



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft



Schlussbericht zum Thema

Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen
zur Förderung von Bestäuberinsekten

FKZ: 2819NA071, 2819NA111

Projektnehmer/Projektnehmerin: Albert-Ludwigs-Universität Freiburg,
Universität Hohenheim

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau.

Das Bundesprogramm Ökologischer Landbau (BÖL) hat sich zum Ziel gesetzt, die Rahmenbedingungen für die ökologische Landwirtschaft in Deutschland zu verbessern. Es wird vom Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL) finanziert und in der BÖL-Geschäftsstelle in der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (BLE) in die Praxis umgesetzt. Das Programm gliedert sich in zwei ineinandergreifende Aktionsfelder - das Forschungs- und das Informationsmanagement.

Detaillierte Informationen und aktuelle Entwicklungen finden Sie unter:

www.bundesprogramm.de
www.oekolandbau.de/forschung

Wenn Sie weitere Fragen haben, wenden Sie sich bitte an:

Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
Bundesprogramm Ökologischer Landbau
Deichmanns Aue 29
53179 Bonn
Tel.: 0228-6845-3280
E-Mail: boel-forschung@ble.de

Schlussbericht des Projektes

Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzten Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten



Titel:	Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten
Akronym:	INTEGRA
Förderkennzeichen:	2819NA071
Laufzeit des Vorhabens:	02.06.2021 – 31.12.2024
Projektteilnehmer:	Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Universität Hohenheim

universität freiburg



UNIVERSITÄT
HOHENHEIM

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft auf Grund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Gefördert durch



Bundesministerium
für Ernährung
und Landwirtschaft

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages



Zuwendungsempfänger bzw. ausführende Stelle

- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Waldwachstum und Dendroökologie (**WW**); Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg im Breisgau

Dr. Christopher Morhart, Prof. Dr. Thomas Seifert, Dr. Zoe Schindler, Nora Obladen, Katja Kröner

E-Mail: christopher.morhart@wwd.uni-freiburg.de

Am Projekt beteiligte Kooperationspartner

- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Naturschutz und Landschaftsökologie (**PFN**); Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg im Breisgau

Prof. Dr. Alexandra-Maria Klein, Dr. Felix Fornoff, Dr. Henning Nottebrock

E-Mail: alexandra.klein@nature.uni-freiburg.de

- Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Juniorprofessur für Transformation zu nachhaltigen Energiesystemen (**TNE**); Tennenbacher Straße 4, 79106 Freiburg im Breisgau

Prof. Dr. Cathrin Zengerling, Marina Klimke

E-Mail: cathrin.zengerling@enrlaw.uni-freiburg.de

- Universität Hohenheim, Institut für Bodenkunde und Standortslehre, Fachgebiet für Biogeophysik (**IBS**); Emil-Wolff-Str. 27, 70593 Stuttgart

Dr. Sebastian Gayler, Dr. Shehan Morandage

E-Mail: sebastian.gayler@uni-hohenheim.de

Titel: Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten (INTEGRA)

Morhart C.* , Schindler Z., Seifert T., Obladen N., Kröner K., Klein A.-M., Fornoff F., Nottebrock H., Zengerling C., Klimke M., Morandage S., Gayler S.

* Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Waldwachstum und Dendroökologie
Tennenbacher Str. 4, 79106 Freiburg im Breisgau
E-Mail: christopher.morhart@wwd.uni-freiburg.de

Unsere Agrarlandschaften leiden zunehmend unter einem Mangel an Bäumen und Sträuchern, die als Lebensraum und Nahrungsquelle für bestäubende Insekten von großer Wichtigkeit sind. Agroforstsysteme, die Gehölze gezielt mit landwirtschaftlicher Nutzung kombinieren, bieten hier eine vielversprechende Lösung. Im Projekt INTEGRA wurden deshalb sowohl der Nutzen solcher Systeme für Bestäuberinsekten als auch die Wechselwirkungen zwischen Bäumen und Ackerkulturen umfassend untersucht. Darüber hinaus wurde der rechtliche Rahmen für Agroforstsysteme in Deutschland eingehend analysiert und bestehende sowie potenzielle Fördermöglichkeiten bewertet.

Auf Basis umfangreicher Messungen konnten nicht nur das Blühangebot der Bäume und Sträucher, sondern auch deren Auswirkungen auf Ackerkulturen – wie beispielsweise Beschattungseffekte – modelliert werden. Mithilfe ökophysiologischer Modelle wurden zudem Interaktionen und Nebeneffekte zwischen Gehölzen und landwirtschaftlichen Kulturen berechnet, um optimale Anordnungen zu identifizieren. Ergänzend wurde erforscht, welche Wildbienenarten welche Baum- und Straucharten als Nahrungsquelle nutzen.

Ein Großteil dieser Erkenntnisse floss in die Entwicklung eines frei verfügbaren Softwaretools zur räumlichen Planung von Habitateigenschaften landwirtschaftlicher Systeme ein. Dieses Tool integriert sowohl bestehendes Wissen als auch die im Projekt gewonnenen neuen Erkenntnisse zur Integration von Bäumen und Sträuchern in die Agrarlandschaft. Die benutzerfreundliche Software ermöglicht es Praktikern, Gehölze auf landwirtschaftlichen Flächen gezielt zu planen und die Auswirkungen dieser Maßnahmen auf die Lebensraumqualität für Bestäuber quantitativ zu bewerten. Zusätzlich ist eine rechtliche Einordnung der Maßnahmen integriert, sodass Planende während des Planungsprozesses die aktuellen rechtlichen Rahmenbedingungen und mögliche Fördermaßnahmen direkt im Tool abrufen können.

Abstract

Title: Integration of habitat structures in agricultural areas for the promotion of pollinator insects (INTEGRA)

Morhart C.* , Schindler Z., Seifert T., Obladen N., Kröner K., Klein A.-M., Fornoff F., Nottebrock H., Zengerling C., Klimke M., Morandage S., Gayler S.

* Albert-Ludwigs-Universität Freiburg, Professur für Waldwachstum und Dendroökologie
Tennenbacher Str. 4, 79106 Freiburg im Breisgau
E-Mail: christopher.morhart@wwd.uni-freiburg.de

Our agricultural landscapes are increasingly suffering from a lack of trees and shrubs, which are crucial as habitats and food sources for pollinating insects. Agroforestry systems, which strategically combine woody plants with agricultural use, offer a promising solution to this issue. Therefore, the INTEGRA project comprehensively investigated both the benefits of such systems for pollinator insects and the interactions between trees and arable crops. Additionally, the legal framework for agroforestry systems in Germany was thoroughly analyzed, and existing as well as potential funding opportunities were assessed.

Based on extensive measurements, not only the flowering availability of the trees and shrubs was modeled, but also their effects on arable crops, such as shading effects. Using ecophysiological models, interactions and side effects between woody plants and agricultural crops were calculated to identify optimal arrangements. Furthermore, research was conducted to determine which wild bee species utilize which tree and shrub species as food sources.

A significant portion of these insights contributed to the development of a freely available software tool for the spatial planning of habitat features in agricultural systems. This tool integrates both existing knowledge and new findings from the project regarding the integration of trees and shrubs into the agricultural landscape. The user-friendly software enables practitioners to strategically plan woody plants on agricultural land and quantitatively assess the impact of these measures on habitat quality for pollinators. Additionally, a legal assessment of the measures is incorporated, allowing planners to access the current legal framework and potential funding opportunities directly through the tool during the planning process.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	1
Tabellenverzeichnis	3
Abkürzungsverzeichnis	3
1. Einführung.....	4
1.1. Gegenstand des Vorhabens	4
1.2. Ziele und Aufgabenstellung	4
1.3. Planung und Ablauf des Projekts	6
2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde	7
3. Material und Methoden.....	9
4. Ergebnisse.....	18
Untersuchung der Pflanzenarten und ihres Potenzials zur Nahrungsversorgung für Bestäuber.....	19
Quantifizierung der Bientracht: Erfassung der von Blüten angebotenen Nektar- und Pollenmengen für Bestäuber	22
Entwicklung von Modellen zur Simulation der ökologischen und agrarischen Effekte der Habitatstrukturen.....	23
Bedarfsanalyse: Bestimmung des saisonalen Nahrungs- und Nistressourcen-Bedarfs von Wildbienen und anderen Bestäubern.....	25
Evaluation des räumlichen Einflusses der Gehölzstrukturen	28
Erfassung von Baum- und Strauchstrukturen in AFS.....	28
Genauigkeitsprüfung Laserscanning	29
Biomasse und Kohlenstoffgehalt beim Nussbaum (<i>Juglans regia</i>).....	30
Biomasse und Kohlenstoffgehalt bei der Wildkirsche (<i>Prunus avium</i> L.)	31
Quantifizierung der Bientracht	32
Modellierung der floralen Ressourcen der Wildkirsche (<i>Prunus avium</i> L.)	33
Modellierung des Gesamtsystems.....	35
Analyse und Weiterentwicklung des Rechtsrahmens für Agroforstsysteme	45
Entwicklung des Agroforst-Planungstools.....	49
5. Diskussion der Ergebnisse.....	50
Methodendiskussion.....	50
Ergebnisdiskussion.....	51
6. Nutzbarkeit der Ergebnisse	55
7. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen	56
8. Zusammenfassung	57
9. Literaturverzeichnis.....	60

10.	Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt (Printmedien, Newsletter usw.), bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse.....	64
	Publikationen.....	64
	Publikationen in Vorbereitung.....	65
	Konferenzbeiträge.....	66
	Vorträge.....	67
	Workshops, Praxistage und Ausstellungen.....	68
	Praxismerkbblätter und Handreichungen.....	68
	Pressemitteilungen.....	69
	Interviews.....	69
	Studentische Abschluss- und Hausarbeiten.....	69
	PR Allgemein.....	71
11.	Anhang zum Schlussbericht: Kurz gefasster Erfolgskontrollbericht.....	72

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Übersicht über die elf im Projekt INTEGRA integrierten Arbeitspakete und deren Zusammenspiel.	6
Abb. 2: Schematische Darstellung der Baum-Ackerkultur-Interaktionen und der räumlichen Konfiguration im Modell XN5-AF	14
Abb. 3: Schematische Darstellung der agroforstlichen Versuchsflächen in Hohenheim (oben) und bei Freiburg (unten). Die roten Kreise markieren die Positionen der Boden-/Wetterstationen, die für das Monitoring des Mikroklimas, der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur verwendet wurden (2022: Freiburg, 2023-2024: Heidfeldhof). Maßstab 1:1000.	15
Abb. 4: Standorte an denen Blütenbesucher in Hecken aufgenommen wurden (links). Eine Dunkle Erdhummel sammelt Pollen an einer Eiche (rechts), darunter eine Keulhornbiene in einer Heckenrosenblüte (Quelle: C. Hospach)	20
Abb. 5: Sortierung der Gehölzarten nach der Anzahl der an ihnen beobachteten Wildbienen (Quelle: C. Hospach).	20
Abb. 6: Sortierung der Gehölzarten in Hecken die von Wildbienen besucht werden, der Rang gibt die geschätzte Wertigkeit einer Baumart für Wildbienen an (hohe Werte sind wertiger als niedrige Werte).	22
Abb. 7: Aufbau der Feldversuche mit Farbschalen: Mit zunehmender Distanz zu blühenden und nicht blühenden Feldgehölzen. A Schema der methodischen Datenaufnahme, B, C & D Farbschalendesign zum Fangen von Wildbienen (Quelle: K. Melcher)	23
Abb. 8: Eintrag von Wildbienen aus Hecken in die angrenzenden Ackerflächen (Quelle: K. Melcher).	24
Abb. 9: Anzahl an Brutzellen von Wildbeinen und Wespen in den Stängeln von Feldgehölzen (Quelle: A. Eilers).	24
Abb. 10: Emergenzfallen auf Äckern (links, als Kontrolle) und in Hecken (rechts)	26
Abb. 11: Die Gesamtbiomasse von im Boden lebenden Insekten gezeigt für Äcker, Hecken und Feldwege	26
Abb. 12: Anzahl von unterschiedlichen stängelnistenden Bienenarten die Hecken als Nahrungs- und Nisthabitat aufsuchen.	27
Abb. 13: Bild eines aufgeschnittenen Brombeerstängels mit den Brutzellen einer Wildbiene	27
Abb. 14: Darstellung der 3D-Punktwolke der Baumhecke der INTEGRA- Versuchsfläche südlich von Freiburg als Heatmap	29
Abb. 15: Quantitative Structure Model (QSM) eines Nussbaumes (<i>Juglans regia</i>)	29
Abb. 16: Auf Rollwagen montierter terrestrische Laserscanner mit Versuchsästen im Hintergrund (links) daneben ein QSM eines gescannten Astes (rechts).	30
Abb. 17: Probennahme im Feld (links oben und Mitte), gewonnene Proben für die Dichtemessungen (links unten) und Probenmaterial für die Messung der Rindenstärke (rechts unten) und des Nährelementgehaltes (rechts oben)	31
Abb. 18: Bilder der Blütenentwicklung eines Kirschenzweiges zu Zeitpunkt T1 (links) und T2 (Mitte) sowie eines gesamten Astes (rechts)	33
Abb. 19: Erfassung der Blüten eines Apfelbaumes: Gesamtbaum (linkes Bild) und Probeast (rechtes Bild)	33
Abb. 20: Wildkirsche (<i>Prunus avium</i>) mit modellierten Blüten (Z. Schindler)	34
Abb. 21: Gemessener Tagesgang der mikroklimatischen Variablen a) Windgeschwindigkeit, b) photosynthetisch aktive Strahlung, c) relative Luftfeuchte, d) Lufttemperatur und e) – f) Bodentemperatur in 15 cm und 50 cm Tiefe im beschatteten (gestrichelte Linien) und wenig beschatteten Bereich (durchgezogene Linien) an den Standorten: Freiburg (2022) und	

Heidfeldhof (2023 und 2024). Gezeigt sind die gemittelten Tagesgänge der letzten Juniwoche des jeweiligen Jahres.....	36
Abb. 22: Aus Sentinel-2 Satellitenbildern abgeleitete Entwicklung des Blattflächenindex von Sojabohne (LAI) am Standort Freiburg während der Vegetationsperiode 2022. Die Baumreihe befindet sich am südöstlichen Rand der Ackerfläche.	38
Abb. 23: Pflanzenhöhe (linke Achse, grün), Blattflächenindex (LAI; rechte Achse, 2 Termine: blau und rot) sowie Ertrag bzw. Biomasse (Balken) in Abhängigkeit vom Abstand zur jeweiligen Baumreihe für a) Freiburg (Eiche-Sojabohne, 2022), b) Heidfeldhof (Kirsche-Weizen, 2023) und c) Heidfeldhof (Kirsche-Mais, 2024). Fehlerbalken stellen Standardabweichungen dar.	38
Abb. 24: Vergleich von simulierter und gemessener Bodentemperatur (a, c) und Bodenfeuchte (b, d) in 15 cm (a, b) und 45 cm (c, d) Bodentiefe am Standort Heidfeldhof im Frühjahr 2023 im Abstand 1 m von der Baumreihe.....	40
Abb. 25: Simulierte mittlere Tagesgänge der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) während der letzten Juniwoche des jeweiligen Jahres für verschiedene Abstände von den Baumreihen an den Standorten a) Freiburg (2022, Sojabohnen), b) Heidfeldhof (2023, Winterweizen) und (c) Heidfeldhof (2024, Mais). Die graue Kurve stellt die PAR unter Offenlandbedingungen ohne Baumeinfluss dar.	41
Abb. 26: Simulierte prozentuale Verringerung der photosynthetisch aktiven Strahlung (Δ PAR, linke Achse, violette durchgezogene Linie) und des Ernteertrags (rechte Achse, grüne gestrichelte Linie) im Vergleich zur Offenlandanbau-Referenzflächen (REF) für (a) Sojabohnen, (b) Weizen und (c) Mais in verschiedenen Abständen zur Baumhecke (1 m bis 24 m). REF-Werte geben den absoluten PAR-Wert (MJ/m^2) und den Ertrag (kg/ha) unter Offenlandanbaubedingungen ohne Baumeinfluss an.	42
Abb. 27: Simulierte relative Erträge von Winterweizen (links) und Mais (rechts) in Abhängigkeit des Beschattungsgrads auf Ackerflächen mit Beschattung durch Baumreihen. Die Simulationsszenarien sind in Anlehnung an den Versuchsstandort Heidfeldhof aufgesetzt, wobei die Baumhöhe, die Breite der Baumreihe und der Wetterinput variiert wurden.	43
Abb. 28: Simulierte Agroforst-Effekte in Winterweizen-Szenarien auf die a) Nitratauswaschung, b) Lachgasemissionen und c) Humusvorräte im Boden. Dargestellt sind in a) die Differenz der Auswaschungsrate zwischen Agroforst- und Referenzfläche, in b) die über die Simulationsperiode von 18 Jahren aufsummierte N_2O -Emissionen sowie in c) die Differenz der Humusvorräte zwischen Agroforst- und Referenzfläche am Ende der 18-jährigen Simulation.	44
Abb. 29: Übersicht über den Rechtsrahmen der Agroforstwirtschaft.	45
Abb. 30: Screenshot des Layouts des Agroforst-Planungstools (www.agroforst-planungstool.de).	50

Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Übersicht über die erfassten Wildbienen	21
Tab. 2: Bienenfreundlichkeitsindex der Landschaft im Pufferbereich einer Agrarlandschaft	25

Abkürzungsverzeichnis

AFS	Agroforstsystem
AP	Arbeitspaket
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BMEL	Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft
INTEGRA	Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzten Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten
QSM	Quantitative Structure Model
TLS	Terrestrischer Laserscanner

1. Einführung

1.1. Gegenstand des Vorhabens

Der alarmierende Rückgang der Bestäuberinsekten ist zu einem großen Teil auf den Mangel an Strukturelementen wie Bäumen und Büschen in intensiv genutzten Agrarlandschaften zurückzuführen. Genau hier setzt das Projekt INTEGRA an, das Methoden entwickelt, um Agrarflächen so zu gestalten, dass Bestäuberinsekten ein optimales Habitat und ausreichenden Schutz finden. Dies ermöglicht eine durchgehende Versorgung mit Nektar und Pollen über die gesamte Vegetationsperiode hinweg, indem die Blühzeiten von Agrarpflanzen, Bäumen, Sträuchern und blühender Krautvegetation berücksichtigt werden. Zudem werden Nist- und Rückzugsmöglichkeiten geschaffen, wobei der räumliche Zusammenhang zwischen den einzelnen Elementen eine entscheidende Rolle spielt.

Das Projekt konzentriert sich auf die Entwicklung von Methoden, die direkt in die landwirtschaftliche Praxis umgesetzt werden können. Mit einem intuitiv bedienbaren räumlichen Planungstool, das auf wissenschaftlichen Erkenntnissen beruht, erhalten Landwirte konkrete Kennzahlen zur Habitatqualität für Bestäuberinsekten. So können sie auch mit minimalen Computerkenntnissen die ökologische Qualität ihrer Agrarflächen gezielt verbessern. Auf diese Weise werden Landwirte selbst zu aktiven Gestaltern, die ihre Flächen basierend auf fundierten ökologischen Fakten planen und optimieren können.

Ein zentraler Fokus des INTEGRA-Projekts liegt in der quantitativen Modellierung der Wirkung von Landschaftselementen auf die Lebensraumqualität und das Nahrungsangebot für Bestäuberinsekten. Solch integrierte Landnutzungssysteme, bei denen Bäume und Sträucher mit landwirtschaftlicher Nutzung kombiniert werden, werden als Agroforstsysteme (AFS) bezeichnet. Sowohl Nahrungsressourcen als auch Nistmöglichkeiten werden in INTEGRA quantitativ und in ihrer räumlichen Wirkung im Landschaftskontext erfasst. Eine zeitliche Modellkomponente bewertet zudem die Vielfalt und Verfügbarkeit von Nahrungsangeboten für verschiedene Bestäubergruppen – Honigbienen, Wildbienen, Hummeln, Schwebfliegen und Tagfalter, die besonders im Naturschutz wichtig sind – im Verlauf des Jahres. Parallel dazu vermittelt das Planungstool bereits während der Planung relevanten rechtlichen Rahmenbedingungen und mögliche Auswirkungen auf die Produktion. Das als Freeware entwickelte INTEGRA-Planungstool bietet mit offenen Schnittstellen gängige Standards für Precision-Agriculture-Anwendungen und ermöglicht so eine einfache Integration in aktuelle und zukünftige Big-Data-Lösungen der Landwirtschaft 4.0. So kann die strukturelle Diversität von Lebensräumen als wichtiger Bestandteil in das moderne Agrarmanagement eingebracht werden.

1.2. Ziele und Aufgabenstellung

Die im Projekt INTEGRA angepeilten Ziele können den folgenden vier Kategorien zugeordnet werden:

1. Wissenschaftliche Erkenntnisse

Im Projekt gibt es vier Themenbereiche, die wissenschaftlich beleuchtet werden sollen.

1. Erhebung der Bienengemeinschaften an verschiedenen Baum- und Straucharten in Hecken, Bewertung der Nistressourcen in Hecken und die Quantifizierung der Blütenressourcen und deren Einfluss auf Bienenpopulationen
2. Quantifizierung der Blühleistung verschiedener Baum- und Straucharten und deren Eignung für AFS
3. Untersuchung und Modellierung der Interaktion zwischen Bäumen und Ackerfrüchten, d.h. die Abschätzung der Effekte von Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe auf die Erträge der Ackerkulturen und den Holzzuwachs sowie weitere Ökosystemfunktionen wie die Kohlenstoffbindung und den Stickstoffumsatz im Boden.
4. Vertiefte Analyse des Rechtsrahmens von AFS in Deutschland und deren Fördermöglichkeiten

Ziel ist es die wissenschaftlichen Ergebnisse in begutachteten Fachzeitschriften zu veröffentlichen sowie in Form von Fachbeiträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen zu präsentieren.

2. Wissensaustausch

Da ein elementares Anliegen des Projektes INTEGRA im Wissensaustausch mit der Praxis besteht, werden neben zwei Workshops und Expertengesprächen auch eine Abschlussveranstaltung durchgeführt, die gezielt Praktiker über die Ergebnisse des Projektes informieren und die daraus abgeleiteten Handlungsempfehlungen kommunizieren soll. Zu dieser Gelegenheit wird eine speziell für Landbewirtschafter konzipierte Praxisanleitung mit den wichtigsten Erkenntnissen des Projektes INTEGRA veröffentlicht.

3. Planungstool:

Die im Rahmen des Projektes erhobenen Daten und daraus abgeleiteten Modelle dienen nach ihrer Validierung als Grundlage des Planungstools. Dieses soll, von einer Fachfirma programmiert werden und als umfassendes, frei verfügbares Online-Planungstool für Praktiker, Planer, Entscheidungsträger und politische Akteure verfügbar sein, mit dessen Hilfe die ökologischen Wirkungen verschiedener Szenarien von Hecken und Feldgehölzen in Agrarlandschaften und deren Auswirkung auf die Insektengemeinschaft prognostiziert und dargestellt werden können. Durch die Nutzung dieser Tools soll eine wissensbasierte Planung ermöglicht werden.

4. Rechtliche Handlungsmöglichkeiten und Empfehlungen

Im Rahmen des Projekts wurde eine vertiefte Analyse des für Agroforstsysteme (AFS) in Deutschland geltenden Rechtsrahmens durchgeführt, die sowohl das Ordnungs- als auch das Förderrecht auf EU-, Bundes- und Landesebene umfasste. Ziel war es, aufzuzeigen, welche Möglichkeiten der gegenwärtige Rechtsrahmen für die Anlage von Agroforstsystemen bietet. Dazu wurden die rechtlichen Vorgaben des Ordnungs- und Förderrechts auf Bundes- und Landesebene in ein Planungstool integriert. Gleichzeitig wurden zentrale rechtliche Hürden identifiziert, die es zu überwinden gilt. Im Anschluss daran wurden konkrete Vorschläge erarbeitet, um diese Hürden zu überwinden und den Rechtsrahmen, der für Agroforstsysteme im Ordnungs- und Förderrecht gilt, weiterzuentwickeln.

1.3. Planung und Ablauf des Projekts

Das Projekt INTEGRA war in insgesamt elf Arbeitspakete (AP) gegliedert. Während die AP 1-AP 8 die inhaltliche Grundlage für das Planungstool (AP 9) bildeten, war AP 10 dem Wissensaustausch und dem Wissenstransfer gewidmet. AP 11 umfasste alle Tätigkeiten, die der Projektkoordination zugeordnet werden können (siehe Abb. 1: Übersicht über die elf im Projekt INTEGRA integrierten Arbeitspakete und deren Zusammenspiel Abb. 1).

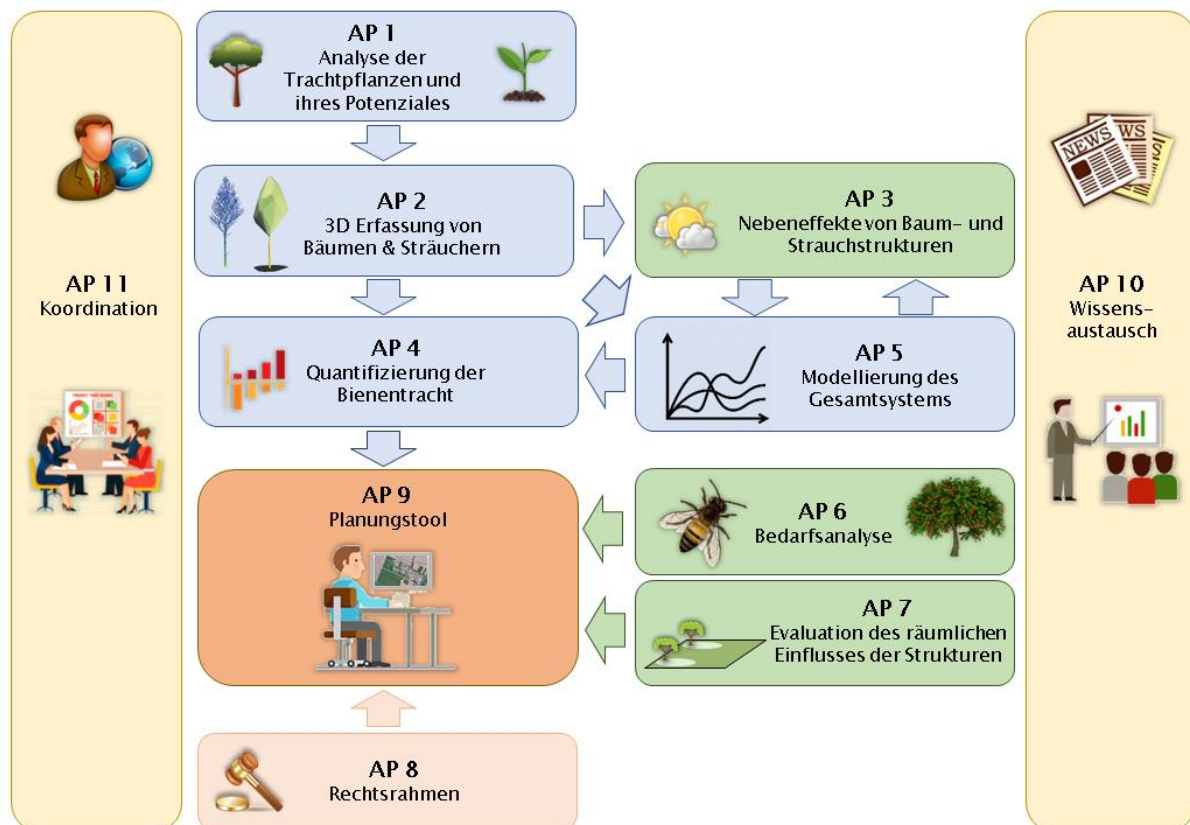


Abb. 1: Übersicht über die elf im Projekt INTEGRA integrierten Arbeitspakete und deren Zusammenspiel.

Die Pfeile in **Abb. 1: Übersicht über die elf im Projekt INTEGRA integrierten Arbeitspakete und deren Zusammenspiel** Abb. 1 zeigen wie die verschiedenen Arbeitspakete aufeinander aufbauen und aus welchen Arbeitspaketen Erkenntnisse an welcher Stelle einfließen.

2. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Bestäuberinsekten spielen eine unersetzliche Rolle in der Natur und leisten so einen wichtigen Beitrag zur biologischen Vielfalt und zum Funktionieren von Ökosystemen (IPBES 2016, Potts et al. 2016, Klein et al. 2018.) Auch in landwirtschaftlichen Ökosystemen und im Garten- und privaten Gemüseanbau sind viele Kulturen auf die Bestäubung angewiesen (Klein et al. 2007). Dabei spielt die Diversität der Bestäuberlebensgemeinschaft eine große Rolle (Garibaldi et al. 2013, Dainese et al. 2019).

Dies ist darauf zurückzuführen, dass unterschiedliche bestäubende Gruppen wie Honigbienen, Wildbienen und Schwebfliegen Pflanzen unterschiedlich hinsichtlich räumlicher, zeitlicher und wetterbedingter Nischen nutzen (Brittain et al. 2013a&b, Venjakob et al. 2016). Dadurch tragen Bestäuberinsekten wie die Honigbiene, Hummeln, verschiedenste Wildbienenarten aber auch Schwebfliegen und Schmetterlinge substantiell zur menschlichen Nahrungsgrundlage bei (Potts et al. 2016). Die weltweit durch den Rückgang von Bestäuberinsekten verursachten Einbußen in der Nahrungsmittelproduktion werden durch die UN auf 235 bis 577 Milliarden Dollar pro Jahr geschätzt (IPBS 2019).

Aktuelle wissenschaftliche Untersuchungen weisen einen besorgniserregenden Rückgang der Bestäuber nach, der sich in einer drastischen Abnahme der Insektenzahlen und -arten in Deutschland niederschlägt und auch insbesondere durch die prekäre Situation der zuvor genannten Artengruppen offenbar wird (Goulson et al. 2008, Hallmann et al. 2017, Seibold et al. 2019). Als Gründe für diesen alarmierenden Schwund an Bestäuberinsekten werden unter anderem Lebensraumverlust, Pestizide und die fehlende Anbaudiversität durch mangelnde Diversifizierung in unserer Agrarlandschaft angeführt (Potts et al 2010, IP-BES2016, Woodcock et al 2016). Der Insektenrückgang scheint besonders durch den Rückgang der Zahl und der Artenvielfalt von Bäumen, Büschen und Kräutern bedingt zu sein (Hallman et al 2017; Seibold et al. 2019).

In immer mehr Ländern werden Bestäuber aktiv verbracht und Bestäubungsservices müssen von der Landwirtschaft teuer eingekauft werden. Auch in Deutschland werden aus Mangel an natürlichen Bestäubern bereits Hummeln und Mauerbienen gezielt gezüchtet und ausgesetzt, um die Erträge aufrechterhalten zu können. Dies wird aus Naturschutzsicht kritisch gesehen, weil es bei einem unnatürlichen oder plötzlichen Vorkommen einer Art wie z.B. der Honigbiene in einem Ökosystem zur Konkurrenz kommt und Wildbienenarten dadurch auf nicht so gut

geeignete Ressourcen ausweichen müssen und sich schwer reproduzieren können (Hudewenz et al. 2013, Hudewenz et al. 2015, Valido et al. 2019).

Aus diesem Grund wollen wir in diesem Projekt bewusst nicht auf das unnatürliche Ausbringen von Bienen in landwirtschaftlichen Kulturen setzen, sondern Managementmaßnahmen über ein geeignetes Trachtangebot entwickeln, um eine Umkehr dieses fatalen Trends des Bestäuberrückgangs anzuschieben. Dies macht substantielle Schritte notwendig, um die Bestäuber zu stützen und unsere Agrarsysteme so anzupassen, dass Landwirtschaft nachhaltig auf die Bestäubung durch Wildbestäuber und eine angemessene Anzahl von Honigbienen, die nicht zur Konkurrenz führt, bauen kann und so als nachhaltiges Agrarökosystem einen positiven Beitrag zur Biodiversität leistet.

Genau an diesem Punkt können Agroforstsysteme (AFS), also Kombinationen von Bäumen, oder Sträuchern in Form von Hecken und einem Heckensaum mit krautigen Pflanzen mit Feldfrüchten und/oder Tieren, einen wertvollen Beitrag leisten. Durch die geeignete räumliche Mischung von Bäumen und Feldfrüchten lassen sich positive Effekte auf die strukturelle Biodiversität und Artenvielfalt erreichen, die den Bestäubern unmittelbar zugutekommt. Werden Agrarräume mit AFS entsprechend optimiert, lassen sich resiliente Agrarsysteme schaffen, welche ein Mehr an Biodiversität ohne signifikante Einbußen in der Produktivität erreichen.

Die Vorzüge von AFS sind umfangreich dokumentiert. Neben positiven Effekten im Bodenschutz, der Wasserhaltekapazität und in der Kohlenstoffspeicherung werden in AFS auch Habitate für Nützlinge wie schädlingsvertilgende Insektenarten, Kleinsäuger und Vögel geschaffen, durch die eine natürliche biologische Schädlingsbekämpfung auf dem Schlag möglich wird (Bianchi et al. 2006). So lassen sich Pestizide durch eine ökologische Intensivierung reduzieren (Boetzel et al. 2019). In AFS lassen sich auch zusätzliche Einnahmequellen, zum Beispiel durch Wertholz- oder Honigproduktion erschließen (Morhart et al. 2012, Nahm et al. 2014), durch welche Produktivitätseinbußen durch Bäume auf dem Schlag kompensiert oder sogar überkompensiert werden können. Durch die Diversifizierung der Einkunftsquellen wird zudem eine höhere Marktunabhängigkeit des Landwirts erreicht. Ähnliche auf Diversifizierung basierende Produktportfolioansätze sowie ihre Wirkung auf Ökosystemdienstleistungen wurden bereits erfolgreich dokumentiert (Paul et al. 2014, Griess et al. 2016, Knoke et al. 2016).

Entscheidend für den ökonomischen und ökologischen Erfolg von Agroforstsystemen ist die optimale Zusammensetzung und bestmögliche räumliche Anordnung der einzelnen Baum-, Busch- und Blühpflanzenelemente im Kontext der Agrarlandschaft, so dass negative Auswirkungen vermieden und positive Effekte maximiert werden. Da für AFS aber bisher nur wenige Daten vorliegen und die Auswirkungen bisher nur spärlich untersucht sind soll mit Hilfe von Modellierungen die Interaktion zwischen Gehölzen und Ackerkulturen berechnet werden. Die wenigen Agrarökosystemmodelle, die bisher entwickelt wurden um Konkurrenzeffekte in AFS zu simulieren, vereinfachen die Wechselwirkungen zwischen Bäumen und Ackerfrüchten häufig sehr stark oder sind zu komplex und erfordern eine Vielzahl aufwändig zu erhebender Modellangaben (Werf et al. 2007, Luedeling et al. 2016, Dupraz et al. 2019). Beides steht einer

verbreiteten Anwendung dieser Simulationsmodelle bisher im Wege (Laub et al., 2025). Ein praktikabler Kompromiss zwischen Modellvereinfachungen und Detailliertheit in den Prozessbeschreibungen wurde im Modell XN5-AF realisiert (Heinlein et al., 2020). Ein Prototyp dieses Agroforstmodells wurde am Helmholtz-Zentrum München entwickelt und als Dynamic Link Library in das Agrar- und Forstökosystemsimulationsmodell Expert-N implementiert, aber noch nicht umfänglich für verschiedene Standorte parametrisiert und getestet. Nach Auflösung der Arbeitsgruppe „Modellierung von Boden-Pflanze Systemen“ im Jahr 2020 wurde die Entwicklung eines Agroforst-Simulationsmodells am Helmholtz-Zentrum München eingestellt.

Die Umsetzung von AFS ist in Deutschland jedoch auch aus anderer Perspektive noch hürdenreich. Zahlreiche rechtliche Hürden existieren auf europäischer, bundes- und landesrechtlicher Ebene. Böhm et al. (2017a) erarbeiteten eine Übersicht über die Rolle von Agroforstsystemen im europäischen und deutschen Agrar- sowie Agrarförderrecht, identifizierten verschiedene Herausforderungen (Böhm et al. 2017b) und formulierten Lösungsansätze (Böhm et al. 2017a). Eine Schwierigkeit der Einbindung von Agroforstsystemen in die Regulierung ist die große Vielfalt von Agroforstsystemen und die damit zusammenhängende bisher fehlende Definition. Böhm et al. (2017b) entwickelten vor diesem Hintergrund einen Vorschlag für eine kontrollfähige Definition von Agroforstschlägen. Die Forschungsergebnisse von Böhm et al. sind Grundlage der hier angestrebten fachjuristischen Analyse, die bisher fehlt.

Die rechtsgutachterliche Prüfung vertieft und erweitert die bisherigen Forschungsergebnisse und berücksichtigt die Änderungen des Rechtsrahmens seit der Arbeit von Böhm et al. (u.a. GAP-Reform, laufender Prozess zur Förderung der Agroforstwirtschaft, siehe BT-Drucksache 19/24389). Sie nimmt sowohl Ordnungs- als auch Förderrecht sowie Vorschriften der Cross Compliance im Mehrebenensystem, insbesondere auch auf Länderebene in den Blick, identifiziert Hürden und entwickelt konkrete Lösungsvorschläge. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der rechtlichen Prüfung erstmals in eine Planungstool integriert.

3. Material und Methoden

Das komplexe Forschungsvorhaben setzte auf einen interdisziplinären Ansatz, bei dem jeder Kooperationspartner seine spezielle fachliche Expertise einbrachte. Durch die Zusammenarbeit von Experten aus den Bereichen des Baumwachstums, der Landwirtschaft, der Ökologie, der Rechtswissenschaften und der Modellierung wurden alle in diesem Forschungsbereich relevanten Schwerpunkte abgedeckt.

Zuerst wurden Arten identifiziert die potentiell von Wildbienen als Nahrungsquelle genutzt werden können. Aus diesen wurden die wichtigsten Arten ausgewählt und verschiedene Aspekte anhand felderprobter Methoden untersucht (AP 1).

Für die in AP 1 ermittelten wichtigsten Arten wurde in AP 2 die räumliche Struktur erfasst und modelliert, die Berechnung von Biomasse und Kohlenstoffspeicherung in Bäumen durchgeführt und der Schatten in Abhängigkeit der räumlichen Struktur berechnet. Die 3D-Erfassung und -Analyse der oberirdischen Strukturen von Bäumen und Sträucher auf landwirtschaftlich genutzten Flächen wurde mit Hilfe eines terrestrischen Laserscanners (TLS) umgesetzt. Die so gesammelten 3D-Daten wurden in der Folge mit entsprechender Software (RISCAN PRO) bearbeitet und die gescannten Strukturen über Quantitative Structure Models (QSM) zur weiteren Verarbeitung rekonstruiert. Diese Daten dienen anschließend als Grundlage für weitere Auswertungen. Mit Hilfe der über die QSMs ermittelten Volumeninformation aus AP 2 in Zusammenspiel mit der gewonnenen Dichteproben des Holzes von verschiedenen Baum- und Straucharten, konnte die Biomasse und die Kohlenstoffspeicherung dieser Gehölzstrukturen quantifiziert und deren größen- und massebezogenen Zuwachs im Laufe der Jahre ermittelt werden (AP 3).

Parallel fanden eine umfangreiche Erfassung und Beobachtung der Entwicklung und Anzahl von Blüten statt. Diese Daten konnten schließlich genutzt werden, um das Trachtangebot in Abhängigkeit der Strukturgröße zu ermitteln (AP 4).

Untersuchung von Hecken als Nisthabitat für Wildbienen und Wespen

Für die Untersuchung von Hecken als Nisthabitat für Wildbienen und Wespen wurde ein strukturiertes Vorgehen gewählt. Zunächst wurden die bodennistenden Wildbienen untersucht, indem Emergenzfallen eingesetzt wurden, um zu ermitteln, wie viele Wildbienen Hecken als Nisthabitat nutzen und ob diese Nutzung im Vergleich zu benachbarten Feldern höher ist. Im Falle der stängelnistenden Wildbienen wurde die Menge an toten Zweigen in den Hecken gemessen, und die darin nistenden Insekten wurden detailliert untersucht. Im Frühjahr wurden Hymenopteren, die sich in der Winterruhe in Zweigen befanden, gesammelt und nach ihrem Schlüpfen identifiziert. Eine Faktorenanalyse wurde durchgeführt, um den Einfluss verschiedener Faktoren wie der Anzahl der Nistzweige, der Pflanzenvielfalt und der Ausrichtung der Hecken auf das Brutverhalten der Insekten zu untersuchen.

Analyse von Heckenpflanzen als Nist- und Nahrungsressourcen für Wildbienen in Agrarlandschaften

Bei der Untersuchung von Heckenpflanzen als Nist- und Nahrungsressourcen für Wildbienen in Agrarlandschaften wurden florale Ressourcen von 24 verschiedenen Gehölzpflanzen analysiert. Die Anzahl der Blüten pro Gehölzart wurde ermittelt, und Nektarmengen wurden mit einem Refraktometer gemessen. Zudem wurde Pollen, den die Bienen trugen, analysiert, um zu verstehen, wie verschiedene Pflanzenarten von den Bienen genutzt werden und wie sich das Sammelverhalten der Bienenarten unterscheidet. Ein Bienenfreundlichkeitsindex wurde entwickelt, um die potenzielle Unterstützung von Bienen durch verschiedene Landnutzungstypen zu bewerten.

Bewertung der Wertigkeit verschiedener Feldgehölzarten für Wildbienen in der Agrarlandschaft

Um die Bedeutung verschiedener Feldgehölzarten für Wildbienen in der Agrarlandschaft festzustellen, wurden mehrere Ansätze gewählt. Dazu zählt ein Wildbienen-Monitoring, bei dem Wildbienen mit einem Streifkescher auf 24 Feldgehölzarten erfasst wurden, um festzustellen, welche Gehölzart für welche Bienenart bevorzugt wird. Weiterhin wurden Nahrungsangebot und Landschaftskontext untersucht, indem der Pollen- und Nektargehalt sowie die Blütenanzahl erfasst wurden. Der Einfluss des umgebenden Landschaftskontexts, etwa der Anteil an Offenlandhabitat und Wald, auf die Wildbienen-Diversität wurde mithilfe von GIS analysiert.

Einsatz von LiDAR zur dreidimensionalen Baumvermessung

Zur strukturellen Erfassung von Einzelbäumen in Agroforstsystemen (AFS) kam in diesem Projekt eine Kombination aus terrestrischem Laserscanning (TLS) und Quantitativen Strukturmodellen (QSMs) zum Einsatz. Diese Methodenkombination ermöglicht eine detaillierte, zerstörungsfreie und objektive Erhebung zentraler Bauparameter wie Stammvolumen, Biomasse, Kronenstruktur und Gesamthöhe. TLS basiert auf der LiDAR-Technologie (Light Detection and Ranging), bei der Laserstrahlen ausgesendet werden und die Zeit bis zur Rückkehr der reflektierten Signale (Time-of-Flight) gemessen wird. Aus der Laufzeit und dem Winkel der Strahlablenkung werden präzise dreidimensionale Punktkoordinaten berechnet.

Im vorliegenden Projekt wurde ein LiDAR-Gerät vom Typ RIEGL VZ-400i eingesetzt. Dieses System erlaubt eine hochauflösende Erfassung der Baumstruktur im Millimeterbereich und ist aufgrund seiner Messgenauigkeit und Reichweite gut geeignet für Einzelbaumstudien in freistehenden Baumstrukturen wie sie typischerweise in AFS vorkommen. Zur Vermeidung von Abschattungseffekten wurde ein Multi-Scan-Verfahren angewendet, bei dem aus mehreren Blickwinkeln gemessen wurde. Durch diese Methode wird die räumliche Abdeckung verbessert und die Datenqualität gesteigert, insbesondere im Kronenbereich.

Verarbeitung der TLS-Daten

Die Verarbeitung der Rohdaten erfolgte in mehreren Schritten. Zunächst wurden die einzelnen Scans mit der Software RiSCAN PRO (RIEGL GmbH) co-registriert, also geometrisch zueinander ausgerichtet. Anschließend wurden die Punktwolken gefiltert, um unerwünschtes Rauschen zu entfernen. Dabei kamen verschiedene Kriterien zur Anwendung, darunter Entfernung, Intensität des reflektierten Signals sowie lokale Punktdichten. Um die Rechenzeiten für die anschließende Analyse und Modellierung zu verringern, wurden die Punktwolken subsampled, d. h. reduziert, ohne dabei die strukturelle Information zu verlieren. Die Segmentierung der Einzelbäume aus der Gesamtpunktwolke erfolgte manuell mithilfe der Open-Source-Software CloudCompare.

Rekonstruktion und Analyse der Baumstruktur mit QSMs

Auf Grundlage der bereinigten und segmentierten Punktwolken wurden Quantitative Strukturmodelle (QSMs) erstellt. QSMs beschreiben die Geometrie von Bäumen mithilfe einer Vielzahl von geometrischer Primitive, typischerweise Zylinder, die an die Punktwolke angepasst werden. Diese Zylinder bilden Äste und Stamm dreidimensional nach und ermöglichen die Berechnung struktureller Parameter wie Länge, Durchmesser, Volumen und Verzweigungstopologie.

Zur Modellierung wurde die Software TreeQSM (Version 2.4.x) verwendet, ein frei zugängliches MATLAB-basiertes Tool. Die Erstellung der QSMs erfolgt dabei in mehreren Schritten: Die Punktwolke wird zunächst in kleine Oberflächenbereiche zerlegt, welche durch ein Region-Growing-Verfahren zu kontinuierlichen Segmenten zusammengeführt werden. Auf diese Segmente werden anschließend Zylinderparameter angepasst. Die Modellierung ist stochastisch, d. h. bei identischer Eingabe können unterschiedliche Modellversionen entstehen. Um robuste und belastbare Schätzungen der Bauparameter zu erhalten, wurden daher mehrere QSMs pro Baum berechnet.

Im Einzelnen wurde für jeden Einzelbaum eine Hyperparameter-Optimierung mittels Grid-Search durchgeführt. Für jeden getesteten Parametersatz wurden zunächst fünf QSMs pro Baum zur Bewertung der Modellgüte berechnet. Nach Auswahl des optimalen Parametersatzes erfolgte je nach der folgenden Analyse die finale Modellierung mit 25 bis 50 QSMs pro Baum. Die resultierenden Parameter (z. B. Volumen, Höhe, Kronenmaße) wurden anschließend über die Modelle hinweg gemittelt, um den Einfluss einzelner Ausreißer zu minimieren und die statistische Stabilität der Schätzwerte zu erhöhen.

Die QSM-Ergebnisse wurden in der Programmiersprache R weiterverarbeitet und analysiert. Hier erfolgten z. B. die Aggregation auf Baumebene, die Berechnung abgeleiteter Größen wie Biomasse (basierend auf Dichtewerten) und die Erstellung von allometrischen Modellen. Auch statistische Analysen und grafische Auswertungen wurden in R umgesetzt.

Technische Bewertung und methodischer Kontext von TLS im Zusammenspiel mit QSMs

TLS in Verbindung mit QSMs gilt derzeit als eine der genauesten verfügbaren Methoden zur strukturellen Erfassung von Einzelbäumen. In früheren Studien konnte gezeigt werden, dass QSM-basierte Schätzungen von Stammvolumen und Biomasse häufig gut mit destruktiven Messungen übereinstimmen. Dennoch ist zu beachten, dass die Qualität der Modelle maßgeblich von der Qualität der zugrundeliegenden Punktwolke abhängt. Ungünstige Bedingungen wie große Scanentfernungen, Windbewegung oder dichte Vegetation können zu Fehlern in der Rekonstruktion führen, insbesondere bei feinen Verzweigungen.

Um diesen Aspekt gezielt zu untersuchen, wurde im Rahmen der Arbeit eine eigene Genauigkeitsstudie durchgeführt, die den Einfluss der Scan-Distanz auf die Modellqualität analysierte. Dabei zeigte sich, dass mit zunehmender Entfernung zwischen Scanner und Objekt insbesondere die Rekonstruktion dünner Äste an Genauigkeit verliert. Die Ergebnisse dieser Vorstudie flossen in die Methodenauswahl der weiteren Untersuchungen ein. So wurden z. B. bei der

Quantifizierung von Blüten nur Äste oberhalb eines bestimmten Durchmessers berücksichtigt, um die Auswirkungen möglicher Verzerrungen gering zu halten.

Im Vergleich zu bisherigen Studien, die sich vor allem auf Forstbestände konzentrieren, zeigt dieses Projekt, dass der Einsatz von TLS/QSM auch in Agroforstsystemen methodisch gut umsetzbar ist. Die meist geringere Baumdichte, die bessere Zugänglichkeit und die kontrollierte Wuchsform der Bäume in AFS bieten dabei günstige Rahmenbedingungen für hochpräzise 3D-Erhebungen. Zwar wurde TLS bereits in verschiedenen ökologischen Studien im Forstkontext angewendet, doch die Anwendung zur strukturellen Erfassung von Einzelbäumen zur Schätzung ökologischer Funktionen – wie Biomasse oder Blütenangebot – in AFS stellt in dieser Kombination eine methodische Erweiterung dar.

Modellierung von Agroforstsystemen

Für die Modellierungsarbeiten im AP 5 wurde das Simulationsmodell Expert-N und XN5-AF verwendet. Expert-N (seit Version 5 auch XN5) ist ein umfassendes Softwarepaket für die Simulation von Pflanzenwachstum und Stoffflüssen in Agrarökosystemen in Abhängigkeit von Wetter/Klima, Bodeneigenschaften und Bewirtschaftung (Priesack, 2006; Rettie et al., 2022). Das Simulationsprogramm ist als Bibliothek verbindbarer Teilmodelle konzipiert, was eine individuelle Anpassung des Modells an spezifische Fragestellungen bzw. Modellanwendungen und die jeweilige Datensituation ermöglicht. Expert-N enthält zahlreiche bestehende Modelle und Prozessbeschreibungen aus der Literatur sowie eigene Modellentwicklungen (<https://expert-n.uni-hohenheim.de/>). So sind beispielsweise verschiedene Pflanzenwachstumsmodelle in Expert-N implementiert, ebenso wie mehrere Modelle und alternative Prozessbeschreibungen für die Bodenwasserdynamik, den Wärmestrom im Boden, den Umsatz der organischen Substanz, den Stofftransport oder die Evapotranspiration. Darüber hinaus gibt es Module für Grasland, Waldwachstum und neuerdings auch für Agroforstsysteme. Die erforderlichen Eingaben umfassen Wetter bzw. Klimadaten (Tageswerte oder höher aufgelöst), Boden- und Standortdaten (Textur, Corg, Exposition, Grundwasserabstand) und Management (Ackerfrucht, Aussaat, Düngung, Bodenbearbeitung, Bewässerung). Expert-N ist zurzeit in der Version 5.2 (XN5.2) für Windows und Linux verfügbar.

Das Agroforstmodell XN5-AF wurde als neue Bibliothek in Expert-N implementiert. Es besteht im Wesentlichen aus einer Kopplung der in Expert-N verfügbaren Wachstumsmodelle für Ackerkulturen (SPASS, GECROS, CERES) mit dem für kurzumtriebige Baumstreifen angepassten Forstwachstumsmodell TREEMIX. Die Interaktion zwischen Gehölzen und Ackerfläche wird im Modell durch Beschattung (Konkurrenz um Licht), Windabschwächung, unterirdische Konkurrenz um Wasser und Nährstoffe sowie über den Eintrag von organischer Substanz von der Baumreihe in den Acker (Streufall, Wurzelturnover) simuliert. Mit Hilfe eines räumlichen Gitters werden hierbei in hoher zeitlicher Auflösung (z.B. halbstündlich) die Beschattung und Austauschterme zwischen der Baumreihe und der Ackerfläche in Abhängigkeit ihrer Distanz voneinander berechnet, wobei der Tagesgang des Schattenwurfs explizit simuliert wird (Heinlein et al. 2020). Zusätzliche Modelleingaben, die das Agroforstmodul benötigt, sind die räumliche Orientierung sowie die initiale Höhe und die Breite der Baumreihe („Hedge“ in Abb.1), die

Porosität der Baumreihe in Bezug auf Lichtdurchlässigkeit und Windabschwächung, die Reichweite des Streufalls und der Baumwurzeln in die Ackerfläche sowie die Abstände von der Baumreihe, an denen das Wachstum der Ackerfrüchte berechnet werden soll. Die Höhe der Bäume kann alternativ aus der Biomassezunahme dynamisch simuliert oder auf einen bestimmten Wert festgelegt werden. Gleiches gilt für die Lichtdurchlässigkeit der Baumreihe, die aus der dynamisch simulierten Blattfläche der Bäume abgeschätzt werden kann. Ausdünnungsszenarien der Baumreihe können vorgegeben werden. Eine schematische Darstellung der wichtigsten Komponenten des Agroforst-Moduls und der simulierten Prozesse zeigt Abb. 2.

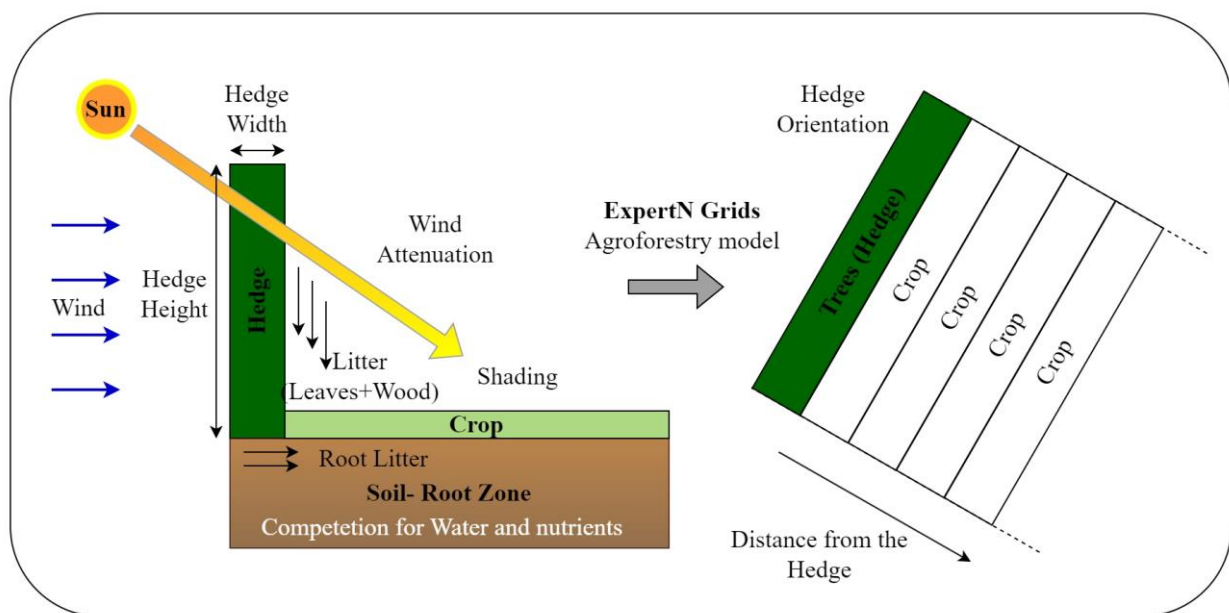


Abb. 2: Schematische Darstellung der Baum-Ackerkultur-Interaktionen und der räumlichen Konfiguration im Modell XN5-AF

Feldversuche in Agroforstsystemen

Die Datenerhebung im Projekt INTEGRA erfolgte an zwei agroforstähnlichen Standorten in Baden-Württemberg, die aufgrund ihrer unterschiedlichen Ausgestaltung und Umweltbedingungen ausgewählt wurden: Freiburg/Biengen (im Folgenden nur ‚Freiburg‘ und Hohenheim/Heidfeldhof (im Folgenden nur ‚Heidfeldhof‘), siehe Abb. 3. Feldversuche wurden in der Wachstumsperiode 2022 zunächst in Freiburg von Mai – September (Ackerfrucht: Sojabohne) und am Heidfeldhof von März 2023 – September 2024 (Ackerfrüchte: in 2023 Winterweizen, in 2024 Mais) durchgeführt. Entsprechend wurden, wie im Antrag vorgesehen, die beiden im Rahmen des Projekts angeschafften Boden-/Wetterstationen dabei zunächst bis zur Ernte 2022 auf der Fläche bei Freiburg installiert und mit Beginn der Wachstumsperiode 2023 nach Hohenheim transferiert.

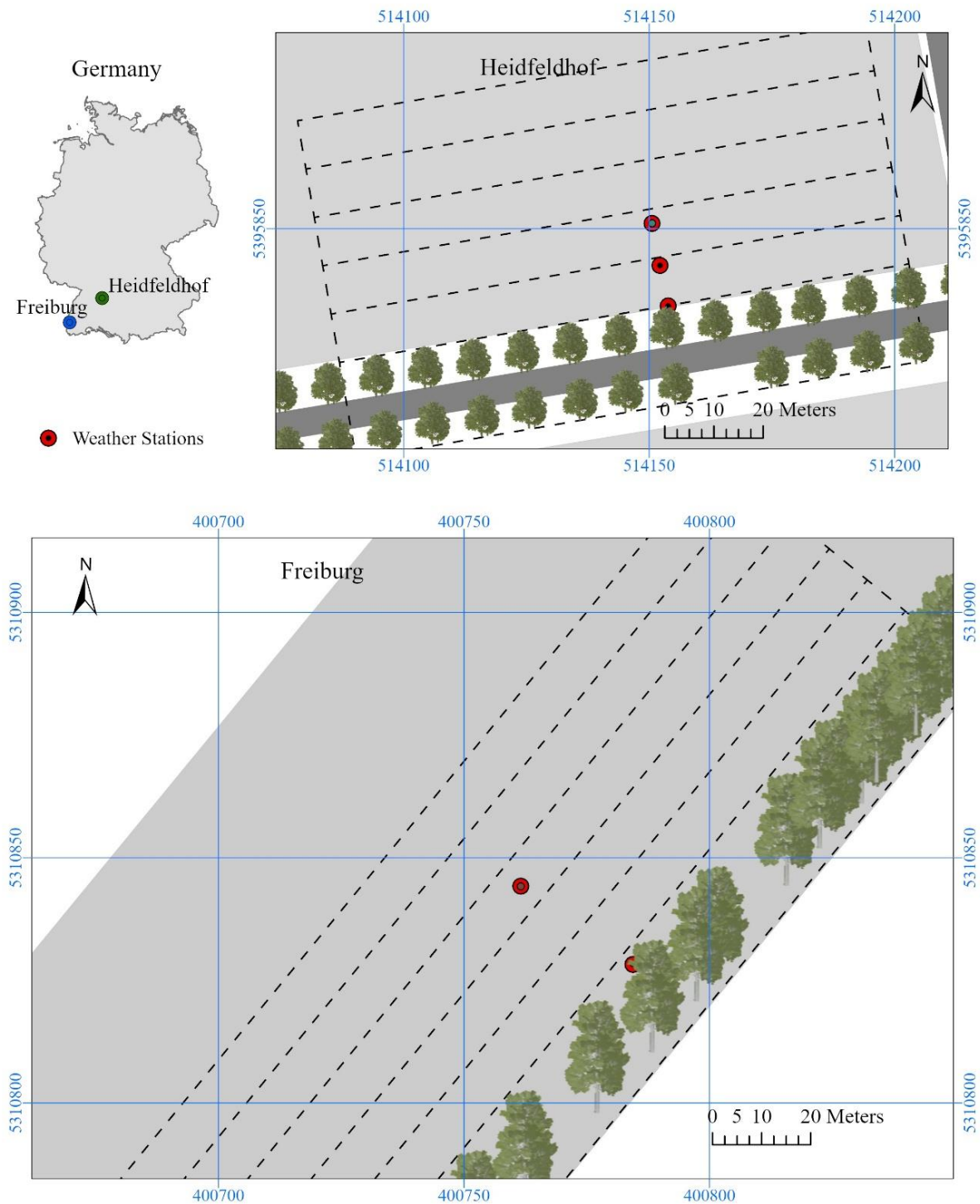


Abb. 3: Schematische Darstellung der agroforstlichen Versuchsflächen in Hohenheim (oben) und bei Freiburg (unten). Die roten Kreise markieren die Positionen der Boden-/Wetterstationen, die für das Monitoring des Mikroklimas, der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur verwendet wurden (2022: Freiburg, 2023-2024: Heidfeldhof). Maßstab 1:1000.

Messungen des Mikroklimas

Es wurden zwei mobile Boden-/Mikroklimastationen installiert, eine in der Nähe der Baumreihe und die andere im kaum beschatteten, offenen Bereich. Im Jahr 2024 wurde eine dritte Station zwischen den beiden ursprünglichen Stationen installiert, um den Gradient von der Baumreihe zum offenen Feld genauer zu erfassen. Abbildung 2 zeigt die genauen Standorte der installierten Boden-/Mikroklimastationen. Jede Station war in drei Höhen mit Windsensoren (Anemometer A100L2, Vector Instruments), Sensoren für die Lufttemperatur und die relative Luftfeuchtigkeit (TBSHTP05, TekBox Digital Solutions), drei Sensoren für die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) (SQ-100X, Apogee Instruments, Inc.) ausgestattet sowie mit sechs Bodensensoren (SMT100, TRUEBNER GmbH), die in zwei Tiefen installiert wurden: 15 cm und 50 cm, mit je drei Sensoren in jeder Tiefe. Die Daten wurden in 10-minütigen Abständen mit einem GP2-Logger (UP Umweltanalytische Produkte GmbH) aufgezeichnet, der an jede Mikroklimastation angeschlossen war.

Bei der Interpretation der aufgezeichneten Bodenfeuchtedaten am Standort Freiburg bestehen allerdings erhebliche Schwierigkeiten, da der Bewirtschafter der Fläche aufgrund der lang anhaltenden Trockenheit im Frühjahr 2022 die Fläche mehrmals mittels Regenkanone beregnet hat, um dem Saatgut das Keimen zu ermöglichen. Aufgrund der mehr horizontalen Flugrichtung des Beregnungswassers konnte dieses nur teilweise vom Regensammler erfasst werden. Auch nach dem Aufkeimen der Sojabohnen wurden wiederholt einzelne Beregnungen durchgeführt, was eine Analyse der Schwankungen der Bodenfeuchtedaten erheblich erschwert, da die genauen Beregnungsmengen nur abgeschätzt werden können (anhand der Angaben des Bewirtschafters) und zudem möglicherweise an den beiden Messstationen unterschiedlich sein könnten.

Erfassung der Pflanzenentwicklung und der Bodeneigenschaften

Die oberirdische Biomasse von Sojabohnen wurde an drei Zeitpunkten (18. Juli, 1. August und unmittelbar vor der Ernte am 30. August 2022) entlang von 3 Transekten in verschiedenen Abständen von der Baumreihe bestimmt. Ertragsmessungen für Winterweizen und Mais am Standort Heidfeldhof wurden jeweils am Tag der Ernte in verschiedenen Abständen zur Baumreihe durchgeführt (manueller Schnitt ausgewählter 1x1 m² Parzellen). Der Blattflächenindex (LAI [m² (Blatt) m⁻² (Boden)]) wurde an beiden Versuchsstandorten mit einem LI-2200 Canopy Analyzer (LI-COR Biosciences, Lincoln, NE, USA) aufgezeichnet, um die Auswirkungen der Bäume auf die Blattfläche und die Lichtabsorptionseffizienz zu bestimmen. Die LAI-Messungen wurden an beiden Standorten mehrmals während der Vegetationsperiode wiederholt.

Bodenproben wurden mit Hilfe von Stechzylindern aus 15 und 50 cm Bodentiefe entnommen, um die Lagerungsdichte und den gravimetrischen sowie volumetrischen Wassergehalt zu bestimmen. Die Bestimmung des Wassergehalts dient der Kalibrierung der automatisierten Bodenfeuchtemessung mittels SMT-Sensoren an den unterschiedlichen Versuchsstandorten. An

beiden Versuchsstandorten wurden zusätzlich aus den gleichen Tiefen Stechzylinder zur Messung der hydraulischen Funktionen (Wasserretentionskurven und Leitfähigkeitskurven) entnommen und in der Hyprop Messanlage analysiert.

Die Entwicklung des Blattflächenindex (LAI) und damit des Pflanzenwachstums auf der gesamten Ackerfläche am Versuchsstandort Freiburg wurde mit Hilfe von Fernerkundungsdaten abgeschätzt. Sentinel-2 Satellitenbilder vom Versuchsstandort Freiburg wurden für 6 wolkenlose Tage während der Wachstumsperiode 2022 von <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home> heruntergeladen. Die atmosphärische Korrektur wurde mit dem halbautomatischen Klassifikations-Plug-In der Software QGIS (v.3.12) durchgeführt. Aus den Reflektanz-Werten im Nahinfrarot- und Rot-Band wurde zunächst der Normalisierte Differenz-Vegetationsindex (NDVI) berechnet, wobei Pixel am Rand des Feldes ausgeschlossen wurden um gemischte Signale zu vermeiden. Anschließend wurden aus dem NDV die LAI-Werte mit Hilfe des Modells von Choudhury et al. (1994) berechnet. Dabei wurde das Modell mit Hilfe der entlang von drei Transekten manuell erhobenen LAI Werte kalibriert. Eine detaillierte Beschreibung der Methode findet sich in Zare et al. (2022).

Simulationsszenarien

Für die Simulationsszenarien an den beiden Untersuchungsstandorten wurde folgende Modellkonfiguration in Expert-N verwendet: Bodenwasserdynamik nach Hydrus (Simunek et al., 1998), Bodenwärmefluss nach Daisy (Hansen et al., 1991), C/N-Umsatz nach SOILN (Johnsson et al. 1987) und Wachstum der Ackerkulturen mittels SPASS (Wang and Engel, 2000, Gayler et al., 2002). Die für die Simulation des Wassertransports benötigten Parameter wurden anhand der gemessenen hydraulischen Funktionen abgeschätzt. Um die Wechselwirkungen zwischen Ackerkulturen und Baumreihen zu untersuchen, wurden drei Simulationsansätze durchgeführt: (1) die Ackerkultur wird als Offenlandanbau simuliert, d.h. ohne Beeinflussung durch Bäume, (2) die Baumreihen werden ohne Beeinflussung durch die Ackerkultur mit TreeMix simuliert und (3) das integrierte Agroforstsystem mit Beschattung, Windabschwächung und Wurzelkonkurrenz wird mit XN5-AF simuliert.

In den im Folgenden dargestellten Ergebnissen wurde in Variante (3) ein zentraler Baumstreifen mit 5 Ackerzonen in zunehmendem Abstand (1, 4, 7, 12 und 24 m) umgeben. Die ökophysiologischen Pflanzenparameter des für die Simulation der Dynamik der Bäume (Blattaustrieb, Wachstum, Streufall, Wurzelwasser- und Stickstoffaufnahme) verwendeten TreeMix-Modells wurden dabei für die jeweils dominierende Baumart angepasst (Freiburg: Eiche, und Heidfeldhof: Kirsche). Die Strukturparameter und Dimensionen der Gehölzstreifen (Baumhöhe, Ausdehnung des Kronendachs und Porosität) wurden mit Hilfe der hochauflösende 3D-Laserscans abgeleitet, die in AP2 durch die Professur für Waldwachstum und Dendroökologie (WW) durchgeführt wurden. Dabei wurden für den Standort Freiburg eine Baumhöhe von 20 m und eine Porosität von 50 % festgelegt, während am Heidfeldhof die Kirschen eine mittlere Höhe von 10

m und dieselbe Porosität (50 %) aufweisen. Die Licht- und Windabschwächung wurde dynamisch mit Hilfe des LAI berechnet, wobei Schatteneffekte bis zu einer Entfernung von 25 m und Windabschwächung ab Windgeschwindigkeiten über 1,0 m s⁻¹ simuliert wurden. Die Wurzelkonkurrenz um Wasser und Nährstoffe wurde durch eine vorgegebene, abnehmende Dichte der Baumwurzeln bei größeren Abständen zu den Bäumen modelliert. Dabei wurden die Wurzelverteilung der Bäume als konstant angenommen, während die Wurzeltiefe und die Wurzellängenverteilung der Ackerfrüchte in Abhängigkeit von Bodenfeuchte und Bodentemperatur simuliert wurden.

Als Wetterantrieb wurden Wetterdaten in stündlicher Auflösung von nahegelegenen Stationen des Deutschen Wetterdienstes verwendet. Die Bewirtschaftung der Ackerfläche wurde entsprechend der Angaben der Landwirte vorgegeben (Aussaatdatum, Saatstärke und –tiefe, Düngung, Bewässerung (Freiburg) und Bodenbearbeitung).

Rechtliche Analyse

Im Rahmen des Forschungsprojekts INTEGRA erfolgte zunächst eine rechtswissenschaftliche Analyse des Ordnungs- und Förderrechts, das für Agroforstsysteme im Mehrebenensystem gilt. Dabei wurden relevante Rechtsquellen auf EU-, Bundes- und Landesebene einbezogen und untergesetzliche Regelungen sowie Rechtsprechung, Kommentare und sonstige rechtswissenschaftliche Literatur ausgewertet. Ein weiterer methodischer Schritt bestand in der Durchführung von Interviews mit Expertinnen, darunter Landwirtinnen und Vertreterinnen von Verwaltung und Verbänden aus den Bereichen Naturschutz und Landwirtschaft. Diese Gespräche sollten tiefere Einblicke in die Praxis ermöglichen. Darüber hinaus wurden Workshops organisiert, um die Expertinnen direkt in das Projekt einzubeziehen und die Projektergebnisse zu diskutieren. Eine vertiefte rechtssoziologische Analyse fokussierte auf die rechtlichen Rahmenbedingungen und die Perspektiven verschiedener Akteure in drei ausgewählten Fallstudienregionen in Niedersachsen, Brandenburg und Baden-Württemberg. Die Multifunktionalität von Agroforstsystemen bildete dabei den Ausgangspunkt der gesamten Untersuchung.

4. Ergebnisse

Die Rolle von Hecken als Nist- und Nahrungsressource für Wildbienen in Agrarlandschaften wurde in mehreren Arbeiten mit unterschiedlichen methodischen Ansätzen untersucht. Ziel war es, das ökologische Potenzial von Hecken für den Erhalt und die Förderung von Wildbienenpopulationen besser zu verstehen. Es wurden mithilfe von Emergenzfängen bodennistende Bienen in Hecken und angrenzenden Feldern erfasst. Parallel dazu wurde durch Pollenanalysen das Nahrungsspektrum verschiedener Bienenarten untersucht. Außerdem wird gezeigt welches Potenzial Totholzzweigen als Niststruktur für stängelnistende Wildbienen haben. In

Zweigen sind darin überwinterte Insekten nach ihrem Schlupf bestimmt worden und strukturelle Merkmale der Hecken (z. B. Gehölzdiversität, Ausrichtung) wurden analysiert. Um den Einfluss der Landschaft auf Wildbienen zu bewerten, wurde ein Bee-Friendliness-Index entwickelt, der die Landnutzung im 500-Meter-Umkreis um die Hecken einbezieht. Zusätzlich wurden Blühangebot und Totholzquantität als lokale Habitatmerkmale untersucht. Eine weitere Untersuchung analysierte die Bedeutung einzelner Gehölzarten für Wildbienen durch standardisierte Streifkescher-Fänge auf Heckengehölze sowie durch die Erhebung von Blütenanzahl, Pollen- und Nektargehalt. Landschaftsstruktur und Habitatkonnektivität wurden mithilfe geographischer Informationssysteme erfasst. Insgesamt zeigen die Ergebnisse, dass Hecken wertvolle Nahrungshabitate für viele Wildbienenarten darstellen. Das Angebot geeigneter Niststrukturen ist jedoch noch unzureichend erforscht und sollte in zukünftigen Managementstrategien stärker berücksichtigt werden. Im Folgenden werden die wichtigsten Ergebnisse dargestellt.

Untersuchung der Pflanzenarten und ihres Potenzials zur Nahrungsversorgung für Bestäuber.

Zuerst wurde eine Liste von heimischen Gehölzen als Trachtpflanzen für Bestäuber erstellt. Diese umfasst alle heimischen, in der wissenschaftlichen Literatur als Heckenpflanzen beschriebenen Arten. Es wurden 60 Arten identifiziert, die potentiell von Wildbienen als Nahrungsquelle genutzt werden. Die wissenschaftliche Literatur wurde nach allen Gehölzarten der Liste durchsucht und alle darin berichteten Bienenarten zusammengefasst. Dabei wurden 50% der Arten als noch vollständig unerforscht identifiziert. Von den 24 häufigsten Gehölzarten wurden die blütenbesuchenden Bienen-gemeinschaften baumartenspezifisch erfasst. Insgesamt wurden 14.000 Bienen und 120 Arten beobachtet. Aus diesem umfangreichen Datensatz lassen sich verschiedene Aspekte ablesen (siehe Abb. 4 & Abb. 5):

- Attraktivität der Pflanzenart für Bienen
- Förderpotential der Gehölzarten für gefährdete Bienenarten
- Förderpotential der Gehölzarten von Kulturpflanzen bestäubenden Bienenarten
- Schlüsselarten, welche besonders zur Kontinuität der zeitlichen Abfolge der Blühaspekte beitragen

Im Rahmen der umfassenden Feldarbeiten wurden 24 häufige Gehölzarten in über 100 Hecken innerhalb von AFS dokumentiert. Eine Analyse der Pollenbestandteile, die an den beobachteten Wildbienen gefunden wurden, zeigte, dass Linden, Weiden, Rosengewächse, Ahorne, Hartriegel und Liguster zu den wichtigsten Gehölzen zählen. Abb. 4 zeigt die Standorte der kartierten Hecken.

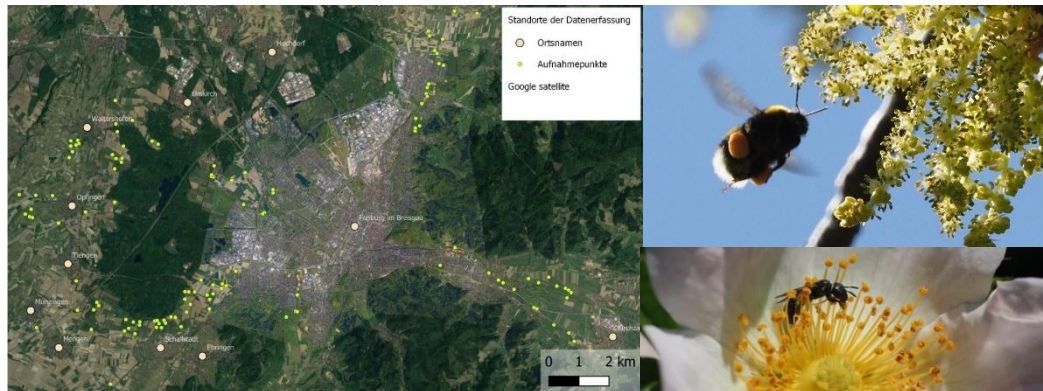


Abb. 4: Standorte an denen Blütenbesucher in Hecken aufgenommen wurden (links). Eine Dunkle Erdhummel sammelt Pollen an einer Eiche (rechts), darunter eine Keulhornbiene in einer Heckenrosenblüte (Quelle: C. Hospach).

Die Abbildungen 2, 4 und 5 veranschaulichen die bestehenden Wechselwirkungen zwischen diesen Gehölzen und den Wildbienen. Darüber hinaus wurden im Rahmen der Erfassung 14.000 Bienenindividuen und 120 Bienenarten an diesen 24 häufigen Gehölzarten dokumentiert. Die beprobten über 100 Hecken, die insgesamt aus etwa 30 bis 60 verschiedenen Gehölzarten bestehen, können als typisch für die in Deutschland vorkommenden Hecken angesehen werden (siehe Abb. 4 und Abb. 5). Bemerkenswerterweise wurden dabei 20 % der in Deutschland vorkommenden Wildbienenarten in den Hecken erfasst, wie in dargestellt.

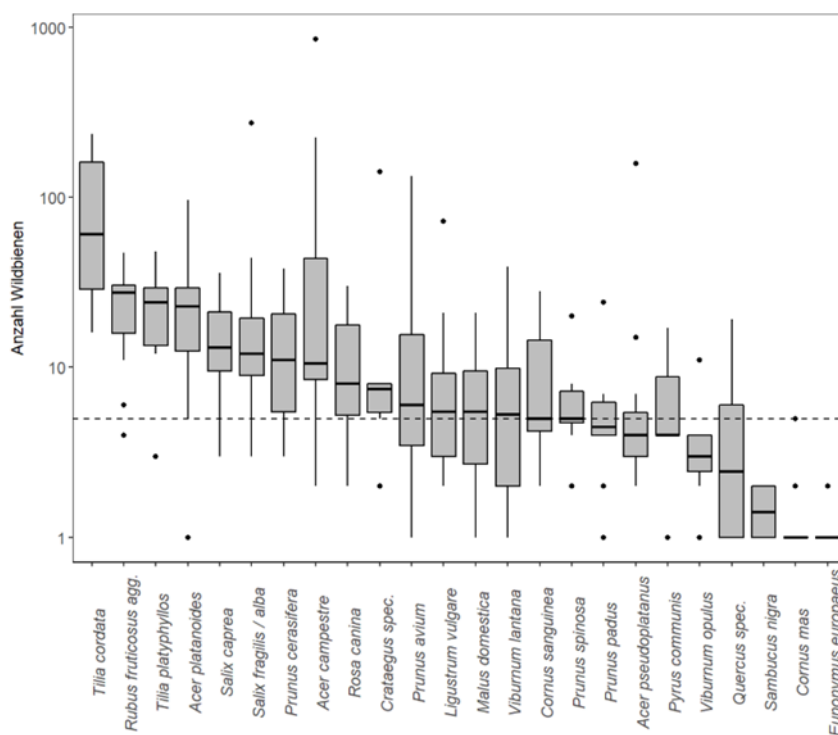


Abb. 5: Sortierung der Gehölzarten nach der Anzahl der an ihnen beobachteten Wildbienen (Quelle: C. Hospach).

Mit weitem Abstand konnte die größte Zahl an Wildbienen an *Tilia cordata* gefunden werden, gefolgt von *Rubus fruticosus*, *Tilia platyphyllos* und *Acer platanoides*.

Zu den häufigsten Wildbienenarten zählen Hummeln, Schmalbienen und Sandbienen (vgl. Tab. 1).

Tab. 1: Übersicht über die erfassten Wildbienen

	Arten	Individuen
Bodennistende Bienen	77	1556
Oberirdisch nistende Bienen	20	668
Parasitierende Bodenbrüter	13	21
Polylektic	81	2258
Oligolektic	22	73
Parasitic	13	21

Das Ziel dieser Untersuchung war es, die Wechselwirkungen zwischen Gehölzen, Bestäubern und der Agrarlandschaft zu analysieren. Im Rahmen dieser Untersuchung wurden Bienengemeinschaften spezifisch je nach Baumart erfasst.

Bei den 24 häufigsten Gehölzarten wurden die blütenbesuchenden Bienengemeinschaften dokumentiert. Insgesamt wurden 14.000 Bienen und 120 Arten beobachtet. Dieser umfangreiche Datensatz bietet die Grundlage für mehrere wichtige Erkenntnisse, die in Abb. 6 veranschaulicht werden können:

1. Die Attraktivität der einzelnen Pflanzenarten für Bienen wurde bewertet.
2. Es wurde untersucht, welches Förderpotenzial die verschiedenen Gehölzarten für gefährdete Bienenarten besitzen.
3. Ebenso wurde das Förderpotenzial der Gehölzarten für Bienenarten, die Kulturpflanzen bestäuben, analysiert.
4. Schlüsselarten wurden identifiziert, die besonders zur Kontinuität der zeitlichen Abfolge der Blühphasen beitragen. Bemerkenswerterweise sind 97 % der Bienenarten Generalisten, von denen viele eine wichtige Rolle bei der Bestäubung von Kulturpflanzen spielen.

	Artenreichtum	Wildbienenanzahl	Rote Liste Arten	Kulturpflanzenbestäuber	Rang	Blüh-Monat	Pollenbeliebtheit
<i>Tilia cordata</i>	30	1015	9	26	9	6	0,5
<i>Rosa canina</i>	38	222	6	24	7	5	0,9
<i>Acer campestre</i>	21	1171	4	19	7	4	0,8
<i>Cornus sanguinea</i>	28	91	8	22	6	5	0,6
<i>Rubus fruticosus</i>	31	277	3	21	5	5	0,9
<i>Tilia platyphyllos</i>	25	201	4	23	5	6	0,6
<i>Ligustrum vulgare</i>	25	121	5	20	5	5	1,0
<i>Crataegus monogyna</i>	22	197	5	17	5	5	1,0
<i>Salix fragilis / alba</i>	20	353	3	20	5	4	1,0
<i>Salix caprea</i>	19	104	4	20	5	3	0,9
<i>Prunus cerasifera</i>	18	73	3	22	4	3	0,9
<i>Prunus avium</i>	22	250	1	21	4	4	1,0
<i>Pyrus communis</i>	18	45	3	19	4	4	0,9
<i>Acer pseudoplatanus</i>	14	159	5	13	4	4	0,8
<i>Acer platanoides</i>	17	150	2	19	4	3	0,9
<i>Prunus spinosa</i>	16	34	3	17	3	4	0,9
<i>Prunus padus</i>	16	50	2	17	3	4	0,7
<i>Viburnum lantana</i>	12	79	3	14	3	4	0,8
<i>Malus domestica</i>	15	52	2	15	3	5	0,8
<i>Viburnum opulus</i>	16	29	2	12	3	4	0,9
<i>Quercus spec.</i>	9	17	3	11	1	5	0,8
<i>Sambucus nigra</i>	4	4	0	3	0	3	
<i>Cornus mas</i>	1	1	0	4	0	5	
<i>Euonymus europaea</i>	1	1	0	1			

Abb. 6: Sortierung der Gehölzarten in Hecken die von Wildbienen besucht werden, der Rang gibt die geschätzte Wertigkeit einer Baumart für Wildbienen an (hohe Werte sind wertiger als niedrige Werte).

Quantifizierung der Bientracht: Erfassung der von Blüten angebotenen Nektar- und Pollenmengen für Bestäuber

Die Quantifizierung der Bientracht umfasst die Erfassung der von Blüten angebotenen Nektar- und Pollenmengen, die Bestäuber nutzen können. Es wurde festgestellt, dass kein direkter Zusammenhang zwischen der Menge an Pollen und Nektar und der Anzahl der blütenbesuchenden Bienen besteht. Die Bienen reagieren nicht auf die Pollen- oder Nektargehalte der Blüten; stattdessen zeigen sie eine Vorliebe für bestimmte Gehölzarten. Der Zusammenhang zwischen Bienen und dem Blütenangebot wurde weiter aufgeschlüsselt, wobei festgestellt wurde, dass zusätzlich zur Gehölzartenspezifität die Anzahl der Bienen mit der Anzahl der Blüten zunimmt. Darüber hinaus spielt die Pflanzendiversität in Hecken eine wichtige Rolle bei der Wahl der Bienen als Nisthabitat.

Entwicklung von Modellen zur Simulation der ökologischen und agrarischen Effekte der Habitatstrukturen.

Die Auswirkung von blühenden Gehölzen auf die Bestäubung von Feldfrüchten wurde in einer Studie untersucht. Sie zeigt das blühende Heckengehölze die Anzahl an Wildbienen in angrenzenden Feldern erhöhen. Die Reichweite dieses Effektes ist ca. 25m in das Feld hinein, darüber hinaus konnten keine positiven Effekte von Blühenden Heckenpflanzen nachgewiesen werden.



Abb. 7: Aufbau der Feldversuche mit Farbschalen: Mit zunehmender Distanz zu blühenden und nicht blühenden Feldgehölzen. A Schema der methodischen Datenaufnahme, B, C & D Farbschalendesign zum Fangen von Wildbienen (Quelle: K. Melcher).

In Abb. 8 ist der Eintrag von Wildbienen aus Hecken in die angrenzenden Ackerflächen dargestellt. Wildbienen werden von blühenden Heckenpflanzen in Felder „exportiert“. Dieser Effekt geht nicht auf einen möglichen „Hecken“-effekt zurück, welcher zum Beispiel durch erhöhten Windschutz und Temperaturen erklärt werden könnte.

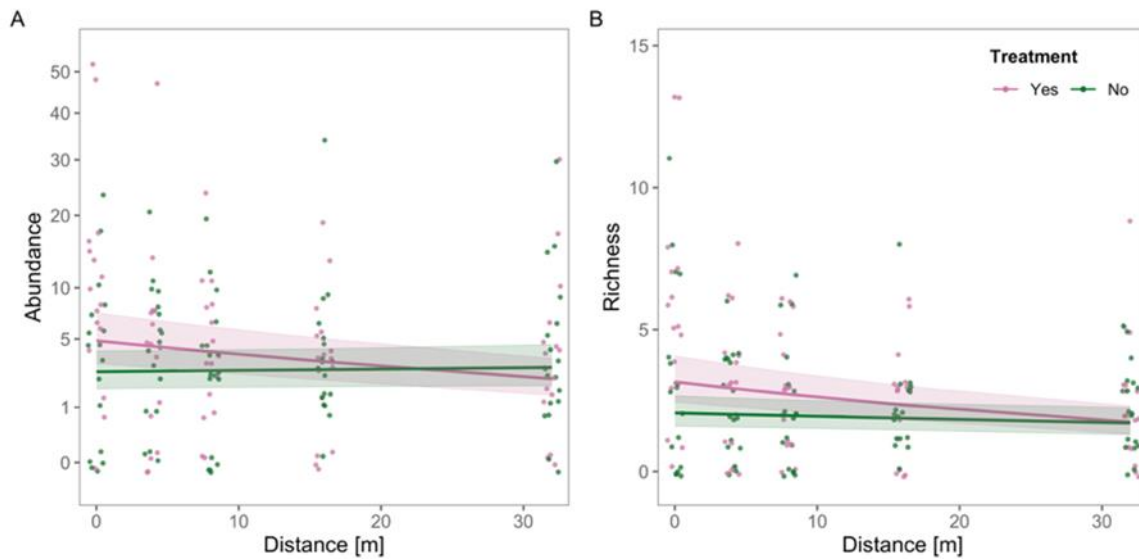


Abb. 8: Eintrag von Wildbienen aus Hecken in die angrenzenden Ackerflächen (Quelle: K. Melcher).

In Abb. 9 ist die Anzahl der Brutzellen von Wildbeinen und Wespen in den Stängeln unterschiedlicher Feldgehölze dargestellt. Besonders attraktiv sind mit Abstand die *Rubus*-Arten, gefolgt von den *Rosa*-Arten und *Sambucus nigra*.

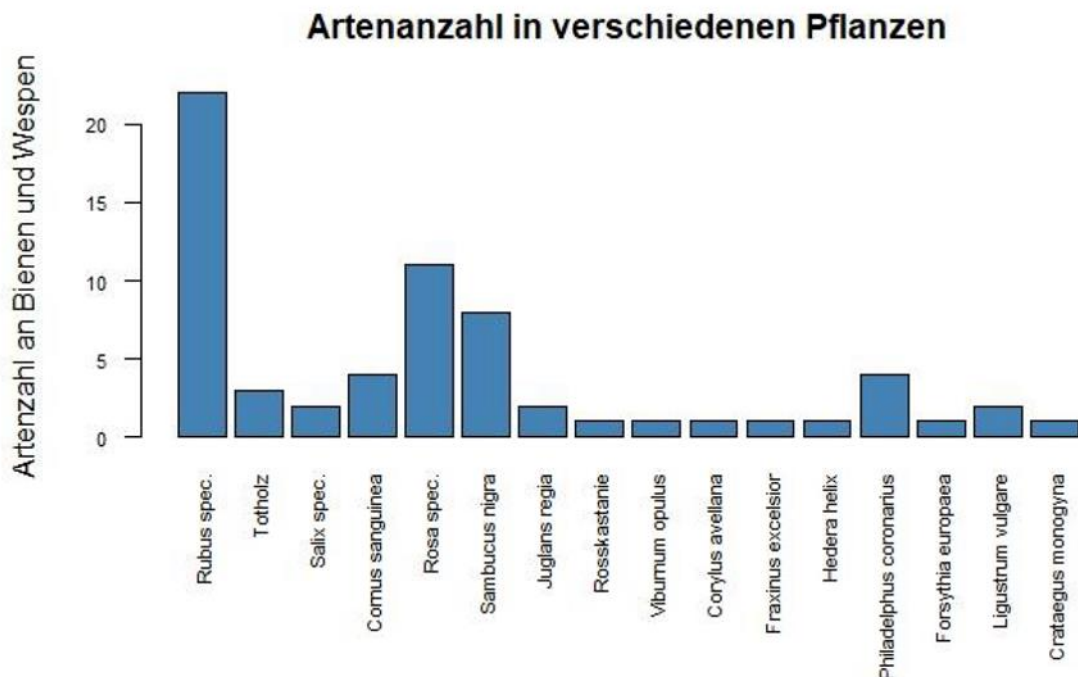


Abb. 9: Anzahl an Brutzellen von Wildbeinen und Wespen in den Stängeln von Feldgehölzen (Quelle: A. Eilers).

In Tab. 2 ist der Bienenfreundlichkeitsindex der Landschaft basierend auf Literaturwerten im Pufferbereich einer Agrarlandschaft im Umkreis einer Hecke dargestellt. Landnutzungstypen innerhalb eines Radius bekommen dabei einen Skalenwert zugeordnet der zeigt wie attraktiv eine Parzelle für Wildbienen jeweils ist. Die höchsten Werte können neben Extensivobstwiesen, Blumenwiesen und Ruderalflächen nur Hecken erreichen.

Tab. 2: Bienenfreundlichkeitsindex der Landschaft im Pufferbereich einer Agrarlandschaft

Landnutzung	Bewertung	Literaturquellen
Blühstreifen	2	Jönsson et al. (2015); Westrich (2018); Wood et al. (2015)
Raps	1	Henriksen & Langer (2013); Westrich (2018)
Intensivgrünland	0	Westrich (2018)
Spargelfeld	1	Westrich (2018)
Extensivobstwiese	3	Roquer-Beni et al. (2021); Westrich (2018)
Intensivobstbau	1	Marini et al. (2012); Westrich (2018)
Weinberg	2	Kratschmer et al. (2019); Westrich (2018)
Ackerland	0	Hass et al. (2019); Holzschuh et al. (2007); Westrich (2018)
Kleinwälder	2	Westrich (2018)
Wohnsiedlungen	2	Banaszak-Cibicka & Żmihorski (2012); Westrich (2018)
Sonstiges (mittleres Interesse)	2	Nicht Vorhanden
Blumenwiesen	3	Roquer-Beni et al. (2021); Westrich (2018)
Sonstiges (geringes Interesse)	0	Nicht Vorhanden
Beerenkulturen (z. B. Erdbeeren)	1	Nicht Vorhanden
Hecken	3	Roquer-Beni et al. (2021); Westrich (2018)
Leguminosen	1	–
Wald	2	Watson et al. (2011); Westrich (2018)
Ruderalflächen	3	Westrich (2018)
Klee	2	Henriksen & Langer (2013); Westrich (2018)
Weitere (nicht näher spezifiziert)	2	Westrich (2018)
<i>Bewertungsskala: 0 = ungeeignet, 3 = sehr gut geeignet für Wildbienen</i>		

Bedarfsanalyse: Bestimmung des saisonalen Nahrungs- und Nistressourcen-Bedarfs von Wildbienen und anderen Bestäubern.

Mit Hilfe von 135 Emergenzfallen, die auf Äckern und in Hecken (siehe Abb. 10) an drei verschiedenen Standorten aufgestellt wurden, wurde das Vorkommen bodennistender Wildbienen untersucht. Die Fallen wurden in drei Blöcken innerhalb der Hecken in einem Abstand von 3 Metern aufgestellt, wobei jeder Block 15 Fallen enthielt.



Abb. 10: Emergenzfallen auf Äckern (links, als Kontrolle) und in Hecken (rechts)

In den Böden der Äcker wurden keine Wildbienen gefunden, während unter den Hecken nur wenige überwinternde Individuen entdeckt wurden. Insgesamt wurden mit den 135 Emergenzfallen 30 Wildbienen auf einer Fläche von 150 Metern Hecke gefunden. Aus diesen Ergebnissen lässt sich ableiten, dass etwa alle 10 Meter zwei bodennistende Bienen entdeckt wurden, die in den Hecken nisten oder überwintert haben.

Darüber hinaus war die Biomasse der aus dem Boden schlüpfenden Insekten in Hecken doppelt so hoch wie in Äckern, wie es aus Abb. 11 ersichtlich ist.

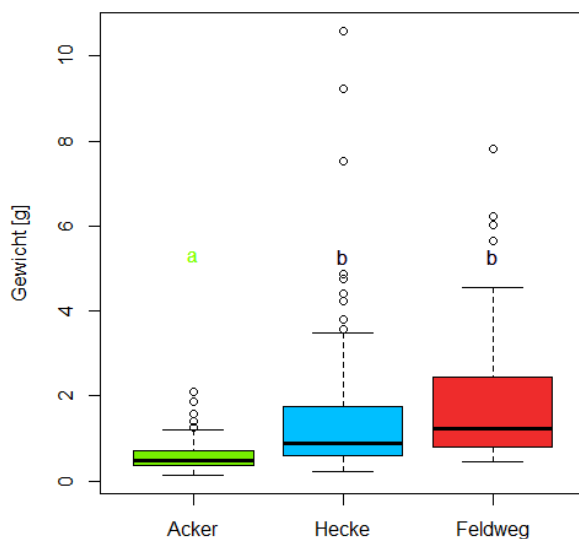


Abb. 11: Die Gesamtbiomasse von im Boden lebenden Insekten gezeigt für Äcker, Hecken und Feldwege

An den drei Standorten wurden die im Boden überwinternden Wildbienen zwischen Äckern und Heckenbereichen verglichen. Es wurde festgestellt, dass keine Bienen in den Äckern überdauern und nur sehr wenige in den Hecken. Diese Ergebnisse sollen in den Folgejahren durch weitere Experimente überprüft werden. In Hecken ist die Biomasse der aus dem Boden

schlüpfenden Insekten doppelt so hoch wie auf den Äckern (siehe Abb. 11). Zudem zeigt sich, dass Wildbienen eine signifikant höhere Vorkommenswahrscheinlichkeit haben, wenn die Biodiversität der Heckenpflanzen erhöht ist. Untersuchungen zu Gehölzstängeln als Nisthabitat ergaben jedoch sehr geringe Anzahlen von nistenden Bienen pro 50 Metern Hecke.

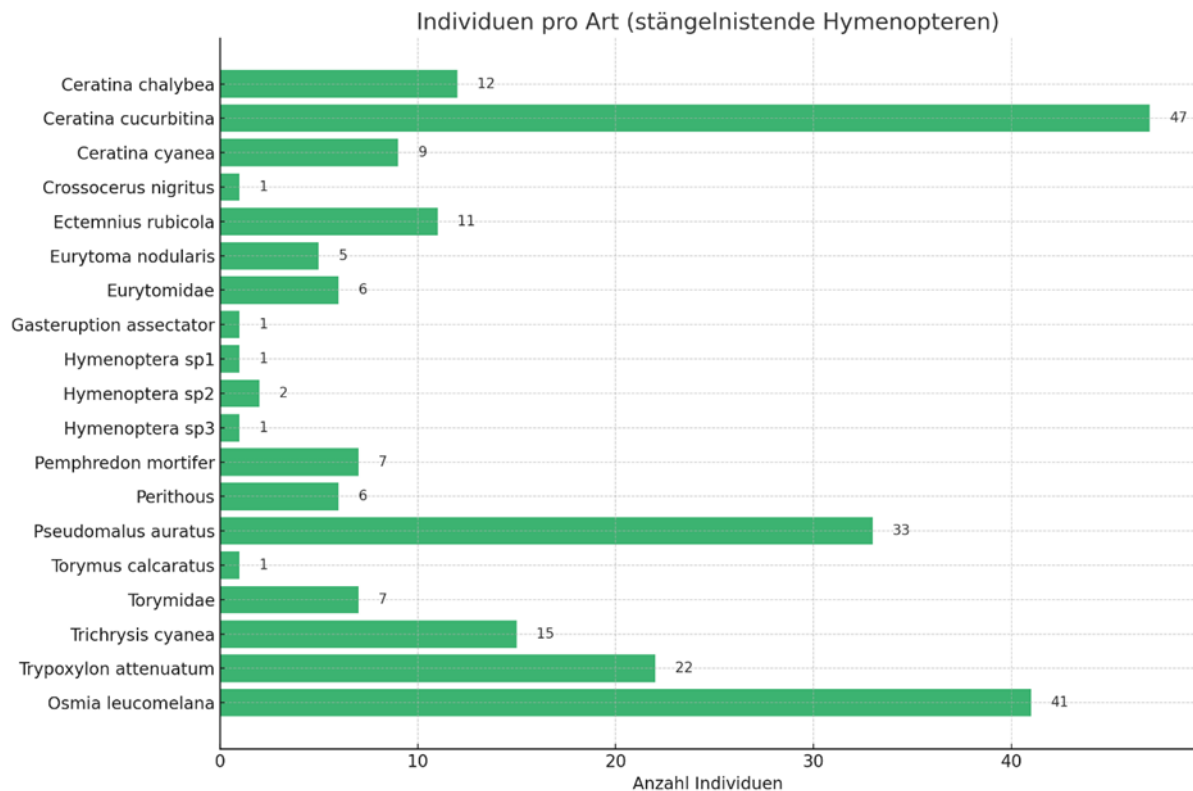


Abb. 12: Anzahl von unterschiedlichen stängelnistenden Bienenarten die Hecken als Nahrungs- und Nisthabitat aufsuchen.

Abgestorbene und trockene Stängel von Brombeere, Rose und Holunder werden als Nestmöglichkeiten von bestimmten Wildbienen aber auch Wespen angenommen (siehe Abb. 13)



Abb. 13: Bild eines aufgeschnittenen Brombeerstängels mit den Brutzellen einer Wildbiene

Ein aufgeschnittener Brombeerstängel beherbergt die Im Rahmen der Untersuchung wurden insgesamt 139 Nester in 2405 besiedlungsfähigen Zweigen gefunden. Dabei konnten 300 Individuen stängelbewohnender Hymenopteren erfasst werden, die sich auf 22 verschiedene Arten bzw. taxonomische Einheiten verteilten, einschließlich unbestimmter Gattungen oder Arten. Zu den am häufigsten nachgewiesenen Arten zählten *Ceratina cucurbitina* mit 47 Individuen, *Osmia leucomelana* mit 41 Individuen, *Pseudomalus auratus* mit 33 Individuen, *Trypoxylon attenuatum* mit 22 Individuen sowie *Trichrysis cyanea* mit 15 Individuen. Seltener vertreten waren Arten wie *Crossocerus nigritus*, *Gasteruption assectator*, *Pemphredon mortifer*, *Ectemnius rubicola* und *Torymus calcaratus*, die jeweils nur mit wenigen Individuen (1–7) gefunden wurden. Zudem wurden drei Individuen nicht näher bestimmt und als Hymenoptera sp1, sp2 und sp3 aufgeführt.

Evaluation des räumlichen Einflusses der Gehölzstrukturen

In diesem Teilprojekt wurde untersucht wie sich Gehölze auf die räumliche Verteilung und Aktivität von Bestäubern auswirken. Die 24 Gehölzarten bieten ein umfangreiches Nahrungsangebot für Wildbienen in den Monaten März bis Juni. Zur gleichen Zeit sind verschiedene Wildbienen aktiv und zeigen eine Anpassung ihrer Aktivität in unterschiedlichen Zeitspannen. In den ersten Monaten (März-April-Mai) sind Sandbienen in Hecken Aktiv und suchen Nahrung, dann sind Schmalbienen aktiv (April-Mai) und später Hummeln (Mai-Juni-Juli). Einige Überschneidungen und teilweise eine höhere Varianz hängt von der Bienenart ab.

Erfassung von Baum- und Strauchstrukturen in AFS

Im Zuge der Feldaufnahmen wurden im Winter 2021/2022, 2022/2023 und 2023/24 über 500 Bäume und Sträucher mit einem terrestrischen Laserscanner dreidimensional erfasst. Dies umfasste unter anderem die Baumhecke der INTEGRA-Versuchsfläche im Süden Freiburgs (siehe Abb. 14) auf der auch die Messarbeiten der anderen Partner stattgefunden haben, sowie die Versuchsfläche der Uni Hohenheim am Versuchsgut „Heidfeldhof“.

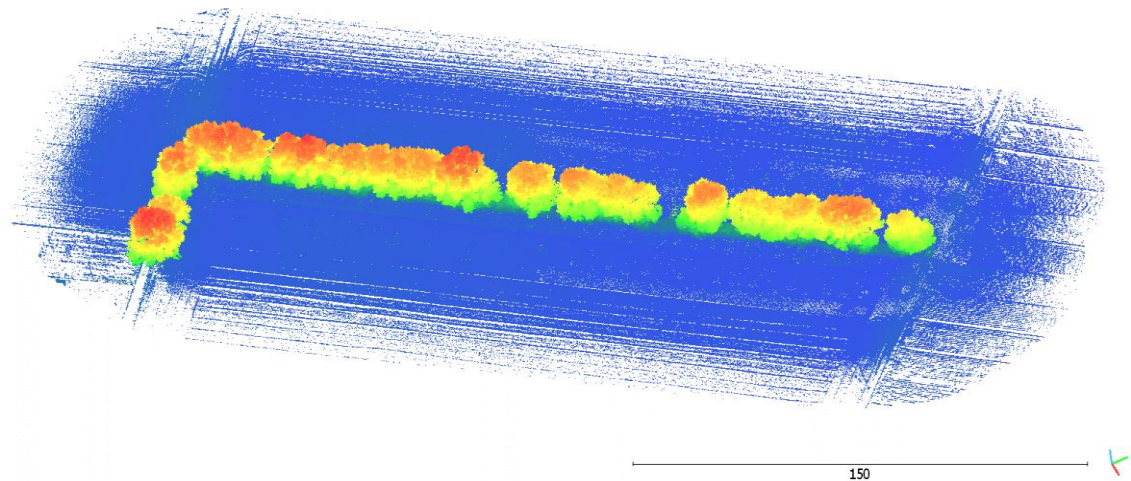


Abb. 14: Darstellung der 3D-Punktwolke der Baumhecke der INTEGRA- Versuchsfläche südlich von Freiburg als Heatmap

Für diese Bäume wurden anschließend detaillierte parametrische Modelle der Ast- und Kronenstruktur, sogenannte Quantitative Structure Models (QSM), berechnet. Ein Beispiel eines QSM eines Nussbaumes zeigt Abb. 15. Die so gewonnenen Daten waren wiederum Grundlage für die Arbeiten im AP 2, AP 3, AP 4 und AP 9 verwendet, zum Beispiel für die Modellierung der Blütenanzahl.

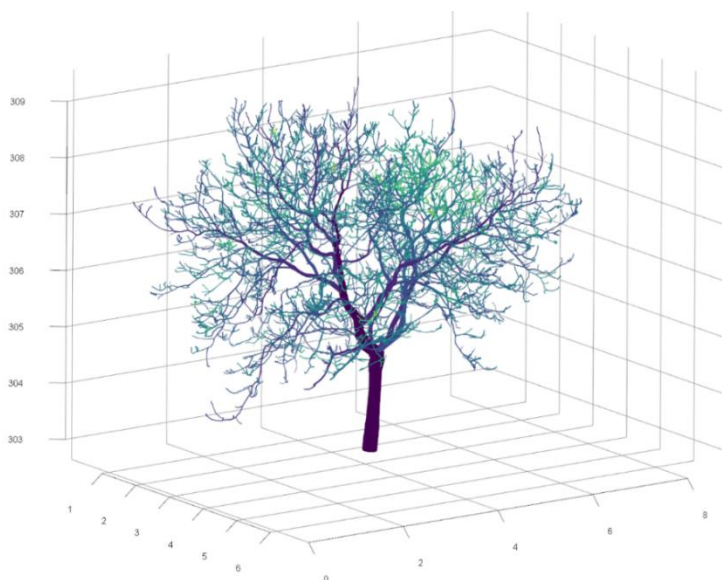


Abb. 15: Quantitative Structure Model (QSM) eines Nussbaumes (*Juglans regia*)

Genauigkeitsprüfung Laserscanning

Im Jahr 2021 wurde mit Hilfe der Erfassung von Bäumen mit dem terrestrischen Laserscanner (siehe AP 2) eine Genauigkeitsprüfung durchgeführt. Um die Genauigkeit der Messungen nach wissenschaftlichen Maßstäben validieren zu können, wurden Genauigkeitsuntersuchungen an 10 Ästen der Buche unter wetter-unbeeinflussten Verhältnissen durchgeführt. Dafür wurde

eine Sporthalle gemietet um den Einfluss von Witterung (v.a. Wind) auf die Genauigkeit der Untersuchungen auszuschließen (siehe Abb. 16).

Die Ergebnisse zeigen, dass abhängig von den QSM-Hyperparametern bei einem Scan-Abstand von 45 m, die kumulative Astlänge im Durchschnitt um - 75% unterschätzt wird, während das Astvolumen um bis zu + 539% überschätzt wurde. Wir gehen davon aus, dass die hohen Abweichungen mit der Qualität der Punktwolke zusammenhängen. Mit zunehmender Distanz zum Scanner nimmt die Größe der einzelnen Laserabdrücke und die Abstände zwischen ihnen zu, so dass es schwieriger wird, kleine Äste vollständig und in ausreichend guter Qualität zu erfassen um damit geeignete QSMs zu berechnen.

Die aus dieser Untersuchung entstandenen Ergebnisse wurden im *European Journal of Forest Research* publiziert (Morhart et al. 2024; [Link](#)).

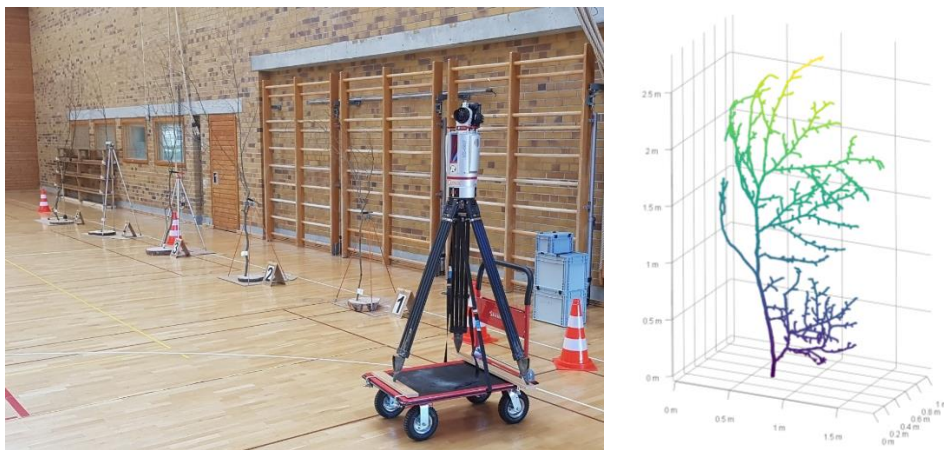


Abb. 16: Auf Rollwagen montierter terrestrische Laserscanner mit Versuchsbäumen im Hintergrund (links) daneben ein QSM eines gescannten Astes (rechts).

Biomasse und Kohlenstoffgehalt beim Nussbaum (*Juglans regia*)

Um die dreidimensionalen Volumenwerte aus den terrestrischen Laserscans in Biomasse umrechnen zu können wurden zusätzlich zu den TLS-Arbeiten in AP 2 Proben zur Bestimmung der Holzdichte, der Rindenstärke und des Nährelementgehaltes an Walnussbäumen (*Juglans regia*) gewonnen (Abb. 17).

Auf der Grundlage der QSMs aus AP 2 wurden volumetrische Informationen sowie verschiedene Höhen- und Kronenparameter bestimmt. Durch die Kombination der volumetrischen Daten mit der Rinden- und Holzdichte sowie der Kohlenstoff- und Nährstoffkonzentration wurden Biomasse, Nährstoff- und Kohlenstoffgehalt des gesamten Baumes abgeleitet.

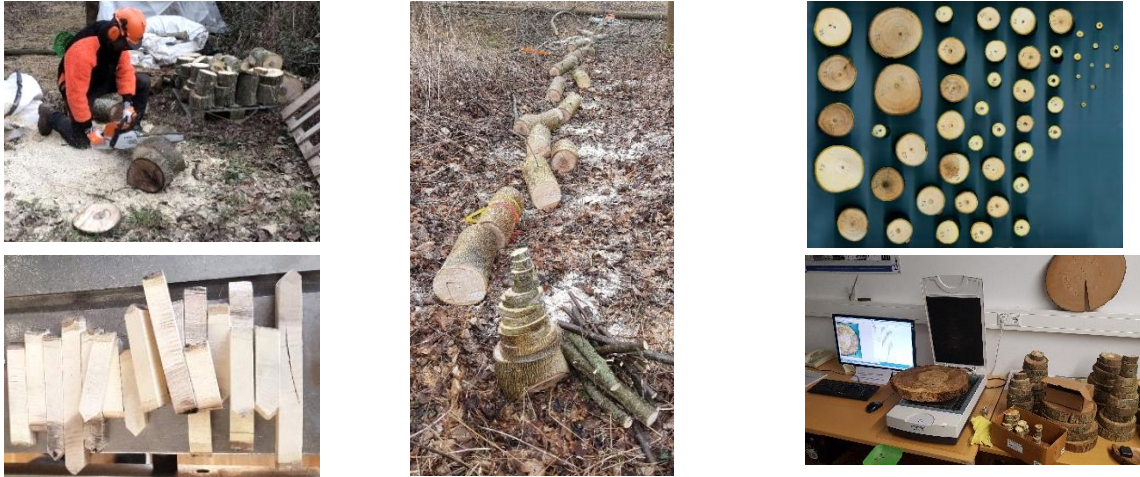


Abb. 17: Probennahme im Feld (links oben und Mitte), gewonnene Proben für die Dichtemessungen (links unten) und Probenmaterial für die Messung der Rindenstärke (rechts unten) und des Nährelementgehaltes (rechts oben)

Um die Anwendung unserer Ergebnisse zu ermöglichen, modellierten wir allometrische Beziehungen auf der Grundlage des Brusthöhendurchmessers (BHD). Die maximale Kronenprojektionsfläche eines Baumes betrug mehr als 340 m², die maximale blattlose oberirdische Trockenbiomasse 7,4 t und die maximale Menge an gespeichertem Kohlenstoff 3,6 t. Ein modelliertes AFS mit 15 Bäumen pro Hektar und einem Ziel-BHD von 60 cm besitzt am Ende seiner 60-jährigen Umtriebszeit ein oberirdisches Baumvolumen von mehr als 100 m³, kommt auf eine Trockenbiomasse von etwa 60 t und entsprechend 30 t gebundenen Kohlenstoff in der oberirdischen Biomasse. Durch die Erstellung allometrischer Funktionen konnten wir dringend benötigte Informationen für die feinaufgelöste Modellierung von AFS bereitstellen.

Die hier beschriebenen Ergebnisse wurden in *Agroforestry Systems* (Schindler et al. 2023a; [Link](#)) veröffentlicht.

Biomasse und Kohlenstoffgehalt bei der Wildkirsche (*Prunus avium* L.)

Wir stellen eine Reihe allometrischer Modelle für die Wildkirsche (*Prunus avium* L.) vor, die in Agroforstsystemen häufig genutzt wird. Die Wildkirsche (*Prunus avium* L.) ist eine häufige Baumart in Agroforstsystemen (AFS). Sie wird entweder für die Fruchtproduktion oder für die Produktion von hochwertigem Holz genutzt und ist somit von großer Bedeutung. Dennoch fehlen selbst grundlegende allometrische Modelle. Insgesamt wurden 70 Bäume im Südwesten Deutschlands mithilfe von terrestrischem Laserscanning untersucht und unter Verwendung quantitativer Strukturmodelle analysiert. Die abgeleiteten allometrischen Modelle bieten eine solide Grundlage für die Biomasseschätzung in vergleichbaren Agroforstsystemen. Unser Biomassemodell, das auf Volumenschätzungen basiert, die in Biomasse umgerechnet wurden, zeigt keine signifikanten Unterschiede zu einer früheren Studie in derselben Region mit derselben Baumart, obwohl sie an Agroforstbäumen unter einem anderen Managementregime durchgeführt wurde.

Das Ziel dieser Studie war die Entwicklung einer Reihe allometrischer Modelle für Wildkirschen in AFS. In diesem Zusammenhang präsentieren wir einen innovativen, nicht-destruktiven Ansatz, der die Schätzung von Rinden- und Holzvolumen separat ermöglicht, indem Rindendickenmodelle auf 3D-Modelle der Bäume angewendet werden. Um die Anwendbarkeit des Modells auf verschiedene AFS zu bewerten, verglichen wir unser allometrisches Modell für die oberirdische Biomasse mit einem früheren Biomassemodell für Wildkirschen unter unterschiedlichem Management in derselben Region.

Das methodische Vorgehen sah in der Studie wie folgt aus: Wildkirschen ($n = 70$), die sich innerhalb von AFS im Süden Deutschlands befinden, wurden mit einem terrestrischen Laserscanner gescannt. Quantitative Strukturmodelle wurden verwendet, um Baumdimensionen und oberirdisches Volumen pro Baum abzuleiten. Mithilfe zusätzlicher Hilfsdaten wurden die Zielvariablen abgeleitet und entsprechende allometrische Modelle angepasst. Ergebnisse Die allometrischen Modelle zur Schätzung des oberirdischen Volumens, der Trockengewichtbiomasse, des Kohlenstoffgehalts und des Nährstoffgehalts basierend auf dem Brusthöhendurchmesser (DBH) zeigten hervorragende Anpassungen ($R^2_{adj} \geq 0,97$). Die Vergleiche mit einer ähnlichen Studie in derselben Region deuteten darauf hin, dass Managementpraktiken wie die Ästung nur einen geringen Einfluss auf die Beziehung zwischen DBH und der oberirdischen Baum-Biomasse haben. Der Nährstoffgehalt in den Bäumen nahm in der Reihenfolge $Ca > N > K > Mg > P$ ab.

Die abgeleiteten allometrischen Modelle liefern wertvolle Informationen über diese wichtige Agroforst-Baumart. Unsere Ergebnisse können sowohl die Managementpraktiken in AFS informieren als auch das ökologische Verständnis dieser Systeme voranbringen. Zukünftige Forschung sollte sich auf die Entwicklung allometrischer Modelle für andere Baumarten konzentrieren, die für AFS relevant sind.

Die hier beschriebenen Ergebnisse wurden in *Annals of Forest Science* (Schindler et al. 2023b; [Link](#)) veröffentlicht.

Quantifizierung der Bientracht

Umfangreiche Erfassung von Bäumen mit dem TLS als Grundlage für die Modellierung des Blütenangebotes wurden im Winter 2021-2022, 2022-2023 und 2023-2024 Bäume mit Hilfe von TLS erfasst (siehe AP 2). Darunter waren zusätzlich zu den bisher erwähnten Baumarten auch die Arten Winterlinde und Bergahorn. Es folgte eine umfangreiche Erfassung und Beobachtung der Entwicklung und Anzahl von Blüten an Wildkirsche (*Prunus avium*), Apfel (*Malus sylvestris*), Birne (*Pyrus communis*) und Winterlinde (*Tilia cordata*) (siehe Abb. 18 & Abb. 19).



Abb. 18: Bilder der Blütenentwicklung eines Kirschenzweiges zu Zeitpunkt T1 (links) und T2 (Mitte) sowie eines gesamten Astes (rechts)



Abb. 19: Erfassung der Blüten eines Apfelbaumes: Gesamtbaum (linkes Bild) und Probeast (rechtes Bild)

Modellierung der floralen Ressourcen der Wildkirsche (*Prunus avium* L.)

Rückgänge bei Bestäubern stellen eine Bedrohung für Ökosysteme und die Nahrungsmittelproduktion dar. Die Landwirtschaft trägt zwar zur Erosion der Bestäubungsleistungen bei, leidet jedoch auch darunter. Unsere Studie untersucht das Potenzial von Bäumen in Agrarlandschaften, Bestäuber durch Bereitstellung von Blütenressourcen zu unterstützen. Unser übergeordnetes Ziel ist die Quantifizierung der von der Wildkirsche (*Prunus avium* L.) produzierten Blütenressourcen, die von blütenbesuchenden und bestäubenden Insekten wie Bienen genutzt werden können. Mit einem innovativen Ansatz kombinieren wir Pollenmessungen mit manuellen Zählungen von Blüten an Zweigen und 3D-Daten aus terrestrischem Laserscanning. Dieser Ansatz ermöglicht es uns, die Anzahl der Blüten von Zweigen auf ganze Bäume hochzurechnen. Die abgeleiteten Modelle zur Abschätzung der Wahrscheinlichkeit des Blütenaufkommens ($R^2c = 0,52$, $R^2m = 0,50$) sowie der Anzahl der Blüten pro Zweig ($R^2c = 0,88$, $R^2m = 0,84$) und pro Baum ($R^2 = 0,83$) zeigen eine gute Anpassung mit nur einer kleinen Menge an Prädiktoren. Die Modellanpassungen deuten darauf hin, dass es auf der Zweigebene schwieriger ist, die

Blühwahrscheinlichkeit vorherzusagen, als die Blütenhäufigkeit. Wir fanden Unterschiede in der Anzahl der Blüten pro Zweig in verschiedenen Kronenabschnitten, was darauf hindeutet, dass die Blütenressourcen heterogen verteilt sind. Außerdem zeigen wir, dass die Anzahl der Blüten pro Baum exponentiell mit der Baumgröße (Stammdurchmesser, Kronenvolumen) zunimmt. Große Bäume liefern daher unverhältnismäßig mehr Blütenressourcen als kleine Bäume und sind besonders erhaltenswert. Unsere Modelle schätzen beispielsweise, dass ein einzelner Baum mit einem Stammdurchmesser von 25 cm etwa 195.535 Blüten trägt (95%-CI: 159.991–237.318) und somit etwa 57 cm³ (95%-CI: 32–88 cm³) Pollen sowie 170 g (95%-CI: 48–345 g) Nektarzucker pro 24 Stunden produziert. Diese Menge an Pollen reicht aus, um beispielsweise 5.202 Larven (95%-CI: 2.886–8.022) von *Lasioglossum laticeps*, einer häufigen und generalistischen Schweißbiene der Kirschbäume, zu ernähren. Im Gegensatz dazu liefert ein kleinerer Baum mit einem Stammdurchmesser von 10 cm nur 8 % dieser Ressourcen. Zusammenfassend zeigen wir, wie unsere Ergebnisse zur breiteren Debatte über "groß oder klein" im Naturschutz beitragen, indem sie den Wert großer Bäume hervorheben. Zusätzlich zeigen wir, wie Informationen, die auf der Zweigebene gesammelt wurden, nicht-destruktiv auf ganze Bäume hochskaliert werden können.

Die hier beschriebenen Ergebnisse (Schindler Z. et al. 2025) sind bei der Fachzeitschrift *Ecology* als Publikation akzeptiert und können unter folgender DOI: [10.1002/ecy.70103](https://doi.org/10.1002/ecy.70103) gefunden werden.

Eine auf 3D-Daten basierte Modellierung der Blüten für die Wildkirsche ist in Abb. 20 dargestellt.

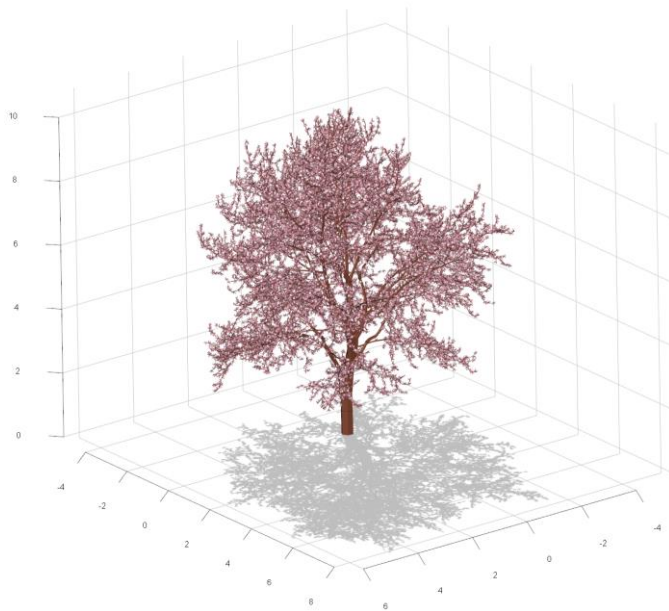


Abb. 20: Wildkirsche (*Prunus avium*) mit modellierten Blüten (Z. Schindler)

Modellierung des Gesamtsystems

Zunächst werden die Ergebnisse der kontinuierlichen Messungen des Mikroklimas und des Pflanzenwachstumsmonitorings dargestellt. Im Anschluss hieran werden die mit dem neuen Agroforstmodell XN5-AF erzielten Simulationsergebnisse gezeigt.

Mikroklima

An beiden Versuchsstandorten unterschieden sich die von den Bäumen stark beeinflussten, beschatteten Bereiche hinsichtlich der mikroklimatischen Bedingungen deutlich von den kaum beschatteten Bereichen im offenen Feld. Die mikroklimatischen Effekte sind exemplarisch in Abb. 21 gezeigt anhand von jeweils über die letzte Juniwoche gemittelten Tagesgängen in den drei Versuchsjahren an den beiden Standorten. Die gemessenen Windgeschwindigkeiten waren in der Nähe der Bäume im Vergleich zum offenen Bereich im Allgemeinen reduziert, wenn auch nicht in allen Fällen gleich stark. Der deutlichste Unterschied wurde in Freiburg 2022 beobachtet, was wahrscheinlich auf das Vorhandensein der dichteren und höheren Bäume zurückzuführen ist, die die Windmuster erheblich veränderten. Die photosynthetisch aktive Strahlung (PAR) war wie zu erwarten in der kaum beschatteten Zone durchweg höher als in den stark beschatteten Bereichen in Baumnähe (Abb. 21b). Besonders deutlich war dieser Effekt am Heidfeldhof, wo die nahezu Ost-West ausgerichtete Baumreihe die Einstrahlung bereits kurz nach Sonnenaufgang bis ca. 18 Uhr beeinflusst. Die Baumreihe in Freiburg ist in einem Winkel von ca. 40 Grad zur Nord-Süd-Richtung ausgerichtet (Abb. 3), wodurch der Schattenwurf in die Ackerfläche bereits kurz nach Mittag endet. Die reduzierte Einstrahlung in den Nachmittagsstunden in der Nähe der Bäume ist hier alleine durch geringere (omnidirektionale) diffuse Strahlung zurückzuführen, die wie die direkte Strahlung ebenfalls von den Bäumen abgeschwächt wird. Die relative Luftfeuchtigkeit (Abb. 21c) zeigt auf beiden Versuchsstandorten den erwarteten Verlauf mit einer deutlichen Abnahme um die Mittagszeit. Dieser fällt im Jahr 2023 (Heidfeldhof) besonders stark aus, was auf eine geringere Bodenfeuchtigkeit bei hoher Sonneneinstrahlung schließen lässt. Der Effekt der Baumreihen zeigt sich in leicht erhöhten Werten im Schattenbereich während der Vormittage und leicht verringerten Werten am Nachmittag, wobei die Umkehr in Freiburg einige Stunden früher erfolgt als am Heidfeldhof. Während der Nacht war die relative Luftfeuchte in der offenen Zone durchwegs um ca. 2-5% höher als in der Nähe der Bäume.

Die Lufttemperatur (Abb. 21d) erreichten in allen Jahren ihren Höchststand um die Mittagszeit bzw. in den frühen Nachmittagsstunden, mit deutlichen Temperaturunterschieden nur während des Vormittags aufgrund eines verzögerten Temperaturanstiegs im Schattenbereich. Bereits ab Nachmittag und während der Nacht gab es kaum Temperaturunterschiede zwischen dem offenen Feld und in Nähe zur Baumreihe. Die Verläufe der Bodentemperatur zeigen die dämpfende Wirkung der Bäume bzw. des Schattens deutlicher als die Lufttemperaturen. In 15 cm Tiefe wurden in sonnigeren Bereichen größere tageszeitliche Schwankungen gemessen als im beschatteten Bereich (Abb. 21e). Neben der geringeren Amplitude wurde hier auch eine

Phasenverschiebung in Bezug auf das Maximum im Temperaturverlauf deutlich, das im Schattenbereich um bis zu drei Stunden verzögert sein kann. In 50 cm Bodentiefe (Abb. 21f). waren die Temperaturen während des Tages kaum Schwankungen unterworfen. Im Gegensatz zur Lufttemperatur zeigte sich bei den Bodentemperaturen aber, dass ein durchgängiger kühlender Effekt durch die Bäume zu beobachten ist, da die Temperaturunterschiede zwischen offenem Feld und Baumnähe auch während der Nachtstunden bestehen blieb.

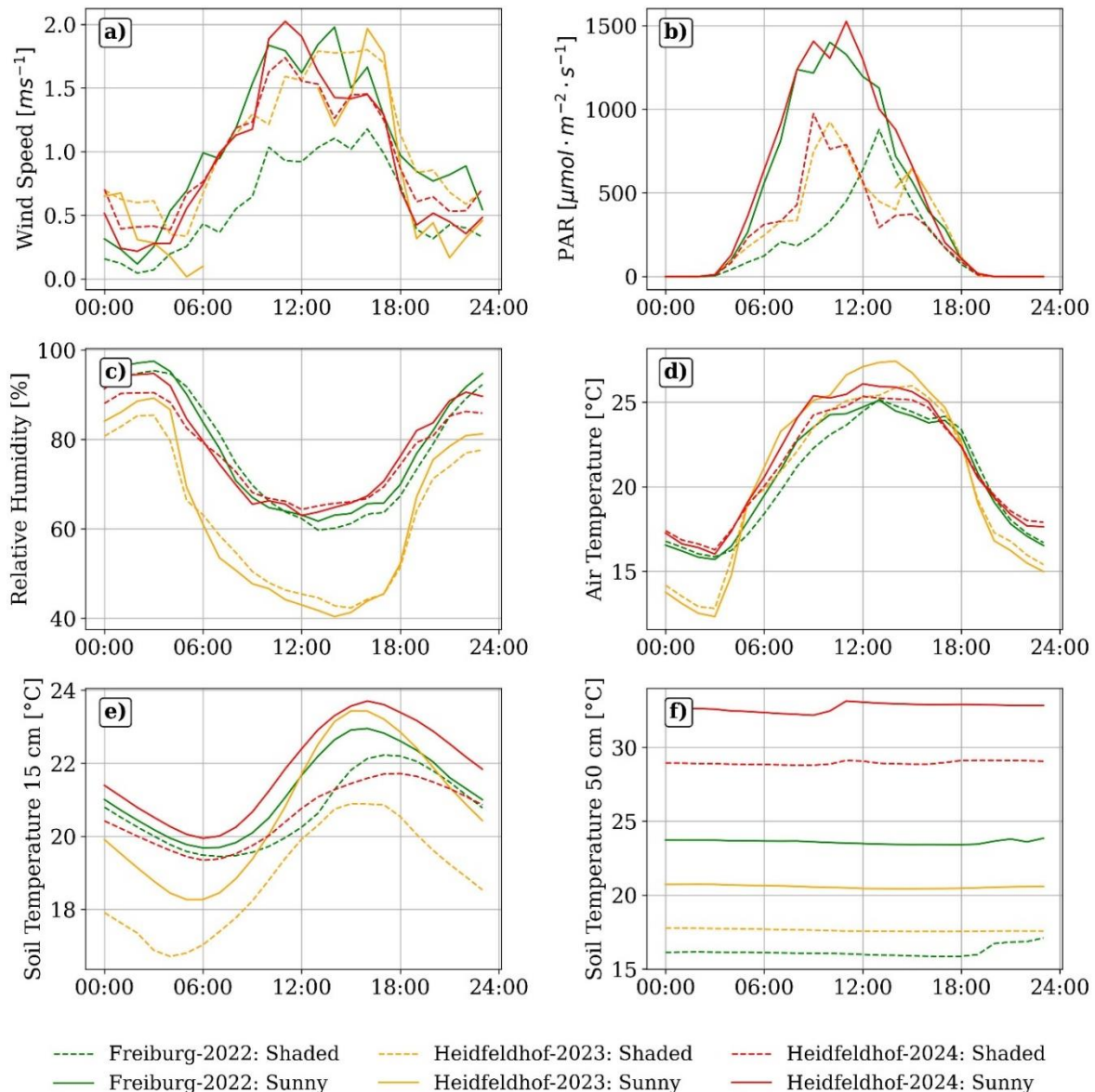


Abb. 21: Gemessener Tagesgang der mikroklimatischen Variablen a) Windgeschwindigkeit, b) photosynthetisch aktive Strahlung, c) relative Luftfeuchte, d) Lufttemperatur und e) – f) Bodentemperatur in 15 cm und 50 cm Tiefe im beschatteten (gestrichelte Linien) und wenig beschatteten Bereich (durchgezogene Linien) an den Standorten: Freiburg (2022) und Heidfeldhof (2023 und 2024). Gezeigt sind die gemittelten Tagesgänge der letzten Juniwoche des jeweiligen Jahres.

Wachstum der Ackerfrüchte in Abhängigkeit vom Abstand zur Baumreihe

Auswertung der Satellitendaten

Einen Überblick über den Einfluss der Baumreihe am Versuchsstandort Freiburg auf die Blattflächenentwicklung und das Wachstum der Sojabohnen auf der angrenzenden Ackerfläche gibt die Auswertung der Sentinel-2 Multispektral-Satellitenbildern, die für sechs wolkenlose Tage während der Hauptwachstumsperiode (Juni-August) verfügbar waren (Abb. 22). Die Baumreihe befindet am südöstlichen Rand des Ackers, vgl. Abb. 3. Es zeigte sich eine deutliche Variabilität im LAI, die sich nicht nur aus dem Abstand zur Baumreihe ergibt, sondern auch innerhalb der offenen Ackerfläche, wobei sich der südwestliche Teil deutlich früher entwickelte und insgesamt auch höhere LAI-Werte erreichte als der nordöstliche Teil. Daneben wird auch der Einfluss der Bäume auf das Wachstum der Ackerfrucht deutlich. Entlang der Baumreihe blieb der LAI bis in den Juli hinter den LAI-Werten in der nicht-beeinflussten Zone zurück. Im August drehen sich die Verhältnisse allerdings um. Nun zeigt sich ein positiver Effekt der Beschattung, der vermutlich auf Wassereinsparung durch verringerte Verdunstung in Folge reduzierter Einstrahlung und geringerer Windgeschwindigkeiten zurückzuführen ist. So bleiben die LAI-Werte hier deutlich länger auf einem hohen Niveau, während die (grüne) Blattfläche im offenen, nicht beschatteten Bereich schon stark rückläufig ist (Seneszenz).

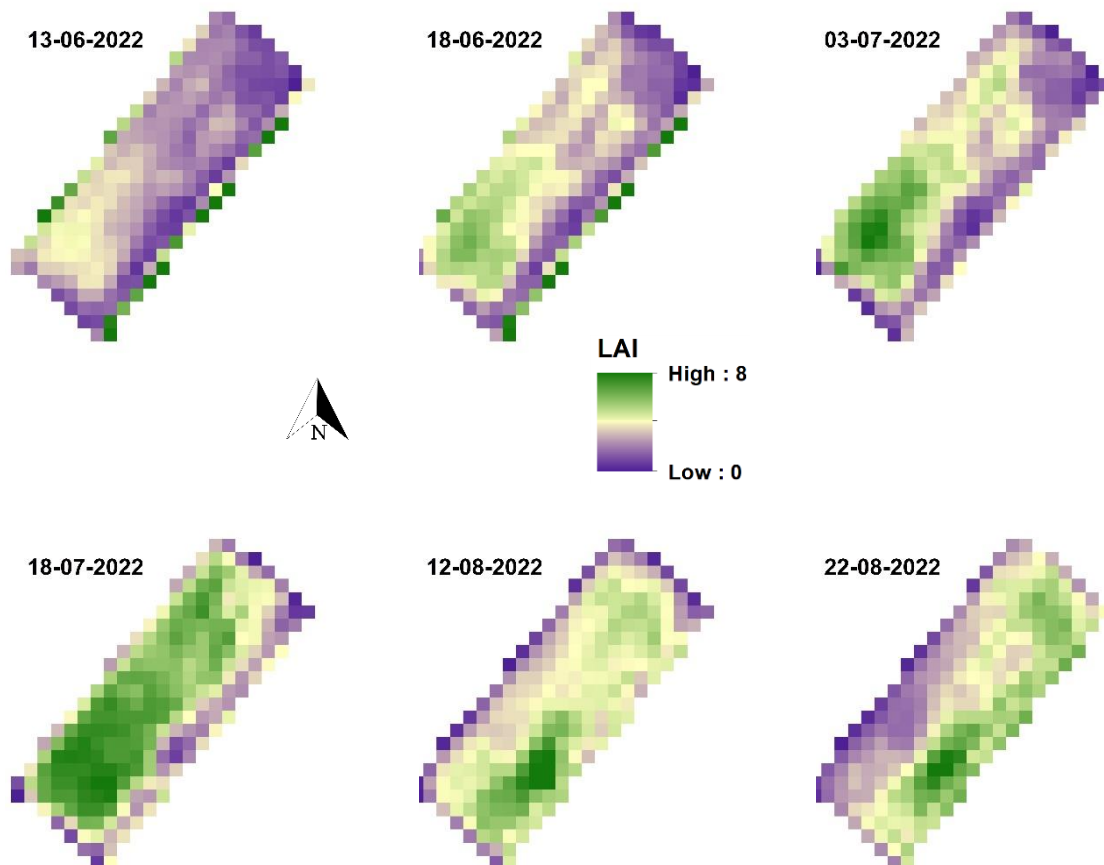


Abb. 22: Aus Sentinel-2 Satellitenbildern abgeleitete Entwicklung des Blattflächenindex von Sojabohne (LAI) am Standort Freiburg während der Vegetationsperiode 2022. Die Baumreihe befindet sich am süd-östlichen Rand der Ackerfläche.

Gemessenes Pflanzenwachstum und Produktivität in Abhängigkeit vom Abstand zu Baumhecken

Die Pflanzenhöhe, der LAI und der Ertrag bzw. die Biomasse zeigten in den drei Versuchsjahren (2022, 2023 und 2024) unterschiedliche Muster mit zunehmendem Abstand zur Baumreihe (Abb. 23). Am Standort Freiburg (2022) nahmen sowohl die Biomasse als auch der LAI der Sojabohnen bis zu einem Abstand von ca. 20 m von der Baumreihe zu, wobei die höchste Biomasse (~37.000 kg/ha, Frischgewicht) in 30 m Entfernung von der Baumreihe gemessen wurde. Dies deutet auf eine starke Konkurrenzsituation in der Nähe der Baumreihe in Bezug auf Licht und unterirdische Ressourcen (Wasser, Nährstoffe) hin, die sich auch in der geringeren Pflanzenhöhe bis zu einem Abstand von 15m widerspiegelt.

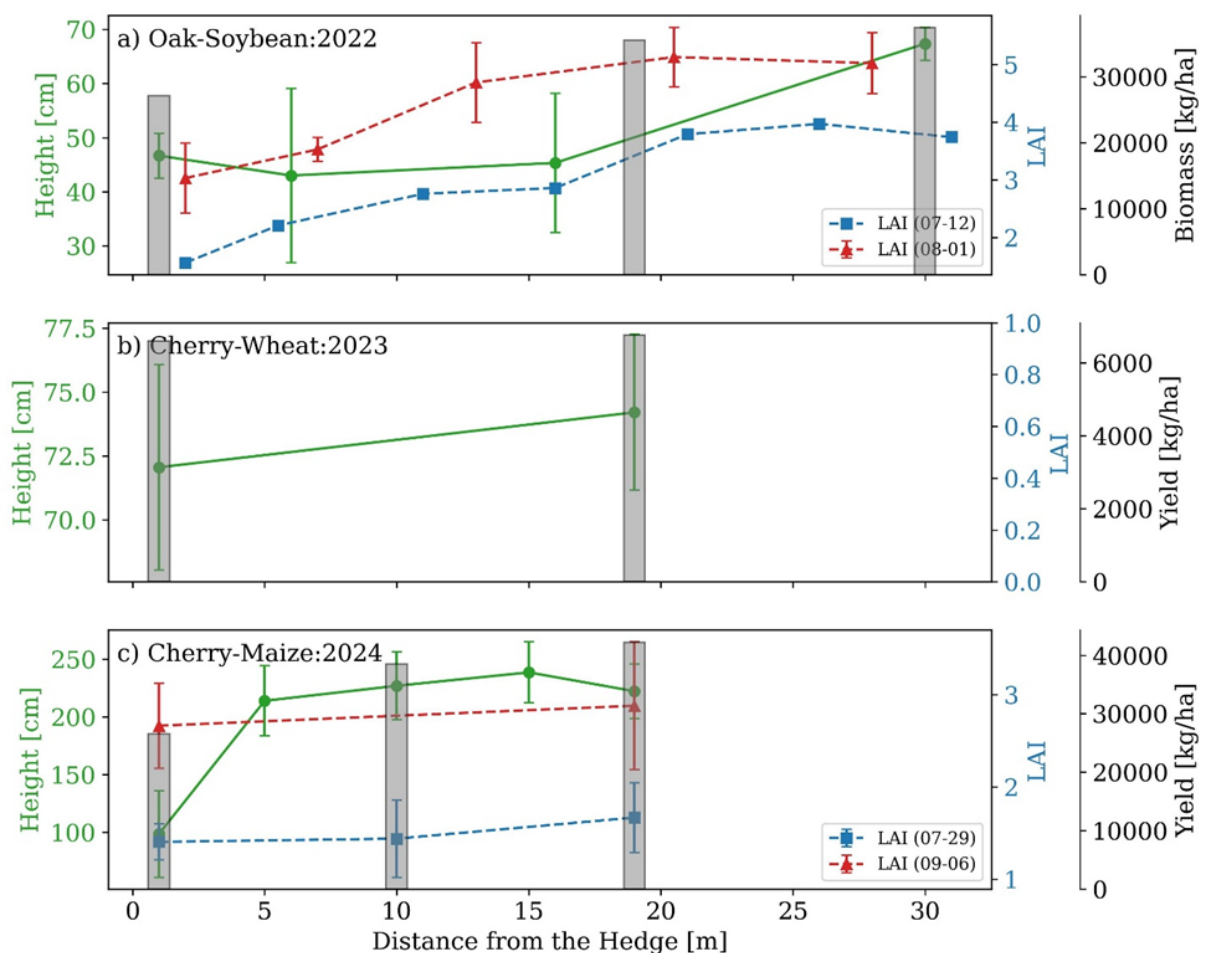


Abb. 23: Pflanzenhöhe (linke Achse, grün), Blattflächenindex (LAI; rechte Achse, 2 Termine: blau und rot) sowie Ertrag bzw. Biomasse (Balken) in Abhängigkeit vom Abstand zur jeweiligen Baumreihe für a) Freiburg (Eiche-Sojabohne, 2022), b) Heidfeldhof (Kirsche-Weizen, 2023) und c) Heidfeldhof (Kirsche-Mais, 2024). Fehlerbalken stellen Standardabweichungen dar.

Im Gegensatz dazu waren im Kirsch-Winterweizen-System (2023, Heidfeldhof) nur geringe Unterschiede in der Pflanzenhöhe und im Ertrag in 1 m bzw. 19 m Abstand zu den Bäumen zu beobachten (~ 6.600 kg/ha, Trockengewicht). Offensichtlich wurde der Weizen durch die Nähe der Bäume hier nur gering beeinträchtigt. Auch das Kirsch-Mais-System (2024, Heidfeldhof) zeigte eine ausgeprägte Reaktion auf Beschattung bzw. Wurzelkonkurrenz mit Bäumen. Pflanzenhöhe, LAI und der Ertrag nahmen mit einem Abstand von weniger als 5 m zur Baumreihe stark ab. Der Ertrag erreichte mit ~ 40.000 kg/ha (Frischgewicht) sein Maximum im kaum beschatteten Bereich (19 m), wohingegen unmittelbar angrenzend an die Baumreihe 40 % weniger geerntet werden konnten. Diese Ergebnisse verdeutlichen die kulturspezifische Empfindlichkeit gegenüber der Nähe von Bäumen, wobei die Sommerungen Sojabohnen und Mais eine stärkere Abhängigkeit von der Entfernung zur Hecke zeigten als der Winterweizen, der unter den vorhandenen Bedingungen weitgehend unbeeinflusst blieb.

Simulationsergebnisse

Im folgenden Abschnitt werden die mit dem neuen Agroforstmodell XN5-AF erzielten Simulationsergebnisse für die beiden Untersuchungsstandorte Freiburg (2022) und Heidfeldhof (2023, 2024) in Bezug auf den Boden, die Beschattung der Ackerfläche und die in verschiedenen Abständen von der jeweiligen Baumreihe (1, 4, 7, 12 und 24 m) prognostizierten Erträge gezeigt sowie Ergebnisse zur Simulation der Effekte von Baumreihen auf die N-Emissionen und die Humusvorräte in der Ackerfläche.

Simulation von Bodenfeuchte und Bodentemperatur

XN5-AF wurde als neue Bibliothek in der Agrarökosystemsimulationsumgebung Expert-N implementiert. Dort kann auf Routinen zur Simulation des Wasser- und Wärmetransports im Boden zurückgegriffen werden. Abb. 24 zeigt für das Versuchsjahr 2023 am Standort Heidfeldhof die gemessenen und simulierten Bodentemperaturen und Bodenfeuchten in der Ackerfläche in 15 und 45 cm Tiefe bei einem Abstand von 1 m von der Baumreihe.

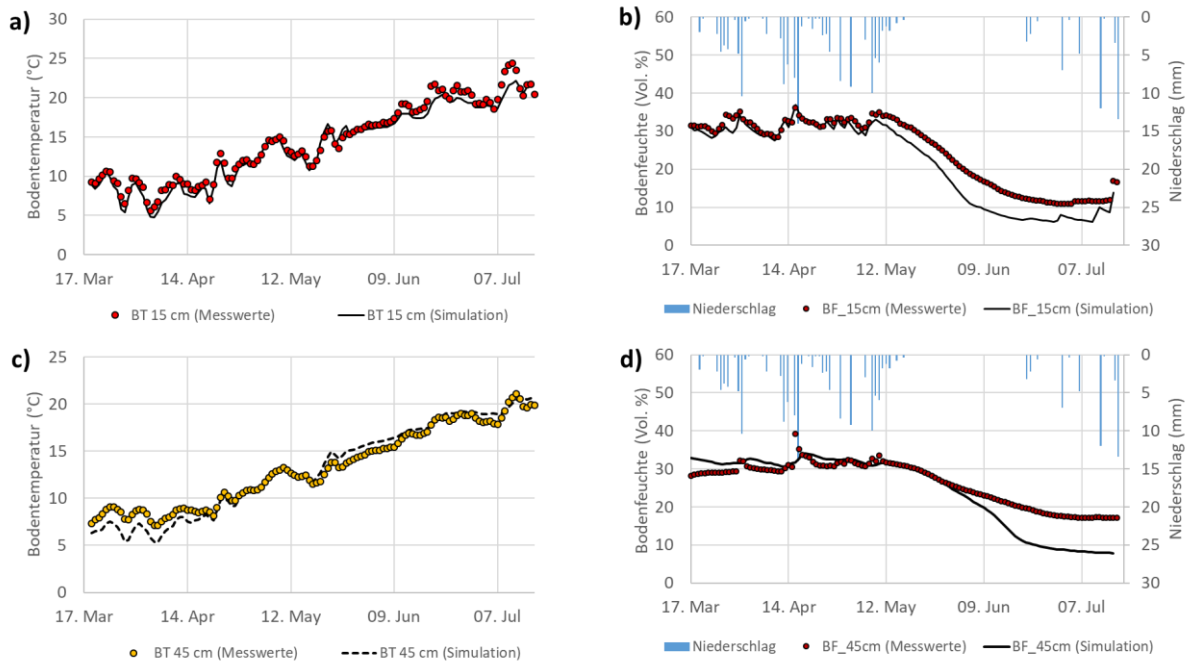


Abb. 24: Vergleich von simulierter und gemessener Bodentemperatur (a, c) und Bodenfeuchte (b, d) in 15 cm (a, b) und 45 cm (c, d) Bodentiefe am Standort Heidfeldhof im Frühjahr 2023 im Abstand 1 m von der Baumreihe.

Während insbesondere im Oberboden der Temperaturverlauf vom Modell mit hoher Genauigkeit nachvollzogen werden kann, trifft dies für den Verlauf der Bodenfeuchte nur bedingt zu. Zwar sind Messung und Modell bis Mitte Mai in guter Übereinstimmung, die anschließende Austrocknung des Bodens bei ausbleibenden Niederschlägen von Mitte Mai bis Mitte Juni wird in der Simulation jedoch deutlich überschätzt. Dies ist vermutlich auf zu starke Vereinfachungen im Modell bei der Abbildung der Konkurrenz um Wasser von Baum- und Ackerfruchtwurzeln zurückzuführen.

Simulierte Effekte der Baumreihen auf die Lichtverfügbarkeit und Ertragsbildung in der Ackerfläche

Die vom Modell berechneten Tagesgänge der photosynthetisch aktiven Einstrahlung (PAR) auf den jeweiligen Ackerflächen ist in Abb. 25 exemplarisch für die letzte Juniwoche des jeweiligen Jahres dargestellt. Auf dem Heidfeldhof (Weizen, Mais) wurden für Ende Juni aufgrund der geringeren Baumhöhen im Vergleich zum Standort Freiburg signifikante PAR-Reduktionen nur für Abstände von 1 m bzw. 4 m Meter simuliert, was sich auch in den simulierten Erträgen wieder spiegelt (Abb. 26). In dieser Jahreszeit erreicht das volle Sonnenlicht die Ackerzone ab einem Abstand von 7m bereits in den frühen Morgenstunden. Während der Wintermonate ist dies wegen des niedrigen Sonnenstands und der daraus resultierenden langen Schatten allerdings nicht der Fall. So werden im Winter während der Mittagsstunden auch die Zonen in 12 m und mehr Entfernung beschattet, allerdings zu einem wesentlich geringeren Grad, wegen der

höheren Lichtdurchlässigkeit der Baumreihe aufgrund der im Winter fehlenden Blätter (ohne Abbildung). Im Gegensatz hierzu sind in den Simulationen für den Standort Freiburg (Sojabohnen) in allen betrachteten Entfernungen PAR-Reduktionen im Vergleich Referenzfläche erkennbar, insbesondere während der Morgenstunden. Die breitere Beschattungszone kann auf die höheren Bäume zurückgeführt werden, die längere Schatten werfen. Wegen der Orientierung der Baumreihe in nordöstliche Richtung ist die Beschattung dabei hauptsächlich auf die erste Tageshälfte beschränkt. Dies führt, über die Vegetationsperiode aufsummiert, zu geringeren Strahlungseinbußen in der Nähe der Baumreihe im Vergleich zur Situation auf dem Heidfeldhof (vgl. Abb. 26).

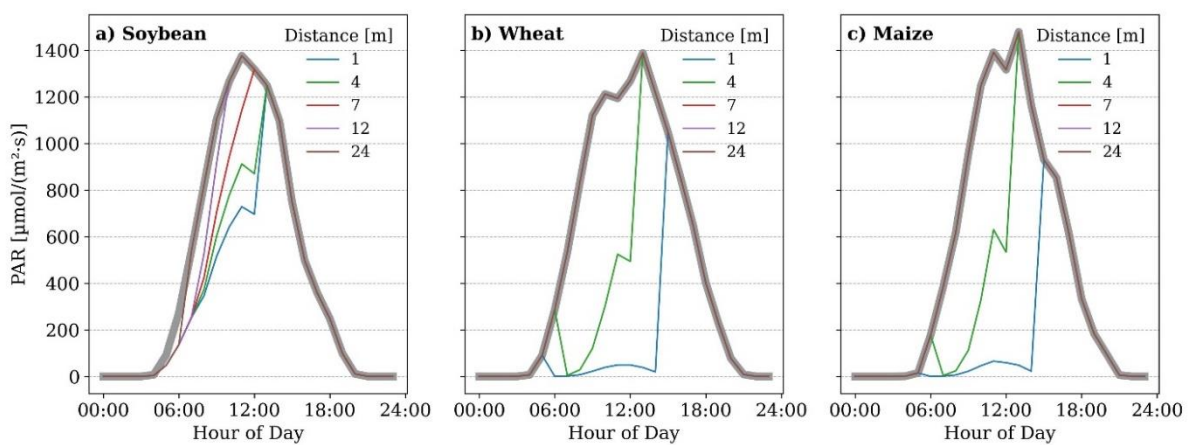


Abb. 25: Simulierte mittlere Tagesgänge der photosynthetisch aktiven Strahlung (PAR) während der letzten Juniwoche des jeweiligen Jahres für verschiedene Abstände von den Baumreihen an den Standorten a) Freiburg (2022, Sojabohnen), b) Heidfeldhof (2023, Winterweizen) und c) Heidfeldhof (2024, Mais). Die graue Kurve stellt die PAR unter Offenlandbedingungen ohne Baumeinfluss dar.

Abb. 26 zeigt für die drei untersuchten Szenarien die mit XN5-AF simulierte Beschattung während der Hauptwachstumsperiode sowie die simulierten Effekte der Baum-Ackerfruchtinteraktionen auf die Erträge in verschiedenen Abständen zur jeweiligen Baumreihe (1, 4, 7, 12 und 24 m). Dabei wird die Beschattung als prozentuale Verringerung der über die Vegetationsperiode aufsummierten photosynthetisch aktiven Einstrahlung (Δ PAR) im Vergleich zu einer fiktiven Offenlandanbau-Referenzfläche (REF) ohne Baumeinfluss dargestellt. REF hat dabei die volle, im Wetterinput vorgegebene Einstrahlung, d.h. 0% Verringerung. In ähnlicher Weise sind die Effekte der Bäume auf die Erträge (Δ Yield) dargestellt, wobei hier die Werte relativ zu den für die Referenzfläche simulierten Erntemengen berechnet wurden. Für alle drei Ackerkulturen sagt das Modell die größten Verringerungen von PAR und Ertrag in unmittelbarer Nähe der Hecke vorher, mit deutlicher Ertragszunahme mit zunehmender Entfernung von der Baumreihe. Bei Sojabohnen (Abb. 26a) ist der PAR-Wert in einem Abstand von 1 m von der Hecke um etwa 35 % reduziert, einhergehend mit einer Ertragsminderung von etwa 20 %. Beide Werte verringern sich mit zunehmender Entfernung. Während Δ PAR bei einem Abstand von 24 m

einen Wert von nahezu Null erreicht, wurde selbst in dieser Entfernung noch immer eine Ertragsreduktion ΔYield von knapp 10% simuliert. Die Simulation für Weizen (Abbildung 8b) zeigt einen deutlichen Einfluss der Baumreihe auf die Erträge, mit einer Verringerung von über 65 % in unmittelbarer Nähe zur Baumreihe. Die Verringerung ΔPAR der akkumulierten Einstrahlung beträgt dabei ca. 40 %. Die starken Ertragseinbußen widersprechen den Resultaten der Ertragsmessung, was darauf hindeutet, dass die Folgen der Beschattung auf die Photosyntheseleistung von Winterweizen oder auch die Wurzelkonkurrenz um Wasser und Nährstoffe vom Modell überschätzt werden.

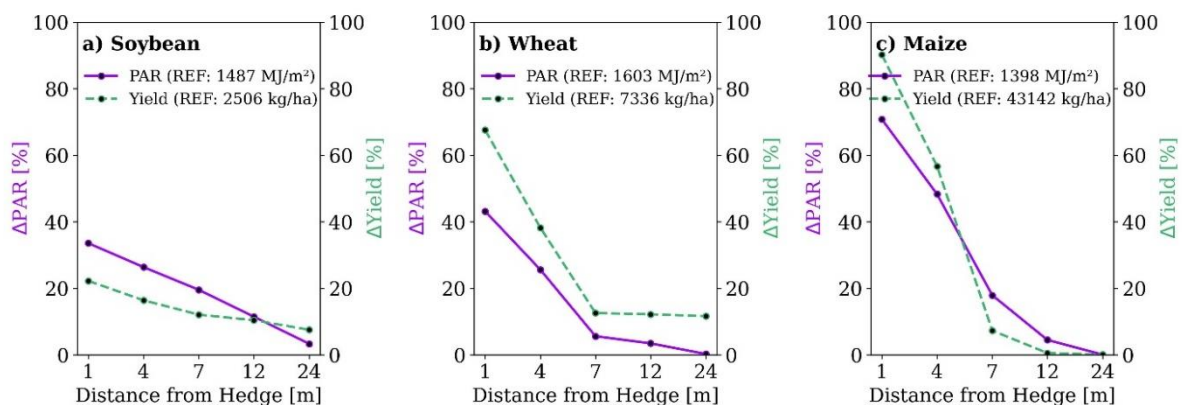


Abb. 26: Simulierte prozentuale Verringerung der photosynthetisch aktiven Strahlung (ΔPAR , linke Achse, violette durchgezogene Linie) und des Ernteertrags (rechte Achse, grüne gestrichelte Linie) im Vergleich zur Offenlandanbau-Referenzflächen (REF) für (a) Sojabohnen, (b) Weizen und (c) Mais in verschiedenen Abständen zur Baumhecke (1 m bis 24 m). REF-Werte geben den absoluten PAR-Wert (MJ/m^2) und den Ertrag (kg/ha) unter Offenlandanbaubedingungen ohne Baumeinfluss an.

Für Mais (Abb. 26c) sagt das Modell in der Nähe der Baumreihe die größten absoluten Ertragseinbußen ($>90\%$) vorher. Die Reduktion der Gesamteinstrahlung beträgt hier über 70%. Ab einem Abstand von 7m entspricht der simulierte Ertrag annähernd dem für die offene Referenzfläche simulierten Werten ($\Delta\text{Yield} \sim 6\%$). Ähnlich wie bei Weizen im Jahr 2023, werden auch für Mais die Konkurrenzeffekte am Standort Heidfeldhof durch die angrenzende Baumreihe insgesamt überschätzt. Die stärkeren Ertragseinbußen von Mais im Vergleich zu Winterweizen werden in der Tendenz vom Modell aber richtig wiedergegeben. So werden im Abstand von 7 m für Mais ein ΔYield von $\sim 20\%$ prognostiziert. Ab einem Abstand von 12 m sind die simulierten Ertragseinbußen für Weizen und Mais in etwa gleich.

Simulation von Beschattungseffekten auf die Erträge von Winterweizen und Mais unter variablen Umweltbedingungen

Um die Ergebnisse der Simulationsstudie besser verallgemeinern zu können, wurden mit Hilfe des Modells Agroforst-Effekte auf die Erträge von Winterweizen und Mais unter verschiedenen

Randbedingungen simuliert. Dabei wurde das Modell zum einen durch langjährige Wetterszenarien (2007-2024) angetrieben, um die Variabilität in den Wetterbedingungen mit zu erfassen. Zum anderen wurden die Parameter, die die Höhe, Breite und Orientierung der Baumreihe definieren über einen weiten Bereich variiert. Das Ergebnis dieser Sensitivitätsstudie zeigt Abb. 27. Die relativen Erträge der beiden Ackerkulturen sind hier jeweils auf die simulierten Erträge einer identischen Referenzfläche ohne Konkurrenzsituation bezogen. Der Grad der Beschattung ist das Verhältnis der über die Wachstumsperiode aufsummierten Einstrahlung (PAR) zur Einstrahlung auf der nicht beschatteten Referenzfläche. Erträge und Strahlung wurden dabei jeweils für 1 m, 4 m, 7 m, 12 m und 24 m Abstand von der Baumreihe sowie für die Offenlandanbau-Referenzfläche berechnet. Aufgrund der unterschiedlichen Wetterbedingungen, Dimensionen und Orientierungen der Baumreihen, können sich bei gleichem Beschattungsgrad folglich unterschiedliche Effekte auf die Erträge ergeben, da z.B. Wassermangel, Lichtreduktion und Temperatureffekte über die Photosynthese in komplexer Weise miteinander wechselwirken.

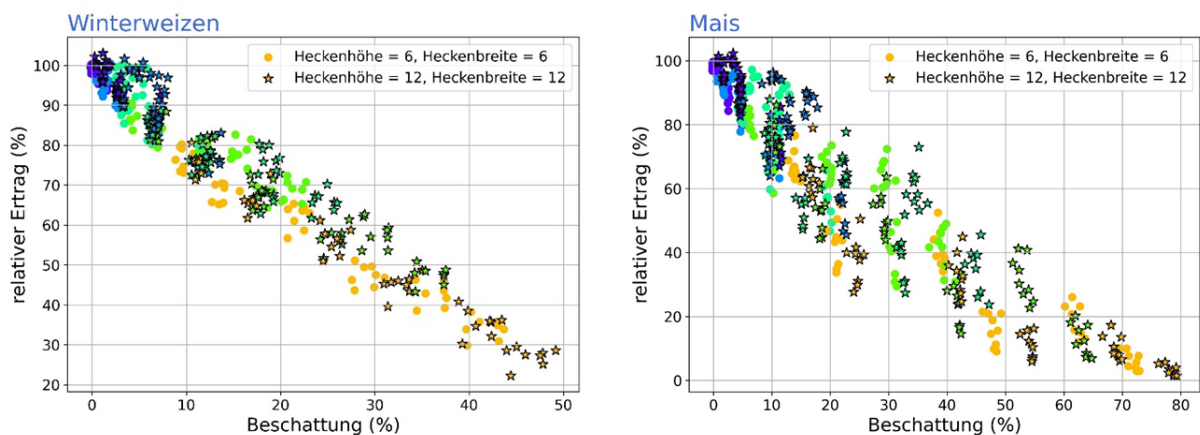


Abb. 27: Simulierte relative Erträge von Winterweizen (links) und Mais (rechts) in Abhängigkeit des Beschattungsgrads auf Ackerflächen mit Beschattung durch Baumreihen. Die Simulationsszenarien sind in Anlehnung an den Versuchsstandort Heidfeldhof aufgesetzt, wobei die Baumhöhe, die Breite der Baumreihe und der Wetterinput variiert wurden.

Die für beide Fruchtarten simulierte Abnahme der relativen Erträge bei zunehmender Beschattung fallen für Mais stärker aus als für Winterweizen, in Übereinstimmung mit den Messungen am Versuchsstandort Heidfeldhof. Dabei ist der Effekt der Beschattung auf die relativen Erträge bei Mais stärkeren Schwankungen unterworfen als im Falle des Winterweizens. Bei einem Beschattungsgrad von 20% variieren beispielsweise die relativen Maiserträge von 30-80%, während die Weizenenerträge im Bereich 55-80% liegen. Darüber hinaus ergeben sich für Mais als Sommerfrucht insgesamt höhere Beschattungsgrade, was sich daraus erklärt, dass bei Mais die gesamte Vegetationsperiode in die Zeit der Belaubung der Bäume fällt, während entscheidende Wachstumsphasen von Winterweizen bis zum Blattaustrieb bereits abgeschlossen sind. Solange der Beschattungsgrad ca. 10% nicht überschreitet, kann bei beiden Fruchtarten die

verringerte Einstrahlung in einzelnen Szenarien auch vollständig ausgeglichen werden. Dabei können Vorteile durch die Einsparung von Wasser durch verringerte Windgeschwindigkeiten und Beschattung in einzelnen Fällen auch zu leicht höheren Erträgen auf der Agroforstfläche als auf der Referenzfläche führen.

Simulation von Beschattungseffekten weitere Ökosystemfunktionen

Für die gleichen Szenarien wie in Abbildung 9 wurden die simulierten Effekte der Baumreihen auf N-Emissionen (NO_3 -Auswaschung, N_2O -Emissionen) und Humus-auf- bzw.-abbau ausgewertet. Während sich bei den N_2O -Emissionen kein deutlicher Unterschied zwischen der Baumbeeinflussten Zone (AF) und der Offenland-Referenzfläche (REF) zeigt (Abb. 28b), ist in den Simulationen die Nitratauswaschung aus der durchwurzelten Zone im Durchschnitt auf der AF-Fläche um $5 \text{ kg NO}_3\text{-N/Jahr}$ gegenüber REF erhöht (Abb. 28a). Einen positiven Effekt zeigen die Simulationen in Bezug auf Humusvorräte (Abb. 28c).

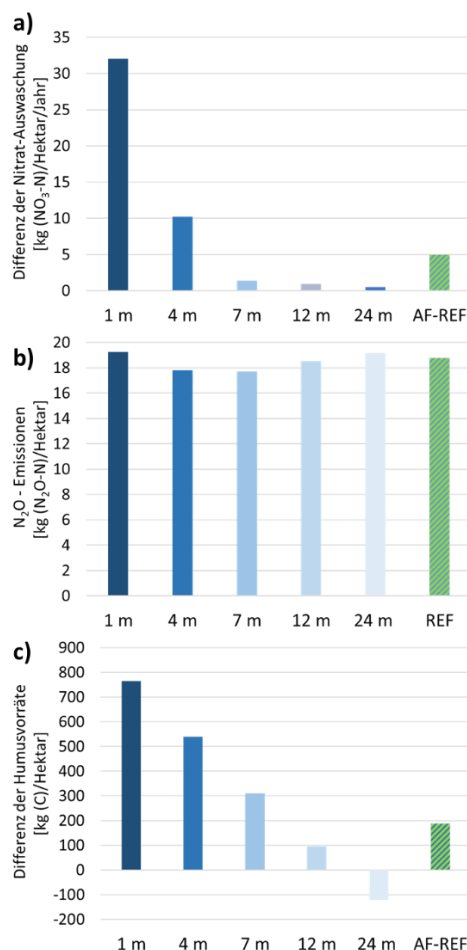


Abb. 28: Simulierte Agroforst-Effekte in Winterweizen-Szenarien auf die a) Nitratauswaschung, b) Lachgasemissionen und c) Humusvorräte im Boden. Dargestellt sind in a) die Differenz der Auswaschungsrate zwischen Agroforst- und Referenzfläche, in b) die über die Simulationsperiode von 18 Jahren aufsummierte N_2O -Emissionen sowie in c) die Differenz der Humusvorräte zwischen Agroforst- und Referenzfläche am Ende der 18-jährigen Simulation.

Im Vergleich zur Referenzfläche werden hier zum Ende der 17-jährigen Simulation mit zunehmender Nähe zu den Bäumen höhere Humuswerte beobachtet als im Offenlandanbau, was durch den Kohlenstoffeintrag über den Streufall in die Ackerfläche zu erklären ist.

Analyse und Weiterentwicklung des Rechtsrahmens für Agroforstsysteme

1. Vertiefte Analyse des für Agroforstsysteme in Deutschland geltenden Rechtsrahmens: Ordnungs- und Förderrecht auf EU-, Bundes-, und Landesebene

Der Rechtsrahmen für Agroforstsysteme auf EU-, Bundes- und Landesebene zeichnet sich durch eine große Komplexität aus (vgl. Abb. 29). Neben förderrechtlichen Rahmenbedingungen sind insbesondere Vorgaben aus dem Naturschutzrecht, Wasserrecht, Forstrecht und Nachbarschaftsrecht zu beachten. Auf Pachtflächen sind zudem die sich aus dem Pachtvertrag ergebenden vertragsrechtlichen Verpflichtungen relevant. Die Regulierung im Mehrebenensystem (u.a. EU-, Bundes-, Landesebene) ist vielschichtig und bisher nicht hinreichend widerspruchsfrei und kohärent. Landesrechtliche Vorgaben variieren teilweise stark. Weiterführende Analyseergebnisse finden sich in Klimke und Zengerling (2025) sowie Klimke et al. (2024).

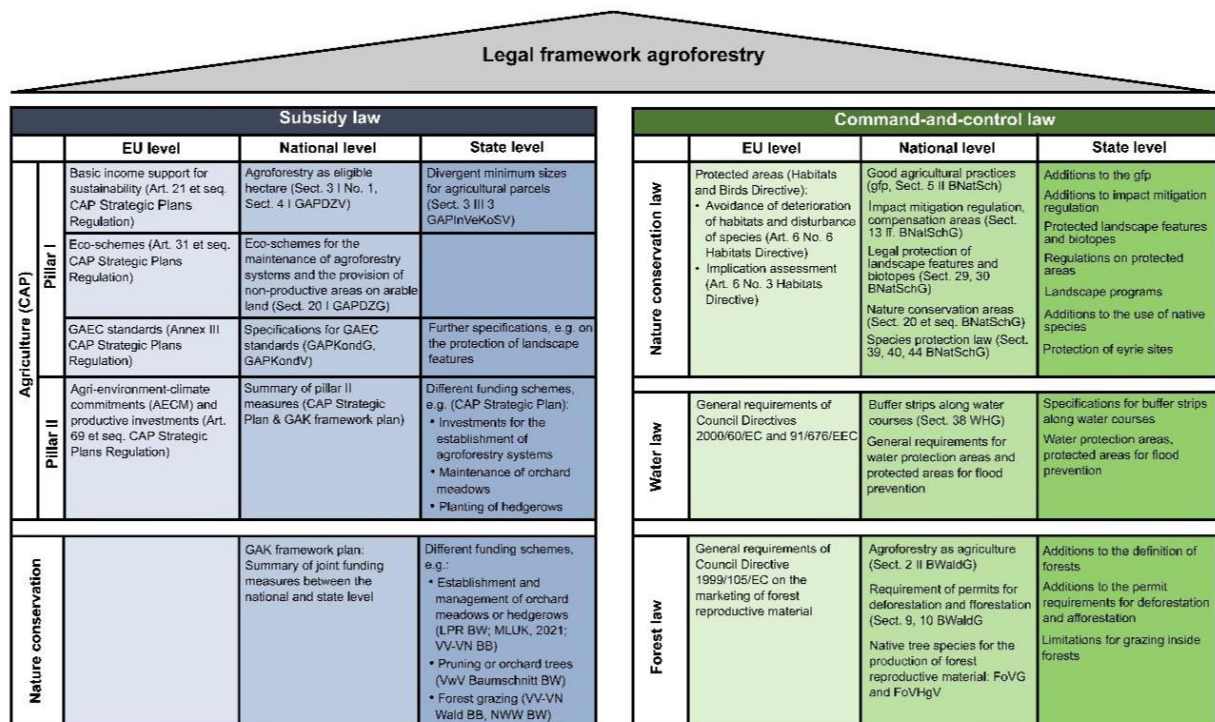


Abb. 29: Übersicht über den Rechtsrahmen der Agroforstwirtschaft.

Auf förderrechtlicher Ebene ist der Rechtsrahmen stark durch die Gemeinsame Agrarpolitik der Europäischen Union geprägt. In Deutschland sind seit der jüngsten Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik (2023 – 2027) erstmals ‚Agroforstsysteme‘ förderfähig, sofern sie die Voraussetzungen nach § 4 Abs. 2 GAPDZV erfüllen. Zudem wurde eine

Ökoregelung für die Beibehaltung der agroforstlichen Bewirtschaftungsweise (zurzeit 200 €/ha Gehölzstreifen, Erhöhung auf 600 €/ha in Diskussion) eingeführt. Im Rahmen der zweiten Säule bestehen je nach Bundesland verschiedene Fördermöglichkeiten für traditionelle Agroforstsysteme wie Streuobst sowie eine Investitionsförderung für die Etablierung von Agroforstsystemen. Eine Ko-Finanzierung zwischen Bund und Ländern für eine Investitionsförderung von Agroforstsystemen ist zudem im GAK-Rahmenplan vorgesehen.

Auf ordnungsrechtlicher Ebene sind insbesondere naturschutzrechtliche Rahmenbedingungen zu beachten. Traditionelle Agroforstsysteme und sonstige Gehölzstrukturen sind durch verschiedene naturschutzrechtliche Instrumente wie die naturschutzrechtliche Eingriffsregelung (§§ 13 ff. BNatSchG), den Schutz gesetzlich geschützter Landschaftsbestandteile und Biotope (§§ 29, 30 BNatSchG) und den Artenschutz (§§ 39, 44 BNatSchG) rechtlich geschützt. In Naturschutzgebieten und Landschaftsschutzgebieten ist zudem der Schutzzweck des jeweiligen Schutzgebiets maßgeblich. In FFH- und Vogelschutzgebieten gelten die Anforderungen der FFH- bzw. Vogelschutzrichtlinie. Sofern ein Agroforstsystem in Gewässernähe angelegt werden soll, sind zudem die Vorgaben des Wasserrechts zu beachten. Im Forstrecht sind gem. § 2 Abs. 2 Nr. 2 BWaldG Flächen unter einer agroforstlichen Nutzung vom Waldbegriff ausgenommen. Dies gilt jedoch nur für produktive Systeme, nicht für nicht-produktive Agroforstsysteme wie Hecken. Die Anlage von Agroforstsystemen in bestehenden Wäldern gilt demgegenüber als Waldumwandlung (§ 9 Abs. 1 S. 1 BWaldG) und unterliegt einem Genehmigungsvorbehalt. Dies gilt auch für die Einführung einer Beweidung in bestehenden Wäldern (Hutewald, Waldweide), die zudem auf Landesebene teils als Ordnungswidrigkeit eingestuft wird (z.B. § 83 Abs. 2 Nr. 16 LWaldG BW).

2. **Erarbeitung zentraler rechtlicher Möglichkeiten und Hürden AFS anzulegen und zu nutzen**
Basierend auf der Aufarbeitung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Agroforstsysteme, Auswertung bestehender Sekundärliteratur sowie Interviews und Workshops mit Akteuren aus Landwirtschaft, Naturschutz und Verwaltung haben wir die im Folgenden zusammengefassten zentralen rechtlichen Möglichkeiten und Hürden identifiziert:

Bestehende Möglichkeiten im derzeitigen Rechtsrahmen

Mit der jüngsten Reform der Gemeinsamen Agrarpolitik 2023 begegnete der europäische Gesetzgeber der Kritik einer fehlenden Definition und Förderung von Agroforstsystemen. Nunmehr normiert § 4 Abs. 2 GAPZDZV eine Definition von AFS (ausgerichtet auf produktive AFS, die der Rohstoffgewinnung oder Nahrungsmittelproduktion dienen) und macht sie auf Dauergrünland, Acker und Dauerkultur direktzahlungsfähig. Dabei bleibt der jeweilige förderrechtliche Status (Acker, Dauergrünland, Dauerkultur) erhalten und AFS sind vom förderrechtlichen Beseitigungsverbot für Landschaftselemente (GLÖZ 8) ausgenommen. Darüber hinaus umfasst die reformierte GAP eine Ökoregelung für die Beibehaltung von Agroforstsystemen. Die Förderhöhe lag zunächst bei 60 €/ha Gehölzstreifen, wurde ab 2024 auf 200 €/ha Gehölzstreifen erhöht, eine Erhöhung auf 600 €/ha ist in Diskussion. Einige Bundesländer haben außerdem eine Investitionsförderung eingeführt.

Durch die Aufnahme der Investitionsförderung in den GAK-Rahmenplan ist eine Kofinanzierung zwischen Bund- und Ländern möglich. Beide Fördermöglichkeiten, Ökoregelung und Investitionsförderung, sind grundsätzlich so angelegt, dass sie sich ergänzen sollen und eine Förderung sowohl für die Anlage als auch die Beibehaltung in Anspruch genommen werden kann. Da es bisher jedoch nur in wenigen Bundesländern eine Investitionsförderung gibt, mangelt es in weiten Teilen Deutschlands an einer komplementären Förderung von (modernen) AFS. Weitergehende Fördermöglichkeiten für traditionelle Agroforstsysteme wie Streuobstwiesen oder Hecken bestehen wie auch in den vergangenen Förderperioden auf Landesebene.

Im Naturschutzrecht sind aus naturschutzfachlicher Perspektive die bestehenden Schutzvorschriften für Gehölzstrukturen positiv hervorzuheben. Durch das Zusammenspiel von naturschutzrechtlicher Eingriffsregelung, Schutz von Landschaftsbestandteilen und Biotopen sowie Artenschutzrecht und weiterführende Schutzvorschriften in Schutzgebieten unterliegen bestehende Gehölzstrukturen einem umfassenden Schutz, der für den Erhalt dieser Strukturen aufgrund ihres Wertes für den Arten- und Biotopschutz erforderlich ist. Auch der Schutz von Streuobstwiesen als traditionelle Agroforstsysteme mit hohem kulturellem und naturschutzfachlichem Wert ist aus Naturschutzperspektive positiv einzuordnen. Zudem kann die bisherige Praxis der Einzelfallentscheidung für die Anlage von Agroforstsystemen auf aus naturschutzfachlich sensiblen Flächen wie Dauergrünland und in Naturschutzgebieten aus naturschutzfachlicher Perspektive als sinnvoll erachtet werden. Im Wasserrecht sind aus Perspektive der modernen Agroforstsysteme die in Brandenburg und Baden-Württemberg geschaffenen Ausnahmeregelungen für die Anlage und Nutzung von Agroforstsystemen positiv einzuordnen. Im Forstrecht besteht durch die Ausnahme der agroforstlichen Nutzung von der Walddefinition bereits eine weitgehende Rechtssicherheit für produktive Systeme.

Zentrale Hürden im derzeitigen Rechtsrahmen

Die oben genannten neuen Fördermöglichkeiten für AFS stellen zwar einen Fortschritt dar. Allerdings schränken eine Vielzahl rechtlicher Hürden die Anlage und Nutzung von Agroforstsystemen aus Betriebsperspektive und auch die Optimierung von Agroforstsystemen im Hinblick auf ihre Multifunktionalität erheblich ein:

1. Zu enge Definition von „Agroforstsystemen“ im Förderrecht, die nicht alle in der Praxis relevanten Agroforstsysteme abdeckt (z.B. Heckenpflanzungen mit dem primären Ziel, Schutz vor Wind- und Wassererosion zu bieten), Begrenzung der Ökoregelung 3 auf streifenförmige Systeme; also keine Kohärenz zwischen rechtlicher und naturwissenschaftlicher Definition von AFS
2. Fehlende bzw. zu geringe finanzielle Anreize für die Anlage und Beibehaltung von Agroforstsystemen (zu voraussetzungsvolle Förderbedingungen für die Ökoregelung 3 und die Investitionsförderung, fehlende Kombinierbarkeit der Ökoregelung mit anderen Fördermaßnahmen, fehlende Umsetzung der Investitionsförderung in den Bundesländern)

3. Generelle Struktur der Gemeinsamen Agrarpolitik mit einem Fokus auf flächengebundenen Direktzahlungen (wenig Raum für die Honorierung von Ökosystemleistungen, fehlende Beständigkeit von Förderprogrammen, Ausschluss von Privatpersonen und kooperativen Vereinigungen wie SoLaWis)
4. Rechtsunsicherheiten und Hemmnisse im Naturschutzrecht (u.a. keine Definition von ‚Agroforstsystemen‘ im BNatSchG, Sorge von Betrieben, angelegte Agroforstsysteme könnten als gesetzlich geschützter Landschaftsbestandteil oder Biotop unter Schutz gestellt werden, Unklarheiten in Bezug auf die Anwendung der naturschutzrechtlichen Eingriffsregelung auf Agroforstsysteme)
5. Begrenzung von naturschutzrechtlichen Instrumenten auf den Erhalt bestehender Gehölzstrukturen, keine Pflicht zur Neuanlage oder Pflege (d.h. begrenzte Möglichkeiten bestehender ordnungsrechtlicher Instrumente zum Erhalt und zur Vermehrung von Gehölzen in der Agrarlandschaft beizutragen)
6. Heterogene administrative Umsetzung (engagierte Mitarbeiter*innen in der Verwaltung vs. fehlendes Wissen bzgl. Agroforstsystemen, fehlende Umsetzung und Kontrolle von Instrumenten zum Schutz traditioneller Gehölzstrukturen)
7. Hemmnisse für Agroforstsysteme auf Pachtflächen (hoher Anteil an Pachtflächen und Pachtverträgen, die AFS gar nicht oder nicht angemessen regeln)

Weiterführende Ergebnisse sind in Klimke und Zengerling (2025) und Klimke et al. (2025) sowie in Bezug auf die Multifunktionalität von Agroforstsystemen in Klimke et al. (2024) veröffentlicht.

3. Erarbeitung konkreter Vorschläge zur Weiterentwicklung des Rechtsrahmens im Ordnungs- und Förderrecht

Basierend auf den identifizierten Hürden und Ergebnissen der Befragungen haben wir folgende kurz-, mittel- und langfristig umsetzbare Optionen zur Weiterentwicklung des Rechtsrahmens erarbeitet:

1. Kurzfristige Optionen: Primär umzusetzendes Ziel sollte es sein, Rechtssicherheit für alle in der Praxis relevanten Agroforstsysteme zu schaffen und ein erstes kohärentes, flächendeckendes finanzielles Anreizsystem für moderne und traditionelle AFS zu etablieren. Dafür sollten Gesetzgeber auf EU-, Bundes- und Landesebenen einerseits Fördermaßnahmen im Förderrecht kohärent weiterentwickeln und umsetzen. Andererseits sollten Bundes- und Landesgesetzgeber sowie Verwaltungen Rechtssicherheit in Bezug auf die Anlage, Ernte und Beseitigung von Agroforstsystemen im Ordnungsrecht und dessen Umsetzung schaffen.
2. Mittelfristige Optionen: Neben dem unmittelbaren Wunsch nach Rechtssicherheit und einem ersten Anreizsystem sollte – insbesondere auch im Hinblick auf den potenziellen Wert von Agroforstsystemen für Bestäuber – in einem nächsten Schritt die Multifunktionalität sowie die Skalierung von Agroforstsystemen im Fokus stehen. Der deutsche Gesetzgeber sollte dabei im Zuge der kommenden GAP-Periode ab 2027

insbesondere die Definition für Agroforstsysteme im Ordnungs- und Förderrecht widerspruchsfrei und komplementär so erweitern, dass sie moderne und traditionelle AFS erfasst und insgesamt die finanzielle Förderung für Anlage und Erhaltung von AFS vereinfachen und erhöhen.

3. Langfristig sollte die Struktur der Gemeinsamen Agrarpolitik so weiterentwickelt werden, dass die finanzielle Förderung nicht primär Flächenanteile, sondern Ökosystemleistungen honoriert.

Weiterführende Angaben zu den vorgeschlagenen Optionen finden sich zudem in den Publikationen des AP Recht und werden als Handlungsempfehlung gesondert publiziert.

Entwicklung des Agroforst-Planungstools

Das Planungstool ist über die Adresse www.agroforst-planungstool.de online zugänglich.

Es ist uns gelungen mit Hilfe der Firma Hydrocode ein intuitiv bedienbares Planungstool zu entwickeln, mit dem ein Agroforstsystem räumlich geplant und auf wissenschaftlicher Grundlage quantifiziert werden kann. Im Planungstool können, nach Auswählen der zu gestaltenden Fläche, verschiedene Baum- und Straucharten auf die Agrarfläche gezogen werden. Über einen Schieberegler kann der Nutzer das Wachstum über die nächsten 100 Jahre betrachten. Ein zusätzlicher Regler erlaubt die Betrachtung des Systems im Jahresverlauf.

Verschiedene Registerkarten erlauben es dem Nutzer den Beitrag ihres geplanten Systems einzusehen (Abb. 30). Darunter befindet sich:

- die jährliche gespeicherte oberirdische Biomasse bzw. der oberirdisch gespeicherte Kohlenstoff (Registerkarte Biomasse) aufsummiert für das gesamte System
- die potentiell beschattete Fläche des Systems im Jahresverlauf (Registerkarte Schatten)
- die Blühzeiträume der geplanten Arten inklusive der Blühabdeckung innerhalb eines Jahres und die jährliche Blütenanzahl/Pollenvolumen/Nektarvolumen (Registerkarte Blüten)
- die potentielle Anzahl an unterstützter Bienenarten im Jahresverlauf (Registerkarte Bienen) bzw. die potentielle Anzahl unterstützter Larven pro Jahr

Die rechtlichen Rahmenbedingungen können während der Planung anhand einer Übersicht zu Fördermöglichkeiten abgerufen werden. Zusätzlich ist für jedes Bundesland eine Handreichung hinterlegt, die dem Nutzer zusätzlich Informationen zur Verfügung stellt. Der Nutzer kann das geplante System speichern und zu einem späteren Zeitpunkt erneut hochladen und weiterbearbeiten. Des Weiteren wird während des Planungsprozesses eine Zusammenfassung der Systemeigenschaften erstellt.

Bisher stehen dem Nutzer die notwendigen Daten für 12 Baum- und Straucharten zur Verfügung. Im Rahmen der Anwendung-Software sind bereits die Möglichkeiten weitere Daten hinzuzufügen hinterlegt.

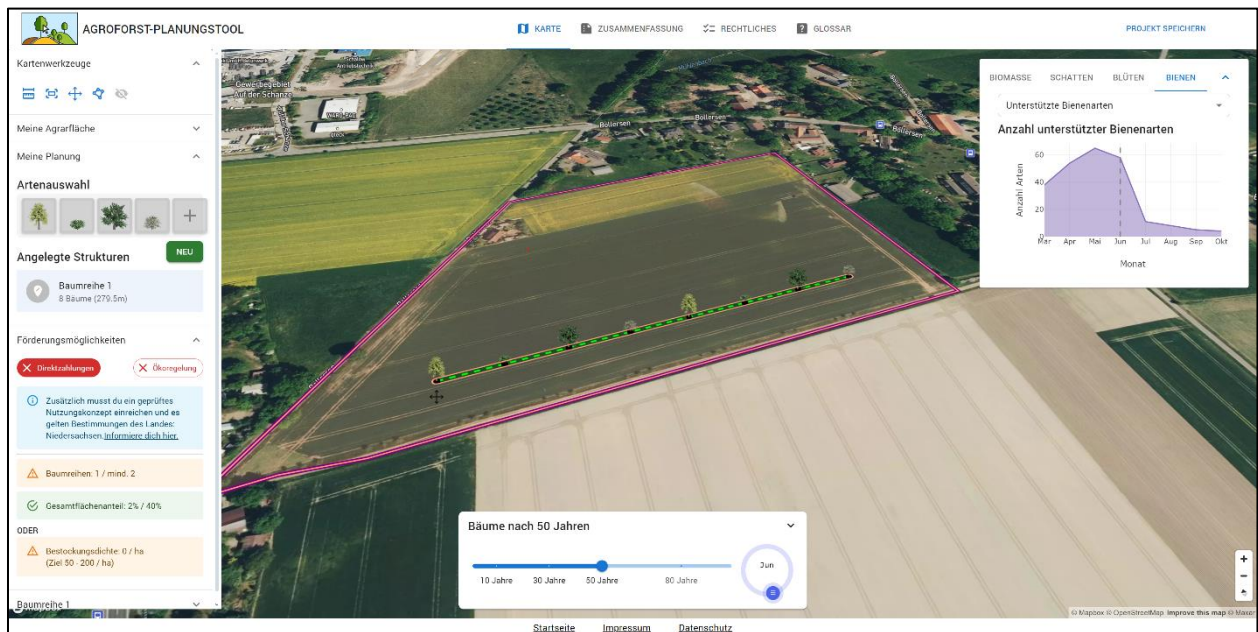


Abb. 30: Screenshot des Layouts des Agroforst-Planungstools (www.agroforst-planungstool.de).

5. Diskussion der Ergebnisse

Methodendiskussion

Im Rahmen dieses Projekts wurde terrestrisches Laserscanning (TLS) in Kombination mit Quantitativen Struktur-Modellen (QSMs) eingesetzt, um die dreidimensionale Struktur von Einzelbäumen in Agroforstsystemen (AFS) detailliert und zerstörungsfrei zu erfassen. Diese Methode hat sich insbesondere für die Ableitung von strukturellen Baumparametern wie Volumen, Biomasse oder Kronenausdehnung etabliert und bietet gegenüber traditionellen Messverfahren eine deutlich höhere Präzision bei gleichzeitig geringerer Invasivität.

Ein zentrales Anliegen der methodischen Arbeit war es, potenzielle Schwächen des TLS/QSM-Ansatzes zu identifizieren und gezielt zu kompensieren. Dabei stand insbesondere die systematische Unterschätzung feiner Verzweigungen bzw. die Überschätzung von Astdurchmessern bei zunehmendem Abstand zum Scanner im Fokus. Eine eigens durchgeführte Genauigkeitsstudie konnte diese Effekte erstmals unter kontrollierten Bedingungen quantifizieren und hat gezeigt, dass insbesondere dünne Äste bei größeren Scan-Distanzen in den Modellen aufgebläht dargestellt werden.

Diese Erkenntnisse wurden gezielt in die Planung weiterer Untersuchungen integriert: Bei der Simulation von Blütenverteilungen auf Kirschbäumen wurden Mindestdurchmesser von 3 cm

für die modellierten Äste festgelegt, um eine Verzerrung durch überzeichnete Strukturen zu vermeiden. Statt einer rein geometrischen Ableitung wurde mit gemessenen Blütendichten pro Ast und extrapolierten Strukturdaten gearbeitet, sodass eine robuste Schätzung der Blütenzahl pro Baum möglich wurde. Gleichzeitig konnte auf eine aufwendige Zählung der gesamten Baumkrone verzichtet werden. Diese Methodenkombination stellt eine deutliche Innovation gegenüber bisherigen Studien dar, in denen lediglich Teilbereiche der Krone aufgenommen und linear skaliert wurden.

Ein weiterer Vorteil der eingesetzten Methoden ergibt sich aus den günstigen Scanbedingungen in typischen AFS. Durch die geringere Baumdichte, die kontrollierte Baumgröße und die meist offene Landschaftsstruktur entstehen im Vergleich zum Wald deutlich weniger Verdeckungen im Laserscan. Dadurch ergibt sich eine besonders hohe Punktdichte und Genauigkeit der resultierenden Punktwolken. Auch der Mehraufwand für Mehrfachscans zur Reduktion von Verdeckungseffekten konnte im Vergleich zur Waldmessung verringert werden.

Insgesamt zeigt sich, dass TLS und QSMs in AFS nicht nur technisch gut einsetzbar sind, sondern bei angepasster Anwendung verlässliche, praxisnahe Ergebnisse liefern. Diese Methodenkombination bildet daher eine zukunftsweisende Grundlage für weiterführende Studien zur Quantifizierung ökologischer Leistungen in AFS.

Ergebnisdiskussion

Ein zentrales Ziel dieses Projekts war es, die ökologischen Leistungen von Einzelbäumen in Agroforstsystemen systematisch zu erfassen und quantifizierbar zu machen – insbesondere im Hinblick auf bestäubende Insekten. Durch die Entwicklung neuer allometrischer Modelle konnte ein zentraler Zusammenhang herausgearbeitet werden: Mit zunehmender Baumgröße steigt nicht nur die Holz- und Biomasseleistung exponentiell an, sondern auch die Zahl der produzierten Blüten – und damit das Angebot an Pollen und Nektar für Bestäuber.

Für Kirschbäume (*Prunus avium*) und Walnussbäume (*Juglans regia*) wurden artspezifische allometrische Funktionen entwickelt, die die Blütenanzahl, oberirdische Biomasse, den Kohlenstoffgehalt sowie verschiedene Nährstoffgehalte zuverlässig in Abhängigkeit vom Brusthöhendurchmesser (BHD) schätzen. Diese Funktionen beruhen auf strukturellen 3D-Daten in Kombination mit empirisch erhobenen Blütendichten bzw. Dichtewerten für Holz und Rinde. Die Einfachheit der Modelle (alle nutzen BHD als einzige Eingangsgröße) ermöglicht eine praxisnahe Anwendung, auch durch Landwirt*innen selbst – zum Beispiel bei der Planung oder Bewertung von bestehenden AFS.

Besonders relevant ist die Erkenntnis, dass große Bäume eine überproportionale Bedeutung für die Bereitstellung von Ökosystemleistungen (ES) haben. Simulationen zeigen, dass sich die Anzahl der Blüten pro Baum sowie die gespeicherte Biomasse und der Kohlenstoffgehalt mit steigendem BHD nicht linear, sondern exponentiell erhöhen. Beispielsweise enthält ein Baum mit einem BHD von 50 cm ein Vielfaches an Blüten und Kohlenstoff im Vergleich zu einem 10 cm dicken Baum – bei gleichzeitig geringerer Baumanzahl pro Flächeneinheit. Diese Befunde legen nahe, dass für die Maximierung von Bestäuberförderung und Kohlenstoffbindung große, langlebige Bäume besonders wertvoll sind. Im Vergleich der beiden untersuchten Arten zeigte

sich, dass Walnussbäume im Verhältnis zum BHD eine deutlich höhere Biomasse und einen höheren Kohlenstoffgehalt aufweisen als Kirschbäume. Letztere hingegen sind für die Bestäuberförderung besonders relevant, da sie eine hohe Blütendichte und Nektarproduktion aufweisen {Gisela Droege, 1984, Das Imkerbuch: Wissenswertes aus allen Teilgebieten der Imkerei}. Je nach Zielsetzung – z. B. Förderung von Bestäubern, Bindung von Kohlenstoff, Holzproduktion – kann also die Wahl der Baumarten gezielt angepasst werden. Auch eine Kombination verschiedener Arten in Baumreihen bietet sich an, um mehrere Zielgrößen gleichzeitig zu adressieren.

Die entwickelten Modelle und Methodiken ermöglichen nicht nur die Einschätzung von Ökosystemleistungen auf Baumebene, sondern können auch in Planungs- und Bewertungsprozesse auf Flächen- oder Landschaftsebene eingebunden werden. Die gewonnenen Erkenntnisse wurden in dem im Rahmen von INTEGRA entwickelten digitalen Online-Tool (<https://agroforst-planungstool.de>) integriert, welches die Auswahl geeigneter Arten und Pflanzkonfigurationen erleichtert und den Planungsprozess für landwirtschaftliche Betriebe unterstützt. Durch die Integration in ein solches Entscheidungshilfesystem könnten die wissenschaftlichen Ergebnisse unmittelbar in der Praxis wirksam werden – z. B. zur Förderung von Bestäubern, zur Optimierung von Pflanzabständen oder zur Abschätzung des Beitrags eines AFS zum Klimaschutz. Im Rahmen eines Folgeprojekts könnten weitere Baumarten und/oder zusätzliche ES (z. B. Frucht-ertrag, Laubmenge als Viehfutter, mikroklimatische Effekte) erfasst, modelliert und in dem Online-Tool integriert werden.

Schließlich zeigen die Ergebnisse auch deutlich, dass fundierte, quantitativ abgesicherte Aussagen zur Wirkung von Bäumen in AFS nicht nur für wissenschaftliche Fragestellungen, sondern auch für Politikberatung, Agrarförderung und Flächenplanung relevant sind. Besonders im Kontext von Maßnahmen zur Honorierung ökologischer Leistungen in der Landwirtschaft – etwa über Zahlungen für Ökosystemleistungen – könnten die vorliegenden Modelle einen Beitrag zur objektiven Quantifizierung liefern.

Interaktion zwischen Gehölzen und Ackerkulturen

Die Messungen des Mikroklimas zeigen für alle drei Versuchsjahre deutliche Effekte in der von der jeweiligen Baumreihe beeinflussten Ackerzone. Am meisten ausgeprägt ist hierbei die Reduktion der Einstrahlung in der Nähe der Bäume. Die beobachteten Muster lassen sich hierbei für beide Versuchsstandorte direkt aus der Höhe der Baumreihe und der räumlichen Orientierung der Baumreihe ableiten. Während der Beschattungsphasen wurden in allen drei Versuchsjahren Ende Juni verringerte Temperaturen in der Nähe der Bäume bei gleichzeitig leicht erhöhter relativer Luftfeuchtigkeit gemessen. Beides zusammen resultiert in einer Verringerung des Wasserdampfdefizits, was über eine verringerte Evapotranspiration zu einer erhöhten Wassernutzungseffizienz der jeweiligen Ackerfrucht geführt haben könnte. Eine experimentelle Überprüfung dieses auch in anderen Agroforstsystemen in Deutschland beobachteten Effekts (Kanzler et al., 2019, Markwitz et al., 2020) war mit den gegebenen Möglichkeiten in diesem Projekt nicht möglich, wäre aber eine wertvolle Ergänzung zur Plausibilisierung des Modells. Im Fall der gemessenen Windgeschwindigkeiten ergab sich ein weniger einheitliches Bild. Während die dichtere Baumreihe am Standort Freiburg die Windgeschwindigkeiten meist deutlich

reduziert hat, wurden am Standort Heidfeldhof neben der Baumreihe teilweise sogar höhere Windgeschwindigkeiten beobachtet als in der offenen Fläche. Dies erklärt sich auch aus der räumlichen Orientierung der Baumreihen. Während die Baumreihe am Standort Freiburg in etwa senkrecht zur Hauptwindrichtung ausgerichtet ist (Luv-Seite), stehen die Bäume am Heidfeldhof nahezu parallel zur Hauptwindrichtung. Deutlich reduzierte Windgeschwindigkeiten in Agroforstsystemen mit annähernd nord-südlicher Orientierung kurzumtriebiger Pappelstreifen wurden auch von Veldkamp et al. (2023) beobachtet.

Die am Standort Freiburg in 2022 gemessenen Bodenfeuchten wurden durch die wiederholten, vom Bewirtschafter mittels Regenkanone (unangekündigt) durchgeführten, Beregnungen stark beeinflusst. Da die Beregnungsmengen aufgrund der horizontalen Flugrichtung des Beregnungswassers vom Regensammler nicht erfasst werden konnten und weder die genauen Zeitpunkte noch die genauen Orte innerhalb der Ackerfläche bekannt waren, an denen beregnet wurde, konnten die Messreihen nicht adäquat interpretiert werden. Diese problematische Situation hat ihre Ursache unter anderem in allgemeinen Schwierigkeiten, die sich aus der Durchführung des Experiments auf einer im Praxisbetrieb bewirtschafteten Flächen ergaben, die zudem ca. 200 km entfernt von der durchführenden Institution liegt. Zu nennen sind hier Schwierigkeiten bei der Kommunikation und teils sehr kurze Vorlaufzeiten vor der Durchführung von Bewirtschaftungsmaßnahmen seitens des Landwirts. Unter diesen Gesichtspunkten bot der zweite Versuchsstandort, Heidfeldhof/Hohenheim, auf dem die Boden-/Wetterstationen planmäßig ab dem zweiten Projektjahr aufgebaut wurden, deutliche Vorteile. Da der Heidfeldhof als Versuchsstation an die Universität Hohenheim angegliedert ist, sind die Bewirtschafter der Ackerflächen dort besser auf die Bedarfe von Wissenschaftlern eingestellt. Inwiefern die in den Satellitenaufnahmen für den Standort Freiburg (Abbildung 4) parallel zur Baumreihe erkennbare Variabilität der Pflanzenentwicklung auf ungleichmäßige Bewässerung oder heterogene Bodenbedingungen zurückzuführen ist, kann anhand der geringen Anzahl an Bodensensoren (2 Messpunkte) nicht beurteilt werden. Senkrecht zur Baumreihe liefern die Fernerkundungsdaten jedoch ein stimmiges Bild in Bezug auf die zunächst verzögerte Blattentwicklung der Ackerfrucht (Juni bis Anfang Juli) und später (August) die verzögerte Seneszenz in der beschatteten Zone.

Das Pflanzenmonitoring in den drei Versuchsjahren zeigte unterschiedliche Empfindlichkeiten der drei Fruchtarten Sojabohne, Winterweizen und Mais gegenüber Beschattung. Auffallend war dabei die hohe Schattentoleranz von Winterweizen. Ein wichtiger Faktor ist hierbei sicherlich die geringere Konkurrenz um Licht während der frühen Entwicklungsstadien des Winterweizens im Vergleich zu den Sommerungen Sojabohne und Mais. Da die Lichtdurchlässigkeit der Baumreihe bis zum Zeitraum ihrer Blattentfaltung relativ hoch ist, waren die Entwicklung und das Wachstum des Winterweizens bis zum Entwicklungsstadium "Ende des Schossens" nur wenig durch die Bäume beeinträchtigt, so dass sich auf der gesamten Fläche eine annähernd gleiche Blattfläche ausbilden konnte. Erst danach, also während der Blüte und der Kornfüllungsphase des Getreides, kam es zu einer ausgeprägten Beschattung, die aber nicht mehr entscheidend für die spätere Ertragsbildung war. Geringe Ertragsrückgänge von Wintergetreide in Folge der Beschattung durch Baumreihen in einer Agroforstanlage in Südwestdeutschland werden auch von Koch et al. (2025) beschrieben.

Mit dem Modell XN5-AF liegt nun ein Simulationsmodell für Agroforstsysteme vor, das in seiner Detailliertheit so konzipiert wurde, dass es einen Kompromiss zwischen zu starker Vereinfachung und zu hoher Komplexität und damit eines zu großen Datenbedarfs für seine Parametrisierung und Initialisierung sucht. Der Vergleich der Simulationen mit den an den Versuchsstandorten gemessenen Daten zeigt nun, dass das Modell wesentliche Effekte der Interaktionen der Ackerpflanzen mit den angrenzenden Baumreihen zwar qualitativ richtig abbilden kann. Die Schwierigkeiten liegen allerdings in der quantitativen Vorhersage der Ausprägung der Effekte, sowohl auf wichtigsten Randbedingungen des Pflanzenwachstums wie Einstrahlung, Bodentemperatur und –feuchte, als auch auf die Wachstumsprozesse selbst. Während Einstrahlung und Bodentemperatur vom Modell mit akzeptabler Genauigkeit beschrieben werden, zeigte sich am Standort Heidfeldhof im Versuchsjahr 2023, dass die Bodenfeuchte zunächst zwar ebenfalls adäquat simuliert wurde, die Wasserentnahme aus dem Boden in der Nähe der Bäume während einer niederschlagslosen Austrocknungsperiode von Mai bis Mitte Juli aber deutlich überschätzt wurde (Abbildung 6). Eine entsprechende Analyse für den Standort Freiburg konnte aus den oben genannten Gründen nicht durchgeführt werden. Für eine Bewertung der Eignung des gewählten Modellansatzes zur Beschreibung der Wurzelkonkurrenz zwischen Bäumen und Ackerfrüchten sollten aber weitere Modell-Daten Vergleiche unter verschiedenen Wetter- und Standortbedingungen durchgeführt werden. Ein besseres Verständnis der zugrundeliegenden Mechanismen bei der Wasseraufnahme im Konkurrenzbereich von Baum- und Ackerfruchtwurzeln könnte mit Hilfe von Messungen von Wurzelverteilung und Transpirationsraten (Saftflussmessungen) erzielt werden, eine Aufgabe für künftige Forschungsprojekte. Die beobachteten Beschattungseffekte auf die Blattentwicklung und Ertragsbildung konnten vom Modell nachvollzogen werden, wobei die unterschiedlichen Empfindlichkeiten der drei Fruchtarten gegenüber den angrenzenden Baumreihen in den Simulationen weniger ausgeprägt waren als beobachtet. So wurden für Winterweizen starken Ertragseinbußen in der Nähe der Baumreihe simuliert, was den Resultaten der Ertragsmessung widerspricht. Ob hierbei die Folgen der Beschattung auf die Photosyntheseleistung von Winterweizen oder eher die Wurzelkonkurrenz um Wasser und Nährstoffe vom Modell überschätzt wurden, kann ohne ein detailliertes Messprogramm nicht entschieden werden. Möglicherweise spielt die Adaption der nahe der Bäume im Schatten aufgewachsenen Pflanzen an niedrigere Strahlungsintensitäten eine Rolle, die sich in veränderten ökophysiologischen Parametern wie dem spezifischen Blattgewicht oder der Lichtnutzungseffizienz zeigen könnten (Li et al., 2024). Entsprechende Mechanismen sind im Modell jedoch nicht berücksichtigt.

Da XN5-AF in die Modell- Bibliothek Expert-N eingebunden ist, können auf einfache Weise Module zur Simulation weiterer Ökosystemfunktionen mit dem Agroforstmodell verknüpft werden, z.B. verschiedene Routinen zur Simulation des Kohlen- und Stickstoffkreislaufs. Die in dieser Studie durchgeführten Szenario-Simulation zeigen exemplarisch Möglichkeiten von XN5-AF auf, Effekte von Baumreihen auf N-Emissionen und Humusbildung zu simulieren und differenziert zu analysieren. In den ausgewählten Szenarien wurden dabei sowohl positive als auch negative Effekte der Baumreihen vorhergesagt. Während die Humusbildung durch Baumreihen im Mittel leicht begünstigt wurde, zeigten sich bei der simulierten Nitratauswaschung aus Agroforstflächen im Durchschnitt um 5 kg (NO₃-N) ha⁻¹ erhöhte Werte im Vergleich zum Offenlandanbau ohne Bäume. Der größte Teil hiervon stammte dabei aus dem Bereich der Ackerfläche, der unmittelbar an den Baumstreifen angrenzt. Ursache hierfür ist das reduzierte

Pflanzenwachstum in unmittelbarer Nähe zu den Bäumen und daraus folgend eine reduzierte N-Aufnahme. Bei homogener Düngung der gesamten Fläche, wie im Modell angenommen, resultiert hieraus ein N-Überschuss im Boden in der Nähe der Bäume. Daraus lässt sich die Handlungsempfehlung an Landwirte ableiten in der Nähe von Gehölzstrukturen weniger zu düngen als in wenig- bzw. nicht-beschattete Zonen. Die im Rahmen der Szenario-Simulationen simulierten Ertragseffekte verdeutlichen die Bedeutung der räumlichen Anordnung von Gehölzstreifen in Agrarflächen, um die Produktivität der Ackerfrüchte zu optimieren bzw. konkurrenzbedingte Ertragsverluste zu minimieren. Für eine abschließende Bewertung der Eignung des Modellansatzes für die Simulation der zu erwartenden Effekte werden jedoch weitere Versuche mit unterschiedlichen Randbedingungen (Fruchtarten, Sorten, Wetter, Bodeneigenschaften, Höhe, Zusammensetzung und räumliche Anordnung Bäume) benötigt.

6. Nutzbarkeit der Ergebnisse

Die große Zahl an relevanten Ergebnissen können sowohl in der Wissenschaft als auch von Praktikern, Planern, Entscheidungsträgern und politischen Akteuren genutzt werden. Dies ist zum einen durch die vielfältigen Formen des Wissenstransfers gewährleistet (siehe Kapitel 10). Dazu können die wissenschaftlichen Erkenntnisse wie die entwickelten allometrischen Funktionen zur Abschätzung der Biomasse und des Kohlenstoffspeicherungspotenziales von Seite der Wissenschaft ebenso wie von Seite der Praxis genutzt werden. Gleiches gilt für die Eignung der Gehölzarten zur Unterstützung verschiedener Wildbienenarten. Mit diesen Informationen können optimal auf Wildbienen angepasste AFS entworfen werden. Andere Ergebnisse sind speziell für die wissenschaftliche Community relevant.

Die Erkenntnisse in Bezug auf die rechtlichen Rahmenbedingungen sind sowohl für wissenschaftliche Fragestellungen von Relevanz als auch für die Praktiker, die AFS umsetzen wollen. Darüber hinaus können sie genutzt werden, um bei einer Reform der derzeitigen Förderbedingungen zu unterstützen.

Eine umfangreiche Nutzung und ein Wissenstransfer der gewonnen Erkenntnisse ist über das Planungstool besonders gut möglich.

Für die Praxis relevante Ergebnisse des Teilprojekts INTEGRA-UHOH liegen prinzipiell in der Schaffung der Möglichkeit mit Hilfe des neuen Agroforst-Simulationsmodells XN5-AF Effekte von Beschattung der Ackerfläche durch Gehölzstrukturen auf die Erträge verschiedener Ackerfrüchte und auf andere Ökosystemfunktionen wie N-Emissionen, Kohlenstoffbindung oder Verdunstung quantitativ abzuschätzen. Allerdings ist Expert-N, und damit auch das eingebettete Modell XN5-AF, eine komplexe Forschungssoftware, für deren sinnvolle Verwendung detaillierte Vorkenntnisse und ausführliche Einarbeitung notwendig sind. Die Voraussetzungen für einen direkten Transfer in Praxisanwendungen sind deshalb zurzeit noch nicht gegeben. Die Erarbeitung einer praxistauglichen Anwendungssoftware bedarf noch erheblicher

Softwareentwicklungsarbeit und war im Rahmen von INTEGRA-UHOH nicht vorgesehen. Es ist allerdings geplant das Agroforstmodell über die Homepage von Expert-N (<https://expert-n.uni-hohenheim.de/>) bis Mitte 2026 frei verfügbar zu machen. Der Support des Modells wird mindestens bis 2030 gesichert sein.

7. Gegenüberstellung der ursprünglich geplanten zu den tatsächlich erreichten Zielen; Hinweise auf weiterführende Fragestellungen

Die geplanten Ziele wie sie in Kapitel 1.2 aufgeführt sind, können den erreichten Zielen wie folgt gegenübergestellt werden.

Wissenschaftliche Erkenntnisse

Die wissenschaftlichen Ergebnisse wurden sehr erfolgreich von den beteiligten Projektpartnern in Fachzeitschriften sowie in Form von Fachbeiträgen auf nationalen und internationalen Konferenzen veröffentlicht (siehe Kapitel 10). Dazu flossen viele der gewonnenen Ergebnisse in das Agroforst-Planungstool ein. Dabei konnten die zu Beginn gesteckten Ziel noch deutlich übertroffen werden.

Wissensaustausch

Der Wissensaustausch konnte noch intensiver als ursprünglich geplant durchgeführt werden, so dass dieser Teil als sehr erfolgreich eingestuft werden kann (vgl. Kapitel 10). Der Wissensaustausch fand u.a. im Rahmen von mehreren Workshops und Expertengesprächen statt und war ein fundamentaler Bestandteil des Projektes. Dazu konnten die Ergebnisse des Projektes im Rahmen der Abschlussveranstaltung von Beenovation präsentiert werden. Ein daran anschließender Workshop zum Agroforst-Planungstool rundete diese Wissenstransfermaßnahme ab. Ein weiterer Workshop zum Thema „Agroforstsysteme im Recht – wie geht es weiter?“ fand am 28. November 2024 ebenfalls im Rahmen einer Veranstaltung von Beenovation statt.

Planungstool

Das Planungstool konnte erfolgreich mit Hilfe einer Fachfirma umgesetzt werden. Das Tool ist online frei verfügbar und somit für Praktiker, Planer, Entscheidungsträger und politische Akteure nutzbar. Die ökologische Wirkung und Auswirkungen auf die Insektengemeinschaft in verschiedenen Szenarien kann prognostiziert und nutzerfreundlich dargestellt werden. Eine weitere Entwicklung des Tools, vor allem in Richtung einer größeren Auswahl an Gehölzen ist erstrebenswert.

Rechtliche Handlungsmöglichkeiten und Empfehlungen

Im Rahmen der Publikation von Klimke et al. (2024) konnten Hürden bezüglich der Implementierung von AFS im Ordnungs- und Förderrecht identifiziert werden. Anknüpfend an die identifizierten Hürden im Ordnungs- und Förderrecht werden konkrete Lösungsvorschläge für die europäische, bundes- und landesrechtliche Ebene aufgezeigt.

Mit der Fertigstellung einer lauffähigen und einsatzbereiten Version des Agroforst-Modells XN5-AF und der Schaffung einer Datengrundlage für die Durchführung von Fallstudien an den beiden Untersuchungsstandorten Freiburg/Biengen und Heidfeldhof/Hohenheim wurden zwei wesentliche Ziele erreicht. Gleichzeitig, und wenig überraschend, wurde aber auch deutlich, dass für eine umfassende Parametrisierung, Überprüfung und Verbesserung des Modells weit umfangreichere Datensätze vonnöten wären, als in diesem Forschungsprojekt erhoben werden können. Es muss dabei auch festgehalten, dass sich bei der Datenerhebung einige unvorhergesehene Schwierigkeiten ergeben haben und deshalb nicht alle Datensätze in der erwünschten Vollständigkeit vorliegen. Zu nennen sind hier die wenig dokumentierten Bewässerungen am Standort Freiburg aufgrund derer die dortigen Bodenfeuchtemessungen kaum interpretierbar sind sowie Datenlücken im zweiten Versuchsjahr am Standort Hohenheim, bedingt durch den Weggang des Bearbeiters des Projekts. Entgegen der ursprünglichen Planung wurde die Messkampagne deshalb im dritten Projektjahr am Standort Hohenheim fortgeführt.

Darüber hinaus kann die zu leistende Entwicklungsarbeit am neuen Agroforstmodell noch keinesfalls als abgeschlossen angesehen werden. So haben die Vergleiche von Simulation und Beobachten teils erhebliche Diskrepanzen offenbart und weiterführende Fragestellungen aufgezeigt, wie z.B. die Modellierung der direkten Konkurrenz zwischen Bäumen und Ackerfrüchten um die unterirdischen Ressourcen Wasser und Nährstoffe oder die Anpassung der physiologischen Merkmale der Ackerfrüchte an schattige Wuchsbedingungen. Um die Ursachen für die Abweichungen zwischen Modell und Beobachtung besser verstehen zu können und daraus Wege für Anpassungen und Verbesserungen der Modellgleichungen ableiten zu können, sind allerdings deutlich umfangreichere Messprogramme vonnöten, als es in diesem Projekt vorgesehen und möglich gewesen war.

Die Einbindung von Ergebnissen aus dem Teilprojekt INTEGRA-UHOH in das INTEGRA Planungstool konnte während der Projektlaufzeit von INTEGRA nicht realisiert werden, da es wegen Schwierigkeiten bei der kontinuierlichen Besetzung der bewilligten Stelle zu erheblichen Verzögerungen kam.

8. Zusammenfassung

Im Rahmen des Forschungsprojekts INTEGRA wurden verschiedene methodische Ansätze eingesetzt, um die Rolle von Agroforstsystem und den darin enthaltenen Gehölzstrukturen zur Unterstützung von bestäubenden Insekten in Agrarlandschaften zu untersuchen. Ziel war es,

das ökologische Potenzial und die Bedeutung von Hecken für den Erhalt und die Förderung besonders von Wildbienenpopulationen besser zu verstehen.

3D-Erfassung und Untersuchung von Bäumen und Sträuchern in AFS

Im Rahmen des Forschungsprojekts wurden in mehreren Feldaufnahmen über 500 Bäume und Sträucher dreidimensional erfasst. Mithilfe eines terrestrischen Laserscanners wurden detaillierte Quantitative Structure Models (QSM) erstellt, die zur Berechnung von Ast- und Kronenstrukturen sowie zur Modellierung von Blütenanzahl genutzt wurden. Eine Genauigkeitsprüfung des Laserscannings wurde durchgeführt, um die Messgenauigkeit unter kontrollierten Bedingungen zu validieren. Diese Untersuchungen führten zu relevanten Erkenntnissen über das mögliche Maß an Abweichungen bei der Volumen- und Längenbestimmung von Ästen. Zur Quantifizierung der Biomasse und des Kohlenstoffgehalts wurden ergänzende Proben zur Bestimmung von Holzdichte, Rindenstärke und Nährelementgehalt an Walnussbäumen (*Juglans regia*) entnommen. Auf Basis der QSMs wurden volumetrische Informationen und verschiedene Baumparameter bestimmt. Ein AFS-Modell zeigt, dass pro Hektar mit 15 Bäumen erhebliche Mengen an Trockenbiomasse und gespeicherten Kohlenstoff möglich sind. Für die Wildkirsche (*Prunus avium* L.), eine häufig genutzte Baumart in Agroforstsystemen, wurden allometrische Modelle entwickelt, die Biomasseschätzungen in diesen Systemen ermöglichen. Dazu wurden 70 Bäume mittels Laserscanning untersucht. Die Modelle zeigen gute Anpassungen für Volumen, Trockenbiomasse und Nährstoffgehalt und sind somit wertvolle Werkzeuge zur Optimierung von Managementpraktiken. Zusätzlich wurde eine Methodik entwickelt, um die Blütenressourcen der Wildkirsche zu quantifizieren. Ein innovativer Ansatz kombiniert Pollenmessungen mit manuellen Blütenzählungen und 3D-Daten, was eine genaue Hochrechnung der Blütenanzahl von Zweigen auf ganze Bäume erlaubt. Große Bäume wurden als besonders wertvoll für die Bestäuber erkannt, da sie unverhältnismäßig viele Blütenressourcen bieten. Die gewonnenen Erkenntnisse dieser Studien können wesentliche Beiträge zur Diskussion über die Bedeutung großer Bäume im Naturschutz leisten und weiterhin die Basis für die Entwicklung von allometrischen Modellen für andere Baumarten bilden.

Agrargehölze und ihr Einfluss auf bestäubende Insekten

Ein Schwerpunkt lag auf der Nutzung von Emergenzfallen, um bodennistende Bienen in Hecken und angrenzenden Feldern zu erfassen. Ergänzend wurden Pollenanalysen durchgeführt, um das Nahrungsspektrum verschiedener Bienenarten zu bestimmen. Auch das Potenzial von Totholzzweigen als Niststruktur für stängelnistende Wildbienen wurde untersucht. Die Analyse der strukturellen Merkmale der Hecken–wie Gehölzdiversität und Ausrichtung–ergänzte diese Untersuchung. Zur Bewertung des Landschaftseinflusses auf die Wildbienenpopulationen wurde ein Bee-Friendliness-Index entwickelt, der die Landnutzung im 500-Meter-Umkreis um die Hecken einbezieht. Weitere Untersuchungen konzentrierten sich auf das Blühangebot und die Totholzquantität als lokale Habitatmerkmale. Die Bedeutung einzelner Gehölzarten wurde

durch standardisierte Streifkescher-Fänge sowie die Erfassung von Blütenanzahl, Pollen- und Nektargehalt analysiert. Mithilfe geografischer Informationssysteme konnten die Landschaftsstruktur und Habitat-Konnektivität erfasst werden. Die Studienergebnisse zeigen, dass Hecken wertvolle Nahrungsbiotope für zahlreiche Wildbienenarten darstellen. Das Angebot geeigneter Niststrukturen bleibt jedoch unzureichend erforscht und sollte in zukünftigen Managementstrategien stärker berücksichtigt werden. Eine Liste heimischer Gehölze, bestehend aus 60 potentiell von Wildbienen genutzten Arten, führte zur Ermittlung der blütenbesuchenden Bienengemeinschaften bei den 24 häufigsten Arten. Insgesamt wurden 14.000 Bienen und 120 Arten dokumentiert, wobei 97% der Bienenarten Generalisten sind. Unterschiede in der Attraktivität und dem Förderungspotenzial dieser Pflanzenarten für Bienenarten wurden festgestellt. Es konnten auch Schlüsselarten identifiziert werden, die zur Kontinuität der Blühphasen beitragen. Eine weitere Studie analysierte das Potenzial von Hecken, die Anzahl an Wildbienen in angrenzenden Feldern zu erhöhen. Die Ergebnisse zeigten, dass blühende Heckenpflanzen die Präsenz von Wildbienen in Felder um bis zu 25 Meter erhöhen können; darüber hinaus konnten keine positiven Effekte nachgewiesen werden. Diese Erkenntnisse betonen die Bedeutung von Heckenstrukturen in der Landschaft.

Modellierung von AFS

Im Modellierungsteil wurde das Agroforst-Simulationsmodell XN5-AF überarbeitet und basierend auf Messungen des Mikroklimas, der Bodenfeuchte und Bodentemperatur sowie eines Pflanzenwachstum-Monitorings an zwei Versuchsstandorten (Freiburg/Biengen und Heidfeldhof/Hohenheim) bzw. während drei Untersuchungsjahren (2022-24) parametrisiert. Simulationen für die örtlichen Gegebenheiten während drei Versuchsjahre wurden durchgeführt und mit den Beobachtungen verglichen. Die Simulationen unterscheiden sich dabei hinsichtlich der standörtlichen und klimatischen Bedingungen, der angebauten Fruchtarten (Sojabohnen, Winterweizen, Mais) sowie der Höhe, Lichtdurchlässigkeit und der räumlichen Orientierung der vorhandenen Baumreihen. Es hat sich gezeigt, dass das Modell prinzipielle Mechanismen der Interaktion von Gehölzstreifen und angrenzender Ackerfläche qualitativ richtig abbilden kann, insbesondere den Schattenwurf und die Reduktion der Einstrahlung in der beschatteten Zone. Die Schwierigkeiten liegen allerdings in der Vorhersage der Ausprägung der Effekte. So wird z.B. die Konkurrenzstärke der Baumwurzeln bei der Wasserentnahme aus dem Boden in der an die Baumreihe direkt angrenzenden Ackerzone am Standort Heidfeldhof deutlich überschätzt. Die Simulationen, wie auch die Beobachtungen, zeigen unterschiedliche Empfindlichkeiten der drei Fruchtarten gegenüber den angrenzenden Baumreihen auf, wobei Mais am stärksten auf Beschattung reagiert. Die vergleichsweise geringe Empfindlichkeit von Winterweizen gegenüber Beschattung wird dabei vom Modell allerdings nicht angemessen wiedergegeben. Neben der Überschätzung eines möglichen Wasserentzugs aus der Ackerfläche durch die benachbarten Bäume können hier auch im Modell fehlende Mechanismen wie die Anpassung physiologischer Parameter der Ackerfrucht (Spezifisches Blattgewicht, Lichtnutzungseffizient) ursächlich sein. Szenariorechnungen über einen Zeitraum von 18 Jahren, auch für nicht experimentell erfasste

Versuchsbedingungen, bestätigen hingegen die unterschiedlichen Beobachtungen für Weizen und Mais. Die im in diesem Teilprojekt erzielten Ergebnisse zeigen das Potential einer mechanistischen Modellierung der Interaktionen im Grenzbereich von Baumreihen und Ackerflächen auf. Für eine umfassende Parametrisierung, Überprüfung und Verbesserung des Modells werden allerdings noch weit umfangreichere Datensätze benötigt, als innerhalb des Projekts erhoben werden konnten.

Analyse und Weiterentwicklung des Rechtsrahmens für Agroforstsysteme

Eine umfassende Analyse des Rechtsrahmens für Agroforstsysteme zeigte die Komplexität des Themas auf EU-, Bundes- und Landesebene. Fördermöglichkeiten wurden beleuchtet, jedoch auch rechtliche Hürden identifiziert. Zu den vorgeschlagenen Möglichkeiten gehören eine engere Definition von Agroforstsystemen im Förderrecht und verstärkte finanzielle Anreize für ihre Anlage und Beibehaltung. Rechtsunsicherheiten im Naturschutzrecht und die geforderte Harmonisierung rechtlicher Definitionen bedürfen ebenfalls zahlreicher Maßnahmen. Die Ergebnisse dieses Projekts werden sowohl zur Verbesserung der Managementpraktiken in der Landwirtschaft als auch zur Stärkung des ökologischen Verständnisses des Potenzials von Agroforstsystemen beitragen. Zukünftige Forschungsarbeiten sollten sich darauf konzentrieren, allometrische Modelle für weitere relevante Baumarten zu entwickeln, um die Diversität und Multifunktionalität von Agrarökosystemen zu fördern.

Entwicklung des Agroforst-Planungstools

Im Rahmen von INTEGRA wurde ein intuitiv bedienbares Planungstool (www.agroforst-planungstool.de) entwickelt, mit dem ein Agroforstsystem räumlich geplant und auf wissenschaftlicher Grundlage quantifiziert werden kann. Im Planungstool können, nach Auswählen der zu gestaltenden Fläche, verschiedene Baum- und Straucharten auf die Agrarfläche gezogen werden. Über einen Schieberegler kann der Nutzer das Wachstum über die nächsten 100 Jahre betrachten. Ein zusätzlicher Regler erlaubt die Betrachtung des Systems im Jahresverlauf. Dazu ist es möglich vielfältige Informationen wie beispielsweise das Kohlenstoffspeicherungspotenzial des gepflanzten Systems oder auch die Menge an produziertem Pollen und Nektar für ausgewählte Gehölzarten über die Ausgabe der App zu bekommen.

9. Literaturverzeichnis

- Bianchi, F., Booij, C. J. H., & Tscharntke, T. (2006). Sustainable pest regulation in agricultural landscapes: A review on landscape composition, biodiversity and natural pest control. *Proceedings of the Royal Society B-Biological Sciences*, 273, 1715– 1727.
- Böhm C., Tsonkova P., Zehlius-Eckert W. (2017a). Wie können Agroforstsysteme praktikabel in das deutsche Agrarförderrecht eingebunden werden? Beitrag in: Bäume in der

- Land(wirt)schaft - von der Theorie in die Praxis, Tagungsband mit Beiträgen des 5. Forums Agroforstsysteme, Senftenberg, 7-16
- Boetzel F.A., Krimmer E., Krauss J., Steffan-Dewenter I. (2019) Agri-environmental schemes promote ground-dwelling predators in adjacent oilseed rape fields: Diversity, species traits and distance-decay functions. *Journal of Applied Ecology* 56: 10–20.
- Böhm C., Tsonkova P., Albrecht E., Zehlius-Eckert W. (2017b). Zur Notwendigkeit einer kontrollfähigen Definition für Agroforstschläge, *Agrar- und Umweltrecht* 1: 7-12
- Böhm C., Tsonkova P., Zehlius-Eckert W. (2017a). Wie können Agroforstsysteme praktikabel in das deutsche Agrarförderrecht eingebunden werden? Beitrag in: *Bäume in der Land(wirt)schaft - von der Theorie in die Praxis, Tagungsband mit Beiträgen des 5. Forums Agroforstsysteme, Senftenberg, 7-16*
- Brittain, C., Kremen, C., Klein, A.M. (2013). Biodiversity buffers pollination in changing environmental conditions. *Global Change Biology* 19:540-547.
- Brittain, C., Williams, N., Kremen, C., Klein, A.M. (2013). Synergistic effects of non-*Apis* bees and honey bees for pollination services. *Proceedings of the Royal Society B* 280:20122767.
- Choudhury, B., Ahmed, N., Idso, S., Reginato, R., Daughtry, C., 1994. Relations between evaporation coefficients and vegetation indices studied by model simulations. *Remote Sensing of Environment* 50, 1–17.
- Dainese, M., Martin, E.A., Aizen, M.A., Albrecht, M., Bartomeus, I., Bommarco, R., Carvalheiro, L.G., Chaplin-Kramer, R., Gagic, V., Garibaldi, L.A., Ghazoul, J., Grab, H., Jonsson, M., Karp, D.S., Kennedy, C.M., Kleijn, D., Kremen, C., Landis, D.A., Letourneau, D.K., Marini, L., Poveda, K., Rader, R., Smith, H.G., Tscharnkte, T., Andersson, G.K.S., Badenhauer, I., Baensch, S., Bezerra, S.D.M., Bianchi, F.J.J.A., Boreux, V., Bretagnolle, V., Caballero-Lopez, B., Cavigliasso, P., Četković, A., Chacoff, N.P., Classen, A., Cusser, S., da Silva e Silva, F.D., de Groot, G.A., Dudenhöffer, J.H., Ekroos, J., Fijen, T., Franck, P., Freitas, B.M., Garratt, M.P.D., Gratton, C., Hipólito, J., Holzschuh, A., Hunt, L., Iverson, A.L., Jha, S., Keasar, T., Kim, T.N., Kishinevsky, M., Klatt, B.K., Klein, A.M., Krewenka, K.M., Krishnan, S., Larsen, A.E., Lavigne, C., Liere, H., Maas, B., Mallinger, R.E., Pachon, E.M., Martínez-Salinas, A., Meehan, T.D., Mitchell, M.G.E., Molina, G.A.R., Nesper, M., Nilsson, L., O'Rourke, M.E., Peters, M.K., Plečaš, M., Potts, S.G., Ramos, D.L., Rosenheim, J.A., Rundlöf, M., Rusch, A., Sáez, A., Scheper, J., Schleuning, M., Schmack, J., Sciligo, A.R., Seymour, C., Stanley, D.A., Stewart, R., Stout, J.C., Sutter, L., Takada, M.B., Taki, Tamburini, G., Tschumi, M., Viana, B.F., Westphal, C., Willcox, B.K., Wratten, S.D., Yoshioka, A., Zaragoza-Trello, C., Zhang, W., Zou, Y., Steffan-Dewenter, I. (2019). A global synthesis reveals biodiversity-mediated benefits for crop production. *Science advances*, 5(10), eaax0121
- Garibaldi, L.A., Steffan-Dewenter, I., Winfree, R., Aizen, M.A., Bommarco, R., Cunningham, S.A., Kremen, C., Carvalheiro, L.G., Harder, L.D., Afik, O., Bartomeus, I., Benjamin, F., Boreux, V., Cariveau, D., Chacoff, N.P., Dudenhöffer, J.H., Freitas, B.M., Ghazoul, J., Greenleaf, S., Hipólito, J., Holzschuh, A., Howlett, B., Isaacs, R., Javorek, S.K., Kennedy, C.M., Krewenka, K., Krishnan, S., Mandelik, Y., Mayfield, M.M., Motzke, I., Munyuli, T., Nault, B.A., Otieno, M., Petersen, J., Pisanty, G., Potts, S.G., Rader, R., Ricketts, T.H., Rundlöf, M., Seymour, C.L., Schuepp, C., Szentgyörgyi, H., Taki, H., Tscharnkte, T., Vergara, C.H., Viana, B.F., Wanger, T.C., Westphal, C., Williams, N., Klein, A.M. 2013. Wild pollinators enhance fruit set of crops regardless of honey-bee abundance. *Science* 339:1608-1611.
- Gayler, S., Wang, E., Priesack, E., Schaaf, T., Maidl, F.-X. (2002): Modeling biomass growth, N-Uptake and phenological development of potato crop. *Geoderma* 105: 367–383.

- Goulson D, Lye GC, Darvill B (2008) Decline and conservation of bumble bees. *Annual Review of Entomology* 53:191–208.
- Griess VC, Uhde B, Ham C and Seifert T (2016) Product diversification in South Africa's commercial timber plantations: a way to mitigate investment risk. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, 78:2, 145-150
- Hallmann CA, Sorg M, Jongejans E, Siepel H, Hofland N, Schwan H, et al. (2017) More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLoS ONE* 12(10): e0185809. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185809>
- Hansen, S., Jensen, H.E., Nielsen, N.E., Svendsen, H., (1991): Simulation of nitrogen dynamics and biomass production in winter wheat using the Danish simulation model DAISY. *Fertilizer research* 27, 245–259
- Heinlein, F., Duan, X. and Priesack, E. (2020): Modelling competition for water between tree and crop roots in an agroforestry system. *EGU2020-8581* <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-8581>
- Hudewenz, A. & Klein, A.M. 2015. Red mason bees cannot compete with honey bees for floral resources in a cage experiment. *Ecology and Evolution* 5:5049-5056.
- Hudewenz, A., Klein, A.M. 2013. Competition between honey bees and wild bees and the role of nesting resources in a nature reserve. *Journal of Insect Conservation* 17:1275-1283.
- IPBES (2016). The assessment report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services on pollinators, pollination and food production. Bonn, Germany
- Johnsson, H., Bergstrom, L., Jansson, P.-E., Paustian, K. (1987): Simulated nitrogen dynamics and losses in a layered agricultural soil. *Agric Ecosyst Environ.* 1987; 18: 333–356
- Kanzler, M., Böhm, C., Mirck, J., Schmitt, D., Veste, M., 2019. Microclimate effects on evaporation and winter wheat (*Triticum aestivum* L.) yield within a temperate agroforestry system. *Agroforest Syst* 93, 1821–1841.
- Klein, A.M., Fornoff, F., Mupepele, A.C., Boreux, V. Pufal, G. 2018. Relevance of wild and managed bees for human well-being. *Current Opinion in Insect Science* 26:82-88.
- Klein, A.M., Vaissière, B.E., Cane, J., Steffan-Dewenter, I., Cunningham, S.A., Kremen, C., Tscharntke, T. 2007. Importance of pollinators in changing landscapes for world crops. *The Proceedings of the Royal Society of London, Series B.* 274:303-313.
- Knoke T, Paul C, Hildebrandt P, Calvas B, Castro L.M, Hartl F, Döllerer M, Hamer U, Windhorst D, Wiersma Y.F, Curatola Fernandez Giulia F, Obermeier W.A, Adams J, Breuer L, Mosandl R, Beck E, Weber M, Stimm B, Haber W, Fürst C, Bendix J (2016) Compositional diversity of rehabilitated tropical lands supports multiple ecosystem services and buffers uncertainties. *Nature Communications* 7: 11877.
- Koch, O., Moore, J., Hörl, J., Cormann, M., Gayler, S., Lewandowski, I., Marhan, S., Munz, S., Pflugfelder, M., Piepho, H.-P., Schneider, J., von Cossel, M., Weinand, T., Winkler, B., Zikeli, S., Schweiger, A.H., 2025: Sheltered by trees: long-term yield dynamics in temperate alley cropping agroforestry with changing water availability. *Agronomy for Sustainable Development* (in press).
- Li, Y., Zhao, J., Ma, H., Pu, L., Zhang, J., Huang, X., Yang, H., Fan, G., 2024. Shade tolerance in wheat is related to photosynthetic limitation and morphological and physiological acclimations. *Front. Plant Sci.* 15, 1465925.

- Markwitz, C., Knohl, A., Siebicke, L., 2020. Evapotranspiration over agroforestry sites in Germany. *Biogeosciences* 17, 5183–5208. <https://doi.org/10.5194/bg-17-5183-2020>
- Morhart C., Oelke M., Springmann S., Spiecker H., Konold W. (2012): Wertholzproduktion in Agroforstsystemen - Chancen für Bewirtschafter und Umwelt. *Archiv f. Forstwesen u. Landsch.ökol.* 46 (4): 179-185.
- Morhart C., Sheppard J.P., Schuler J.K., Spiecker H. (2016): Above-ground woody biomass allocation and within tree carbon and nutrient distribution of wild cherry (*Prunus avium* L.) – a case study. *Forest Ecosystems*, doi: 10.1186/s40663-016-0063-x.
- Morhart, C., Schindler, Z., Frey, J., Sheppard, J.P., Calders, K., Disney, M., Morsdorf, F., Raumonen, P., Seifert, T. (2024) Limitations of estimating branch volume from terrestrial laser scanning. *European Journal of Forest Research* 143, 687–702, doi: 10.1007/s10342-023-01651-z.
- Nahm M., Morhart C., Spiecker H., Sauter U.H. (2014): Agroforst ganz am Rande. Böschungen und Feldraine für die Wertholzproduktion nutzen. *Naturschutz und Landschaftsplanung*, 46 (12): 377–381.
- Paul C., Griess V.C., Havardi-Burger N., Weber M. (2014) Timber-based agrisilviculture improves financial viability of hardwood plantations: a case study from Panama Agroforestry Systems. *Agroforestry Systems* 89(2): 217-235.
- Potts S.G., Biesmeijer J.C., Kremen C., Neumann P., Schweiger O., Kunin W.E. (2010): Global pollinator declines: trends, impacts and drivers. *Trends in Ecology and Evolution*. 25(6):345–353.
- Potts S.G., Imperatriz-Fonseca V., Ngo H. T., Aizen M. A., Biesmeijer J. C., Breeze T. D., ... & Vanbergen A. J. (2016). Safeguarding pollinators and their values to human well-being. *Nature*, 540(7632), 220-229.
- Priesack, E. (2006): Expert-N – Dokumentation der Modellbibliothek. FAM-Bericht 60, Hieronymus Verlag, München. Verfügbar über <https://expert-n.uni-hohenheim.de/fileadmin/einrichtungen/expert-n/ExpertN-Modellbibliothek.pdf>
- Rettie, F. M., Gayler, S., KD Weber, T., Tesfaye, K., and Streck, T. (2022). Climate change impact on wheat and maize growth in Ethiopia: A multi-model uncertainty analysis. *PloS one*, 17(1), e0262951.
- Seibold, S., Gossner, M.M., Simons, N.K. et al. (2019): Arthropod decline in grasslands and forests is associated with landscape-level drivers. *Nature* 574, 671–674
- Simunek, J., Huang, K., and Genuchten, M.T. (1998): The HYDRUS code for simulating the one-dimensional movement of water, heat, and multiple solutes in variably-saturated media. Version 6.0. (No. Techn. Report 144). U.S. Salinity Laboratory, USDA, ARS.
- Valido, A.; Rodríguez-Rodríguez, M.C.; Jordano, P. (2019). Honeybees disrupt the structure and functionality of plant-pollinator networks. *Scientific Reports* 9:4711.
- 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., Seserman, D.-M., Shao, G., Siebicke, L., Svoboda, N., Swieter, A., Carminati, A., Freese, D., Graf, T., Greef, J.M., Isselestein, J., Jansen, M., Karlovsky, P., Knohl, A., Lamersdorf, N., Priesack, E., Wachendorf, C., Wachendorf, M., Corre, M.D., 2023. Multifunctionality of temperate alley-cropping agroforestry outperforms open cropland and grassland. *Commun Earth Environ* 4, 20.

- Venjakob C, Klein AM, Ebeling., Tschardt T, Scherber C (2016). Plant diversity increases spatio-temporal niche complementarity in plant-pollinator interactions. *Ecology and Evolution* 6:2249-2261.
- Wang, E., Engel, T. (2000): SPASS: a generic process-oriented crop model with versatile windows interfaces. *Environmental Modelling & Software* 15: 179–188.
- Woodcock BA, Isaac NJ, Bullock JM, Roy DB, Garthwaite DG, Crowe A, et al. (2016): Impacts of neonicotinoid use on long-term population changes in wild bees in England. *Nature Communications*. 2016;7:12459
- Zare, H., Weber, T.K.D., Ingwersen, J., Nowak, W., Gayler, S., Streck, T., 2022. Combining Crop Modeling with Remote Sensing Data Using a Particle Filtering Technique to Produce Real-Time Forecasts of Winter Wheat Yields under Uncertain Boundary Conditions. *Remote Sensing* 14, 1360.

10. Übersicht über alle im Berichtszeitraum vom Projektnehmer realisierten Veröffentlichungen zum Projekt (Printmedien, Newsletter usw.), bisherige und geplante Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse

Publikationen

- Schindler Z., Morhart C., Sheppard J.P., Frey J., Seifert T. (2023a) In a nutshell: exploring single tree parameters and above-ground carbon sequestration potential of common walnut (*Juglans regia* L.) in agroforestry systems. *Agroforestry Systems* **97**, 1007–1024. (DOI: [10.1007/s10457-023-00844-0](https://doi.org/10.1007/s10457-023-00844-0))
- Schindler Z., Seifert T., Sheppard J.P., Morhart C. (2023b) Allometric models for above-ground biomass, carbon and nutrient content of wild cherry (*Prunus avium* L.) trees in agroforestry systems. *Annals of Forest Science* **80**, 28. (DOI: <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01196-6>)
- Morhart C., Schindler Z., Frey J., Sheppard J.P., Calders K., Disney M., Morsdorf F., Raunonen P., Seifert T. (2024) Limitations of estimating branch volume from terrestrial laser scanning. *European Journal of Forest Research* 143, 687–702. (DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-023-01651-z>)
- Klimke M., Plieninger T., Zengerling C. (2024). Allowing for the multifunctionality of agroforestry systems—lessons from a legal perspective with a focus on Germany. *Earth System Governance* 22, 100223. (DOI: <https://doi.org/10.1016/j.esg.2024.100223>)
- Klimke M., Plieninger T. & Zengerling C. (2025) Social–ecological traps in agroforestry and the role of law. *Sustainability Science*. <https://doi.org/10.1007/s11625-024-01623-1>
- Klimke M., Plieninger T., Zengerling C. (2023) Agroforstsysteme als multifunktionale Landnutzungsoption – Chancen und Hemmnisse aus rechtlicher Sicht. 9. *Forum Agroforstsysteme*, Freiburg im Breisgau, Deutschland (Tagungsband)

- Fornoff F., Klein A.-M. (2023) Attraktivität von Gehölzarten für kulturpflanzenbestäubende Wildbienen in Deutschland. 9. *Forum Agroforstsysteme*, Freiburg im Breisgau, Deutschland (Tagungsband)
- Morhart C., Schindler Z., Sheppard J.P., Seifert T. (2023) Biomasse und Kohlenstoffspeicherungspotenzial von Walnuss- und Kirschbäumen in Agroforstsystemen. 9. *Forum Agroforstsysteme*, Freiburg im Breisgau, Deutschland (Tagungsband)
- Fornoff F., Nottebrock H., Klein, A.-M. (2024) Hecken in Agrarlandschaften bieten attraktive Blütenressourcen aber wenige Nisthabitate für Wildbienen. (Fachforum Bienen und Landwirtschaft — Strategiekonferenz Konferenz der Deutschen Agrarforschungsallianz Strategiekonferenz: Bienen und Landwirtschaft | Berlin, 17. – 18. Januar 2024)
- Nottebrock H. (2024) Dornröschen erwacht: die verborgenen Schätze der Heckenlandschaften für Wildbienen. In: *Nachrichten der Gesellschaft für Ökologie*, 54.2024.
- Klimke M. (2024). Transformation der Landwirtschaft. Was ist die Rolle des Rechts? Initiativ – Welche Rechte hat die Erde? Rundbrief 171 Mai 2024, S. 12 – 13.
- Schindler Z., Larysch L., Fornoff F., Kröner K., Obladen N., Klein A.-M., Seifert T., Morhart C. (2025) Flower power: Modelling floral resources of wild cherry (*Prunus avium* L.) for bee pollinators based on 3D data, *Ecology*, DOI: 10.1002/ecy.70103

Publikationen in Vorbereitung

- Schindler et al.: Ein Manuskript zur Publikation in einem internationalen Fachjournal, bei dem die NCPs (nature's contributions to people) in Agroforstsystemen thematisiert werden sollen, ist in Vorbereitung
- Gayler S. et al.: Ein Manuskript zur Publikation der in INTEGRA-UHOH erarbeiteten Ergebnisse in einer Fachzeitschrift ist in Vorbereitung. Das Manuskript umfasst eine detaillierte Beschreibung des neuen Modells XN5-AF sowie Fallstudien zu den beiden Versuchsstandorten.
- Klimke et al.: Publikation zu Akteursperspektiven auf Agroforstsysteme und die rechtlichen Rahmenbedingungen (englischsprachig)
- Klimke et al.: Publikation zu leverage points in Bezug auf die Skalierung von Agroforstsystemen und die Rolle der rechtlichen Rahmenbedingungen (englischsprachig)
- Klimke et al.: Publikation zu Optionen für die Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Agroforstsysteme (deutschsprachig)
- Klimke et al.: Publikation zum Vergleich der rechtlichen Rahmenbedingungen für Agroforstsysteme auf Landesebene (deutschsprachig)

Konferenzbeiträge

- Morhart, C., Klein, A.-M., Fornoff, F., Gayler, S., Zengerling, C., Seifert, T. (2021) „Integration von Bäumen und Sträuchern in Agrarlandschaften zur Förderung von Bestäuberinsekten – Das Projekt INTEGRA. 8. Forum Agroforstsysteme, Bernburg, Deutschland. [Link](#)
- Morhart C., Klein, A.-M., Fornoff F., Gayler S., Zengerling C., Seifert T. (2021) „Integration von Bäumen und Sträuchern in Agrarlandschaften zur Förderung von Bestäuberinsekten - Das Projekt INTEGRA“; 8. Forum Agroforstsysteme am 29.-30.09.2021 in Bernburg (Saale)
- Morhart, C., Schindler, Z., Sheppard, J., Bohn Reckziegel, R., Kahle, H.-P., Seifert, T. (2022) „Common walnut (*Juglans regia* L.) – a promising tree species for agroforestry systems“. EURAF 2022, Nuoro, Italien. [Link](#)
- Schindler, Z., Morhart, C., Frey, J., Sheppard, J.P., Seifert, T. (2023) “Critical overestimation of branch volume and underestimation of branch length escalates with increasing distance between TLS scan position and scanned branches”. SilviLaser 2023, London, UK. [Link](#)
- Fornoff, F., Klein, A.-M. (2023) „Attraktivität von Gehölzarten für kulturpflanzenbestäubende Wildbienen in Deutschland“. 9. Forum Agroforstsysteme, Freiburg im Breisgau, Deutschland. [Link](#)
- Klimke, M., Plieninger, T., Zengerling, C. (2023) „Agroforstsysteme als multifunktionale Landnutzungsoption – Chancen und Hemmnisse aus rechtlicher Sicht“. 9. Forum Agroforstsysteme, Freiburg im Breisgau, Deutschland. [Link](#)
- Morhart, C., Schindler, Z., Sheppard, J.P., Seifert, T. (2023) „Biomasse und Kohlenstoffspeicherungspotenzial von Walnuss- und Kirschbäumen in Agroforstsystemen“. 9. Forum Agroforstsysteme, Freiburg im Breisgau, Deutschland. [Link](#)
- Fornoff, F. (2023) „Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten (INTEGRA)“, Deutsche Agrarforschungsallianz (DaFa): Fachforum Bienen und Landwirtschaft, Julius-Kühn-Institut, Berlin.
- Klimke, M. (2023) „Gehölzstrukturen in der Agrarlandschaft für Landwirtschaft und Naturschutz – Eine sozial-ökologische Perspektive auf den Rechtsrahmen für Agroforstsysteme“. In: J. Stadler (Hrsg.). Treffpunkt Biologische Vielfalt XXI. Interdisziplinärer Forschungsaustausch im Rahmen des Übereinkommens über die biologische Vielfalt. BfN Schriften 661, S. 87 – 89.
- Klimke, M., Zengerling, C. (2023) A pathway for transforming agroforestry law from an Earth System Law perspective. Radboud Conference on Earth System Governance, Nijmegen, Niederlande.
- Morhart C., Schindler Z., Sheppard J., Larysch E., Kröner K., Obladen N., Fornoff F., Seifert T. (2024) „Agroforstsysteme: Win-Win für Klimaschutz und Biodiversität“ Vortrag am 14.03.2024 im Rahmen der Konferenz der Deutsche Agrarforschungsallianz (DaFa); Berlin
- Morhart C., Schindler Z., Obladen N., Kröner K., Seifert T., Nottebrock H., Fornoff F., Klein A.-M., Klimke M., Zengerling C., Morandage S., Sebastian Gayler S. (2024) „Das INTEGRA-Projekt“ Vortrag am 17.10.2024 im Rahmen der Beenovation Abschlussveranstaltung in Berlin

- Schindler Z., Morhart C., Obladen N., Kröner K., Seifert T., Nottebrock H., Fornoff F., Klein A.-M., Klimke M., Zengerling C., Morandage S., Sebastian Gayler S. (2024) „Das Agroforst-Planungstool“ Vortrag am 17.10.2024 im Rahmen der Beenovation Abschlussveranstaltung in Berlin
- Klein A.-M. (2024) „Bedeutung von Bienen für unsere Ernährung“ Vortrag am 17.10.2024 im Rahmen der Beenovation Abschlussveranstaltung in Berlin
- Klimke, M. (2024) „Agroforstsysteme in Ostfriesland? Rechtliche Rahmenbedingungen und die Perspektive von Akteuren aus Naturschutz und Landwirtschaft“. In: Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz (Hrsg.). Junge Naturschutz-Forschung in Niedersachsen – Ergebnisse des 2. Kolloquiums für Nachwuchswissenschaftlerinnen und -wissenschaftler an der NNA. Naturschutz in Praxis und Forschung, Berichte aus der Alfred Toepfer Akademie für Naturschutz, Heft 1/2024, Schneverdingen, S. 18 – 21.
- Klimke, M. (2024) Actor perspectives on agroforestry law in Germany. EURAF 2024, Brno, Tschechien.
- Fornoff F., Nottebrock H., Klein, A.-M. (2024) Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten (INTEGRA). Deutsche Agrarforschungsallianz (dafa): Fachforum Bienen und Landwirtschaft 17.01.2024, Berlin
- Fornoff F., Nottebrock H., Klein, A.-M. (2024) Deciphering the influence of hedges on the habitat suitability of ground nesting bees. (53. GfÖ24, Freising, TUM, Germany, 9–13 September 2024)

Vorträge

- Morhart C. (2022) „Einführung in Agroforstsysteme“ Vortrag am 05.05.2022 für die Bolland Regionalgruppe Waldshut-Tiengen in Stühlingen- Bettmaringen
- Morhart C. (2022) „Einführung in Agroforstsysteme“ Vortrag auf der „Soil Evolution“-Tagung am 02.06.2022 in Uttenweiler
- Morhart C. (2022) „Ästung von Wertholzbäumen“ Vortrag mit Praxisvorführung am 29.06.2022 auf den Ökofeldtagen in Giessen
- Klimke, M. (2022) „Gehölzstrukturen in der Agrarlandschaft für Landwirtschaft und Naturschutz – Eine sozial-ökologische Perspektive auf den Rechtsrahmen für Agroforstsysteme“. Aktuelle Biodiversitätsforschung – Eine interdisziplinäre Tagung für Nachwuchswissenschaftler*innen zur Umsetzung des Übereinkommens über die Biologische Vielfalt, Vilm, Deutschland
- Morhart C. (2022) „Einführung in Agroforstsysteme“ Vortrag am 04.07.2022 an der Uni Hohenheim im Rahmen des bodenwissenschaftlichen Kolloquiums
- Zengerling, C., Klimke, M. (2022). Aufwind für Agroforstsysteme? Aktuelle Entwicklungen, Chancen und Hemmnisse im europäischen und deutschen Recht, Ringvorlesung „Recht der Nachhaltigen Nutzung Natürlicher Ressourcen“, Center for Law and Sustainability (CLS), Universität Luzern, Schweiz.
- Morhart C., Schindler Z., Seifert T. (2022) „Integration von Habitatstrukturen in landwirtschaftlich genutzte Flächen zur Förderung von Bestäuberinsekten (INTEGRA)“ Online-Vortrag im Rahmen der Beenovation- Auftaktveranstaltung am 14.10.2022

- Morhart C. (2023) „Einführung in Agroforstsysteme“ Online-Vortrag am 18.01.2023 an der Hochschule Geisenheim
- Morhart C. (2023) Teilnahme an der Podiumsdiskussion am 27.03.2023 im Rahmen des „Sustainability Forum“ in Offenburg
- Morhart C., Schindler Z., Seifert T., Fornoff F., Klein A.-M., Zare H., Gayler S., Klimke M., Zengerling C. (2023) „Das INTEGRA-Projekt“ Vortrag am 01.03.2023 im Rahmen des Be-enovation Vernetzungstreffen in Berlin
- Morhart C. (2023) „Agroforstsysteme - eine Chance für die Landwirtschaft“ Vortrag am 19.09.2023 im Rahmen der Fachtagung Klimawandel in Offenburg
- Morhart C. (2023) „Bäume und Sträucher in Agroforstsystemen“ Vortrag am 25.10.2023 im Rahmen der LEL-Fortbildung „Agroforst“ in Schwäbisch Gmünd
- Morhart C. (2023) „Agroforstwirtschaft: eine zukunftssträchtige Landnutzungsform!“ Vortrag am 17.11.2023 im Rahmen der Vortragsreihe der Naturforschenden Gesellschaft in Freiburg
- Klimke, M. (2023) „Rechtliche Rahmenbedingungen der Agroforstwirtschaft in Deutschland“. Vortrag im Rahmen des Online-Seminars „Was braucht es, um Agroforstsysteme in Baden-Württemberg zu fördern?“ der Flächenagentur Baden-Württemberg.
- Klimke, M. (2024) „Rechtliches zu Agroforstsystemen in Deutschland“. Ringvorlesung Agroforst, Universität Göttingen.

Workshops, Praxistage und Ausstellungen

- Klimke M. (2024) Agrarumweltmaßnahmen, Agroforstsysteme & Co – Ökologische Potenziale und rechtliche Rahmenbedingungen am 28.11.2024, in Kooperation mit der EurAG und dem Projekt FarmerBeeWild, Online
- Klimke M. (2024) Gesprächsrunde mit verschiedenen Agroforst-Expert*innen zu Optionen zur Weiterentwicklung der rechtlichen Rahmenbedingungen für Agroforstsysteme am 7.2.2025, Online,
- Schindler Z. und Morhart C. (2024) Teilnahme an der Woche der Umwelt in Berlin mit einem Stand zur Präsentation des INTERGA-Projektes
- Morhart C. (2024) Agroforstsysteme als wichtiger Bestandteil einer zukunftsfähigen Landwirtschaft; Beitrag im Rahmen des Be-enovation Workshops am 28.11.2024 in Kooperation mit der EurAG und dem Projekt FarmerBeeWild, Online

Praxismerkbblätter und Handreichungen

Im Rahmen des Projektes wurden zwei Praxismerkbblätter erstellt

1. Rechtliche Rahmenbedingungen für Agroforstsysteme
2. Hecken: Bedeutsame Lebensräume für Wildbienen

diese sind über die BLE abrufbar.

Darüber hinaus wurden Handreichungen für die 16 Bundesländer zu Fördermöglichkeiten für die Anlage und Pflege eines Agroforstsystems erstellt. Für jedes Bundesland steht jeweils eine Handreichung zum Förderrecht und zum Ordnungsrecht zur Verfügung. Ein Download ist unter anderem unter folgender Adresse möglich:

<https://www.integra.uni-freiburg.de/de/publikationen/>

Pressemitteilungen

- Lebensraum für Bestäuberinsekten verbessern (11.06.2021)
<https://www.pr.uni-freiburg.de/pm/2021/lebensraum-fuer-bestaebuereinsekten-verbessern>
- Vorstellung des Projektes INTEGRA in einem Artikel auf der Website der Universität Freiburg am 11.06.2021
- Vorstellung des Projektes INTEGRA auf der Plattform „Gabot.de“ am 15.06.2021
- Forschung: Lebensraum für Bestäuberinsekten verbessern (15.06.2021)
<https://www.gabot.de/ansicht/forschung-lebensraum-fuer-bestaebuereinsekten-verbessern-410644.html>
- Beitrag zum Artikel „Äcker zu Alleen“ (DER TAGESSPIEGEL vom 24.09.2021)
- INTEGRA auf dem 9. Forum Agroforstsysteme (05.10.2023)
<https://www.beenovation.de/post/integra-auf-dem-9-forum-agroforstsysteme>
- Abschlussveranstaltung der Vernetzungs- und Transfermaßnahme „Beenovation“ (17.10.2024)
<https://www.beenovation.de/post/pressemitteilung-abschlussveranstaltung-der-vernetzungs-und-transferma%C3%9Fnahme-beenovation>

Interviews

- Fornoff F. (2024) Warum derzeit schwarze Insekten-Wolken durch die Region Freiburg schwirren. In: Badische Zeitung.2024.
- Fornoff F. (2024): Beenovation Podcast „Folge 5: Biodiversität fördern“ Interview zum INTEGRA-Projekt im Rahmen der Beenovation Podcast-Reihe ([Link](#)).

Studentische Abschluss- und Hausarbeiten

- **BSc-Arbeiten:**
 - Analyse und Quantifizierung der Verteilung der Blüten am Bergahorn (*Acer pseudoplatanus*), 2023.
 - Untersuchungen zu Anzahl und Verteilung von Blüten an Ästen der Kultur-Birne (*Pyrus communis* L.), 2022.
 - Untersuchungen zur Anzahl und Verteilung von Blüten an *Prunus avium*“, 2023.
 - Feldgehölze als Nisthabitat für Bienen und Wespen, 2024.

- Beute- und Nistplatzpräferenzen der neozoischen Grabwespe *Isodontia mexicana* (Hymenoptera: Sphecidae), 2022.
- Die Bedeutung regionaler Belange für die Etablierung von Agroforstsystemen: Eine vergleichende Analyse auf Länderebene, 2022.
- Synergien und Konflikte bei der Etablierung von Agroforstsystemen in Schutzgebieten, 2024.
- Rechtliche Förderinstrumente für die Etablierung von Agroforstsystemen in Deutschland und der Schweiz - Eine ländervergleichende Analyse, 2024.
- Allometrische Modelle zur Schätzung der verholzten oberirdischen Biomasse der Straucharten *Cornus mas* und *Ligustrum vulgare* und die Verteilung ihrer Biomasse in den Durchmesserklassen: Eine Fallstudie für den Standort Müllheim am Oberrhein, 2023.
- Herausforderungen und Verbesserungsmöglichkeiten in der Förderung von Agroforstsystemen, 2025.
- **MSc-Arbeiten:**
 - Die Wertigkeit verschiedener Feldgehölzarten für Wildbienen in der Agrarlandschaft, 2022.
 - Diversity of wild bees nesting in and visiting flowers of hedgerow plants along a heterogeneity gradient in agricultural landscapes, 2022.
 - Hedgerow plants as nesting and foraging habitats for wild bees in agricultural landscapes, 2022.
 - Agroforestry-Related Subsidy Law and Policy in Germany and the United States: A Comparative Legal Analysis, 2022
 - Anzahl und Verteilung der Blätter an Ästen von Apfel- und Birnbäumen, 2023.
 - Assessment of woody landscape features in selected states of Germany, 2023.
 - Hecken als Nisthabitat und Nahrungsressource für Bienen, 2023.
 - Analysis of the relations between honey bee colony mass and land use and weather, 2024.
 - Einfluss des Alters von Blühflächen auf die Diversität nahrungssuchender Wildbienen, 2024.
 - The influence of hedgerows and their flowering resources on the abundance, richness, and composition of bee communities in adjacent agricultural fields, 2024.
- **Dissertationen**
 - Frau Dr. Schindler hat Ihre Promotion, die u.a. durch das Projekt INTEGRA gefördert wurde, mit dem Prädikat „Summa cum Laude“ abgeschlossen.
- **Hausarbeiten**
 - Aktuelles Thema: „Analyse rechtlicher und fachlicher Definitionen von Agroforstsystemen“, 2022

PR Allgemein

Für das INTEGRA-Projekt wurden zur Sichtbarmachung des Projektes und zur Unterstützung der Kommunikation der Projektergebnisse folgende Maßnahmen durchgeführt:

- Erstellung eines Projektlogos (siehe Titelseite und Kopfzeile)
- Erstellung der Projektwebsite: www.integra.uni-freiburg.de
- Erstellung einer Social-Media-Präsenz
- Erstellung eines frei verfügbaren Planungs-Tools: <https://www.agroforst-planungs-tool.de/>