

Prüfung der Eignung von Agroforstsystemen als Maßnahme der produktionsintegrierten Kompensation und Erarbeitung eines Vor- schlages für die Integration von Agroforst- systemen in die Biotopwertlisten für die Ein- griffsregelung.

Wissenschaftliche Arbeit zur Erlangung des Grades
M.Sc. Naturschutz und Landschaftsplanung
an der TUM School of Life Science der Technischen Universität München.

Betreut von Dr. agr. Wolfgang Zehlius-Eckert
Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung

Eingereicht von Sarah Marie Namockel
Schönaugasse 10, Top 7
A - 8010 Graz
+43 677 64887584

Eingereicht am 22.03.2025 in München

IMPRESSUM

Wissenschaftliche Arbeit zum Erlangen des Titels M.Sc. Naturschutz und Landschaftsplanung:

Eignung von Agroforstsystemen als Maßnahme der produktionsintegrierten Kompensation

Sarah Marie Namockel

03731396

Betreuung

Technische Universität München

TUM School of Life Science

Lehrstuhl für Strategie und Management der Landschaftsentwicklung

Dr. agr. Wolfgang Zehlius-Eckert

ZUSAMMENFASSUNG

Agroforstsysteme stellen eine moderne, multifunktionale Art der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung unter der Integration von Gehölzen dar. Positive Effekte auf die ökosystemaren Kreisläufe und Funktionen konnten bereits von vielen Autor*innen gezeigt werden. Ziel dieser Arbeit ist die Feststellung der Eignung von silvoarablen Agroforstsystemen im Allee-Anbau als funktionsidentische, produktionsintegrierte Kompensationsmaßnahme (i.S.d. § 11 Abs. 1 BKompV) für die natürlichen Bodenfunktionen, im speziellen die natürliche Bodenfruchtbarkeit und die Filter- und Pufferfunktionen des Bodens. Im Rahmen einer standardisierten Literaturrecherche konnte belegt werden, dass silvoarable Agroforstsysteme eine nachhaltige Bewirtschaftungsmaßnahme auf Ackerflächen zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit der natürlichen Bodenfunktionen darstellen. Unter den Gehölzstreifen der silvoarablen Systeme wird im Vergleich zur konventionellen Landwirtschaft der organische Bodenkohlenstoff (organische Substanz) angereichert, die Bodenstruktur stabilisiert und die bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften durch eine erhöhte und tiefere Durchwurzelung verbessert. In Kombination mit einer permanenten Vegetationsdecke wird die Erosion durch Wind und Wasser verringert. Dadurch werden Austräge von organischer Substanz, Nährstoffen und Schadstoffen im Oberboden zusätzlich reduziert sowie Oberflächengewässer vor Sedimentation oder stofflichen Einträgen geschützt. Nähr- und Schadstoffe verbleiben über einen längeren Zeitraum in der Bodenlösung und können so zu einem größeren Anteil durch die Pflanzen aufgenommen oder an Bodenpartikel gebunden werden. Ein verbessertes Mikroklima, der erhöhte Biomasseeintrag und die ausbleibende Bodenbearbeitung innerhalb der Gehölzstreifen fördern die Aktivität von Bodenorganismen. Insbesondere durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität werden Nährstoffmineralisation und Zersetzungsprozesse gefördert, was zur langfristigen Verbesserung der Bodenqualität, insbesondere hinsichtlich der Fruchtbarkeit und ökosystemaren Resilienz, beiträgt. Darüber hinaus wurden systemabhängige Komponenten des silvoarablen Designs und der Bewirtschaftung identifiziert, wodurch ein zielgerichteter Einsatz von silvoarablen Systemen als produktionsintegrierte Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme zur Kompensation der natürlichen Bodenfunktionen ermöglicht wird. Auf Grundlage dieser Erkenntnisse wurde eine Empfehlung zur Integration von Agroforstsystemen in die Bundeskompensationsverordnung als produktionsintegrierte Kompensationsmaßnahme (Anlage 6 Abschnitt A BKompV) entwickelt. Dazu wurde vorab ein Vorschlag der „Agroforstsysteme“ (41.09a) als Biotoptypen für die Aufnahme in die Liste der Biotoptypen und -werte (Anlage 2 BKompV) eingeführt.

Des Weiteren wurde aufgrund des Defizits hinsichtlich der Gleichbehandlung von Eingriffen im Rahmen der Ermittlung des Kompensationsbedarfs und -umfangs der funktionspezifischen Maßnahmen eine teilformalisierte Methode zu Ermittlung der funktionsidentischen Kompensation für die natürlichen Bodenfunktionen ausgearbeitet. Dies schafft einen quantifizierten Bewertungsrahmen und erhöht die Gleichbehandlung und Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen unter Berücksichtigung der naturräumlichen Charakteristika und der Einzelfallentscheidung im bundesweiten Vergleich.

ABSTRACT

Agroforestry systems represent a modern, multifunctional approach to agricultural land management that integrates woody plants. Numerous studies have demonstrated their positive effects on ecosystem cycles and functions. The objective of this study is to assess the suitability of silvoarable Alley-Cropping agroforestry systems as functionally equivalent, production-integrated compensation measures (pursuant to § 11 (1) BKompV) for natural soil functions, particularly natural soil fertility as well as the filtering and buffering functions of the soil.

A standardized literature review confirmed that silvoarable agroforestry systems constitute a sustainable management practice for arable land that enhances the functionality of natural soil functions. Compared to conventional agriculture, the tree strips in silvoarable systems contribute to the accumulation of soil organic carbon (organic matter), stabilization of soil structure, and improvement of soil chemical and physical properties through enhanced and deeper root penetration. In combination with permanent vegetation cover, wind and water erosion are reduced, which in turn minimizes the export of organic matter, nutrients, and pollutants from the topsoil and protects surface waters from sedimentation and contaminant influx. Nutrients and pollutants remain in the soil solution for an extended period, increasing their uptake by plants or their adsorption to soil particles. An improved microclimate, increased biomass input, and the absence of soil tillage within the tree strips promote soil organism activity. In particular, enhanced microbial activity fosters nutrient mineralization and decomposition processes, contributing to the long-term improvement of soil quality, particularly in terms of fertility and ecosystem resilience. Furthermore, system-specific components of silvoarable agroforestry design and management were identified, enabling the targeted application of silvoarable systems as production-integrated management and maintenance measures to compensate for natural soil functions.

Based on these findings, a recommendation was developed for the integration of agroforestry systems into the Federal Compensation Ordinance (BKompV) as a production-integrated compensation measure (Annex 6, Section A BKompV). To this end, a proposal was introduced to classify "agroforestry systems" (41.09a) as biotope types for inclusion in the list of biotope types and values (Annex 2 BKompV). Additionally, due to the lack of equal treatment in assessing the compensation requirements and scope of function-specific measures, a partially formalized method was developed to determine functionally equivalent compensation for natural soil functions. This approach establishes a quantified evaluation framework, ensuring greater equity and proportionality in the implementation of measures while considering the natural spatial characteristics and case-specific decisions in a nationwide comparison.

INHALTSVERZEICHNIS

I.	ABBILDUNGSVERZEICHNIS.....	I
II.	TABELLENVERZEICHNIS.....	I
III.	ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS	II
1	EINLEITUNG	1
2	METHODIK	14
3	ERGEBNISSE UND DISKUSSION.....	18
3.1	DURCHWURZELUNG	18
3.1.1	Ergebnisse.....	18
3.1.1	Diskussion	20
3.2	ORGANISCHE BODENSUBSTANZ UND SOC-GEHALT.....	20
3.2.1	Ergebnisse.....	20
3.2.2	Diskussion	23
3.3	BODENGEFÜGE	28
3.3.1	Ergebnisse.....	28
3.3.2	Diskussion	29
3.4	BODENFEUCHTE.....	30
3.4.1	Ergebnisse.....	30
3.4.2	Diskussion	31
3.5	EROSION UND BODENVERLUSTE.....	33
3.5.1	Ergebnisse.....	33
3.5.2	Diskussion	33
3.6	NÄHRSTOFFVERFÜGBARKEIT.....	35
3.6.1	Ergebnisse.....	35
3.6.2	Diskussion	36
3.7	SCHADSTOFFRÜCKHALT	38
3.7.1	Ergebnisse.....	38
3.7.2	Diskussion	39
3.8	ÖKOSYSTEMFUNKTIONEN	40
3.8.1	Ergebnisse.....	40
3.8.2	Diskussion	42
3.9	ZWISCHENFAZIT	43
4	SCHLUSSFOLGERUNG FÜR AF-SYSTEME IM RAHMEN DER BKOMPV.....	45

4.1	BIOTOPTYPEN SILVOARABLE GEHÖLZSTREIFEN IM ALLEE-ANBAU-SYSTEM (ANLAGE 2 BKOMPV)	45
4.2	BEWIRTSCHAFTUNGS- ODER PFLEGEMAßNAHMEN SILVOARABLE GEHÖLZSTREIFEN AUF ACKER (ANLAGE 6 ABSCHNITT A BKOMPV)	47
4.3	HALBFORMALISIERTE FUNKTIONSSPEZIFISCHE KOMPENSATION.....	49
4.3.1	Bewertung des Eingriffs.....	51
4.3.2	Ermittlung des Kompensationsbedarfs	52
4.3.3	Ermittlung des Umfangs der Kompensationsmaßnahme	53
4.4	DISKUSSION.....	56
5	FAZIT	59
IV.	LITERATURVERZEICHNIS	62

I. ABBILDUNGSVERZEICHNIS

Abbildung 1: Beispielhafter Auszug aus Anlage 6 Abschnitt A "Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahmen BKompV (Anlage 6 Abschnitt A BKompV).....	4
Abbildung 2: Schematische Darstellung der Systemdesigns der silvoarablen Systeme zur Energieholzproduktion (oben) und zur Obst- und Stammholzproduktion (unten) im Allee-Anbau.....	6
Abbildung 3: Übersicht über das methodische Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit (n = Anzahl der Studien)	14

II. TABELLENVERZEICHNIS

Tabelle 1: Schutzgüter und Funktionen der Anlage 1 Spalten 1 & 2 BKompV sowie der erwartete naturschutzfachlich positive Einfluss von Agroforstsystemen auf diese. Die prognostizierten Effekte basieren auf den Kenntnissen von (Nawroth et al., 2019; Zehlius-Eckert et al., 2020)	8
Tabelle 2: Erwartete positive Effekte auf die Funktionen und deren Indikatoren durch die Etablierung der Gehölze, abgeleitet nach Amelung et al. (2018), Nawroth et al. (2019) und Zehlius-Eckert et al. (2020). Sie stellen gleichfalls die Hypothesen dar.	11
Tabelle 3: Suchbegriffe und Reihung der detaillierten und offenen Suchabfragen in Web of Science (CC) vom 27.12.2024.	16
Tabelle 4: Ausgewertete Meta-Studien und Reviews im Überblick. Angaben zur Art, Anzahl der ausgewerteten Studien, Klima- beziehungsweise biogeographische Regionen, der geographischen Ausdehnung, der ausgewerteten AF-Systeme und den Komponenten sowie Ökosystemleistungen (MA = Meta-Analys, ÖS = Ökosystemleistungen).	19
Tabelle 5: Ermittlung der Biotoptypenwerte von silvoarablen Systemen im Allee-Anbausystem in differenzierten Typen und altersbedingter Ausprägung. Da silvoarable Agroforstsysteme bisher nicht in der Roten Liste der Biotoptypen Deutschlands (Finck et al., 2017) geführt werden, wurde entsprechend der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, S. 15) ein Grundwert der ZD1 ermittelt.	46
Tabelle 6: Vorschlag zur Aufnahme der silvoarablen Agroforstsysteme in die Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen der Anlage 6 Abschnitt A BKompV (X = Eignung; (X) = Eignung unter Vorbehalt; - = keine Eignung).....	48
Tabelle 7: Bewertungsrahmen natürliche Bodenfunktionen: Regler- und Speicherfunktion, Filter- und Pufferfunktion, natürliche Bodenfruchtbarkeit (Mengel et al. 2018, S. 126).....	51
Tabelle 8: Bewertungsmatrix zur "Feststellung der Schwere der zu erwartenden Beeinträchtigung" Anlage 3 BKompV (eB = erhebliche Beeinträchtigung; eBS = erhebliche Beeinträchtigung besonderer Schwere).	52
Tabelle 9: Maßnahmen zur Kompensation der erheblichen Beeinträchtigung besonderer Schwere von natürlichen Bodenfunktionen inklusive deren Quantifizierung durch einen Funktionswert.	55

III. ABKÜRZUNGSVERZEICHNIS

AF	Agroforstwirtschaft
BauGB	Baugesetzbuch (in der aktuell gültigen Fassung)
BKompV	Bundeskompensationsverordnung (in der aktuell gültigen Fassung)
BNatSchG	Bundesnaturschutzgesetz (in der aktuell gültigen Fassung)
BVerwG	Bundesverwaltungsgericht
BWaldG	Bundeswaldgesetz (in der aktuell gültigen Fassung)
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
eBS	erhebliche Beeinträchtigung besonderer Schwere
efsi	effective size (Maß für Aussagekraft einer Beziehung zwischen Variablen oder Gruppen)
EGR	Naturschutzrechtliche Eingriffsregelung (gem. §§ 1a & 35 BauGB i. V. m. §§ 13 ff BNatSchG)
GAP	Gemeinsame Agrarpolitik
GAP-KondG	GAP-Konditionalitäten-Gesetz (in der aktuell gültigen Fassung)
KUP	Kurzumtriebsplantage
nE/vE	nach Eingriff / vor Eingriff
N ₂	molekularer Stickstoff / atmosphärischer Stickstoff
N ₂ O	Distickstoffmonoxid / Lachgas (wird als klimarelevantes Gas bei der Denitrifikation von Nitrat (NO ₃ ⁻) freigesetzt)
NH ₄ ⁺	Ammonium (pflanzenverfügbarer, anorganischer Stickstoff als Produkt im Zersetzungsprozess von organischer Substanz. Wirkt durch Oxidation zu Nitrit versauernd.)
ÖKVO	Ökokonto-Verordnung Baden-Württemberg (in der geltenden Fassung)
pF	beschreibt die Energie, mit dem das Bodenwasser gegen die Gravitation in der Bodenmatrix zurückgehalten wird
PIK	Produktionsintegrierte Kompensation
SOC	soil organic carbon (organischer Bodenkohlenstoff)
TBI	tree based intercropping (gehölzbasierter Zwischenfruchtanbau)
ZD	Zieldimension (i.S.d. § 1 Abs. 1 BNatSchG)

1 EINLEITUNG

EINFÜHRUNG INS THEMA

Die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung (EGR) gem. §§ 13 ff BNatSchG stellt eines der wichtigsten formellen Instrumente des Naturschutzes in Deutschland dar. Sie sichert den Schutz des natürlichen und kulturellen Erbes, der Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes sowie des Landschaftsbildes gem. § 1 BNatSchG im Rahmen von Bauvorhaben im unbebauten Bereich und bei der Aufstellung der Bauleitpläne (§§ 1a & 35 BauGB). Der allgemeine „Schutz von Natur und Landschaft“ ist in Deutschland gem. §§ 13 ff BNatSchG zu sichern. Ist eine erhebliche Beeinträchtigung von Natur und Landschaft durch einen anthropogenen Eingriff, wie ein Bauvorhaben, nicht zu vermeiden (vorrangig zu prüfen), ist diese in Form von Ausgleich- oder Ersatzmaßnahmen zu kompensieren (§§ 13 & 15 Abs. 1 & 2 BNatSchG). Ausgleichsmaßnahmen stellen Maßnahmen der Landschaftsplanung oder des Naturschutzes dar, welche die beeinträchtigte Funktion des Naturhaushaltes gleichartig wiederherstellt, während die Ersatzmaßnahme eine gleichwertige Wiederherstellung innerhalb des betroffenen Naturraumes zum Ziel hat (§ 15 Abs. 2 BNatSchG). Beide Maßnahmentypen werden im Folgenden unter sogenannten „Kompensationsmaßnahmen“ zusammengefasst. „Eingriffe in Natur und Landschaft im Sinne des Gesetzes sind Veränderungen der Gestalt oder Nutzung von Grundflächen oder Veränderungen des mit der belebten Bodenschicht in Verbindung stehenden Grundwasserspiegels, die die Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes oder das Landschaftsbild erheblich beeinträchtigen können“ (§ 14 Abs. 1 BNatSchG). Der Naturhaushalt wird gem. § 7 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG über die Naturgüter Boden, Wasser, Klima, Luft, Flora und Fauna sowie deren Wirkungsgefüge definiert. Die Umsetzung der EGR wurde in den Bundesländern über eigene Verordnungen, beispielsweise die Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV) oder die Ökokonto-Verordnung Baden-Württemberg (ÖKVO), fortgeschrieben. Zusätzliche Arbeitshilfen und Leitfäden, wie die Arbeitshilfen der Landesanstalt für Umwelt Bayern (LfU) (LfU, 2014), der Landesanstalt für Umwelt Baden-Württemberg (LUBW) (LUBW, 2024) oder dem Leitfaden zur „Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit“ (Bechler, 2010), konkretisieren die Ermittlung und Bewertung der Beeinträchtigung sowie mögliche Kompensationsmaßnahmen der Länder.

Seit 2020 gilt zusätzlich für länderübergreifende Bundesvorhaben, wie der Aus- und Neubau der Bahn, von Bundesstraßen, Wasserstraßen oder Energieleitungen, die Bundeskompensationsverordnung (BKompV) (BfN & BMU, 2021, S. 9). Sie konkretisiert und standardisiert die bestehenden gesetzlichen Verpflichtungen der EGR (§ 1 BKompV) bundesweit und vereinheitlicht diese länderübergreifend für die Planungen des Bundes (BMUV, 2020, www). Die Erfassung und Bewertung eines Eingriffs sowie die Ermittlung des Kompensationsbedarfes erfolgt für erhebliche Beeinträchtigungen von Biotopen gem. § 4 ff BKompV mit dem sogenannten Biotopwertverfahren (§ 5 BKompV). Die Biotoptypenwerte wurden in Anlehnung an die Rote Liste gefährdeter Biotoptypen Deutschlands (Finck et al., 2017) und in ihren Grundzügen nach der „Methodik der Eingriffsre-

gelung im bundesweiten Vergleich“ (Mengel et al., 2018) erstellt. Jedem gelisteten Biotoptyp wurde ein Biotoptypenwert von 0-24 zugeordnet (BfN & BMU, 2021, S. 13). Dieser ermittelt sich über eine Werteinstufung der Zieldimensionen (ZD) des § 1 Abs. 1 BNatSchG:

ZD 1: Sicherung des natürlichen und kulturellen Erbes

ZD 2: Leistung- und Funktionsfähigkeit der Naturgüter

ZD 3: Erleben und Wahrnehmen von Natur und Landschaft (BfN & BMU, 2021, S. 5)

Jenen Zieldimensionen wurden Wertstufen von 0-8 zugeordnet, welche im Anschluss durch Addition den Biotoptypenwert des jeweiligen Biotopes ergeben (BfN & BMU, 2021, S. 13). Zusätzlich können, je nach Ausstattung des Biotoptyps, bis zu 2 Zusatzpunkte pro Zieldimension addiert oder bis zu 2 Minuspunkte für die ZD 2 subtrahiert werden (BfN & BMU, 2021, S. 15 ff). Anlage 2 BKompV (zu § 5 Abs. 1 BKompV) umfasst die Liste der Biotoptypen, inklusive ihres Biotopwertes. Der Kompensationsbedarf für einen Eingriff, der ein Biotop erheblich beeinträchtigt, wird berechnet, indem die Differenz zwischen dem Biotoptypwert vor und nach dem Eingriff mit der voraussichtlich betroffenen Fläche multipliziert wird (§ 7 Abs. 1 Nr. 1 BKompV). Mittelbare Beeinträchtigungen werden über die Multiplikation des Biotopwertes im Ist-Zustand mit der beeinträchtigten Fläche und dem Faktor gem. § 5 Abs. 4 BKompV (0,1 – 1/ gering – hoch) ermittelt (§ 7 Abs. 1 Nr. 2 BKompV). Eine erhebliche Beeinträchtigung gilt gem. § 8 BKompV als kompensiert, wenn innerhalb eines angemessenen Zeitraums im betroffenen Naturraum eine Aufwertung des Landschaftsbildes oder des Naturhaushaltes (i.S.d. § 1 BNatSchG) in Höhe des ermittelten Kompensationsbedarfes erfolgt.

Die Ermittlung des funktionsspezifischen Kompensationsbedarfs, also infolge einer erheblichen Beeinträchtigung besonderer Schwere der Naturgüter Boden, Wasser, Klima, Luft erfolgt verbal-argumentativ (§ 7 Abs. 2 BKompV). Gleiches gilt für eine mindestens erhebliche Beeinträchtigung des Landschaftsbildes. Gemäß BKompV ist die Bewertung der Beeinträchtigung von den Funktionen der Schutzgüter nach Einschätzung der zuständigen Behörde erforderlich. Eine Ausnahme bildet das Schutzgut Boden mit seinen Funktionen. Ab einer vorhabenbezogenen Flächeninanspruchnahme von unversiegelten Flächen im Umfang von mindestens 2000m² durch Versiegelung, Verdichtung oder anderweitige dauerhafte Wirkung auf den Bodenwasser- und Stoffhaushalt, ist eine Feststellung der Schwere der Beeinträchtigung regelmäßig durchzuführen.

Im Rahmen der Feststellung der Beeinträchtigungsschwere ist eine Bodenbewertung nach bewährtem Verfahren und eine anschließende Bewertung des Eingriffs, entsprechend der Bewertungsmatrix aus Anlage 3 BKompV durchzuführen. Zu beurteilen ist die Bedeutung der Funktion sowie die Stärke, Dauer und Wirkung des Eingriffs (BfN & BMU, 2021, S. 47 ff; Mengel et al., 2018, S. 115 ff). Diese Beeinträchtigungen sind gleichartig zu kompensieren (§ 9 BKompV). Die Ermittlung des Kompensationsbedarfs erfolgt ebenfalls verbal-argumentativ. Mögliche Maßnahmen werden in Anlage 6 BKompV und in der Handreichung (BfN & BMU, 2021, S. 66 ff) aufgeführt.

Für eine Kompensationsmaßnahme bedarf es einer Aufwertung eines aufwertungsfähigen Biotoptyps in einen höherwertigen Zustand. Für eine solche Aufwertung werden meist landwirtschaftliche Flächen genutzt. Auch für die Eingriffe sollten gemäß Vermeidungsgebot (§ 3 BKompV i. V. m. § 13 Abs. 1 BNatSchG) möglichst „geringwertige“ Biotoptypen (vgl. Anlage 2 BKompV) in Anspruch genommen werden. Unter Annahme eines Flächenbedarfs von Eingriff und Kompensation von 1:1 resultiert in der Praxis daher ein sogenannter „doppelter Flächenverlust“ für die Landwirtschaft (Wagener et al., 2013, S. 21).

Um dem Verlust an landwirtschaftlichen Produktionsstandorten entgegenzuwirken, ergänzte die Bundesregierung im Jahr 2010 den § 15 BNatSchG um Abs. 3, der zur „Rücksicht auf agrarstrukturelle Belange“ (§ 15 Abs. 3 BNatSchG) unter anderem die vorrangige Prüfung der Kompensation in Form einer angepassten Bewirtschaftung vorsieht. § 15 Abs. 3 BNatSchG bildet die Grundlage für die sogenannte Produktionsintegrierte Kompensation, kurz PIK. Die PIK beschreibt naturschutzorientierte Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahmen (i.S.d. § 10 Abs. 3 i.V.m. § 11 B KompV) von landwirtschaftlichen Anbausystemen mit dem Ziel der Steigerung des Biotopwertes. Die Flächen verbleiben jedoch weiterhin in der landwirtschaftlichen Nutzung. Anforderungen an eine PIK-Maßnahme sind insbesondere ein Aufwertungsbedürftigkeit sowie die Aufwertungsfähigkeit der Ausgangsfläche. Dabei beschreibt die Aufwertungsbedürftigkeit eine naturschutzfachlich minderwertig bewertete Fläche hinsichtlich ihrer Funktionsfähigkeit. Die Aufwertungsfähigkeit wird durch die Möglichkeit der Fläche definiert, über eine angepasste Maßnahme einen höheren ökologischen Wert zu erlangen (Druckenbrod et al., 2012, S. 13). Des Weiteren gilt für angepasste Bewirtschaftungsmaßnahmen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen das zwingende Übertreffen der Konditionalität (ehemals Cross-Compliance) der neuen Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) sowie der „guten fachlichen Praxis“ (Druckenbrod et al. 2012, S. 14). Die Konditionalität gemäß Gesetz zur Durchführung der im Rahmen der Gemeinsamen Agrarpolitik geltenden Konditionalität (GAP-KondG) beinhaltet nach europäischem Recht bindende Anforderungen an die Betriebsführung (GAB), die Erhaltung von Flächen in gutem landwirtschaftlichem und ökologischem Zustand (GLÖZ) sowie an den sozialen Bereich (Sozial) (§§ 1 & 3 GAP-KondG). Die GLÖZ 1-9 enthalten konkrete Bewirtschaftungsanforderungen, beispielsweise an die Bodenbearbeitung und Bodenbedeckung (GLÖZ 5 & 6). Die Anforderungen entsprechen den Voraussetzungen für Zahlungen der Gemeinsamen Agrarpolitik (GAP) aus der ersten Säule. Übergeordnetes Ziel ist die Entwicklung eines zukunftsfähigen Landwirtschaftssektors, inklusive dessen aktiver Beiträge zum Klima- und Umweltschutz „in attraktiven ländlichen Räumen“ (Wiegmann et al., 2023, S. 96). Die gute fachliche Praxis gem. § 5 Abs. 2 Nr. 1 - 6 BNatSchG beinhaltet:

- Eine standortgerechte Bewirtschaftung sowie die Gewährleistung der nachhaltigen Bodenfruchtbarkeit und Nutzbarkeit.
- Die natürliche Ausstattung der Fläche darf nur im erforderlichen Maß im Rahmen des nachhaltigen Ertrages beeinträchtigt werden.

- Landschaftselemente zur Biotopvernetzung sind mind. zu erhalten oder auszubauen.
- Grünlandumbruch ist auf sensiblen Standorten, wie Moore, erosionsgefährdete Hänge oder Standorte mit hohen Grundwasserständen zu unterlassen.
- Verwendung von Pflanzenschutz- und Düngemitteln ist nur nach Bestimmungen des landwirtschaftlichen Fachrechtes erlaubt. Die Anwendung ist zu dokumentieren.

KOMPENSATIONSPRAXIS

Mit § 10 BKompV wird die Notwendigkeit und Möglichkeit der PIK bei Inanspruchnahme von landwirtschaftlichen Flächen für den Kompensationsbedarf in das Bundesrecht integriert.

Anlage 6 Abschnitt A BKompV enthält eine Auflistung möglicher „Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen“ (vgl. Abbildung 1) sowie deren Anforderungen. Beispielsweise werden Brachen oder der extensiv genutzte Acker beziehungsweise Ackerwildkräuterstreifen als Maßnahme auf Ackerland gelistet (siehe Abbildung 1). Weiters wird in den Spalten 4 – 14 der Anlage 6 Abschnitt A BKompV die Eignung der jeweiligen Bewirtschaftungsmaßnahme für die Funktionen der Natur-/Schutzgüter gekennzeichnet.

Maßnahmentyp Zielbiotoptypen (keine abschließende Aufzählung)	Anforderungen an die Ausführung der Maßnahmen	
	Mindestanforderungen	Weitergehende Anforderungen, die im Einzelfall festgesetzt werden können
Maßnahmen auf Acker		
Brachen Ackerbrachen: 33.01.04, 33.02.04, 33.03.04, 33.04a.04, 33.04b.04	<ul style="list-style-type: none"> • Selbstbegrünung (gilt nicht in Gebieten mit hohem Stickstoff-Auswaschungsrisiko) • Keine Düngung, keine PSM • Keine Bodenbearbeitung • Keine Nutzung/Mahd • Höchstdauer der Belassung ohne Umbruch: 3 Jahre • Herstellungskontrolle und ggf. Monitoring (in Abhängigkeit von jeweiligen Zielarten) • Pflegeintervall 2 bis 3 Jahre 	<ul style="list-style-type: none"> • Spezifische Maßnahmen, z. B. extensive Pflege zur Schaffung von Heterogenität im Bestand • In Abhängigkeit von Zielarten ggf. Sonderformen • Reduzierung von konkurrenzstarken, nicht dem Zielbiotoptyp entsprechenden Pflanzenarten (z. B. Acker-Kratzdistel, Neophyten) ausschließlich durch mechanische Beseitigung

Abbildung 1: Beispielhafter Auszug aus Anlage 6 Abschnitt A "Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahmen BKompV (Anlage 6 Abschnitt A BKompV)

Als eine weitere, alternative landwirtschaftliche Nutzungsform mit naturschutzfachlichen Potenzialen wird die Agroforstwirtschaft (AF) diskutiert (Nawroth et al., 2019; Zehlius-Eckert et al., 2020). Agroforstsysteme sind eine Form der landwirtschaftlichen Nutzung, bei der neben der landwirtschaftlichen Produktion auch Gehölzkulturen angebaut werden (§ 2 Abs. 2 Nr. 1 f BWaldG).

Im Allgemeinen wird zwischen drei Nutzungsformen der Agroforstsysteme unterschieden (Nair, 1985, S. 102):

- Silvoarable Systeme: Kombination einjähriger landwirtschaftlicher Kulturen mit Gehölzkulturen
- Silvopastorale Systeme: Kombination Grünlandwirtschaft mit Gehölzkulturen
- Agrosilvopastorale Systeme: Kombination aus landwirtschaftlichen Anbaukulturen, Grünlandwirtschaft beziehungsweise Tierhaltung und Gehölzkulturen.

Da im Rahmen der EGR insbesondere intensiv genutzte Ackerflächen für Kompensationsmaßnahmen herangezogen werden, wird der Fokus dieser Arbeit auf die silvoarablen Systeme gelegt. Eine moderne Form des silvoarablen Agroforstes sind sogenannte Alley-Cropping-Systeme (LfL, 2024, S. 6). Das ‚Alley-Cropping‘, zu Deutsch Allee-Anbau, sieht eine Bewirtschaftung der landwirtschaftlichen Flächen durch landwirtschaftliche Kulturen, ergänzt mit parallel angeordneten Gehölzkulturenreihen in Streifen vor. Das Anbaudesign orientiert sich primär an der Maschinenbreite, sodass eine effektive Bewirtschaftung der Anbaufläche gewährleistet bleibt (LfL, 2024, S. 6). Die landwirtschaftlichen Anbaukulturen bestehen aus einjährigen Kulturfrüchten wie Weizen, Hafer, Gerste oder Klee, die in Fruchtfolge angebaut werden (DeFAF, 2024, www).

Die Gehölzkulturen eines solchen Agroforstsystems dienen der Produktion von Energie- oder Stammholz und/oder Fruchterzeugnissen (Unselde et al., 2011, S. 6). Die Bewirtschaftung der AF-Systeme mit Gehölzstreifen zur Energieholzgewinnung orientiert sich hauptsächlich an den Erfahrungen der KUP aus Deutschland (LfL, 2024, S. 10). In der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung flächig angelegte Gehölzkulturen zur primären Erzeugung von Bioenergie „mit dem Ziel baldiger Holzentnahme“ (§ 2 Abs. 2 Nr.1 BWaldG), werden als „Kurzumtriebsplantage“ (KUP) (§ 2 Abs. 2 Nr.1 BWaldG) bezeichnet. Bisher bewährte Baumarten für KUP in Deutschland sind insbesondere schnellwachsende Arten, wie Pappel- und Weidenarten sowie deren Hybride (Reeg et al., 2009, S. 57; Unselde et al., 2011, S. 6). Als weitere geeignete Arten für den Kurzumtrieb gelten beispielsweise Robinie, Bergahorn, Birke, Linde, Eiche und Erle (Reeg et al., 2009, S. 43; Unselde et al., 2011, S. 7). Im AF-System hat sich die Anlage von mindestens 2-reihig gepflanzten, 5 m breiten Gehölzstreifen in einem maximalen Abstand von 100 m bewährt (Hübner & Günzel, 2022, S. 10). Die Ernte erfolgt meist nach Umtriebszeiten von sechs bis zehn Jahren. Danach folgt der erneute Austrieb der Gehölze (LfL, 2024, S. 10).

In Systemen zur Gewinnung von Stammhölzern für die Furnier- und Möbelindustrie und/oder zur Fruchtproduktion werden Arten wie Elsbeere, Speierling, Ahorn, (Wild-) Birne, (Wild-, Vogel-) Kirsche, Maulbeere, Apfel, Zwetschge oder Nussbaumarten empfohlen. Dabei sind die Gehölzkulturen in Einzelreihen mit einem Pflanzabstand von ca. acht bis zehn Metern zu pflanzen (LfL, 2024, S. 12). Die Einzelreihen sind in einem Mindestabstand von 15 m anzulegen (Hübner & Günzel, 2022, S. 11). Die Ernte erfolgt nach etwa 50 bis 70 Jahren (LfL, 2024, S. 11).

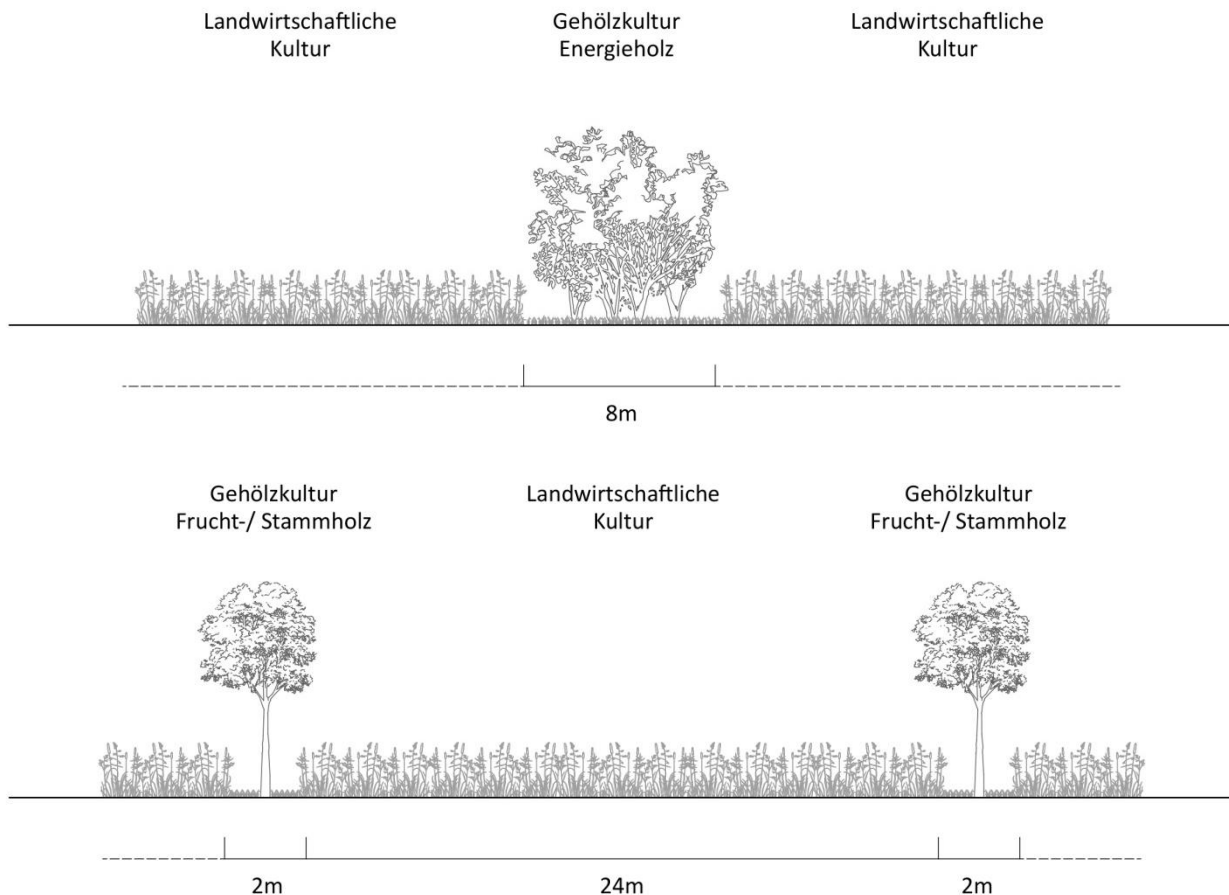


Abbildung 2: Schematische Darstellung der Systemdesigns der silvoarablen Systeme zur Energieholzproduktion (oben) und zur Obst- und Stammholzproduktion (unten) im Allee-Anbau.

Agroforstsysteme weisen bereits bekannte klima- und naturschutzfachlich relevante Effekte auf (Nawroth et al., 2019; Zehlius-Eckert et al., 2020). Positive Effekte auf fast alle Naturgüter des Naturhaushaltes (Boden, Klima, Wasser, Biologische Vielfalt) im Sinne des § 7 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG und aufs Landschaftsbild sind durch die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen mit AF-Systemen im Vergleich zu einem konventionellen Acker zu erwarten (Zehlius-Eckert et al., 2020, S. 8). Dem entsprechend führt das Land Thüringen bereits seit 2014 Agroforstsysteme in den Maßnahmenvorschlägen „Produktionsintegrierte Kompensation (PIK)“ als geeignete PIK-Maßnahmen (TLL & ThLG, 2014, S. 15). Der dort genannte Maßnahmentyp AF7 „KUP/Agroforst auf Ackerflächen“ bezieht sich auf die Förderung der Schutzgüter Boden, Biodiversität, Wasser und Landschaftsbild. Genannt werden auch hier positive Effekte auf die Bodenstruktur durch Humusbildung, den Nährstoffhaushalt sowie geringere Nährstoffausträge, eine verminderte Erosion und Förderung von Tieren der halboffenen Agrarlandschaft und Feldflur, insbesondere Tagfalter, Spinnen und Laufkäfer sowie Vögel und Kleinsäuger. Die übergeordneten Ziele sind der Biotopverbund sowie die Schaffung von ökologischen Nischen, Erosionsschutz und Erhöhung der Arten- und Strukturvielfalt (TLL & ThLG, 2014, S. 15). Mit einem Richtwert von möglichen 30 Punkten liegt der Zielzustand der KUP/Agroforstsysteme auf Acker 10 - 14 Punkte über dem konventionellen Acker und stellt somit eine Aufwertung der Fläche dar (TLL &

ThLG, 2014, S. 4). Eine zusätzliche Aufwertung der Bedeutungsstufe kann mithilfe von verlängerten Umtriebszeiten, einer erhöhten Artenvielfalt der Gehölze, abschnittsweise Ernte und eine Pufferwirkung für angrenzende hochwertige Biotope getätigt werden (TLL & ThLG, 2014, S. 4). Als Zusatznutzen wird außerdem auf eine Treibhausgasmindering hingewiesen (TLL & ThLG, 2014, S. 15).

Auch im „Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz“ des Bundesministeriums für Umwelt, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) wird als naturbasierte Lösung zur Speicherung von Kohlenstoff in den Böden ebenfalls die gezielte Förderung und Erhaltung von Agroforstsystemen angeführt. Das BMUV weist konkret auf eine positive „Klima- und Biodiversitätswirkung“ (BMUV, 2023, S. 40) hin:

„Hecken, Knicks, Baumreihen, Feldgehölze und Agroforstsysteme zeichnen sich insbesondere gegenüber Ackerflächen zum einen durch einen höheren Humusgehalt und damit eine höhere Kohlenstoffspeicherung im Boden aus. Zum anderen legen sie im Gehölzaufwuchs Kohlenstoff längerfristig fest. Zudem entfalten sie weitere positive ökologische Wirkungen, indem sie Erosion (inklusive Humusabtrag) auf angrenzenden Ackerflächen mindern, ausgleichend auf den Wasserhaushalt (inklusive Taubildung) und das Kleinklima der Umgebung wirken, Nährstoffeinträge in Gewässer mindern und in hohem Maße die Biodiversität im Landschaftsraum erhöhen“ (BMUV, 2023, S. 40).

FORSCHUNGSGEGENSTAND UND ZIELSETZUNG

Auf dieser Grundlage wird die These aufgestellt, dass sich Agroforstsysteme – Alley-Cropping in silvoarablen Systemen – als PIK gemäß der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung in Deutschland eignen. Naturschutzfachlich positive Effekte beziehen sich auf die Natur-/Schutzgüter Biodiversität, Boden, Wasser, Klima und Landschaftsbild.

In der BKompV werden sie bisher jedoch weder als Biotoptyp noch als angepasste Bewirtschaftungsmaßnahme auf Acker geführt. Lediglich „42.06a Kurzumtriebsplantagen mit heimischen oder nicht heimischen Baumarten“ (Anlage 2 BKompV) wurde in Ergänzung zum Biotoptyp „Kurzumtriebsplantagen mit nicht heimischen Baumarten“ der Roten Liste (Finck et al., 2017, S. 184) in der Anlage 2 mit einem Biotopwert von 6 gelistet. Dieser Wert entspricht dem eines intensiv genutzten Ackers (vgl. 33.01.03, 33.02.03, 33.03.03, 33.04.03a Anlage 2 BKompV) und stellt daher kein Aufwertungspotenzial für eine landwirtschaftliche Fläche dar.

Daher soll im Rahmen dieser Arbeit festgestellt werden, ob beziehungsweise in welchem Maß sich silvoarable Agroforstsysteme als PIK eignen. Anschließend soll ein erster Vorschlag für die Aufnahme silvoarabler Agroforstsysteme als Biotoptyp gemäß Anlage 2 BKompV erarbeitet werden. Der Vorschlag beinhaltet die Codierung, die Benennung des Biototyps sowie den entsprechenden Biotopwert.

Ziel ist es, silvoarable Systeme in den gesetzlichen Rahmen der BKompV als mögliche „Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme“ gem. § 11 BKompV i. V. m. § 15 Abs. 3 BNatSchG einzuordnen. Berücksichtigt werden sollen sowohl die Eignung zur biotopwertbezogenen Kompensation als auch hinsichtlich der funktionspezifischen Kompensation.

Genähert wird sich über die Forschungsfragen:

- Welche naturschutzfachlichen positiven Effekte hinsichtlich der Schutzgüter und Funktionen gemäß Anlage 1 Spalte 1 & 2 BKompV sind durch die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Flächen mit Agroforstsystemen zu erwarten?
- Wie sind Agroforstsysteme hinsichtlich der drei Zieldimensionen gem. § 1 Abs. 1 BNatSchG zu bewerten?

Aufgrund der Erkenntnisse der Arbeit von Nawroth et al. (2019), Zehlius-Eckert et al. (2020) sowie der Maßnahmenerläuterung funktionspezifischer Kompensation gemäß Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, S. 67-82), werden positive Effekte auf zumindest eine Funktion aller Schutzgüter gem. § 4 Abs. 3 BKompV erwartet. Eine Übersicht über die Schutzgüter und deren Funktionen sind in Tabelle 1 aufgelistet. In Spalte 3 werden die erwarteten naturschutzfachlich positiven Effekte skizziert.

Tabelle 1: Schutzgüter und Funktionen der Anlage 1 Spalten 1 & 2 BKompV sowie der erwartete naturschutzfachlich positive Einfluss von Agroforstsystemen auf diese. Die prognostizierten Effekte basieren auf den Kenntnissen von (Nawroth et al., 2019; Zehlius-Eckert et al., 2020)

Schutzgut	Funktion	Prognostizierter naturschutzfachlich positiver Effekt
Biodiversität	Vielfalt von Lebensgemeinschaften und Lebensräumen	Gehölze in der Landschaft fungieren als permanente vertikale Strukturen und Extensivzonen in der offenen Agrarlandschaft. Sie führen zusätzlich zu einer Zunahme an Saumbereichen. Die Struktur- und Habitatvielfalt wird erhöht. Durch den Wechsel zwischen Grünland- und Ackerkulturen und Gehölzstreifen wird die Grenzliniendichte erhöht.
	Vielfalt von Tierarten einschließlich der innerartlichen Vielfalt	Durch die erhöhte Struktur- und Habitatvielfalt wird die Lebensraumdiversität in der Agrarlandschaft erhöht. Dadurch wird die Artenzahl von Pflanzen und Tieren, insbesondere von Vögeln, Niederwild, Insekten, Spinnen, Amphibien und Reptilien erhöht. Gehölzreihen als natürliche lineare Strukturen in der Landschaft verbessern den Biotopverbund und dienen zusätzlich als Wander- und Rückzugskorridore für Groß- und Kleinsäuger, Vögel und Insekten.

	Hochwasserschutzfunktion	Die verbesserte Bodenstruktur führt zu einer erhöhten Infiltration und Wasserspeicherkapazität innerhalb der Gehölzreihen. Der Oberflächenabfluss der Gesamtfläche wird durch die Rauigkeit der permanenten Vegetationsdecke, die Barrierewirkung der Gehölze auf den Oberflächenabfluss und die erhöhte Infiltration verringert.
Klima	Klimaschutzfunktion durch Treibhausgasspeicher oder -senke	Die verbesserte Bodenstruktur sowie die Zunahme an Bodenflora und -fauna innerhalb der Gehölzreihen führen zu einer Kohlenstoffspeicherung durch Humusaufbau. Die Gehölze wirken darüber hinaus durch Kohlenstoffbindung in holziger Biomasse als Treibhausgasenke.
Landschaftsbild	Vielfalt von Landschaften & Erleben und Wahrnehmen von Landschaft	Gehölzreihen werden als wertgebende Elemente und Strukturen wahrgenommen. Dadurch wird der Erholungsfaktor erhöht.

Im Rahmen dieser Arbeit soll außerdem der Effekt von Alley-Cropping-Systemen im Speziellen auf die bodengebundenen Funktionen analysiert werden. Dazu werden die Effekte von silvoarablen Systemen auf die zwei Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen:

- die natürliche Bodenfruchtbarkeit und
- die Filter- und Pufferfunktion des Bodens betrachtet.

Allgemein positive Effekte, ausgehend von den Gehölzreihen eines Alley-Cropping-Systems auf diese Funktionen, werden als bestätigt betrachtet (vgl. Tabelle 1). Das Ausmaß der Effekte und mögliche Stellschrauben sollen jedoch konkretisiert werden, um eine zielgerichtete Anwendung der Etablierung von Alley-Cropping-Systemen als funktionspezifische Kompensationsmaßnahme für erhebliche Beeinträchtigungen besonderer Schwere auf die natürlichen Bodenfunktion gewährleisten zu können. Hinsichtlich der Filter- und Pufferfunktion und der natürlichen Bodenfruchtbarkeit werden insbesondere positive Effekte der Gehölzkulturen auf die organische Bodensubstanz und das Bodenleben, das Bodengefüge und die Bodenanreicherung sowie die Bodenfeuchte erwartet. Die folgende Wirkkaskade erläutert, basierend auf den Kenntnissen von Amelung et al. (2018), Nawroth et al. (2019) und Zehlius-Eckert et al. (2020), die erwarteten positiven Effekte der etablierten Gehölze in silvoarablen Systemen auf die beiden Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen. Sie sind im Kontext dieser Arbeit gleichfalls als Hypothesen zu verstehen. Da die Funktion der Böden hinsichtlich der Bodenfauna und -flora im Rahmen der Habitatfunktion zu beurteilen sind, wird auf diesen Indikator nicht näher eingegangen.

Tabelle 2: Erwartete positive Effekte auf die Funktionen und deren Indikatoren durch die Etablierung der Gehölze, abgeleitet nach Amelung et al. (2018), Nawroth et al. (2019) und Zehlius-Eckert et al. (2020). Sie stellen gleichfalls die Hypothesen dar.

Indikatoren und Funktionen	Erwartete positive Effekte unter Gehölzstreifen
Durchwurzelung	Eine erwartete erhöhte und tiefere Durchwurzelung durch die Gehölze führt zu einer mechanischen Stabilisierung und Tiefenlockerung des Bodens. Darüber hinaus werden tiefere Wasser- und Nährstoffquellen erschlossen. Ein zusätzlicher Eintrag organischer Substanz in tieferen Bodenschichten erfolgt über Wurzelexsudate und abgestorbene Wurzelmasse.
Organische Bodensubstanz	Streu, Schnittreste und die Wurzelrückstände von Gehölzen, sowie Wurzelexsudate erhöhen den Gehalt an organischer Substanz im Ober- und Unterboden. Ein höherer Gehalt an organischer Substanz verbessert zusätzlich die Aggregatstabilität und die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften. Sie erhöht außerdem die Nährstoffspeicherung und den Nährstoffvorrat in Form der eingetragenen organischen Substanz. Zusätzlich wird durch den höheren Biomasseeintrag die Bodenfauna und -flora gefördert.
Bodengefüge	Durch die Aggregatstabilisierung, die Bodenlockerung durch die Gehölze und die erhöhte Bodenfauna und Anreicherung organischer Bodensubstanz werden die Bodenstruktur sowie die chemischen und physischen Bodeneigenschaften verbessert. Die Erhöhung des Porenvolumens erhöht die Durchlüftung des Bodens sowie die Infiltration und Wasserhaltekapazität.
Bodenfeuchte	Durch die gesteigerte, tiefere Infiltration und Wasserspeicherkapazität des Bodens wird die Bodenfeuchte erhöht. Die Versickerung wird verlangsamt. Die Durchwurzelung durch die Gehölze führt ihrerseits zu einer gleichmäßigen Nutzung der Wasserressourcen und der Erschließung tieferen Bodenwassers.
Erosion und Bodenverluste	Die Barrierewirkung von Gehölzen sowie die dauerhafte Bodenbedeckung, die erhöhte Aggregatstabilität und die mechanische Stabilisierung des Bodens führen zu geringeren Bodenverlusten durch Wind- und Wassererosion. Gleichzeitig wird die Bodenbildung durch den Eintrag an Biomasse und die erhöhte Aktivität von Bodenorganismen angeregt.
Nährstoffverfügbarkeit	Durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität wird die Zersetzung und Mineralisierung der erhöhten Einträge organischer Substanz verbessert. Zusätzlich wird die Speicherung von Nährstoffen durch die verbesserte Bodenstruktur erhöht. Aufgrund der reduzierten Bodenverluste durch Erosion werden gleichermaßen die Nährstoffverluste im Oberboden verringert. Durch die erhöhte Wasserspeicherkapazität verbleiben mehr wasserlösliche Nährstoffe zusätzlich länger in der Bodenlösung. Die Nährstoffverfügbarkeit wird erhöht. Zudem ermöglicht die gleichmäßige und tiefere Durchwurzelung die Nutzung von Nährstoffen der Bodenlösung bis in tiefere Bodenschichten. Dadurch wird

der Nährstoffkreislauf stabilisiert. Stickstofffixierende Arten können den Stickstoffvorrat im Boden zusätzlich anreichern.

Schadstoffrückhalt

Das verbesserte Bodengefüge inklusive der verbesserten physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften erhöht die Adsorption und Immobilisierung von Schadstoffen. Die gesteigerte mikrobielle Aktivität erhöht die Mineralisierung der Schadstoffe. Die erhöhte Infiltration und erhöhte Wasserspeicherkapazität verringern eine Auswaschung von wasserlöslichen Schadstoffen. Das tiefreichende, vergrößerte Wurzelvolumen ermöglicht eine Aufnahme der Schadstoffe zusätzlich auch in tieferen Bodenschichten. Durch die Verringerung der Bodenerosion werden außerdem Schadstoffausträge in Oberflächengewässer reduziert.

Ökosystemfunktionen

Das verbesserte Bodengefüge inklusive der physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften, die reduzierten Bodenverluste, die erhöhte Bodenfeuchte und mikrobielle Aktivität sowie die Nährstoffverfügbarkeit erhöhen die Bodenfruchtbarkeit sowie die Filter- und Pufferfunktion unterhalb der Gehölzstreifen.

Dabei wird jedoch angenommen, dass:

- standörtliche Charakteristika, wie die Bodenart,
- das Systemdesign, wie die Abstände der Gehölzreihen, die Breite der Gehölzstreifen und die Pflanzdichte der Gehölze, Vegetationsbedeckung, Alter der Gehölze, Durchwurzelungstiefe sowie
- die Bewirtschaftungsart, wie Erntezyklus, Bodenbearbeitung, Düngung, etc.

der jeweiligen Alley-Cropping-Systeme einen Einfluss auf die positiven Effekte der Gehölzreihen hinsichtlich der natürlichen Bodenfunktionen im Vergleich zum konventionellen Acker haben. Die Hauptkomponenten sollen identifiziert und hinsichtlich ihrer Auswirkung auf die natürlichen Bodenfunktionen analysiert werden.

Die Forschungsfragen in dem Kontext lauten:

- Welche Komponenten der standörtlichen Voraussetzungen, der Anlage und Bewirtschaftung sind maßgeblich für den positiven Effekt von Gehölzreihen eines AF-Systems auf die Filter- und Pufferfunktion des Bodens?
- Welche Komponenten der standörtlichen Voraussetzungen, der Anlage und Bewirtschaftung sind maßgeblich für den positiven Effekt von Gehölzreihen eines AF-Systems auf die natürliche Bodenfruchtbarkeit des Bodens?
- In welchem Maße beeinflussen diese Komponenten der Anlage und Bewirtschaftung den positiven Effekt von Gehölzreihen eines AF-Systems auf die Filter- und Pufferfunktion des Bodens?

- In welchem Maße beeinflussen diese Komponenten der Anlage und Bewirtschaftung den positiven Effekt von Gehölzreihen eines AF-Systems auf die natürliche Bodenfruchtbarkeit?

Weiters soll ein Vorschlag für eine teilformalisierte Ermittlung der funktionspezifischen Kompensation der ausgewählten Teilfunktionen entwickelt werden. Ziel ist es, eine praxisnahe Ermittlung des funktionspezifischen Kompensationsumfangs unter Berücksichtigung der Einzelfallentscheidung und Gleichbehandlung zu ermöglichen.

Auch die Eignung von silvoarablen Alley-Cropping-Systeme zur Energie-, Stammholz- und Fruchtproduktion soll in diesen teilformalisierten Ermittlungs- und Bewertungsentwurf eingeordnet werden. Dazu werden die erlangten Erkenntnisse zum Effekt der silvoarablen Systeme auf die natürlichen Bodenfunktionen in einer quantitativen Annäherung für die funktionspezifische Kompensation als Maßnahmenvorschlag aufbereitet.

2 METHODIK

STANDARDISIERTE LITERATURANALYSE

Um die naturschutzfachliche Eignung der silvoarablen Systeme sowie der Hauptkomponenten des naturschutzfachlich wirksamen Effektes von Agroforstsystemen auf die Filter- und Pufferfunktion und die natürliche Bodenfruchtbarkeit analysieren und einordnen zu können, wird eine standardisierte Literaturrecherche nach dem Prinzip der systematischen Literaturanalyse nach Lueglinger & Renner (2013) und Newig & Fritsch (2009) durchgeführt. Gegenstand der Untersuchung stellen die acht Indikatoren und Funktionen (Durchwurzelung, Bodengefüge, Bodenfeuchte, Erosion und Bodenverluste, Organische Bodensubstanz, Nährstoffverfügbarkeit und Schadstoffrückhalt, Ökosystemfunktion) dar. Das Untersuchungsgebiet erstreckt sich über den

gemäßigten, humiden Raum, mit einem Untersuchungsschwerpunkt auf Europa und

insbesondere Deutschland. Untersuchungsgegenstand sind silvoarable Systeme zur Energie- und Stammholzproduktion sowie jene zur Fruchtgewinnung. Um einen umfassenden Überblick über die tatsächliche Wirkung und die abhängigen Variablen von Alley-Cropping-Systemen auf die Funktionen zu erlangen, wurde nur gezielt nach Meta-Analysen und Reviews gesucht.

Dazu wurden auf Grundlage vorangegangener Recherchen, Suchbegriffe zu:

- TITLE/TOPIC: „Agroforst“
- TOPIC: Meta-Studie, Review
- Und TOPIC: klimatischer Untersuchungsraum (Deutschland und klimatisch vergleichbare Systeme)
- Und TOPIC: Funktionen (Filter- und Pufferfunktion und natürliche Bodenfruchtbarkeit)

zusammengetragen und anhand einiger Suchdurchläufe präzisiert. Die Literaturrecherche beschränkt sich auf auswertende Studien der letzten 10 Jahre um den aktuellen Wissensstand sowie eine ausreichend diffe-

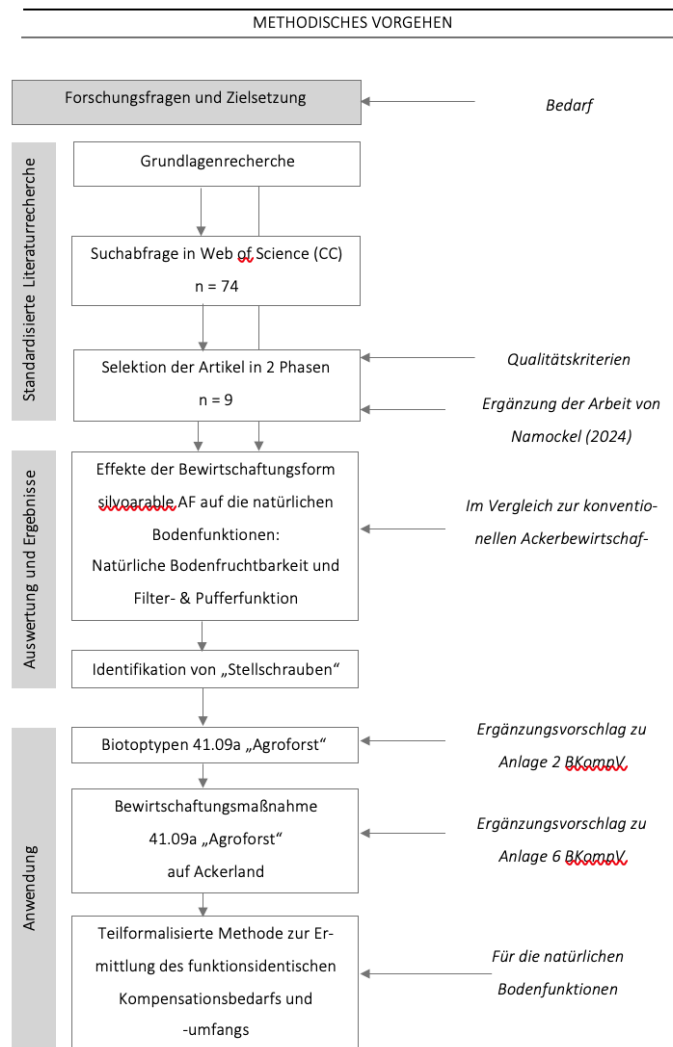


Abbildung 3: Übersicht über das methodische Vorgehen im Rahmen dieser Arbeit (n = Anzahl der Studien)

renzierte Betrachtung der Ergebnisse zu gewährleisten. Ergebnisse aus älteren Feldstudien werden indirekt über die ausgewerteten Artikel berücksichtigt.

Die Suchabfrage erfolgte im Dezember 2024 in englischer Sprache unter Nutzung der Webdatenbank „Web of Science Core Collection“. Es wurden insgesamt zwei Suchabfragen (vgl. Tabelle 3), eine detaillierte Abfrage unter Verwendung aller Indikatoren und Funktionen sowie eine erweiterte, weniger detaillierte Abfrage durchgeführt.

Im Rahmen dieser Suchabfragen wurden 24 Artikel über die detaillierte Suche sowie 50 Artikel über die erweiterte Suche identifiziert und in jeweils eigenen Datenbanken gesammelt. Die Artikel der erweiterten Suche wurden um Dopplungen mit der detaillierten Suche auf 34 Artikel bereinigt. Anschließend wurden die verbliebenen 58 Artikel anhand von Qualitätsanforderungen in 2 Phasen auf ihre Relevanz überprüft.

1. Titel, Schlüsselwörter, Abstract

Geprüft wurden insbesondere fünf Qualitätskriterien in der Grobanalyse der Artikel anhand des Titels, der Schlüsselwörter sowie dem Abstract:

- Meta-Analyse oder Review als Artikelart
- Differenzierte Analyse silvoarabler Agroforstsysteme
- Zielsetzung der Studien hinsichtlich der Auswirkung von Agroforst auf Bodenfunktionen oder deren Parameter beziehungsweise Komponenten im Vergleich zum konventionellen Acker
- Beziehungsweise thematische Auseinandersetzung mit den Bodenfunktionen, insbesondere mit den einzelnen Komponenten oder Parametern
- Klimatische Repräsentanz (sofern bereits erläutert)

Im Rahmen der ersten Phase wurden 17 Artikel der detaillierten und 15 Artikel der erweiterten Suchabfrage als vorläufig geeignet definiert. Daraufhin folgte die zweite Phase der Relevanzprüfung.

2. Gesamtartikel

Die vorläufig geeigneten Gesamtartikel wurden mit Hauptaugenmerk auf Zielsetzung, Methodik und die Ergebnisse erneut auf die erläuterten Qualitätsanforderungen überprüft und gefiltert.

Die als geeignet identifizierten Artikel beider Suchen wurden tabellarisch aufbereitet und ausgewertet. Zusätzlich wurde die unveröffentlichte, systematische Literaturanalyse von Namockel (2024) zum Thema „Wassermanagement durch Agroforstsystemen in Deutschland“ zu den geeigneten Reviews und Meta-Analysen ergänzt. Die Ergebnisse zu den Effekten von silvoarablen Systemen auf die beiden bodengebundenen Teilfunktionen wurden nachfolgend anhand der identifizierten Indikatoren (vgl. Tabelle 2) sowie übergreifend für die Ökosystemfunktionen zusammengefasst und diskutiert.

Tabelle 3: Suchbegriffe und Reihung der detaillierten und offenen Suchabfragen in Web of Science (CC) vom 27.12.2024.

Detaillierte Suchabfrage	
TOPIC	„meta-analysis“ OR „meta studies“ OR review
TITLE	AND agroforestry* OR silvoarable OR „alley crop*“
TOPIC	AND humid OR continental OR European OR german OR temperate
TOPIC	AND ecosystem OR „ecosystem functions“ OR „ecosystem services“ OR „natural balance“ OR soil OR „soil functions“ OR „soil services“ OR „soil structure“ OR „soil density“ OR „soil permeability“ OR „soil quality“ OR „soil loss“ OR „soil moisture“ OR „field capacity“ OR „soil fertility“ OR nutrients* OR „nutrient retention“ OR „nutrient provisioning“ OR „nutrient cycling*“ OR „element cycling*“ OR „organic matter“ OR humus OR decomposition OR „storage capacity“ OR „water quality“ OR „water purification“ OR infiltration OR rooting OR buffer OR filter OR „pollutant degradation“
NOT TOPIC	NOT tropic* OR „sub tropical*“
TIMESPAN	2014-01-01 to 2024-12-28
Erweiterte Suchabfrage	
TOPIC	„meta-analysis“ OR „meta studies“ OR review
TOPIC	AND agroforestry OR „alley cropping*“ OR silvoarable
TOPIC	AND temperate OR continental OR humid
NOT TOPIC	NOT tropic OR „sub tropical*“
TOPIC	AND ecosystem OR „ecosystem services“ OR „ecosystem functions“ OR soil OR „soil functions“
TIMESPAN	2014-01-01 to 2024-12-28

ENTWICKLUNG DER BIOTOPTYPEN

Anhand der erlangten Kenntnisse, des Stands der Wissenschaft und entsprechend der Methode zur Ermittlung des Biotoptypenwertes gemäß der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, Tabellen 1-3 & S. 19 ff) wurden anschließend Biotoptypenwerte unter Berücksichtigung der drei Zieldimensionen (§ 1 Abs. 3 BNatSchG) für die Agroforstsysteme ermittelt. Als Vergleichstypen dienen weitere gelistete Gehölzstrukturen.

Folgende Biotoptypen gemäß Anlage 2 BKompV in Verbindung mit der „Roten Liste gefährdeter Biotoptypen Deutschlands“ nach Finck et al. (2017, S. 483 ff) ähneln in ihren Charakteristika denen der agroforstlichen Baumreihen, insbesondere den silvoarablen Alley-Cropping-Systemen und eignen sich daher als Referenzsysteme für die naturschutzfachliche Einstufung der AF-Systeme hinsichtlich der Zieldimensionen:

- „Hecken mit überwiegend autochthonen Arten“ (41.03) in ihren Altersausprägungen,
- „Gehölzanzpflanzungen und Hecken aus überwiegend nicht autochthonen Arten“ (41.04) in ihren Altersausprägungen,
- „Einzelbäume, Baumreihen und Baumgruppen“ (41.05) in unterschiedlichen Ausprägungen,

- „Streuobstbestand auf Acker“ (41.06.02) in ihren Altersausprägungen und
- „Kurzumtriebsplantagen mit heimischen oder nicht heimischen Baumarten“ (42.06a)

Die Codierung erfolgte ebenfalls entsprechend der Methode nach Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, S.5) und auf Basis der Roten Liste gefährdeter Biotoptypen Deutschland (Finck et al. 2017).

ENTWICKLUNG DER BEWIRTSCHAFTUNGS- UND PFLEGEMAßNAHME

Des Weiteren wurde ein Maßnahmenvorschlag für die Aufnahme von silvoarablen Agroforstsystemen in die Anlage 6 Abschnitt A BKompV erarbeitet. Als fachliche Grundlage zur Beurteilung der voraussichtlichen Auswirkungen von Agroforstsystemen auf die Funktionen aller Schutzgüter (gem. Anlage 1 Spalte 1 & 2 BKompV) dienen die Erkenntnisse aus Kapitel 3, das Loseblatt von Zehlius-Eckert et al. (2020) sowie die Maßnahmenvorschläge – PIK der Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft (TLL) und der Thüringer Landgesellschaft mbH (ThLG) (TLL & ThLG, 2014, S. 15).

ENTWICKLUNG EINER TEILFORMALISIERTEN METHODE ZUR ERMITTLUNG DES KOMPENSATIONSBEDARFS UND -UMFANGS

Abschließend wurde ein halbformalisierter Vorschlag für die Ermittlung des Kompensationsumfanges im Rahmen der BKompV ausgearbeitet und diskutiert. Die Entwicklung der Methode basiert auf den Erkenntnissen des F+E-Projekts von Mengel et al. (2018) sowie auf der Bundeskompensationsverordnung (BKompV) und deren Handreichung (BfN & BMU, 2021). Zudem erfolgt die methodische Ausarbeitung unter Berücksichtigung der bestehenden Bewertungsverfahren für Eingriffe, der vorgesehenen Maßnahmen sowie der Festlegung maßnahmenangepasster Ökopunkte nach dem baden-württembergischen Ökokonto-Verfahren (ÖKVO) und der zugehörigen Arbeitshilfe des LUBW (2024). Inhaltliche Spezifikationen werden auf Grundlage der erarbeiteten Erkenntnisse (vgl. Kap. 3), des Loseblattwerks von Zehlius-Eckert et al. (2020) sowie der Maßnahmenvorschläge – PIK der TLL und der ThLG (2014) vorgenommen.

3 ERGEBNISSE UND DISKUSSION

Im Rahmen der standardisierten Literaturrecherche konnten insgesamt neun Artikel identifiziert werden. Sie beinhalten AF-Systeme, insbesondere Alley-Cropping-Systeme, der gemäßigten Regionen über den Globus verteilt. Zum Vergleich werden weitere AF-Systeme oder Landnutzungsformen sowie solche anderer biogeographischer Regionen mitberücksichtigt. Als Kontrollsystem der silvoarablen Systeme wird überwiegend der konventionelle Acker herangezogen. Fünf der Artikel werten Primärdaten im Rahmen einer Meta-Analyse aus, während vier weitere Reviews Primärstudien sowie Meta-Analysen zusammenfassen. Tabelle 4 umfasst die wesentlichen Informationen der ausgewerteten Studien, inklusive deren Anzahl ausgewerteter Studien und deren Gesamtanzahl an Beobachtungen (=n, Entsprechen einem Datenpaar eines Versuchsdesigns), der geographischen und klimatischen Ausdehnung sowie der analysierten Ökosystemfunktionen und/oder Komponenten der natürlichen Bodenfruchtbarkeit und Filter- und Pufferfunktion.

3.1 Durchwurzelung

3.1.1 Ergebnisse

AF-Systeme wirken sich nach den von Namockel (2024) zusammengefassten Untersuchungsergebnissen positiv auf die Durchwurzelung des Bodens aus. In AF-Systemen zeigt sich im Vergleich zum konventionellen Acker eine dauerhaft intensivere, tiefere und gleichmäßigere Durchwurzelung des Bodens (Blanchet et al., 2022; de Aguiar et al., 2010; Langeveld et al., 2012; Ong et al., 2000;

Veldkamp et al., 2023 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19 f.). Insbesondere in und unmittelbar um die Gehölzstreifen ist eine erhöhte Wurzeldichte messbar. Dabei lässt sich eine signifikante Zunahme der Feinwurzeldichte (Veldkamp et al., 2023 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19) in der landwirtschaftlichen Kultur eines AF-Systems im Vergleich zum konventionellen Acker quantifizieren, ebenso wie signifikante Differenzen in der Durchwurzelungstiefe der Gehölzkultur und der landwirtschaftlichen Kultur. Die Wurzelverteilung einjähriger Kulturpflanzen konzentriert sich primär auf die obersten Bodenhorizonte bis zu einer Tiefe von 1 m, während die Wurzeln von Walnussbäumen deutlich tiefere Bodenschichten bis mindestens 6 m erschließen (Blanchet et al., 2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19). Untersuchungen von Blanchet et al. (2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19) sowie Cardinael et al. (2015 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19) zeigen zudem, dass Gehölze in AF-Systemen eine gleichmäßigere und tiefere Durchwurzelung der Bodenprofile aufweisen als Gehölze in Monokulturen. Die Wurzelsysteme der Gehölze erstrecken sich, ausgehend von der Nulllinie der Gehölze, nach Erkenntnissen von Swieter et al. (2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19) bis in eine Entfernung von 3 m mit abnehmender Wurzelmasse. In der unmittelbaren Umgebung der Nulllinie der gepflanzten Pappeln wurde eine Wurzelmasse von 5.256 g/m^3 dokumentiert, in 1,2 m Entfernung 819 g/m^3 und in 3 m Entfernung 662 g/m^3 . In 4 m Entfernung wurden keine Feinwurzeln der Pappeln mehr nachgewiesen (Swieter et al., 2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 19 f.).

Tabelle 4: Ausgewertete Meta-Studien und Reviews im Überblick. Angaben zur Art, Anzahl der ausgewerteten Studien, Klima- beziehungsweise biogeographische Regionen, der geographischen Ausdehnung, der ausgewerteten AF-Systeme und den Komponenten sowie Ökosystemleistungen (MA = Meta-Analys, ÖS = Ökosystemleistungen).

Artikel	Art	Anzahl Studien	Klimaregionen	Geographische Ausdehnung	Systeme	Indikatoren und Funktionen
Torralba et al., 2017	MA	53 (n=365)	Mediterran (59%), atlantisch (21%), kontinental (6%), pannonisch (6%), boreal/alpin (8%)	Europa (Portugal, Spanien, Italien, Griechenland, Türkei, Frankreich, England, Schottland, Schweden, Finnland, Österreich/Deutschland, Ungarn)	Silvopastoral (n=31), silvoarable (n=13), mixed (n=7)	ÖS (Produktivität, Nährstoffverfügbarkeit, Erosionskontrolle, BioDiv)
Mayer et al., 2022	MA	20 (n=61)	Gemäßigt	International Nord-Amerika (n=17) Europa (n=41), China (n=3)	Silvopastoral (n=10), Alley-Cropping (n=25), Hecken/Pufferstreifen (n=26)	SOC
Ivezic et al., 2022	MA	43 (n=377)	Gemäßigt Tropisch	International gemäßigt: Europa (Süd n=4, Nord n=4), Asien (n=4), Nord-Amerika (n=7) tropisch: Amerika (Nord n=1, Central n=4, Süd n=1), Afrika (n=12), Asien (n=8)	Alley-Cropping	SOC
Zhu et al., 2020	MA	83	Gemäßigt Tropisch	International (Afrika, Asien, Europa, Lateinamerika und N-Amerika), 33 Länder	Silvoarable (n=38), Silvopastoral (n=6), Windschutzhecken (n=6), Pufferstreifen (n=33)	Wasserverluste, Bodenverluste, Nährstoffverluste, Pestizidverluste
Visscher et al., 2023	MA	78 (n=1451)	Gemäßigt Tropisch Wüste	Lateinamerika (12 Länder)	Silvoarabel, Silvopastoral	Biologische Aktivität und Diversität, C-Sequestrierung, Nährstoffversorgung, Erosionskontrolle
Dmuchowski et al., 2024	Review	13 Metastudien	Gemäßigt	k.A. (international)	Silvoarabel, Silvopastoral, Silvoagripastoral	ÖS (BioDiv, Bodenanreicherung, Wasser- & Luftqualität) C-Gehalt, CO2, CH4, N2O
Baah-Acheamfour et al., 2018	Review	10	Gemäßigt, Subalpin	Kanada	Alley-Cropping shelterbelts Hecken	C-Gehalt THG-Emissionen
Strauss et al., 2024	Review	275	Gemäßigt	Europa	KUP (n=57), AF (n=82)	Klimaschutz C-Gehalt ÖF (Erosionsfunktion, Filter- und Puffer, Habitatfunktion, Wasserkreislauf, Rückhaltefunktion)
Namockel, 2024	Review	24	Gemäßigt/kontinental	International	KUP, AF	Durchwurzelung Erosion Bodenfeuchte Bodengefüge

3.1.1 Diskussion

Die erläuterten Ergebnisse bestätigen einen positiven Effekt von silvoarablen Systemen auf die Durchwurzelung des Bodens. Dabei wird sowohl die Wurzelmasse als auch eine konstante tiefere Durchwurzelung im Vergleich zum konventionellen Acker erhöht. Eine dauerhafte Durchwurzelung, trägt wesentlich zur Stabilisierung der Bodenstruktur bei und reduziert das Risiko von Bodenerosion, wie auch Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 9, 12) beschreiben. Ebenso wirkt sich eine erhöhte Durchwurzelung und Wurzelatmung positiv auf den SOC-Gehalt, die Bodenstruktur sowie die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften aus, wie auch Zhu et al. (2020, S.74 f.) dokumentieren.

Die Wurzelsysteme der Gehölze reichen in den Wurzelraum der landwirtschaftlichen Kultur hinein. Verschiedene Autor*innen (Cardinael et al., 2015; Jose et al., 2000; Mayer et al., 2022; Mulia & Dupraz, 2006; Swieter et al., 2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 20) interpretieren die nachgewiesene horizontale und vertikale Verteilung der Gehölzwurzeln als Ergebnis der Konkurrenz durch die angrenzende landwirtschaftliche Kultur während der Etablierungsphase unter vergleichsweise trockenen Bedingungen. Die Wuchsrichtung der Wurzeln ist nach Erkenntnissen von Cardinael et al. (2015, zitiert nach Namockel, 2024, S. 20) dabei vorzugsweise vertikal orientiert. Eine konkurrenzbedingte Anpassung des Wurzelwuchs deutet darauf hin, dass Gehölze Bodenwasser- und Nährstoffressourcen überwiegend aus tieferen Bodenschichten aufnehmen, was bereits auf einen gehölzbedingten Effekt hinsichtlich der Bodenfeuchte hindeutet. Weitere, von Namockel (2024, S. 20) disku-

tierte Ergebnisse, deuten darauf hin, dass die jährliche Bodenbearbeitung des konventionell bewirtschafteten Ackers nicht zu einem signifikanten Wurzelrückgang, beziehungsweise einer Erziehung der Gehölze unterhalb der angrenzenden landwirtschaftlichen Kultur, wie sie im Informationsblatt des LfL (2024, S. 21) beschrieben wird, führt. Mulia & Dupraz (2006 zitiert nach Namockel, 2024, S. 20) weisen in ihrer Studie Pappelwurzeln in bis zu 8 m Entfernung zur Gehölzreihe, innerhalb der landwirtschaftlichen Kultur nach, während Wurzeln der Juglans nur in bis zu 2 m Entfernung dokumentiert werden konnten. Diese Ergebnisse deuten außerdem auf artabhängige Unterschiede in der konkurrenzbedingten Anpassung durch Wurzelausdehnung hin. Es ist dennoch anzumerken, dass auch Mulia & Dupraz (2006, S. 73) festhalten, dass die Bodenbearbeitung während der ersten Jahre wie ein Wurzelschnitt in den oberen Bodenschichten bis 30 cm wirkt.

3.2 Organische Bodensubstanz und SOC-Gehalt

3.2.1 Ergebnisse

Daten zum SOC unter AF-Systemen im Vergleich zu einem Kontrollfeld wurden von sieben der neun ausgewerteten Studien thematisiert (Baah-Acheamfour et al., 2017; Dmuchowski et al., 2024; Ivezić et al., 2022; Mayer et al., 2022; Strauss et al., 2024; Torralba et al., 2016; Visscher et al., 2024). Torralba et al. (2016, S. 156) dokumentieren eine erhöhte organische Substanz in europäischen silvoarablen Systemen im Vergleich zum konventionellen Acker. Baah-Acheamfour et al. (2017, S. 183)

berichten in ihrem Review (10 Studien) von erhöhtem Kohlenstoff in ober- und unterirdischer Masse innerhalb der Gehölzstreifen (42,8 +16 Mg C ha; n=7) im Vergleich zum konventionellen Acker (1,4 Mg C ha; n=1) im gemäßigten und subalpinen Raum Kanadas. Den größten Anteil innerhalb der Gehölzstreifen macht der SOC (69 %) in den oberen 0 - 30/40 cm des Bodens aus, während weniger als ein Drittel des Kohlenstoffs in der Vegetation (31 %) gebunden ist. In baumbasierten Zwischenfruchtanbau-Systemen (tree-based-intercropping-Systemen, kurz TBI) konnten 14,1 +- 2 Mg C ha (n=5) in oberirdischer Biomasse und 4,2 +- 0.5 Mg C ha (n=5) in unterirdischer Biomasse dokumentiert werden (Hazlett et al., 2005 zitiert nach Baah-Acheamfour et al., 2017, S. 183). Eine Erhöhung der SOC-Vorräte erfolgt unter erhöhten C-Einträgen (Menge der Biomasse oder externe organische Einträge) oder verringerten Verlusten (Paul et al., 2023 zitiert nach Strauss et al., 2024, S. 2). Hinsichtlich der SOC-Vorräte unterschiedlicher agroforstlicher Landnutzungssysteme skizzieren Baah-Achemfour et al. (2017) zudem eine Reihung:

Hecken > Pufferstreifen > Alley-Cropping zitiert nach Baah-Acheamfour et al., 2017, S 184). Shi et al. (2018) zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 5) reihen die untersuchten Produktionsstandorte der gemäßigten Regionen in Abhängigkeit der Kohlenstoffvorräte in den Böden wie folgt:

Subtropische Hausgärten (10 Mg C/ha) > Alley-Cropping (2,2 Mg C/ha) > Windschutzhecken (0.90 Mg C) > Silvopasture (0.7 Mg C).

Gehölzbasierte Landnutzungssysteme wurden ihrem SOC-Vorrat entsprechend Wälder > Agroforste > Baumplantagen > Ackerbaukulturen gereiht (Me-

nichetti et al., 2020 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 5). Strauss et al. (2024, S. 4) berichten außerdem unter agroforstlicher Nutzung durch KUP vereinzelt von einem Rückgang des SOC-Gehalts.

Baah-Acheamfour et al. (2017, S. 185) halten eine erhöhte CO₂-Emission sowie eine erhöhte Wurzelatmung und mikrobielle Aktivität innerhalb der Gehölzstreifen im Vergleich zum konventionellen Acker fest (Peichl et al., 2006; Wotherspoon et al., 2014 zitiert nach Baah-Acheamfour et al., 2017, S. 185). Ivezić et al. (2022, S. 11) stellten in Alley-Cropping-Systemen unterschiedlichen Alters bis zu 20 Jahren im globalen Maßstab (gemäßigte und tropische Regionen) weiters fest, dass SOC hauptsächlich in den oberen 0 - 30 cm akkumuliert wird sowie mehr innerhalb der Baumreihen als außerhalb. Auch Mayer et al. (2022, S. 4 f.) dokumentieren in gemäßigten Alley-Cropping-Systemen auf globaler Ebene signifikant höhere SOC-Vorräte in AF-Systemen im Vergleich zu den jeweiligen Kontrollflächen in den oberen Bodenschichten von 0 - 40 cm (0 - 20 cm, 20 - 40 cm). Ebenso weisen die mittleren SOC-Vorräte in den analysierten Bodentiefen bis 40 cm signifikant höhere Werte auf als die Kontrollflächen (Mayer et al., 2022, S. 4).

Dmuchowski et al. (2024, S. 4) berichten von einem jährlichen Sequestrierungs-Index im Oberboden (0 - 20 cm) von Alley-Cropping-Systemen von +- 1,15 t/ha SOC. Nach der Umwandlung eines konventionellen Ackers in ein AF-System wies der Oberboden bis 30 cm Tiefe einen bis zu 40 % höheren SOC-Gehalt auf (De Stefano & Jacobson, 2017 zitiert nach Dmuchowski et al. 2024). Die Effekte wurden mit 19 - 34 % höheren C-Vorräten als auf der Kontrollfläche bis in 1 m Tiefe festgestellt und waren in

heißen Regionen größer als in gemäßigten. Eine signifikant positive Korrelation zwischen den Gehölzen und dem SOC-Gehalt ließ sich bis in 8 m Entfernung von den Gehölzreihen nachweisen. Weiters berichten Dmuchowski et al. (2024) von abnehmenden C-Einträgen mit zunehmender Distanz zur Baumreihe in AF-Systemen (Simón et al., 2013 zitiert in Dmuchowski et al., 2024, S.5). In einem Meter Abstand wurden jährliche Einträge von 0,95 Mg/ha gemessen, bei einem Abstand von 11,5 m lag der Wert bei 0,22 Mg/ha (Oelbermann et al., 2004 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6). Ähnliche Werte wurden unter sieben Jahre alten Hybridpappeln von Thevathasan & Gordon (2004 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6) und *Quercus suber* L. zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6) nachgewiesen. Einen signifikanten Einfluss von Baumarten auf die SOC-Anreicherung im Boden konnten Mayer et al. (2022, S. 5), ebenso wie Ivezic et al. (2022, S. 7), nicht feststellen. Die Artenvielfalt der Gehölze zeigte jedoch einen positiven Effekt auf die Abbaurrate der organischen Bodensubstanz zitiert nach Strauss et al., 2024, S. 6).

Anders als hinsichtlich der Baumarten konnten Mayer et al. (2022, S.5) eine signifikant positive Korrelation zwischen den SOC-Vorräten und dem Tonanteil in 20 - 40 cm Bodentiefe feststellen, während das System-Alter signifikant negativ mit den SOC-Vorräten korreliert. Hinsichtlich des RSOC (relativer Bodenkohlenstoff: SOC-Vorrat des konventionellen Ackers in Relation zu dem SOC-Vorrat im Alley-Cropping-System) stellten Ivezic et al. (2022, S. 7) jedoch keine signifikanten Effekte des Baumalters in detaillierter Betrachtung der Bodentiefen bis 10 und 40 cm fest, ebenso wie die Klimazonen. Unter

Berücksichtigung des gesamten Datensets hingegen dokumentierten sie eine signifikante Korrelation der Klimazonen sowie eine leichte Korrelation des Baumalters auf den RSOC. So wiesen AF-Systeme der tropischen Regionen signifikant höhere RSOC-Werte auf als jene in gemäßigten Regionen (Ivezic et al., 2022, S. 8). Auch die Reihenbreite hatte einen signifikanten Effekt. Unter älteren Gehölzstreifen mit zunehmender Reihenbreite geringere Werte dokumentiert (Ivezic et al., 2022, S. 7). Strauss et al. (2024, S.6) beschreiben ebenfalls steigende Kohlenstoffvorräte mit steigendem Alter des Gehölzbestandes.

Dem allgemein erhöhten SOC-Gehalt entsprechend zeigen Visscher et al. (2024) eine erhöhte C-Sequestrierung um durchschnittlich 33 % (17 Studien, n=44) in silvoarablen Systemen der gemäßigten, tropischen und Wüstenregionen Lateinamerikas im Vergleich zum konventionell bewirtschafteten Kontrollfeld (Visscher et al., 2024, S. 5). Auch De Stefano & Jacobson (2017 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 5) berichten von einer signifikanten Veränderung der C-Sequestrierung mit einer veränderten Landnutzung. Baah-Acheamfour et al. (2017, S. 184) berichten weiter, dass sich die Anreicherung des SOC-Gehaltes unterhalb von Gehölzstreifen im Vergleich zum konventionellen Acker zwischen den ausgewerteten Studien unterschied. Die Unterschiede innerhalb der Studien waren sehr gering. Visscher et al. (2024) hingegen stellten für die Systeme Lateinamerikas keine Unterschiede zwischen den Sequestrierungswerten der unterschiedlichen Klimaregionen (gemäßigt, tropisch, Wüste) oder Bodentextur-Klassen fest, jedoch war der Effekt

signifikant höher in trockenen Regionen (Visscher et al., 2024, S. 5).

Mayer et al. (2022) stellten weiters eine nicht proportionale Anreicherung der SOC-Vorräte nach der Umwandlung in AF-Systeme unterschiedlicher Bodentiefen fest. Die SOC-Sequestrierungsrate unterschied sich zwischen den Bodentiefen. Diese war in den 0 - 20 cm Bodentiefe im Vergleich zu der in 20 - 40 cm Bodentiefe leicht erhöht (Mayer et al., 2022, S. 4). In 20 - 40 cm Bodentiefe korrelierte die Sequestrierungsrate signifikant positiv mit der durchschnittlichen Jahrestemperatur, jedoch negativ mit der Baumdichte (Mayer et al., 2022, S. 5). Des Weiteren sank die Zuwachsrate des Kohlenstoffvorrates mit zunehmendem Bestandsalter des Systems (Feliciano et al., 2018; Hamon et al., 2009 zitiert nach Strauss et al. 2024, S 6).

Strauss et al. (2024) analysierten außerdem das Klimaschutzpotenzial von unterschiedlichen europäischen AF-Systemen. Das Klimaschutzpotenzial entspricht einer positiven Netto-C-Bilanz innerhalb eines Systems, was neben der Anreicherung von Kohlenstoff auch den gleichzeitigen Austrag berücksichtigt. Sie halten fest, dass durch die Landnutzungsänderung von konventioneller landwirtschaftlicher Bewirtschaftung zu AF-Systemen ein erhöhtes Klimaschutzpotenzial einhergeht (Wilson et al., 2016 zitiert nach Strauss et al. 2024, S. 6). Für KUP stellten sie ein erhöhtes Klimaschutzpotenzial unter einer ausreichenden Wasserversorgung sowie milden bis warmen Temperaturen in der Vegetationsperiode fest (Aust, 2012 zitiert nach Strauss et al. 2024, S. 6). Außerdem stieg das Potenzial mit der Umtriebslänge, hier der Dauer der Pflanzung, wohingegen es mit zunehmender Erntehäufigkeit sank.

Darüber hinaus stellten die Autor*innen eine Abhängigkeit des Klimaschutzpotenzials von der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung fest, während die Baumartenwahl weniger Effekte zeigte (Chimento et al., 2016; Lasch et al., 2010 zitiert nach Strauss, 2024, S. 6). In Alley-Cropping-Systemen stieg das Klimaschutzpotenzial mit zunehmender Baumdichte. Strauss et al. (2024, S.6) halten weiter fest, dass auch die Baumartenwahl das Klimaschutzpotenzial der Alley-Cropping-Systeme beeinflusst.

3.2.2 Diskussion

Die oben erläuterten Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass die organische Substanz im Boden nach der Etablierung von AF-Systemen auf konventionellen Ackerstandorten erhöht wird. Durch die Landnutzungsänderung von konventionellem Acker zu Agroforstsystemen resultiert eine erhöhte Biomasseproduktion durch die Gehölze, wodurch der Eintrag durch Streu, Schnittreste, Wurzel-Turnover und Rhizodeposition erhöht wird, wie auch Mayer et al. (2022, S.5) diskutieren. Die Menge des jährlichen Inputs von organischer Substanz entspricht etwa 35 % der Vorräte organischer Substanz im System (Amelung et al., 2018, S. 89). Dabei kommt es nach den Erkenntnissen von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 110) zu einer nennenswerten Humusanreicherung, ähnlich der von Hecken, innerhalb der Gehölzreihen. Die organische Substanz verbessert die bodenphysikalischen Eigenschaften, wodurch die Aggregat- und Humusstabilität gesteigert werden, wie durch weitere Erkenntnisse von Mayer et al. (2022, S. 5) und Strauss et al. (2024, S. 20) bestätigt wird. Durch verringerte Kohlenstoffausträge durch Erosion des Oberbodens und Auswaschung

(vgl. Kap. 3.5) wird der Bodenkohlenstoff nachhaltig im Oberboden gespeichert.

Durch das Adsorptionsvermögen von organischer Bodensubstanz ist von einer erhöhten Schad- und Nährstoffspeicherung des Bodens auszugehen (Amelung et al., 2018, S. 84). Ebenso werden auch die chemischen Bodeneigenschaften verbessert, wodurch im Prozess der Humusbildung die Kationenaustauschkapazität erhöht wird (Amelung et al. 2018, S. 84). Dabei wird gleichfalls die Bodenstruktur und der Humus stabilisiert (Amelung et al. 2018, S. 85), was zusätzlich einen positiven, erosionsmindernden Effekt hat.

Außerdem wird, wie Dmuchowski et al. (2024, S. 6) weiter festhalten, die mikrobielle Aktivität erhöht. Dies führt zu einer höheren Zersetzungsrate der organischen Substanz zu SOC, ebenso wie zu einer Erhöhung des mikrobiell gespeicherten Kohlenstoffs (Amelung et al., 2018, S. 126). Im Verhältnis entspricht der C-Gehalt des Bodens etwa 50 % der organischen Bodensubstanz (Amelung et al., 2018, S. 86).

Die erhöhten Kohlenstoffeinträge erfolgen überwiegend in den Oberboden. Das tiefere Wurzelsystem von Gehölzen (vgl. Kap. 3.1) führt jedoch zu zusätzlichen Einlagerungen organischer Stoffe durch abgestorbene Feinwurzeln und Rhizodeposition in tieferen Bodenschichten. Die Autor*innen weisen außerdem darauf hin, dass die identifizierten Datengrundlagen keine aussagekräftigen Ergebnisse zur Anreicherung von SOC in tieferen Bodenschichten zulassen, da die meisten Studien lediglich Messungen bis zu 40 cm Bodentiefe beinhalten (Ivezić et al., 2022; Mayer et al., 2022). Die Effekte der Gehölze zur Anreicherung von SOC reichen jedoch

nachweislich bis in 1 m Tiefe und 8 m Entfernung in die landwirtschaftliche Kultur hinein.

Die Ergebnisse lassen den Schluss zu, dass die klimatischen und standörtlichen Bedingungen sowie die Landnutzung und deren Art, hinsichtlich der Gestaltung (Baumarten, Reihendichte, Reihenabstände) und Bewirtschaftung, die wichtigsten Parameter einer SOC-Anreicherung sind.

Im globalen Maßstab wird das allgemeine Potenzial SOC zu generieren durch die klimatischen Voraussetzungen, speziell die durchschnittliche Jahrestemperatur und den durchschnittlichen jährlichen Niederschlag bestimmt. Baah-Acheamfour et al. (2017, S. 184) halten aufgrund der Unterschiede in der C-Anreicherung in silvoarablen Systemen unterschiedlicher klimatischer Regionen fest, dass im globalen Vergleich der Standort sowie die herrschenden klimatischen Bedingungen größere Auswirkungen als die Landnutzung haben. Insbesondere unter hohen Temperaturen konnten höhere Werte für die C-Sequestrierung und ein höherer SOC-Vorrat festgestellt werden. Entscheidend sind nach Kenntnissen von Mayer et al. (2022, S. 6) hierbei die höhere Biomasseproduktion und erhöhte Einträge in den Boden sowie deren verbesserte Zersetzung durch die erhöhte mikrobielle Aktivität. Letztere resultiert einerseits durch höhere Bodentemperaturen in warmen Regionen und andererseits durch ein höheres Nahrungsangebot durch die erhöhten Biomasseeinträge. Dies deckt sich mit dem heutigen Stand des Wissens (Amelung et al., 2018). Insbesondere hinsichtlich steigender Temperaturen und einer veränderten Phänologie im Klimawandel ist darauf hinzuweisen, dass das allgemeine Potenzial zukünftiger deutscher Landnut-

zungssysteme, Biomasse zu produzieren und SOC zu generieren, steigen könnte. Strauss et al. (2024) halten wiederum weiters fest, dass mit dem Klimawandel Kohlenstoffverluste aus dem Boden zunehmen und eine Anreicherung des SOC-Gehaltes unter AF lediglich den Verlust ausgleicht, jedoch langfristig nicht zwangsläufig einen Netto-SOC-Anstieg bewirken.

Des Weiteren konnte eine höhere C-Sequestrierung unter trockenen Bedingungen in der globalen Betrachtung festgestellt werden. Visscher et al. (2024, S. 7, 9f.) vermuten, dass Wasserknappheit in Trockengebieten die Empfindlichkeit des Ökosystems gegenüber Nutzungsänderung erhöht, weshalb jede Veränderung der Funktionsweise erhebliche Auswirkungen auf das System hat. Etablierte Bäume können das Mikroklima verändern und so die standörtlichen Bedingungen für die Biomasseproduktion verbessern. Systeme in gemäßigten Regionen mit hoher Wasserverfügbarkeit sind ihrer Ansicht nach in sich stabiler und weniger kontrastreich hinsichtlich des SOC-Gehaltes nach einer Landnutzungsänderung (Visscher et al., 2024, S. 9 f.). Dies wird durch die Vermutungen von Ivezić et al. (2022, S. 10) bekräftigt.

Die Voraussetzungen eines Standortes, innerhalb einer biogeographischen Region SOC zu akkumulieren beziehungsweise zu speichern, sind abhängig von der Landnutzung und dem Tongehalt des Bodens. Alle Autor*innen der ausgewerteten Studien bestätigen im Durchschnitt einen höheren SOC-Vorrat des Bodens sowie einen höheren RSOC infolge einer Landnutzungsänderung. Insbesondere der RSOC gibt Auskunft über die Veränderung des SOC-Vorrates durch die Landnutzungsänderung. Auch

Ivezić et al. (2022, S. 8), die eine Korrelation zwischen dem Klima und dem RSOC in silvoarablen Systemen feststellten, begründen ihre Ergebnisse mit den ursprünglichen (landwirtschaftlichen) Systemen. Kontrollsysteme beziehungsweise Systeme der tropischen Regionen, auf denen AF etabliert wurden, sind häufig durch degradierte Böden charakterisiert. Unter solchen Bedingungen ist der SOC-Vorrat im Ausgangszustand weiter von dem standörtlichen Sättigungspunkt entfernt, weshalb die Böden ein größeres Potenzial zur SOC-Anreicherung aufweisen (Ivezić et al., 2022, S. 10). Durch die gehölzbedingte Verbesserung der chemischen und physikalischen Bodeneigenschaften degradierter Böden sowie einer Reduktion der Erosion wird der Effekt durch die Baumpflanzungen größer im Vergleich der Systeme unterschiedlicher Klimaregionen. Wie Mayer et al. (2022, S. 7) und Strauss et al. (2024, S. 6) weiter festhalten, kann unter einer bestimmten Landnutzung nur ein maximaler SOC-Gehalt angereichert werden. Es gibt einen Gleichgewichtspunkt zwischen Eintrag und Austrag. Die Landnutzungsänderung führt zu einem veränderten, höheren Gleichgewichtspunkt. In Abhängigkeit von der vorherigen Landnutzung ist mit einer schnellen und kontrastreichen SOC-Anreicherung zu rechnen. Eine schnellere Erhöhung des C-Vorrates erfolgt mit steigender Differenz des Vorrates im Status-Quo und dem im Gleichgewichtszustand (Feliciano et al., 2018; Hamon et al., 2009; Medinski et al., 2014 zitiert nach Strauss et al., 2024, S. 6).

Gemäß den Reihungen der Systeme lässt sich außerdem ableiten, dass naturnahe Systeme, wie Wälder oder Hecken, ein höheres Potenzial zur SOC-Anreicherung aufweisen. Es ist jedoch darauf

hinzuweisen, dass es sich bei den Reihungen um Ergebnisse aus Meta-Analysen und somit einer Auswertung auf Grundlage eines sehr heterogenen Datensatzes handelt. Die Vergleichbarkeit hinsichtlich standörtlicher Eigenschaften sowie Bewirtschaftungs- und Systemunterschiede zwischen den unterschiedlichen Systemen ist nicht gegeben, weshalb solche Reihungen im Rahmen dieser Arbeit als Versuch der übersichtlichen Darstellung von Systempotenzialen, SOC zu speichern, zu verstehen sind.

Neben dem Gleichgewichtspunkt unter einer Landnutzung ist der potenzielle C-Vorrat des Bodens immer abhängig von standörtlichen Bedingungen, insbesondere dem Ton-Anteil des Bodens, der den C-Sättigungspunkt bestimmt (Amelung et al., 2018, S. 95 f.). Dem entsprechen die Ergebnisse von Mayer et al. (2022), die eine Korrelation des SOC-Gehaltes in 20 - 40 cm Bodentiefe und dem Tongehalt des Bodens feststellten. SOC wird im Prozess der Bodenbildung an die Oberfläche von Tonmineralen gebunden sowie aggregiert (Amelung et al., 2018, S. 84; Strauss et al., 2024, S. 6). Insbesondere in 20 – 40 cm Bodentiefe erfolgt die Speicherung von SOC vermehrt durch Adsorption sowie Aggregationen mit/an Tonmineralen und weniger in Form von mikrobieller Masse oder an organischer Substanz. Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 16) fassen außerdem zusammen, dass ein hoher Tongehalt des Oberbodens die Speicherung von organischem Kohlenstoff in stabilen organo-mineralischen Komplexen erhöht. Ein hoher Tongehalt des Unterbodens kann insbesondere in Kombination mit hohen Niederschlägen zu einer gehemmten Zersetzung und Mineralisierung der organischen Substanz führen

und somit den SOC-Gehalt erhöhen (Zehlius-Eckert et al., 2020, S. 16).

Auf Systemebene lassen sich darüber hinaus, entsprechend der Ergebnisse, bewirtschaftungsbedingte „Stellschrauben“ hinsichtlich der positiven Effekte auf die SOC-Anreicherung durch die Etablierung von Gehölzreihen in silvoarablen Systemen feststellen. Infolge der geänderten Landnutzung zu silvoarablen Systemen beschreiben Strauss et al. (2024, S. 6) einen positiven Effekt der Baumdichte innerhalb von AF-Systemen auf die Netto-Kohlenstoffbilanz. Ivezić et al. (2022) stellten höhere Werte des RSOC bei geringerer Breite des mehrreihigen Gehölzstreifens fest. Sie schließen auf eine höheren Baumdichte und einen resultierenden höheren ober- und unterirdischen Eintrag von Biomasse (Ivezić et al., 2022, S. 7). Es ist jedoch auf die intra- und interspezifische Konkurrenz innerhalb des Gehölzstreifens hinzuweisen, die im Rahmen dieser Arbeit nicht näher beleuchtet wird.

Da sich der erhöhte SOC-Vorrat auf die Gehölzstreifen und deren nähere Umgebung bezieht, ist davon auszugehen, dass der gesamte SOC-Vorrat eines silvoarablen Systems mit geringeren Abständen zwischen den Gehölzreihen steigt. Mayer et al. (2022) hingegen stellen eine negative Korrelation zwischen der Baumdichte und der C-Sequestrierung in 20 - 40 cm Bodentiefe unter AF-Systemen der gemäßigten Zone fest. In näherer Betrachtung der Datengrundlage fällt jedoch auf, dass die Systeme mit der höchsten Baumdichte pro Hektar und negativer C-Sequestrierung in 20 - 40 cm Bodentiefe silvopastorale Systeme und Hecken unter vermehrter Verwendung von Koniferen sind, während Alley-Cropping-Systeme geringere Baumdichten aufwei-

sen. Es ist außerdem zu berücksichtigen, dass die Kontrollsysteme von silvopastoralen Systemen und Hecken überwiegend Grünlandflächen waren und die Kontrollsysteme bereits einen hohen SOC-Vorrat aufwiesen (Mayer et al., 2022, Appendix 3). Dies lässt darauf schließen, dass die Korrelation keine Kausalität hinsichtlich der Pflanzdichte von mehrreihigen Gehölzstreifen zur Energieholz-erzeugung ableiten lässt, sondern in diesem Fall vielmehr eine Kovarianz mit den Systemarten und den Vergleichssystemen besteht. Weiters konnten aufgrund der Datengrundlage weniger Daten (35 n von 61 n) zur C-Sequestrierung in 20 - 40 cm Bodentiefe ausgewertet werden als jener in 0 - 20 cm. Ein Vergleich der Ergebnisse der untersuchten Bodenschichten sollte daher mit Vorsicht interpretiert werden (Mayer et al., 2022, Appendix 3).

Ivezić et al. (2022) halten außerdem fest, dass der RSOC positiv mit dem Alter der Gehölze korreliert. Die Zuwachsrate der positiven Kohlenstoffbilanz sinkt jedoch mit zunehmendem Gehölzalter, was auf eine Näherung des SOC-Gehaltes an den Gleichgewichtszustand hinweist (Strauss et al., 2024, S. 10). Hinsichtlich des RSOC in den Bodentiefen bis 10 und 40 cm konnten Ivezić et al. (2022, S. 7) keinen signifikanten Einfluss des Gehölzalters feststellen, was sie mit einer geringen Anzahl an Beobachtungen unter älteren Systemen begründen. Sie diskutieren weitere Ergebnisse von Ramesh et al. (2015) und Young (1997), die darauf hinweisen, dass eine tatsächliche SOC-Anreicherung in Alley-Cropping-Systemen erst nach zehn Jahren nach Etablierung der Gehölze erfolgt (zitiert nach Ivezić et al., 2022, S. 11). Mayer et al. (2022) weisen wiederum eine negative Korrelation des Baumalters auf den SOC-

Vorrat in 20 - 40 cm Bodentiefe nach. Dies könnte ebenfalls mit dem oben erläuterten reduzierten Datensatz begründet werden. Insbesondere alte Systeme und junge Systeme enthalten gehäuft keine Daten zum SOC-Vorrat in 20 - 40 cm. Die Altersspanne reicht von 4 - 80 Jahren, wobei Systeme unter zehn Jahren mit drei Beobachtungen und Systeme über 31 Jahren mit einer Beobachtung berücksichtigt wurden (Mayer et al., 2022, Appendix 3).

Hinsichtlich der Bewirtschaftung ist festzuhalten, dass mit zunehmender Erntefrequenz der Gehölze in KUP die positive Kohlenstoffbilanz sinkt (Strauss et al., 2024). Dies könnte durch einen verringerten Gesamtbiomasseeintrag in den Boden begründet werden. Auch die weiteren Ergebnisse von Strauss et al. (2024, S. 4) zur Reduktion der C-Vorräte in einzelnen KUP könnten dem entsprechend durch eine regelmäßige Biomasseentnahme erklärt werden.

Die Baumartenwahl hatte in keiner ausgewerteten Studie einen signifikanten Einfluss auf die SOC-Anreicherung. Die Autor*innen weisen jedoch daraufhin, dass im Allgemeinen Laubbäume ein größeres Potenzial zur SOC-Anreicherung aufweisen, da ihre Wurzelsysteme größer und tiefer sind (vgl. auch Kap. 3.1) und das Laub schneller zersetzt werden kann als Nadeln (Dmuchowski et al., 2024, S. 6; Mayer et al., 2022, S. 5). Im Rahmen der Auswertung der Ergebnisse von Mayer et al. (2022), die eine negative Korrelation zwischen der Baumdichte und der C-Sequestrierung feststellen, ist bei näherer Datenbetrachtung festzustellen, dass ein großer Anteil der negativen C-Sequestrierungswerte aus AF-Systemen mit Koniferen stammt. Dies könnte die

Vermutungen zur gehölzartabhängigen SOC-Anreicherung stützen. Strauss et al. (2024, S. 6) weisen außerdem darauf hin, dass in deutschen AF-Systemen zur Energieholzgewinnung die Baumarten einen geringen Einfluss auf die Netto-Kohlenstoffbilanz haben, da alle der verwendeten Baumarten ähnliche Eigenschaften aufweisen. Außerdem hat eine höhere Diversität der Gehölze innerhalb der Gehölzstreifen eines AF-Systems einen positiven Effekt auf die C-Sequestrierung.

Hinsichtlich der Klimaschutzfunktion ist noch einmal auf die Ergebnisse von Baah-Acheamfour et al. (2017, S. 185) hinzuweisen. Sie stellen durch eine erhöhte Wurzelatmung und mikrobielle Aktivität eine erhöhte CO₂-Emission innerhalb der Gehölzstreifen im Vergleich zum konventionellen Acker fest. Durch die C-Assimilation der Bäume, die C-Anreicherung durch Streu, Wurzelumsatz, den Ein- und Austrag durch Pflanzen und Auswaschungen, könnten die Systeme dennoch in der Netto-Bilanz Kohlenstoff anreichern (Peichl et al., 2006 zitiert nach Baah-Acheamfour et al., 2017, S. 185). Über die positiven Effekte der Gehölze auf die natürlichen Bodenfunktionen hinaus, bestätigen diese Ergebnisse das Potenzial von silvoarablen Systemen als wirkungsvolle Treibhausgasspeicher beziehungsweise -senken hinsichtlich der Klimaschutzfunktion, wie durch das BMUV (2023) und Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 12 ff) erläutert wird.

Es ist jedoch weiters darauf hinzuweisen, dass die Analyse von Strauss et al. (2024) zu dem Schluss führte, dass das angenommene Klimaschutzpotenzial (jährliche CO₂-Reduktion durch Bindung des Kohlenstoffs in organischen Verbindungen pro Hektar) durch die veränderte Landnutzung häufig nicht

mit den realen Ergebnissen übereinstimmte, sondern darunter bleibt (Strauss et al., 2024, S. 6, 10). Die Gestaltung der Maßnahme, die Bewirtschaftung und die Rückkopplung mit den standörtlichen Faktoren müssen daher weiter untersucht werden (Strauss et al., 2024, S. 10).

3.3 Bodengefüge

3.3.1 Ergebnisse

Detaillierte Ergebnisse zur Veränderung des Bodengefüges, wie auch zur Durchwurzelung unter AF-Systemen konnten im Rahmen dieser standardisierten Literaturrecherche nur aus der unveröffentlichten Arbeit von Namockel (2024) gewonnen werden. Unter AF-Systemen kommt es zu einer Bodenanreicherung durch erhöhte Einträge organischer Substanzen und eine erhöhte mikrobielle Aktivität (zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6). Mayer et al. (2022, S. 7) halten fest, dass durch die SOC-Anreicherung in Alley-Cropping-Systemen unter Verwendung von Laubbäumen die Bodenaktivität angeregt wird, organische Substanz leichter zersetzt werden kann und die Bodenstruktur durch stabile organisch-mineralische Aggregate verbessert wird. Die von Namockel (2024) zusammengefassten Ergebnisse zeigen eine deutlich höhere Gesamtporosität und eine deutlich verringerte Schüttdichte in der Bodentiefe 0 - 20 cm unterhalb der Gehölzstreifen. Unter konventionellen Kulturen liegt die durchschnittliche Schüttdichte in 0 - 20 cm bei 1,58 - 1,65 g/cm³, was der Kategorie mittel – hoch nach AG Boden entspricht. Die festgestellte durchschnittliche Schüttdichte unter 18-jährigen KUP-Streifen betrug 1,38-1,35 g/cm³ und entspricht der Katego-

rie „niedrig“ (Kahle & Janssen, 2020 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21). Eine Studie dokumentierte jedoch leicht erhöhte Schüttdichte-Werte unter KUP mit Weiden und Pappeln im Vergleich zum konventionellen, bearbeiteten Acker (Langeveld et al., 2012 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21). Unterhalb der 20 cm Bodentiefe konnten keine signifikanten Unterschiede festgestellt werden (Kahle & Janssen, 2020 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21).

3.3.2 Diskussion

Unterhalb und in näherer Umgebung der Gehölze kommt es zu einer erhöhten Bodenlockerung.

Die bereits erläuterte, erhöhte Durchwurzelung (vgl. Kap. 3.1) des Bodens im Bereich der Gehölze führt zu einer Erhöhung des Porenvolumens. Auch Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 12) berichten von signifikant geringeren Rohdichten, einem signifikant erhöhten Anteil der Mittelporen sowie einer erhöhten Porosität auf Energieholzstreifen nach sechs und zehn Jahren. Dem entsprechen die Erkenntnisse von Kahle & Janssen (2020 zitiert nach Namockel, 2024, S. 22), die ihre Ergebnisse auf eine erhöhte Porosität in Kombination mit leeren Feinwurzelkanälen zurückführen. Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 12) weisen ebenfalls auf die positiven Effekte einer permanenten, dynamischen Bodendurchwurzelung hin. Des Weiteren zeigen sie eine Abhängigkeit der Bodenlockerung von einem erhöhten Anteil wasserstabiler Aggregate sowie einer gesteigerten Aktivität der Bodenfauna auf.

Entsprechend der in Kapitel 3.2 zusammengetragenen und diskutierten Erkenntnisse zur Anreicherung der organischen Substanz und des SOC im Oberboden unter Gehölzstreifen (vgl. Kap. 3.2.1), ist von einer Bodenanreicherung und Verbesserung des

Bodengefüges durch stabilere Aggregation auszugehen, wie auch von Kahle & Janssen (2020, zitiert nach Namockel, 2024, S. 22) erläutert wird. Ergänzend wirkt die von vielen Autor*innen bestätigte, erhöhte mikrobielle Aktivität und Populationsgröße der Bodenflora und -fauna positiv auf die Bodenbildung und Lockerung. Insbesondere eine vergrößerte Regenwurmpopulation führt zu einer Verbesserung des Porenvolumens (Veldkamp et al., 2023; Kahle & Janssen, 2020 zitiert nach Namockel, 2024; Zehlius-Eckert et al. 2020, S. 28). Durch die erhöhte mikrobielle Aktivität werden bodenbildende Prozesse verstärkt, die außerdem die physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften verbessern. Daher ist von weiteren positiven Effekten auf die Infiltration und Wasserspeicherkapazität, die Erosion, die Nährstoffspeicherung und -verfügbarkeit sowie die Puffer- und Filterfunktion der Böden auszugehen.

Die wiederum erhöhten Schüttdichten unter Gehölzstreifen könnten durch ein Ausbleiben einer regelmäßigen Pflugbearbeitung der jungen AF-Systeme in Vergleich zum konventionellen Acker erklärt werden (Langeveld et al., 2012 zitiert nach Namockel, 2024, S. 22). Darüber hinaus könnten die divergierenden Ergebnisse auf unterschiedliche Entwicklungsstadien der Gehölzstreifen zurückzuführen sein. Auch Langeveld et al. (2012, zitiert nach Namockel, 2024, S. 22) weisen darauf hin, dass unter bestimmten Bedingungen eine erhöhte Kohlenstoffbindung zu einer Verringerung der Schüttdichte führen kann. Diese Annahme deckt sich mit den Ergebnissen von Wang et al. (2015 zitiert nach Namockel, 2024, S. 22), die eine zunehmende Infiltrationsrate innerhalb der Gehölzstreifen mit fortschreitendem Alter der Bestände dokumentierten,

was auf eine Bodenlockerung und Erhöhung des Porenvolumens mit dem Bestandsalter hindeutet.

3.4 Bodenfeuchte

3.4.1 Ergebnisse

Zum Thema Bodenfeuchte beziehungsweise dem Bodenwasserhaushalt konnten zwei (drei) Studien identifiziert werden. Mayer et al. (2022 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 4) beschreiben eine erhöhte Infiltration und Wasserspeicherung durch erhöhte SOC-Werte. Einige der von Namockel (2024) zusammengefassten Studien zeigen keine Veränderung des Wasserhaushaltes in AF-Systemen nach einer Umwandlung von Grünland oder Acker (Veldkamp et al., 2023 zitiert nach Namockel, 2024, S. 30). Andere Autor*innen dokumentieren eine signifikante Anreicherung des Bodenwassergehaltes unter den AF-Systemen. So konnte ein deutlich höheres Matrixpotenzial in den Bodentiefen 1 m, 1,5 m und 2 m eines kalkhaltigen, schluffigen Tonbodens unter den AF-Systemen nachgewiesen werden, jedoch ohne dass sich das Matrixpotenzial zwischen den Bodentiefen unterscheidet. Unterhalb der landwirtschaftlichen Kultur hingegen zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Bodentiefen (1 m > 1,5 m > 2 m), die nach dem Blattaustrieb der Bäume zunahm (Inurreta-Aguirre et al., 2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 31). Unter Versuchsfeldern mit einem Wurzelschnitt der Gehölze resultierte ein zusätzlich erhöhter Bodenwassergehalt im Vergleich zu solchen mit Gehölzen ohne Wurzelschnitt (Inurreta-Aguirre et al., 2022; Siriri et al., 2013 zitiert nach Namockel, 2024, S. 31 f.). Dem entgegen stehen weitere Ergebnisse zu trockeneren

Bedingungen unter AF-Systemen im Vergleich zum bewirtschafteten Kontrollacker unterhalb von 1,2 m Bodentiefe sowie zu Beginn der Vegetationsperiode (Anfang März bis Mitte Mai) in der Pflugschicht bis 30 cm Bodentiefe (Blanchet et al., 2022; Ong et al., 2000 zitiert nach Namockel, 2024, S. 31). Auch die Tiefenaustrocknung des Bodens ohne folgende Wiederauffüllung wurde unter einem chinesischen AF-System der gemäßigten Zone dokumentiert. Eine andere ausgewertete Studie zeigt eine verbesserte Wiederbefeuchtung des Bodens unterhalb von Gehölzstreifen eines AF-Systems während längerer Regenfälle (Wang et al., 2015 zitiert nach Namockel, 2024, S. 31).

Die höchsten Bodenspannungswerte (200 cBar) wurden in einer Bodentiefe von 15 cm und in einer Entfernung von 24 m von der Nulllinie der Gehölze, mittig innerhalb des Kulturfeldes, erfasst.

Die geringsten Bodenspannungswerte wurden in 1,5 m Entfernung von der Nulllinie in 30 cm Bodentiefe dokumentiert. Die Werte in 60 - 90 cm unterhalb von Baumstreifen waren höher als die derselben Bodentiefe in 1,5 und 24 m Entfernung (Swieter et al., 2022 zitiert nach Namockel, 2024, S. 31). Weitere, von Namockel (2024) zusammengefasste Studien dokumentieren im Oberboden von KUP-Streifen (0 - 10 cm) einen deutlich höheren Anteil pflanzenverfügbaren Wassers (Kahle und Janssen zitiert nach Namockel, S. 30 f.) sowie 3 - 4-mal höhere Werte für die gesättigte hydraulische Leitfähigkeit unterhalb der Baumreihen als im Kontrollacker (Anderson et al., 2009 zitiert nach Namockel, 2024, S. 32) sowie eine leichtere Verteilung des infiltrierten Wassers innerhalb der Bodenmatrix unterhalb von Gehölzen im Vergleich zum konven-

tionellen Acker (Kahle & Janssen, zitiert nach Namockel, 2024, S. 32). Darüber hinaus konnten unter AF-Systemen signifikant höhere durchschnittliche konstante Infiltrationsraten in der Zeit von April – Oktober, besonders zwischen Juli – September, beobachtet werden. Sie waren bis zu 1,81-mal höher unterhalb der Gehölzstreifen als unter der landwirtschaftlichen Kultur (Wang et al., 2015 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21). Außerdem wurde der Boden unterhalb von Gehölzen mit steigender Infiltrationsrate mit zunehmendem Bestandsalter der Gehölze ebenfalls tiefgründiger infiltriert (Wang et al., 2015 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21). Die dokumentierte Wasserrückhaltekapazität bei pF 1,8 und 2,48 war unterhalb von KUP-Streifen nicht signifikant höher als im konventionellen Acker (Kahle & Janssen, 2020 zitiert nach Namockel, 2024, S. 21).

3.4.2 Diskussion

Der Einfluss von Agroforstsystemen (AF-Systemen) auf die Bodenfeuchte und den Wasserhaushalt ist komplex und hängt von einer Vielzahl von Faktoren wie Bodentextur, Infiltrationsraten, Wurzelverteilung, Vegetationsdynamik und klimatische Bedingungen ab. Die untersuchten Studien zeigen ein differenziertes Bild, in dem sowohl positive als auch negative Effekte auf die Bodenfeuchte dokumentiert werden.

Die erhöhte Infiltration und Wasserspeicherung kann durch die erhöhte Durchwurzelung des Bodens durch die Gehölze (vgl. Kap. 3.1) und das dadurch erhöhte Porenvolumen (vgl. Kap. 3.3) der Bodenmatrix sowie die Anreicherung der organischen Substanz (vgl. Kap. 3.2.2) erklärt werden (Amelung et al., 2018). Dies könnte dazu führen, dass infiltriertes Wasser langsamer versickert und

der Boden über längere Zeit hinweg Wasser halten kann. Zusätzlich zeigen einige Studien eine tiefere Wasserinfiltration unter Gehölzstreifen im Vergleich zu konventionellen Ackersystemen. Tonreiche Böden speichern Wasser effizienter als sandige Böden, wodurch die Effekte von Gehölzen auf den Wasserhaushalt je nach Standort stark variieren können (Amelung et al., 2018, S. 283 f.). Mit zunehmendem Alter der Gehölze steigt zudem die konstante Infiltrationsrate, was auf eine langfristige Verbesserung der Bodenhydrologie durch Agroforstsysteme hindeutet. Dem entsprechen die Ergebnisse zur verbesserten Bodenlockerung durch die SOC-Anreicherung unter älteren Gehölzkulturen (vgl. Kap. 3.3.1). Bekräftigt wird dies außerdem durch die Erkenntnisse von Dmuchowski et al. (2024, S.4), die eine erhöhte Infiltration und Wasserspeicherung unter erhöhten Gehalten von organischer Boden-substanz im Boden von AF-Systeme festhalten. Zudem wird von vielen Autor*innen im Zusammenhang mit der verbesserten Infiltration auf eine erhöhte Populationsgröße der Bodenfauna in AF-Systemen hingewiesen. Das entspricht den Kenntnissen von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 28), die insbesondere auf eine größere Regenwurmpopulation hinweisen. Die Regenwurmpopulation trägt nach Angaben von Veldkamp et al. (2023 zitiert nach Namockel, 2024, S. 22) zur Boden- und Gefügebildung beziehungsweise der Erhöhung des Porenvolumens und somit zur verbesserten Versickerung bei.

Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass von Kahle & Janssen (2020 zitiert nach Namockel et al. 2024, S.21) keine signifikanten Unterschiede in der Wasserrückhaltekapazität bei pF 1,8 und 2,48 zwischen

KUP-Streifen und Kontrolläckern festgestellt wurden. Dennoch wiesen sie eine leicht erhöhte Wasserrückhaltekapazität unter KUP im Vergleich zum Ackerland nach.

Die Ergebnisse deuten außerdem auf eine räumlich und zeitlich variierende Bodenfeuchte innerhalb von AF-Systemen hin. Mehrere Studien belegen trockenere Bedingungen unter den Gehölzreihen der AF-Systeme, insbesondere während der frühen Vegetationsperiode. Da der Effekt im weiteren Verlauf der Vegetationsperiode gegen Null geht, ist davon auszugehen, dass der frühere Blattaustrieb der Gehölze den Wasserbedarf während dieser Zeit erhöht und somit trockenere Bedingungen unterhalb der Gehölzreihen herrschen. In einem chinesischen AF-System auf dem westlichen Lössplateau wurde zusätzlich eine dauerhafte Tiefenaustrocknung dokumentiert, ohne dass es zu einer signifikanten Wiederauffüllung des Bodenwassers kam. Zu berücksichtigen ist jedoch, dass der durchschnittliche Jahresniederschlag mit 385,3 mm trockenen Bedingungen entspricht. Weitere von Namockel (2024, S. 22) diskutierte Studien zeigen, dass sich während längerer Regenereignisse eine verbesserte Wiederbefeuchtung des Bodens unterhalb von Gehölzstreifen nachweisen lässt.

Die Bodenfeuchte innerhalb eines AF-Systems differiert mit dem Abstand zu den Gehölzen. Die maximalen Bodenspannungswerte (200 cBar) während der Sommermonate weisen auf eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit im Oberboden der landwirtschaftlichen Kultur hin. Die weiteren Ergebnisse zur geringsten Bodenspannung (höchste Feuchte) in 1,5 m Entfernung zu den Gehölzen in 30 cm Bodentiefe und den höheren Spannungswerten in 60 - 90 cm

Tiefe unterhalb von Gehölzen im Vergleich zur selben Messtiefe unter der landwirtschaftlichen Kultur, deuten unter Berücksichtigung weiterer von Namockel (2024) zusammengefasster Erkenntnisse, neben einer variierenden Infiltration, auf Unterschiede in der Wasseraufnahme der Kulturen und der Evapotranspiration in der räumlichen Verteilung des AF-Systems hin (Namockel, 2024, S. 33). Innerhalb der Gehölzreihen variiert die Bodenfeuchte unterschiedlicher Bodentiefen in Abhängigkeit von der Wurzelarchitektur der Gehölze. Inurreta-Aguirre et al. (2022, zitiert nach Namockel 2024) dokumentieren ein deutlich höheres Matrixpotenzial in allen Bodentiefen unter Gehölzstreifen, während im konventionellen Acker eine stärkere vertikale Differenzierung der Feuchteverteilung festgestellt wurde. Dies könnte darauf hindeuten, dass tiefreichende Wurzelsysteme in AF-Systemen eine gleichmäßigere Wasserverteilung über das Bodenprofil hinweg durch Bodenlockerung ermöglichen. Ein Wurzelschnitt kann die Bodenfeuchte im Konkurrenzbereich der Gehölze und landwirtschaftlichen Kulturen zusätzlich erhöhen (Namockel 2024, S. 36). Es ist jedoch darauf hinzuweisen, dass schnellwachsende Gehölze, wie Pappeln und Weiden, die in Deutschland überwiegend in AF-Systemen zur Energieholzgewinnung verwendet werden (Reeg et al., 2009 zitiert nach Namockel, 2024, S. 4), einen hohen Wasserbedarf aufweisen (Langeveld et al., 2012 zitiert nach Namockel, 2024, S. 38).

3.5 Erosion und Bodenverluste

3.5.1 Ergebnisse

Hinsichtlich der Bodenverluste durch Erosion berichten sieben der ausgewerteten Artikel (Dmuchowski et al., 2024; Mayer et al., 2022; Strauss et al., 2024; Torralba et al., 2016; Visscher et al., 2024; Zhu et al., 2020; Namockel, 2024).

Zhu et al. (2020) analysieren die Wirksamkeit von AF-Systemen bezüglich der Verringerung der Wasser-, Boden- und Nährstoffverluste sowie des Austrages von Pestiziden in gemäßigten und tropischen Regionen (globale Ausdehnung). Global zusammengefasst wird in AF-Systemen der Oberflächenabfluss um 90 % und die Bodenverluste um 86 % reduziert. Konkret wird der Abfluss um 6 - 92 % und die Bodenerosion um 14 - 99 % verringert (Zhu et al., 2020, S. 62). Auch Dmuchowski et al. (2024, S. 4) stellen einen deutlich reduzierten Oberflächenabfluss fest. Für Europa berechnen Zhu et al. (2020, S. 62) eine Verringerung des Bodenverlustes um 44%.

Dabei weisen sie darauf hin, dass die Verringerung der Verluste von Oberflächenabfluss, Boden und Nährstoffen effizienter sind als die des organischen Kohlenstoffes. Auch Mayer et al. (2022, S. 9) halten ein geringeres Erosionspotenzial durch Wind und Wasser fest. Außerdem dokumentierten eine Reduktion der potenziellen Winderosion bei mittleren Windgeschwindigkeiten um 87% durch KUP-Streifen eines AF-Systems. Auch hohe Windgeschwindigkeiten werden stärker abgepuffert. Während das Erosionsrisiko durch hohe Windgeschwindigkeiten auf dem konventionellen Acker 12,2-mal höher wirkt als bei mittleren Windgeschwindigkeiten, ist die Erosionsgefahr im AF-System lediglich 5,1 - 8 %

höher als die bei mittleren Windgeschwindigkeiten. Eine zusätzliche Reduktion der potenziellen Winderosion in einem AF-System konnte in Abhängigkeit der Reihenabstände der Gehölze festgestellt werden. So wurden in AF-Systemen mit Reihenabständen von 96 m und 24 m eine um 13 - 16 % geringere potenzielle Winderosion im Vergleich zum konventionellen Acker dokumentiert.

Auch Torralba et al. (2016, S. 155) stellen eine erhöhte Erosionskontrolle durch die Etablierung von silvoarablen Systemen fest (efsi 0,772). In der differenzierten Betrachtung der Erosionskontrolle in den unterschiedlichen klimatischen Regionen konnte kein signifikanter Effekt der AF-Systeme auf die Bodenverluste in den kontinentalen Regionen nachgewiesen werden (Torralba et al., 2016, S. 154). Auch Visscher et al. (2024, S. 6) konnten in der Auswertung von 16 Studien (n=98) zur Erosionskontrolle keinen Unterschied zwischen dem konventionellen Acker und dem silvoarablen System feststellen. Jedoch dokumentieren sie, dass Böden mit einem hohem Tongehalt zu einer besseren Erosionskontrolle tendieren.

3.5.2 Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen eine signifikante Verringerung der Wasser- und Winderosion in AF-Systemen im Vergleich zu konventionellen Agrarsystemen, wie sie entsprechend der Erkenntnisse von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 9 f.) beschrieben wurden. Zhu et al. (2020) zeigen im globalen Maßstab eine Verringerung des Oberflächenabflusses in silvoarablen Systemen im Vergleich zu konventionellen Ackerflächen um 90 % und des Bodenverlustes um 86 %. Torralba et al. (2016) und Visscher et al. (2024) hingegen konnten im Rahmen ihrer Me-

taanalyse keinen signifikanten Unterschied zwischen silvoarablen Systemen und den konventionell bewirtschafteten Kontrollfeldern hinsichtlich der Erosionskontrolle nachweisen. Im Rahmen der beiden Metaanalysen könnte die gesamtheitliche Auswertung der Daten auf unterschiedlichen Standortbedingungen die Effekte der AF-Systeme verzerren. Auch die Spannweite der Reduktion des Oberflächenabflusses von 14 - 99 % in AF-Systemen nach Zhu et al. (2020) verdeutlicht, dass die Wirksamkeit stark von lokalen Standortbedingungen und Bewirtschaftungsmaßnahmen abhängt. Insbesondere ein hoher Tonanteil beziehungsweise die Stabilität der Aggregate haben einen Einfluss auf die Erosivität des Bodens. Entsprechend der Erkenntnisse zur Durchwurzelung (vgl. Kap. 3.1), der organischen Substanz (vgl. Kap. 3.2) und des Bodengefüges (vgl. Kap. 3.3) ist durch eine Stabilisierung des Bodens von einer reduzierten Erosion und verringerten Bodenverlusten auszugehen.

Entscheidend für die Wassererosion ist außerdem die Hangneigung sowie die effektive Hanglänge. Längere Hänge führen zu einer höheren Fließgeschwindigkeit des Wassers und damit zu einer stärkeren Erosionskraft. Durch die Gehölzanordnung entlang der Höhenlinien, entsprechend dem Key-Line-Design können AF-Systemen die effektive Hanglänge verkürzen (Namockel, 2024, S.19). Auch Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 10) halten fest, dass durch die regelmäßige Anordnung von Gehölzstreifen das Erosionspotenzial effektiv reduziert werden kann. Dadurch wird die Fließgeschwindigkeit des Wassers verringert, was die Sedimentmobilisierung reduziert und die potenzielle Infiltrationsrate von Niederschlägen erhöht (Zhu et al., 2020, S. 73).

Durch die Bodenlockerung unterhalb der Gehölze in AF-Systemen wird die Infiltration erhöht (vgl. Kap. 3.3 und 3.4.2). Es resultiert ein verringerter Oberflächenabfluss in AF-Systemen, was durch die Ergebnisse von Dmuchowski et al. (2024) für AF-Systeme der gemäßigten Regionen bestätigt wird. Des Weiteren stabilisieren Wurzelsysteme den Boden mechanisch, während ein erhöhter SOC-Gehalt und mikrobielle Aktivität die Aggregatstabilität des Bodens erhöht. Dadurch ist der Boden weniger sensibel gegenüber erosiven Kräften durch Regentropfen und Oberflächenabfluss sowie der Mobilisierung von Feinmaterial des Oberbodens (Zhu et al., 2020, S. 72). Auch die Erosionskontrolle durch Wind wird durch die Ergebnisse der ausgewerteten Studien bestätigt. Die Gehölze von AF-Systemen wirken als vertikale Barrieren, die sowohl mittlere als auch hohe Windgeschwindigkeiten reduzieren und somit den Abtrag von Bodenpartikeln verhindern. Mayer et al. (2022) sowie die von Namockel (2024) zusammengetragenen Studien beschreiben eine signifikante Reduktion des Winderosionspotenzials in AF-Systemen im Vergleich zu konventionellen Ackerbausystemen. Weitere von Namockel (2024, S. 16) erläuterte Erkenntnisse zur Reduktion der Windgeschwindigkeit in der landwirtschaftlichen Kultur durch die Anlage von Gehölzstreifen, zeigen eine effektive Verringerung auf der Lee-Seite der Gehölze bis zu einer Entfernung von der Nulllinie der Gehölze, der dem 18-fachen der Gehölzhöhe entspricht. Am effektivsten wirkt der Schutz in einem Abstand bis zum 4,7-fachen der Gehölzhöhe beziehungsweise in der Nachlaufzone bis zum 12-fachen der Gehölzhöhe (Nuberg, 1998 zitiert nach Namockel, 2024, S. 16). Die Ergebnisse weisen au-

ßerdem darauf hin, dass die Gestaltung des silvoarablen Systems eine Auswirkung auf den erosionsmindernden Effekt hat. Weniger weite Abstände (24 m) zwischen den Gehölzreihen reduzieren die potenzielle Winderosionsgefahr zusätzlich, was die Erkenntnisse von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 9) bestätigt. Namockel (2024, S. 17) diskutiert darüber hinaus eine Reduktion der Windgeschwindigkeit in Abhängigkeit der Porosität der Gehölzreihen. Während eine Porosität von 40 - 60 % die effektivste Reduktion der Windgeschwindigkeiten erzielt (Brandle et al., 2015; Cunningham, 1988 zitiert nach Namockel, 2024, S. 17), kann den Erkenntnissen von Lawson et al. (2019 zitiert nach Namockel, 2024, S. 17) und Nuberg (1998 zitiert nach Namockel, 2024, S. 17) zufolge eine geringe oder hohe Porosität der Gehölzstreifen zur Wirbelbildung innerhalb der landwirtschaftlichen Kultur führen. Dies würde die Winderosion und die Bodenverluste erhöhen. Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 9) halten darüber hinaus fest, dass insbesondere dichte Gehölzstreifen in ihrem Erosionsschutz ähnlich effektiv, wie Windschutzhecken wirken.

Innerhalb der Gehölzstreifen wird der Oberboden zusätzlich durch eine permanente Bodenbedeckung durch die Vegetation und Streu vor Erosion geschützt. Zhu et al. (2020) halten fest, dass der „Bedeckungsansatz“ hinsichtlich der Erosionsschutzwirkung effektiver ist als der „Barriereansatz“ (Nair et al., 1995 zitiert nach Zhu et al. S. 73). So könnte eine 20 %-ige Vegetationsbedeckung die Erosion bereits erheblich verringern, während eine Bodenbedeckung von 60 % die Bodenverluste fast gänzlich verhindern könnten (Zhu et al., 2020, S. 73). Die Reduktion von Erosion und Bodenverlusten führt

zum Erhalt des humus- und nährstoffreichen Oberbodens. Dadurch werden bodenbildende Prozesse aufrechterhalten sowie die Grundbausteine der Bodenqualität hinsichtlich physikalischer und chemischer Eigenschaften am Standort gesichert. Es resultiert der Erhalt der nachhaltigen Bodenfunktionalität, insbesondere hinsichtlich der Bodenfruchtbarkeit. Gleichzeitig wird der Schadstoffaustrag reduziert.

3.6 Nährstoffverfügbarkeit

3.6.1 Ergebnisse

Vier der für diese Ausarbeitung untersuchten Artikel dokumentieren eine erhöhte Nährstoffverfügbarkeit unter AF-Systemen im Vergleich zum Kontrollfeld (Dmuchowski et al., 2024; Torralba et al., 2016; Visscher et al., 2024; Zhu et al., 2020). Torralba et al. (2016, S. 156) zeigen eine signifikant erhöhte Nährstoffkonzentration in europäischen silvoarablen Systemen im Vergleich zum konventionellen Acker. AF-Systeme fördern den zusammengefassten Ergebnissen von Dmuchowski et al. (2024) nach im Allgemeinen die Nährstoffzunahme durch einen erhöhten Biomasseeintrag über Schnittgut und Streu der etablierten Gehölze (Pardon et al., 2018 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 4). Auch Visscher et al. (2024) konnten eine signifikant höhere Nährstoffbereitstellung in den südamerikanischen AF-Systemen feststellen (29 Studien, n=269). Während die Klimazonen keinen Effekt auf die Nährstoffverfügbarkeit in AF-Systemen zeigten, wurden die größten Effekte unter trockenen Bedingungen und auf Standorten mit

einem gering bis mittleren Tongehalt erzielt (Visscher et al., 2024, S. 5).

Zhu et al. (2020) werten die Wirksamkeit von silvoarablen Systemen bezüglich der Verringerung der Nährstoffverluste im Vergleich zu den Kontrollsystemen aus. Global wurden dabei in silvoarablen Systemen die Nährstoffverluste um 69 % reduziert (Zhu et al., 2020, S. 51). Der Verlust von organischem Kohlenstoff, Stickstoff, Phosphor und Kalium wurde um bis zu 28 %, 100 %, 100 % und 99 % reduziert. Bei allen Nährstoffen bis auf Phosphor kam es allerdings auch zu einer Zunahme der Nährstoffverluste in silvoarablen Systemen, die bis zu 7 % (C), 193 % (N) und 19 % (K) betragen (Zhu et al., 2020, S. 51).

Weitere Elemente und Pflanzennährstoffe wurden unter AF-Systemen ebenfalls zu 17 - 95 % weniger ausgetragen als in den landwirtschaftlichen Kontrollsystemen. Für Europa berechnen sie für Agroforstsysteme im Vergleich zu den Kontrollsystemen eine durchschnittliche Verringerung des Nährstoffverlustes um 43 % in Kombination mit einem verringerten Bodenverlust (Zhu et al., 2020, S. 62). Es kam bei durchschnittlichen Nährstoffverlusten eines Systems zu signifikant höheren Verlusten durch Sedimentaustrag (69 %) als durch Auswaschung (47 %) oder Oberflächenabfluss (46 %), jeweils in Bezug auf die Reduktion durch silvoarable Systeme im Vergleich zum Kontrollsystem (Zhu et al., 2020, S. 51). Auch Dmuchowski et al. (2024) und Torralba et al. (2017, S. 155) beschreiben eine erhöhte Kontrolle der Verluste von Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffen.

3.6.2 Diskussion

Die Ergebnisse bestätigen eine signifikant erhöhte Nährstoffverfügbarkeit unter silvoarablen Systemen im Vergleich zu den Kontrollflächen. Dieser Effekt kann insbesondere durch den erhöhten Biomasseeintrag, in Form von Streu und Schnittgut der Gehölze, als Quelle der Nährstoffe erklärt werden (Dmuchowski et al., 2024). In Kombination mit einer gesteigerten mikrobiellen Aktivität und einem erhöhten Vorkommen von Bodenorganismen im Boden wird die organische Substanz schneller in organisch-mineralische Verbindungen zersetzt, was zu einer verbesserten Nährstofffreisetzung führt (Amelung et al., 2018, S. 121). Im Vergleich zum konventionellen Acker wird durch die Rückführung der Nährstoffe über den Biomasseeintrag von Streu der Nährstoffkreislauf zusätzlich langfristig stabilisiert. An dieser Stelle sei jedoch auf die unterschiedlichen Zielerzeugnisse und Bewirtschaftungsformen der silvoarablen Systeme hingewiesen. Während durch die Ernte bei Systemen zur Frucht- und Stammholzproduktion von geringeren Biomasseausträgen auszugehen ist, werden bei der Energieholzgewinnung entsprechend des Erntezyklus Biomasse und somit Nährstoffe aus dem Agrarsystem entnommen. Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 10) halten jedoch fest, dass eine erhöhte Nährstoffentnahme durch schnellwachsende Gehölze zur Energieholzgewinnung nicht zu erwarten ist, da das Holz einen geringen Nährstoffgehalt aufweist. Nach Erkenntnissen von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 10) sind Gehölzstreifen zur Energieholznutzung darüber hinaus in ihrer Funktionsfähigkeit hinsichtlich des Nährstoffkreislaufes vergleichbar mit Windschutzhecken.

Ebenso wie der SOC-Gehalt korreliert die Nährstoffverfügbarkeit unter Gehölzen der AF-Systeme mit dem Tongehalt sowie mit trockenen Bedingungen, was sich mit den physikalischen und chemischen Bodeneigenschaften eines Standortes erklären lässt. Tonminerale fungieren als Adsorbent für Nährstoffe. Außerdem weisen tonige Böden eine höhere Kationenaustauschkapazität auf, während sandige Böden eine höhere Nährstoffmobilität und somit ein höheres Auswaschungsrisiko besitzen (Amelung et al., 2018, S. 176). Die in AF-Systemen erhöhte organische Bodensubstanz (vgl. Kap. 3.2) dient als zusätzlicher Adsorbent für Nährstoffe.

Darüber hinaus werden die Nährstoffverluste verringert. Die Ergebnisse bestätigen eine Reduktion der Nährstoffverluste um 69 % durch AF-Systeme im internationalen Maßstab, wobei insbesondere Stickstoff und Phosphor fast vollständig zurückgehalten werden. Gleichzeitig weisen Zhu et al. (2020) jedoch darauf hin, dass unter bestimmten Bedingungen auch Verluste auftreten können, was auf die Heterogenität von Bodeneigenschaften und Bewirtschaftungsformen hindeutet.

In Europa zeigt sich zudem eine Verringerung der Nährstoffverluste in silvoarablen Systemen um 43 %, insbesondere bedingt durch die Reduktion von Sedimentausträgen. Die Erosion (vgl. Kap. 3.5) wird über einen verstärkten Wurzelschutz durch die erhöhte Durchwurzelung und die verbesserte Bodenstruktur reduziert (vgl. Kap. 3.3), was die Verluste durch Sedimentaustrag minimiert. Gleichzeitig wird durch den stabileren Humusgehalt (vgl. Kap. 3.2.2) und die Aggregation das Risiko der Nährstoffauswaschung verringert, da Nährstoffe stabiler im Boden gespeichert werden. Im Vergleich zum konventio-

nellen Acker entfällt unterhalb der Gehölzstreifen eine intensive Bodenbearbeitung, die zu einer Freisetzung von aggregierten Nährstoffen führen kann, welche anschließend entweder durch Oberflächenabfluss oder Auswaschung ausgetragen werden können (vgl. Amelung et al., 2018, S. 95). Insbesondere bei der Etablierung kann es jedoch zu Bodenstörungen und daraus resultierenden Verlusten des SOC-Gehaltes (Mayer et al., 2022, S. 7) und der Nährstoffe kommen. Daher sollte auf eine möglichst bodenschonende Umsetzung bei der Anlage von Gehölzstreifen der silvoarablen Systeme geachtet werden (Mayer et al., 2022, S. 7).

Des Weiteren entsteht durch die erhöhte und tiefere Durchwurzelung ein sogenannter „Safety-Net“-Effekt (Zhu et al., 2020, S. 47). Nährstoffe sind nur in wassergebundener Form in der Bodenlösung für Pflanzen verfügbar. Eine Aufnahme erfolgt über die Wurzeln im durchwurzelten Bereich. Die tiefreichenden Wurzeln der Gehölze ermöglichen eine effektive Nährstoffaufnahme auch aus tieferen Bodenschichten. Gleichzeitig wird durch den Wurzelsog die Wasserrückhaltekapazität erhöht. Dadurch können mehr Nährstoffe, aber auch Schadstoffe von den Gehölzkulturen aufgenommen oder im Boden gehalten werden, während die Auswaschung reduziert wird (Zhu et al., 2020, S. 47). Der Nährstoffkreislauf eines silvoarablen Systems wird dadurch stabilisiert. Eine erhöhte Wurzelaktivität führt außerdem zu einer verstärkten Exsudation von organischen Säuren, die die Kationenaustauschkapazität erhöhen und so Nährstoffe aus mineralischen und organischen Bodenvorräten mobilisieren und pflanzenverfügbar machen (Amelung et al., 2018, S. 64, 67, 77).

Diese Ergebnisse zeigen einen Erhalt der Bodenfruchtbarkeit bei gleichzeitiger Reduktion der Verluste. Zusätzlich kann die Verwendung von Leguminosen und weiteren stickstoffbindenden Arten in AF-Systemen zur Stickstofffixierung beitragen, wodurch die Stickstoffverfügbarkeit zusätzlich erhöht wird. Insbesondere in nährstoffarmen, degradierten Böden kann die Stickstofffixierung durch die Gehölze die Bodenfruchtbarkeit erhöhen (Dmuchowski et al., 2024, S. 6). Unter Berücksichtigung der landwirtschaftlichen Nutzung ist weiters darauf hinzuweisen, dass dadurch die Zugabe von mineralischem Stickstoffdünger reduziert werden kann. Innerhalb der Gehölzstreifen wird in der Regel gänzlich auf Düngerzugabe verzichtet (Zehlius-Eckert et al., 2020, S. 10), dadurch können Nitratausträge ebenfalls verringert werden.

Zhu et al. (2020) stellten darüber hinaus leichte Verluste von Kohlenstoff bis -3 % sowie große Verluste von Stickstoff (-193 %) und Kalium (-17 %) unter einzelnen der ausgewerteten AF-Systemen fest. Aus einer näheren Betrachtung des Datensatzes (vgl. Zhu et al. 2020, S. 52-52) wird deutlich, dass die maximalen Werte der N-Verluste aus einem Vergleich zwischen einem silvoarablen System mit Walnuss und Walnusseinzelnbeständen (vergleichbar mit einem Wald) stammen und nicht zum landwirtschaftlichen Kontrollfeld. Die Reduktion des verfügbaren Kaliums stammt aus dem Versuch von Yang et al. (2016). Nach genauerer Betrachtung der Ergebnisse ist eine Anreicherung des verfügbaren Kaliums bis zu 90 cm Bodentiefe mit steigendem Abstand zu den Gehölzen (1,5 – 5,5 m) festzustellen. Im Vergleich zum Kontrollwert auf konventionellem Acker (vor der Etablierung der Gehölze)

wurde jedoch auch in 1,5 m Abstand zu den Gehölzen nach der Etablierung eine leichte Erhöhung (+1,3 mg/kg) in bis zu 90 cm Bodentiefe dokumentiert (Yang et al., 2016, S. 112). Die Autor*innen weisen weiters darauf hin, dass die höchste Nährstoffverfügbarkeit in 2.5 m Entfernung von der Baumgrenze (im Vergleich aller Entfernungen) auftritt. In 1,5 m war die Verfügbarkeit am geringsten, was mit der wasserlimitierten Wettbewerbszone nach den zusammengetragenen Erkenntnissen von Namockel (2024, S. 40) übereinstimmt. Daraus kann geschlossen werden, dass bis etwa 1,5 m Abstand zu den Gehölzen eine Konkurrenzzone mit reduzierten Erträgen resultiert. Die Bodenfruchtbarkeit als Funktion des Bodens zur vegetationsunabhängigen Produktionsfähigkeit wird in diesen Bereichen jedoch nicht eingeschränkt, sondern nach den erlangten Kenntnissen erhalten oder erhöht.

3.7 Schadstoffrückhalt

3.7.1 Ergebnisse

Bezüglich der Filter- und Pufferfunktion konnte in zwei Studien ein Effekt auf die Schadstoffrückhaltung in der Fläche unter AF-Systemen festgestellt werden. Silvoarable Systeme reduzieren nach den Erkenntnissen von Zhu et al. (2020, S. 68) Schadstoffe durchschnittlich um 41 % (7 - 100 %). Die Schadstoffrückhalteeffizienz von silvoarablen Systemen entspricht dabei der von den untersuchten Pufferstreifen (Gehölzbasierte Systeme zum Schutz von umliegenden Ökosystemen, insbesondere Gewässern). Hinsichtlich der Filter- und Pufferfunktion gegenüber Pestiziden, Herbiziden und anderen Schadstoffen konnten von ihnen aufgrund geringer

Anzahlen keine Studien quantitativ ausgewertet werden (Zhu et al., 2020, S. 68).

Baah-Acheamfour et al. (2017) berichten von geringeren N₂O-Emissionen in baumbasierten Intercropping-Systemen als im Kontrollfeld. Hinsichtlich der Filterwirkung und Fixierung von N₂ weisen Dmuchowski et al. (2024) jedoch auf größere Effekte unter der Verwendung von Leguminosen (Fabaceae), wie *Robinia pseudoacacia* oder anderen stickstoffbindenden Arten, wie *Alnus glutinosa* hin. In AF-Systemen mit *Juglans*, *Populus* und *Fraxinus* konnten sie ebenfalls eine verringerte jährliche Auswaschung von gelöstem organischem Stickstoff um 0,16 Mg N/ha dokumentieren. Es kam jedoch zu höheren NH₄⁺ - Verlusten durch Auswaschung (Bergeon et al., 2011 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6).

3.7.2 Diskussion

Die untersuchten Studien zeigen sowohl positive Effekte auf die Schadstoffrückhaltung als auch potenzielle Nachteile, insbesondere in Bezug auf die Freisetzung bestimmter Stickstoffverbindungen. Den Ergebnissen von Zhu et al. (2020) zufolge, reduzieren silvoarable AF-Systeme Schadstoffeinträge in die Umwelt im Durchschnitt um 41 %. Die Schwankungsbreite von 7 - 100 % könnte durch unterschiedliche standörtliche Bedingungen und Ausgangssysteme erklärt werden. Die Effizienz ist nach Angaben der Autor*innen jedoch vergleichbar mit der von gehölzbasierten Pufferstreifen, die gezielt zum Schutz angrenzender Ökosysteme, insbesondere Gewässer, eingesetzt werden. Baah-Acheamfour et al. (2017) berichten weiter von geringeren N₂O-Emissionen in baumbasierten Inter-

cropping-Systemen im Vergleich zu konventionellen landwirtschaftlichen Flächen.

Die gehölzbedingten Effekte, unabhängig von den standörtlichen Charakteristika könnten unter Berücksichtigung der bereits diskutierten Indikatoren, insbesondere durch einen erhöhten Wasserrückhalt (vgl. Kap. 3.4), die Verbesserung des Bodengefüges (vgl. Kap. 3.3) sowie der bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften (vgl. Kap. 3.3.2), eine tiefere Durchwurzelung (vgl. Kap. 3.1) und eine erhöhte mikrobielle Aktivität innerhalb sowie in näherer Umgebung der Gehölzreihen erklärt werden. Unter Gehölzen ist die Infiltrationsrate des Bodens erhöht (vgl. Kap. 3.4), wodurch Schadstoffe, ebenso wie Nährstoffe besser im Boden zurückgehalten und weniger durch oberflächlichen Abfluss ausgetragen werden. Das mengenmäßig erhöhte, infiltrierte Bodenwasser, beziehungsweise die Bodenlösung wird durch die Bodenlockerung und den Wurzelsog länger im durchwurzelbaren Bereich gehalten, wodurch die Schadstoffmenge durch Auswaschungen reduziert wird. Ein höherer Anteil organischer Bodensubstanz fördert die Filterung und Bindung von Schadstoffen an Bodenpartikel (vgl. Kap. 3.2.2). Eine vermehrte Wurzelexsudation der erhöhten und tieferen Durchwurzelung führt zu einer Verbesserung der bodenchemischen Eigenschaften und erhöhten Kationenaustauschkapazität. Zusätzlich können Gehölze durch ihr ausgedehntes und tiefgreifendes Wurzelsystem Schadstoffe, insbesondere Restnitrat, aus dem Boden filtern und assimilieren, wodurch die Menge an mobilen Schadstoffen reduziert wird (Zehlius-Eckert et al. 2020, S. 30; Baah-Acheamfour et al., 2017). Dieser Effekt wird als Safety-Net-Effekt beschrieben (vgl.

Kap. 3.6.2). Wasserlösliche Schadstoffe, die zunächst in den oberen Bodenschichten gebunden sind, können durch Auswaschung in tiefere Schichten gelangen und dort weiterhin von den Gehölzen aufgenommen werden. Folglich wird die Auswaschung oder Verdunstung von Schadstoffen reduziert (Zhu et al., 2020, S. 68). Dies wird durch die Ergebnisse von Dmuchowski et al. (2024) bestätigt, die in baumbasierten Intercropping-Systemen auf sandigem und tonigen-Lehmboden mit *Populus*, *Juglans* und *Fraxinus* verringerte Stickstoffauswaschungen feststellten.

Außerdem fördern Gehölze die mikrobielle Aktivität und so die Denitrifikation in den Böden, was zu einer erhöhten Stickstoffrückhaltung im Boden führen kann. Es ist außerdem darauf hinzuweisen, dass durch den gezielten Einsatz von Gehölzen in landwirtschaftlichen Flächen in diesen Bereichen weniger Stickstoffdünger ausgebracht werden muss. Wie Baah-Acheamfour et al. (2017) berichten, konnten N₂O-Emissionen in baumbasierten Intercropping-Systemen durch eine Reduktion von Stickstoffdünger sowie die Assimilation von Restnitrat durch die Bäume reduziert werden. Leguminosen, wie *Robinia pseudoacacia* oder andere stickstofffixierende Baumarten, wie *Alnus*-Arten können die Stickstoffverfügbarkeit im Bereich der Gehölzwurzeln erhöhen (vgl. Kap. 3.1). Daher weisen Baah-Acheamfour et al. (2017) darauf hin, dass der Einsatz von stickstofffixierenden Pflanzen die N₂O-Emissionen erhöhen kann. Diese Erkenntnisse sind insbesondere hinsichtlich der Einträge von organischen Schadstoffen in landwirtschaftliche Flächen von Relevanz. Sie bilden die Schnittstelle zur Klimaschutzfunktion von Böden.

Hinsichtlich der verfügbaren Datengrundlage zur Filterfunktion gegenüber Pestiziden und Herbiziden stellen Zhu et al. (2020) eine begrenzte Anzahl an Studien fest. Eine quantitative Auswertung war aufgrund der geringen Anzahl verfügbarer Studien nicht möglich. Dies zeigt, dass weitere Forschung notwendig ist, um die tatsächliche Effizienz von AF-Systemen in Bezug auf Pestizidrückhalt zu quantifizieren. Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 32) halten jedoch eine deutliche Reduktion der Herbizid- und Pestizidauswaschungen unter silvoarablen Systemen im Vergleich zum landwirtschaftlichen Acker fest. Die zusammengefassten Ergebnisse von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 26) weisen eine Reduktion des Herbizidgehaltes im oberflächennahen Grundwasser um bis zu 95 % in Abhängigkeit der Inhaltsstoffe nach sowie eine durchschnittliche Reduktion der oberirdisch ausgetragenen Pflanzenschutzmittel um bis zu 60 % hin. Auch ein reduzierter Eintrag ins Grundwasser ist durch die Bindung der Pflanzenschutzmittel an organischem Material, einer erhöhten Aufnahme durch die Gehölze sowie eine verringerte Sickerwassermenge unter den Gehölzstreifen zu erwarten (Zehlius-Eckert et al., 2020, S. 31 f.). Zusätzlich wirkt die Reduktion der Bodenverluste (vgl. Kap. 3.5) in silvoarablen Systemen positiv auf den nachhaltigen Erhalt der Filter- und Pufferfunktion von Böden landwirtschaftlicher Standorte.

3.8 Ökosystemfunktionen

3.8.1 Ergebnisse

Fünf der neun Studien analysieren den Einfluss von AF-Systemen auf Ökosystemfunktionen. Der Fokus lag insbesondere auf bodenbezogenen Funktionen

wie der Produktionsfähigkeit, Bodenfruchtbarkeit, Erosionsschutz sowie der biologischen Aktivität und Diversität.

In allen untersuchten Studien wurden positive Effekte auf die untersuchten bodenbezogene Ökosystemfunktionen festgestellt (Dmuchowski et al., 2024; Strauss et al., 2024; Torralba et al., 2016; Visscher et al., 2024; Zhu et al., 2020). Dmuchowski et al. (2024, S. 6) dokumentieren, dass die Nährstoffgehalte in kanadischen Agroforstsystemen im Vergleich zum konventionellen Ackerbau anstiegen. Dabei nahmen der Gesamt-N um 114 %, mineralisierter N um 141 %, P um 109 % und Gesamt-C um 114 % zu (Rivest et al., 2013 zitiert nach Dmuchowski et al., 2024, S. 6).

Torralba et al. (2016, S. 154) stellen eine Korrelation zwischen den Baumarten und den Effekten der AF-Systeme auf die untersuchten Ökosystemfunktionen (Biomasseproduktion, Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffkreislauf, Erosionsschutz und biologische Vielfalt) fest. Sie dokumentieren signifikant positive Effekte unter Kirsch-, Walnuss-, Kastanienarten und Olivenbäumen, sowie negative Effekte unter Weide-, Pappel- und Eschenarten. Stark negative Effekte wurden in AF-Systemen mit Nadelbäumen nachgewiesen (Torralba et al., 2016, S. 154).

Des Weiteren stellten sie über alle europäischen biogeographischen Regionen hinweg einen signifikant positiven Effekt von silvoarablen und silvopastoralen Systemen auf die Bodenfruchtbarkeit (efsi 0.261) im Vergleich zur konventionellen Land- und Forstwirtschaft fest. In der differenzierten Betrachtung der Regionen konnte kein signifikanter Effekt in den kontinentalen Regionen festgestellt werden (Torralba et al., 2016, S. 154 f.). Sie beobachteten

zudem einen Trend, dass der Nutzen der AF-Systeme für die Ökosystemfunktionen mit steigender Temperatur zu- und mit steigendem Niederschlag abnimmt (Torralba et al., 2016, S. 154).

Die Ergebnisse von Visscher et al. (2024, S. 10) zeigten ebenfalls die höchsten Effekte auf die bodenbezogenen Ökosystemfunktionen in silvoarablen Systemen (biologische Aktivität und Diversität, ober- und unterirdische C-Sequestrierung, Nährstoffversorgung, Erosionskontrolle) in trockenen Regionen oder in Gebieten mit geringem bis mittlerem Tongehalt. Silvopastorale Systeme hingegen hatten den größten Effekt in Gebieten mit gemäßigttem Klima und geringen Niederschlägen (Visscher et al. 2024, S. 10).

Im Rahmen eines durchgeführten Mappings für die Potenziale der Agroforstwirtschaft auf bodenbezogene Ökosystemfunktionen (Erosionskontrolle, Filter- und Pufferfunktion, Habitatfunktion, Wasserkreislauf, Rückhaltefunktion) zeigen Strauss et al. (2024, S. 7) positive bis sehr hoch positive Effekte in West-, Mittel- und Süddeutschland. Im Norden Deutschlands ist durch die Etablierung von AF-Systemen von mittel bis gering positiven Effekten auf die bodenbezogenen Ökosystemfunktionen auszugehen. Es resultierte ein zu erwartender positiver Effekt in ganz Deutschland durch die Implementierung von AF-Systemen (Strauss et al., 2024, S. 7). Insgesamt kam es dabei zu einer Verbesserung des Erosionsschutzes, der Bodenqualität, der Bereitstellung von Lebensräumen sowie der biotischen Verarbeitung von Abfallstoffen. Zusätzlich dienen die Gehölzkulturen als Windschutz (Strauss et al., 2024, S. 7 f.).

3.8.2 Diskussion

Die betrachteten Studien zeigen, dass AF-Systeme positive Effekte auf bodenbezogene Ökosystemfunktionen haben. Diese betreffen insbesondere die Produktionsfähigkeit, Bodenfruchtbarkeit, Erosionskontrolle und die biologische Aktivität und Diversität. Die Ergebnisse variieren jedoch in Abhängigkeit der Klimaregionen, Baumarten und Systemtypen.

Torralba et al. (2016) zeigen, dass der Nutzen von AF-Systemen für die untersuchten bodenbezogene Ökosystemfunktionen mit höheren Temperaturen zu-, aber mit steigendem Niederschlag abnimmt. Dies wird durch die Ergebnisse von Visscher et al. (2024) bestätigt. Sie halten fest, dass silvoarable Systeme in trockenen Regionen oder auf Böden mit geringem bis mittlerem Tongehalt am effektivsten wirken, insbesondere hinsichtlich der Bodenfruchtbarkeit. Die Ergebnisse decken sich mit den Ergebnissen zur Anreicherung von SOC (vgl. Kap. 3.2).

Visscher et al. (2024, S. 10) erklären die größeren Effekte unter warmen und trockenen Bedingungen mit einer effektiveren Verbesserung der Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit unter AF-Systemen und einer Reduktion der Bodenerosion. Systeme in gemäßigten Regionen weisen wiederum eine allgemein höhere Resilienz gegenüber Änderungen und stabilere Ökosystemfunktionen auf. Es ist jedoch erneut darauf hinzuweisen, dass trockene Regionen häufig durch degradierte Kontrollsysteme charakterisiert sind.

Innerhalb Deutschlands zeigen Strauss et al. (2024), dass AF-Systeme in West-, Mittel- und Süddeutschland besonders stark positive Effekte auf die Erosionskontrolle, Filter- und Pufferfunktion, Wasserkreisläufe und Habitatqualität haben. In Nord-

deutschland sind diese Effekte moderater, aber dennoch positiv. Diese Ergebnisse verdeutlichen ein flächendeckendes Potenzial von agroforstlichen Praktiken zur Verbesserung der Bodenfunktionen in Deutschland.

Dmuchowski et al. (2024) zeigen, dass AF-Systeme die Nährstoffverfügbarkeit im Vergleich zu konventionellen Ackersystemen signifikant erhöhen. Die dokumentierten Anstiege des SOC-Gehaltes (vgl. Kap. 3.2.1) und der Nährstoffe (vgl. Kap. 3.6.1) bekräftigen die Bedeutung von AF-Systemen für die langfristige Bodenfruchtbarkeit.

Außerdem werden die Effekte silvoarablen Systemen auf die bodenbezogenen Ökosystemfunktionen nach Erkenntnissen der Autor*innen durch die Baumarten beeinflusst. Arten wie Kirsche, Walnuss, Kastanie und Olive verbessern die Biomasseproduktion, Bodenfruchtbarkeit und Erosionskontrolle innerhalb des europäischen Untersuchungsraumes. Weide, Pappel und Esche zeigen eine geringere positive Wirkung auf diese Ökosystemfunktionen. Nadelbaum-basierte AF-Systeme hingegen führen zu einem Rückgang der Bodenfruchtbarkeit. Wie auch in Bezug auf die Anreicherung von SOC (vgl. Kap. 3.2) haben Laubbäume ein größeres Potenzial zur Verbesserung der Bodenfunktionen (vgl. Dmuchowski et al., 2024, S. 6; Mayer et al., 2022, S. 5). Jedoch ist darauf hinzuweisen, dass die Effekte der Baumarten im Detail nicht vergleichbar sind, da die Beobachtungen unter unterschiedlichen standörtlichen und klimatischen Bedingungen stattgefunden haben.

3.9 Zwischenfazit

Die untersuchten Studien zeigen konsistent, dass die Etablierung von AF-Systemen auf Ackerflächen eine nachhaltige Strategie zur Verbesserung bodenbezogener Ökosystemfunktionen darstellen. Insbesondere die Bodenfruchtbarkeit und Nährstoffverfügbarkeit werden erhöht, die Filter- und Pufferfunktion von Böden werden verbessert. In der Landwirtschaft integrierte Gehölze stabilisieren ökosystemare Kreisläufe, wie die erläuterten Wasser-, Kohlenstoff- beziehungsweise Nährstoffkreisläufe, ebenso wie die Filterung und Pufferung von Schadstoffen. Die Hypothesen hinsichtlich der Indikatoren und Funktionen konnten bestätigt werden.

Auf Systemebene ist festzustellen, dass Gehölzreihen der AF-Systeme durch die Reduktion des Oberflächenabflusses die Wasserbewegung verlangsamen und eine höhere Infiltration ermöglichen. Nähr- und Schadstoffe verbleiben über einen längeren Zeitraum in der Bodenlösung und können so zu einem größeren Anteil durch die Pflanzen aufgenommen oder an Bodenpartikel gebunden werden. Die Stabilisierung der Bodenstruktur durch die erhöhte Durchwurzelung, die Anreicherung von SOC sowie die permanente Vegetationsdecke verringern zusätzlich die Erosion durch Wind und Wasser. Dadurch wird der Austrag von organischer Substanz, Nährstoffen und Schadstoffen im Oberboden zusätzlich reduziert sowie Oberflächengewässer vor Sedimentation oder stofflichen Einträgen geschützt. Ein verbessertes Mikroklima, der erhöhte Biomasseeintrag und die ausbleibende Bodenbearbeitung innerhalb der Gehölzstreifen fördern die Aktivität von Bodenorganismen. Insbesondere durch eine gesteigerte mikrobielle Aktivität werden Nährstoffmineralisation und Zersetzungsprozesse gefördert, was zur langfristigen Verbesserung der Bodenqualität, insbesondere hinsichtlich der Fruchtbarkeit, und ökosystemaren Resilienz beiträgt. Die zusammengefassten Ergebnisse zur Durchwurzelung, dem Bodengefüge und der Bodenfeuchte lassen darüber hinaus den Schluss zu, dass auch die Speicher- und Reglerfunktion des Bodens als Ausgleichskörper im Wasserhaushalt durch die Implementierung von silvoarablen Systemen verbessert wird und somit auch die Retentionsfunktion. Die natürlichen Bodenfunktionen im Sinne der BKompV werden nach den Erkenntnissen dieser zusammenfassenden Arbeit durch silvoarable Systeme verbessert. Die These, dass sich Alley-Cropping-Systeme als angepasste Pflege- und Bewirtschaftungsmaßnahme auf landwirtschaftlichen Ackerflächen zur funktionspezifischen Kompensation beeinträchtigter natürlicher Bodenfunktionen eignen, wird bestätigt. Darüber hinaus ist hinsichtlich der effektiven Kohlenstoffspeicherung von einem zusätzlichen Nutzen von silvoarablen Systemen im Allee-Anbau als Treibhausgasspeicher/-senken und einer Erhöhung der Klimaschutzfunktion auszugehen.

Auch die Annahme, dass der positive Effekt der Gehölze eines silvoarablen Systems von standörtlichen Bedingungen, dem Bewirtschaftungsdesign sowie der Bewirtschaftungsart abhängt, wird bestätigt. Die Grundvoraussetzungen für das Ausmaß der positiven Effekte in einer bestimmten geographischen Lage werden durch die durchschnittliche Jahrestemperatur und die durchschnittliche Niederschlagsmenge bestimmt.

Die Hauptkomponenten auf Systemebene sind:

1. Boden:

Auf Böden mit gering - mittlerem Tongehalt werden die größten Effekte durch die Anlage der silvoarablen Systeme auf die Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen erzielt.

2. Systemdesign:

Der Eintrag organischer Substanz hängt maßgeblich von der Breite der Gehölzstreifen sowie der Dichte innerhalb der Gehölzreihen ab. Auch Erosion und Bodenverluste werden aufgrund der permanenten Vegetationsdecke, der Stabilisierung des Bodens durch Durchwurzelung und Anreicherung von organischer Bodensubstanz sowie durch die erhöhte Infiltration mittels breiter Gehölzstreifen effektiver verringert als mittels schmaler Gehölzstreifen. Zusätzlich ist der Abstand zwischen den Gehölzreihen hinsichtlich der Wassererosion maßgeblich für die Verkürzung der Hanglänge. Ebenso wird das Winderosionspotenzial in engeren Abständen zwischen den Gehölzreihen (24 m > 48 m > 96 m) effektiver reduziert.

3. Bewirtschaftungsart:

Insbesondere das Alter der Gehölze hat einen Einfluss auf die Effekte hinsichtlich der Anreicherung der organischen Bodensubstanz und der Verbesserung des Bodengefüges. Dem entsprechend wirken sich längere Erntezyklen von silvoarablen Gehölzreihen positiv auf die Anreicherung von organischer Bodensubstanz sowie der Nährstoffverfügbarkeit aus im Vergleich zu kürzeren Erntezyklen. Außerdem wirkt sich eine bodenschonende Etablierung sowie Bewirtschaftung positiv auf die Anreicherung organischer Bodensubstanz und von Nährstoffen aus. Die Bodenverluste werden minimiert.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass die gezielte Etablierung von AF-Systemen unter Berücksichtigung von klimatischen Bedingungen, Bodeneigenschaften und Systemeigenschaften (Design und Bewirtschaftung) einen erheblichen Beitrag zur nachhaltigen Landbewirtschaftung leisten kann. Es ist jedoch noch einmal darauf hinzuweisen, dass es sich bei dieser Literaturrecherche um eine zusammenfassende Arbeit von Meta-Analysen und Reviews handelt. Die Ergebnisse dienen dem besseren allgemeinen Verständnis von silvoarablen Systemen und ihrem Effekt auf die Bodenfruchtbarkeit und Filter- und Pufferfunktion. Es ist darauf hinzuweisen, dass die ausgewerteten Artikel unterschiedliche Systeme, teils über unterschiedliche biogeographische/klimatische Regionen hinweg, bezüglich ihres Effektes auf die Komponenten und Bodenfunktionen gemeinsam ausgewertet haben. Viele der Autor*innen wiesen auf eine unzureichende Standardisierung der Messmethoden hin, weshalb die identifizierte Datengrundlage bezüglich einiger Parameter nur eingeschränkt oder gar nicht zur quantitativen Auswertung herangezogen werden konnte. Daher bedarf es weiterer standardisierter Versuchsstudien zu den einzelnen Wirkkomponenten sowie im ökosystemaren Komplex. Weitere auswertende Studien sind erforderlich, die mit einer größeren Stichprobengröße und standardisierten Messmethoden differenziertere Analysen ermöglichen. Dabei sollten insbesondere die Systeme, standörtlichen Eigenschaften, klimatischen Bedingungen sowie System- und Bewirtschaftungseigenschaften hinsichtlich ihres Effektes auf silvoarablen Systeme in Deutschland untersucht werden.

4 SCHLUSSFOLGERUNG FÜR AF-SYSTEME IM RAHMEN DER BKOMPV

4.1 Biotoptypen silvoarable Gehölzstreifen im Allee-Anbau-System (Anlage 2 BKompV)

Als mögliche Pflege- und Bewirtschaftungsmaßnahme, beziehungsweise produktionsintegrierte Kompensationsmaßnahme (PIK) muss ein entsprechender Biotoptyp in die Biotoptypenliste der BKompV Anlage 2 enthalten sein. Bisher existiert kein eigenständiger Biotoptyp für Agroforstsysteme, weshalb in diesem Kapitel entsprechend der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021) und der Arbeit nach Mengel et al. (2018, S. 135 ff) ein Vorschlag für die Aufnahme der silvoarablen Systeme in die Anlage 2 (zu § 5 Abs. 1) BKompV entwickelt wurde.

Der Vorschlag beinhaltet die Codierung, die Bezeichnung des Biotoptyps inklusive einer kurzen Charakterisierung sowie den Biotoptypenwert. Als Referenz dienen vergleichbare Biotoptypen, wie die Untertypen der Hecken mit überwiegend autochthonen Arten (41.03), Gehölzanpflanzungen und Hecken aus überwiegend nicht autochthonen Arten (41.04), Einzelbäume, Baumreihen und Baumgruppen (41.05), Streuobstwiesen (41.06) und Kurzumtriebsplantagen mit heimischen oder nicht heimischen Baumarten (42.06a) (Anlage 2 BKompV; Mengel et al., 2018, Anhang 2).

Die Codierung richtet sich nach der in der Handreichung zur BKompV erläuterten Systematik (BfN & BMU, 2021, S. 13 f.). Da es sich bei den maßgeblich systembestimmenden Eigenschaften eines silvoarablen Systems um die Gehölzanpflanzungen auf landwirtschaftlichen Nutzflächen handelt, werden die AF-Systeme den Biotoptypen 41.: „Feldgehölze, Gebüsche, Hecken und Gehölzkulturen“ (Anlage 2 BKompV) zugeordnet. Um silvoarable Systeme als eigene Typkategorie von AF-Systemen einzuführen, wird empfohlen, auf eine Unterordnung der Systeme zu einem bereits bestehenden Typ zu verzichten, da die Charakteristik der bereits bestehenden Biotoptypen nicht auf die Vielzahl der AF-Systeme anwendbar ist. Vielmehr sollte die Möglichkeit bestehen, weitere AF-Systemtypen zu ergänzen um so den „neuen“ landwirtschaftlich genutzten Gehölzpflanzungen als Biotoptyp Raum zu schaffen. Daher wird vorgeschlagen, den Biotoptypen 41.09a: „Agroforstsysteme“ neu einzuführen (a = Abweichung von der Nummerierung der Roten Liste nach Finck et al. (2017) entsprechend der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, S. 13). Weiters sollte ebenfalls entsprechend der im vorherigen Kapitel zusammengetragenen Erkenntnisse zwischen Gehölzreihen junger und mittlerer Ausprägung differenziert werden.

Charakterisiert werden AF-Systeme durch Gehölzanpflanzungen autochthoner oder nicht autochthoner Arten in landwirtschaftlichen Nutzflächen. Silvoarable Systeme im Allee-Anbau zeichnen sich durch eine Kombination landwirtschaftlicher Kulturen und ein- bis mehrreihiger Gehölzkulturen zur Frucht-, Stamm- oder Energieholzgewinnung aus.

Beispielhafte Berechnungen des Biotoptypenwertes entsprechend der Bedeutung eines Typs für die drei Zieldimensionen sind in der Arbeit von Mengel et al. (2018, S. 140 ff) enthalten. Zusätzliche Informationen wurden bei den Autoren erfragt. Da es sich um interne, nicht veröffentlichte Daten handelt, wurden diese primär zur eigenen Information genutzt und können im Rahmen dieser Arbeit nicht zitiert werden.

Entsprechend der Arbeit von Mengel et al. (2018, 136 ff) erfolgt die Ermittlung des Biotoptypenwertes über die in § 1 BNatSchG vorgenommenen Differenzierung der Zieldimensionen (ZD) Sicherung von Vielfalt und des natürlichen und kulturellen Erbes (ZD1), Leistungs- und Funktionsfähigkeit des Naturhaushaltes im materiellen Sinne (ZD2) und des Erholungswertes der Natur und Landschaft durch Wahrnehmen und Erleben (ZD3) (Mengel et al., 2018, S. 135). Eine Quantifizierung der Bedeutung des Biotoptyps hinsichtlich der Zieldimensionen erfolgt gemäß BfN & BMU (2021, S. 15 ff). Die Ermittlung des Biotoptypwerts von silvoarablen Allee-Anbau-Systemen erfolgt auf Basis der Ergebnisse und Erkenntnisse aus Kap. 3 und der Referenzsysteme.

Tabelle 5: Ermittlung der Biotoptypenwerte von silvoarablen Systemen im Allee-Anbausystem in differenzierten Typen und altersbedingter Ausprägung. Da silvoarablen Agroforstsysteme bisher nicht in der Roten Liste der Biotoptypen Deutschlands (Finck et al., 2017) geführt werden, wurde entsprechend der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021, S. 15) ein Grundwert der ZD1 ermittelt.

	Ermittlung	WERT	Ermittlung	WERT	Ermittlung	WERT	Gesamt-wert
	ZD1	ZD1	ZD2	ZD2	ZD3	ZD2	
41.09a Agroforstsysteme							
41.09a.01 Gehölzreihen der silvoarablen Allee-Anbausysteme zur Frucht-, Stammholzgewinnung							
#							
- Junge Ausprägung	2	2	6+0+0+0	6	2+0+1	3	11
- Mittlere Ausprägung	2	2	6+1+0+1	8	2+0+1	3	13
41.09a.02 Gehölzreihen der silvoarablen Allee-Anbausysteme zur Energieholzgewinnung							
#							
- Junge Ausprägung	1	1	4+1+0+0	5	2+0+0-0	2	8
- Mittlere Ausprägung	1-2	1-2	4+1+0+1	6	2+0+0-0	2	9-10

ERLÄUTERUNG ZU SILVOARABLEN SYSTEMEN ZUR FRUCHT- UND/ODER STAMMHOLZGEWINNUNG (41.09.01J und 41.09a.01M):

Silvoarable Systeme zur Frucht- und Stammholzgewinnung ähneln Obst- und Nussbaumreihen, weshalb sie der Wertstufe 2 der ZD1 zugewiesen wurden. Hinsichtlich der ZD2 weisen diese Systeme eine geringe Nutzungsintensität auf und werden daher in Wertstufe 6 der ZD2 eingestuft. Ergänzend werden in Gehölzreihen mittlerer Ausprägung entsprechend der Ergebnisse aus Kap. 3 2 Punkte aufgrund ihrer Klimarelevanz sowie der Bodenfruchtbarkeit addiert. Da den Gehölzreihen eine nutzungsbedingte Charakteristik mit Merkmalen der „Lesbarkeit“ zukommt, sie jedoch bisher keine schützenswerte Eigenart aufweisen, werden sie in Wertstufe 2 der ZD3 eingeordnet. Vergleichbar mit Gehölzreihen, beispielsweise mit Obst- oder Nussbaumarten, kommt ihnen in der Agrarlandschaft eine positiv assoziierte Wahrnehmungsform zu, weshalb ein zusätzlicher Punkt in ZD3 addiert wurde.

ERLÄUTERUNG ZU SILVOARABLEN GEHÖLZREIHEN ZUR ENERGIEHOLZGEWINNUNG (41.09a.02J und 41.09a.02M):

Silvoarable Gehölzreihen zur Energieholzgewinnung wurden in der jungen Ausprägung der Wertstufe 1 zugeteilt, wohingegen sie in mittlerer Ausprägung der Wertstufe 2 zugewiesen werden können, sofern autochthone Arten verwendet wurden. Hinsichtlich der ZD2 ist im Vergleich zum Acker von einer geringen Nutzungsintensität auszugehen, insbesondere unter weiten Erntezyklen. Da die Streifen jedoch bei Ernte auf den Stock gesetzt werden und übliche Erntezyklen zwischen 3 - 5 Jahren liegen, erfolgt die Einstufung in Wertstufe 4. Ergänzend ist entsprechend der Ergebnisse aus Kapitel 3 von einer nachweislichen C-Sequestrierung auch in junger Ausprägung auszugehen. In Gehölzstreifen mittlerer Ausprägung ist außerdem von einer Anreicherung der Bodenfruchtbarkeit auszugehen. Auch die Gehölzreihen der AF-Systeme zur Energieholzgewinnung weisen, ähnlich wie (Windschutz-) Hecken, eine nutzungsbedingte Charakteristik mit Merkmalen der „Lesbarkeit“ auf. Ihnen wird jedoch keine schützenswerte Eigenart zuteil, weshalb sie in Wertstufe 2 der ZD3 eingeordnet wurden.

4.2 Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahmen silvoarable Gehölzstreifen auf Acker (Anlage 6 Abschnitt A BKompV)

Auf Grundlage der erarbeiteten Biotoptypen „silvoarable Systeme zur Frucht- und/oder Stammholzgewinnung“ (41.09a.01J und 41.09a.01M) sowie „silvoarable Gehölzreihen zur Energieholzgewinnung“ (41.09a.02J und 41.09a.02M) innerhalb der „Agroforstsysteme“ (41.09a) wird ein Entwurf zur Aufnahme dieser Biotoptypen in Anlage 6 der BKompV als als Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme im Sinne des § 15 Abs.3 BNatschG vorgeschlagen (vgl. Tabelle 6).

Als fachliche Grundlage zur Einschätzung der höchstwahrscheinlichen Effekte von Agroforstsystemen auf die Funktionen aller Schutzgüter dienten die Erkenntnisse zu den funktionsspezifischen Effekten silvoarabler

Systeme auf die natürlichen Bodenfunktionen (vgl. Kap.3), das Loseblatt von Zehlius-Eckert et al. (2020) sowie die Maßnahmenvorschläge - PIK der TLL und der ThLG (2014, S. 15). Hinsichtlich der Mindestanforderungen ist auf die Notwendigkeit des Übertreffens der guten fachlichen Praxis und der Konditionalität hinzuweisen. Bisher existieren jedoch keine Standards für Agroforstsysteme, weshalb darauf nicht weiter eingegangen werden kann. Die Mindestanforderungen werden anhand der bereits existierenden Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen (BKompV Anlage 6 Abschnitt A) abgeleitet und durch die erlangten Erkenntnisse (vgl. Kap. 3) ergänzt. Gleiches gilt für die weitergehenden Anforderungen gemäß Anlage 6 Abschnitt A BKompV. Die weitergehenden Anforderungen beziehen sich in diesem Zusammenhang auf die Berücksichtigung der standörtlichen Charakteristika sowie weiterer Schutzgüter, die durch die Etablierung von Gehölzreihen beeinträchtigt werden könnten. Beispielsweise sind hinsichtlich der Brutzeiten und Vorkommen von Vögeln Erntezeiträume von Energieholzstreifen festzusetzen. Auch die Artenauswahl der Gehölze kann nach bestätigtem Vorkommen einer naturschutzfachlichen Zielart im Areal des geplanten AF-Systems zielgerichtet festgesetzt werden.

Tabelle 6: Vorschlag zur Aufnahme der silvoarablen Agroforstsysteme in die Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen der Anlage 6 Abschnitt A BKompV (X = Eignung; (X) = Eignung unter Vorbehalt; - = keine Eignung)

Maßnahme auf Acker
Maßnahmentyp: Agroforstsysteme
Silvoarable Allee-Anbausysteme: 41.09a.01, 41.09a.02
Mindestanforderungen (BkompV Anlage 6 Abschnitt A, Spalte 2):
<ul style="list-style-type: none"> - Keine Düngung - Nur mechanischer Pflanzenschutz während der Etablierung - Keine Bewässerung nach der Etablierung - Mindestdauer 25 Jahre - Festlegung der Zeiträume für die Ernte bei Energieholzstreifen
Weitergehende Anforderungen, die im Einzelfall festgesetzt werden können (BkompV Anlage 6 Abschnitt A, Spalte 3):
<ul style="list-style-type: none"> - Art des silvoarablen Allee-Anbausystems (hinsichtlich des Landschaftsbildes) - Abstände der Gehölzreihen auf stark erosionsgefährdeten Flächen (Erosionsschutz nimmt mit zunehmendem Abstand zwischen den Gehölzreihen ab: 24m>48m>96m) - Anordnung der Gehölzreihen quer zur Hauptwindrichtung auf stark winderosionsgefährdeten Flächen/Entlang der Höhenlinien auf stark wassererosionsgefährdeten Flächen - Autochthone Artenwahl oder Diversität (insbesondere bezüglich Energieholzstreifen; mind. 2 Arten) innerhalb der Gehölzstreifen - Kein Pflanzenschutz - Ernte von Energieholzstreifen in Rotation (ein Teil der Reihe bleibt stehen)

Eignung als Ausgleich oder Ersatz für folgende Funktionen (BkompV Anlage 6 Abschnitt A, Spalten 4-14):	geeignet
Vielfalt von Tier- und Pflanzenarten	(X)
Vielfalt von Biotoptypen	(X)
Vielfalt von Bodentypen und Bodenformen	(X)
Natürliche Bodenfunktionen	X
Oberflächengewässer	X
Grundwasser	(X)
Hochwasserschutz- und Retentionsfunktion	X
Klimatische und lufthygienische Ausgleichsfunktionen	X
Klimaschutzfunktion durch Treibhausgasspeicher/-senke	X
Vielfalt von Landschaften als natürliches und kulturelles Erbe	-
Funktionen im Bereich Erleben und Wahrnehmen von Landschaft	(X)

4.3 Halbformalisierte funktionspezifische Kompensation

Die Ermittlung des funktionspezifischen Kompensationsbedarfes erfolgt gem. § 7 Abs. 2 BKompV verbal-argumentativ. Dies ermöglicht eine breite Anwendung hinsichtlich der länderübergreifenden Vorhaben und der naturräumlichen Bodenvielfalt. Gemäß Gerichtsurteil des BVerwG (BVerwG, Urteil vom 9.6.2004 – 9A 11.3, Rn 1198) ist eine verbal-argumentative Darstellung der Eingriffs- und Kompensationsbilanz ausreichend, sofern sie nachvollziehbar dargelegt ist, und bedarf keiner rechenhaften Weise. Auch Mengel et al. (2018, S. 215) halten fest, dass der Umfang der funktionspezifischen Kompensationsmaßnahmen einzelfallbezogen zu ermitteln und begründen ist. Die Eingriffs- und Kompensationsbilanz im Falle eines Eingriffs mit erheblicher Beeinträchtigung besonderer Schwere (eBS) setzt jedoch ein „ausreichendes Maß an Quantifizierung sowohl der Eingriffswirkungen als auch der Kompensationsmaßnahmen“ (BVerwG, Urteil v. 6.11.2012 – 9 A 17/11, Rn 138ff) voraus.

Auch aus den Erkenntnissen von Mengel et al. (2018, S. 106) geht hervor, dass Zuständige der Naturschutzbehörden und Landesämter, die mit Aufgaben der Eingriffsregelung betraut sind, Schwellenwerte oder Fallbeispiele nutzen und als hilfreich empfinden. Gem. § 17 BNatSchG obliegt den zuständigen Behörden die Bewertung und Beurteilung des Eingriffs hinsichtlich der Beeinträchtigung auf die Funktionen der Schutzgüter. Der Planfeststellungsbehörde kommt im Rahmen der Bewertung der vorhabenbezogenen Eingriffswirkung sowie dessen Kompensationsmaßnahmen eine Einschätzungsprärogative zu (BVerwG, Urteil vom 9.6.2004 – 9 A 11.03, Rn. 118, NuR 2004: 795). In ihren Empfehlungen arbeiten Mengel et al. (2018, S. 386) heraus, dass einheitliche Bewertungsmaßstäbe und -kriterien die Eingriffsregelung als Instrument stärken können. Hinsichtlich der 6-stufigen Bewertung (vgl. Tabelle 8) der Bedeutung der Funktion gemäß BKompV wurde bereits ein Bewertungsrahmen in die BKompV übernommen. Hinsichtlich der Ermittlung des Kompen-

sationsbedarfs und -umfangs existieren jedoch bisher keine standardisierenden Rahmenbedingungen. Bei der Bewertung und Ermittlung des Eingriffsumfanges sowie der Kompensationsmaßnahmen kommt es derzeit, je nach angewandter Bewertungsmethode, zu unterschiedlichen Kompensationsausmaßen. Grundsätzlich gilt jedoch gem. Art. 3 Abs. 1 GG der allgemeine Gleichheitssatz, der eine Gleichbehandlung von Sachverhalten sichert.

Daher widmet sich dieses Kapitel einem Vorschlag der teilformalisierten, funktionspezifischen Kompensationsermittlung im Rahmen der BKompV unter Berücksichtigung der Einzelfallentscheidung. Eine teilformalisierte Ermittlung des funktionspezifischen Kompensationsbedarfes könnte einen Bewertungsrahmen schaffen und so die Gleichbehandlung und Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen unter Berücksichtigung der naturräumlichen Charakteristika und der Einzelfallentscheidung im bundesweiten Vergleich erhöhen.

Allgemeine Anforderungen an eine solche Methode (Mengel et al., 2018):

- Einzelfallbezogene Ableitung
Der hier erarbeitete Vorschlag kombiniert die Quantifizierung der Beeinträchtigung sowie der Kompensationswirkung mit einer verbal-argumentativen Begründung. Um eine standortspezifische Beurteilung der Beeinträchtigung zu gewährleisten, wie es die einzelfallbezogene Ableitung vorsieht, erfolgt die quantitative Zuteilung verbal-argumentativ. Außerdem sind Wertspannen für die Wirksamkeit der Maßnahmen vorgesehen, die eine einzelfallbezogene Einordnung ermöglichen.
- Aufwertungsfähigkeit und Aufwertungsbedürftigkeit der Kompensationsfläche
Entsprechend der aktuellen Praxis wird von einer Aufwertungsfähigkeit und -bedürftigkeit landwirtschaftlicher Flächen, insbesondere intensiv bewirtschafteter Äcker, hinsichtlich der Bereitstellung natürlicher Bodenfunktionen ausgegangen. Der geplante Standort ist im Einzelfall jedoch zu berücksichtigen.
- Hochwahrscheinliche Wirksamkeit nach aktuellem Stand der Wissenschaft
Entsprechend der im vorherigen Kapitel erläuterten Effekte von silvoarablen Systemen im Allee-Anbau-Verfahren auf die natürlichen Bodenfunktionen (vgl. Kap. 3.9), ist nach aktuellem Stand der Wissenschaft von einer Wirksamkeit bezüglich der Filter- und Pufferfunktion sowie der natürlichen Bodenfruchtbarkeit nach Etablierung auf Ackerflächen auszugehen.
Es ist eine Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit, der Filter- und Pufferfunktion sowie wahrscheinlich der Speicher- und Reglerfunktion im Bereich der Gehölzstreifen zu erwarten.
- Übertreffen der guten fachlichen Praxis und der Konditionalität
Ein Überschreiten der guten fachlichen Praxis beziehungsweise der Konditionalität kann jedoch im Rahmen dieser Arbeit nicht beurteilt werden, da bisher keine naturschutzfachlichen Maßgaben zur guten fachlichen Praxis in Agroforstsystemen existieren.
- Multifunktionalität hinsichtlich der Aufwertung weiterer Funktionen anderer Schutzgüter (Ergänzend wünschenswert jedoch nicht zwangsläufig notwendig)

Als Grundlage für die Entwicklung der Methode dienen die Erkenntnisse des F+E-Projektes von Mengel et al. (2018) und die BKompV sowie deren Handreichung (BfN & BMU, 2021). Darüber hinaus wird der Vorschlag auf Basis der bereits geltenden Methode zur Bewertung von Eingriffen und den vorgesehenen Maßnahmen

sowie der Festsetzung von maßnahmenangepassten Ökopunkten aus Baden-Württemberg (ÖKVO) und der entsprechenden Arbeitshilfe der LUBW (2024) entwickelt. Inhaltliche Konkretisierungen werden mit Hilfe der erarbeiteten Kenntnisse (Kap. 3), dem Loseblatt von Zehlius-Eckert et al. (2020) und den Maßnahmenvorschlägen - PIK des TLL und der ThLG (2014, S. 15) vorgenommen.

4.3.1 Bewertung des Eingriffs

Die Bestandserfassung ist unter Anwendung bewährter Bewertungsmethoden durchzuführen. Berücksichtigt wird nach Mengel et al. (2028, S. 126) der Bodentyp in Verbindung mit Ausgangsgestein, Wasserhaushalt, Tiefgründigkeit und einigen mehr. Die Beurteilung der Bedeutung der Funktion erfolgt sechsstufig entsprechend der Bewertungsmatrix BKompV Anlage 3 Nr. 1. Es empfiehlt sich die Anwendung der Wertstufen entsprechend der Handreichung zur BKompV (BfN & BMU, 2021), beziehungsweise der Erläuterungen nach Mengel et al. (2018). Ergänzend sollte die Bedeutung der Funktion des Bodens im jeweiligen Naturraum berücksichtigt werden. Eine Auf- oder Abwertung um eine Wertstufe, entsprechend der naturräumlichen Bedeutung kann verbal-argumentativ begründet werden. Eine Kategorisierung von Sonderstandorten für naturnahe Vegetation, wie sie in Baden-Württemberg vorgesehen ist, sollte nicht vorgenommen werden, da dies im Rahmen der Biotope bewertet wird und eine Doppelbewertung von Funktionen der Schutzgüter vermieden werden sollte.

Tabelle 7: Bewertungsrahmen natürliche Bodenfunktionen: Regler- und Speicherfunktion, Filter- und Pufferfunktion, natürliche Bodenfruchtbarkeit (Mengel et al. 2018, S. 126)

Wertstufen	Merkmale
hervorragend (6)	Böden mit hervorragender Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen, z. B. besonders tiefgründige, gut entwickelte Lössböden ohne Stauwassereinfluss
sehr hoch (5)	Böden mit sehr hoher Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen, z. B. tiefgründige, schwach steinige, lehmige Tonböden
hoch (4)	Böden mit hoher Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen
mäßig (3)	Böden mit mäßiger Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen
gering (2)	Böden mit geringer Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen, insbesondere durch Baumaßnahmen stark veränderte Böden
sehr gering (1)	Fläche versiegelt oder befestigt
Böden, deren Ausprägung nicht von den aufgeführten Beispielen abgedeckt wird, sind im Hinblick auf die natürlichen Bodenfunktionen individuell zu bewerten. Dabei sind die in der Tabelle vorgenommenen Einstufungen als Orientierungsmaßstab zu verwenden.	

Die Beurteilung des Eingriffs erfolgt anhand der Stärke (Art und Intensität), der (zeitlichen) Dauer und der (räumlichen) Reichweite einer möglichen Beeinträchtigung. Dabei sollte zwischen der anlagebedingten, betriebsbedingten und baubedingten Projektwirkung unterschieden werden (Mengel et al. 2018, S. 117 f.).

Im Rahmen der Beurteilung der Erheblichkeit sollte einzelfallbezogen die Empfindlichkeit von Böden mitberücksichtigt werden (BfN & BMU, 2021; Mengel et al., 2018). Die Bewertung ist verbal-argumentativ zu begründen. Im Folgenden wird die Ermittlung des Kompensationsbedarfs und des Umfangs der Kompensationsmaßnahme in Kombination mit einem Beispiel erläutert.

Tabelle 8: Bewertungsmatrix zur "Feststellung der Schwere der zu erwartenden Beeinträchtigung" Anlage 3 BKompV (eB = erhebliche Beeinträchtigung; eBS = erhebliche Beeinträchtigung besonderer Schwere).

Bedeutung der Funktionen des jeweiligen Schutzgutes nach Wertstufen	Stärke, Dauer und Reichweite der vorhabenbezogenen Wirkung		
	I gering	II mittel	III hoch
1 sehr gering	-	-	-
2 gering	-	-	eB
3 mittel	-	eB	eB
4 hoch	eB	eB	eBS
5 sehr hoch	eB	eBS	eBS
6 hervorragend	eBS	eBS	eBS

Beispiel:

Dauerhafte Beanspruchung einer Fläche von 2000 m² mit hoher Ausprägung natürlicher Bodenfunktionen. Dabei sollen 1500 m² vollversiegelt werden und weitere 500 m² sollen als Stellplätze mit Rasengittersteinen (Aufbau: 8 cm Rasengittersteine in 4 cm Bettung, 20 cm obere Tragschicht, 30 cm untere Tragschicht) ausgeführt werden. Eine Prüfung ist gemäß BKompV notwendig und es resultiert eine vorhabenbezogene erhebliche Beeinträchtigung besonderer Schwere.

Als Kompensationsmaßnahme soll eine Implementierung silvoarabler Systeme zur Energieholzgewinnung, also eine PIK (Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme) dienen. Die geplanten Gehölzreihen haben eine Breite von 8 m und eine Länge von 100 m. Der geplante Standort weist einen geringen Tongehalt sowie eine Hangneigung auf. Die Gehölzreihen werden im Abstand von 48 m entsprechend des Key-Line-Designs angelegt. Der Erntezyklus der Gehölze ist alle 5 - 8 Jahren in Rotation geplant.

4.3.2 Ermittlung des Kompensationsbedarfs

Ausgehend von der Bedeutung der Funktion vor Eingriff (s.

Tabelle 7) und der Bedeutung der Funktion nach dem Eingriff wird ein Funktionsverlust ermittelt. Dieser bildet sich in Anlehnung an die Ökokontoverordnung BW aus der Differenz der Bewertung vor dem Eingriff (vE) und der höchstwahrscheinlich resultierenden Bewertung nach dem Eingriff (nE). Dazu werden die Wertstufen der Bewertungsmatrix von 1 - 6 quantifiziert. Bei einer Befestigung/Versiegelung wird von einem

kompletten Funktionsverlust (Wertstufe 1) ausgegangen. Ebenfalls zu berücksichtigen ist die Art der zukünftigen Nutzung, es erfolgt keine Bewertung ausschließlich anhand der standörtlichen Bodencharakteristika. Die Bewertung der Bedeutung nach Eingriff erfolgt nach aktuellem Stand des Wissens und ist ebenfalls verbal-argumentativ zu begründen.

$$\begin{aligned} \text{Bedeutung } vE - \text{Bedeutung } nE &= \text{Funktionsverlust} \\ 4 - 1 &= 3 \text{ (Funktionsverlust)} \end{aligned}$$

Der ermittelte Funktionsverlust ist mit dem Faktor 3, entsprechend der drei Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen pro m², zu multiplizieren sowie anschließend mit der beeinträchtigten Fläche zu multiplizieren. Dabei sollte ein Teilversiegelungsgrad berücksichtigt werden. Dazu ist die beanspruchte Fläche zusätzlich mit dem Abflussbeiwert des Bodenbelags zu multiplizieren.

$$\begin{aligned} \text{Funktionsverlust} \times \text{Funktionsfaktor} &= \text{Funktionswert(Eingriff)} \\ 3 \times 3 &= 9 \text{ (Funktionswert/m}^2\text{)} \\ \text{Funktionswert (Eingriff)} \times (\text{Eingriffsfläche} \times \text{Abflussbeiwert}) &= \text{Funktionspunkte} \\ 9 \times (1500 \times 1 + 500 \times 0,3) &= 14.850 \text{ Funktionspunkte} \end{aligned}$$

4.3.3 Ermittlung des Umfangs der Kompensationsmaßnahme

Eine Quantifizierung der Wirksamkeit der Kompensationsmaßnahmen erfolgte ebenfalls auf Grundlage der Ökokontoverordnung BW. Ein konkreter Vorschlag für diese Quantifizierung der Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahmen (PIK) gem. § 10 BKompV wird anhand des Beispiels der Etablierung von silvoarablen Systemen auf Ackerflächen erarbeitet.

Da Maßnahmen der PIK auf landwirtschaftlichen Flächen umgesetzt werden und entsprechend der guten fachlichen Praxis und der Konditionalität der nachhaltige Erhalt des Bodens und dessen Funktionen vorausgesetzt wird, ist auf landwirtschaftlichen Flächen von einer verhältnismäßig geringen Aufwertungsfähigkeit auszugehen. Daher wird als Richtwert einer nutzungsbedingten Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen, also der natürlichen Bodenfruchtbarkeit, der Filter- und Pufferfunktion sowie der Regler- und Speicherfunktion, auf landwirtschaftlichen Flächen durch PIK-Maßnahmen eine einfach erhöhte Wertstufe. Die entspricht einer Erhöhung um 3 Funktionswerte pro Quadratmeter. Zusätzlich kann, je nach Nutzungsart oder Bewirtschaftungsdesign des jeweiligen silvoarablen Systems sowie den Bodeneigenschaften der geplanten Ausgleichsfläche ein Funktionswert ergänzt werden. Dabei wird davon ausgegangen, dass PIK-Maßnahmen alle Teilfunktionen der natürlichen Bodenfruchtbarkeit oder eine Teilfunktion besonders standortspezifisch im Wirkraum verbessern können. Beispielsweise können silvoarable Systeme auf Hangstandorten die Bodenverluste durch Erosion im Vergleich zu konventionellen Ackerflächen deutlich verringern. Dadurch werden alle Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen deutlich erhöht. Es müssen jedoch standortspezifisch ausreichend Kriterien zur Verbesserung der natürlichen Bodenfunktionen erfüllt werden. Dies ist verbal-argumentativ und einzelfallbezogen zu beurteilen.

Kriterien, abgeleitet aus den Erkenntnissen aus Kapitel 3 können sein:

- Reihenabstand zwischen den Gehölzen (geringere Abstände zwischen den Gehölzreihen erhöhen das Erosionsschutzpotenzial: 24 > 48 > 96 m)
- Diversität der Gehölze innerhalb der Gehölzstreifen
- Alter der Gehölze (nur bei Verwendung von Kompensationsflächen aus Bevorratung ab einem Alter von 25 Jahren)
- Verlängerter Erntezyklus und Rotation (bei silvoarablen Systemen zur Energieholzproduktion)
- Tongehalt (auf Flächen mit gering-mittleren Tongehalt resultieren die höchsten Effekte durch die silvoarablen Systeme)
- Hanglage der Ausgleichsfläche und Anordnung der Gehölze in Key-Line-Design/Etablierung der Gehölzreihen in Regionen mit hohem Winderosionspotenzial

Es ergibt sich eine Wertspanne von 3 - 4 Funktionswerten. In dem konkreten Erläuterungsbeispiel ist aufgrund der Hanglage und dem geringen Tongehalt des Bodens von einem zusätzlichen, deutlichen Erosionsschutz durch die Gehölzreihen auszugehen. Dabei werden Bodenbildende Prozesse im Vergleich zum Status quo zusätzlich erhalten und ein größerer Effekt auf die Funktionsverbesserung erzielt. Daher wird eine hohe Funktionsverbesserung an diesem Standort durch die geplante PIK-Maßnahme angenommen, weshalb ein Funktionswert von 4 festgelegt wird.

Als anrechenbare Kompensationsfläche sollte die Breite (im Beispiel 8 m) der Gehölzstreifen in der Gesamtlänge der Streifen (im Beispiel 100 m) dienen, da die funktionsbezogenen Effekte insbesondere innerhalb der Gehölzstreifen wirken. Anhand des Funktionswertes(Komp) und der anrechenbaren Kompensationsfläche ergeben sich Kompensationspunkte. Es gilt, den Kompensationsbedarf, gemessen über die Funktionspunkte, durch die Kompensationspunkte funktionsidentisch auszugleichen oder zu ersetzen.

$$\begin{aligned}
 & \text{Funktionswert(Komp)} \times \text{anrechenbare Kompensationsfläche} = \text{Kompensationspunkte} \\
 & \text{Dabei gilt: Funktionspunkte} = \text{Kompensationspunkte} \\
 & \text{Kompensationspunkte} / \text{Funktionswert(Komp)} = \text{Flächenbedarf (anrechenbare Fläche)} \\
 & \quad \quad \quad 14.850 / 4 = 3713 \text{ (Flächenbedarf)} \\
 & \quad \quad \quad 3713 / (8 \times 100) = 4,6 \text{ (Anzahl Gehölzreihen, um den Flächenbedarf zu decken)}
 \end{aligned}$$

Mithilfe dieser Ermittlungsmethode für den Kompensationsbedarf und -umfang wird ein teilformalisierter Ansatz präsentiert, der unter Berücksichtigung standörtlicher, einzelfallbezogener Charakteristika eine Gleichbehandlung des Eingriffsvorhabens im Rahmen der funktionsidentischen Kompensation ermöglicht.

Um eine Anwendung der Methode nicht nur für silvoarable Systeme als angepasste Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahme zu ermöglichen, wird ein teilquantifizierter Ansatz für die funktionsidentische Kompensation aller gelisteter Kompensationsmaßnahmen (vgl. Anlage 5 Spalte 3 BKompV) der natürlichen Bodenfruchtbarkeit entwickelt.

In Anlehnung an die Tabelle 3 der Ökokonto-Verordnung BW und unter Berücksichtigung der oben erläuterten Vorgehensweise wird die folgende Zuordnung eines Funktionswertes zu den möglichen Maßnahmen der

funktionspezifischen Kompensation natürlicher Bodenfunktion (Anlage 5 Spalte 3 Zeile 4 BKompV) vorgeschlagen. Zusätzlich dient die Arbeitshilfe des LUBW (2024, S. 17 ff) als Grundlage für den Entwurf. Es ist darauf hinzuweisen, dass sich der Funktionswert nur auf die Kompensationswirkung hinsichtlich der natürlichen Bodenfunktionen bezieht.

Tabelle 9: Maßnahmen zur Kompensation der erheblichen Beeinträchtigung besonderer Schwere von natürlichen Bodenfunktionen inklusive deren Quantifizierung durch einen Funktionswert.

Maßnahme	Funktionswert/m ²	Bemerkungen
Entsiegelung oder Teilentsiegelung	15	Siehe Anlage 6 Abschnitt B BKompV, maximale Kompensationspunkte als Anreiz zur Entsiegelung
Entfernen von Überschüttungen	3-12	Entspricht der Rekultivierung von Flächen. Die anrechenbaren Kompensationspunkte richten sich nach der vorherigen Bedeutung der natürlichen Bodenfunktionen. Es wird angenommen, dass sich in Folge der Entfernung von Überschüttungen die Bodenfunktionen um mind. eine Wertstufe (pro m ²) jedoch max. um 4 Stufen erhöhen. Nicht anrechenbar, wenn im Rahmen der Genehmigung Entfernung der Überschüttung verpflichtend festgeschrieben ist.
Herstellen oder Verbessern eines durchwurzelbaren Bodenraums	3-7	Bei Überdeckung baulicher Anlagen je nach Mächtigkeit und Beschaffenheit der Überdeckung, einschließlich der Begrünung von Tiefgaragen unter Verwendung von Bodenmaterial. Bei Oberbodenauftrag: Mächtigkeit der Auftragschicht in der Regel 20 cm; nur bei Böden, die derzeit eine sehr geringe - mittlere Funktionserfüllung besitzen (Bewertungsklassen 1, 2 und 3). Maximaler Zugewinn um mehr als 2 Wertstufen/m ² auf degradierten Böden oder auf baulichen Anlagen (je nach Überdeckung und Vegetationsschicht) möglich.
Mechanisches und biologisches Tiefenlockern, ggf. mit Untergrundmelioration	3-4	bei Verdichtungen auf ehemaligen Lagerplätzen und ehemals genutzten Wegen etc.; nicht auf landwirtschaftlich genutzten Flächen
Wiedervernässung von hydromorphen Böden, Mooren	3-6	Es wird eine Grundfunktionalität der Böden angenommen. Daher ergibt sich eine maximale Verbesserung um 2 Wertstufen/m ² . Nur auf Böden der Bewertungsklasse hoch (4), sehr hoch (5), beziehungsweise Mooren oder Auen.

Nutzungsextensivierung	3	Beispielsweise Reduktion der Mähdurchgänge oder der Düngung (bis Verzicht). Nutzungsextensivierung impliziert intakte Nähr- und Wasserkreisläufe. Es wird eine Aufwertung um eine Wertstufe angenommen. Auf Standorten der Bewertungsstufe 3, 4, 5 oder 6 der Bodenfunktion möglich.
Bewirtschaftungs- oder Pflegemaßnahme (bspw. Agroforstsysteme)	3-4	Siehe Anlage 6 Abschnitt A Die Wirkung entspricht teils der einer biologischen Tiefenlockerung oder Nutzungsextensivierung. Aufwertung um einen Kompensationspunkt aufgrund systemspezifischer Charakteristika (s. Beispiel).

4.4 Diskussion

Der erarbeitete Entwurf einer teilformalisierten Methode bietet einen Bewertungsrahmen für den Eingriff sowie die Kompensation erheblicher Beeinträchtigungen besonderer Schwere der natürlichen Bodenfunktionen im Rahmen der BKompV. Er bettet sich daher in bestehende Vorschriften der BKompV.

Es ist festzuhalten, dass durch die Teilformalisierung unter geltendem Recht eine Verbesserung hinsichtlich der Gleichbehandlung gleicher Fälle unter Wahrung einer Einzelfallentscheidung erzielt wird. Ein Defizit wird jedoch nach wie vor hinsichtlich der Bewertungsmethoden der Bodenfunktionen attestiert. Derzeit gibt es keinen standardisierten, bundeseinheitlichen Ansatz zur Bewertung der Bodenfunktionen, was in der Klassifizierung der Böden in die Wertstufen nach wie vor zu Unterschieden führen kann (Mengel et al., 2018, S. 60). Eine weitere Grundvoraussetzung der produktionsintegrierten Kompensation stellt das Überschreiten der guten fachlichen Praxis dar. Diese existieren jedoch bisher nicht für Agroforstsysteme. Daher besteht weiterer Bedarf in der Zusammenstellung der naturschutz- und agrarfachlichen Standards für die gute fachliche Praxis von Agroforstsystemen. Ein tatsächliches Überschreiten der guten fachlichen Praxis von silvoarablen Systemen kann erst unter Festsetzung der Standards festgelegt werden. An dieser Stelle sei ebenfalls darauf hingewiesen, dass die gute fachliche Praxis Bewirtschaftungsstandards zum nachhaltigen Schutz der Böden sicherstellt, insbesondere vor Erosion (Henke et al., 2015, S. 8, 74 f.). Dennoch haben Langzeitstudien auf deutschen Beobachtungsflächen einen durchschnittlichen jährlichen Bodenverlust von 1,4 – 3,2 Tonnen Boden pro Hektar gezeigt (BZL, 2025, www). Einerseits könnte das auf ein Nichteinhalten der guten fachlichen Praxis bei der Bewirtschaftung hindeuten. Andererseits könnte auch die Annahme, dass das Einhalten der guten fachlichen Praxis den Schutz (Erhalt des Status-Quo) des Bodens und der Bodenfunktionen (Bechler, 2010, S. 11; Henke et al., 2015, S. 7 f.) gewährleistet, derzeit noch nicht zutreffen. Daher könnten AF-Systeme beziehungsweise PIK-Maßnahmen einen noch größeren Effekt auf die natürlichen Bodenfunktionen haben als im Rahmen dieser Arbeit bei einem Vergleich zur guten fachlichen Praxis der konventionellen Landwirtschaft unterstellt. Konkret könnte die Aufwertungsfähigkeit landwirtschaftlicher Flächen größer sein

als derzeit erwartet. Der Funktionswert der Kompensationsmaßnahmen (vgl. Tabelle 9) könnte demnach gegebenenfalls auf die Verbesserung um 2 Wertstufen (entspricht einem Funktionswert von 6) angehoben werden. Gleiches gilt für eine Nutzungsextensivierung landwirtschaftlicher Flächen. Auch hinsichtlich der Beurteilung der standortspezifischen, natürlichen Bodenfunktionen erscheint eine Quantifizierung und Festlegung durch Schwellenwerte einzelner Parameter, wie der tatsächlichen Oberbodenmächtigkeit, des Humusgehaltes und der Schüttdichte, empfehlenswert. Des Weiteren ist in diesem Zusammenhang darauf hinzuweisen, dass viele Bewertungsmethoden der Bodenfunktionen unter Verwendung digitaler Bodenkarten durchgeführt werden, wie beispielsweise in Baden-Württemberg (Bechler, 2010, S. 11). Dies setzt eine stetige Aktualisierung sowie eine hohe Rasterauflösung voraus. Eine Beurteilung der tatsächlichen Bedeutung der Bodenfunktionen einer Fläche ist nur unter Durchführung von Bodenbeprobungen möglich. Dies bezieht sich im Rahmen der Ermittlung des funktionsidentischen Kompensationsbedarfs und -umfangs weniger auf alle Flächen, sondern nur auf solche bei denen eine eingriffsbedingte eBS voraussichtlich resultiert. Dies wäre ebenfalls für die zielgerichtete Maßnahmenentwicklung von Vorteil.

Bezüglich der Ermittlung des Biotoptypwertes (Kap. 4.1) wurden vergleichbare Systeme als Grundlage zur Einstufung der allgemeinen Schutzwürdigkeit von Biotoptypen zur „Sicherung des natürlichen und kulturellen Erbes“ (ZD1) herangezogen, da die bearbeiteten Agroforstsysteme in der Roten Liste gefährdeter Biotoptypen (Finck et al., 2017) bisher nicht definiert sind. Für die silvoarablen Systeme zur Energieholzgewinnung wurde dafür der Referenzwert von KUP (41.06a) verwendet. Unter Berücksichtigung der Ergebnisse von Zehlius-Eckert et al. (2020, S. 45 f.) zum Biodiversitätsschutz könnte jedoch davon ausgegangen werden, dass auch Energieholzstreifen unter einer diversifizierten, autochthonen Gehölzverwendung, dem Systemdesign (Breite der Gehölzstreifen, Pflanzdichte der Gehölze) und einer entsprechenden Bewirtschaftung einem höheren Grundwert (2) entsprechen können.

Hinsichtlich der vorgeschlagenen Methode zur Ermittlung des Kompensationsbedarfs ist noch einmal auf den Funktionsfaktor pro m² einzugehen. Dieser wird entsprechend der drei Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen auf 3 festgelegt. Das setzt voraus, dass alle Funktionen standortspezifisch gleichermaßen durch einen Eingriff beeinträchtigt werden. Unter Berücksichtigung der erlangten Erkenntnisse, insbesondere zu den Hauptindikatoren der Teilfunktionen (Tongehalt, Humusgehalt, Bodengefüge), ist von einer kohärenten Funktionsfähigkeit auszugehen. Es stellt sich jedoch die Frage, inwieweit sich die einzelnen Teilfunktionen der natürlichen Bodenfunktionen gegenseitig beeinflussen, um ein tieferes Verständnis für die Funktionsfähigkeit des Schutzgutes Boden zu erhalten und Beeinträchtigungsermittlungen sowie Maßnahmen zielgerichtet anwenden zu können.

Des Weiteren wurde im Rahmen des Vorschlages für die Anrechnung von silvoarablen Systemen im Beispiel darauf eingegangen, dass sich die anrechenbare Fläche auf die Breite der Gehölzstreifen bezieht. Aus Kap. 3 geht jedoch hervor, dass die Effekte wie die Durchwurzelung, die Anreicherung von organischer Bodensubstanz sowie die Nährstoffverfügbarkeit nachweislich in die landwirtschaftliche Kultur hineinreichen. Es be-

darf jedoch weiterer Feldstudien, um das Maß der Effekte durch die etablierten Gehölze auf die natürlichen Bodenfunktionen im Übergangsbereich zwischen Gehölzstreifen und landwirtschaftlicher Kultur zu ermitteln. Dem entsprechend könnte die anrechenbare Fläche von silvoarablen Systemen als PIK um den zusätzlichen, deutlich beeinflussten Übergangsbereich ergänzt werden. Darüber hinaus sieht die Methode zur Ermittlung des Kompensationsumfanges in BW vor, dass Maßnahmen zur Erosionsschutzfunktion durch die Verkürzung der Hanglänge (bis zu 200 m) berücksichtigt werden. Dabei können zusätzlich bis zu 25 % der Hanglänge ober- und unterhalb der Maßnahme als anrechenbare Fläche einbezogen werden (LUBW, 2024, S. 23). Da sich in dem hier vorgeschlagenen Ansatz zur Ermittlung des Kompensationsbedarfes lediglich auf die tatsächlich vom Eingriff betroffene Fläche (bspw. durch Versiegelung) bezogen wurde, gilt aus Gleichbehandlungsgründen der gleiche Ansatz für die Kompensationsmaßnahme.

5 FAZIT

Im Rahmen der standardisierten Literaturrecherche konnte belegt werden, dass silvoarable Agroforstsysteme auf Acker eine nachhaltige Bewirtschaftungsmaßnahme zur Verbesserung der Funktionsfähigkeit der natürlichen Bodenfunktionen darstellen. Insbesondere tragen sie zur Erhöhung der beiden analysierten Teilfunktionen der Bodenfruchtbarkeit und der Filter- und Pufferfunktion von Böden bei. Die Integration von Gehölzen stabilisiert den Wasser-, Kohlenstoff- und Nährstoffkreislauf und reduziert die Mobilität von Schadstoffen. Auf Systemebene verlangsamen Gehölzreihen den Oberflächenabfluss und erhöhen die Infiltration, wodurch Nähr- und Schadstoffe länger in der Bodenlösung verbleiben und von den Gehölzen aufgenommen werden können. Die erhöhte Durchwurzelung, der Zuwachs an organischer Bodensubstanz und die permanente Vegetationsdecke stabilisieren die Bodenstruktur und verringern die Erosion durch Wind und Wasser. Zudem wird durch die gesteigerte mikrobielle Aktivität die Nährstoffmineralisation gefördert. Langfristig wird die Bodenqualität und ökosystemare Resilienz erhöht. Die Hypothesen zum Wirkgefüge der gehölzbedingten Effekte auf die Indikatoren und Zielfunktionen in silvoarablen Gehölzstreifen konnten bestätigt werden. Auch hinsichtlich der Speicher- und Reglerfunktion des Bodens im Wasserhaushalt sind positive Effekte zu erwarten, ebenso wie im Hinblick auf andere Funktionen der weiteren Schutzgüter. Zu nennen sind insbesondere die Retentions- und Klimaschutzfunktion der Schutzgüter Wasser und Luft. Auch die These, dass das Maß der positiven Effekte von systemspezifischen Komponenten abhängt, wurde bestätigt. Darüber hinaus konnten die Hauptkriterien identifiziert werden. Als standörtliches Kriterium wurde der Tongehalt des Bodens identifiziert. So wirken silvoarable Systeme auf Böden mit gering - mittlerem Tongehalt am effektivsten. Hinsichtlich des Systemdesigns beeinflussen die Breite der Gehölzstreifen und die Dichte innerhalb der Reihen maßgeblich den Eintrag organischer Substanz, die Reduktion von Erosion und Bodenverlusten sowie die verbesserte Infiltrationsfähigkeit. Engere Abstände zwischen den Gehölzreihen (z. B. 24 m im Vergleich zu 48 m oder 96 m) verringern außerdem das Erosionspotenzial durch Wind und Wasser deutlich. Bezüglich der Bewirtschaftungsart wirken längere Erntezyklen und eine bodenschonende Bewirtschaftung effektiver auf die Anreicherung organischer Bodensubstanz, die Nährstoffverfügbarkeit und die Reduktion der Bodenverluste als kurze Erntezyklen oder eine intensive Bodenbearbeitung.

Die Ergebnisse bestätigen bestehende Erkenntnisse zur Bedeutung von AF-Systemen für die nachhaltige Landbewirtschaftung. Die Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und der Ökosystemresilienz durch Gehölze deckt sich mit vorangegangenen Studien zu Agroforstsystemen und deren Rolle bei der Stabilisierung ökologischer Kreisläufe. Die identifizierten Systemkomponenten, wie die Abstände der Gehölzstreifen, die Gehölzdichte innerhalb eines Streifens oder die Erntefrequenz, und deren Einfluss auf die natürlichen Bodenfunktionen liefern darüber hinaus differenziertere Einblicke, die für eine standortangepasste Etablierung von silvoarablen Systemen genutzt werden können. Die Ergebnisse liefern ergänzende Argumente für die Aufnahme von Agroforstsystemen in die BKompV als Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme zur produktions-

integrierten und funktionspezifischen Kompensation im Rahmen der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung.

Daher wurde ein Vorschlag für die Biotoptypen der silvoarablen Agroforstsysteme im Sinne der Anlage 2 BKompV entwickelt sowie ein Maßnahmenvorschlag der Systeme als „Bewirtschaftungs- und Pflegemaßnahme“ auf Acker zur produktionsintegrierten Kompensation von Beeinträchtigungen der Funktionen der Schutzgüter im Sinne des § 1 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG in Verbindung mit § 7 Abs. 1 Nr. 2 BNatSchG.

Zudem wurde ein Defizit hinsichtlich einer standardisierten, bundeseinheitlichen Bewertungsmethodik festgestellt. Die Bewertung von Eingriffen hinsichtlich ihrer Beeinträchtigungsschwere sowie die Ermittlung des Kompensationsbedarfs und -umfangs ist verbal-argumentativ zu ermitteln und variiert aufgrund fehlender einheitlicher Parameter und Methoden. Daher wurde im Rahmen dieser Arbeit eine teilformalisierte Methode als Bewertungsrahmen für die Eingriffs- und Kompensationsermittlung erheblicher Beeinträchtigungen besonderer Schwere der natürlichen Bodenfunktionen entwickelt. Die Methode ergänzt den verbal-argumentativen Ansatz um ein Verfahren zur Ermittlung des Kompensationsbedarfs und -umfangs unter der Berücksichtigung bestehender gesetzlicher Vorgaben. Ein solches teilformalisiertes Ermittlungsverfahren verbessert die Gleichbehandlung in der Beurteilung von Eingriffen, bei gleichzeitiger Wahrung der Einzelfallentscheidung. Dem entsprechend wurde ein Vorschlag zur Quantifizierung der möglichen Kompensationsmaßnahmen für die natürliche Bodenfruchtbarkeit aus Anlage 5 Abschnitt A Spalte 3 Zeile 4 BKompV in Funktionspunkten eingeführt. Der Vorschlag bettet sich in den bestehenden rechtlichen Rahmen der BKompV und berücksichtigt methodische Ansätze der Bundesländer.

Darauf aufbauend sollte ebenso für die weiteren schutzgutbezogenen Funktionen ein solcher halbformalisierter Ansatz ausgearbeitet werden, um dem Gleichbehandlungsgrundsatz hinsichtlich der Ermittlung der funktionspezifischen Kompensation aller Funktionen im Rahmen des Geltungsbereiches der BKompV gerecht zu werden.

Methodisch ist jedoch noch einmal darauf hinzuweisen, dass die Ergebnisse der standardisierten Literaturauswertung auf der Auswertung von Meta-Analysen und Reviews basiert. Darin wurden verschiedene AF-Systeme unter unterschiedlichen biogeographischen und klimatischen Bedingungen zusammengefasst, wodurch systematische Vergleichbarkeiten limitiert sind. Zudem weisen zahlreiche Studien auf eine unzureichende Standardisierung der Messmethoden hin, wodurch einige Parameter nur eingeschränkt oder nicht quantitativ auswertbar sind. Zukünftige Forschung sollte daher standardisierte Versuchsstudien zu den einzelnen Wirkkomponenten von AF-Systemen durchführen. Insbesondere in Deutschland sind weitere differenzierte Untersuchungen notwendig, die eine größere Datenmenge mit standardisierten Methoden berücksichtigen, um den Einfluss von Standort, System- und Bewirtschaftungseigenschaften, einzeln und im Wirkgefüge, auf die Bodenfunktionen systematisch zu analysieren. Ein nächster Schritt könnten standortangepasste Empfehlungen zur Anlage und Bewirtschaftung von silvoarablen Agroforstsystemen sein. Darüber

hinaus sollten auch weitere Agroforstsysteme wie silvoarable Systeme mit verstreuter Gehölzanordnung sowie silvopastorale und agrosilvopastorale Systeme in die BKompV aufgenommen werden.

Bezüglich der Bewertung von Eingriffen besteht jedoch immer noch ein Defizit in der standardisierten Bewertung der Bodenfunktionen, da ein bundesweit einheitliches Bodenbewertungsverfahren bisher nicht existiert. Weiterer Forschungsbedarf besteht daher hinsichtlich einer bundeseinheitlichen Methode zur Bodenbewertung, die eine Festlegung von Schwellenwerten für Parameter wie Humusgehalt, Schüttdichte oder Bodenmächtigkeit umfasst. Zudem zeigt sich ein Bedarf an der Definition naturschutz- und agrarfachlicher Standards für Agroforstsysteme, um die Abgrenzung des Überschreitens der guten fachlichen Praxis zu expliziten Kompensationsmaßnahmen zu ermöglichen. Dies ist insbesondere hinsichtlich der Anforderungen (gem. Anlage 6 Abschnitt A Spalten 2-3 BKompV) an die Anlage und Bewirtschaftung der silvoarablen Systeme dringend notwendig.

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Implementierung silvoarabler Systeme unter Berücksichtigung klimatischer und bodenspezifischer Faktoren einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen Landbewirtschaftung leisten kann. Gleichzeitig besteht ein fortwährender Forschungsbedarf hinsichtlich der quantitativen Erfassung der Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Bodenfunktionen sowie der Weiterentwicklung standardisierter Bewertungsverfahren. Die vorgeschlagenen Methodiken und Erkenntnisse bilden eine wichtige Grundlage für zukünftige Bewertungsansätze und die gezielte Integration von Agroforstsystemen in naturschutz- und agrarpolitische Maßnahmen.

IV. LITERATURVERZEICHNIS

- Amadi, C. C., Van Rees, K. C. J., & Farrell, R. E. (2016). Soil–atmosphere exchange of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in shelterbelts compared with adjacent cropped fields. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 223, 123–134. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.02.026>
- Amelung, W., Blume, H.-P., Fleige, H., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretschmar, R., Stahr, K., & Wilke, B.-M. (2018). *Scheffer/Schachtschabel Lehrbuch der Bodenkunde*. Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-662-55871-3>
- Anderson, S. H., Udawatta, R. P., Seobi, T., & Garrett, H. E. (2009). Soil water content and infiltration in agroforestry buffer strips. *Agroforestry Systems*, 75(1), 5–16. <https://doi.org/10.1007/s10457-008-9128-3>
- Aust, C. (2012). *Abschätzung der nationalen und regionalen Biomassepotentiale von Kurzumtriebsplantagen auf landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland* [[Doctoral Thesis, Albert-Ludwigs-Universität Freiburg im Breisgau]]. <http://www.freidok.uni-freiburg.de/dnb/download/8630>.
- Baah-Acheamfour, M., Chang, S., Bork, E., & Carlyle, C. (2017). The potential of agroforestry to reduce atmospheric greenhouse gases in Canada: Insight from pairwise comparisons with traditional agriculture, data gaps and future research. *The Forestry Chronicle*, 93, 180–189. <https://doi.org/10.5558/tfc2017-024>
- Bechler, K. (2010). *Bewertung von Böden nach ihrer Leistungsfähigkeit: Leitfaden für Planungen und Gestattungsverfahren* (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg (LUBW), Hrsg.; 2., völlig überarb. Neuaufl). Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg.
- Bergeron, M., Lacombe, S., Bradley, R. L., Whalen, J., Cogliastro, A., Jutras, M.-F., & Arp, P. (2011). Reduced soil nutrient leaching following the establishment of tree-based intercropping systems in eastern Canada. *Agroforestry Systems*, 83(3), 321–330. <https://doi.org/10.1007/s10457-011-9402-7>
- BfN & BMU. (2021). *Handreichung zum Vollzug der Bundeskompensationsverordnung* (Bundesamt für Naturschutz & Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit, Hrsg.). <https://www.bfn.de/eingriffsregelung>
- Blanchet, G., Barkaoui, K., Bradley, M., Dupraz, C., & Gosme, M. (2022). Interactions between drought and shade on the productivity of winter pea grown in a 25-year-old walnut-based alley cropping system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(5), 583–598. <https://doi.org/10.1111/jac.12488>

BMUV. (2020, April 14). *Bundeskompensationsverordnung (BKompV)—Hintergrund*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. <https://www.bmuv.de/WS5459>

BMUV. (2023). Aktionsprogramm Natürlicher Klimaschutz—Kabinettsbeschluss vom 29. März 2023. *Broschüre, 1. Ausgabe*.

Brandle, J. R., Hodges, L., Tyndall, J., & Sudmeyer, R. A. (2015). Windbreak Practices. In H. E. “Gene” Garrett (Hrsg.), *ASA, CSSA, and SSSA Books* (S. 75–104). American Society of Agronomy and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/2009.northamericanagroforestry.2ed.c5>

BZL. (2025, März 21). *Boden in Gefahr: Erosion in der Landwirtschaft*. <https://www.landwirtschaft.de/umwelt/natur/boden/boden-in-gefahr-erosion-in-der-landwirtschaft>

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*(1–2), 219–235. <https://doi.org/10.1007/s11104-015-2422-8>

Chimento, C., Almagro, M., & Amaducci, S. (2016). Carbon sequestration potential in perennial bioenergy crops: The importance of organic matter inputs and its physical protection. *GCB Bioenergy*, *8*(1), 111–121. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12232>

Cunningham, R. A. (1988). 27. Genetic improvement of trees and shrubs used in windbreaks. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *22–23*, 483–498. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(88\)90040-0](https://doi.org/10.1016/0167-8809(88)90040-0)

de Aguiar, M. I., Maia, S. M. F., Xavier, F. A. da S., de Sá Mendonça, E., Filho, J. A. A., & de Oliveira, T. S. (2010). Sediment, nutrient and water losses by water erosion under agroforestry systems in the semi-arid region in northeastern Brazil. *Agroforestry Systems*, *79*(3), 277–289. <https://doi.org/10.1007/s10457-010-9310-2>

De Stefano, A., & Jacobson, M. G. (2017). Soil carbon sequestration in agroforestry systems: A meta-analysis. *Agroforestry Systems*. <https://doi.org/10.1007/s10457-017-0147-9>

DeFAF. (2024). *Bäume und Acker | DEFAF e.V.* <https://agroforst-info.de/arten/baeume-und-acker/>

Dmuchowski, W., Baczevska-Dąbrowska, A. H., & Gworek, B. (2024). The role of temperate agroforestry in mitigating climate change: A review. *Forest Policy and Economics*, *159*, 103136. <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2023.103136>

- Dollinger, J., & Jose, S. (2018). Agroforestry for soil health. *Agroforestry Systems*, 92(2), 213–219. <https://doi.org/10.1007/s10457-018-0223-9>
- Druckenbrod, C., Schäfer, A., Stock, R., & Wagner, A. (with Deutsche Bundesstiftung Umwelt). (2012). *Produktionsintegrierte Kompensation: Rechtliche Möglichkeiten, Akzeptanz, Effizienz und naturschutzgerechte Nutzung* (D. Czybulka, U. Hampicke, & B. Litterski, Hrsg.). Erich Schmidt Verlag.
- 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>
- Finck, P., Heinze, S., Raths, U., Riecken, U., & Ssymank, A. (2017). *Rote Liste der gefährdeten Biotoptypen Deutschlands: Dritte fortgeschriebene Fassung 2017: Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 156* (Bundesamt für Naturschutz, Hrsg.). LV Buch Verlag. <http://ebookcentral.proquest.com/lib/munchentech/detail.action?docID=5849723>
- Hamon, X., Dupraz, C., & Liagre, F. (2009). *L'agroforesterie, Outil de Séquestration du Carbone en Agriculture*. <https://hal.inrae.fr/hal-02820921>
- Hazlett, P. W., Gordon, A. M., Sibley, P. K., & Buttle, J. M. (2005). Stand carbon stocks and soil carbon and nitrogen storage for riparian and upland forests of boreal lakes in northeastern Ontario. *Forest Ecology and Management*, 219(1), 56–68. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2005.08.044>
- Henke, W., Brunotte, J., Busch, M., & Honecker, H. (2015). *Gute fachliche Praxis—Bodenbewirtschaftung und Bodenschutz* (Aid Infodienst Ernährung, Landwirtschaft Verbraucherschutz, Hrsg.; 2. Aufl). aid infodienst Ernährung, Landwirtschaft, Verbraucherschutz.
- Howlett, D. S., Moreno, G., Mosquera Losada, M. R., Nair, P. K. R., & Nair, V. D. (2011). Soil carbon storage as influenced by tree cover in the Dehesa cork oak silvopasture of central-western Spain. *Journal of Environmental Monitoring*, 13(7), 1897. <https://doi.org/10.1039/c1em10059a>
- Hübner, R., & Günzel, J. (2022). *Agroforstwirtschaft: Die Kunst, Bäume und Landwirtschaft zu verbinden (3.Auflage)* (DeFAF, Hrsg.). https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2022/12/2022_DeFAF_Broschuere_3-web.pdf
- Inurreta-Aguirre, H. D., Lauri, P.-É., Dupraz, C., & Gosme, M. (2022). Impact of shade and tree root pruning on soil water content and crop yield of winter cereals in a Mediterranean alley cropping system. *Agroforestry Systems*, 96(4), 747–757. <https://doi.org/10.1007/s10457-022-00736-9>

Ivezić, V., Lorenz, K., & Lal, R. (2022). Soil Organic Carbon in Alley Cropping Systems: A Meta-Analysis. *Sustainability*, 14(3). <https://doi.org/10.3390/su14031296>

Jose, S., Gillespie, A. R., Seifert, J. R., & Biehle, D. J. (2000). Defining competition vectors in a temperate alley cropping system in the midwestern USA: 2. Competition for water. *Agroforestry Systems*, 48(1), 41–59. <https://doi.org/10.1023/A:1006289322392>

Kahle, P., & Janssen, M. (2020). Impact of short-rotation coppice with poplar and willow on soil physical properties. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 183(2), 119–128. <https://doi.org/10.1002/jpln.201900443>

Langeveld, H., Quist-Wessel, F., Dimitriou, I., Aronsson, P., Baum, C., Schulz, U., Bolte, A., Baum, S., Köhn, J., Weih, M., Gruss, H., Leinweber, P., Lamersdorf, N., Schmidt-Walter, P., & Berndes, G. (2012). Assessing Environmental Impacts of Short Rotation Coppice (SRC) Expansion: Model Definition and Preliminary Results. *BioEnergy Research*, 5(3), 621–635. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9235-x>

Lasch, P., Kollas, C., Rock, J., & Suckow, F. (2010). Potentials and impacts of short-rotation coppice plantation with aspen in Eastern Germany under conditions of climate change. *Regional Environmental Change*, 10(2), 83–94. <https://doi.org/10.1007/s10113-009-0095-7>

Lawson, G., Dupraz, C., & Watté, J. (2019). Can Silvoarable Systems Maintain Yield, Resilience, and Diversity in the Face of Changing Environments? In *Agroecosystem Diversity* (S. 145–168). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811050-8.00009-1>

LfL. (2024). Agroforstsysteme in Bayern. *LfL-Information*. https://www.lfl.bayern.de/mam/cms07/publikationen/daten/informationen/agroforstsysteme_in_bayern_lf_l-information.bf.pdf

LfU. (2014, Oktober). *Bayerische Kompensationsverordnung (BayKompV) Arbeitshilfe Produktionsintegrierte Kompensationsmaßnahmen (PIK)* (Landesamt für Umwelt, Hrsg.). [https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000009?SID=1067178765&ACTIONxSESSxSHOWPIC\(BILDxKEY:%27ifu_nat_00321%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27\)](https://www.bestellen.bayern.de/application/eshop_app000009?SID=1067178765&ACTIONxSESSxSHOWPIC(BILDxKEY:%27ifu_nat_00321%27,BILDxCLASS:%27Artikel%27,BILDxTYPE:%27PDF%27))

Lorenz, K., & Lal, R. (2014). Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 34(2), 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>

LUBW. (2024). *Das Schutzgut Boden in der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung: Arbeitshilfe zu Bewertungsregelungen und Maßnahmen zur Eingriffsvermeidung und zur Schutzgutinternen Eingriffskompensation*

(Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg, Hrsg.; 3., überarb. Aufl). LUBW. <https://pudi.lubw.de/detailseite/-/publication/10636>

Lueglinger, E., & Renger, R. (2013). *Das weite Feld der Metaanalyse: Sekundär-, literatur- und metaanalytische Verfahren im Vergleich* [Text/pdf]. <https://doi.org/10.25598/JKM/2013-2.2>

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. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 323, 107689. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107689>

Medinski, T. V., Freese, D., Böhm, C., & Slazak, A. (2014). Soil carbon fractions in short rotation poplar and black locust coppices, Germany. *Agroforestry Systems*, 88(3), 505–515. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9709-2>

Mengel, A., Schwarzer, M., Strothmann, T., Wickert, J., von Haaren, C., Galler, C., Müller-Pfannenstiel, K., Wulfert, K., Pieck, S., & Borkenhagen, J. (2018). *Methodik der Eingriffsregelung im bundesweiten Vergleich: Naturschutz und Biologische Vielfalt Heft 165* (B. für Naturschutz, Hrsg.; 1st ed). LV Buch Verlag.

Menichetti, L., Kätterer, T., & Bolinder, M. A. (2020). A Bayesian modeling framework for estimating equilibrium soil organic C sequestration in agroforestry systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 303, 107118. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2020.107118>

Mulia, R., & Dupraz, C. (2006). Unusual Fine Root Distributions of Two Deciduous Tree Species in Southern France: What Consequences for Modelling of Tree Root Dynamics? *Plant and Soil*, 281(1–2), 71–85. <https://doi.org/10.1007/s11104-005-3770-6>

Nair, P. K. R. (1985). Classification of agroforestry systems. *Agroforestry Systems*, 3(2), 97–128. <https://doi.org/10.1007/BF00122638>

Nair, P. K. R., Kang, B. T., & Kass, D. C. L. (1995). Nutrient Cycling and Soil-Erosion Control in Agroforestry Systems. In A. S. R. Juo & R. D. Freed (Hrsg.), *ASA Special Publications* (S. 117–138). American Society of Agronomy, Crop Science Society of America, and Soil Science Society of America. <https://doi.org/10.2134/asaspecpub60.c7>

Namockel, S. M. (2024). *Wassermanagement durch Agroforstsysteme. Eine Systematische Literaturanalyse* [[Unpublished manuscript]]. TUM School of Life Science, Technische Universität München.

Nawroth, G., Warth, P., Böhm, C., & Fraunhofer-Institut für Arbeitswirtschaft und Organisation (Hrsg.). (2019). *Roadmap Agroforstwirtschaft: Bäume als Bereicherung für landwirtschaftliche Flächen in Deutschland*. Fraunhofer Verlag.

Newig, J., & Fritsch, O. (2009). The Case Survey Method and Applications in Political Science. *Political Science Association (APSA)*, 49.

Nuberg, I. K. (1998). Effect of shelter on temperate crops: A review to define research for Australian conditions. *Agroforestry Systems*, 41(1), 3–34. <https://doi.org/10.1023/A:1006071821948>

Oelbermann, M., Paul Voroney, R., & Gordon, A. M. (2004). Carbon sequestration in tropical and temperate agroforestry systems: A review with examples from Costa Rica and southern Canada. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 104(3), 359–377. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2004.04.001>

Ong, C. K., Black, C. R., Wallace, J. S., Khan, A. A. H., Lott, J. E., Jackson, N. A., Howard, S. B., & Smith, D. M. (2000). Productivity, microclimate and water use in *Grevillea robusta*-based agroforestry systems on hillslopes in semi-arid Kenya. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 80(1–2), 121–141. [https://doi.org/10.1016/S0167-8809\(00\)00144-4](https://doi.org/10.1016/S0167-8809(00)00144-4)

Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet, G., Van Waes, C., & Reheul, D. (2018). Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agricultural Systems*, 166, 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2018.08.008>

Paul, C., Bartkowski, B., Dönmez, C., Don, A., Mayer, S., Steffens, M., Weigl, S., Wiesmeier, M., Wolf, A., & Helming, K. (2023). Carbon farming: Are soil carbon certificates a suitable tool for climate change mitigation? *Journal of Environmental Management*, 330, 117142. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.117142>

Peichl, M., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., Huss, J., & Abohassan, R. A. (2006). Carbon Sequestration Potentials in Temperate Tree-Based Intercropping Systems, Southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 66(3), 243–257. <https://doi.org/10.1007/s10457-005-0361-8>

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(1), 10–23. <https://doi.org/10.1002/jpln.200800030>

Ramesh, T., Manjaiah, K. M., Mohopatra, K. P., Rajasekar, K., & Ngachan, S. V. (2015). Assessment of soil organic carbon stocks and fractions under different agroforestry systems in subtropical hill agroecosystems of north-east India. *Agroforestry Systems*, 89(4), 677–690. <https://doi.org/10.1007/s10457-015-9804-z>

- Reeg, T., Bemann, A., Konold, W., Murach, D., & Spiecker, H. (Hrsg.). (2009). *Anbau und Nutzung von Bäumen auf Landwirtschaftlichen Flächen* (1. Aufl.). Wiley. <https://doi.org/10.1002/9783527627462>
- Rivest, D., Lorente, M., Olivier, A., & Messier, C. (2013). Soil biochemical properties and microbial resilience in agroforestry systems: Effects on wheat growth under controlled drought and flooding conditions. *Science of The Total Environment*, 463–464, 51–60. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.05.071>
- 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(11), 3886–3897. <https://doi.org/10.1002/ldr.3136>
- Siriri, D., Wilson, J., Coe, R., Tenywa, M. M., Bekunda, M. A., Ong, C. K., & Black, C. R. (2013). Trees improve water storage and reduce soil evaporation in agroforestry systems on bench terraces in SW Uganda. *Agroforestry Systems*, 87(1), 45–58. <https://doi.org/10.1007/s10457-012-9520-x>
- Strauss, V., Paul, C., Dönmez, C., & Burkhard, B. (2024). Carbon farming for climate change mitigation and ecosystem services – Potentials and influencing factors. *Journal of Environmental Management*, 372, 123253. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.123253>
- Swieter, A., Langhof, M., & Lamerre, J. (2022). Competition, stress and benefits: Trees and crops in the transition zone of a temperate short rotation alley cropping agroforestry system. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 208(2), 209–224. <https://doi.org/10.1111/jac.12553>
- Thevathasan, N. V., & Gordon, A. M. (2004). Ecology of tree intercropping systems in the North temperate region: Experiences from southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, 61–62(1–3), 257–268. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000029003.00933.6d>
- TLL & ThLG. (2014). *Produktionsintegrierte Kompensation (PIK) Maßnahmenvorschläge* (Thüringer Landesanstalt für Landwirtschaft & Thüringer Landgesellschaft mbH, Hrsg.). https://www.db-thueringen.de/servlets/MCRFileNodeServlet/dbt_derivate_00029132/PIK.pdf
- 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>
- Unsel, R., Reppin, N., Eckstein, K., Zehlius-Eckert, W., Hoffmann, H., & Huber, T. (2011). *Leitfaden Agroforstsysteme. Möglichkeiten zur naturschutzgerechten Etablierung von Agroforstsystemen*. https://www.bfn.de/sites/default/files/2023-03/BfN_Agroforst_Skript.pdf

van Ramshorst, J. G. V., Siebicke, L., Baumeister, M., Moyano, F. E., Knohl, A., & Markwitz, C. (2022). Reducing Wind Erosion through Agroforestry: A Case Study Using Large Eddy Simulations. *Sustainability*, *14*(20), 13372. <https://doi.org/10.3390/su142013372>

Veldkamp, E., Schmidt, M., Markwitz, C., Beule, L., Beuschel, R., Biertümpfel, A., Bischel, X., Duan, X., Gerjets, R., Göbel, L., Graß, R., Guerra, V., Heinlein, F., Komainda, M., Langhof, M., Luo, J., Potthoff, M., van Ramshorst, J. G. V., Rudolf, C., ... Corre, M. D. (2023). Multifunctionality of temperate Alley-Cropping agroforestry outperforms open cropland and grassland. *Communications Earth & Environment*, *4*(1), 20. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>

Visscher, A. M., Meli, P., Fonte, S. J., Bonari, G., Zerbe, S., & Wellstein, C. (2024). Agroforestry enhances biological activity, diversity and soil-based ecosystem functions in mountain agroecosystems of Latin America: A meta-analysis. *Global Change Biology*, *30*(1), e17036. <https://doi.org/10.1111/gcb.17036>

Wagener, F., Heck, P., & Böhmer, J. (Hrsg.). (2013). *Nachwachsende Rohstoffe als Option für den Naturschutz... Naturschutz durch Landbau? Schlussbericht zu ELKE III. Umwelt-Campus Birkenfeld.* https://www.landnutzungsstrategie.de/wp-content/uploads/2018/07/2013-10-31_Schlussbericht_ELKE_III_JB.pdf

Wang, L., Zhong, C., Gao, P., Xi, W., & Zhang, S. (2015). Soil Infiltration Characteristics in Agroforestry Systems and Their Relationships with the Temporal Distribution of Rainfall on the Loess Plateau in China. *PLOS ONE*, *10*(4), e0124767. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0124767>

Wiegmann, K., Scheffler, M., Schneider, C., Lakner, S., Sommer, P., & Meyer-Jürshof. (2023). *Klimaschutz in der GAP 2023-2027.* https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/11850/publikationen/103_2023_texte_klimaschutz_in_der_gap.pdf

Wilson, D., Blain, D., & Couwenberg, J. (2016). Greenhouse gas emission factors associated with rewetting of organic soils. *Mires and Peat*, *17*, 1–28. <https://doi.org/10.19189/MaP.2016.OMB.222>

Wotherspoon, A., Thevathasan, N. V., Gordon, A. M., & Voroney, R. P. (2014). Carbon sequestration potential of five tree species in a 25-year-old temperate tree-based intercropping system in southern Ontario, Canada. *Agroforestry Systems*, *88*(4), 631–643. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9719-0>

Yang, L., Ding, X., Liu, X., Li, P., & Eneji, A. E. (2016). Impacts of long-term jujube tree/winter wheat–summer maize intercropping on soil fertility and economic efficiency—A case study in the lower North China Plain. *European Journal of Agronomy*, *75*, 105–117. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.01.008>

Young, A. (1997). *Agroforestry for soil management* (2. ed). CAB International.

Zehlius-Eckert, W., Böhm, C., & Tsonkova, P. (2020). Umweltleistungen von Agroforstsystemen. In C. Böhm (Hrsg.), *AUFWERTEN, Loseblattsammlung* (1–2). Technische Universität München. https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2021/03/02__Umweltleistungen.pdf

Zhu, X., Liu, W., Chen, J., Bruijnzeel, L. A., Mao, Z., Yang, X., Cardinael, R., Meng, F.-R., Sidle, R. C., Seitz, S., Nair, V. D., Nanko, K., Zou, X., Chen, C., & Jiang, X. J. (2020). Reductions in water, soil and nutrient losses and pesticide pollution in agroforestry practices: A review of evidence and processes. *Plant and Soil*, 453(1), 45–86. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04377-3>

Die unveröffentlichte Arbeit von Namockel (2024) kann auf Nachfrage bei der Autorin oder dem Betreuer eingesehen werden.

Erklärung

Ich versichere hiermit, dass ich die von mir eingereichte Abschlussarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt habe.

Graz, 22.03.2025

Ort, Datum, Unterschrift

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Namobil', is written over a horizontal line that spans the width of the signature area.