

Justus-Liebig-Universität Gießen
Fachbereich 09
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung II
Professur für Ökologischen Landbau

Titel der Bachelorarbeit:

„Wirkung zweier Baumarten (Populus sp. und Robinia pseudoacacia) auf die Stickstoffverfügbarkeit eines Agroforstsystems.“

Matrikelnummer: 8101724

Studiengang: Agrarwissenschaften

Abgabedatum 26.12.2025

Betreut von: Dr. Wiebke Niether (Erstbetreuerin)

Sarah-Olivia Peter (Zweitbetreuerin)

Eingereicht von Noelle Demirci

Biebortal, den 10.11.2025

Zusammenfassung

Agroforstsysteme gelten als nachhaltige Landnutzungsform mit dem Potenzial, Bodenfunktionen zu verbessern und Flächenerträge sowie Ökosystemdienstleistungen zu steigern. In der vorliegenden Arbeit wurde untersucht, inwiefern die Baumarten Pappel (*Populus sp.*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) Stickstoffverfügbarkeit sowie das Kohlenstoff zu Stickstoff-Verhältnis (C:N) im Oberboden eines Agroforstsystems beeinflussen. Zu diesem Zweck wurden Boden- und Laubproben in einem 2021 angelegten System in Miltenberg (Bayern) entnommen und hinsichtlich ihrer Gehalte an mineralischem Stickstoff (N_{min}), Gesamt-Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff sowie des C:N-Verhältnisses analysiert.

Die Ergebnisse zeigen signifikant höhere N_{min}-Werte unter Robinien im Vergleich zu Pappeln ($\Delta = +17,74 \text{ kg/ha}$, $p = 0,01$), wobei der Unterschied vor allem durch erhöhte Nitratkonzentrationen entsteht. Die höchsten N_{min}-Werte unter Robinien traten in unmittelbarer Nähe zur Baumreihe auf, was auf eine begrenzte räumliche Reichweite der Gehölzeinflüsse hinweist. Dieser Effekt ist auf die Fähigkeit der Robinie zur biologischen Stickstofffixierung, sowie wahrscheinlich auf das engere C:N-Verhältnis der Robinienlaubstreu zurückzuführen. Da diese Umstände eine schnellere mikrobielle Zersetzung und Mineralisierung fördern. Das C:N-Verhältnis im Boden ist unter Robinien geringfügig höher als unter Pappeln, allerdings ohne statistische Signifikanz ($p = 0,08$).

Die Robinie zeigt in diesem Zusammenhang ein hohes Potenzial zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit, insbesondere in nährstoffarmen oder von Degradierung betroffenen Agrarlandschaften. Gleichzeitig ist sie aufgrund ihrer vegetativen Ausbreitung über Wurzelausläufer und Veränderung bodenchemischer Prozesse aus naturschutzfachlicher Perspektive kritisch zu betrachten. Die Ergebnisse unterstreichen die Bedeutung einer differenzierten, standortangepassten Bewertung von Baumarten in Agroforstsystemen, bei der sowohl agronomische Chancen als auch ökologische Risiken berücksichtigt werden sollten.

Gliederung

Zusammenfassung	2
Abkürzungsverzeichnis	4
Abbildungsverzeichnis	5
Tabellenverzeichnis	6
1. Einleitung	7
1.1 Zielstellung und Forschungsfragen.....	8
1.2 Bodenprozesse und Einfluss der Baumarten.....	9
2. Material und Methoden	10
2.1 Untersuchungsgebiet.....	10
2.2 Versuchsdesign und Probenentnahme	11
.....	12
2.3 Laboranalysen.....	13
2.4 Datenauswertung	14
3. Ergebnisse.....	15
3.1 Mineralischer Stickstoff (N _{min})	15
3.2 Kohlenstoff, Stickstoff und C:N-Verhältnis.....	18
3.2.1 Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff (C) und Gesamt-Stickstoff (N).....	18
3.2.2 C:N-Verhältnis im Boden	19
3.2.3 C:N-Verhältnis der Laubstreu.....	20
3.2.4 Zusammenhang zwischen Streu- und Bodenparametern.....	20
4. Diskussion und Schlussfolgerung	22
4.1 Einfluss der Baumart auf die Stickstoffverfügbarkeit	22
4.2 Kein signifikanter Einfluss auf C:N im Boden	24
4.3 Streuqualität als erklärender Mechanismus	25
4.4 Räumliche Verteilung der Effekte	26
4.5 Robinie als invasive Art.....	28
4.6 Methodische Reflexion	30
4.7 Schlussfolgerung	31
5. Fazit und Ausblick.....	33
Literaturverzeichnis	VIII
Anhang.....	XII
Ehrenwörtliche Erklärung.....	XIV

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
ANOVA	Analysis of Variance (Varianzanalyse)
C	Kohlenstoff
N	Stickstoff
C:N	Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff
KI	Konfidenzintervall
DIN	Deutsche Industrie-Norm
MODEMA	Modell und Demonstrationsnetzwerk für Agroforstwirtschaft in Deutschland
NH_4^+	Ammonium
NO_3^-	Nitrat
Nmin	mineralischer Stickstoff
PapLaub	Pappellaubstreu
RobLaub	Robinienlaubstreu
SOC	soil organic carbon / organischer Bodenkohlenstoff
TL	Tree Line / Baumstreifen (Probepunkt im Baumstreifen)

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung der Transekte anhand einer Drohnenaufnahme	11
Abbildung 2: Aufnahmen des Agroforstsystems	12
Abbildung 3: Mittelwerte des Nmin-Gehalts [kg/ha] im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit von Baumart (Pappel, Robinie) und Distanz zur Baumreihe.....	16
Abbildung 4: Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu von Pappel (<i>Populus sp.</i>) und Robinie (<i>Robinia pseudoacacia</i>) und dem Gehalt an mineralischem Stickstoff im Oberboden im Baumstreifen (TL).	21

Tabellenverzeichnis

<i>Tabelle 1: Mittelwerte des Nmin-Gehalts [kg/ha] in Abhängigkeit von Baumart.....</i>	<i>15</i>
<i>Tabelle 2: Mittelwerte des Gesamt-Kohlenstoffs (C), Gesamt-Stickstoffs (N) sowie C:N-Verhältnis im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit vom Transekt und Distanz zur Baumreihe.</i>	<i>18</i>
<i>Tabelle 3: Einzelwerte des Gesamt-Kohlenstoffs (C), Gesamt-Stickstoffs (N) und C:N-Verhältnisses der Laubstreu unter Pappel und Robinie.</i>	<i>20</i>

1. Einleitung

Der Ackerbau steht angesichts zunehmender Extremwetterereignisse, einem höheren Ertragsanspruch und der wachsenden Rolle des Umweltschutzes, vor großen Herausforderungen (FAO, 2017; IPCC et al., 2022). Klimawandel, Bodenerosion und der Verlust biologischer Vielfalt erfordern eine Neuausrichtung landwirtschaftlicher Produktionssysteme, die nicht nur Erträge sichern, sondern auch ökologische Funktionen stärken (IPBES et al., 2019; Panagos et al., 2015). Eine Möglichkeit, diesen Anforderungen gerecht zu werden, liegt in der Integration von Gehölzen in landwirtschaftlich genutzte Flächen: den Agroforstsystemen (Kay et al., 2019).

Agroforstsysteme vereinen den Anbau von Bäumen oder Sträuchern mit landwirtschaftlichen Kulturen und/oder Grasland und gelten als vielversprechender Ansatz für eine multifunktionale Landwirtschaft. Studien zeigen, dass solche Systeme positive Effekte auf Biodiversität, Mikroklima, Erosionsschutz und Biomasseproduktion haben können (Cardinael et al., 2017; Jacobs et al., 2022; Jose, 2009; Veldkamp et al., 2023). Insbesondere der Einfluss von Bäumen auf bodenchemische Parameter ist von hoher agronomischer Relevanz, da Gehölze durch ihre Wurzelsysteme und Streueinträge die Bodenstruktur und den Nährstoffhaushalt maßgeblich beeinflussen können (Lorenz and Lal, 2014).

Ein zentraler Mechanismus der Bodenfruchtbarkeit ist die Stickstoffverfügbarkeit, da Stickstoff als einer der drei Hauptnährstoffe das Pflanzenwachstum limitiert (Schubert, 2024; Weil and Brady, 2017). Die Wahl der Baumarten innerhalb von Agroforstsystemen kann erheblichen Einfluss auf die Stickstoff-Dynamik im Boden nehmen (Augusto et al., 2002; Cardinael et al., 2017; Jose, 2009). Besonderes Interesse gilt deswegen der Robinie, da sie als stickstofffixierende Art durch Wurzel- und Streueinträge zur N-Anreicherung im Boden beitragen kann (Boring and Swank, 1984). Trotz ihres agronomischen Potenzials wird die Robinie in Mitteleuropa zugleich kritisch als invasive Art betrachtet, da sie sich unter bestimmten Bedingungen schnell ausbreiten und insbesondere an trockenen offenen Standorten, heimische Arten, verdrängen kann (Cierjacks et al., 2013; Vítková et al., 2017). Vor dem Hintergrund wärmerer und trockenerer Bedingungen könnte der Klimawandel ihre Etablierung zusätzlich begünstigen (Kleinbauer et al., 2010).

1.1 Zielstellung und Forschungsfragen

Ziel dieser Arbeit ist es, den Einfluss der Baumarten **Pappel** (*Populus sp.*) und **Robinie** (*Robinia pseudoacacia*) auf Stickstoffgehalte und C:N-Verhältnisse im Oberboden eines jungen Agroforstsystems zu analysieren. Untersucht wurden sowohl die Unterschiede in den **Gehalten an mineralischem Stickstoff, dessen Zusammensetzung, die Menge an Kohlenstoff und Stickstoff in Boden und Laub, sowie die C:N-Verhältnisse** zwischen den beiden Baumarten. Ebenfalls wurden deren **räumliche Verteilung** entlang eines Transektes vom Baumstreifen in die angrenzende Ackerfläche untersucht.

Daraus resultieren folgende Forschungsfragen:

1. **Wie unterscheiden sich das C:N-Verhältnis und die Nmin-Konzentration im Oberboden unter Pappel- und Robinienstreifen?**
2. **Wie verläuft die Verteilung dieser Parameter entlang der Distanz zur Baumreihe in Richtung der Ackerfläche?**
3. **Lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und den bodenchemischen Parametern (C:N, Nmin) herstellen?**
4. **Welches Potential haben Robinien in einer nachhaltigen Landwirtschaft?**

1.2 Bodenprozesse und Einfluss der Baumarten

Die Fruchtbarkeit eines Bodens wird durch seine physikalischen, chemischen und biologischen Eigenschaften beeinflusst. Ein essentieller Faktor ist dabei die Verfügbarkeit von Stickstoff, da dieser in gemäßigten Breiten häufig der limitierende Nährstoff für das Pflanzenwachstum ist (Weil and Brady, 2017). Pflanzen nehmen Stickstoff nur in mineralischer Form als Nitrat (NO_3^-), Ammonium (NH_4^+) (oder als Harnstoff) über den Boden auf. Ammonium entsteht bei der Ammonifikation, bei welcher Bakterien und Pilze aus organischen Stickstoffverbindungen Ammonium produzieren. Durch die anschließende Nitrifikation wird Ammoniumstickstoff zu dem gut pflanzenverfügbaren Nitrat umgewandelt (Schubert, 2024; Weil and Brady, 2017).

Ein zentraler Indikator für die Abbaubarkeit organischer Substanz ist das Verhältnis von Kohlenstoff zu Stickstoff (C:N-Verhältnis). Es beschreibt das massenbasierte Verhältnis von C zu N in einem Material, etwa in der Laubstreu von Bäumen.

Laubstreu mit engem C:N-Verhältnis (z. B. $\text{C:N} \approx 20$; entspricht 20:1) wird in der Regel schneller zersetzt und fördert die Stickstofffreisetzung. Weite C:N-Verhältnisse (> 30) fördern hingegen die Stickstoffimmobilisierung, da C-heterotrophe Organismen zum Aufbau ihrer Biomasse Stickstoff aus dem Boden benötigen und diesen speichern, bis sie absterben (Hättenschwiler et al., 2008; Prescott, 2010; Schubert, 2024, p. 121).

Leguminosen wie *Robinia pseudoacacia*, die über eine Symbiose mit Rhizobien atmosphärischen Stickstoff binden können, bilden eine Ausnahme. Sie können den gebildeten Stickstoff zunächst organisch bzw. als NH_4^+ an den umliegenden Boden abgeben. Durch Nitrifikation wird nachfolgend NO_3^- gebildet, was zu einer Anreicherung von N_{min} beiträgt (Von Holle et al., 2013; Weil and Brady, 2017).

Populus-Arten hingegen gelten als schnellwüchsige, aber nicht stickstofffixierende Bäume. Ihre Laubstreu weist häufig ein höheres C:N-Verhältnis auf und wird langsamer mineralisiert (Erdenebileg et al., 2023; Giweta, 2020). Der Vergleich beider Arten innerhalb eines Agroforstsystems erlaubt daher Rückschlüsse der baumartenspezifischen Wirkungen auf die Stickstoffdynamik im Boden und liefert potenziell relevante Erkenntnisse für die Gestaltung nachhaltiger Anbausysteme.

2. Material und Methoden

2.1 Untersuchungsgebiet

Die Entnahme der Bodenproben fand in einem Alley-Cropping Agroforstsystem des Bauernhofes der Familie Frey (MODEMA Partnerbetrieb) in 63897 Miltenberg statt. Das dortige Klima ist gemäßigt mit einer durchschnittlichen Jahresniederschlagsmenge von 700,9 mm (Deutscher Wetterdienst (DWD), 2025a) und einer mittleren Jahrestemperatur von 10,4 °C (Deutscher Wetterdienst (DWD), 2025b). Laut Angaben des Betriebs handelt es sich um Buntsandstein-Verwitterungsboden mit 40-45 Bodenpunkten. Bodenklassifikationen des LfU Bayern weisen den Boden in der Region überwiegend als Braunerde bis Pseudogley-Braunerde auf Lösslehm oder Sedimentgestein aus (Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2024).

Das untersuchte Agroforstsystem wurde 2021 mit einer Pflanzdichte von 2222 Bäumen/–ha gepflanzt. Die Hangneigung beträgt 5-10 % und die Ausrichtung der Baumstreifen ist in Nord-Süd-Richtung. Familie Frey bewirtschaftet ihren Gemischtbetrieb ökologisch.

Die Fläche umfasst drei Baumstreifen mit zwei Baumarten. Die äußeren Baumstreifen mit den Arten Pappel (*Populus sp.*) und ein Baumstreifen mit Robinien (*Robinia pseudoacacia*). Die Robinien wurden als wurzelnackte Jungpflanzen mit circa 30 cm Höhe gepflanzt, die Pappeln als Steckruten verschiedenster Pappelsorten (Marke/Dender, Skado, Vesten und hybride 275). Der Ackerschlag ist 5 ha groß und die Baumreihen sind 9 m (Pappel) und 12 m (Robinie) breit. In jedem der zwei Pappelbaumstreifen wurden je vier Reihen Pappeln gepflanzt, in dem Robinienbaumstreifen drei Reihen Robinien. Die Bäume sind im ersten Umtrieb nach der Pflanzung. Zwischen jedem Baumstreifen befinden sich je 54 m Ackerstreifen. Zum Zeitpunkt der Probenentnahme war die Ackerfläche mit einer Zwischenfruchtmischung mit hohem Anteil an Kreuzblütlern (*Brassicaceae*) begrünt, darunter Arten wie Ölrettich (*Raphanus sativus var. oleiformis*) und Rübsen (*Brassica rapa*). Die gesamte Fruchtfolge der Fläche besteht aus: Klee gras (zweijährig) -Mais -Winterweizen -Rotklee Vermehrung- Sommerweizen- Roggen- Dinkel (Sebastian Frey, 2025).

2.2 Versuchsdesign und Probenentnahme

Die Bodenproben wurden am 30. und 31. Oktober 2024 entnommen. Zur Untersuchung bodenchemischer Parameter wurden zwölf Transekte angelegt, je sechs pro Baumart (*Populus* sp. und *Robinia pseudoacacia*). Es lagen sich immer die Transekte 1 und 4, 2 und 5 sowie 3 und 6 gegenüber. Innerhalb jedes Transektes erfolgte die Beprobung entlang eines Gradienten an fünf Distanzen parallel zur Baumreihe (TL, 1 m, 6 m, $\frac{1}{4}$ Ackerbreite (13,5 m) und $\frac{1}{2}$ Ackerbreite (27 m)). Die Beprobung erfolgte mittels einer Nietfeld-Bodensonde, welche auf einem Geländeleichtfahrzeug montiert ist. Entnommen wurden die Bodenproben in einer Tiefe von 0-30 cm des Oberbodens. Je Probepunkt wurden drei Einstiche mit der Nietfeld-Bodensonde zu einer Mischprobe (~200 g) zusammengeführt.

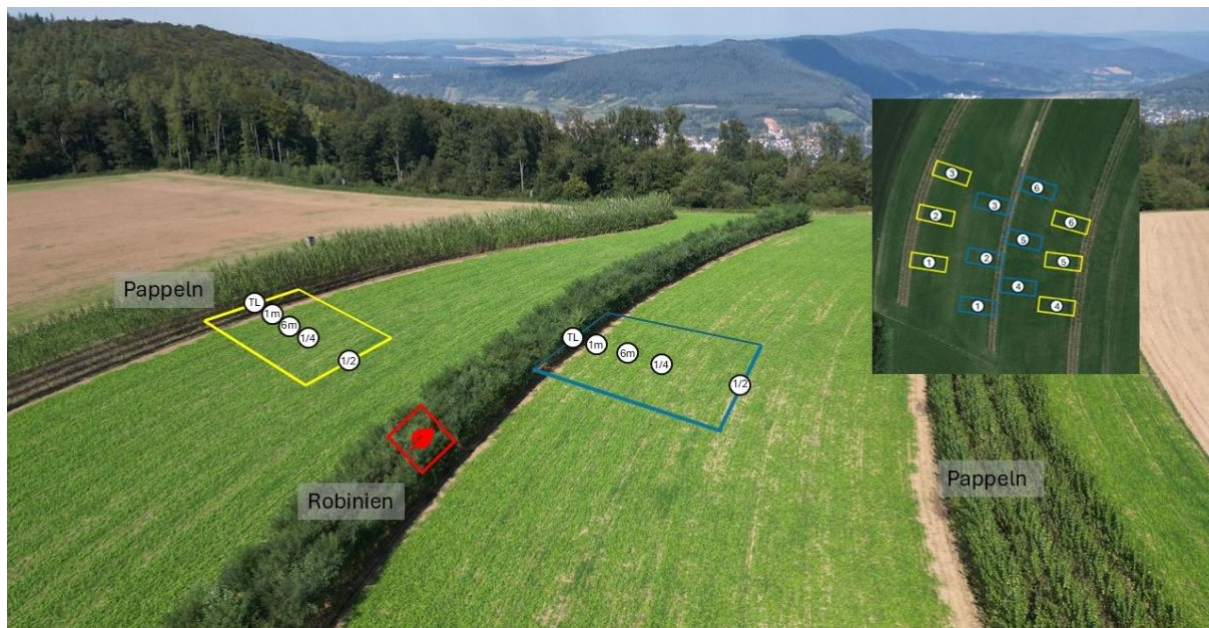


Abbildung 1: Schematische Darstellung der Transekte anhand einer Drohnenaufnahme

Darstellung von Sarah-Olivia Peter.

Die gelben Transekte markieren den Bereich der Pappelbodenproben, die blauen Transekte die Robinienbodenproben. Der rote Rahmen ist eine beispielhafte Darstellung der 1x1 m Rahmen, welche für das Sammeln der Laubstreu verwendet wurden.

Zusätzlich wurde mittels 1x1 m Rahmen herabgefallenes Laub in der Mitte der Baumstreifen gesammelt, getrennt nach PapLaub (Pappellaubstreu) und RobLaub (Robinienlaubstreu), um den Einfluss der organischen Einträge auf die Stickstoffdynamik zu untersuchen.

Insgesamt wurden 60 Bodenproben (je 30 pro Baumart) entnommen. Sowie 6 Laubproben (je 3 pro Baumart) aus den Baumstreifen gesammelt



Abbildung 2: Aufnahmen des Agroforstsystems

Die obere Bildhälfte zeigt einen der Pappelbaumstreifen. Die untere Bildhälfte den Robinienbaumstreifen.

Aufgenommen im Rahmen der Probenentnahme von Sarah-Olivia Peter

2.3 Laboranalysen

Die Bodenproben wurden nach der Entnahme gekühlt und später bis zur Nmin-Extraktion eingefroren, um die mikrobielle Aktivität in den Bodenproben zu stoppen und Verluste sowie Verfälschungen der Nmin-Werte zu vermeiden.

Zur Bestimmung des mineralischen Stickstoffs (Nmin) wurden NH_4^+ - und NO_3^- -Ionen durch Extraktion mit 0,015-molarer KCl-Lösung (DIN 19746:2005-06) aus den Bodenproben gelöst. Die Konzentrationen wurden photometrisch mit einem Continuous-Flow-Analyzer (SEAL Analytical AA3) bestimmt. Nach der Extraktion wurden sie bei 40 °C im Trockenschrank getrocknet, anschließend manuell zerkleinert und später für die Elementaranalyse erneut im Mörser gemahlen. Für die Trockensubstanzbestimmung wurden die Proben erneut 48 Stunden bei 105 °C im Trockenschrank getrocknet. Es erfolgte eine Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs und Gesamt-Kohlenstoffs (sowie dem C:N-Verhältnis) mittels Elementaranalyse (Variomax) (DIN ISO 13878:1998-11).

Die Laubproben wurden ebenfalls getrocknet, grob zerkleinert, mit einer Ultrazentrifugalmühle (ZM 200) auf <2 mm gesiebt und mittels Elementaranalyse auf Gesamt-Kohlenstoff, Gesamt-Stickstoff und C:N-Verhältnis untersucht.

Es wurden für Boden- und Laubproben die Trockensubstanz ermittelt und mit den gemessenen Werten verrechnet, um Feuchteinflüsse auszuschließen und vergleichbare Konzentrationen beziehungsweise Massen zu erhalten.

Alle genannten Analysen wurden in Doppelbestimmungen durchgeführt. Für die Auswertung wurde jeweils der arithmetische Mittelwert der beiden Messwerte berechnet.

2.4 Datenauswertung

Die Datenaufbereitung und statistische Analyse erfolgten in R 4.3.2 (R Core Team, 2025) mit RStudio 2023.12.1 (Posit, 2025). Datenimport und -aufbereitung erfolgten mit *readxl* (Wickham and Bryan, 2025) und *dplyr* (Wickham et al., 2023). Grafiken wurden mit *ggplot2* erstellt (Wickham, 2016). Post-hoc-Vergleiche (Estimated Marginal Means, Tukey-Adjustierung) wurden mit *emmeans* durchgeführt (Lenth, 2025).

Zur Prüfung der Effekte auf die bodenchemischen Parameter wurden folgende Varianzanalysen (ANOVA) durchgeführt:

Für Nmin eine zweifaktorielle ANOVA mit den Faktoren *Baumart* (Pappel, Robinie) und *Distanz* (0, 1, 6, 13,5, 27 m). Bei signifikanter Interaktion (*Baumart* $\times$ *Distanz*) wurden einfache Effekte der Baumart je Distanz mit *emmeans* bestimmt; die paarweisen Vergleiche wurden Tukey-adjustiert. Für NO_3^- und NH_4^+ wurden, getrennt nach Baumart, einfaktorielle ANOVAs über die Distanzstufen gerechnet; bei Signifikanz folgten Tukey-HSD-Post-hoc-Tests. Für Gesamt-C, Gesamt-N und Boden-C:N wurden Haupteffekte und/oder einfaktorielle ANOVAs über die Distanz geprüft, Post-hoc analog wenn das Ergebnis signifikant war.

Die Modellvoraussetzungen wurden über Residuenplots (Histogramm, Q-Q-Plot) sowie den Shapiro-Wilk-Test (Normalverteilung der Residuen) geprüft. Varianzhomogenität wurde visuell beurteilt. Das Signifikanzniveau betrug $\alpha = 0,05$. Zusätzlich wurden Korrelationsanalysen nach Pearson durchgeführt, um mögliche Zusammenhänge zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und dem Nmin-Gehalt im Boden zu prüfen.

Zur besseren Veranschaulichung der Ergebnisse wurde ein Balkendiagramm (Distanzverläufe) und ein Streudiagramm mit linearer Regressionslinie erstellt. Die Tabellenaufbereitung erfolgte mit Excel (Microsoft, 2025).

3. Ergebnisse

3.1 Mineralischer Stickstoff (Nmin)

Wie unterscheiden sich die Nmin-Konzentrationen im Oberboden unter Pappel- und Robinienstreifen? Wie verläuft die Nmin-Verteilung entlang der Distanz zur Baumreihe?

Zur Einordnung der Stickstoffverfügbarkeit wurden zunächst die mittleren Nmin-Gehalte in Abhängigkeit von Baumart und Entfernung zum Baumstreifen (TL) betrachtet (Tab. 1). Dabei zeigte sich bei den Robinien insgesamt höhere Mittelwerte als bei den Pappeln. In unmittelbarer Nähe zum Baumstreifen waren bei Robinien besonders hohe Nmin-Gehalte zu verzeichnen, während sich die Werte mit zunehmender Distanz tendenziell annäherten. Der Verlauf der Nmin-Gehalte unter den Pappeln war jedoch gegensätzlich zu dem der Robinien (½ Acker höchste Werte).

Tabelle 1: Mittelwerte des Nmin-Gehalts [kg/ha] in Abhängigkeit von Baumart und Distanz zum Baumstreifen.

Mit * gekennzeichnete Werte sind signifikant höher im Vergleich (Tukey-Test, $p < 0,05$).

Baumart	Distanz	Nmin [kg/ha]
Pappel	TL (Baumstreifen)	27,46
Robinie	TL (Baumstreifen)	90,52*
Pappel	1 m	28,75
Robinie	1 m	66,92*
Pappel	6 m	53,13
Robinie	6 m	41,17
Pappel	¼ Acker: 13,5 m	45,77
Robinie	¼ Acker: 13,5 m	52,09
Pappel	½ Acker: 27 m	56,78
Robinie	½ Acker: 27 m	49,88

Zur Prüfung der Effekte von Baumart und Distanz wurde eine zweifaktorielle ANOVA durchgeführt. Es zeigte sich ein signifikanter Haupteffekt der Baumart ($F(1, 50) = 8,12$; $p = 0,01$), kein Haupteffekt der Distanz ($F(4, 50) = 0,51$; $p = 0,73$) und eine **signifikante Interaktion von Baumart und Distanz** ($F(4, 50) = 5,28$; $p = 0,001$).

Einzelvergleiche der Distanzen (emmeans, Tukey-adjustiert) zeigten, dass der Unterschied im Nmin-Gehalt insbesondere in der Nähe der Baumstreifen am höchsten war.

Im Robinien-Baumstreifen (TL, 0 m) lag der Nmin-Gehalt im Mittel **63,06 kg/ha** signifikant über dem Wert der Pappeln ($p < 0,001$). In 1 m Entfernung war der Unterschied mit **38,17 kg/ha** ebenfalls signifikant ($p = 0,01$).

Ab 6 m Distanz konnten keine signifikanten Unterschiede mehr festgestellt werden (6 m: $\Delta = -11,96$ kg/ha; $p = 0,39$; 13,5 m: $\Delta = 6,32$ kg/ha; $p = 0,65$; 27 m: $\Delta = -6,90$ kg/ha; $p = 0,62$).

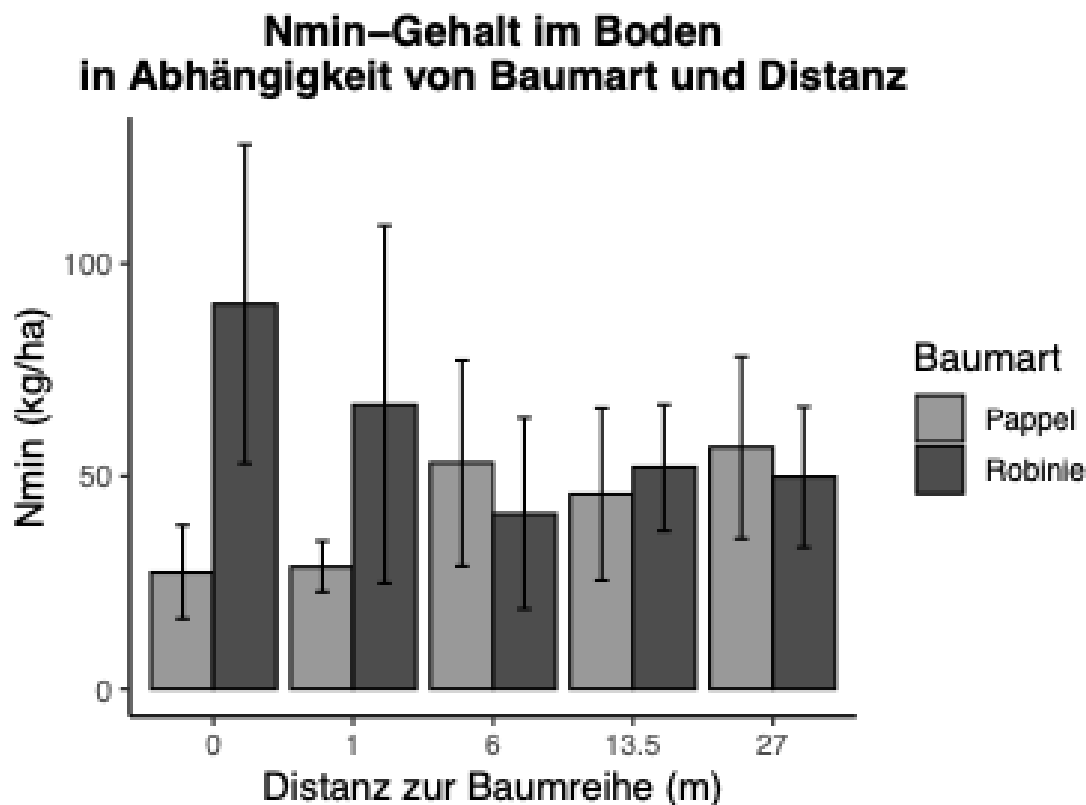


Abbildung 3: Mittelwerte des Nmin-Gehalts [kg/ha] im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit von Baumart (Pappel, Robinie) und Distanz zur Baumreihe.

Ergänzend ergab eine einfaktorielle ANOVA über alle Distanzen hinweg einen Effekt der Baumart ($F(1, 58) = 6,44$; $p = 0,01$); der zugehörige Tukey-Vergleich bestätigte **im Mittel 17,74 kg/ha höhere Nmin-Gehalte unter Robinien** (95 %-KI: 3,74–31,73; $p = 0,01$)

3.1.2 Nitrat (NO_3^-) und Ammonium (NH_4^+)

Die getrennte Betrachtung von NO_3^- und NH_4^+ zeigt, dass der Unterschied im Gesamt-Nmin vor allem durch höhere NO_3^- -Gehalte unter Robinien getragen wird. Die **Mittelwerte** lagen bei **54,6 kg/ha** (Robinie) bzw. **39,4 kg/ha** (Pappel; $\Delta = 15,15$ kg/ha, 95 %-KI: 3,63–26,68). Der Haupteffekt der Baumart auf NO_3^- war signifikant ($F(1, 58) = 6,93$; $p = 0,01$). Für NH_4^+ zeigte sich kein signifikanter Unterschied, obwohl die Werte unter Robinien numerisch höher lagen.

Einzelwerte zu NO_3^- und NH_4^+ befinden sich im Anhang (Tab. A1).

Eine Varianzanalyse entlang der Distanz (getrennt nach Baumart) ergab für die Pappel einen Distanz-Effekt ($F(4, 25) = 4,22$; $p = 0,01$). Der Post-hoc-Test (Tukey) zeigte in 27 m Distanz zum Baumstreifen (1/2 Ackerbreite) höhere NO_3^- -Gehalte als im Baumstreifen (0 m) ($\Delta = 28,19$; $p = 0,02$) und in 1 m Entfernung ($\Delta = 26,65$; $p = 0,03$). Weitere Distanzvergleiche waren nicht signifikant. Für die Robinien war der Distanz-Effekt von NO_3^- ebenfalls signifikant ($F(4, 25) = 3,00$; $p = 0,04$); im Post-hoc-Test waren die Werte in 6 m Entfernung signifikant niedriger als im Baumstreifen (0 m) ($\Delta = -42,48$; $p = 0,03$), alle übrigen Distanzen Paare waren nicht signifikant.

3.2 Kohlenstoff, Stickstoff und C:N-Verhältnis

Wie unterscheiden sich die C:N-Verhältnisse im Oberboden unter Pappel- und Robinienstreifen? Wie verläuft die Verteilung entlang der Distanz zur Baumreihe?

3.2.1 Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff (C) und Gesamt-Stickstoff (N)

Die Gehalte an Gesamt-Kohlenstoff (C) und Gesamt-Stickstoff (N) im Oberboden variierten in Abhängigkeit von der Distanz zur Baumreihe und unterschieden sich zwischen den Baumarten. Eine Übersicht der Mittelwerte ist in Tabelle 2 dargestellt. Einzelwerte sind im Anhang (Tab. A2) aufgeführt.

Tabelle 2: Mittelwerte des Gesamt-Kohlenstoffs (C), Gesamt-Stickstoffs (N) sowie C:N-Verhältnis im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit vom Transekt und Distanz zur Baumreihe.

Baumart	Distanz	C %	N %	C:N
Pappel	TL (Baumstreifen)	1,47	0,15	10,12
Robinie	TL (Baumstreifen)	1,53	0,15	10,22
Pappel	1 m	1,35	0,14	9,95
Robinie	1 m	1,37	0,13	10,15
Pappel	6 m	1,37	0,14	9,93
Robinie	6 m	1,27	0,13	9,92
Pappel	¼ Acker: 13,5 m	1,36	0,14	9,92
Robinie	¼ Acker: 13,5 m	1,48	0,15	10,14
Pappel	½ Acker: 27 m	1,61	0,16	9,98
Robinie	½ Acker: 27 m	1,43	0,14	10,07

C:N als Mittelwert der je Probe berechneten Verhältnisse (C/N).

Für die Pappelbodenproben zeigte die einfaktorielle Varianzanalyse einen Distanz-Effekt, sowohl beim C-Gehalt ($F(4, 25) = 3,84$; $p = 0,01$) als auch beim N-Gehalt ($F(4, 25) = 3,18$; $p = 0,03$). Der Post-hoc-Test (Tukey-Test) zeigte, dass die C-Gehalte bei 27 m Distanz (1/2 Ackerbreite) höher waren als bei 1 m ($\Delta = 0,261$; $p = 0,022$), 6 m ($\Delta = 0,240$; $p = 0,040$) und 13,5 m (1/4 Ackerbreite; $\Delta = 0,243$; $p = 0,037$). N-Werte waren in 27 m Distanz höher als bei 1 m ($\Delta = 0,025$; $p = 0,037$); die weiteren Vergleiche waren nicht signifikant.

Bei den Bodenproben der Robinien ergaben sich keine signifikanten Distanz-Effekte (C: $F(4, 25) = 1,83$; $p = 0,15$; N: $F(4, 25) = 1,67$; $p = 0,19$).

3.2.2 C:N-Verhältnis im Boden

Die Korrelationsanalyse zwischen Gesamt-C und Gesamt-N ergab eine stark positive Beziehung im Oberboden ($r = 0,99$, $p < 0,001$; 95 %-Konfidenzintervall: 0,985–0,994) beider Baumarten.

Die Varianzanalyse ergab keinen signifikanten Einfluss der Baumart auf das C:N-Verhältnis im Oberboden ($F(1,56) = 3.13$; $p = 0,08$), jedoch eine Tendenz zu höheren Werten unter Robinien. Weder die Distanz zur Baumreihe ($p = 0,44$) noch die Interaktion zwischen Baumart und Distanz ($p = 0,94$) wirkten sich signifikant auf das C:N-Verhältnis aus.

Insgesamt variierte das C:N-Verhältnis im Boden nur geringfügig zwischen den Baumarten und entlang der Transekte und blieb mit Werten um 10 sehr konstant. Die Unterschiede zwischen Pappel und Robinie lagen stets unter $\pm 0,3$ Punkten und waren statistisch nicht signifikant (vgl. Tab. 2).

3.2.3 C:N-Verhältnis der Laubstreu

Beim Vergleich des C:N-Verhältnisses zeigten sich deutliche Unterschiede zwischen den Boden- und Laubproben.

Die Einzelwerte der Laubstreu von Pappel und Robinie sind in Tabelle 3 aufgeführt. Dabei zeigte die Robinienlaubstreu insgesamt niedrigere C:N-Verhältnisse als die Pappellaubstreu.

Tabelle 3: Einzelwerte des Gesamt-Kohlenstoffs (C), Gesamt-Stickstoffs (N) und C:N-Verhältnisses der Laubstreu unter Pappel und Robinie.

Transekt	Distanz	C %	N %	C:N
Pappel Transekt 1	TL (Baumstreifen)	42,90	1,42	30,22
Pappel Transekt 2	TL (Baumstreifen)	43,59	1,36	32,16
Pappel Transekt 3	TL (Baumstreifen)	44,83	1,47	30,56
Robinie Transekt 1	TL (Baumstreifen)	39,47	1,53	25,87
Robinie Transekt 2	TL (Baumstreifen)	46,23	1,97	23,50
Robinie Transekt 3	TL (Baumstreifen)	50,25	1,99	25,19

3.2.4 Zusammenhang zwischen Streu- und Bodenparametern

Lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und den bodenchemischen Parametern (C:N, Nmin) herstellen?

Weder für die Robinie noch für die Pappel konnte ein signifikanter Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und des Oberbodens festgestellt werden (Robinie: $r = 0,39$; $p = 0,45$; Pappel: $r = 0,35$; $p = 0,50$; jeweils $n = 3$). Trotz eines schwach positiven Trends ist die Aussagekraft aufgrund der geringen Stichprobenzahl der Streu begrenzt.

Robinienlaubstreu wies ein signifikant engeres C:N-Verhältnis auf als Pappellaubstreu ($p < 0,001$), was mit tendenziell engeren Boden-C:N-Verhältnissen unter den Robinien ($p = 0,08$) sowie signifikant höheren Nmin-Gehalten ($p < 0,05$) einherging.

Zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und dem Nmin-Gehalt im Boden an der Baumreihe (TL/0 m) zeigte sich ein signifikanter, negativer Zusammenhang ($r = -0,75$; $p < 0,001$; Abb. 4).

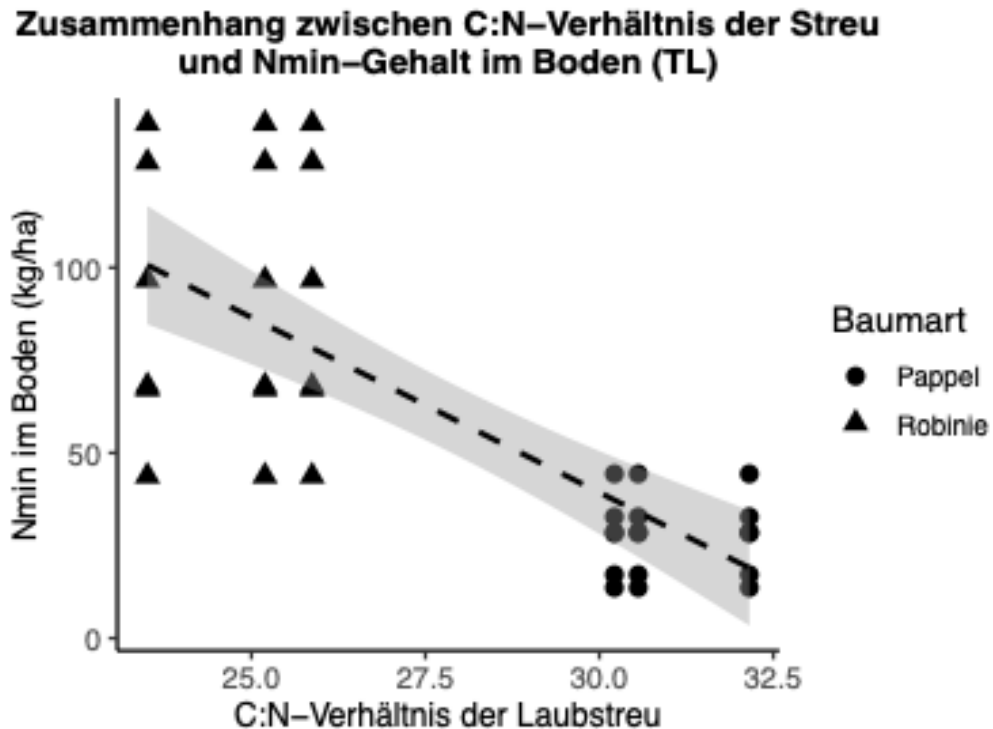


Abbildung 4: Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu von Pappel (*Populus sp.*) und Robinie (*Robinia pseudoacacia*) und dem Gehalt an mineralischem Stickstoff im Oberboden im Baumstreifen (TL). Regressionslinie mit 95%-Konfidenzintervall.

Höhere C:N-Verhältnisse im Laub waren mit geringeren Konzentrationen an mineralischem Stickstoff im Boden assoziiert. Die Pappellaubstreuproben wiesen insgesamt höhere C:N-Werte auf als die der Robinien. Der Zusammenhang wurde visuell durch einen abfallenden Trend in einem Streudiagramm mit linearer Regressionslinie dargestellt (Abb. 4).

4. Diskussion und Schlussfolgerung

4.1 Einfluss der Baumart auf die Stickstoffverfügbarkeit

Die signifikant höheren N_{min} -Werte unter den Robinien ($\Delta = +17,74 \text{ kg/ha}$, $p = 0,01$) beruhten hauptsächlich auf den erhöhten Nitratgehalten ($p = 0,01$). Diese lassen sich durch die symbiotische N_2 -Fixierung erklären. Der zunächst in Wurzeln und Nodulen gebundene Stickstoff gelangt über Exsudation oder Zersetzung, Mineralisierung und Nitrifikation in den mineralischen N-Pool und bildet so lokale NO_3^- -Anreicherungen (Fustec et al., 2010; Liu et al., 2020; Von Holle et al., 2013). Frühere Studien belegten bereits, dass Leguminosen, wie die Robinie, die Stickstoffverfügbarkeit im Boden erhöhen (Boring and Swank, 1984).

Dies bietet großes Potenzial für Agroforstsysteme, da die natürliche N-Anreicherung zur Bodenfruchtbarkeit beitragen kann. Insbesondere für bodenschonenden Ackerbau könnte diese Stickstoffquelle interessant sein, da der Stickstoffeintrag passiv durch die Bäume stattfinden kann. Hierdurch können Überfahrten mit schweren Landmaschinen und eine einhergehende Belastung des Bodengefüges potenziell reduziert werden.

Bäume in Agroforstsystemen leisten über die N-Bereitstellung hinaus Beiträge zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit (Jose, 2009). Tiefreichende und dichte Wurzelsysteme erhöhen die Porenkontinuität und Aggregatstabilität und fördern so den vertikalen Stoffaustausch (Cardinael et al., 2017; Jose, 2009). Baumstreifen können als Landschaftselement die Windgeschwindigkeit mindern und so der Wind- und Wassererosion des Bodens entgegenwirken (Brandle et al., 2004; Jacobs et al., 2022). Zudem können sie Nitratauswaschungen durch Bindung des Stickstoffs und tiefreichende Wurzeln reduzieren, insbesondere wenn die Baumstreifen als Puffer entlang hydrologischer Fließwege angeordnet sind (Dosskey et al., 2010; Palma et al., 2007; Udawatta and Gantzer, 2022).

Die gesteigerte Nährstoffaufnahme der Bäume zeigt sich in den niedrigeren N_{min} -Werten unter den Pappeln (TL und 1 m). Die schnellwachsenden Bäume nehmen viel Stickstoff aus dem

Oberboden auf und binden diesen in ihrer Biomasse ohne, dass diese Entnahme durch stickstofffixierende Rhizobien im Boden ausgeglichen werden kann. Dies stellt neben der wirtschaftlichen Nutzung des Holzes, der Habitatbereitstellung (Torralba et al., 2016) und den bereits genannten Ökosystemdienstleistungen den großen Nutzen der Pappeln dar. Denn durch ihr schnelles Wachstum und ihre dementsprechende Nährstoffaufnahme eignen sich Pappeln sehr gut als Puffer für Nitratauswaschungen, als Windschutz und zur Phytosanierung von Schwermetall- oder pestizidverseuchten Böden (Böhm et al., 2014; Rockwood et al., 2004).

Jedoch können die Bäume auch mit den Pflanzen der Ackerkultur um Wasser und Nährstoffe konkurrieren (Cardinael et al., 2017; Pardon et al., 2018). Diese Effekte sind art-, distanz- und managementabhängig und können Ertragsminderungen zur Folge haben. Bei ausreichender Wasserversorgung wurden jedoch auch positive Interaktionen, durch Mikroklima- und (teils) hydraulische Umverteilungseffekte nachgewiesen (Bayala and Prieto, 2020; Jacobs et al., 2022).

Insgesamt tragen beide Baumarten zur N-Dynamik bei, jedoch über unterschiedliche Mechanismen: Robinien über Symbiose-vermittelte N_2 -Fixierung und höhere Nitratgehalte im Boden, Pappeln vor allem über hohe N-Aufnahme und Speicherung in Biomasse.

Somit eignen sich Pappeln gut als Puffergehölz zur Erosionsminderung, stehen aber abhängig von Standort und Management mit der Ackerkultur in Stickstoff-Konkurrenz. Robinien hingegen tragen zur N-Akkumulation bei und eignen sich besonders als Pionierpflanze für nährstoffarme Standorte.

Eine gemischte Pflanzung beider Baumarten in einem Baumstreifen könnte aufzeigen, inwieweit sich artspezifische Effekte gegenseitig aufheben oder ergänzen, wäre aber mit erhöhtem Managementaufwand verbunden.

4.2 Kein signifikanter Einfluss auf C:N im Boden

Die Bodenproben zeigten ein konstantes C:N-Verhältnis entlang der verschiedenen Distanzen. Dieses lag überwiegend im, für stabile mineralische Ackerobertböden üblichen, Bereich von 10–12 (Umweltbundesamt (UBA), 2023, p. 9).

Entlang des Distanzgradienten unter Pappeln sind für Gesamt-C und Gesamt-N signifikante Änderungen nachweisbar, das C:N-Verhältnis bleibt jedoch stabil. Dies deutet darauf hin, dass sich die C- und N-Vorräte entlang der Distanz in der Menge zwar verändern, in Relation zueinander aber gleichbleibend sind.

Zwischen den Baumarten waren die Unterschiede gering. Die C:N-Werte waren in den verschiedenen Punkten der Pappel-Transekte jedoch geringfügig niedriger (Pappel 9,98; Robinie 10,10; $\Delta = -0,12$). Aus dem etwas niedrigeren Boden-C:N allein lässt sich jedoch keine erhöhte Mineralisierungsrate ableiten, da sich das C:N-Verhältnis als Summenmaß nur langsam verändert.

Die sehr hohe positive Korrelation zwischen dem Gesamt-Kohlenstoff und Gesamt-Stickstoffgehalt im Boden ($r = 0,99$, $p < 0,001$) unterstreicht die enge Kopplung beider Elemente an die organische Bodensubstanz. Kurzfristige Veränderungen der Stickstoffverfügbarkeit, wie sie in den Nmin-Gehalten sichtbar wurden, lassen sich darin jedoch nicht erkennen. Das untersuchte Agroforstsystem war zum Beprobungszeitpunkt noch zu jung, als dass baumartspezifische N-Effekte bereits das Verhältnis von Gesamt-C zu Gesamt-N verändern. Dies deckt sich mit Metaanalysen, die SOC-Zunahmen (soil organic carbon) in Alley-Cropping-Systemen meist erst nach mehreren Jahren bis Dekaden berichten (Ivezić et al., 2022).

Hier wäre eine erneute Messung und Betrachtung nach 10 Jahren (ausgehend von der Pflanzung in 2021) sehr interessant.

4.3 Streuqualität als erklärender Mechanismus

Der organische Eintrag durch Laubstreu ist ein zentraler Faktor der Nährstofffreisetzung im Boden, da die Streuqualität die Zersetzungsrates und damit die mikrobielle N-Bilanz (Mineralisierung vs. Immobilisierung) steuert (Prescott, 2010).

Die Analyse der C:N-Verhältnisse des abgeworfenen Laubs zeigte ein signifikant engeres Verhältnis bei Robinien im Vergleich zu Pappeln ($p < 0,001$). Ein engeres Streu-C:N geht tendenziell mit höherer N-Freisetzung einher (Boring and Swank, 1984; Prescott, 2010), sodass aus Robinienlaubstreu eine schnellere Mineralisierung und Pflanzenverfügbarkeit von Stickstoff zu erwarten ist. Die erhöhte N-Verfügbarkeit unter Robinien ist aber auch auf die biologische N_2 -Fixierung zurückzuführen. Der Anteil der Fixierung lässt sich mit den vorliegenden Daten nicht vom Stickstoffeintrag des Laubs trennen, aber auch bestehende Studien (Augusto et al., 2002; Boring and Swank, 1984) zeigten, dass Baumarten mit nährstoffreichem Laub, durch die leichtere Zersetzbarkeit ihrer Streu mittelfristig höhere Nmin-Konzentrationen im unmittelbaren Wurzelraum aufweisen können.

Vor diesem Hintergrund ist die in dieser Arbeit beobachtete signifikante negative Korrelation zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und den Nmin-Gehalten im Oberboden ($r = -0,75$) plausibel.

Obwohl in den hier erhobenen Bodenproben kein signifikanter direkter Einfluss der Streu auf Gesamt-C und Gesamt-N nachweisbar war, zeigen unabhängige Untersuchungen, dass Streu in Pappel-Agroforstsystemen unter Baumstreifen schneller umgesetzt wird und streu-abgeleiteter Kohlenstoff messbar im Boden wiedergefunden wird (Wachendorf et al., 2020).

Die Streumenge wurde jedoch in dieser Arbeit nicht über die Vegetationsperiode quantifiziert. Alle Aussagen beziehen sich somit nur auf die Streuqualität.

4.4 Räumliche Verteilung der Effekte

Die räumliche Verteilung der Effekte ist zentral, um den Nutzen der Bäume auf den Ackerstreifen, und damit den Ackerbau, zu bewerten. In den Daten zeigte sich die Interaktion zwischen Baumart und Distanz zur Baumreihe als signifikant ($p < 0,01$). Es zeigten sich unter den Pappeln und den Robinien gegensätzliche Muster.

Unter Robinien waren die N_{min}-Gehalte im unmittelbaren Baumumfeld (TL und 1 m) am höchsten und nahmen mit zunehmender Entfernung zur Ackerfläche deutlich ab. Dieses Muster ist konsistent mit bekannten artspezifischen Prozessen. Diese entstehen durch die Fähigkeit der Robinie zur Symbiose mit Rhizobien und die dadurch erhöhte Stickstofffixierung im Wurzelraum. Sowie die nährstoffreiche Streu, mit engem C:N-Verhältnis, die tendenziell schneller mineralisiert (Boring & Swank, 1984; Prescott, 2010). Der Effekt blieb räumlich eng begrenzt und war bereits ab einer Distanz von 6 m nicht mehr nachweisbar. Solche Gradienten sind für temperate Alley-Cropping-Systeme typisch (Cardinael et al., 2017; Pardon et al., 2017).

Im Gegensatz dazu waren die N_{min}-Gehalte unter Pappeln im direkten Baumumfeld (TL, 1 m) am niedrigsten und stiegen erst mit zunehmender Distanz zum Baumstreifen an. Dies könnte sowohl mit der nährstoffarmen Pappellaubstreu zusammenhängen, die durch das weitere C:N-Verhältnis langsamer mineralisiert wird (Erdenebileg et al., 2023), als auch durch den N-Entzug der Bäume durch ihr Wachstum. Ebenso sind standortbedingte Einflussfaktoren oder diffuse Effekte der unterschiedlichen Pappelsorten denkbar.

Damit prägen Pappeln den N-Haushalt des Agroforstsystems indirekter (durch Entzug/Umverteilung, mikroklimatische Effekte), während Robinien zusätzlich über N₂-Fixierung und Streuqualität N bereitstellen.

Dass die Stärke bodenchemischer (und physikalischer) Effekte der Bäume mit der Distanz abnimmt, ist in temperaten Agroforst-Systemen der Regelfall (Jacobs et al., 2022; Pardon et al., 2017). Da Laubstreu vor allem in baumnaher Umgebung eingetragen wird, die Reichweite von Wurzeln und deren Exsudaten limitiert ist und auch mikroklimatische Veränderungen in Baumnähe stärker sind. Dies ist abhängig von Höhe, Größe und Pflanzdichte der Bäume. Zudem

die Bewirtschaftung der Ackerstreifen, durch Bearbeitung des Oberbodens und dem Ausbringen von Dünger, die baumartenspezifischen Effekte überlagern kann.

Dementsprechend ist das Einflusspotential der Bäume auf den gesamten 54 m Breite Ackerstreifen limitiert. Um die theoretisch maximale Ausnutzung der Stickstofffixierung der Robinie zu nutzen, müssten die Ackerstreifen auf nur wenige Meter Breite begrenzt werden, dies verstärkt aber Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe sowie den Pflegeaufwand (Bayala and Prieto, 2020; Luedeling et al., 2016).

Das Düngemanagement der Ackerstreifen wurde in dieser Arbeit nicht quantifiziert und kann Distanzmuster überlagern, die Baumstreifen selbst wurden jedoch nicht gedüngt (Sebastian Frey, 2025). Es handelt sich zudem um ein junges System. Mehrjährige Messreihen (inkl. Erträge, N-Bilanzen, Streumengen) sind erforderlich, um Nettoeffekte und die Gestaltung des Agroforstsystems belastbar zu bewerten.

Im Rahmen des MODEMA Projekts werden weitere Daten aus diesem System folgen und die hier präsentierten Ergebnisse ergänzen.

4.5 Robinie als invasive Art

Robinia pseudoacacia ist in Europa weit verbreitet und gilt in Deutschland als invasiver Neophyt (Cierjacks et al., 2013; Kowarik, 2010). Grund dafür ist ihre charakteristische Ausbreitung durch vegetative Vermehrung über Wurzelausläufer, sowie fortpflanzungsfähige Samen, die bereits ab einem Baumalter von sechs Jahren entstehen (Cierjacks et al., 2013; Saulino et al., 2023). Zusammen mit ihrem schnellen Wachstum und der Fähigkeit als Pionierbaumart zu fungieren, führt dies zu einer dominanten Ausbreitung, insbesondere auf anthropogen gestörten Flächen (Cierjacks et al., 2013; Vítková et al., 2020, 2017).

Über die biologische N₂-Fixierung erhöht die Robinie den Stickstoffeintrag, was nitrophile Arten begünstigt und konkurrenzschwache, nährstoffarme Standorte bevorzugende Flora zurückdrängen kann (Cierjacks et al., 2013; Kowarik, 2010).

Als trockenheitsresistente und wärmeliebende Art profitiert die Robinie von den zunehmend heißen und niederschlagsarmen Sommern, wie sie im Zuge des Klimawandels auch in Mitteleuropa häufiger auftreten. Modellierungen zeigen eine Ausweitung klimatisch geeigneter Flächen für Robinien unter zukünftigen Szenarien (Kleinbauer et al., 2010; Roloff, 2020).

Mit der seit 2023 wirksamen GAP-Direktzahlungen-Verordnung (GAPDZV) steht *Robinia pseudoacacia* in Anlage 1 auf der „Negativliste“. Neuanlagen agroforstlicher Systeme mit Robinie sind damit nicht förderfähig (BMLEH, 2023).

Welches Potential haben Robinien in einer nachhaltigen Landwirtschaft?

Die Ergebnisse dieser Arbeit unterstreichen, dass *Robinia pseudoacacia* durch ihre Stickstofffixierung und die nährstoffreiche Laubstreu die Stickstoffverfügbarkeit im Oberboden lokal erhöhen kann.

Damit besitzt die Art ein hohes agronomisches Potenzial. Sie kann die N-Versorgung verbessern, Biomasseerträge erhöhen, Erosion mindern und wertvolle Habitate bereitstellen (Cierjacks et al., 2013; Nicolescu et al., 2020; Saulino et al., 2023).

Ihre hohe Trockenresistenz macht sie darüber hinaus, im Hinblick auf den Klimawandel, zu einer potenziell zukunftssträchtigen Baumart (Kleinbauer et al., 2010).

Allerdings hängt die Nutzbarkeit dieser Eigenschaften stark von Kontext und Management ab. In kontrollierten Alley-Cropping-Systemen lassen sich Ausbreitungstendenzen durch klare Streifenabgrenzung, regelmäßige Pflege, Bodenbearbeitung an der Kante von Baum- zu Ackerstreifen bzw. Wurzelbarrieren/-schnitt deutlich eindämmen (Cierjacks et al., 2013; Nicolescu et al., 2020). Idealerweise werden Robinienstreifen in Agroforstsystemen vollständig von Ackerflächen umschlossen und regelmäßig kontrolliert, sodass sich Wurzelausläufer oder Samen nicht außerhalb des Baumstreifens etablieren können. Die Pflanzung von Robinienstreifen auf Flächen, die an offene, magere Wiesen oder Schutzflächen angrenzen ist aus diesen Gründen nicht zu empfehlen (Cierjacks et al., 2013).

Insgesamt zeigen die erhobenen Daten, dass die Robinie in kontrolliert gemanagten Agroforstsystemen eine nützliche Baumart sein kann, die durch Stickstofffixierung, Biomasseproduktion und Stressresistenz einen Beitrag zu resilienteren Anbausystemen leisten könnte.

Für zukünftige agroforstliche Einsatzszenarien bleibt eine differenzierte Betrachtung unter Berücksichtigung ökologischer Risiken und rechtlicher Vorgaben unerlässlich, jedoch sollte das Potential der Robinie nicht außer Acht gelassen werden.

4.6 Methodische Reflexion

Die vorliegenden Ergebnisse liefern Hinweise auf baumartspezifische Einflüsse auf bodenchemische Parameter. Dennoch sollten einige methodische Aspekte bei der Interpretation berücksichtigt werden.

Alle Replikate waren innerhalb eines Ackerschlags; damit sind Aussagen dieser Arbeit primär systemspezifisch. Zwischen den Pappelstreifen existierten klon-/sortenbedingte Unterschiede, die nicht differenziert wurden und artspezifische Effekte potenziell beeinflussen können.

Die Beprobung erfolgte innerhalb zweier aufeinanderfolgender Tage, weswegen keine saisonale Dynamik erfasst wurde, jedoch ist Nmin stark zeitvariabel. Schlussfolgerungen zur Verfügbarkeit beziehen sich daher auf den Messzeitpunkt. Wiederholte Beprobungen im Frühjahr, Sommer und Herbst wären erforderlich, um die saisonale Dynamik und Ertragsrelevanz zu bewerten. Ein Ertragsvergleich der Ackerstreifen wäre hierbei besonders informativ.

Die Anzahl der Laubproben ist mit einem Stichprobenumfang von 6 nur begrenzt repräsentativ. Die Streumenge wurde nicht über die Vegetationsperiode bilanziert; Aussagen beziehen sich somit nur auf die Streuqualität (C:N). Ein Einfluss durch Winderosion/Verlagerung lässt sich hier nicht quantifizieren.

Des Weiteren wurden Variablen wie Bodenfeuchte, pH-Wert, Textur sowie das Düngemanagement der Ackerstreifen innerhalb dieser Arbeit nicht erhoben. Diese können die Distanzmuster der Nmin-Gehalte beeinflussen.

In Summe stützt das Design der Arbeit belastbare Aussagen zur artspezifischen, räumlich begrenzten N-Verfügbarkeit. Für Langzeiteffekte (insbesondere SOC) und Mechanismen sind jedoch zeitliche Replikation, Ertragsmessungen und Input-Bilanzen erforderlich.

4.7 Schlussfolgerung

Die Ergebnisse zeigen, dass *Robinia pseudoacacia* die kurzfristige N-Verfügbarkeit im Oberboden lokal erhöht, während *Populus sp.* den N-Haushalt eher indirekt beeinflusst. Die Effekte der Robinien sind am stärksten in unmittelbarer Nähe der Bäume und flachen in die Ackerfläche hinein, mit zunehmender Distanz, ab. Summenparameter (Gesamt-C:N, Boden-C:N) reagierten im jungen System, erwartungsgemäß, nur schwach.

Im Folgenden werden die 4 Forschungsfragen abschließend beantwortet:

1. Wie unterscheiden sich das C:N-Verhältnis und die Nmin-Konzentration im Oberboden unter Pappel- und Robinienstreifen?

Das Boden-C:N-Verhältnis unterschied sich zwischen den Baumarten nicht signifikant und lag insgesamt im engen, für mineralische Ackerobertböden typischen, Bereich von ~10–12.

Die Nmin-Gehalte unter den Robinien waren jedoch insgesamt signifikant höher als unter den Pappeln (Tukey $\Delta = 17,74$ kg/ha; $p = 0,01$). Dieser Unterschied wurde vor allem durch höhere Nitratgehalte (NO_3^-) unter den Robinien getragen ($F(1,58) = 6,93$; $p = 0,01$).

2. Wie verläuft die Verteilung dieser Parameter entlang der Distanz zur Baumreihe in Richtung der Ackerfläche?

Das Boden-C:N-Verhältnis, sowie Gesamt-C und Gesamt-N, variierte nicht signifikant entlang der Distanz zur Baumreihe.

Die Interaktion zwischen Baumart und Distanz war jedoch signifikant ($p = 0,001$) und zeigte für die Baumarten gegensätzliche Muster.

Unter Robinien waren die Nmin-Werte im Baumstreifen (TL, 0 m) und bei 1 m am höchsten und nahmen zur Ackerfläche hin ab; unter Pappeln traten die niedrigsten Nmin-Werte baumnah (TL, 0 m/1 m) auf und stiegen mit der Distanz an. Ab 6 m waren die Unterschiede zwischen den Baumarten nicht mehr signifikant.

3. Lässt sich ein Zusammenhang zwischen dem C:N-Verhältnis der Laubstreu und den bodenchemischen Parametern (C:N, Nmin) herstellen?

Zwischen dem Streu-C:N und dem Boden-C:N ließ sich kein signifikanter Zusammenhang nachweisen.

Hingegen bestand eine signifikante negative Korrelation zwischen Streu-C:N und Nmin im Oberboden ($r \approx -0,75$). Ein engeres C:N-Verhältnis in der Laubstreu (N-reichere Laubstreu) ging mit höheren Nmin-Gehalten im Boden einher (Interpretation: tendenziell schnellere N-Freisetzung). Hinweise: Die Streumenge wurde nicht über die Vegetationsperiode bilanziert und bei Robinie lässt sich der Einfluss aus N₂-Fixierung und Streumineralisierung mit den vorliegenden Daten nicht trennen.

4. Welches Potential haben Robinien in einer nachhaltigen Landwirtschaft?

Die vorliegenden Ergebnisse weisen auf ein substanzielles Potenzial der Robinie in gut gemanagten, vom Ackerstreifen umgrenzten, Alley-Cropping-Systemen hin.

Im unmittelbaren Umfeld der Bäume erhöhte sich die N-Bereitstellung (vor allem Nitrat). Zugleich sind die Wirkungen räumlich eng begrenzt und mit Trade-offs verbunden (mögliche Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe).

Der Einsatz von *Robinia pseudoacacia* und die Gestaltung solcher Systeme sollten standortspezifisch geplant werden und regulatorische Rahmenbedingungen (Förderfähigkeit/Invasivitätsbewertung) berücksichtigen.

5. Fazit und Ausblick

Diese Arbeit zeigt, dass artspezifische Prozesse und die Streuqualität (C:N) die Stickstoffverfügbarkeit im Oberboden auch in jungen temperaten Alley-Cropping-Systemen lokal prägen. Für die Praxis heißt das, dass Robinien in gemanagten, klar abgegrenzten Streifen eine zusätzliche N-Bereitstellung ermöglichen können. Mit den vorliegenden Daten lässt sich der artspezifische N-Eintrag der Robinie jedoch nicht eindeutig der Rhizobien-Fixierung oder der schnelleren Mineralisierung N-reicher Streu zuordnen, da entsprechende Tracer- bzw. Bilanzdaten fehlen. Gleichwohl belegen frühere Arbeiten, dass Streu unter Baumstreifen schneller umgesetzt wird und streu-abgeleiteter C messbar im Boden ankommt sowie, dass engere Streu-C:N-Verhältnisse die N-Freisetzung tendenziell fördern (Boring and Swank, 1984; Wachendorf et al., 2020). Das unterstreicht die Bedeutung der Streuqualität für N-Dynamiken.

Die Reichweite dieser Effekte ist räumlich begrenzt und nimmt mit steigender Distanz zur Baumreihe typischerweise (Cardinael et al., 2017; Pardon et al., 2017). Gleichzeitig können Trade-offs durch Konkurrenz um Licht, Wasser und Nährstoffe entstehen (Bayala and Prieto, 2020; Jacobs et al., 2022; Luedeling et al., 2016; Pardon et al., 2018). Ein konsequentes Streifen-Management ist neben einer sorgfältigen Planung zentral, um N-Vorteile zu nutzen und Risiken (inkl. invasiver Tendenzen) zu begrenzen.

In Summe bekräftigt diese Arbeit das **Potenzial von Baumstreifen** eine **klimawandelangepasste, biodiversitätsfördernde** und **bodenschonende** Landwirtschaft zu unterstützen.

5.1 Ausblick – Vorschläge für weiterführende Untersuchungen:

Für weiterführende Untersuchungen empfehlen sich saisonale N_{min}-Messungen, um die Stickstoffdynamik abzubilden, sowie mehrjährige Wiederholungen von Gesamt-C, Gesamt-N und Boden-C:N zur Erfassung möglicher SOC-Trends. Ergänzend bieten sich molekulare Analysen der an der Stickstoffumsetzung beteiligten Bodenmikroorganismen an, verknüpft mit Steuergrößen wie pH-Wert und wassergefülltem Porenraum. Parallel sollten mit Isotopen-Tracern die Stickstoffflüsse untersucht werden, um genauer zu differenzieren, ob Stickstoff durch ackerbauliche Düngung, aus der Zersetzung der Laubstreu oder durch biologische N₂-Fixierung in den Boden gelangt ist. Ein begleitendes Streufluss-Monitoring (Menge und Qualität) sowie die Erhebung von Ertragsdaten der Ackerstreifen würden die Prozessbefunde mit praxisrelevanten Kennzahlen verbinden.

Literaturverzeichnis

- Augusto, L., Ranger, J., Binkley, D., Rothe, A., 2002. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility. *Ann. For. Sci.* 59, 233–253.
<https://doi.org/10.1051/forest:2002020>
- Bayala, J., Prieto, I., 2020. Water acquisition, sharing and redistribution by roots: applications to agroforestry systems. *Plant Soil* 453, 17–28. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04173-z>
- Bayerisches Landesamt für Umwelt, 2024. Bodeninformationssystem Bayern – Kartenviewer.
- BMLEH, 2023. Dritte Verordnung zur Änderung der GAP-Direktzahlungen-Verordnung [WWW Document]. Bundesminist. Für Landwirtsch. Ernähr. Heim. URL <https://www.bmleh.de/SharedDocs/Gesetzestexte/DE/3-aend-gap-direktzahlungs-vo.html> (accessed 9.24.25).
- 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. *Agrofor. Syst.* 88, 579–591. <https://doi.org/10.1007/s10457-014-9700-y>
- Boring, L.R., Swank, W.T., 1984. Symbiotic Nitrogen Fixation in Regenerating Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.) Stands. *For. Sci.* 30, 528–537.
<https://doi.org/10.1093/forestscience/30.2.528>
- Brandle, J.R., Hodges, L., Zhou, X.H., 2004. Windbreaks in North American agricultural systems. *Agrofor. Syst.* 61, 65–78.
<https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028990.31801.62>
- Cardinael, R., Chevallier, T., Cambou, A., Béral, C., Barthès, B.G., Dupraz, C., Durand, C., Kouakoua, E., Chenu, C., 2017. Increased soil organic carbon stocks under agroforestry: A survey of six different sites in France. *Agric. Ecosyst. Environ.* 236, 243–255.
<https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.12.011>
- Cierjacks, A., Kowarik, I., Joshi, J., Hempel, S., Ristow, M., von der Lippe, M., Weber, E., 2013. Biological Flora of the British Isles: *Robinia pseudoacacia*. *J. Ecol.* 101, 1623–1640.
<https://doi.org/10.1111/1365-2745.12162>
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2025a. Klimanormalwerte 1991–2020 – Jahresniederschlagssumme, Station Miltenberg 3291 [WWW Document]. URL https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/nieder_9120_fest.html.html?view=nasPublication (accessed 10.30.25).
- Deutscher Wetterdienst (DWD), 2025b. Klimanormalwerte 1991–2020 – Jahresmittel der Lufttemperatur. Station Miltenberg 3291 [WWW Document]. URL https://www.dwd.de/DE/leistungen/klimadatendeutschland/mittelwerte/temp_9120_SV_html.html?nn=16102&view=nasPublication (accessed 10.30.25).
- DIN 19746:2005-06, 2005. Bestimmung von mineralischem Stickstoff (Nitrat und Ammonium) in Bodenprofilen (Nmin-Laborverfahren).
- DIN ISO 13878:1998-11, 2002. Bestimmung des Gesamt-Stickstoffs durch trockene Verbrennung.
- Dosskey, M.G., Vidon, P., Gurwick, N.P., Allan, C.J., Duval, T.P., Lowrance, R., 2010. The Role of Riparian Vegetation in Protecting and Improving Chemical Water Quality in Streams. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* 46, 261–277. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2010.00419.x>
- Erdenebileg, E., Wang, C., Yu, W., Ye, X., Pan, X., Huang, Z., Liu, G., Cornelissen, J.H.C., 2023. Carbon versus nitrogen release from root and leaf litter is modulated by litter

- position and plant functional type. *J. Ecol.* 111, 198–213. <https://doi.org/10.1111/1365-2745.14026>
- FAO, 2017. The Future of Food and Agriculture: Trends and Challenges. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome.
- Fustec, J., Lesuffleur, F., Mahieu, S., Cliquet, J.-B., 2010. Nitrogen rhizodeposition of legumes. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 57–66. <https://doi.org/10.1051/agro/2009003>
- Giweta, M., 2020. Role of litter production and its decomposition, and factors affecting the processes in a tropical forest ecosystem: a review. *J. Ecol. Environ.* 44, 11. <https://doi.org/10.1186/s41610-020-0151-2>
- Hättenschwiler, S., Aeschlimann, B., Coûteaux, M.-M., Roy, J., Bonal, D., 2008. High variation in foliage and leaf litter chemistry among 45 tree species of a neotropical rainforest community. *New Phytol.* 179, 165–175. <https://doi.org/10.1111/j.1469-8137.2008.02438.x>
- IPBES, E. S. Brondizio, J. Settele, S. Díaz, H. T. Ngo, 2019. Global assessment report on biodiversity and ecosystem services of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services, IPBES secretariat, Bonn, Germany.
- IPCC, H.-O. Pörtner, D.C. Roberts, M. Tignor, E.S. Poloczanska, K. Mintenbeck, A. Alegría, M. Craig, S. Langsdorf, S. Löschke, V. Möller, A. Okem, B. Rama, 2022. Climate Change 2022: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY.
- Ivezić, V., Lorenz, K., Lal, R., 2022. Soil Organic Carbon in Alley Cropping Systems: A Meta-Analysis. *Sustainability* 14, 1296. <https://doi.org/10.3390/su14031296>
- Jacobs, S.R., Webber, H., Niether, W., Grahmann, K., Lüttschwager, D., Carmen Schwartz, Breuer, L., Bellingrath-Kimura, S.D., 2022. Modification of the microclimate and water balance through the integration of trees into temperate cropping systems. *Agric. For. Meteorol.* 323, 109065. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2022.109065>
- Jose, S., 2009. Agroforestry for ecosystem services and environmental benefits: an overview. *Agrofor. Syst.* 76, 1–10. <https://doi.org/10.1007/s10457-009-9229-7>
- Kay, S., Rega, C., Moreno, G., den Herder, M., Palma, J.H.N., Borek, R., Crous-Duran, J., Freese, D., Giannitsopoulos, M., Graves, A., Jäger, M., Lamersdorf, N., Memedemin, D., Mosquera-Losada, R., Pantera, A., Paracchini, M.L., Paris, P., Rocas-Díaz, J.V., Rolo, V., Rosati, A., Sandor, M., Smith, J., Szerencsits, E., Varga, A., Viaud, V., Wawer, R., Burgess, P.J., Herzog, F., 2019. Agroforestry creates carbon sinks whilst enhancing the environment in agricultural landscapes in Europe. *Land Use Policy* 83, 581–593. <https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2019.02.025>
- Kleinbauer, I., Dullinger, S., Peterseil, J., Essl, F., 2010. Climate change might drive the invasive tree *Robinia pseudacacia* into nature reserves and endangered habitats. *Biol. Conserv.* 143, 382–390. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2009.10.024>
- Kowarik, I., 2010. Biologische Invasionen : Neophyten und Neozoen in Mitteleuropa ; 77 Tabellen, 2., wesentlich erweiterte Auflage. ed. Ulmer, Stuttgart (Hohenheim).
- Lenth, R.V., 2025. emmeans: Estimated Marginal Means, aka Least-Squares Means. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.emmeans>
- Liu, Z., Hu, B., Bell, T.L., Flemetakis, E., Rennenberg, H., 2020. Significance of mycorrhizal associations for the performance of N₂-fixing Black Locust (*Robinia pseudoacacia* L.). *Soil Biol. Biochem.* 145, 107776. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107776>

- Lorenz, K., Lal, R., 2014. Soil organic carbon sequestration in agroforestry systems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 34, 443–454. <https://doi.org/10.1007/s13593-014-0212-y>
- Luedeling, E., Smethurst, P.J., Baudron, F., Bayala, J., Huth, N.I., van Noordwijk, M., Ong, C.K., Mulia, R., Lusiana, B., Muthuri, C., Sinclair, F.L., 2016. Field-scale modeling of tree–crop interactions: Challenges and development needs. *Agric. Syst.* 142, 51–69. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2015.11.005>
- Microsoft, 2025. Microsoft Excel for Microsoft 365.
- Nicolescu, V.-N., Rédei, K., Mason, W.L., Vor, T., Pöetzelsberger, E., Bastien, J.-C., Brus, R., Benčat, T., Đodan, M., Cvjetkovic, B., Andrašev, S., La Porta, N., Lavnyy, V., Mandžukovski, D., Petkova, K., Roženbergar, D., Waśik, R., Mohren, G.M.J., Monteverdi, M.C., Musch, B., Klisz, M., Perić, S., Keça, L., Bartlett, D., Hernea, C., Pástor, M., 2020. Ecology, growth and management of black locust (*Robinia pseudoacacia* L.), a non-native species integrated into European forests. *J. For. Res.* 31, 1081–1101. <https://doi.org/10.1007/s11676-020-01116-8>
- Palma, J.H.N., Graves, A.R., Burgess, P.J., van der Werf, W., Herzog, F., 2007. Modeling environmental benefits of silvoarable agroforestry in Europe. *Agric. Ecosyst. Environ.* 119, 320–334. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.07.021>
- Panagos, P., Borrelli, P., Poesen, J., Ballabio, C., Lugato, E., Meusburger, K., Montanarella, L., Alewell, C., 2015. The new assessment of soil loss by water erosion in Europe. *Environ. Sci. Policy* 54, 438–447. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2015.08.012>
- Pardon, P., Reubens, B., Mertens, J., Verheyen, K., De Frenne, P., De Smet, G., Van Waes, C., Reheul, D., 2018. Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agric. Syst.* 166, 135–151. <https://doi.org/10.1016/j.agry.2018.08.008>
- Pardon, P., Reubens, B., Reheul, D., Mertens, J., De Frenne, P., Coussement, T., Janssens, P., Verheyen, K., 2017. Trees increase soil organic carbon and nutrient availability in temperate agroforestry systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 247, 98–111. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2017.06.018>
- Posit, 2025. RStudio.
- Prescott, C.E., 2010. Litter decomposition: what controls it and how can we alter it to sequester more carbon in forest soils? *Biogeochemistry* 101, 133–149. <https://doi.org/10.1007/s10533-010-9439-0>
- R Core Team, 2025. R: A Language and Environment for Statistical Computing.
- Rockwood, D.L., Naidu, C.V., Carter, D.R., Rahmani, M., Spriggs, T.A., Lin, C., Alker, G.R., Isebrands, J.G., Segrest, S.A., 2004. Short-rotation woody crops and phytoremediation: Opportunities for agroforestry? *Agrofor. Syst.* 61, 51–63. <https://doi.org/10.1023/B:AGFO.0000028989.72186.e6>
- Roloff, A., 2020. *Bäume Mitteleuropas: Biologie, Funktionen und Nutzung*, 4. Auflage. ed. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- Saulino, L., Rita, A., Stinca, A., Liuzzi, G., Silvestro, R., Rossi, S., Saracino, A., 2023. Wildfire promotes the invasion of *Robinia pseudoacacia* in the unmanaged Mediterranean *Castanea sativa* coppice forests. *Front. For. Glob. Change* 6. <https://doi.org/10.3389/ffgc.2023.1177551>
- Schubert, S. (Verfasser), 2024. *Pflanzenernährung*, 4., vollständig überarbeitete Auflage. ed. Verlag Eugen Ulmer, Stuttgart.
- Sebastian Frey, 2025. Der Bauernhof Familie Frey GbR. [bio\(at\)bauernhof-frey.de](mailto:bio(at)bauernhof-frey.de) . Monbrunn 9, 63897 Miltenberg.

- Torralba, M., Fagerholm, N., Burgess, P.J., Moreno, G., Plieninger, T., 2016. Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agric. Ecosyst. Environ.* 230, 150–161. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.002>
- Udawatta, R.P., Gantzer, C.J., 2022. Soil and water ecosystem services of agroforestry. *J. Soil Water Conserv.* 77, 5A-11A. <https://doi.org/10.2489/jswc.2022.1028A>
- Umweltbundesamt (UBA), 2023. Humusgehalte von Acker- und Grünlandböden – Indikator-Factsheet, Indikatoren für die Deutsche Anpassungsstrategie. Bosch & Partner GmbH (Konstanze Schönthaler).
- 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., Isselstein, 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. <https://doi.org/10.1038/s43247-023-00680-1>
- Vítková, M., Müllerová, J., Sádlo, J., Pergl, J., Pyšek, P., 2017. Black locust (*Robinia pseudoacacia*) beloved and despised: A story of an invasive tree in Central Europe. *For. Ecol. Manag.* 384, 287–302. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2016.10.057>
- Vítková, M., Sádlo, J., Roleček, J., Petřík, P., Sitzia, T., Müllerová, J., Pyšek, P., 2020. *Robinia pseudoacacia*-dominated vegetation types of Southern Europe: Species composition, history, distribution and management. *Sci. Total Environ.* 707, 134857. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134857>
- Von Holle, B., Neill, C., Largay, E.F., Budreski, K.A., Ozimec, B., Clark, S.A., Lee, K., 2013. Ecosystem legacy of the introduced N₂-fixing tree *Robinia pseudoacacia* in a coastal forest. *Oecologia* 172, 915–924. <https://doi.org/10.1007/s00442-012-2543-1>
- 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. <https://doi.org/10.1016/j.pedobi.2020.150651>
- Weil, R.R., Brady, N.C., 2017. The nature and properties of soils, Fifteenth edition, global edition. ed. Pearson, Upper Saddle River.
- Wickham, H., 2016. ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis.
- Wickham, H., Bryan, J., 2025. readxl: Read Excel Files. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.readxl>
- Wickham, H., François, R., Henry, L., Müller, K., Vaughan, D., 2023. dplyr: A Grammar of Data Manipulation. <https://doi.org/10.32614/CRAN.package.dplyr>

Anhang

Tabelle A1: Einzelwerte der Gehalte an Nitrat-N (NO_3^- -N), Ammonium-N (NH_4^+ -N) und mineralischem Stickstoff (Nmin) im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit von Transekt und Distanz zur Baumreihe.

Transekt	Distanz	NO_3^- -N [kg/ha]	NH_4^+ -N [kg/ha]	Nmin [kg/ha]	Transekt	Distanz	NO_3^- -N [kg/ha]	NH_4^+ -N [kg/ha]	Nmin [kg/ha]
Pappel 1	TL	44,126	0,216	44,342	Robinie 1	TL	51,640	15,589	67,228
Pappel 1	1 m	20,961	0,154	21,114	Robinie 1	1 m	40,913	1,122	42,035
Pappel 1	6 m	33,230	0,668	33,898	Robinie 1	6 m	32,631	0,576	33,207
Pappel 1	13,5 m	48,601	30,769	79,370	Robinie 1	13,5 m	57,730	8,947	66,677
Pappel 1	27 m	67,815	7,419	75,234	Robinie 1	27 m	55,527	0,649	56,176
Pappel 2	TL	27,710	0,886	28,595	Robinie 2	TL	95,421	1,257	96,679
Pappel 2	1 m	27,185	0,390	27,575	Robinie 2	1 m	41,716	1,219	42,935
Pappel 2	6 m	21,078	0,377	21,455	Robinie 2	6 m	31,255	1,241	32,496
Pappel 2	13,5 m	32,501	0,451	32,953	Robinie 2	13,5 m	41,685	0,903	42,588
Pappel 2	27 m	42,944	1,096	44,040	Robinie 2	27 m	59,468	0,587	60,054
Pappel 3	TL	16,495	0,645	17,140	Robinie 3	TL	38,618	5,137	43,755
Pappel 3	1 m	33,589	2,839	36,428	Robinie 3	1 m	66,138	85,150	151,288
Pappel 3	6 m	58,878	20,510	79,388	Robinie 3	6 m	30,925	0,784	31,709
Pappel 3	13,5 m	57,309	0,572	57,881	Robinie 3	13,5 m	54,664	1,074	55,737
Pappel 3	27 m	32,410	0,706	33,116	Robinie 3	27 m	53,248	0,535	53,783
Pappel 4	TL	30,315	2,431	32,746	Robinie 4	TL	119,257	9,176	128,433
Pappel 4	1 m	35,161	0,408	35,569	Robinie 4	1 m	43,808	0,926	44,734
Pappel 4	6 m	67,518	7,023	74,541	Robinie 4	6 m	85,101	0,573	85,674
Pappel 4	13,5 m	46,059	1,607	47,666	Robinie 4	13,5 m	36,238	1,083	37,322
Pappel 4	27 m	36,047	0,063	36,109	Robinie 4	27 m	22,813	0,559	23,372
Pappel 5	TL	27,330	0,973	28,303	Robinie 5	TL	138,596	0,314	138,910
Pappel 5	1 m	24,723	0,000	24,655	Robinie 5	1 m	61,645	1,538	63,183
Pappel 5	6 m	40,520	0,046	40,566	Robinie 5	6 m	23,182	0,113	23,295
Pappel 5	13,5 m	24,731	0,000	24,610	Robinie 5	13,5 m	38,119	0,326	38,445
Pappel 5	27 m	68,128	2,483	70,611	Robinie 5	27 m	61,032	7,568	68,600
Pappel 6	TL	13,090	0,543	13,633	Robinie 6	TL	54,049	14,038	68,087
Pappel 6	1 m	26,690	0,490	27,180	Robinie 6	1 m	56,648	0,688	57,336
Pappel 6	6 m	64,463	4,470	68,933	Robinie 6	6 m	39,600	1,050	40,649
Pappel 6	13,5 m	31,595	0,541	32,135	Robinie 6	13,5 m	68,751	2,989	71,741
Pappel 6	27 m	80,875	0,678	81,553	Robinie 6	27 m	36,303	0,987	37,291

TL: Baumstreifen; 13,5 m: ¼ der Ackerbreite; 27 m: ½ der Ackerbreite.

Tabelle A2: Einzelwerte des Gesamt-Kohlenstoffs (C), Gesamt-Stickstoffs (N) und C:N-Verhältnisses im Oberboden (0–30 cm) in Abhängigkeit von Transekt und Distanz zur Baumreihe.

Transekt	Distanz	C %	N %	C:N	Transekt	Distanz	C %	N %	C:N
Pappel 1	TL	1,480	0,143	10,342	Robinie 1	TL	1,436	0,144	10,003
Pappel 1	1 m	1,176	0,118	10,000	Robinie 1	1 m	1,404	0,137	10,265
Pappel 1	6 m	1,235	0,121	10,229	Robinie 1	6 m	1,556	0,154	10,101
Pappel 1	13,5 m	1,295	0,135	9,587	Robinie 1	13,5 m	1,453	0,147	9,914
Pappel 1	27 m	1,818	0,176	10,320	Robinie 1	27 m	1,431	0,144	9,934
Pappel 2	TL	1,338	0,126	10,606	Robinie 2	TL	1,533	0,150	10,191
Pappel 2	1 m	1,318	0,131	10,050	Robinie 2	1 m	0,976	0,100	9,715
Pappel 2	6 m	1,261	0,123	10,245	Robinie 2	6 m	1,203	0,122	9,835
Pappel 2	13,5 m	1,415	0,142	9,975	Robinie 2	13,5 m	1,365	0,136	10,011
Pappel 2	27 m	1,520	0,150	10,124	Robinie 2	27 m	1,658	0,164	10,123
Pappel 3	TL	1,490	0,145	10,292	Robinie 3	TL	1,406	0,139	10,087
Pappel 3	1 m	1,165	0,116	10,022	Robinie 3	1 m	1,151	0,116	9,952
Pappel 3	6 m	1,371	0,136	10,048	Robinie 3	6 m	1,202	0,120	10,050
Pappel 3	13,5 m	1,515	0,151	10,057	Robinie 3	13,5 m	1,673	0,162	10,320
Pappel 3	27 m	1,639	0,158	10,368	Robinie 3	27 m	1,458	0,144	10,119
Pappel 4	TL	1,485	0,151	9,860	Robinie 4	TL	1,606	0,147	10,955
Pappel 4	1 m	1,564	0,157	9,987	Robinie 4	1 m	1,505	0,145	10,399
Pappel 4	6 m	1,432	0,148	9,694	Robinie 4	6 m	1,298	0,132	9,855
Pappel 4	13,5 m	1,255	0,123	10,242	Robinie 4	13,5 m	1,213	0,119	10,177
Pappel 4	27 m	1,229	0,130	9,477	Robinie 4	27 m	1,235	0,120	10,285
Pappel 5	TL	1,463	0,147	9,959	Robinie 5	TL	1,548	0,154	10,079
Pappel 5	1 m	1,453	0,147	9,918	Robinie 5	1 m	1,689	0,160	10,553
Pappel 5	6 m	1,412	0,145	9,706	Robinie 5	6 m	1,124	0,112	10,036
Pappel 5	13,5 m	1,299	0,133	9,751	Robinie 5	13,5 m	1,667	0,159	10,464
Pappel 5	27 m	1,733	0,178	9,737	Robinie 5	27 m	1,202	0,122	9,831
Pappel 6	TL	1,535	0,159	9,683	Robinie 6	TL	1,662	0,166	10,003
Pappel 6	1 m	1,405	0,145	9,694	Robinie 6	1 m	1,521	0,151	10,040
Pappel 6	6 m	1,494	0,154	9,678	Robinie 6	6 m	1,241	0,128	9,664
Pappel 6	13,5 m	1,410	0,142	9,898	Robinie 6	13,5 m	1,514	0,152	9,977
Pappel 6	27 m	1,710	0,174	9,843	Robinie 6	27 m	1,575	0,156	10,126

TL: Baumstreifen; 13,5 m: ¼ der Ackerbreite; 27 m: ½ der Ackerbreite.

Ehrenwörtliche Erklärung

Ich versichere, dass ich die vorliegende Bachelorarbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel verwendet habe. Alle Ausführungen, die anderen Arbeiten wörtlich oder sinngemäß entnommen sind, sind kenntlich gemacht. Die Arbeit wurde in gleicher oder ähnlicher Form noch in keinem anderen Studiengang als Prüfungsleistung verwendet.

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Demirci', with a stylized initial 'D'.

Noelle Demirci

Biebertal, den 10.11.2025