

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung



Leibniz
Universität
Hannover

**Institut für Erdsystemwissenschaften
Abteilung Bodenkunde
Leibniz Universität Hannover (LUH)**

**CATCHY – Catch-cropping as an Agrarian Tool for Continuing
Soil Health and Yield increase**

Norman Gentsch & Georg Guggenberger

Förderkennzeichen: 031B1060C

Schlussbericht 2025

**„Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln
des Bundesministeriums für Bildung und Forschung unter dem
Förderkennzeichen 031B1060C gefördert. Die Verantwortung für den
Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.“**



BONARES
Centre for Soil Research



2 Teil II – Ausführliche Darstellung

Im Folgenden sind die wichtigsten Ergebnisse der dritten Projektphase in der Reihenfolge der Arbeitspakete beschrieben: **WP 3.1** Dauerbeobachtung von Bodeneigenschaften; **WP 3.2** Bewertung der Bodenstruktur, **WP 3.3** Optimierung der Zusammensetzung der Zwischenfruchtstreu, **WP 3.4** Datenverknüpfung und Modellierung; **WP 3.5** Wissenstransfer. Alle Meilensteine der Arbeitspakete wurden erreicht und sind abgeschlossen.

2.1 Treibhausgasmonitoring

Insgesamt wurden seit Beginn der dritten Projektphase in 58 Kampagnen Treibhausgase gemessen (Abb. 1). Die gesamte Monitoring Periode umfasste 638 Tage.

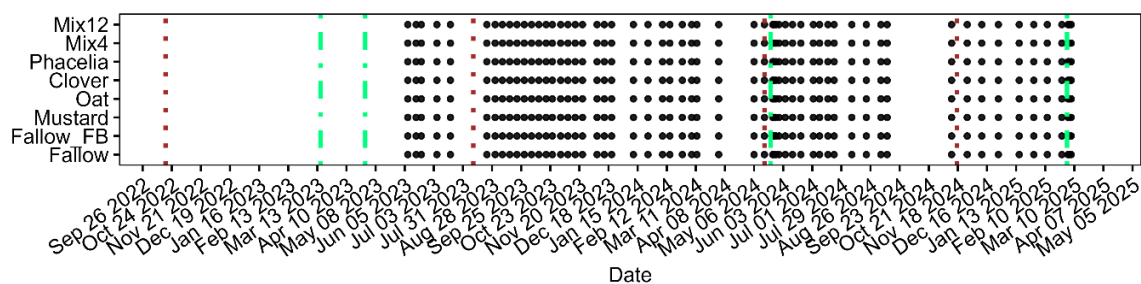


Abbildung 1 Termine der Treibhausgasmessungen am Standort Asendorf. Übersicht der Meskampagnen, braune Linien= Aussaattermine, braune Linien = N-Düngung, grüne Linien = Bodenprobenahme

Der Verlauf der CO₂-Flüsse (Abb. 2) folgt den Witterungsbedingungen und findet sich in den Managementmaßnahmen wieder. Die höchsten Flüsse werden im Sommer bei feucht-warmen Witterungsbedingungen gemessen. Bodenbearbeitung vor der Aussaat und Düngung erzeugen Mineralisationspulse, welche sich in den Messungen als Höchstwerte widerspiegeln. Mit einer Erhöhung der Messaktivität vor und nach solchen Events wurde sichergestellt, dass die Emissionsspitzen zuverlässig erfasst wurden. Es konnten jedoch keine Emissionsspitzen identifiziert werden, die aus einer bestimmten Zwischenfruchtbehandlung resultieren (Abb. 2).

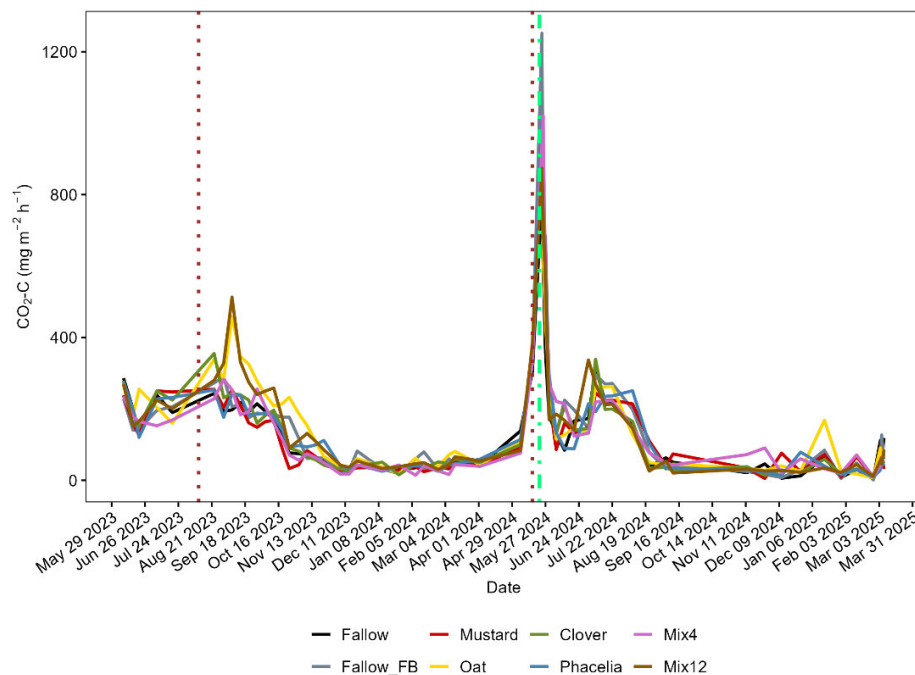


Abbildung 2 Zeitlicher Verlauf der CO₂-C Emissionen der unterschiedlichen Vergleichsvarianten.

Ein wichtiges Maß für die Gesamtemissionen aus einem System sind die kumulativen Messwerte, aufsummiert für ein Kalenderjahr. In Abb. 3 sind die kumulativen CO₂-C Emissionen dargestellt und über Effektgrößen statistisch miteinander verglichen. Typischerweise liegen die jährlichen CO₂-Emissionen aus landwirtschaftlichen Böden im Bereich von etwa 0,1 bis 20 t CO₂-C pro ha (Tiemeyer et al., 2020). Bodentyp, Klima Region Management sind die wichtigsten Faktoren für die Unterschiede. Insgesamt liegen die jährlichen CO₂ Emissionen am Standort Asendorf mit 7,7 bis 12,3 t ha⁻¹ a⁻¹ im mittleren Bereich (Abb. 3). Tendenziell liegen die CO₂-C Emissionen für Zwischenfrüchte im Mittel 1,02 t ha⁻¹ a⁻¹ höher als die Brache. Aufgrund der großen Variabilität in der Brache lassen sich jedoch keine statistischen Unterschiede zwischen den Behandlungsvarianten feststellen. Bei einer jährlichen Biomasseproduktion von 3,3 t Spross- und 2,9 t Wurzelmasse, mit jeweils mittleren C-Gehalten von 42% in Spross und 37% in Wurzeln, ergibt sich ein jährlicher Fluss (aufgeteilt auf 2 Jahre Fruchtfolge) von 2,5 t ha⁻¹a⁻¹ C_{org} in den Boden. Abzüglich der etwa 1 t höheren CO₂-C-Emissionen errechnet sich für Zwischenfrüchte ein positiver Saldo von 0,23 t C ha⁻¹ a⁻¹ die im System verbleiben. Dies lässt darauf schließen, dass Zwischenfrüchte den photosynthetisch

generierten C effizient in stabile Humusverbindungen einbauen und die Netto Flüsse zwischen Anbausystem (Pflanze und Böden) und Atmosphäre negativ sind.

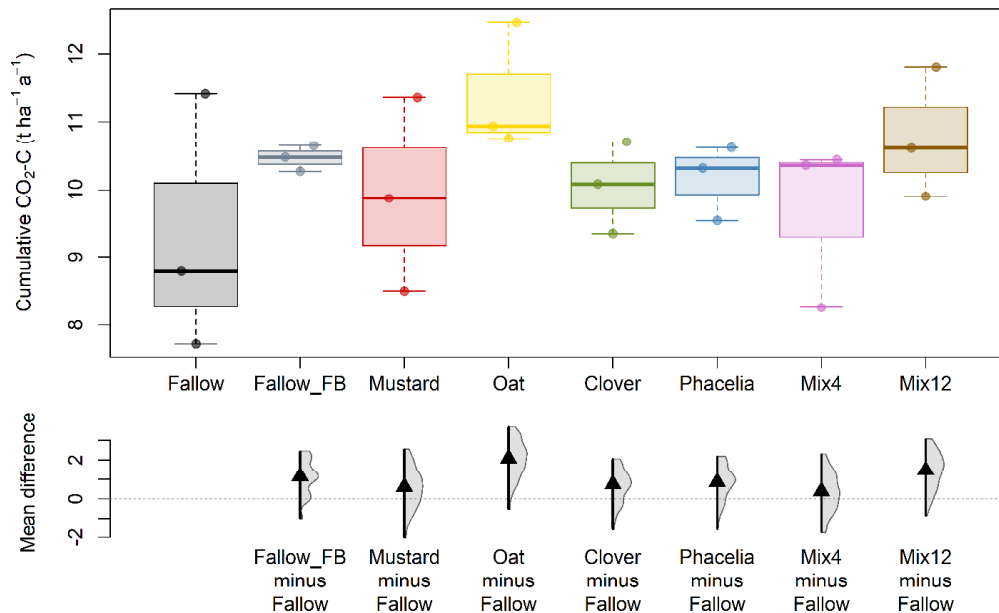


Abbildung 3 Kumulative CO₂-C Emissionen normiert auf 365 Tage. Der „Estimation Plot“ zeigt klassischen Datenpunkte und Boxplot Statistik im oberen Teil, im unteren Teil Konfidenzintervalle und Effektgrößen. Die Konfidenzintervalle für die Schätzung werden mittels Bootstrap-Resampling unter Verwendung des angepassten Bootstrap-Perzentils bestimmt. Wenn das Konfidenzintervall die Nulllinie nicht überschreitet, ist der Unterschied statistisch signifikant.

Die N₂O Emissionen folgen noch stärker klimatischen Events und Managementmaßnahmen. Signifikante N₂O Flüsse in die Atmosphäre ließen sich bislang nur nach N-Düngung zu den Kulturen aufzeichnen. Im Vergleich zu mittleren N₂O-N Emissionen aus deutschlandweiten Messstationen, liegen die Daten am Standort Asendorf auf einem sehr niedrigem Niveau (Jungkunst et al., 2006; Mathivanan et al., 2021). Interessanterweise zeigt die kumulative Auswertung der N₂O Daten nach N-Düngung, signifikant niedrigere Werte bei Versuchsvarianten Phacelia, Mix4 und Klee im Vergleich zur Brache (Abb.4). Auch alle anderen Zwischenfruchtvarianten liegen gleichauf mit der Brache. Im Gegensatz zu anderen Studien (Abdalla et al., 2019; Basche et al., 2014; Bodner et al., 2017) belegen die Daten für Asendorf keine erhöhten N₂O Emissionen durch Zwischenfruchtanbau und sogar einen puffernden Effekt auf Emissionspeaks von Düngemaßnahmen.

Insgesamt umfassen der Gesamtmesszeitraum der Treibhausgasmessungen am Standort Asendorf 2,1 Jahre. Die Messzeiträume umfassen unterschiedliche Witterungsbedingungen in verschiedenen Jahren sowie unterschiedlichen Managementmaßnahmen (Bodenbearbeitung, Düngung). Zu keinem dieser Zeiträume zeigen Zwischenfrüchte statistisch signifikant erhöhte Treibhausgasemissionen im Vergleich zur Brache.

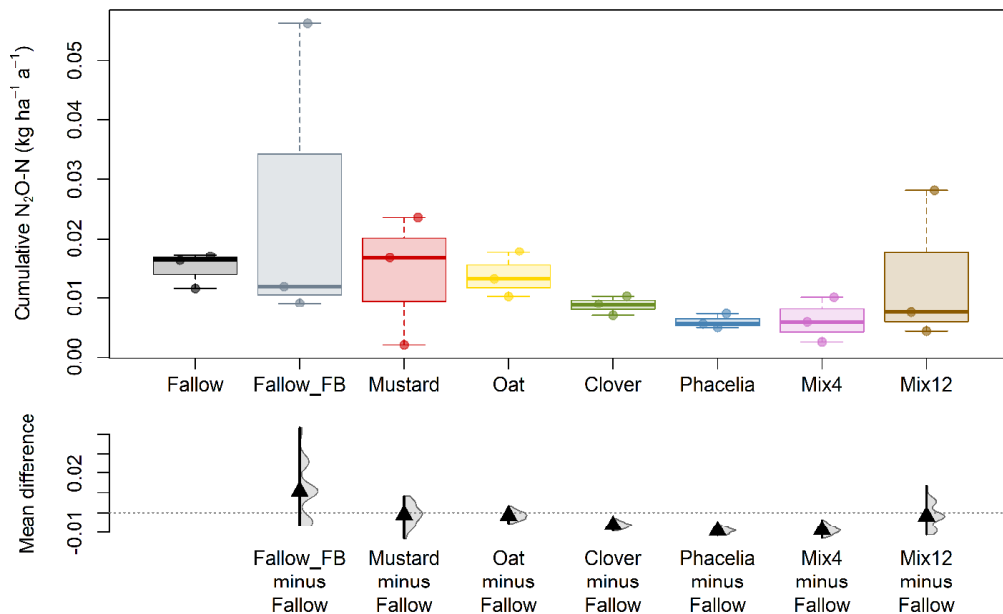


Abbildung 4 Kumulative N₂O-N Emissionen normiert auf 365 Tage. Der „Estimation Plot“ zeigt klassischen Datenpunkte und Boxplot Statistik im oberen Teil, im unteren Teil Konfidenzintervalle und Effektgrößen (siehe Unterschrift Abb. 3).

2.2 Bodenkohlenstoffbilanz

Zur Bilanzierung von organischem Kohlenstoff (C_{org}) im Boden sowie zur Dauerbeobachtung von Veränderung durch den Anbau von Zwischenfrüchten mussten an beiden Standorten großen Herausforderungen gelöst werden.

2.2.1 Langzeithistorie und Herausforderungen Asendorf

Die Fläche war bis 2000 Teil eines früheren Viehzuchtbetriebs. Die Fläche wurde als Weide und für die Futtermittelproduktion genutzt, Fruchtfolge und Bewirtschaftung der Fläche in dieser

Zeit sind nicht bekannt. Seit 2000 waren die Flächen an einen Ackerbauern verpachtet, der mit geringer Bodenfruchtbarkeit und einem niedrigen Gehalt an organischer Substanz begann (persönliche Mitteilung). Die Böden wurden nachfolgend mit reduzierter Bodenbearbeitung, nicht wendend, bewirtschaftet. Die Fruchtfolge war Triticale - Winterraps - Winterweizen. Das Stroh verblieb auf dem Feld und wurde zusammen mit Geflügelmist (140 kg N pro Jahr) in den Boden eingearbeitet, allerdings nur vor der Rapssaat. Die Bearbeitungstiefe betrug 10 cm mit einem Zinkengrubber. Die Hauptkulturen wurden mit Rindergülle und Harnstoff (AHL) gedüngt. Die Bewirtschaftung führte zum Versuchsbeginn von CATCHY zu einer Erhöhung des C_{org} -Gehalts im Boden auf durchschnittlich 1,8 % in den oberen 0-30 cm. Im Jahr 2014 wurde die Fläche von der DSV (Deutsche Saatveredelung AG) übernommen, und 2015 der CATCHY Versuch gestartet. Zur Homogenisierung der Versuchsfläche zu Beginn des Projekts wurde im Sommer 2014 vor der Aussaat von Winterweizen bis zu 30 cm gepflügt. Seitdem wurden die Böden nur noch mit Zinkengrubber und Scheibenegge bis zu einer maximalen Tiefe von 15-20 cm bearbeitet. Es handelte sich somit um ein Bodenmanagement mit reduzierter Bodenbearbeitung, nicht Boden wendend.

Eine weitere Herausforderung war der Windeintrag von Laubstreu der etwa 150 Jahre alten Alle-Eichen im Südwesten der Versuchsfläche (Abb. 5). Trotz des Mindestabstands von 76 m war die Nähe zu der Baumreihe im C_{org} -Vorrat der Fläche messbar (Abb. 5). Die Verwehung von Laubstreu auf die Versuchsflächen führte zu einem starken C_{org} -Gradienten mit höheren Gehalten mit zunehmender Nähe zur Baumreihe. Der Gradient wird zwar im Versuchsdesign durch die Anlage von Reihen innerhalb der 4 Blöcke erfasst, nicht jedoch innerhalb der Reihen. Eine Randomisierung erfolgte jedoch nur innerhalb der Reihen. Besonders die Fruchtfolgeeffekte (Leg-, Leg+) werden durch den Streueintrag stark beeinflusst und sind untereinander nicht vergleichbar. Diese Effekte wurden jedoch erst nach dem Start des Versuchs und der vollständigen Kartierung der Versuchsfläche durch SP3 sichtbar.

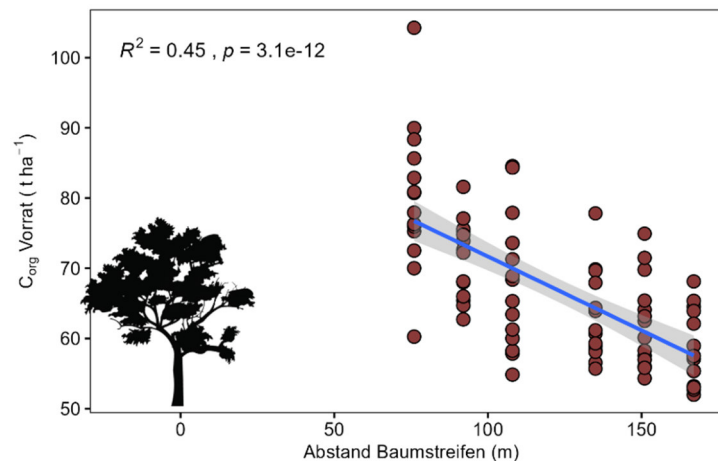


Abbildung 5 Veränderung der C_{org}-Vorräte (0-30 cm) mit Abstand zur Baumreihe (in m) des Versuchs in Asendorf. Die Fruchtfolge wird von Laubstreu Eintrag der Eichen signifikant beeinflusst.

2.2.2 Bodenheterogenität Triesdorf

Am Standort Triesdorf war das Bodenmanagement äquivalent zum Versuchsstandort Asendorf. Vor Versuchsbeginn wurde bis 30 cm gepflügt. Danach erfolgte die Bodenbearbeitung nur noch mit Zinkengrubber und Scheibenegge bis zu einer maximalen Tiefe von 15-20 cm. Außerdem wurde das Weizenstroh auf der Fläche belassen. Der Tongehalt war hier die größte Herausforderung. Der Tongehalts der Fläche lag zwischen 9 und 22% und war somit sehr variabel (Abb. 6). Da Tonminerale wichtige Bindungspartner für organische Substanz sind, gibt es vor allem im Oberboden hoch signifikante Korrelationen. Aus der Regressionsgleichung für 0-10 cm ($C_{org} (\%) = Ton (\%) \times 0.0620 + 0.33$) und einem Anstieg von 10% auf 20% Ton ergibt sich ein C_{org} Anstieg um 0.62%. Entsprechend fanden sich hoch signifikante Korrelationen zu den Erträgen (Groß et al., 2023). Diese große Textur-Heterogenität macht es am Standort schwierig, Effekte des Zwischenfruchtanbaus auf den C_{org}-Vorrat sauber herauszuarbeiten.

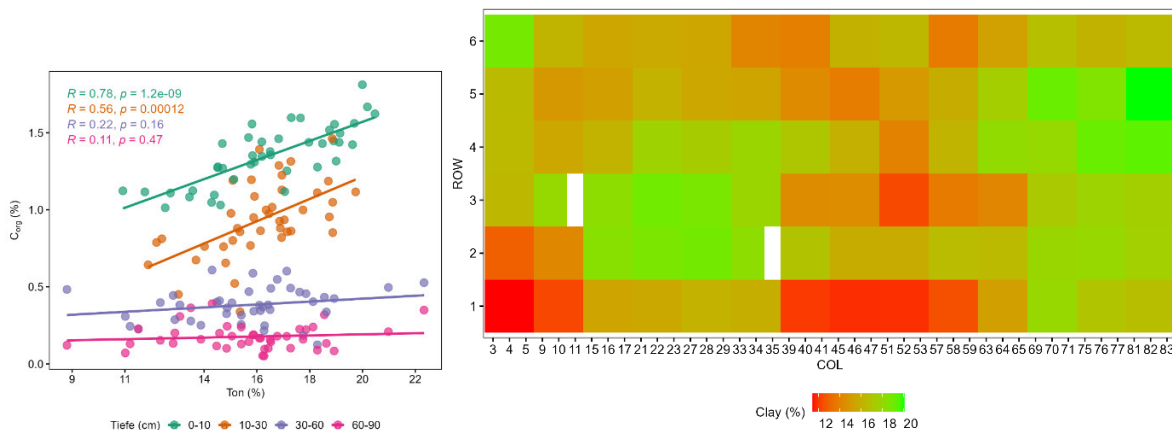


Abbildung 6 Korrelation des C_{org} Gehaltes mit dem Tongehalt am Standort Triesdorf. Zeitpunkt der Probenahme war August 2023 nach Weizenernte (links). Heterogenität des Tongehalts am Standort Triesdorf im Oberboden (0-30 cm). Jedes Viereck repräsentiert einen Versuchsplot, die Randomisierung der Plots erfolgte nur innerhalb der Reihen (ROW).

2.2.3 Veränderungen der C_{org}- Vorräte

Die Abschlusskartierung der aufsummierten C_{org} Vorräte bis 100 cm zeigt auf beiden Flächen keine statistischen Unterschiede zwischen den Vergleichsvarianten (Abb. 7). Hauptursache dafür ist die sehr breite Streuung der Werte an beiden Standorten, zwischen 40 bis 130 t C_{org} ha⁻¹. Die oben skizzierten Faktoren, insbesondere der Laubtreueintrag der Alleebäume in Asendorf und die hohe Texturheterogenität in Triesdorf, werden als treibende Faktoren für die große Spannbreite angenommen. Selbst Einbeziehung dieser Faktoren in statistische Modelle konnte die Variabilität nicht reduzieren. In der weiteren Auswertung fokussierten wir daher nur auf den Oberboden (0-10 cm) da für diesen Bereich die Probenametechnik immer gleich war und die Anzahl der Probenahmeterminale im Projektzeitraum am größten. Für die Statistik wurden Garder-Altman-Plots mit Schätzer-Grafiken verwendet (Ho et al., 2019). Gegenüber der Null-Hypothesen Statistik, bietet diese Form der statistischen Auswertung den Vorteil, dass alle Daten und Datenpaare transparent gezeigt werden. Die Berechnung der Konfidenzintervalle basiert auf einer „adjusted bootstrapped resampling“ Methode. Dabei werden die mittleren Differenzen durch die Standardisierung um die Standardabweichung der Differenzen verzerrungskorrigiert (Khan & McLean, 2023). Somit sind Ungleichgewichte der Probenanzahl zwischen den Prüfgliedern automatisch korrigiert. In einer paarweisen

Auswertung über beide Standorte und all Zwischenfruchtvarianten hinweg ergibt sich ein leichter Anstieg der C_{org} -Vorräte zwischen 2015 und 2023, nicht jedoch für die Variante Brache (Abb. 8). Dagegen steigen die C_{org} -Vorräte aller Zwischenfruchtbehandlungen im Mittel um $1,44 \text{ t ha}^{-1}$, 95% CI [0.764045, 2.64955], an. Bezogen auf 8 Versuchsjahre liegt die durchschnittliche jährliche C_{org} Aufbauraten im Oberboden unter Zwischenfrucht bei $0,18 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Für alle Standorte und Versuchsglieder sind die Aufbauraten statistisch hoch signifikant. Dieser Werte decken sich sehr gut mit den aus den Emissionen ermittelten Kohlenstoffsenken von durchschnittlich $0,23 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (siehe Abschnitt 2.1). Damit sind die Humusaufbauraten etwa 3 mal geringer als in einer globalen Metastudie (Poeplau & Don, 2015). Die Autoren errechnen im globalen Mittel eine jährliche C_{org} Anreicherung von $0,49 \text{ t pro ha (t ha}^{-1} \text{ a}^{-1})$ durch Zwischenfruchtanbau (95 % CI [0,34 bis $0,65 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$]) im Oberboden (0-30 cm). Das entspricht einer Humusakkumulationsrate von etwa $1 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und einem CO_2 -Äquivalent von $1,82 \text{ t ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$. Die Differenz zu den CATCHY Werten ergibt sich möglicherweise aus den unterschiedlichen Tiefen der Berechnung. Da in CATCHY aufgrund der oben angesprochenen Probleme nur das Tiefeninkrement 0-10 cm berücksichtigt wurde, ist die Aufbauraten von $0,18 \text{ t C}_{org} \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ als konservativ zu betrachten.

Werden Zwischenfrüchte mit Leguminosen eingesetzt, ergeben sich während des Beobachtungszeitraums höhere C_{org} Aufbauraten ($1,68 \text{ t ha}^{-1}$) im Vergleich zu nicht Leguminosen ($1,19 \text{ t ha}^{-1}$). In Abb. 9 sind Senf, Rauhafer und Phacelia als ZF-Leg und Klee, Mix4 und Mix12 als ZF+Leg zusammengefasst.

Die Bilanzierung der Humusgehalte an beiden Standorten war mit großen statistischen Herausforderungen verbunden. Insgesamt bestätigen die Ergebnisse jedoch die Trends aus unterschiedlichen Studien. Zwischenfrüchte führen zum Humusaufbau im Oberboden, wobei Leguminosen im Zwischenfruchtanbau den Humusaufbau leicht verstärken im Vergleich zu Nichtleguminosen haltige Zwischenfrüchte.

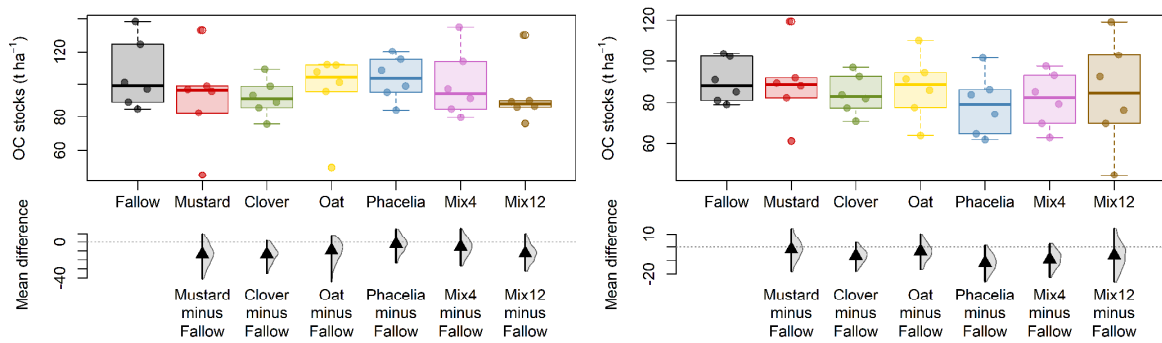


Abbildung 7 Gardener-Altman Plots der C_{org} Vorräte (0-100cm) Asendorf (links) und Triesdorf (rechts). Effektschätzer im unteren Teil zeigen keine signifikanten Trends zwischen den Versuchsvarianten.

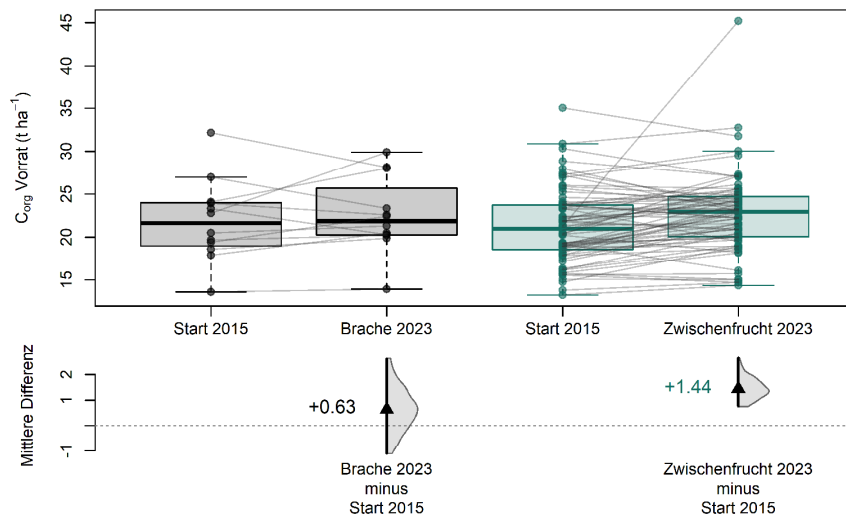


Abbildung 8 Effekt von Zwischenfruchtanbau auf den C_{org} Vorrat im Oberboden (0-10 cm) beider CATCHY Versuchsflächen. Die Effektschätzer im unteren Teil zeigen signifikante C_{org} Anreicherung durch Zwischenfrüchte zwischen Startzeitpunkt der Versuche bis zur letzten Probenahme 2023.

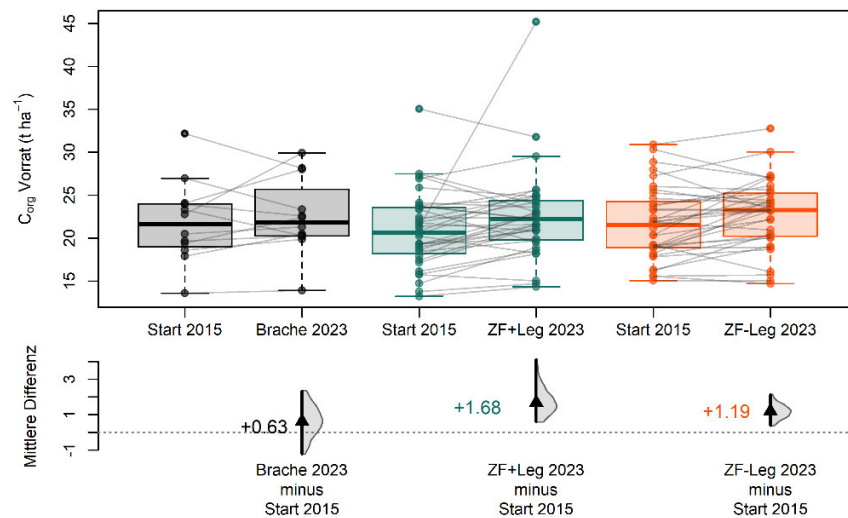


Abbildung 9 Effekt von unterschiedlichen Zwischenfruchtvarianten (ZF+Leg: Zwischenfruchtmischungen mit Leguminosen, ZF-Leg: Zwischenfrüchte ohne Leguminosen) auf den C_{org} Vorrat im Oberboden (0-10 cm) beider CATCHY Versuchsflächen. Die Effektschätzer im unteren Teil zeigen signifikante C_{org} Anreicherung für beide Varianten.

2.3 Bodenstrukturbewertung

Die Bewertung der Bodenstrukturveränderungen erfolgte über die Fraktionierung von Bodenaggregaten und Stabilitätstests. An luftgetrockneten Proben wurden zunächst unterschiedliche Aggregatklassen fraktioniert und deren Verteilung ermittelt. Anschließend wurden die Aggregate einer definierten Krafteinwirkung durch Wasser ausgesetzt. Die Messwerte beschreiben die Stabilität von Bodenaggregaten gegenüber Stresseinwirkung (z.B. Starkregen, mechanische Bodenbearbeitung). Die Ergebnisse zeigen, dass Pflanzen mit unterschiedlicher Wurzelphysiologie unterschiedliche Effekte auf die Verteilung der Aggregatgrößenklassen und dem mittleren gewichteten Aggregatdurchmesser (MWD) ausüben (Abb. 10, links). Unabhängig von der Art oder Mischungszusammensetzung weisen alle Zwischenfruchtbehandlungen im Versuch stabilere Bodenaggregate im Vergleich zur Brache auf (Abb. 10, rechts). Zwischenfruchtmischungen zeigen dabei leicht höhere Werte gegenüber den Reinsaaten und damit etwas höheres Potential zur Bodenstruktursanierung.

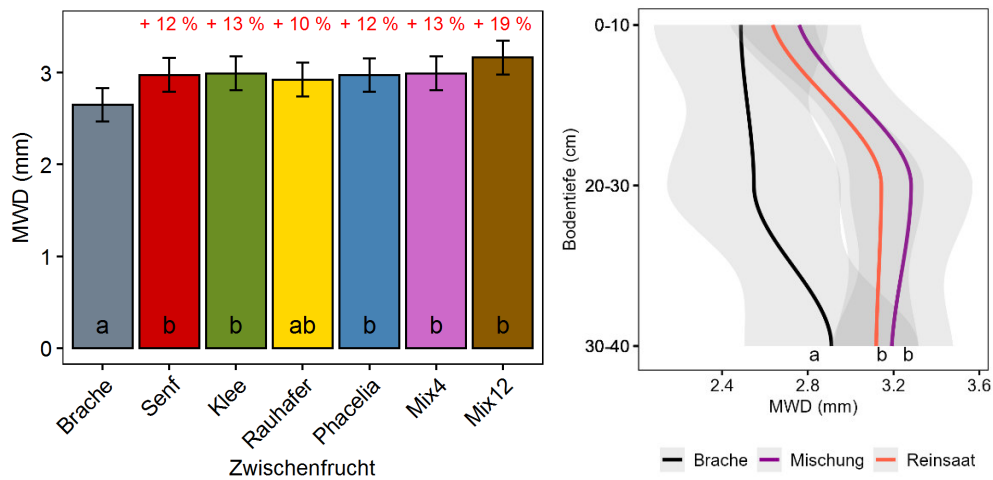


Abbildung 10 Bewertung der Bodenstruktur über Aggregatfraktionierung und mittleren, gewichteten Durchmesser (MWD).

2.4 Spezifische Pflanzenfunktionen und Optimierung von Mischungen

Bezüglich der spezifischen Eigenschaften einzelner Zwischenfrüchte auf mikrobielle Stoffkreisläufe im Boden gibt es noch immer große Wissenslücken. Die unterschiedlichen N₂O Emissionen sowie das unterschiedliche Potential zur N-Auswaschung lassen auf einen aktiven Einfluss bestimmter Zwischenfrüchte auf die mikrobiellen N-Flüsse im Boden schließen. In einer Zeitreihenanalyse wurde Bodenparameter und mikrobielle Funktionen unter Brache, Phacelia und Klee gemessen. Die Ergebnisse zeigen einen starken Einfluss der einzelnen Zwischenfrüchte auf Mikroorganismen, die aktiv in Stoffkreisläufe im Boden involviert sind. Jede Pflanzenart hat einen spezifischen Einfluss auf bestimmte Teilprozesse des Stickstoffkreislaufs. Klee z.B. aktivieren die Stickstoffaufnahme aus elementaren Quellen (nifH, N-Fixierung), wogegen Phacelia die Aktivität von nosZ erhöht, was die Denitrifizierung und Umwandlung von N₂O in elementares N₂ bewirkt. Dadurch können N₂O Emissionen aus dem Boden verringert werden. Netzwerkanalysen zeigen, dass unterschiedliche Pflanzen verschiedene Interaktionen mit unterschiedlichen Mikroorganismengruppen hervorrufen (Abb. 11). Jede Pflanze erzeugt somit einzigartige mikrobielle Netzwerke mit unterschiedlichen Funktionen und Interaktionen. Zusammen mit den Ergebnissen zur Messung der Stöchiometrie von Nährstoffverhältnissen in einzelnen Pflanzen ergibt sich ein erstes Bild zur Optimierung

von Zwischenfruchtmischungen. Diese sollten nicht nur (wie aktuell) die phytosanitären Aspekte in der Fruchtfolge berücksichtigen, sondern den Nährstoffbedarf der Folgekultur und den Einfluss auf den mikrobiellen Fingerabdruck. Unsere Daten liefern erste Hinweise, dass Zwischenfruchtmischungen ein Werkzeug sind, um multiple Bodenfunktionen und Pflanzenperformance in gezielte Richtungen zu beeinflussen. Die Projektlaufzeit reichte jedoch nicht aus um Pflanzenfunktionen aller Zwischenfruchtarten umfassend zu katalogisieren. Diese Arbeit sollte Ziel einer zukünftigen Forschungsinitiative sein.

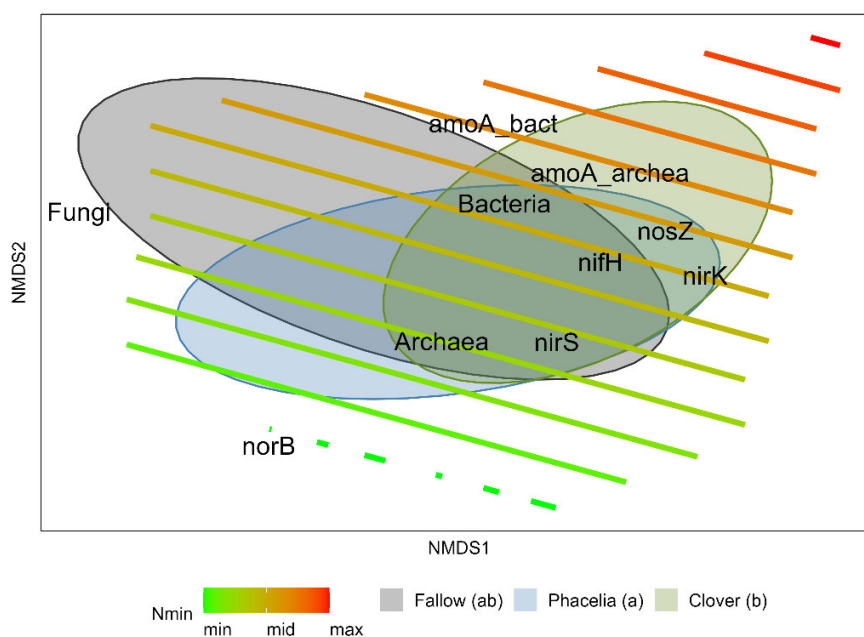


Abbildung 11 Funktionelle Markergene des N-Kreislaufs im Boden über einen zeitlichen Gradienten.

2.5 Umsetzungsgeschwindigkeiten von Zwischenfrüchten

Zur Bestimmung von Zersetzungsgeschwindigkeiten der Zwischenfruchtstreu wurden so genannte „Litterbag“ Experimente im Freiland und unter Laborbedingungen durchgeführt. Die Laborexperimente liefern Informationen über potentielle Umsatzzeiten unter idealen Bodenbedingungen und lassen damit Aussagen über die Geschwindigkeit der Freisetzung von Nährstoffen aus unterschiedlichen Pflanzen bzw. Pflanzenteilen zu. Dafür wurde Pflanzenmaterial von 10 unterschiedlichen Pflanzen im Feld gesammelt und in Spross und

Wurzel separiert. Etwa 10 g des getrockneten Materials wurde in Gazebeutel mit definierter Maschenweite gefüllt und in Kisten, befüllt mit Boden der Asendorfer Versuchsfläche, platziert. In Abständen von jeweils 4 Wochen wurde Beutel entnommen, der Masseverlust bestimmt und die Elementzusammensetzung der Reststoffe gemessen. Die Daten wurden statistisch aufbereitet und über kinetische Funktionen erster Ordnung Umsatzzeiten und Poolgrößen von schnell und langsam zersetzbaren Pflanzenteilen bestimmt. Für die Sprossmasse wurden zusätzlich Mischungsexperimente durchgeführt. Dafür wurde die Elementkonzentration der Streustoffe bestimmt und Mischungen mit genau definierten Elementkonzentration zusammengestellt. Die C- und N-Konzentrationen der Mischungen wurden so eingestellt, dass sie einen Gradienten der C:N Verhältnisses von 12, 16, 19 bis 22 entsprechen. Zusätzlich wurden bei gleich bleibenden C:N Verhältnissen die P-Konzentrationen der Mischungen variiert. Die Varianten mit hohen P Konzentrationen enthielten 5,7 mg P g⁻¹ Boden und die niedrige Variante 3,7 mg P g⁻¹ Boden. Aus Kapazitätsgründen wurden die Wurzelexperimente eine Saison später als die Sprossexperimente durchgeführt. Leider standen zu diesem Zeitpunkt ungenügend Wurzelmaterial der Lucerne zur Verfügung. Daher musste im Wurzelexperiment auf Weißklee als alternative Leguminose ausgewichen werden.

Die Zersetzung der Biomasse im Experiment erfolgt maßgeblich durch Mikroorganismen und Mesofauna. Durch die definierte Maschenweite von <2 mm wird die Makro- und Megafauna ausgeschlossen. Der Biomassezerfall der Sprossmasse folgt exponentiellen Zerfallskurven erster Ordnung, sowohl für C und N in der Biomasse (Abb. 12a, 13a). Die Zersetzungsgeschwindigkeiten variierten je nach Pflanzenart (Abb. 12b, 13b). Die mittlere Umsatzzeit (engl. mean residence time, MRT) beschreibt das Zeitintervall, in dem 50% des jeweiligen Elements umgesetzt sind. In Abb. 12b sind die Zersetzungszeiten entsprechend ihrer Dauer nach Pflanzenarten geordnet. Entsprechend steigt die MRT von Phacelia (8 Tage) als niedrigster Wert, bis Roggen (25 Tage) als höchsten Wert, an. Die Varianz der Gesamtmenge des umgesetzten C reicht von 75 bis 80 % (Abb.12 a). Dagegen ist die Varianz des umgesetzten N deutlich weiter (Abb. 13a). Etwa 55 bis 75% des gesamt N wurden umgesetzt.

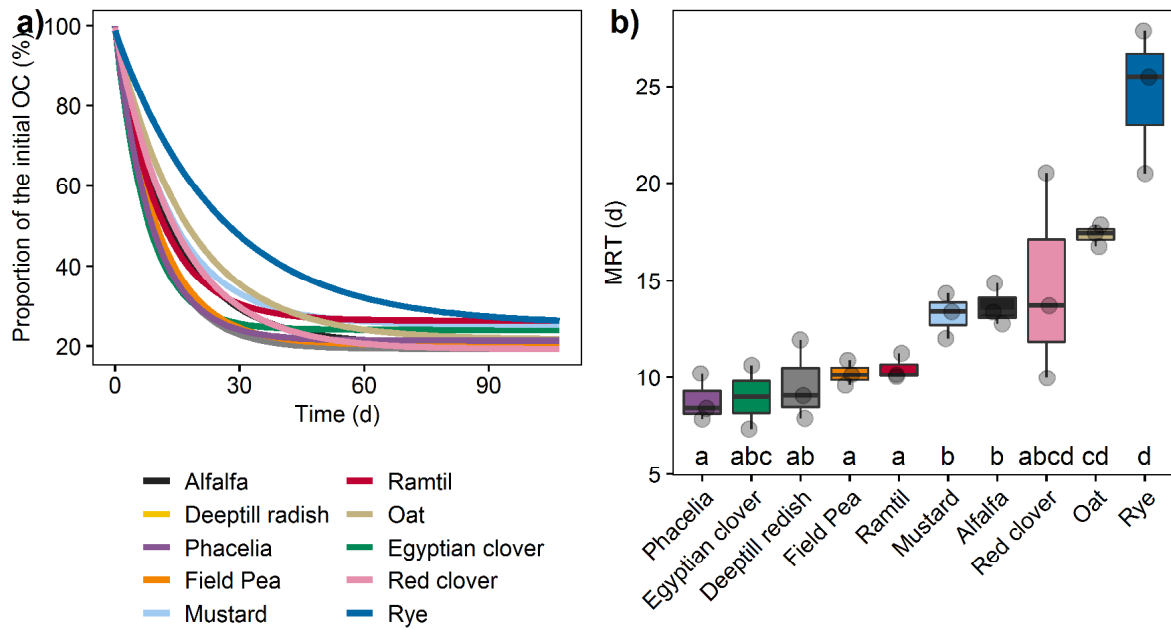


Abbildung 12 Exponentielle Zersetzungskurven des organischen Kohlenstoffs (OC in %) angepasst mit kinetischen Funktionen erster Ordnung (a). Rate der Zerfallsgeschwindigkeit berechnet als mittlere Umsatzzeit (MRT=mean residence time) in Tagen (b).

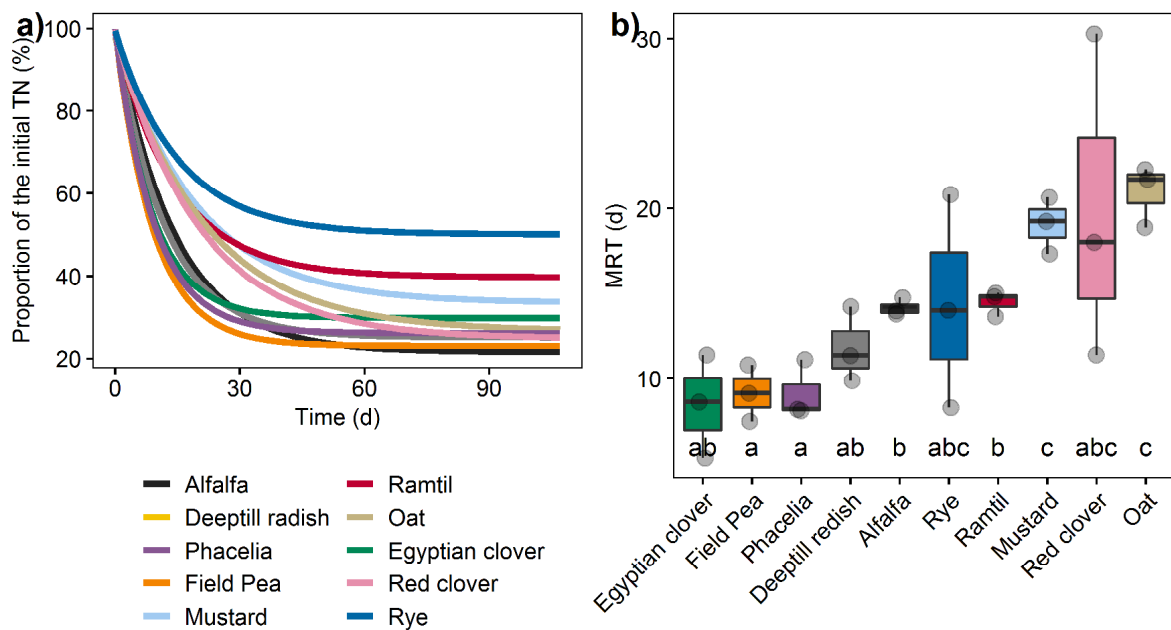


Abbildung 13 Exponentielle Zerfallskurven des Gesamtstickstoffs (TN in %) angepasst mit kinetischen Funktionen erster Ordnung (a). Rate der Zerfallsgeschwindigkeit berechnet als mittlere Umsatzzeit (MRT=mean residence time) in Tagen (b).

Der höchste Anteil des in der Streu gespeicherten N wurde aus Lucerne freigesetzt, die geringste Menge aus Roggen. Die Mischungsexperimente zeigen einen klassischen Anstieg der MRT mit dem C:N-Verhältnis der Streustoffe (Abb. 14). Doch nicht nur das C:N-Verhältnis auch der Anteil an P hat einen signifikanten Einfluss auf das Mineralisationsverhalten der Streu. Ein hoher P Gehalt steigert die Menge des freigesetzten N (Abb. 14a). Im Experiment wurde der hohe P Gehalt durch Zugabe von Streustoffen mit hohen P Konzentrationen wie Phacelia erreicht. Daher ist nicht das C:N-Verhältnis sondern das C:N:P-Verhältnis die beste Antwortvariable um Umsatzzeiten der Streustoffe inkl. der Nährstofffreisetzung zu projizieren.

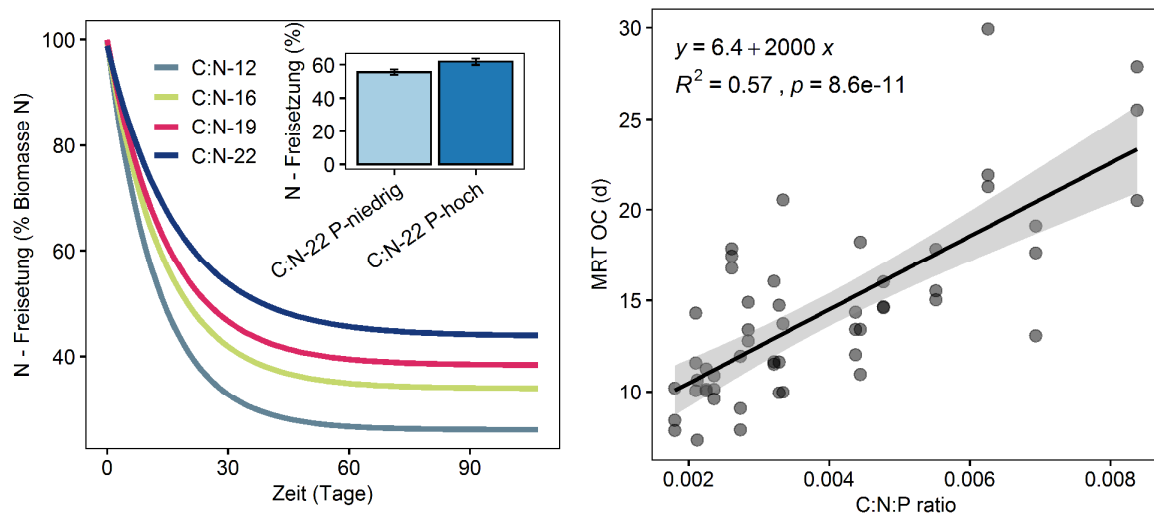


Abbildung 14 Exponentielle Zerfallskurven des Gesamtstickstoffs (TN in %) angepasst mit kinetischen Funktionen erster Ordnung der Streustoffmischungen (a). Korrelation zwischen MRT und dem C:N:P Verhältnis der Streustoffe.

Die Wurzelexperimente zeigen einen stärkeren Kontrast zwischen den Streustoffen der unterschiedlichen Arten (Abb. 15). War die Varianz der C-Zersetzung im Sprossmaterial gering, so zeigte sich die Varianz des Wurzelumsatzes mit 35% bis 91% sehr hoch (Abb. 16. links). Interessanterweise waren die Wurzeln unterschiedlicher Leguminosenarten sehr kontrastreich. War Ägyptischer Klee bereits nach 50 Tagen fast vollständig umgesetzt, so waren Rotkleewurzeln nur zu 40% mineralisiert. Dies reflektiert eine große Variabilität der Streustoffe auch innerhalb der Pflanzenfamilien. Möglicherweise spielen auch allelopathische Substanzen in den Wurzeln eine Rolle bei der Zersetzungsgeschwindigkeit. Für genauere

Aussagen zu den Ursachen sind weitere Analysen, insbesondere zu den primären und sekundären Pflanzeninhaltsstoffen notwendig. Die N-Freisetzung aus den Wurzeln folgt nicht für alle Pflanzen einem exponentiellen Zerfall (Abb. 16, rechts). Senf, Hafer und Rotklee folgen keiner Zerfallskurve, sondern weisen einen zeitweisen Anstieg der N Gehalte in den Streustoffen auf. Der Anstieg ist einzig über eine N Immobilisierung durch die mikrobielle Biomasse erklärbar. Die weiten C:N-Verhältnisse der Wurzeln stellen nur wenig N für die Aufrechterhaltung der metabolischen Stöchiometrie der Streuzersetzer zur Verfügung. Daher müsse Spezialisten wie z.B. saprophytische Pilze, N aus anderen Quellen der Bodenmatrix erschließen. Solche Quellen können Ammoniumdepots aus N Düngung oder auch die organische Bodensubstanz sein.

Zusammenfassend zeigten sowohl für C als auch für N Ägyptischer Klee, Ramtil und Phacelia die schnellsten Umsatzraten. Die höchste Menge an schlecht umsetzbaren Streustoffen waren bei Senf, Roggen und Rauhafer zu finden. Rotkleewurzeln waren ebenfalls nur langsam mineralisierbar. Je nach Zweck der Zwischenfrucht, z.B. für eine schnelle Bereitstellung von Nährstoffen für die Folgekultur oder eine stärkere Konservierung der Nährstoffe, müssen Zwischenfruchtmischungen ein Artenspektrum abdecken, um die entsprechenden Anforderungen zu erfüllen. Die Erkenntnisse über Stöchiometrie der Streustoffe und deren Zerfallszeiten sind wichtige Grundlagen für eine weitere Optimierung von Zwischenfruchtmischungen.

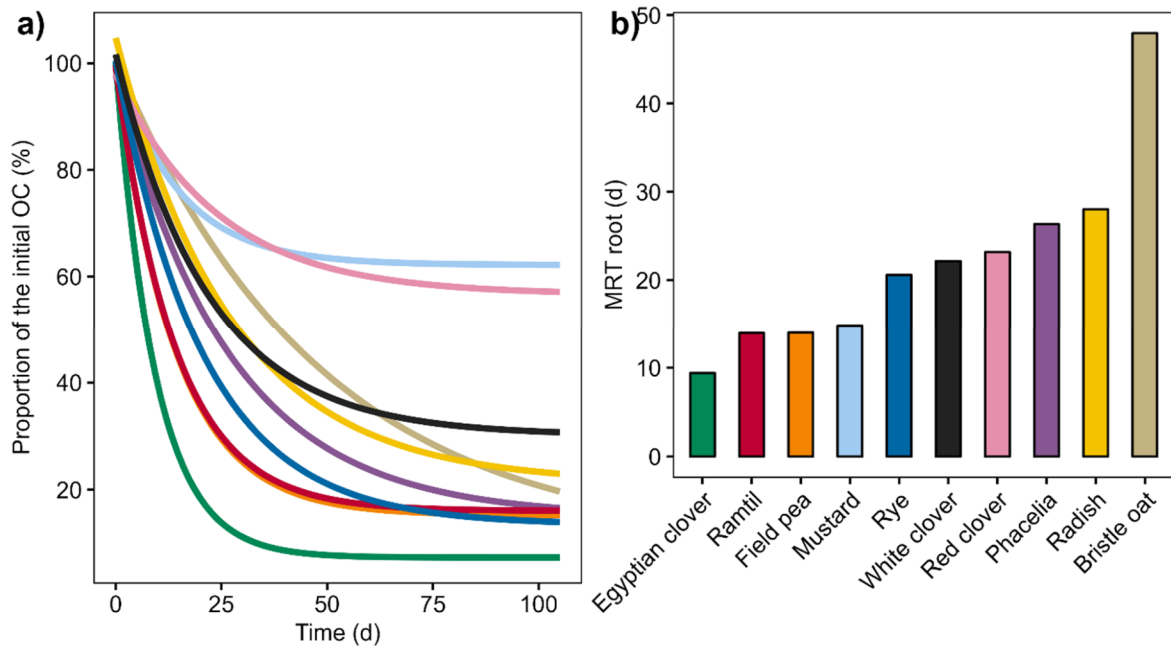


Abbildung 15 Exponentielle Zersetzung des organischen Kohlenstoffs (OC in %) aus Wurzelstreu (a). Rate der Zersetzungsgeschwindigkeit berechnet als mittlere Umsatzzeit (MRT=mean residence time) in Tagen (b).

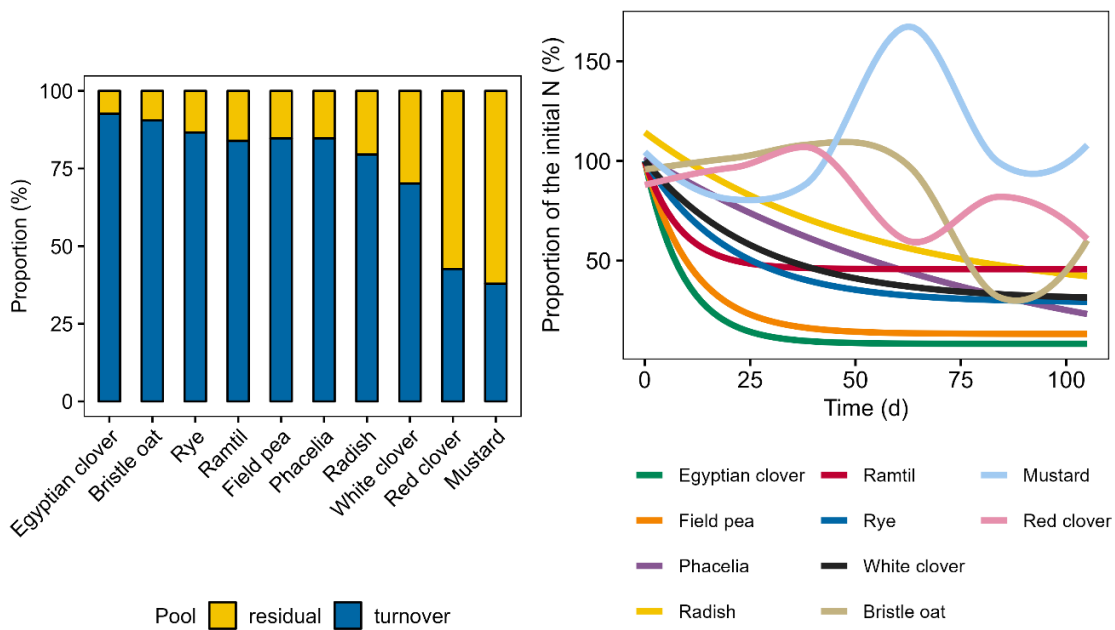


Abbildung 16 Anteil des umgesetzt C aus Wurzeln (links) und Anpassung unterschiedlicher Funktionen an die Stickstoffmineralisierung aus Wurzelstreu (rechts).

2.6 CO₂-Fußabdruck

In Zusammenarbeit mit SP5 wurde eine Studie zum CO₂-Fußabdruck von Zwischenfrüchten erstellt. SP3 war maßgeblich für die Datenakquise und statistische Auswertung verantwortlich. In Abb. 17 sind die Ergebnisse vier unterschiedlicher Szenarien zu klimarelevanten Einflüssen von Zwischenfrüchten auf Basis von CO₂-Äquivalenten dargestellt. Alle Szenarien belegen einen positiven Effekt (d.h. geringere Werte) von Zwischenfrüchten auf Treibhausgasemissionen. Der Netto-Klimaeffekt liegt je nach Szenario zwischen 0,4 und 3,3 t ha⁻¹ a⁻¹. Hochrechnungen zeigen, wenn alle Maisflächen in Europa zuvor mit Zwischenfrüchten bewachsen wären, ergäbe sich ein Einsparungspotential von 49.80 Million Mg CO₂-Äquivalenten pro Jahr. Dies entspräche etwa 13% der gesamten Treibhausgasemissionen der Europäischen Landwirtschaft. Die Studie ist in der Fachzeitschrift PLOS One erschienen (Schön et al., 2024) und erhielt große mediale Aufmerksamkeit, z.B. in Forschung aktuell im Deutschlandfunk: <https://www.deutschlandfunk.de/klimaschutzweniger-treibhausgase-durch-zwischenfruechte-dlf-d510af33-100.html>.

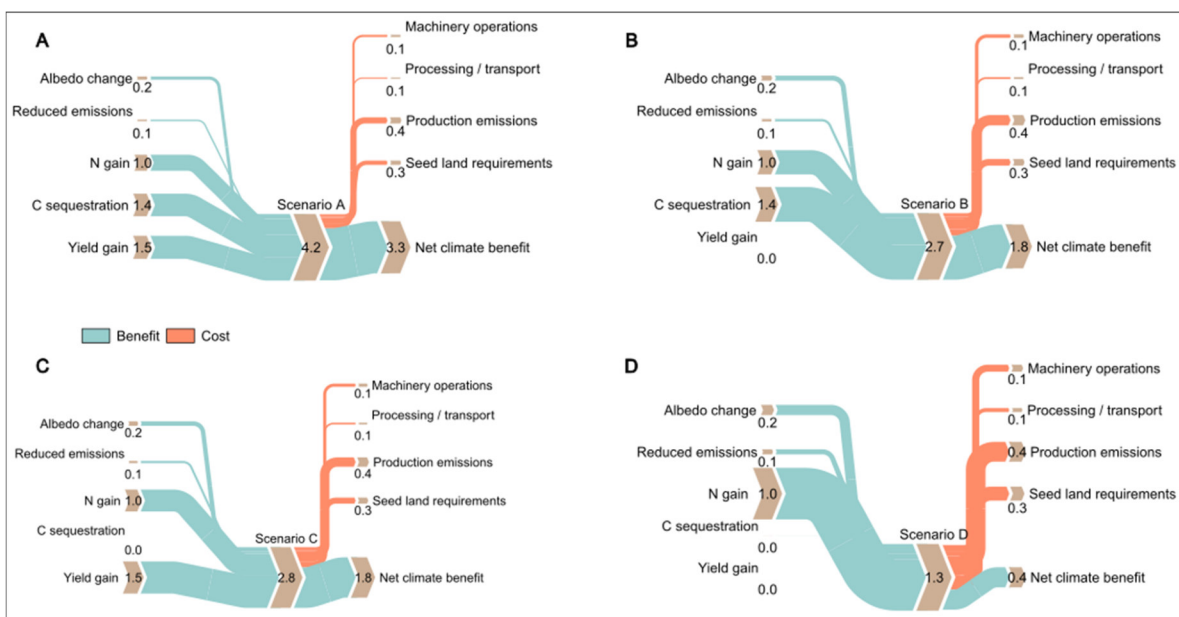


Abbildung 17 Vier Szenarien zur Klimabilanz von Zwischenfrüchten zeigen alle einen positiven Netto-Klimaeffekt. Zahlen entsprechen CO₂-Äquivalent in t pro ha⁻¹ a⁻¹.

2.7 Multifunktionalität

Eine wesentliche Synergie des Gesamtvorhabens ist die Zusammenführung der Ergebnisse der Projektpartner. Dazu mussten die Datensätze der einzelnen Projektpartner aus unterschiedlichen Versuchsjahren zunächst in ein einheitliches Datenformat überführt werden. Anschließend wurden multivariate Statistikwerkzeuge genutzt, um Datensätze zu Nährstoffen im Boden, mikrobieller Biomasse und Pflanzenparametern miteinander zu verschneiden. Um alle Funktionen zusammenfassend zu bewerten, wurde der so genannte Multifunktionalitätsindex verwendet. Dieser Index summiert nach Standardisierung aller Datenpunkte alle unterschiedlichen Messergebnisse und bietet eine übersichtliche, zusammenfassende Statistik. Die Daten umfassen Messwerte, die unterschiedliche Ökosystemfunktionen repräsentieren (Durchwurzelungstiefen, Nährstoffaufnahmeeffizienz, Mineralisationsverhalten, Treibhausgasemissionen, mikrobielle Biomasse, Ertragsparameter und funktionelle Gene). Nach einer Normalisierung und Standardisierung der Daten, wurde ein Multifunktionalitätsindex aus dem durchschnittlichen Z-Score der Daten berechnet. Der Vorteil gegenüber einer Einzelauswertung ist, dass einzelne kleine Effekte eines jeweiligen Parameters im Index multiplizieren. Damit treten positive Effekte des Zwischenfruchtanbaus deutlicher hervor. In Abb. 18 (links) sind die Parameter abgebildet, welche in den Index einfließen. Zwischenfruchtmischungen zeigen eine höhere Multifunktionalität im Vergleich zu Reinsaaten (Abb. 18, rechts). Hier bestätigen sich die Systemtheorien, worin Biodiversität zu Erhöhung von Ökosystem-Dienstleistungen führen (Altieri et al., 2015). Zwischenfruchtmischungen sind ein wichtiges Werkzeug um die Agrobiodiversität zu erhöhen und damit die Multifunktionalität und Resilienz der Anbausysteme.

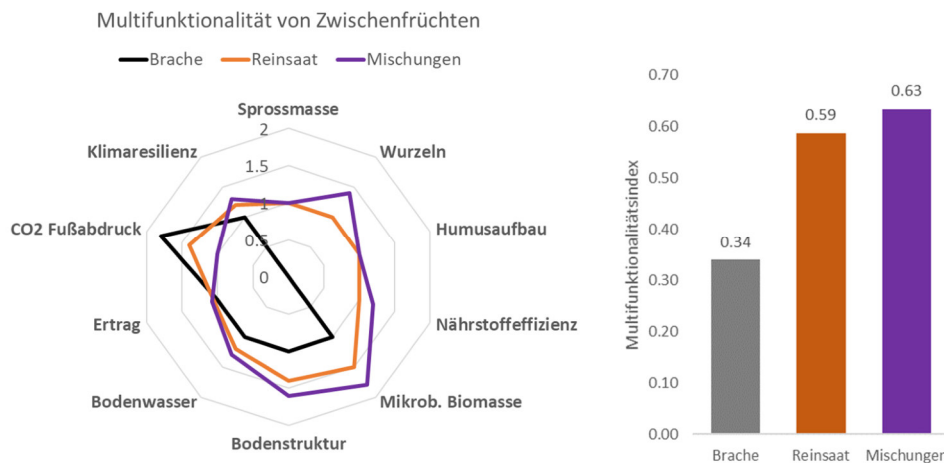


Abbildung 18 Parameter zur Berechnung der Multifunktionalität von Zwischenfrüchten (links) und Multifunktionalitätsindex (rechts).

2.8 Erfolge Veröffentlichung der Ergebnisse

In Zusammenarbeit aller Projektpartner wurden die wichtigsten Ergebnisse in einer umfangreichen Zusammenfassung für die Öffentlichkeit aufgearbeitet. Die Broschüre ist über



Abbildung 19 OR Code mit Link zur Broschüre.

einen DOI zitierfähig und wurde am 05.08.2024 veröffentlicht. Wie geplant, wurde die Broschüre im Open Access im ZENODO Repositorium veröffentlicht. Die BonaRes Datenbank selbst ist für diese Art der Veröffentlichung leider nicht geeignet. Der Zugang erfolgt entweder über den folgenden DOI oder den QR Code (Abb. 19) der zum Link führt: <https://doi.org/10.5281/zenodo.13219122>.

In 10 Kapiteln werden auf 74 Seiten die zentralen Ergebnisse für die praktische Anwendung beschrieben. Der LUH kam hier die Rolle der Koordination aller Arbeiten zu. In Zusammenarbeit mit dem BonaRes-Zentrum wurde ein professionelles Layout realisiert und eine grafisch ansprechende Broschüre erstellt. In leichter Sprache werden alle Arbeitsschwerpunkte quer durch die Projektlaufzeit beschrieben und in ihrer Kernaussage kondensiert. Diese reichen von Schwierigkeiten bei der Zwischenfrucht-Etablierung, die richtige Pflanzenwahl, ober- und unterirdische Biomasseentwicklung, Einflüsse auf physikalische und chemische Bodenparameter, Einflüsse auf Bodenorganismen, Schaderreger

und Pflanzen unterstützenden Mikroorganismen bis hin zu Nährstoffüberträgen und Erträge der Folgekultur. Dabei gehen spezielle Kapitel auf die Herausforderungen im Klimawandel ein, auf Feldhygiene und Krankheitsdruck, aber auch auf den CO₂-Fußabdruck ein.

Zusätzlich wurden im Laufe der Projektlaufzeit **14 Beiträge in Agrarzeitschriften** geschrieben und **5 Webinare** online gestellt.

2.8.1 Peer Review Veröffentlichungen in Wissenschaftlichen Fachzeitschriften

Im Verlauf des Projekts war WP3 an 11 Veröffentlichungen in Peer Review Zeitschriften beteiligt oder federführend:

Gentsch, N., Boy, J., Batalla, J. D. K., Heuermann, D., von Wirén, N., Schweneker, D., Feuerstein, U., Groß, J., Bauer, B., Reinhold-Hurek, B., Hurek, T., Céspedes, F. C., & Guggenberger, G. (2020). Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils*. <https://doi.org/10.1007/s00374-020-01475-8>

Gentsch, N., Heuermann, D., Boy, J., Schierding, S., Wirén, N. von, Schweneker, D., Feuerstein, U., Kümmerer, R., Bauer, B., & Guggenberger, G. (2022). Soil nitrogen and water management by winter-killed catch crops. *SOIL*, 8(1), 269–281. <https://doi.org/10.5194/soil-8-269-2022>

Gentsch, N., Riechers, F. L., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Heuermann, D., & Guggenberger, G. (2024). Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL*, 10(1), 139–150. <https://doi.org/10.5194/soil-10-139-2024>

Groß, J., Gentsch, N., Boy, J., Heuermann, D., Schweneker, D., Feuerstein, U., Brunner, J., von Wirén, N., Guggenberger, G., & Bauer, B. (2023). Influence of small-scale spatial variability of soil properties on yield formation of winter wheat. *Plant and Soil*, 493(1), 79–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06212-2>

Groß, J., Kümmerer, R., Heuermann, D., Gentsch, N., Schweneker, D., Feuerstein, U., Guggenberger, G., Von Wirén, N., & Bauer, B. (2024). Improving dual cover crop mixtures to increase shoot biomass production and weed suppression potential. *Frontiers in Agronomy*, 6. <https://doi.org/10.3389/fagro.2024.1416379>

Heuermann, D., Döll, S., Schweneker, D., Feuerstein, U., Gentsch, N., & von Wirén, N. (2023). Distinct metabolite classes in root exudates are indicative for field- or hydroponically-grown cover crops. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fpls.2023.1122285>

Heuermann, D., Gentsch, N., Boy, J., Schweneker, D., Feuerstein, U., Groß, J., Bauer, B., Guggenberger, G., & Wirén, N. von. (2019). Interspecific competition among catch crops

- modifies vertical root biomass distribution and nitrate scavenging in soils. *Scientific Reports*, 9(1), 1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48060-0>
- Heuermann, D., Gentsch, N., Guggenberger, G., Reinhold-Hurek, B., Schweneker, D., Feuerstein, U., Heuermann, M. C., Groß, J., Kümmerer, R., Bauer, B., & von Wirén, N. (2022). Catch crop mixtures have higher potential for nutrient carry-over than pure stands under changing environments. *European Journal of Agronomy*, 136, 126504. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126504>
- Schepens, J. A. B., Koopmans, C. J., Heupink, D. T., Timmermans, B. G. H., Gentsch, N., Martens, S., de Haan, J., Creamer, R. E., & Moinet, G. Y. K. (2025). From global trends to local realities: SOC accrual of improved management practices in northwestern Europe. *Geoderma Regional*, 42, e00983. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2025.e00983>
- Schön, J., Gentsch, N., & Breunig, P. (2024). Cover crops support the climate change mitigation potential of agroecosystems. *PLOS ONE*, 19(5), e0302139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302139>
- Techen, A.-K., Helming, K., Brüggemann, N., Veldkamp, E., Reinhold-Hurek, B., Lorenz, M., Bartke, S., Heinrich, U., Amelung, W., Augustin, K., Boy, J., Corre, M., Duttman, R., Gebbers, R., Gentsch, N., Grosch, R., Guggenberger, G., Kern, J., Kiese, R., ... Vogel, H.-J. (2020). Chapter Four—Soil research challenges in response to emerging agricultural soil management practices. In D. L. Sparks (Ed.), *Advances in Agronomy* (Vol. 161, pp. 179–240). Academic Press. <https://doi.org/10.1016/bs.agron.2020.01.002>

2.9 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Im Verwendungsnachweis für SP3 wurden die Positionen 0812 und 0817 für Personalmittel einer E13 sowie 50% E9 Stelle ausgegeben. Die E13 Stelle wurde mit Wissenschaftlichem Personal zur Koordination des Projekts besetzt, und die E9 Stelle mit technischen Personal für Laboranalytik. Die Position 0822 beinhaltet HiWi Mittel zur Unterstützung der Laboranalytik. Aufgrund eines Überhanges bei den Personalmitteln, wurde eine kostenneutrale Verlängerung um ein Jahr beantragt. Die Position 0831 (Gegenstände) wurde für die Beschaffung einer Digitalkamera für den Einsatz in Disseminationsaktivitäten verwendet. Die Position 0843 (Sonstige Ausgaben) beinhaltet hauptsächlich Verbrauchsmaterial für Laboranalytik, Materialien für Probenahme und Transport. Kosten für Dienstreisen zu den Versuchsflächen, Projekttreffen, Tagungen und Feldveranstaltungen sind unter Position 0846 aufgeführt.

2.10 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die Aufgabe des wissenschaftlichen Personals war die Planung und Koordination des zeitlichen Ablaufs von Experimenten und Feldarbeit sowie deren Synchronisation mit der Analytik. Darüber hinaus lag hier die Schnittstelle aller Daten von SP3 und der Projektpartnern. Für die Auswertung der multidimensionalen Datensätze war ein erfahrener PostDoc notwendig. Für die aufwendigen Feldexperimente war eine genaue Planung und eine präzise und reproduzierbare Laborführung erforderlich um die feinen Unterschiede zwischen den Prüfgliedern zu detektieren. Im Arbeitsbereich des wissenschaftlichen Personals lag auch die Veröffentlichung von Ergebnissen in wissenschaftlichen Fachzeitschriften sowie Disseminationsaktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse für landwirtschaftliche Anwender.

Der hohe Probendurchsatz und das breite Spektrum an unterschiedlicher Laboranalytik bedingen den Einsatz qualifizierten Laborpersonals, um eine zügige Aufarbeitung und Messung zu gewährleisten. Insgesamt wurden im Berichtszeitraum etwa 1500 Bodenproben der Nährstoffanalytik unterzogen. An jeder Probe wurden mehrere Analysen (u.a., pH-Werte, Leitfähigkeit, Ionenchromatographie, Spektralphotometrie) durchgeführt. Zusätzlich wurden 600 Proben Gehalte an organischem Kohlenstoff und Stickstoff, sowie deren Stabilisotopen gemessen. Zur Quantifizierung der CO₂, CH₄, und N₂O Emissionen wurden Gasmessungen im Feld durchgeführt. Für die komplexen Messungen im Spurenbereich wurde eine erfahrene Technikerin beschäftigt. Wissenschaftliche Hilfskräfte unterstützten bei den Routinearbeiten wie dem Trocknen, Mahlen und Einwiegen der Proben. Insbesondere die Elementar- und Isotopenanalysen sind sehr kostenintensiv und erfordern teure internationale Referenzstandards und Gase. Obwohl viele der Routineanalysen vergleichsweise preiswert durchzuführen sind, ergaben sich durch die hohe Probenzahl, Messwiederholungen und Mehrfachmessungen (unterschiedliche Analysen an mehreren Geräten) hohe Kosten.

2.11 Verwertbarkeit der Ergebnisse

Im Rahmen der nationalen Bioökonomiestrategie spielen biologische Ressourcen eine zentrale Rolle im Ersatz der fossilen Rohstoffe. Feldfrüchte als nachwachsender Rohstoff sind der

wichtigste Baustein für innovative und nachhaltige Industrieprodukte. Als Zielkonflikt darf der steigende Bedarf an nachwachsenden Rohstoffen jedoch nicht zu einer fortschreitenden Bodendegradation führen und so die Ernährungssicherung zusätzlich gefährden. Die Projektergebnisse zeigen, dass Zwischenfrüchte und insbesondere Zwischenfruchtmischungen zur Steigerung der Bodenqualität und damit langfristig höheren und stabileren Erträgen führen. Für den Humusaufbau und die Steigerung der biologischen Vielfalt sind Zwischenfrüchte ebenfalls unverzichtbar. Langfristig können Zwischenfrüchte ein Werkzeug zur Minderung von bis zu 13% der Treibhausgasemissionen aus dem Sektor Landwirtschaft bieten. Die Ergebnisse sind daher eine wichtige Berechnungsgrundlage für CO₂ Zertifikathandel oder PES (Payment for Environmental Services) Programme. Für Landwirtinnen und Landwirte stellt die Inwertsetzung einer CO₂ Fixierung durch Humusaufbau darüber hinaus einen willkommenen Weg dar, humusaufbauende Maßnahmen zu finanzieren. Für Saatgutproduzenten sind die Ergebnisse des Projekts wichtig, um Komponenten in Mischungen optimal aufeinander abzustimmen. Dadurch soll das Maximum an Synergieeffekten zwischen den Zwischenfruchtarten erreicht werden.

Die offenen Fragestellungen führten zu mehreren Folgeanträgen in unterschiedlichen Programmen:

- BLE, BAnz AT 31.12.2024 B3 – Projektantrag OPAL zu Frage von Wassereffizienz und Zwischenfrüchten
- EU, HORIZON-MISS-2025-05-SOIL-06– Projektantrag ECOSOIL zur Frage Zwischenfrüchte und mikrobiell Bodenfunktionen.

2.12 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordener Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Forschung zum biodiversen Zwischenfruchtanbau hat in den vergangenen Jahren stark Fahrt aufgenommen. In Deutschland aber auch im Europäischen Ausland entstand ein Netzwerk zur Zwischenfruchtforschung mit eigenen Workshops und Ergebnisaustausch. Wichtige arbeiten außerhalb des CATCHY Konsortiums im Berichtszeitraum waren: (Chahal &

Van Eerd, 2023; Chaplot & Smith, 2023; Constantin et al., 2024; Engedal et al., 2023; Helfrich et al., 2024; Peng et al., 2024; Sørensen et al., 2023).

4 Referenzen






- Abdalla, M., Hastings, A., Cheng, K., Yue, Q., Chadwick, D., Espenberg, M., Truu, J., Rees, R. M., & Smith, P. (2019). A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Global Change Biology*, *25*(8), 2530–2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- Altieri, M. A., Nicholls, C. I., Henao, A., & Lana, M. A. (2015). Agroecology and the design of climate change-resilient farming systems. *Agronomy for Sustainable Development*, *35*(3), 869–890. <https://doi.org/10.1007/s13593-015-0285-2>
- Basche, A. D., Miguez, F. E., Kaspar, T. C., & Castellano, M. J. (2014). Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation*, *69*(6), 471–482. <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.471>
- Bodner, G., Mentler, A., Klik, A., Kaul, H.-P., & Zechmeister-Boltenstern, S. (2017). Do cover crops enhance soil greenhouse gas losses during high emission moments under temperate Central Europe conditions? *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment*, *68*(3), 171–187. <https://doi.org/10.1515/boku-2017-0015>
- Chahal, I., & Van Eerd, L. L. (2023). Do Cover Crops Increase Subsequent Crop Yield in Temperate Climates? A Meta-Analysis. *Sustainability*, *15*(8), Article 8. <https://doi.org/10.3390/su15086517>
- Chaplot, V., & Smith, P. (2023). Cover crops do not increase soil organic carbon stocks as much as has been claimed: What is the way forward? *Global Change Biology*, *gcb.16917*. <https://doi.org/10.1111/gcb.16917>
- Constantin, J., Minette, S., Vericel, G., Jordan-Meille, L., & Justes, E. (2024). MERCI: A simple method and decision-support tool to estimate availability of nitrogen from a wide range of cover crops to the next cash crop. *Plant and Soil*, *494*(1), 333–351. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06283-1>
- Engedal, T., Karlsson, M., Andersen, M. S., Rasmussen, J., Thorup-Kristensen, K., Jensen, L. S., Magid, J., & Hansen, V. (2023). Legume-based cover crop mixtures can overcome trade-offs between C inputs, soil mineral N depletion and residual yield effects. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *349*, 108408. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2023.108408>
- Groß, J., Gentsch, N., Boy, J., Heuermann, D., Schwenecker, D., Feuerstein, U., Brunner, J., von Wirén, N., Guggenberger, G., & Bauer, B. (2023). Influence of small-scale spatial variability of soil properties on yield formation of winter wheat. *Plant and Soil*, *493*(1), 79–97. <https://doi.org/10.1007/s11104-023-06212-2>
- Helfrich, M., Dechow, R., Merl, S., Fuß, R., Rübiger, T., Kühling, I., Schlathölter, M., Kage, H., & Flessa, H. (2024). Winter cover crops decreased soil mineral N contents and increased soil organic C stocks and N₂O emission. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *367*, 108985. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2024.108985>

- Ho, J., Tumkaya, T., Aryal, S., Choi, H., & Claridge-Chang, A. (2019). Moving beyond P values: Data analysis with estimation graphics. *Nature Methods*, *16*(7), Article 7. <https://doi.org/10.1038/s41592-019-0470-3>
- Jungkunst, H. F., Freibauer, A., Neufeldt, H., & Bareth, G. (2006). Nitrous oxide emissions from agricultural land use in Germany—A synthesis of available annual field data. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *169*(3), 341–351. <https://doi.org/10.1002/jpln.200521954>
- Khan, M. K., & McLean, D. J. (2023). *Durga: An R package for effect size estimation and visualisation* (p. 2023.02.06.526960). bioRxiv. <https://doi.org/10.1101/2023.02.06.526960>
- Mathivanan, G. P., Eysholdt, M., Zinnbauer, M., Rösemann, C., & Fuß, R. (2021). New N₂O emission factors for crop residues and fertiliser inputs to agricultural soils in Germany. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *322*, 107640. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107640>
- Peng, Y., Wang, L., Jacinthe, P.-A., & Ren, W. (2024). Global synthesis of cover crop impacts on main crop yield. *Field Crops Research*, *310*, 109343. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109343>
- Poeplau, C., & Don, A. (2015). Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *200*, 33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- Schön, J., Gentsch, N., & Breunig, P. (2024). Cover crops support the climate change mitigation potential of agroecosystems. *PLOS ONE*, *19*(5), e0302139. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0302139>
- Sørensen, P., Pedersen, B. N., Thomsen, I. K., Eriksen, J., & Christensen, B. T. (2023). Plant availability and leaching of 15N-labelled mineral fertilizer residues retained in agricultural soil for 25 years: A lysimeter study. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, *186*(4), 441–450. <https://doi.org/10.1002/jpln.202200288>
- Tiemeyer, B., Freibauer, A., Borraz, E. A., Augustin, J., Bechtold, M., Beetz, S., Beyer, C., Ebli, M., Eickenscheidt, T., Fiedler, S., Förster, C., Gensior, A., Giebels, M., Glatzel, S., Heinichen, J., Hoffmann, M., Höper, H., Jurasinski, G., Laggner, A., ... Drösler, M. (2020). A new methodology for organic soils in national greenhouse gas inventories: Data synthesis, derivation and application. *Ecological Indicators*, *109*, 105838. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105838>

5 Projektübersicht

Laufzeit: April 2015 – März 2025

Projektpartner:

 <p>Universität Bremen</p>	Universität Bremen	Fachbereich Molekulare Pflanzen-Bakterien-Interaktionen
 <p>Leibniz Universität Hannover</p>	Leibniz Universität Hannover	Institut für Bodenkunde
 <p>IPK LEIBNIZ INSTITUTE</p>	Leibniz-Institut für Pflanzengenetik und Kulturpflanzenforschung	Perspektivgruppe nachhaltiges Nährstoffmanagement
 <p>WEIHENSTEPHAN · TRIESDORF University of Applied Sciences</p>	Hochschule Weihenstephan-Triesdorf	Fachbereich Pflanzenbau, Pflanzenschutz und Grünland / Fachbereich Marketing, Marktlehre
 <p>DSV</p>	Deutsche Saatveredelung AG	Forschung & Entwicklung: Saatguttechnologie & Anbausysteme

Standorte:

Asendorf: Koordinaten (52.76333112575907, 9.024652710705224)

Klima: MAT 9,3°C, MAP 751 mm

Boden: pseudovergleyte Parabraunerden aus einer flachen Lössschicht über glazifluvialen Sanden, Textur Lehmschluff (Mittelwerte: Ton 8 %, Sand 19 %, Schluff 73 %), mittlerer Humusgehalt 3,0 % (1,7 % Corg), pH-Werte um 6,5.

Triesdorf: Koordinaten (49.21045030165102, 10.642646920900232)

Klima: MAT 9,1°C, MAP 686 mm

Boden: pseudovergleyte Braunerde weiter Spannweite der Textur von sandig bis schluffigem Lehm (Mittelwerte: Ton 16 %, Sand 50 %, Schluff 45 %), mittlerer Humusgehalt 2,4 % (1,4 % Corg), pH-Werte im Mittel 7,4.



Abbildung 20 Standorte des CATCHY Projekts (links) und Luftbild der Versuchsfläche (rechts). Erkennbar sind die zeitversetzten Startzeitpunkte, die Blöcke (1-4) und die Fruchtfolgen mit (Leg+) und ohne Leguminosen in der Hauptfruchtfolge (Leg-).

Fruchtfolge:**Tabelle 1** CATCHY Fruchtfolge mit und ohne Ackerbohne.

Fruchtfolge Leg-	Fruchtfolge Leg+
Winterweizen	Winterweizen
Zwischenfrucht	Zwischenfrucht
Silomais	Silomais
Winterweizen	Winterweizen
Zwischenfrucht	Zwischenfrucht
Silomais	Ackerbohne

Tabelle 2 Versuchsvarianten der Zwischenfruchtbehandlungen im CATCHY Projekt.

Variante	Bezeichnung	Wissenschaftlicher Name	Samenanteil (%)	Aussaatstärke (kg ha ⁻¹)
1	Brache	-	-	-
2	Gelbsenf	<i>Sinapis alba L.</i>	100.0	18.0
3	Klee	<i>Trifolium alexandrinum L.</i>	100.0	25.0
4	Rauhafer	<i>Avena strigosa Schreb.</i>	100.0	100.0
5	Phacelia	<i>Phacelia tanacetifolia Benth.</i>	100.0	12.0
6	Gelbsenf	<i>Sinapis alba L.</i>	10.3	
	Phacelia	<i>Phacelia tanacetifolia Benth.</i>	45.5	
	Klee	<i>Trifolium alexandrinum L.</i>	36.1	
	Rauhafer	<i>Avena strigosa Schreb.</i>	8.2	
			100.0	25.0
7	Felderbse	<i>Pisum sativum</i>	1.0	
	Sorghum	<i>Sorghum bicolor</i>	2.6	
	Phacelia	<i>Phacelia tanacetifolia</i>	18.8	
	Öllein	<i>Limum usitatissimum</i>	6.5	
	Pannonische Wicke	<i>Vicia pannonica</i>	0.7	
	Rettich Deeptill	<i>Raphanus sativus</i>	1.1	
	Ramtillkraut	<i>Nyger (Guizotia abyssinica)</i>	7.1	
	Sonnenblume	<i>Helianthus annuus</i>	0.1	
	Leindotter	<i>Camelina sativa</i>	8.5	
	Perserklee	<i>Trifolium resupinatum</i>	15.1	
	Schwedenklee	<i>Trifolium hybridum</i>	29.5	
	Inkarnatklee	<i>Trifolium incarnatum</i>	9.0	
			100.0	35.0