mail: gez@vrd-stiftung.org

Wolfram Kudlich

WALD21 GmbH

Friedrich-Ebert-Straße 13

97215 Uffenheim

E-Mail: kudlich@wald21.com

Dr. Ernst Kürsten

3N Dienstleistungen GmbH

An den Papenstücken 2

30455 Hannover

E-Mail: ek@wood-report.de

Prof. Dr. Norbert Lamersdorf

Büsgen-Institut Ökopedologie der gemäßigten Zonen, Georg-August-Universität Göttingen

Büsgenweg 2

37077 Göttingen

E-Mail: nlamers@gwdg.de

Christoph A. Meixner
Triebwerk – Regenerative Land- und Agroforstwirtschaft
Im Rothenbach 49
37290 Meißner
E-Mail: christoph.meixner@relawi.org

Dr. Christopher Morhart
Professur für Waldwachstum und Dendroökologie, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg
Tennenbacher Str. 4
79106 Freiburg
E-Mail: Christopher.Morhart@iww.uni-freiburg.de

Tobias Peschel
Lignovis GmbH
Tietzestr. 29
22587 Hamburg
E-Mail: tobias.peschel@lignovis.com

Dr. Penka Tsonkova
Lehrstuhl für Bodenschutz und Rekultivierung, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-
Senftenberg (BTU)
Konrad-Wachsmann-Allee 6
03046 Cottbus
E-Mail: penka.tsonkova@b-tu.de

PD Dr. Martin Wiesmeier
Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), Institut für Agrarökologie Ökologischen Landbau und
Bodenschutz (IAB)
Emil-Ramann-Straße 2
85354 Freising
E-Mail: martin.wiesmeier@lfl.bayern.de