

Bodenkundliche Untersuchungen in streifenförmigen Agroforstsystemen

Probennahmen im
Transektdesign &
Bodenparameter mit
Methoden-
empfehlungen



Impressum

Herausgeber:
Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V.
Karl-Liebknecht-Straße 102 – Haus B, 03046 Cottbus
Tel.: +49 (0) 355 752 132 43
Mail: info@defaf.de
Internet: www.defaf.de

1. Auflage: August 2022

Autorinnen und Autoren

Eva-Maria L. Minarsch
Justus-Liebig-Universität Gießen
Professur für Ökologischen Landbau
Karl-Glöckner-Straße 21 C
35394 Gießen

Thomas Middelani
Initiative für Landwirtschaftlichen
WissensAustausch
Institut für Landschaftsökologie
Heisenbergstraße 2
48149 Münster

Dr. Christian Böhm
Brandenburgische Technische Universität
Cottbus-Senftenberg
Fachgebiet Bodenschutz und Rekultivierung
Konrad-Wachsmann-Allee 6
03046 Cottbus

Dr. Philipp Weckenbrock
Justus-Liebig-Universität Gießen
Professur für Ökologischen Landbau
Karl-Glöckner-Straße 21 C
35394 Gießen

Prof. Dr. Florian Wichern
Hochschule Rhein-Waal
Professur für Bodenkunde und
Pflanzenernährung
Marie-Curie-Straße 1
47533 Kleve

Dr. Leonie Göbel
Deutscher Fachverband für
Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V.
Karl-Liebknecht-Straße 102, Haus B
03046 Cottbus

Gutachter

Prof. Dr. Andreas Gattinger
Justus-Liebig-Universität Gießen
Professur für Ökologischen Landbau
Karl-Glöckner-Straße 21 C
35394 Gießen

Dr. Rico Hübner
Technische Universität München
Lehrstuhl für Strategie und Management der
Landschaftsentwicklung
Emil-Ramann-Straße 6
85356 Freising

Prof. Dr. Norbert Lamersdorf
Georg-August-Universität Göttingen
Büsgen-Institut
Ökopedologie der gemäßigten Zonen
Büsgenweg 2
37077 Göttingen

Korrespondenz

eva-maria.minarsch@agrar.uni-giessen.de
forschung@defaf.de

Layout und Design

Claret Canelon & Eva-Maria Minarsch

Copyright Fotos:

Michael Hauschild: Abb. 2 (oben), Abb. 18; Julia Günzel: Abb. 2 (unten); Lino Seiffert: Abb. 11d; Thomas Middelanis: Abb. 11 b & c, Abb. 15 (oben); Johanna Wille Abb. 11e; Sonstiges: Eva-Maria Minarsch

Diese Publikation ist im Rahmen des Projektes „Agroforstsysteme Hessen“ entstanden. Dieses wurde mit Mitteln des Hessischen Ministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz im Rahmen des Hessischen Ökoaktionsplans 2020-2025 (Aktenzeichen: VII 5 – 80e04-09-04) gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor*innen.

Lizenz



Diese Arbeit unterliegt den Bestimmungen der Creative Common Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) Lizenz. Weitere Informationen zu den Lizenzbestimmungen finden Sie unter creativecommons.org

Zitervorschlag

Minarsch E-ML, Middelanis T, Wichern F, Göbel L, Böhm C, Weckenbrock P (2022) Leitfaden: Bodenkundliche Untersuchungen in streifenförmigen Agroforstsystemen. Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V. Cottbus, Germany.

Inhaltsverzeichnis

1	<i>Einleitung</i>	6
1.1	Hintergrund und Ziel des Leitfadens	6
1.2	Definitionen und Begrifflichkeiten zu Agroforstsystemen	8
1.3	Methodik der Agroforstforschung im Transektdesign	10
2	<i>Probennahme im Transektdesign</i>	14
2.1	Auswahl der Transekte	14
2.2	Transektaufbau	15
2.3	Mischprobendesign	17
2.3.1	Positionierung der Einstiche im Gehölzstreifen	19
2.3.2	Positionierung der Einstiche in einer weiteren Nutzungskomponente	21
2.4	Beispiele für Transekte in streifenförmigen Agroforstsystemen	22
2.5	Transektdesign für nicht-bodenkundliche Untersuchungen in Agrofor ..	25
3	<i>Bodenkundliche Untersuchungen</i>	26
3.1	Mineralischer Boden und Streuauflage	26
3.2	Beprobungstiefe	27
3.3	Beprobungszeitpunkt und -häufigkeit	27
3.4	Bodenparameter- und Methodenempfehlungen	28
3.5	Dokumentation der Erhebungen	28
4	<i>Zusammenfassung und Fazit</i>	30
	<i>Literaturverzeichnis</i>	31

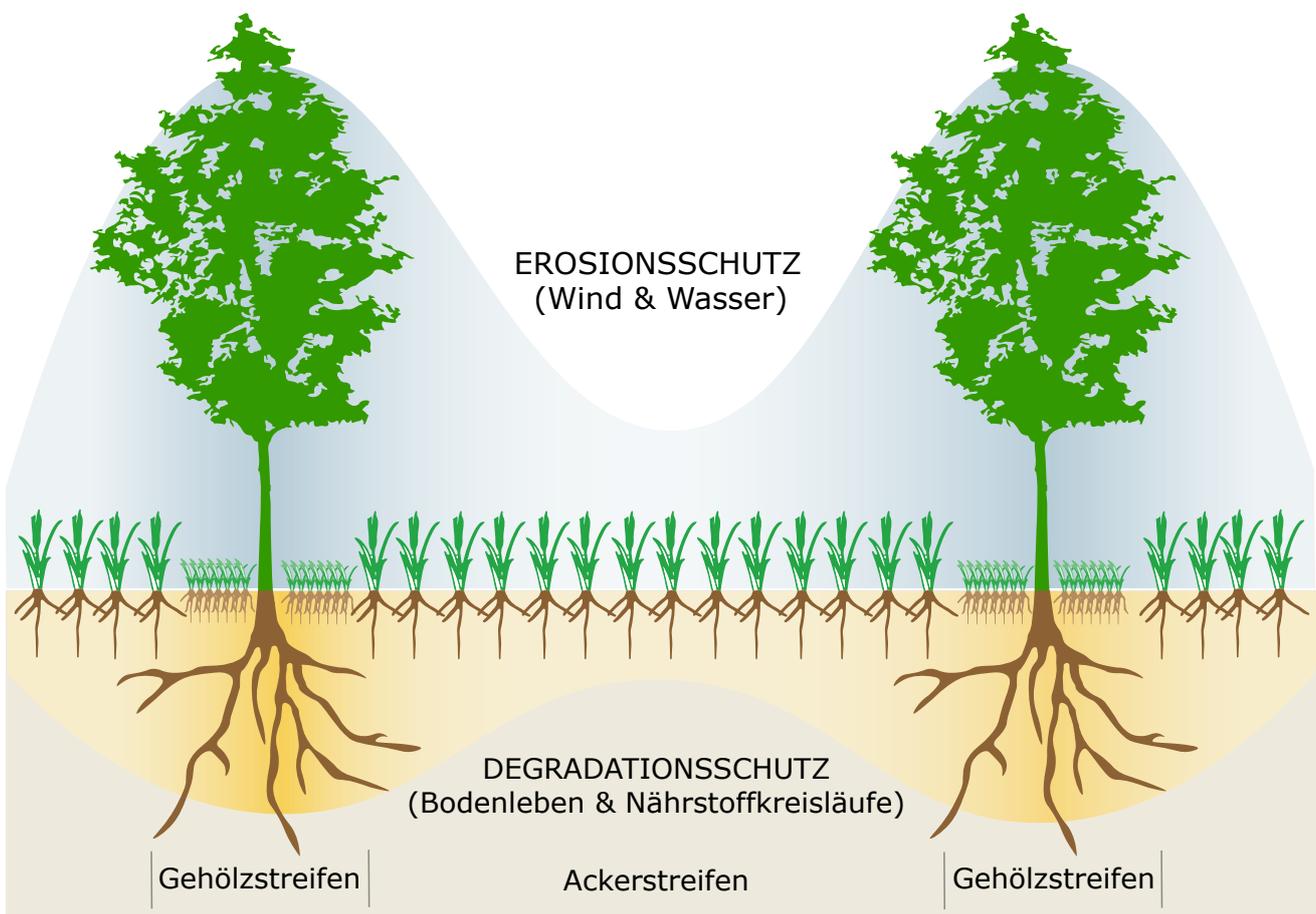
1 Einleitung

1.1 Hintergrund und Ziel des Leitfadens

Die Agroforstwirtschaft gewinnt aktuell in zivilgesellschaftlichen, politischen und landwirtschaftlichen Debatten an Bedeutung (Böhm und Hübner 2020). Als landwirtschaftliche Nutzung wurde sie durch die Bundestags- und Bundesratsbeschlüsse in der Politik angenommen und in die Bundesgesetzgebung und -verordnungen integriert. Mit einer konkreten Förderung ab Januar 2023 im Rahmen der EcoSchemes und in der Zweiten Säule ist von einem weiteren Anstieg der Etablierung der Agroforstwirtschaft in Deutschland auszugehen. Eine Zunahme von Agroforstsystemen in Deutschland ist aber bereits schon heute zu verzeichnen und kann teilweise auf der Agroforst-Landkarte des DeFAF verfolgt werden (DeFAF 2021). Dieses steigende Interesse an der Agroforstwirtschaft als modernes Produktionssystem lässt sich nicht allein anhand ihres

Beitragspotenzials zum Klimaschutz und der -anpassung erklären. Agroforstsysteme ziehen auch zunehmend das Interesse auf sich, da sie die Agrarlandschaft abiotisch, biotisch, ökonomisch sowie soziokulturell verändern können (Torralba et al. 2016; Kay et al. 2019).

In der Erforschung von Agroforstsystemen kommt dem Zustand der Böden und den damit zusammenhängenden Stoffhaushalten sowie der Boden-Biodiversität eine besondere Bedeutung zu. Insbesondere die Gehölzstreifen können mit ihrer mehrjährigen Vegetation und ausbleibenden Bodenbearbeitung den Boden vor Erosion und Degradation schützen und damit die Agrarlandschaft nachhaltig beeinflussen (Torralba et al. 2016; Basche und DeLonge 2019; Beule et al. 2022; Jacobs et al. 2022). Neben der Windschutzwirkung mit Auswirkung



auf die gesamt Fläche (Böhm et al. 2014) und dem lokalen Düngungseffekt durch nährstoffreiche Laubstreu (Wachendorf et al. 2020), werden die stofflichen Auswirkungen von Gehölzen vor allem in Bezug auf den Kohlenstoffgehalt der Böden betont (Nair 2011; Zomer et al. 2016; Cardinael et al. 2017; Hübner et al. 2021; Mayer et al. 2022). Es können ober- sowie unterirdische Gradienten innerhalb des Systems entstehen (s. Abb. 1), die es bei der Erforschung genannter Potentiale und Bodenfunktionen zu berücksichtigen gilt.

Unter Anbetracht der erläuterten Zunahme an Agroforstsystemen gilt es insbesondere die Datengrundlage für Systeme der gemäßigten Zone zu stärken. Hierfür wird ein Mindestumfang an bodenkundlichen Methoden sowie sich zeitlich wiederholende Untersuchungen empfohlen (Golicz et al. 2022). Methodische Standards sind dabei essentiell, um die Erforschung neu entstehender Agroforstsysteme sowie alter Systeme über einzelne Studien hinausgehend vergleichbar zu machen und erzielte Ergebnisse in den Kontext weiterer Forschung im Agrarraum setzen zu können (Golicz et al. 2022; Mayer et al. 2022). Mayer und Kolleg*innen (2022) betonen in diesem Zusammenhang vor allem die Notwendigkeit, dass Kohlenstoffvorräte und Prozesse in Agroforstsystemen als System untersucht und evaluiert werden müssen.

Abbildung 2: Agroforstsysteme mit streifenförmiger Anordnung der Gehölzkulturen. Gerade Streifen (oben) und Keyline Streifen entlang der Geländekontur (unten).



Dieser Leitfaden richtet sich an alle Wissenschaftler*innen sowie Citizen-Science-Gruppen, die bodenkundliche Untersuchungen in Agroforstsystemen mit streifenförmiger Anordnung der Gehölzkulturen vornehmen möchten (s. Abb. 2).

Ein besonderer Fokus liegt auf dem Probennahmedesign als Fundament und Grundvoraussetzung für die Vergleichbarkeit von wissenschaftlichen Studien, sowie einer Auswahl an zu untersuchenden bodenkundlichen Parametern und geeigneten Methoden.

Das im Folgenden erläuterte Forschungsdesign ist als **Mindestanforderung für die Untersuchung eines Agroforstsystems als Gesamtsystem** zu ver-

stehen. Außerdem kann es als Basis für weiterführende Untersuchungen und spezifische Fragestellungen im Agroforstkontext dienen.

Das übergeordnete Ziel dieses Leitfadens ist es, langfristig eine hohe Vergleichbarkeit von Daten aus verschiedenen Agroforstsystemen zu gewährleisten. Die aus der Zusammenführung von Daten unterschiedlicher Fallstudien gewonnenen Informationen sollen in der Zukunft Wissenschaftler*innen, Praktiker*innen und Entscheidungsträger*innen dabei unterstützen, objektive Aussagen sowie fundierte Entscheidungen im Management und der Förderung von Agroforstsystemen und -projekten zu treffen.

Abbildung 1: Bodenschutz in Agroforstsystemen entlang von ober- und unterirdischen Gradienten ausgehend von den Gehölzstreifen hin zur Mitte des Ackerstreifens. Erosionsschutz u.a. durch gebremste Winde und gesteigerte Wasserinfiltration und -retention sowie Degradationsschutz u.a. durch Förderung des Bodenlebens und der Nährstoffzufuhr insbesondere im Bereich der Gehölzstreifen (Seite 6).

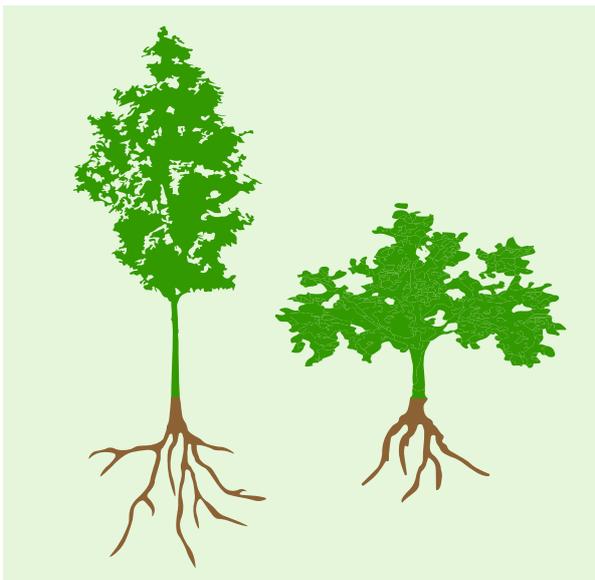
1.2 Definitionen und Begrifflichkeiten zu Agroforstsystemen

Agroforstwirtschaft umfasst Landnutzungssysteme, welche die Bewirtschaftung von Gehölzkulturen mit dem Anbau von landwirtschaftlichen- und gärtnerischen Kulturpflanzen (silvoarable), oder einer Grünlandbewirtschaftung mit und ohne Nutztierhaltung (silvopastoral) auf ein und derselben Fläche kombinieren (DeFAF 2020). Die größte Praxisrelevanz besitzen Agroforstsysteme mit streifenförmiger Anordnung der Gehölzkulturen, da sie die Bearbeitung mit landwirtschaftlichen Maschinen ermöglichen.

Nutzungskomponenten streifenförmiger Agroforstsysteme sind die Gehölzstreifen (Bäume und Sträucher mit Unterwuchs) und die Acker- bzw. Grünlandstreifen. In manchen Systemen gibt es noch weitere unabhängig bewirtschaftete Komponenten, wie z.B. mehrjährige Blühstreifen, die bei einer repräsentativen Beprobung zu berücksichtigen sind.

Es kann aber auch innerhalb der einzelnen Komponenten eine starke Variabilität geben. Insbesondere die Gehölzstreifen variieren in unterschiedlichen Agroforstsystemen stark im Hinblick auf das Pflanzschema (Zusammensetzung, Anordnung und Dichte) und das Management (mit/ohne Pufferstreifen, mit/ohne Unterwuchs, mit/ohne Mulchmaterial aus organischem Material oder abbaubarer Folie). Dies gilt es bei Untersuchungen in Agroforstsystemen zu berücksichtigen und je nach Forschungsziel das Probenahmedesign entsprechend anzupassen.

Gehölzstreifen



Acker-/Grünlandstreifen



Blühstreifen

Gehölzstreifen und Gehölzreihen sind im Agroforstkontext dahingehend zu unterscheiden, dass eine Gehölzreihe die linienförmige Anordnung von Bäumen oder Sträuchern beschreibt, welche auf Ackerland immer (auf Grünland teilweise) auf einem Gehölzstreifen mit Unterwuchs positioniert ist (s. Abb. 3). Der Gehölzstreifen wiederum ist oft mehrere Meter breit und bezeichnet die Fläche, die der Nutzung der Gehölze und nicht der Ackerkultur oder dem Grünland gewidmet wird. Agroforst-Gehölzreihen in silvopastoralen Systemen stehen teilweise direkt - ohne Gehölzstreifen - auf dem Grünland. Hier wird die direkte Umgebung der Gehölze gleich genutzt wie der Rest des Grünlandes, z.B. durch Beweidung auch in der Gehölzreihe.



Abbildung 3: Grafische Darstellung der zwei bis drei Nutzungskomponenten von einem Agroforstsystem (Seite 8). Illustration eines Gehölzstreifen in einem silvoarablen Agroforstsystem mit einer Gehölzreihe mit unterschiedlichen Gehölzen in der Mitte (Seite 9).

1.3 Methodik der Agroforstforschung im Transektdesign

Aufgrund ihres komplexen Aufbaus und der Verwendung von mehrjährigen Gehölzkulturen, lassen sich Agroforstsysteme nur bedingt in sogenannten Split-Plot-Designs untersuchen, die häufig in der experimentellen Agrarforschung Anwendung finden. Die Untersuchungsplots liegen hier meist in direkter Nachbarschaft, um äußere Einflussfaktoren wie Bodenbedingungen, Wasserverfügbarkeit oder Mikroklimaeffekte zu minimieren. Gehölzkulturen in Agroforstsystemen können über 20 m hoch werden und haben daher einen großen Einflussradius auf ihre Umgebung, sowohl ober- als auch unterirdisch. Große Flächen und lange Zeithorizonte sind notwendig, um Agroforstforschung in Split-Plot-Designs durchzuführen. Eine gute Alternative bieten Untersuchungen von einzelnen Agroforstsystemen, die auch in der Regel eine höhere Praxisrelevanz haben. Idealerweise erfolgt gleichzeitig die Untersuchung einer benachbarten Nicht-Agroforst-Referenzfläche mit gleichem Acker- bzw. Grünland- und/oder Gehölzmanagement.

Eine geeignete Methode zur Untersuchung von streifenförmigen Agroforstsystemen stellt das **Transektdesign** dar. Dieses wird in der Ökologie vielseitig eingesetzt um Untersuchungen entlang von Umweltgradienten durchzuführen. Das Transektdesign ermöglicht die räumliche Heterogenität eines Agroforstsystems mit seinen mindestens zwei alternierenden Nutzungskomponenten zu erfassen. Ein Transekt erstreckt sich vom Gehölzstreifen senkrecht zur Acker- bzw. Grünlandstreifenmitte mit mehreren Probenahmepunkten (s. Abb. 4). Letztere liegen im Gehölzstreifen sowie in definierten Abständen vom Gehölzstreifen im Acker- bzw. Grünlandstreifen.

Die Transektmethode fand bereits in vielen Agroforststudien Anwendung, jedoch mit unterschiedlichem Design (s. Tab. 1 und Abb. 5). Die Untersuchung der Ackerstreifen erfolgte meist in ähnlichen Abständen. Die räumliche Heterogenität der Gehölzstreifen wurde hingegen nicht ausreichend berücksichtigt und in den meisten Fällen der Gehölzeinfluss für das Gesamtsystem sogar unterrepräsentiert (Seitz et al. 2017; Beuschel et al. 2019; de Abreu et al. 2020). Cardinael et al. (2017) haben in ihrem Probennahmedesign die Heterogenität des Gehölzstreifens erstmals sehr detailliert erfasst und aus den Ergebnissen geschlussfolgert, dass das Probennahmedesign für weitere Studien vereinfacht werden kann. Ein entsprechender Ansatz wird in diesem Leitfaden mit dem Mischprobendesign vorgestellt, welches die Heterogenität des Gehölzstreifens und des angrenzenden Acker- bzw. Grünlandstreifens besser erfasst und zugleich die Probenanzahl auf ein Minimum beschränkt.

Für Agroforstsysteme, die eine andere Anordnung der Gehölzkulturen aufweisen, oder wenn Einzelbaum-Untersuchungen im Fokus stehen, ist ein anderes Probennahmedesign gegebenenfalls besser geeignet. Auf Flächen mit verstreut stehenden Bäumen, z.B. Streuobstwiesen, kann eine Kombination aus Messpunkten mit festem und variablem Abstand zum zentralen Gehölz angewendet werden (Wiedermann et al. 2022). Systeme, die eine dichte Bepflanzung der Gehölzkulturen aufweisen, z.B. Gehölze die im Kurzumtrieb bewirtschaftet werden oder Waldgärten, wiederum können mit der Voronoi Polygon Methode untersucht werden, mit der Bereiche in naher und weiter Entfernung zum Baum sowie innerhalb und außerhalb der Gehölzreihen gleichermaßen abgedeckt werden (Defrenet et al. 2016).

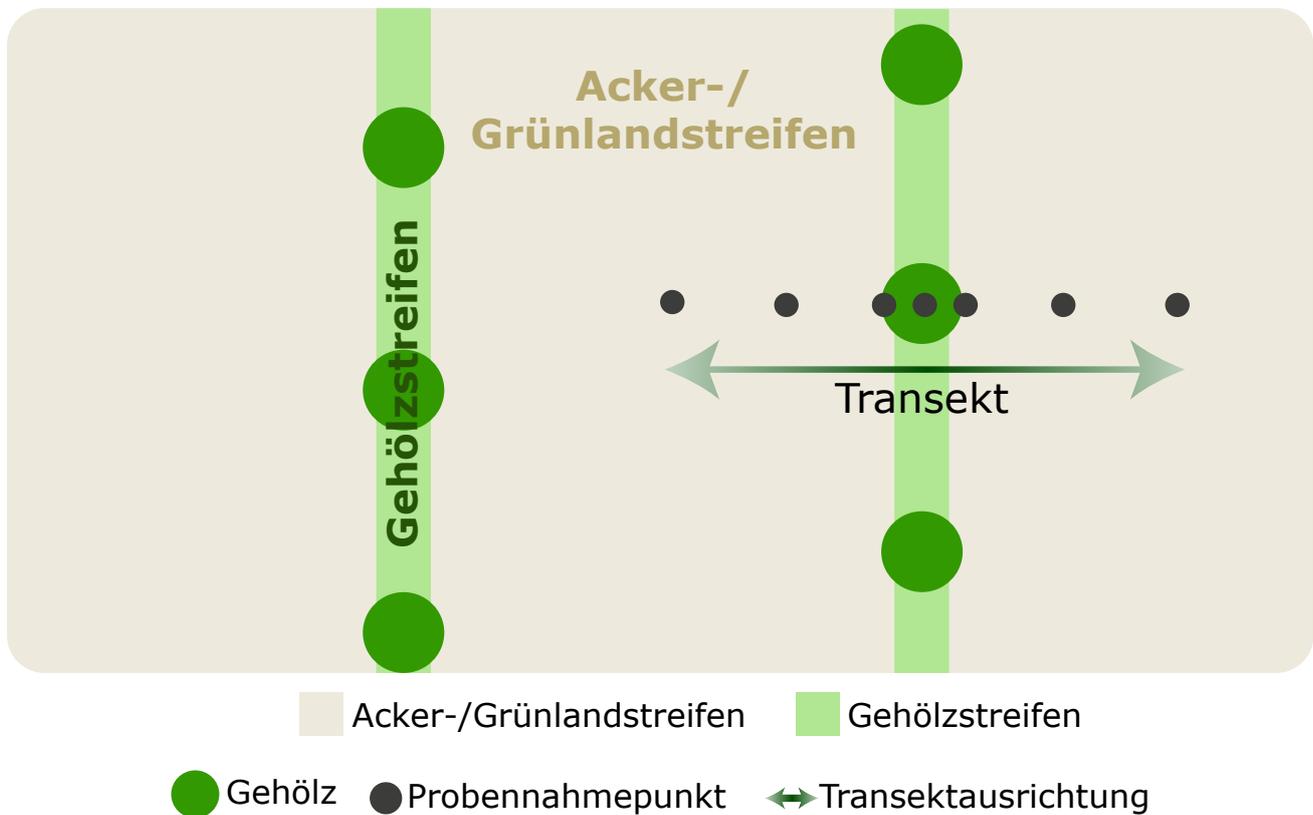


Abbildung 4: Schematische Darstellung eines Teilausschnittes eines Agroforstsystems mit zwei Nutzungskomponenten, den Gehölzstreifen mit Bäumen und dem Acker- bzw. Grünlandstreifen. Der Pfeil stellt die Transektausrichtung zu beiden Seiten des Gehölzstreifens dar. Die Probennahmepunkte liegen im Gehölzstreifen und Acker- bzw. Grünlandstreifen.

Tabelle 1: Übersicht ausgewählter Studien zu Bodenuntersuchungen in Agroforstsystemen mit Probenahme im Transektdesign. Probenahmeabstand $W/4$ bzw. $W/2$ beschreibt ein Viertel bzw. die Hälfte der Acker-/Grünlandstreifenbreite (W , width) und $D/2$ den halben Abstand (D , distance) zwischen zwei Gehölzen im Gehölzstreifen. Ausrichtung beschreibt die Orientierung der Transekte ausgehend vom Gehölzstreifen zu einer oder beiden Seiten (z.B. Einseitig mit 2 Transekten nach links und 1 Transekt nach rechts). Einstiche beschreibt die Anzahl an Einzelproben für eine Mischprobe. Genannte Limitierungen des Designs beziehen sich auf die jeweilige Studie nach Interpretation der Autor*innen und unter Berücksichtigung des im Leitfaden vorgeschlagenen Probenahmedesigns.

Studie	Agroforstsysteme	Transektnzahl	Abstand der Probennahmepunkte		Transektausrichtung	Einstiche	Limitierung des Design
			Gehölzstreifen	Ackerstreifen			
Cardinael et al. 2017	Silvoarabel und silvopastoral	3	Ab Stammfuß 1 m, 2 m, 3 m und $D/2$	Ab Stammfuß 1 m, 2 m, 3 m, $W/4$ und $W/2$	Einseitig (2 zu 1)	/	<ul style="list-style-type: none"> • Unterrepräsentierter Gehölzeinfluss, mittlere Einflussbereiche im Gehölz- und Ackerstreifen werden nicht genug erfasst. • Differenzierung zwischen Süd/Nord bzw. Ost/West-Einfluss durch einseitige Beprobung nicht möglich. • Mischproben fehlen, kleinräumige Heterogenität des Bodens wird nicht erfasst. • Große Probenanzahl ist sehr zeit- und geldaufwendig.
Seitz et al. 2017	Silvoarabel	5	$D/2$	Ab Gehölzreihe $W/4$ und $W/2$	Einseitig (5 zu 0)	4	<ul style="list-style-type: none"> • Unterrepräsentierter Apfelbaumeinfluss, maximale und mittlere Einflussbereiche werden nicht erfasst. • Einseitige Ausrichtung der Transekte, erschwert Rückschluss auf Gesamtsystem.
Beuschel et al. 2019	Silvoarabel	4	Im Zentrum	Ab Gehölzstreifen 1 m, 7 m und $W/2$ (+1,5 m vom Stammfuß)	Einseitig (2 zu 2)	6	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogenität des vier reihigen Pappel-Gehölzstreifens wird nicht erfasst. • Viertel der Ackerstreifenbreite ($W/4$) wird nicht erfasst, erschwert Rückschluss auf Gesamtsystem. • Differenzierung zwischen Süd/Nord bzw. Ost/West-Einfluss durch nur 2-fach einseitige Beprobung nicht möglich.
de Abreu et al. 2020	Silvopastoral	4	0,5 m	1,6 m, 3,8 m und $W/2$	Einseitig (4 zu 0)	/	<ul style="list-style-type: none"> • Heterogenität des zwei reihigen Eukalyptus-Gehölzstreifens wird nicht erfasst. • Einseitige Ausrichtung der Transekte, erschwert Rückschluss auf Gesamtsystem. • Mischproben fehlen, kleinräumige Heterogenität des Bodens wird nicht erfasst.

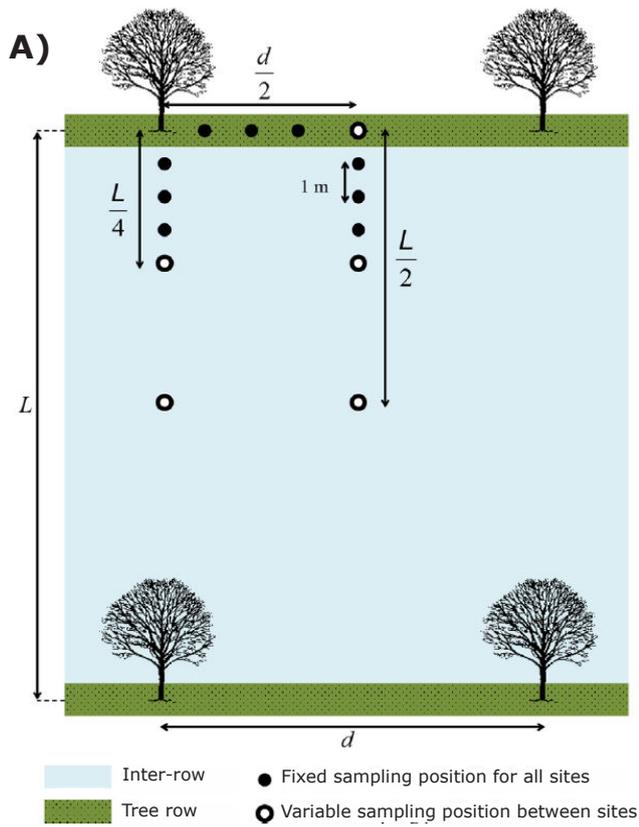
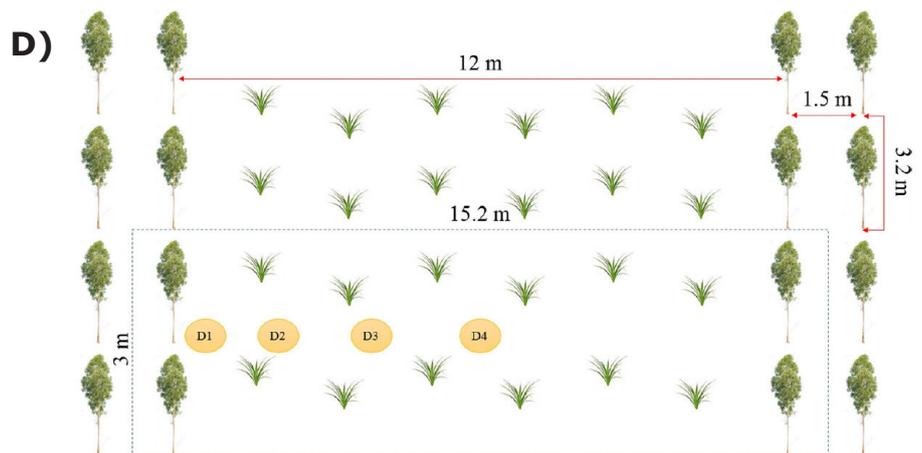
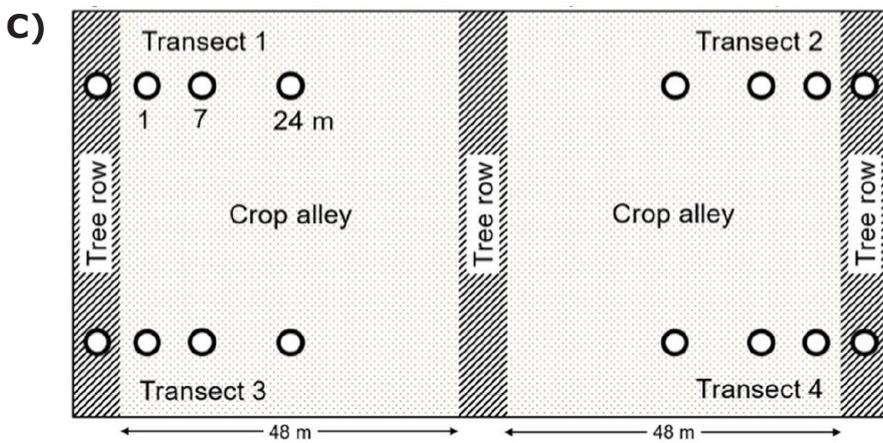
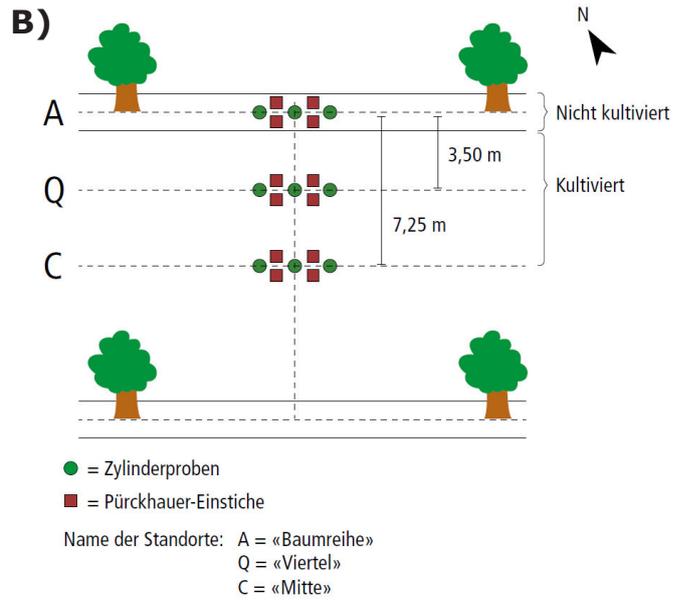


Abbildung 5: Transektaufbau ausgewählter wissenschaftlicher Studien aus Tabelle 1 mit verändert nach Cardinael et al. 2017 (A), Seitz et al. 2017 (B), Beuschel et al. 2019 (C) und de Abreu et al. 2020 (D). L = Acker-/Grünlandstreifenbreite (length), d = Gehölzabstand (distance).



2 *Probennahme im Transektdesign*

2.1 Auswahl der Transekte

Im Folgenden wird ein modellhafter Transektaufbau vorgestellt, bei dem es sich um eine Mindestanforderung an die räumliche Ausdifferenzierung der Bodenprobennahme in Agroforstsystemen handelt. Es wird vorgeschlagen, dass bei einer Untersuchung des Gesamtsystems mindestens vier Transekte im Agroforstsystem so platziert werden, dass sie zusammen das System möglichst vollständig repräsentieren.

Bei der Positionierung der Transekte sollten öffentliche Bodenkarten sowie bereits veröffentlichte Daten zur Fläche (Nutzungshistorie) berücksichtigt werden (s. Tab. 3). Eine Flächenbegehung sollte vor der räumlichen Festlegung der Transekte stattfinden, um Sonderstandortsbereiche wie Fahrspuren, ehemalige Wege oder Vernässungsstellen zu identifizieren. In der Regel sind diese von der Probenahme auszuschließen oder entsprechend in das Probennahmedesign zu integrieren. Desweiteren sollte mit dem/der Landwirt*in über das Management der Fläche gesprochen werden. Dabei sollten die Bearbeitungsbreite der unterschiedlichen Maschinen und eventuelle Überlappungen in der Mitte oder am Rand des Ackerstreifens erfragt werden.

Jeder Transekt und seine Probennahmepunkte sollten georeferenziert (z.B. per GPS mit RTK) und gegebenenfalls mit Überfahrstangen markiert werden (s. Abb. 6). Dies ermöglicht eine Wiederholung der Untersuchung an genau demselben Standort zu einem späteren Zeitpunkt, die Durchführung weiterer Untersuchungen (z.B. Ertrags- oder Biodiversitätserhebungen) sowie eine geostatistische Auswertung der Daten durch Berücksichtigung der räumlichen Autokorrelation.



Abbildung 6: Vermessung von Probennahmepunkten mit einem GPS Gerät mit RTK Signal.

2.2 Transektaufbau

Mittelpunkt eines jeden Transekts ist ein zentrales Gehölzelement, welches für das zu untersuchende System und entsprechend der Fragestellung der jeweiligen Studie, auszuwählen ist. Insbesondere für Systeme, die eine Kombination verschiedener Gehölzarten aufweisen, ist dies notwendig, um mögliche gehölzartenspezifische Einflussfaktoren ausschließen zu können. In einem System mit Obst-, Wertholz- und Biomassebäumen kann

beispielsweise der Obstbaum als zentrales Gehölz fungieren.

Ein Transekt erstreckt sich zu beiden Seiten des Gehölzstreifens mit insgesamt mindestens sieben Probenahmepunkten, wovon der mittlere Punkt innerhalb des Gehölzstreifens liegt (s. Abb. 7). Eine Untersuchung lediglich zu einer Seite des Gehölzstreifens vorzunehmen, wird nicht empfohlen.

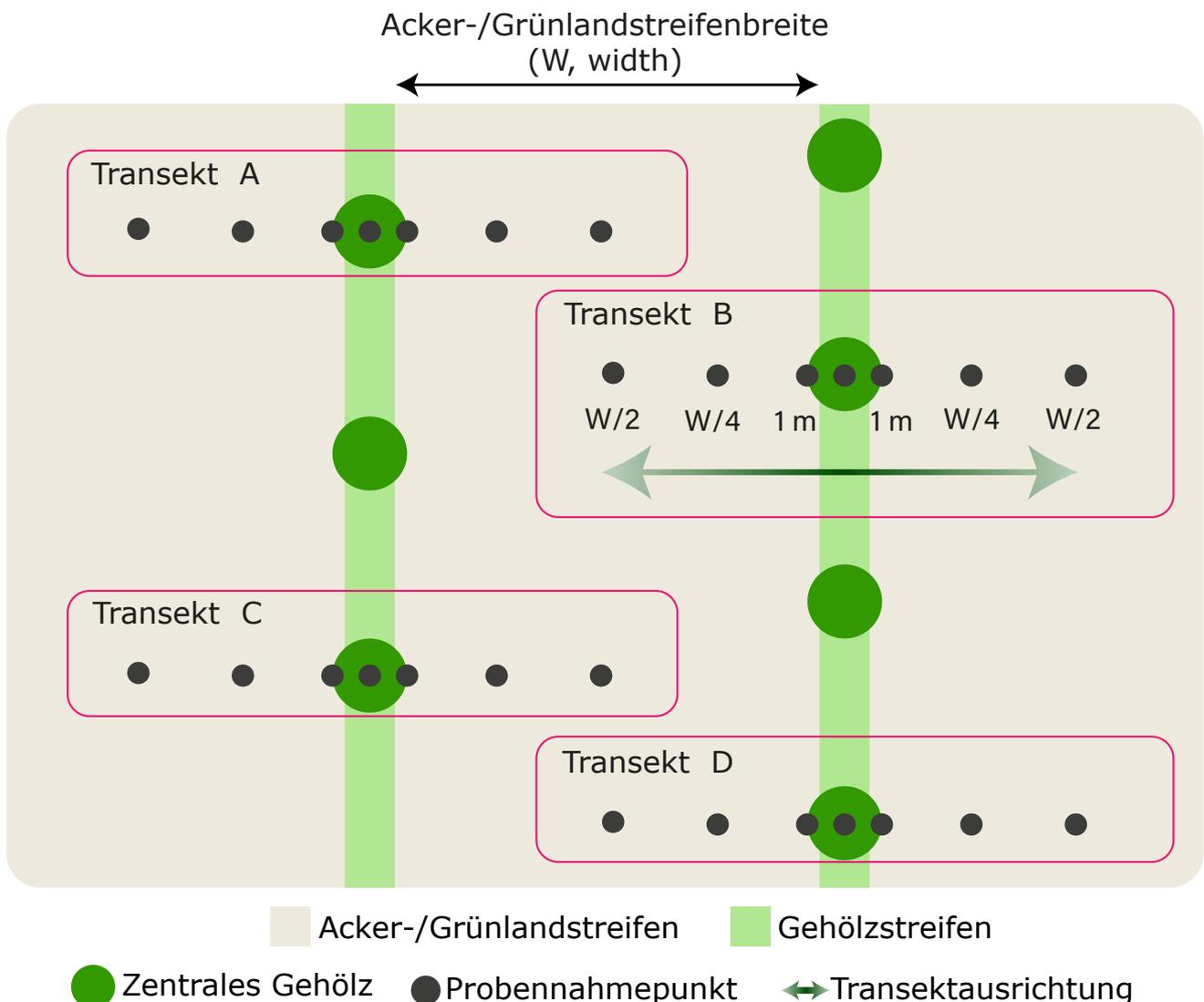


Abbildung 7: Schematische Darstellung des Transektaufbaus ausgehend vom zentralen Gehölzelement im Gehölzstreifen und zu beiden Seiten senkrecht bis zur Mitte des Acker-/Grünlandstreifens. Probenahmepunkte liegen im Gehölzstreifen, 1 m entfernt im Acker-/Grünlandstreifen, ein Viertel ($W/4$) sowie in der Mitte des Acker-/Grünlandstreifens ($W/2$).

Sollte beispielsweise die zur Beprobung herangezogene Seite weniger beschattet werden, im Windschutz eines dicht bepflanzten Gehölzstreifens, oder auf der hangoberseite eines Systems mit starkem Gefälle liegen, wäre diese Auswahl für das Gesamtsystem nur bedingt repräsentativ.

Die Probennahmepunkte des Transekts im Acker- bzw. Grünland orientieren sich an der Acker- bzw. Grünlandstreifenbreite (W , width) und liegen 1 m , ein Viertel der Acker- bzw. Grünlandstreifenbreite ($W/4$) und die halbe Acker- bzw. Grünlandstreifenbreite ($W/2$) entfernt vom Rand des Gehölzstreifens. Diese

Anordnung ist damit zu begründen, dass so ein möglicher Einfluss der Gehölzstreifen auf die angrenzenden Flächen abgebildet werden kann. Damit dieser jedoch nicht über- oder unterschätzt wird, werden die Proben nahe, im Übergang und in maximaler Entfernung zum Gehölzstreifen gezogen. Eine feste Meterangabe wird nicht empfohlen, da Agroforstsysteme in ihrer Acker- bzw. Grünlandstreifenbreite stark variieren und somit gegebenenfalls das Gesamtsystem nicht abgebildet wird. Mittels Interpolation kann anhand der gewonnenen Daten ein Wert für das Gesamtsystem berechnet werden.

Ausnahme: Für den Fall, dass in einem Agroforstsystem die Acker- bzw. Grünlandstreifen und/oder Gehölzstreifen mit unterschiedlichen Kulturen bestellt sind, sollte darauf geachtet werden, dass die unterschiedlich gemanagten Nutzungskomponenten gleichermaßen und entsprechend dem Ziel, z.B. das Gesamtsystem abzubilden, untersucht werden. Die Transekte können sich gegebenenfalls von Gehölzstreifen *a* zu Gehölzstreifen *b* oder von Gehölzstreifen *a* nur zu einer Seite (z.B. Westen) und Gehölzstreifen *b* zur anderen Seite (z.B. Osten) erstrecken (s. Abb. 8). Es ist darauf zu achten, dass die Anzahl der verschiedenen Probennahmepunkte ausgeglichen ist und mögliche Effekte der Gehölzstreifenausrichtung sowie des Streifenmanagements gleichermaßen abgebildet werden.

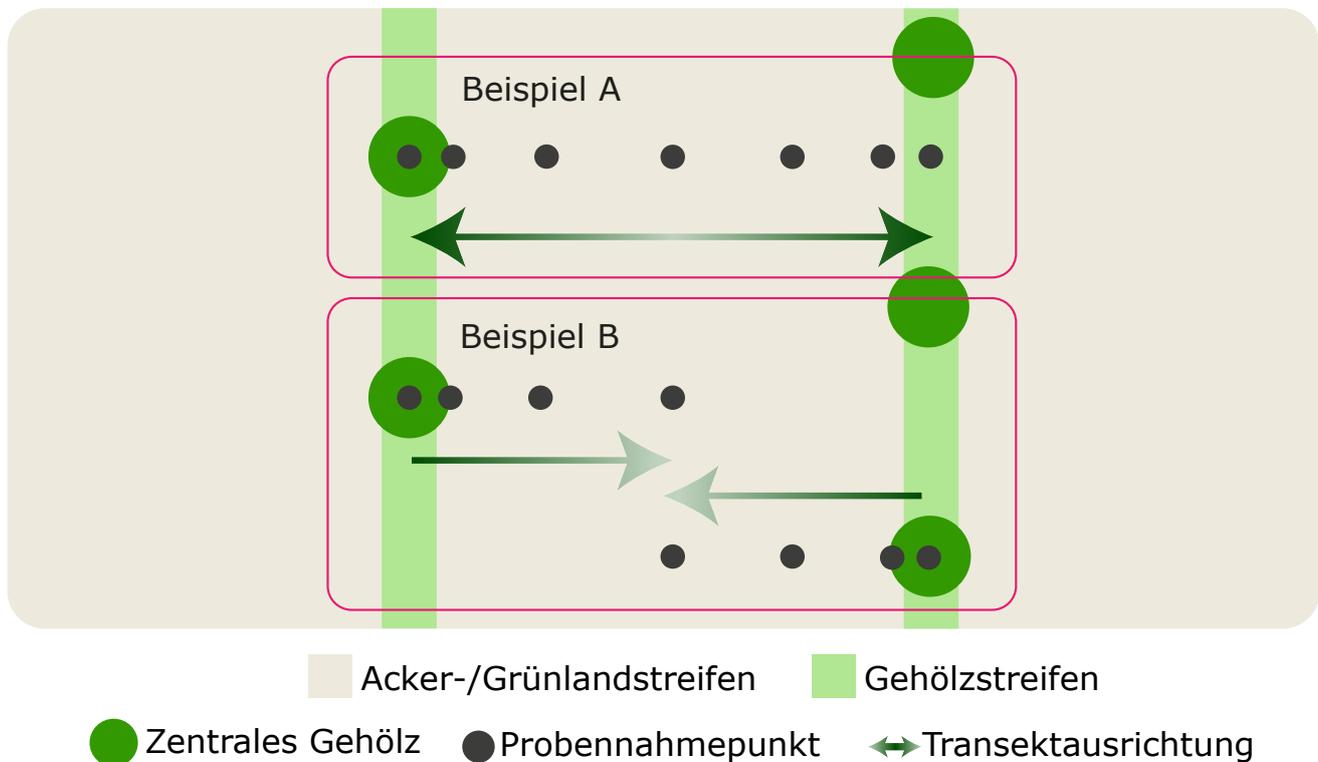


Abbildung 8: Schematische Darstellung der Transektanordnung, wenn sich das Acker-/Grünlandmanagement zu beiden Seiten des Gehölzstreifens unterscheidet und eine Seite nicht zum Gesamtsystem gehört. Die Transekte können sich dann über die gesamte Ackerstreifenbreite erstrecken (Beispiel A) oder ausgehend von der Gehölzreihe nur zu einer Seite (Beispiel B).

2.3 Mischprobendesign

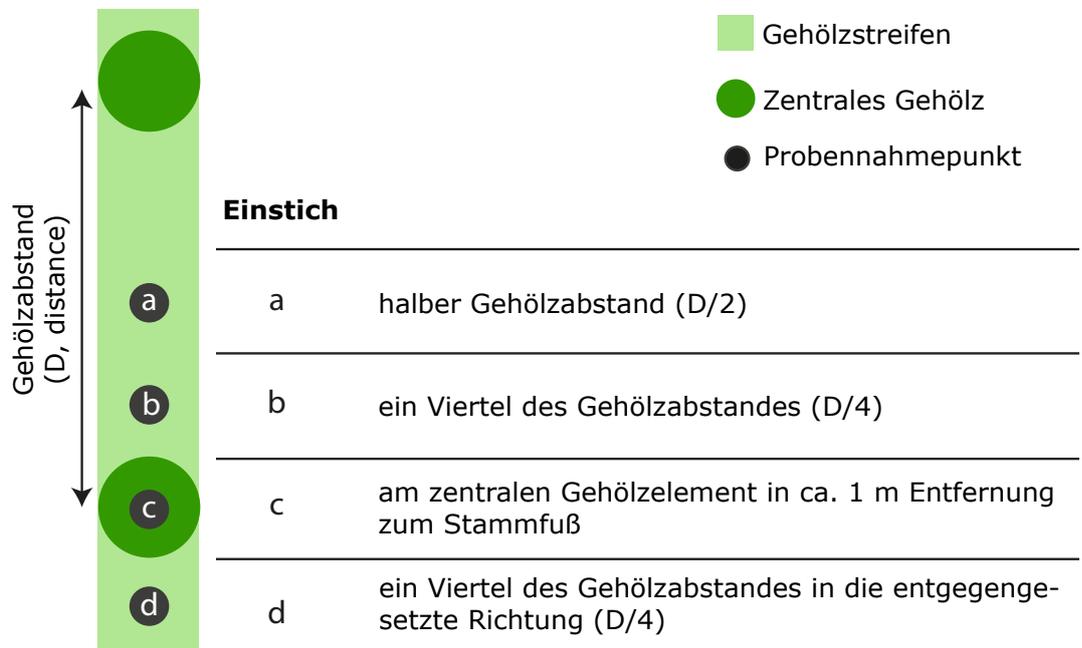
Für Bodenuntersuchungen werden in der Regel Mischproben generiert, um die kleinräumige Heterogenität von Böden zu berücksichtigen und die Probenanzahl zu reduzieren. Je nach Probennahmedesign können die Abstände zwischen den einzelnen Einstichen der Mischprobe wenige Zentimeter bis zu mehreren Metern betragen.

In Agroforstsystemen ist es empfehlenswert Mischproben zu generieren, um insbesondere die Heterogenität eines Gehölzstreifens selbst, aber auch in Bezug auf das Gesamtsystem, abzubilden.

Jeder Probennahmepunkt im Transekt steht für eine Mischprobe aus vier separaten Einstichen (a-d, s. Abb. 9). Die Einstiche erfolgen

linienförmig parallel zum Gehölzstreifen und somit orthogonal zum Transektverlauf. Die Anordnung orientiert sich am Gehölzabstand (D, distance) des zentralen Gehölzelementes im Gehölzstreifen und ist damit zu begründen, dass der Einfluss der Einzelbäume durch das Versuchsdesign weder über- noch unterschätzt werden soll. In der hier gewählten Struktur sind sowohl Zonen maximaler (a) sowie minimaler (c) Entfernung zum zentralen Gehölz gleichmäßig repräsentiert, während mittlere Abstände aufgrund ihres hohen Flächenanteils auch doppelt gewichtet werden (b und d). Um Verletzungen der Gehölzwurzeln zu vermeiden, sollten Einstiche immer in ca. 1 m Entfernung zum Stammfuß des Gehölzes erfolgen.

Abbildung 9: Mischprobendesign im Gehölzstreifen mit zentralem Gehölzelement und Positionen für Bodenproben-Einstiche (a-d) in Abhängigkeit zum Gehölzabstand (D) in orthogonaler Ausrichtung zum Transektverlauf.



Ausnahme: Bei einem Gehölzabstand von 4 m oder weniger kann, unter Einhaltung des 1 m Abstands zum Stammfuß des zentralen Gehölzes, der Einstich c auf gleicher Position liegen wie b oder d. In diesem Fall sollten sich die Abstände zwischen den Einstichen nicht nach den relativen Angaben aus Abbildung 9 richten, sondern unabhängig davon festgelegt werden.

Das Mischprobendesign ist für jeden Probennahmepunkt eines Transekts durchzuführen (s. Abb. 10). Die Abmessungen für die Mischproben der Probennahmepunkte im Acker- bzw. Grünland orientieren sich an denen im Gehölzstreifen (s. Abb. 9).

Im Folgenden sind weitere Leitlinien für die Positionierung der Probennahmepunkte im Mischprobendesign im Gehölzstreifen sowie einer möglichen dritten Nutzungskomponente genauer definiert.

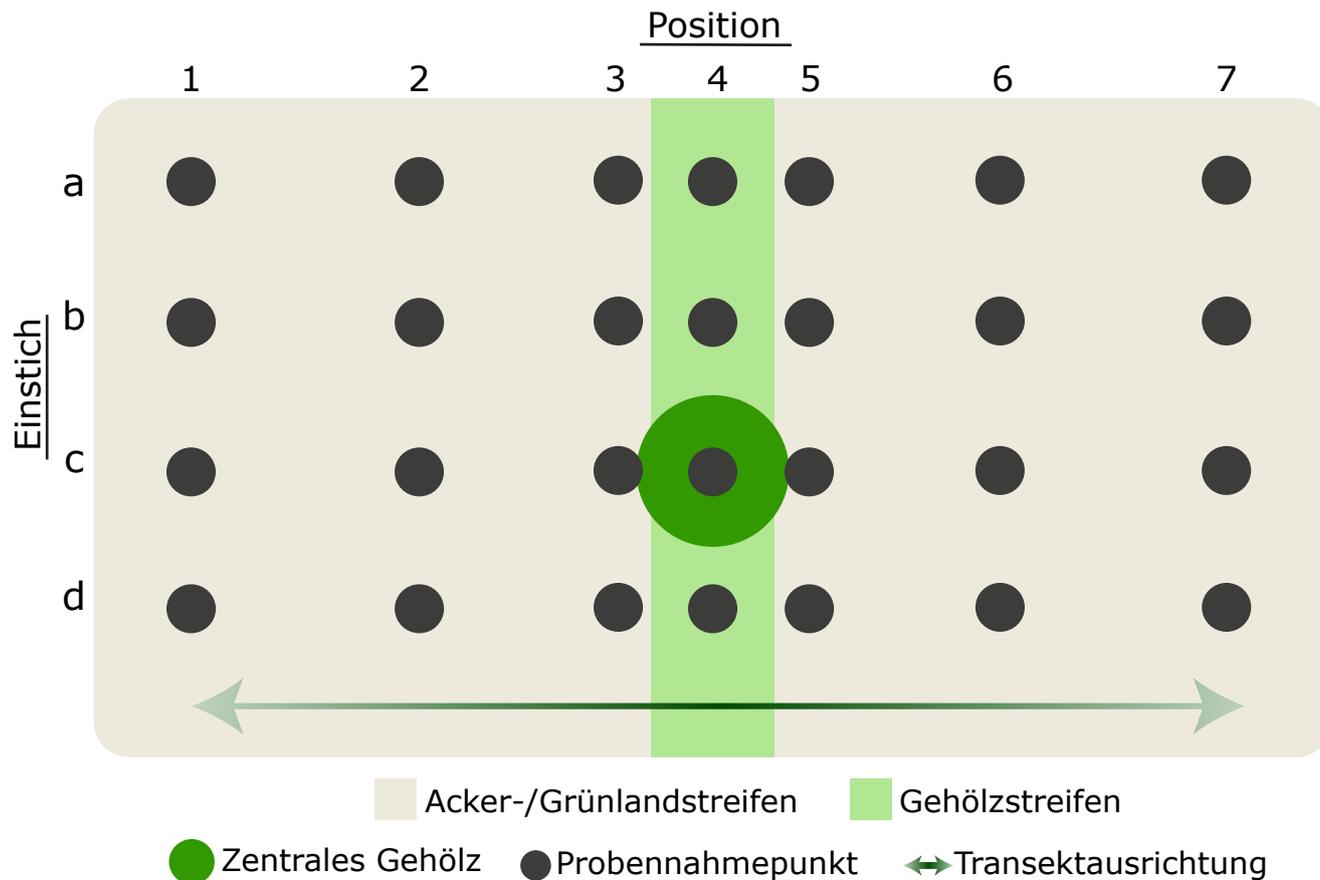


Abbildung 10: Exemplarische Positionierung der Probennahmepunkte eines Transekts im Mischprobendesign mit je vier Einstichen (a-d) je Probennahme-position im Gehölzstreifen und Acker-/Grünlandstreifen. Der Abstand des zentralen Gehölzes beträgt 12 m.

Ausnahme: Beinhaltet ein Agroforstsystem lediglich Reihen von Gehölzen, jedoch keine Gehölzstreifen, die sich in ihrer Bodenbedeckung und Nutzung von den umliegenden Flächen unterscheiden (z.B. auf Grünland mit Weidenutzung), so verbleiben die Einstiche der Mischprobe 4 genauso innerhalb der Gehölzreihe. Die Positionen der Proben 3 und 5 werden in diesem Fall nicht mit 1 m vom Gehölzstreifen, sondern in 2,5 m Entfernung von der Gehölzreihe vorgesehen. Dieser Wert basiert auf einer erfahrungsgemäß häufig verwendeten Gehölzstreifenbreite von 3 m, bzw. 1,5 m Pufferzone zwischen Gehölzreihe und Ackerstreifen und dient der Vergleichbarkeit von Daten aus unterschiedlichen Agroforstsystemen.

2.3.1 Positionierung der Einstiche im Gehölzstreifen

Gehölzstreifen weisen je nach Nutzungsform Unterschiede im Gehölzabstand innerhalb und/oder zwischen Gehölzreihen und dem Unterwuchs auf (s. Abb. 11). In Agroforstsystemen mit Kurzumtriebs-Gehölzstreifen stehen die Bäume in der Regel in mehreren Reihen in engem Abstand innerhalb und zwischen den Baumreihen (i.d.R. 0,4 bis 1,5 m innerhalb der Reihe und 2,0 bis 3,0 m zwischen den Reihen). In Systemen zur Stammholzproduktion oder auf Streuobstwiesen hingegen gibt es normalerweise nur eine Gehölzreihe je Gehölzstreifen mit zumeist 10 bis 15 m Abstand zwischen den Gehölzen innerhalb der Reihe.

Außerdem gibt es vielfältig gestaltete Mischformen, wovon sich eine Form mit sehr hoher Komplexität in sogenannten sukzessionalen (bzw. syntropischen oder dynamischen) Agroforstsystemen zeigt (Götsch 1992). Die Gehölzdichte ist hier häufig sehr hoch und teilweise gibt es mehrere parallel verlaufende Gehölzreihen mit unterschiedlichen Gehölzarten. Hinzu kommt, dass sich in all diesen unterschiedlichen Agroforstsystemen, der Unterwuchs und das Management in der Gehölzreihe vom restlichen Gehölzstreifen (i.d.R. rechts und links der Gehölzreihe) unterscheiden können. Zur Beikrautregulierung kann beispielsweise in der Gehölzreihe Mulchmaterial (Folie, Kompost und/oder Hackschnitzel) ausgebracht oder die Handhacke eingesetzt werden. Rechts und links der Gehölzreihe wiederum kann z.B. eine Kleeegrasmischung als Pufferzone zum Ackerland wachsen.



Abbildung 11: Gehölzstreifen von unterschiedlichen Agroforstsystemen mit unterschiedlichem Pflanzschema, Unterwuchs und Management. Pflanzschemata: (a) Drei Gehölzreihen mit Obstbäumen in einem Gehölzstreifen, (b) eine Wertholz-Gehölzreihe auf Grünland, (c) vier Pappel-Energieholz Reihen auf einem Gehölzstreifen. Management: (d) Kleegrasschnittgut aus dem Gehölzstreifen wird an die Gehölzreihe gemulcht, (e) mit Holzhackschnitzeln gemulchte Gehölzreihe nach der Pflanzung.

Folglich sollte das Mischprobendesign entsprechend dem Gehölzstreifentyp angepasst werden. Je nach Gehölzdichte, Unterwuchs und Fragestellung, können die vier Einstiche für die Mischprobe in der Gehölzreihe, rechts und/oder links der Gehölzreihe oder diagonal verlaufend im Gehölzstreifen genommen werden (s. Abb. 12). Außerdem sollte die Bodenbedeckung am Ort des Einstichs die des gesamten Baumstreifens weitestgehend repräsentieren.

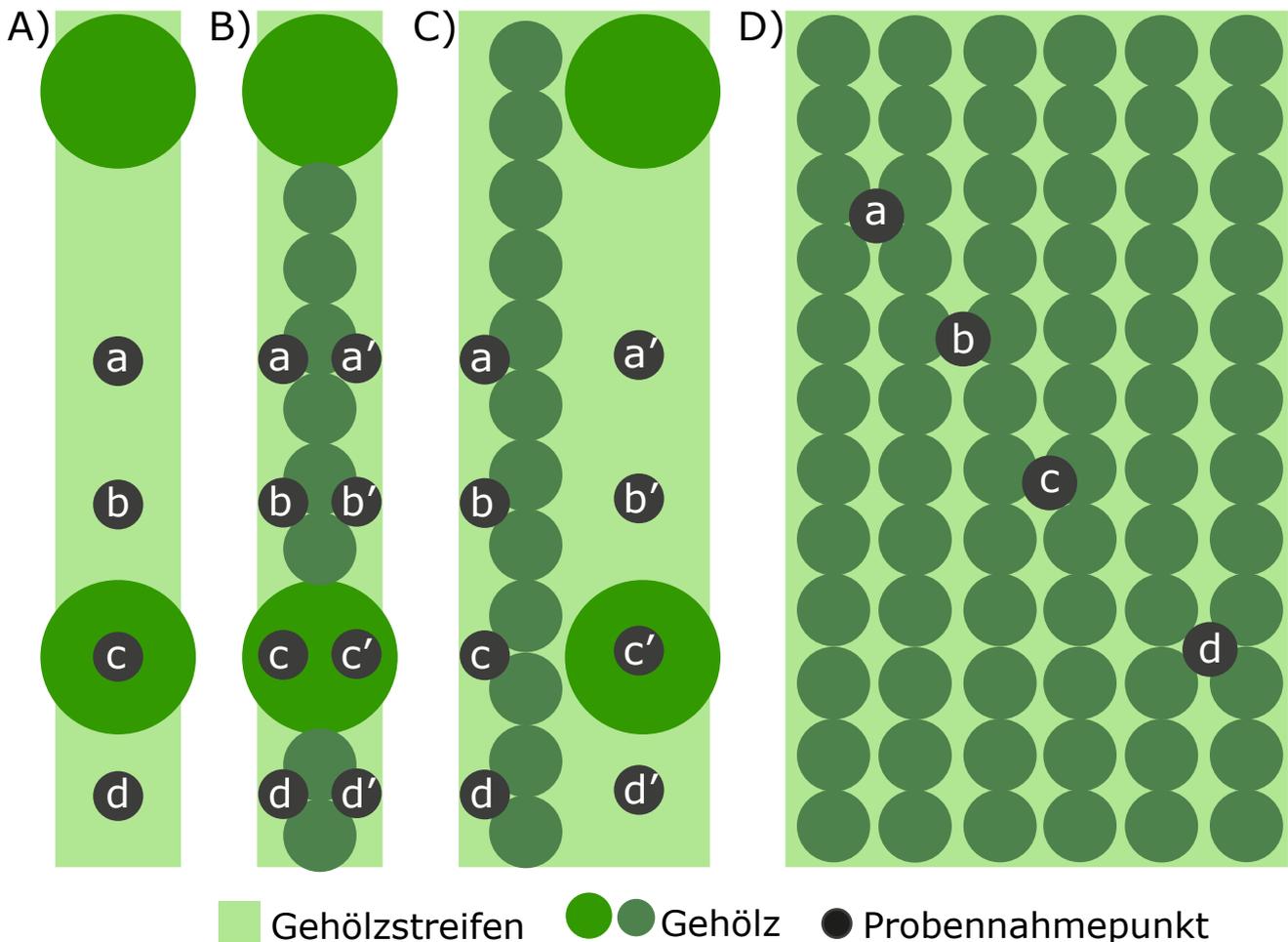


Abbildung 12: Beispielhafte Pflanzschemata streifenförmiger Agroforst-Gehölzstreifen mit beispielhafter Positionierung der Probennahmepunkte im Mischprobendesign mit vier Einstichen (a-d). Gezeigt sind (A) Einzelstammpflanzung zur Stammholz- oder Obstproduktion mit Mischprobendesign mittig in der Gehölzreihe; (B) Mischform 1 mit unterschiedlichen Gehölzen in einer Gehölzreihe mit zwei Mischprobendesigns rechts und links der Gehölzreihe im Gehölzstreifen (optional diagonales Mischprobendesign); (C) Mischform 2 mit zwei Gehölzreihen mit unterschiedlichen Gehölzen im Gehölzstreifen mit zwei Mischprobendesigns parallel zu beiden Gehölzreihen (optional diagonales Mischprobendesign); (D) Kurzumtriebs-Gehölzstreifen mit sechs Gehölzreihen und diagonal verlaufendem Mischprobendesign.

2.3.2 Positionierung der Einstiche in einer weiteren Nutzungskomponente

Ist das Agroforstsystem mit weiteren streifenförmigen Komponenten ausgestattet, welche sich im Management vom Gehölzstreifen und dem Acker- bzw. Grünland unterscheiden (s. Abb. 13), dann sollten diese nach einem modularen Aufbau in das Probenahmedesign eingefügt werden. Die Minimalanforderung für jede weitere Komponente ist eine Mischprobe aus vier Einstichen nach demselben Muster, welches ebenso mittig in dem jeweiligen Streifen angeordnet sein sollte. In Abbildung 14 ist dies für zwei zusätzliche Blühstreifen rechts und links des Gehölzstreifens dargestellt.



Abbildung 13: Wertholz-Agroforstsystem mit zwei Pappel-Gehölzreihen im Gehölzstreifen und zwei flankierenden Blühstreifen.

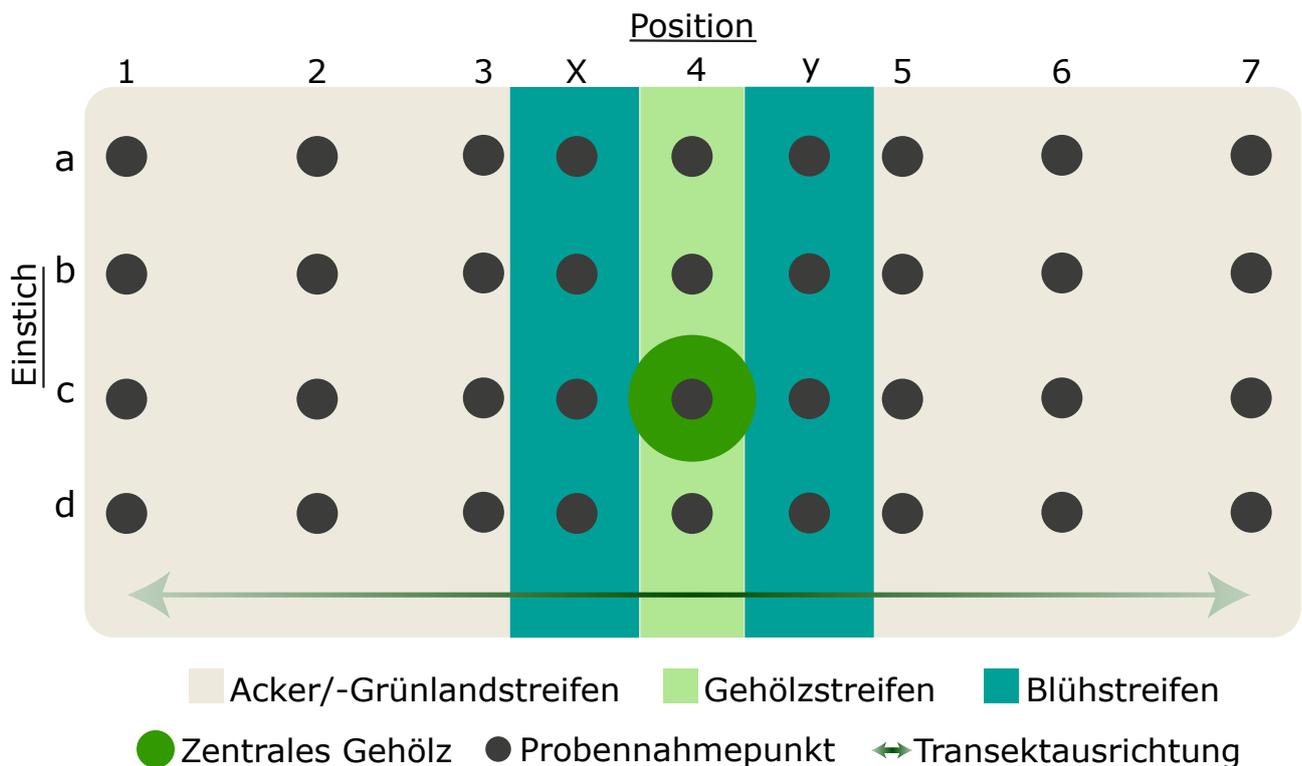


Abbildung 14: Exemplarische Darstellung eines Agroforstsystems mit 4 m breiten Blühstreifen als dritte Nutzungskomponente zwischen dem Acker- bzw. Grünlandstreifen und dem Gehölzstreifen mit zentralem Gehölz. Zusätzliche Probennahmepunkte (X, Y) des Transekts im Mischprobendesign mit je vier Einstichen (a-d) liegen mittig im Blühstreifen.

2.4 Beispiele für Transekte in streifenförmigen Agroforstsystemen

Im Folgenden wird die beispielhafte Anwendung des oben beschriebenen Transektaufbaus im Mischprobendesign zur bodenkundlichen Untersuchung bei drei streifenförmigen silvoarablen Agroforstsystemen gezeigt (s. Abb. 15-17). Die Gehölzstreifen der Systeme enthalten eine bis fünf Gehölzreihen mit gleichen und unterschiedlichen Gehölztypen und/oder Blühstreifen als dritte Nutzungskomponente.

Die Beispiele sollen verdeutlichen, wie vielfältig Agroforstsysteme in der Praxis angelegt werden und dass es folglich viele Möglichkeiten

gibt, die Transekte mit dem Mischprobendesign im System zu platzieren. Am Ende muss immer eine individuelle Lösung gefunden werden, die sich aber in den Grundsätzen an den Vorgaben des Leitfadens orientieren sollte.

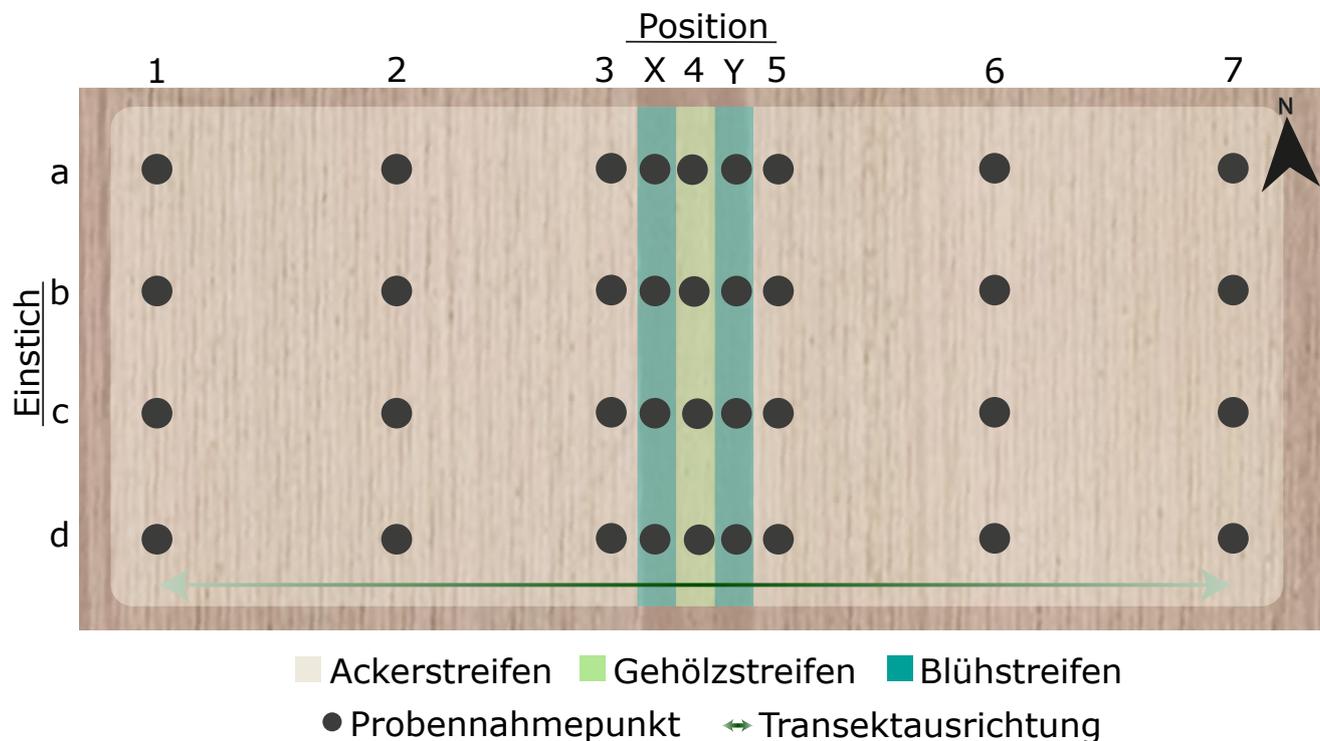


Abbildung 15: Silvoarables Wertholz-Pappel-Agroforstsystem auf dem Hof Hartmann in Rettmer, Niedersachsen, mit beispielhaftem Transektaufbau im Mischprobendesign. Der in Nord-Süd Richtung verlaufende 2,5 m breite Gehölzstreifen besteht aus zwei Pappelreihen und ist umgeben von 3 m breiten Blühstreifen. Im Gehölzstreifen ist das Mischprobendesign diagonal angelegt (4, a-d). Der Pflanzabstand innerhalb der Reihen beträgt unter 4 m, somit können die Abstände der Einstiche für die Mischproben auf 2 m festgelegt werden. Die Ackerstreifenbreite beträgt 81 m und die Probennahmepunkte orientieren sich an denen im Gehölzstreifen.

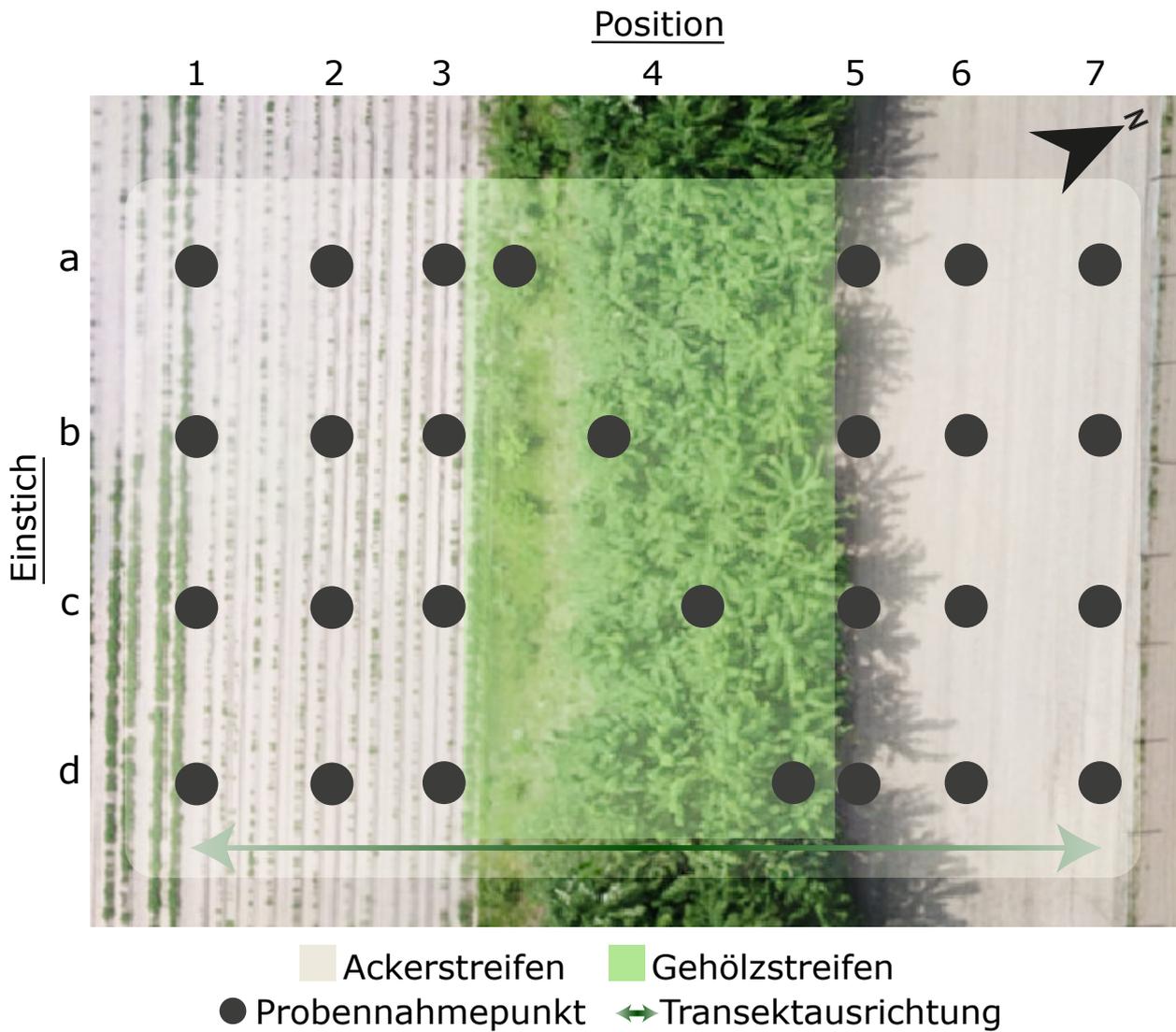


Abbildung 16: Silvoarables Kurzumtriebs-Pappel-Agroforstsystem auf dem Hof Hartmann in Rettmer, Niedersachsen, mit beispielhaftem Transektaufbau im Mischprobendesign. Die in Ost-West Richtung verlaufenden 12 m breiten Gehölzstreifen bestehen aus vier Pappelreihen und einer direkt angrenzenden Reihe mit Sträuchern. Im Gehölzstreifen ist das Mischprobendesign diagonal angelegt (4, a-d) um die kleinräumige Heterogenität abzubilden. Die Probennahmepunkte im Ackerstreifen orientieren sich an denen im Gehölzstreifen.

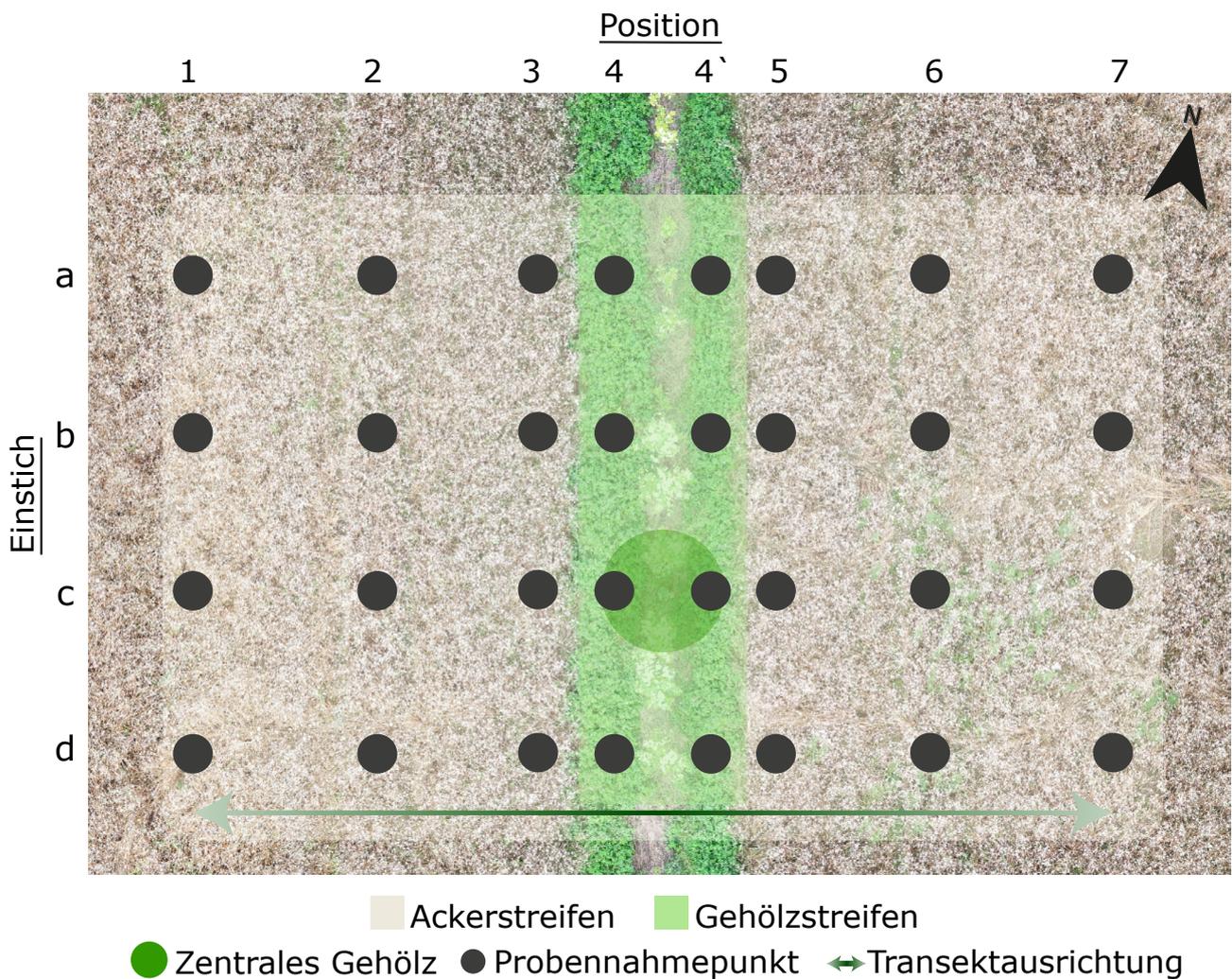


Abbildung 17: Silvoarables Mischform-Agroforstsystem auf dem Gladbacherhof der Justus-Liebig-Universität Gießen in Aumenau, Hessen, mit beispielhaftem Transektaufbau im Mischprobendesign. Der in Nord-Süd Richtung verlaufende 3 m breite Gehölzstreifen (18 m Ackerstreifen) besteht aus einer Gehölzreihe (Pflanzschema: Apfelbaum (zentrales Gehölz), 3x Pappel, Holunderstrauch, 3x Wertholz, Holunderstrauch, 3x Pappel) und 1,2 m breiten Klee grasstreifen als Pufferzone. Das Mischprobendesign im Gehölzstreifen kann zu beiden Seiten der durchgehend bepflanzten Gehölzreihe im Klee grasstreifen liegen (4 und 4' a-d). Eine diagonale Ausrichtung ist ebenfalls möglich um die Probenanzahl zu reduzieren, allerdings ist dann eine Differenzierung zwischen West-/Osteinfluss nicht mehr möglich.

2.5 Transektdesign für nicht-bodenkundliche Untersuchungen in Agroforstsystemen

Das Transektdesign lässt sich durch eine entsprechende Anpassung auf weitere, nicht-bodenkundliche Untersuchungen in Agroforstsystemen anwenden. Dies bietet die Möglichkeit, Agroforstsysteme in ihrer Vielschichtigkeit zu erfassen und die Wechselwirkungen der unterschiedlichen Ökosystemkomponenten darzustellen. Wenn möglich, sollten weitere Untersuchungen an jenen Stellen vorgenommen werden, an denen auch bodenkundliche Untersuchungen erfolgen, um direkte Rückschlüsse zwischen den Erhebungen ziehen zu können.

Ein möglicher Ansatz der Adaptierung des Transektdesigns für **Ertragsuntersuchungen** ist, das oben beschriebene kleinräumige Mischprobendesign für Bodenuntersuchungen auf die gesamte Länge eines Gehölzstreifens auszudehnen. Das kann in vier einzelnen Transekten je Gehölzstreifen resultieren. Die Lokalisierung der Transekte erfolgt dabei nach dem bereits beschriebenen Prinzip, indem das zentrale Gehölzelement und sein Gehölzabstand (D) definiert wird und ausgehend von diesem die drei weiteren Transekte festgelegt werden. Je nach Länge des Gehölzstreifens können die Transekte mehrere Meter voneinander entfernt liegen (s. Abb. 18).

Für **floristische Untersuchungen** auf Ackerflächen und Grünlandstandorten lassen sich wiederum je nach Fragestellung unterschiedlich große Aufnahmeflächen definieren. Beispielsweise kann ein Minimumareal von 25 m^2 für die Anlage der Vegetationsplots verwendet werden (Braun-Blanquet 1964; Binder et al. 2021). Die Aufnahmeflächen mit $2,5 \text{ m}$ Breite und 10 m Länge können parallel zur Gehölzreihe im Transektdesign positioniert werden.

Einen umfangreichen Überblick über weitere mögliche Untersuchungen im Transektdesign bietet der Methodenkatalog zum bürgerwissenschaftlichen Monitoring moderner Agroforst-Ökosysteme der Initiative für landwirtschaftlichen Wissensaustausch der Universität Münster (Binder et al. 2021).



Abbildung 18: Transekte von Quadratmeterschnitten zur Ertragsuntersuchung der Ackerkultur in einem silvoarablen Agroforstsystem. Die Transekte erstrecken sich zu beiden Seiten der Gehölzstreifen mit Probenahmepunkten in 1 m , $W/4$ und $W/2$ Entfernung zum Gehölzstreifenrand.

3 *Bodenkundliche Untersuchungen*

3.1 Mineralischer Boden und Streuauflage

Jede Nutzungskomponente eines Agroforstsystems hat ein spezifisches Management und damit unterschiedliche Ansprüche an das Bodenmanagement. Insbesondere in silvoarablen Agroforstsystemen ist der Gehölzstreifen (mehrjährige Pflanzen, keine Bodenbearbeitung und Düngung) klar vom Ackerland (einjährige Pflanzen, Bodenbearbeitung und Düngung) abgegrenzt. Hinzu kommen mögliche Maßnahmen zur Beikrautunterdrückung in der Gehölzreihe mittels Mulchauflage und/oder mechanische Bodenbearbeitung.

Da der Einfluss der Gehölze i.d.R. auch über die Gehölzstreifen hinaus reicht, ist es bei bodenkundlichen Untersuchungen immer notwendig, zwischen dem mineralischen Boden und der Streuauflage (Auflagehorizont) zu unterscheiden. Insbesondere im Hinblick auf die Kohlen-

stoffbilanzierung von Agroforstsystemen spielt diese Unterscheidung eine wichtige Rolle (Kim et al. 2016; Wachendorf et al. 2020).

Sobald mindestens 10 % der zu untersuchenden Fläche mit einer Streuauflage bedeckt sind, sollte deren Menge mit Hilfe eines Stechrahmens (30x30 oder 40x40 cm) ermittelt werden. Die Positionierung der Stechrahmen folgt dem Mischprobendesign des Transektaufbaus. Empfohlene Basis-Analyseparameter der Streuauflage sind der Tabelle 2 zu entnehmen.

Tabelle 2: Empfohlene Basisparameter zur Charakterisierung der Streuauflage in Agroforstsystemen mit Methodenempfehlung.

Parameter	Methode
Pflanzekohlenstoff (C)	Elementaranalyse
Pflanzenstickstoff (N)	Elementaranalyse
Pflanzenphosphor und -kalium (P, K)	Königswasseraufschluss oder Druckaufschluss mit HNO ₃ (HFA 2005)

3.2 Beprobungstiefe

Je nach Möglichkeit und Fragestellung der Untersuchungen wird eine Beprobung von Mineralböden bis in 1 m Tiefe empfohlen, um dadurch den größten Teil des durchwurzelbaren Raumes abzudecken und zusätzlich den im Unterboden besser vor Abbau geschützten Kohlenstoff zu erfassen (Smith et al. 2019).

Außerdem erweist sich eine Unterteilung in fünf Tiefenstufen mit 0-10, 10-30, 30-50, 50-70 und 70-100 cm als zielführend, wie sie auch bei der Bodenzustandserhebung vom Thünen-Institut durchgeführt wird (Jacobs et al. 2018). Wenn die daraus resultierende Anzahl an Bodenproben die Kapazitäten und Mittel übersteigt, können Tiefenstufen zusammengelegt oder im Notfall ganz weggelassen werden. Als Minimalanforderung wird jedoch die Bepro-

bung der oberen 30 cm empfohlen (Wiesmeier et al. 2020). Die Unterteilung in 0-10 und 10-30 cm ist dabei zwingend erforderlich, da in den oberen Zentimetern, insbesondere in den ersten Jahren, die stärksten Veränderungen und Unterschiede zu erwarten sind (Cardinael et al. 2017).

Wenn das notwendige Wissen vorliegt, ist eine Unterteilung nach Horizontstufen ebenfalls möglich. Es sollte jedoch darauf geachtet werden, dass eine spätere Vergleichbarkeit der Ergebnisse mit Datensätzen aus statischen Tiefenstufenzonierungen möglich ist. Die Horizontmächtigkeit und ihre Lagerungsdichten gilt es hierbei immer anzugeben.

3.3 Beprobungszeitpunkt und -häufigkeit

Die Probennahme sollte im Herbst nach der Ernte der Hauptkultur und Bodenbearbeitung oder im Frühjahr vor der ersten Düngung und Bodenbearbeitung stattfinden. Es sollte darauf geachtet werden, dass die letzte Bodenbearbeitung mindestens sechs Wochen zurückliegt (Wiesmeier et al. 2020).

Die Häufigkeit der Untersuchung richtet sich nach den zu untersuchenden Parametern und nach dem Management. Es ist beispielsweise ausreichend, sich langsam verändernde Parameter wie Gesamtkohlenstoffgehalt oder pH-Wert frühestens nach drei bis fünf Jahren erneut zu untersuchen (Schrumpf et al. 2011; Wiesmeier et al. 2020). Demgegenüber kann sich die Bodenbiologie schnell verändern und jahreszeitlichen Schwankungen unterliegen. Eine jährliche oder auch zeitlich höher aufgelöste Untersuchung der mikrobiellen Biomasse kann daher von Interesse sein. Mit dem Fokus auf einem Langzeitmonitoring der Landnutzungsänderung zeigen wissenschaftliche Untersuchungen in diesem Bereich unterschied-

liche Erkenntnisse (Sun et al. 2016; Beuschel et al. 2019; Beule und Karlovsky 2021). Als Minimalanforderung kann daher auch hier eine wiederholte Untersuchung nach drei bis fünf Jahren ausreichend sein.

Generell ist darauf zu achten, wiederholende Untersuchungen immer zur gleichen Zeit im Jahr durchzuführen, um jahreszeitliche Unterschiede auszuschließen. Zudem sollten die Feldbedingungen, insbesondere die Bodenfeuchte, zu den Untersuchungszeitpunkten möglichst identisch sein (Wiesmeier et al. 2020).

Es wird empfohlen, vor allem die erste Untersuchung eines Agroforstsystems zeitnah vor oder nach der Anlage des Systems durchzuführen um den Ausgangszustand festzuhalten. Wiederholende Untersuchungen können dann je nach Finanzierungsmöglichkeit in Anlehnung an die in Tabelle 3 erläuterten Beprobungshäufigkeiten durchgeführt werden. Für alle bodenchemischen und physikalischen Para-

meter besteht außerdem die Möglichkeit, die Bodenproben im lufttrockenen Zustand für längere Zeit zu lagern, bis Mittel zur Finanzierung der Analysekosten vorhanden sind. Wenn das notwendige Wissen für die sterile Bodenprobenaufbereitung für spätere mikrobiologische Bodenanalysen vorhanden ist, dann empfiehlt es sich, neben den lufttrockenen Proben, auch feldfrisches Bodenmaterial einzufrieren.

Wenn möglich, sollte außerdem die Untersuchung einer benachbarten Nicht-Agroforstfläche (Referenzfläche) mit gleichem Acker bzw. Grünlandmanagement zum gleichen Zeitpunkt erfolgen.

3.4 Bodenparameter- und Methodenempfehlungen

Die Empfehlung für eine Grundcharakterisierung einer Agroforstfläche mit relevanten Parametern aus der Bodengenetik, -physik, -chemie und -biologie ist der Tabelle 3 zu entnehmen.

Mit Ausnahme der Bodengenetik, für welche die Bodenkundliche Kartieranleitung KA5 (Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden 2005) sowie weiteres Kartenmaterial, Satellitenbilder und Hö-

henmodelle verwendet werden können, sind Laboranalysen für alle genannten Parameter notwendig. Diese sollten in Forschungseinrichtungen oder akkreditierten Laboren durchgeführt werden. Bei der Auswahl der Parameter sollte auch immer die Nutzungshistorie der Fläche berücksichtigt werden.

3.5 Dokumentation der Erhebungen

Die Aussagekraft von Zeitreihen hängt stark davon ab, dass die Erhebungen immer möglichst gleich durchgeführt werden. Hierfür ist es elementar wichtig, dass jede Erhebung detailliert dokumentiert und kommuniziert wird. Insbesondere wenn Erhebungen in späteren Jahren nicht von den selben Personen durchgeführt werden, kann damit die Vergleichbarkeit gefördert werden.

Es gilt Besonderheiten bei der Beprobung zu erfassen, das Management der Fläche zum Zeitpunkt der Untersuchung sowie von den vorangegangenen Jahren zu dokumentieren und die genauen Abstände der Proben zum Stammfuß des Gehölzes und dem Gehölzstreifenrand anzugeben.

Tabelle 3: Empfohlene Bodenparameter für die Grundcharakterisierung mineralischer Böden in Agroforstsystemen mit Erläuterung zur Methode und möglicher Häufigkeit der Untersuchung nach zu erwartender Veränderung des Parameters.

Parameter	Methode	Häufigkeit
Bodengenetik		
Geologie	KA5	einmalig
Bodentyp	KA5, Kartierung der Horizontabfolge und -tiefe	
Hydrologie	KA5	
Geländemorphologie	KA5, 3D-Modell	
Bodenphysik		
Lagerungsdichte	Stechzylinder oder Rammkernsondierung (Walter et al. 2016)	immer zusammen mit C_{tot}
Textur	Korngrößenanalyse mittels Siebmethode (Grobboden) und Nasssiebung mit Pipettiermethode oder Fingerprobe (Feinboden)	einmalig
Bodenchemie		
pH-Wert	in $CaCl_2$ oder H_2O	höchstens alle 3-5 Jahre
Elektrische Leitfähigkeit	in H_2O in mit pH	
Gesamtkohlenstoffgehalt (C_{tot})	Elementaranalyse	
Carbonatgehalt	nach Scheibler	
Gesamtstickstoffgehalt (N_{tot})	Elementaranalyse	
Kationenaustauschkapazität (KAK)	Potentielle KAK	
Extrahierbare Pflanzennährstoffe (P, K)	Calcium-Acetat-Lactat (CAL) oder Doppel-Lactat (DL) Auszug	starke Fluktuation je nach Management
Bodenbiologie		
Mikrobielle Biomasse (C)	Fumigation-Extraktion (K_2SO_4)	jährlich oder nach 3-5 Jahren

4 Zusammenfassung und Fazit

Der vorliegende Leitfaden ist ein erster Vorschlag zur Standardisierung von Bodenuntersuchungen in streifenförmigen Agroforstsystemen. Da jedoch lediglich Mindestanforderungen mit möglichen Parametern für eine allgemeine Grundcharakterisierung des Gesamtsystems genannt werden, bleibt ein großer Gestaltungsspielraum für weitere Untersuchungen bestehen. Hier ist besonders zu betonen, dass jede Untersuchung eines Agroforstsystems immer auch an die jeweiligen Gegebenheiten (z.B. durch bereits vorhandene Daten aus der landwirtschaftlichen Bewirtschaftung) sowie die spezifischen Anforderungen und Ziele eines Systems ausgerichtet werden sollte. Steht beispielsweise eine Minderung von Stickstoff im Boden aufgrund einer vorangegangenen Stickstoffbelastung im Vordergrund, dann kann eine Untersuchung des mineralischen Stickstoffs im Frühjahr und Herbst empfehlenswert sein. Auf der anderen Seite kann bei einer Abnahme des pH-Wertes im Boden, z.B. durch das Ausbleiben von Kalkungen, eine Untersuchung der Basen-Kationen (MB) nach Methoden der forstlichen Analytik (HFA 2005) von Interesse sein.

Zusammenfassend lässt sich sagen, dass Agroforstsysteme aktuelle Fragestellungen zur Entwicklung der Agrarlandschaft aufwerfen und vielfältige Untersuchungsmöglichkeiten bieten. Jede Untersuchung sollte daher kontextspezifisch geplant und entschieden werden. Der Leitfaden ist dabei als nützlicher Baukasten und nicht als eine eins zu eins Anleitung für die direkte Durchführung zu verstehen.



Abbildung 18: Silvoarables Agroforstsystem nach Umbruch der Zwischenfrucht im Frühjahr mit Raureif im Gehölzstreifen.

Literaturverzeichnis

- de Abreu LHG, de Freitas IC, Santana PHL, de Almeida Barbosa DL, Santos LDT, Santos MV, Sanglard DA, Frazão LA (2020) Variation in soil carbon, nitrogen and microbial attributes within a silvopastoral system in the Brazilian Cerrado. *Agroforestry Systems* 94, 2343–2353. doi:10.1007/s10457-020-00554-x.
- Ad-hoc-Arbeitsgruppe Boden (2005) 'Bodenkundliche Kartieranleitung. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe in Zusammenarbeit mit den Staatlichen Geologischen Diensten (Hrsg.).' (E. Schweizerbart'sche Verlagsbuchhandlung: Stuttgart)
- Basche AD, DeLonge MS (2019) Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PLOS ONE* 14, e0215702. doi:10.1371/journal.pone.0215702.
- Beule L, Karlovsky P (2021) Early response of soil fungal communities to the conversion of monoculture cropland to a temperate agroforestry system. *PeerJ* 9, e12236. doi:10.7717/peerj.12236.
- Beule L, Vaupel A, Moran-Rodas VE (2022) Abundance, Diversity, and Function of Soil Microorganisms in Temperate Alley-Cropping Agroforestry Systems: A Review. *Microorganisms* 10, 616. doi:10.3390/microorganisms10030616.
- Beuschel R, Piepho H-P, Joergensen RG, Wachendorf C (2019) Similar spatial patterns of soil quality indicators in three poplar-based silvo-arable alley cropping systems in Germany. *Biology and Fertility of Soils* 55, 1–14. doi:10.1007/s00374-018-1324-3.
- Binder J, Middelantis T, Meyenburg T, Pohl C, Obst L, Göller R, Köster P, Ortmann A, Schürmann L, Theil M, Wendiggensen A (2021) Methodenkatalog zum bürgerwissenschaftlichen Monitoring moderner Agroforst-Ökosysteme. Westfälische Wilhelms-Universität Münster 131.
- Böhm C, Hübner R, Hrsg. (2020) Bäume als Bereicherung für landwirtschaftliche Flächen: Ein Innovationskonzept für die verstärkte Umsetzung der Agroforstwirtschaft in Deutschland. Cottbus, IG AUFWERTEN 1–145.
- Böhm C, Kanzler M, Freese D (2014) Wind speed reductions as influenced by woody hedgerows grown for biomass in short rotation alley cropping systems in Germany. *Agroforestry Systems* 88, 579–591. doi:10.1007/s10457-014-9700-y.
- Braun-Blanquet J (1964) 'Pflanzensoziologie: Grundzüge der Vegetationskunde.' (Springer: Wien)
- Cardinael R, Chevallier T, Cambou A, Béral C, Barthès BG, Dupraz C, Durand C, Kouakoua E, Chenu C (2017) Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 236, 243–255. doi:10.1016/j.agee.2016.12.011.
- DeFAF (2020) 'Agroforstwirtschaft: Die Kunst, Bäume und Landwirtschaft zu verbinden.' (Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V.: Cottbus)
- DeFAF (2021) DeFAF Agroforst-Landkarte: Übersicht zu eingetragenen Agroforstflächen. <https://agroforst-info.de/wp-content/uploads/2022/03/Uebersicht-zu-Agroforstflaechen-in-Deutschland-2021-DeFAF-design.pdf>.
- Defrenet E, Roupsard O, Van den Meersche K, Charbonnier F, Pastor Pérez-Molina J, Khac E, Prieto I, Stokes A, Roumet C, Rapidel B, de Melo Virginio Filho E, Vargas VJ, Robelo D, Barquero A, Jourdan C (2016) Root biomass, turnover and net primary productivity of a coffee agroforestry system in Costa Rica: effects of soil depth, shade trees, distance to row and coffee age. *Annals of Botany* 118, 833–851. doi:10.1093/aob/mcw153.
- Feliciano D, Ledo A, Hillier J, Nayak DR (2018) Which agroforestry options give the greatest soil and above ground carbon benefits in different world regions? *Agriculture, Ecosystems & Environment* 254, 117–129. doi:10.1016/j.agee.2017.11.032.
- Golicz K, Bellingrath-Kimura S, Breuer L, Wartenberg AC (2022) Carbon accounting in European agroforestry systems – Key research gaps and data needs. *Current Research in Environmental Sustainability* 4, 100134. doi:10.1016/j.crsust.2022.100134.
- Götsch E (1992) Natural succession of species in agroforestry and in soil recovery. https://agrofloresta.net/static/artigos/agroforestry_1992_gotsch.pdf
- HFA (2005) 'Handbuch Forstliche Analytik - Boden, Humus, Pflanze, Wasser.' (Gutachterausschuss Forstliche Analytik)

- Hübner R, Kühnel A, Lu J, Dettmann H, Wang W, Wiesmeier M (2021) Soil carbon sequestration by agroforestry systems in China: A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 315, 107437. doi:10.1016/j.agee.2021.107437.
- Jacobs A, Flessa H, Don A, Heidkamp A, Prietz R, Dechow R, Gensior A, Poeplau C, Riggers C, Schneider F, Tiemeyer B, Vos C, Wittnebel M, Müller T, Säurich A, Fahrion-Nitschke A, Gebbert S, Hopfstock R, Jaconi A, Kolata H, Lorbeer M, Schröder J, Laggner A, Weiser C, Freibauer A (2018) Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Thünen Report 64. (Braunschweig, Germany) <http://d-nb.info/1172528241/>.
- Jacobs SR, Webber H, Niether W, Grahmann K, Lüttschwager D, Schwartz C, Breuer L, Bellingrath-Kimura SD (2022) Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agricultural and Forest Meteorology* 323, 109065. doi:10.1016/j.agrformet.2022.109065.
- Kay S, Rega C, Moreno G, den Herder M, Palma JHN, Borek R, Crous-Duran J, Freese D, Giannitsopoulos M, Graves A, Jäger M, Lamersdorf N, Memedemin D, Mosquera-Losada R, Pantera A, Paracchini ML, Paris P, Roces-Díaz JV, Rolo V, Rosati A, Sandor M, Smith J, Szerencsits E, Varga A, Viaud V, Wawer R, Burgess PJ, Herzog F (2019) Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83, 581–593. doi:10.1016/j.landusepol.2019.02.025.
- Kim D-G, Kirschbaum MUF, Beedy TL (2016) Carbon sequestration and net emissions of CH₄ and N₂O under agroforestry: Synthesizing available data and suggestions for future studies. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 226, 65–78. doi:10.1016/j.agee.2016.04.011.
- Mayer S, Wiesmeier M, Sakamoto E, Hübner R, Cardinael R, Kühnel A, Kögel-Knabner I (2022) Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 323, 107689. doi:10.1016/j.agee.2021.107689.
- Nair P (2011) Methodological challenges in estimating carbon sequestration potential of agroforestry systems. 'Carbon Sequestration Potential Agrofor. Syst. Oppor. Chall.' *Advances in Agroforestry*. pp. 3–16. (Springer Dordrecht Heidelberg London New York) doi:10.1007/978-94-007-1630-8_1.
- Schrumpf M, Schulze E, Kaiser K, Schumacher J (2011) How accurately can soil organic carbon stocks and stock changes be quantified by soil inventories. *Biogeosciences* 1193–1212. doi:10.5194/BG-8-1193-2011.
- Seitz B, Carrard E, Burgos S, Tatti D, Herzog F, Jäger M, Sereke F (2017) Erhöhte Humusvorräte in einem siebenjährigen Agroforstsystem in der Zentralschweiz. *Agrarforschung Schweiz* 318–323.
- Smith P, Soussana J-F, Angers D, Schipper L, Chenu C, Rasse DP, Batjes NH, Egmond F van, McNeill S, Kuhnert M, Arias-Navarro C, Olesen JE, Chirinda N, Fornara D, Wollenberg E, Álvaro-Fuentes J, Sanz-Cobena A, Klumpp K (2019) How to measure, report and verify soil carbon change to realize the potential of soil carbon sequestration for atmospheric greenhouse gas removal. *Global Change Biology* 26, 219–241. doi:10.1111/gcb.14815.
- Sun H, Koal P, Gerl G, Schroll R, Gatteringer A, Joergensen R, Munch J (2016) Microbial communities and residues in robinia- and poplar-based alley-cropping systems under organic and integrated management. *Agroforestry Systems* 12. doi:10.1007/s10457-016-0009-x.
- Torralla M, Fagerholm N, Burgess PJ, Moreno G, Plieninger T (2016) Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 230, 150–161. doi:10.1016/j.agee.2016.06.002.
- Wachendorf C, Piepho H-P, Beuschel R (2020) Determination of litter derived C and N in litterbags and soil using stable isotopes prevents overestimation of litter decomposition in alley cropping systems. *Pedobiologia* 81–82, 150651. doi:10.1016/j.pedobi.2020.150651.
- Walter K, Don A, Tiemeyer B, Freibauer A (2016) Determining Soil Bulk Density for Carbon Stock Calculations: A Systematic Method Comparison. *Soil Science Society of America Journal* 80,. doi:10.2136/sssaj2015.11.0407.
- Wiedermann E, Hübner R, Kilian S, Wiesmeier M (2022) Festlegung von Kohlenstoff in Streuobstwiesen des Alpenvorlands. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) 66.
- Wiesmeier M, Mayer S, Paul C, Helming K, Don A, Franko U, Steffens M, Kögel-Knabner I (2020) CO₂-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen. *BonaRes-Zentrum Für Bodenforschung* 19. doi:10.20387/bonares-f8t8-xz4h.
- Zomer RJ, Neufeldt H, Xu J, Ahrends A, Bossio D, Trabucco A, van Noordwijk M, Wang M (2016) Global Tree Cover and Biomass Carbon on Agricultural Land: The contribution of agroforestry to global and national carbon budgets. *Scientific Reports* 6, 29987. doi:10.1038/srep29987.

DeFAF Leitfaden

Im Rahmen des neuen DeFAF Format „Leitfaden“ sollen in Zukunft noch weitere Leitfäden zum Thema Agroforst veröffentlicht werden. Der Fokus steht dabei auf der Wissensvermittlung und dem -transfer von Forschungsmethoden für die Agroforstforschung.

Nehmen Sie gerne Kontakt zu uns auf, wenn Sie Ideen für einen Leitfaden haben oder an einem Thema diesbezüglich arbeiten: info@defaf.de

Der Deutsche Fachverband für Agroforstwirtschaft

Sie interessieren sich für die Agroforstwirtschaft, haben aber noch Fragen dazu? Sprechen Sie uns gerne an!

Der DeFAF e.V. steht als zentraler Ansprechpartner zu allen Themen rund um die Agroforstwirtschaft in Deutschland zur Verfügung und setzt sich dafür ein, dass die Agroforstwirtschaft als nachhaltiges Landbausystem verstärkt umgesetzt wird. Ziel ist es, die verschiedenen Akteure aus Land- und Ernährungswirtschaft, Politik und Verwaltung, Naturschutz und andere Interessierte zum Thema Agroforstwirtschaft besser zu vernetzen. Nur so können gemeinsam praktikable und nachhaltige Lösungen für die zukünftige Agrarwirtschaft gefunden werden.

Der gemeinnützige Verein wirkt in mehreren Fachbereichen, die sich u.a. mit Themen wie Beratung, Aus- und Weiterbildung sowie mit ökonomischen, ökologischen und rechtlichen Fragen beschäftigen. Bei Fragen oder Anregungen kommen Sie gerne auf uns zu.

Erfahren Sie mehr über den DeFAF: <https://agroforst-info.de/>

