

Gefördert durch:



aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Verbundprojekt

THG-ZwiFru

Minderung von Treibhausgasemissionen in der
Pflanzenproduktion durch standortangepasst op-
timierte Zwischenfruchtanbausysteme

ABSCHLUSSBERICHT

Projektlaufzeit 1.8.2018 – 31.12.2022



Autoren:

Insa Kühling (CAU)
Paul Mikuszies (CAU)
Henning Kage (CAU)
Marilena Reinhard-Kolempas (LKW NI)
Annette Hoffmann (LKW NI)
Mirjam Helfrich (TI)
René Dechow (TI)
Heinz Flessa (TI)
Heinz-Josef Koch (IfZ)
Dennis Grunwald (IfZ)
Lisa Essich (UHOH)
Reiner Ruser (UHOH)
Victoria Nasser (GAUG)
Klaus Dittert (GAUG)
Michaela Schlathölter (PHP)

Beteiligte Institutionen:

- Christian-Albrechts-Universität Kiel, Abteilung Acker- & Pflanzenbau (CAU) – Projektkoordination, FKZ 28-1-B2.007-16
- Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften (UHOH), FKZ 28-1-B2.008-16
- Universität Göttingen, Department Nutzpflanzenwissenschaften (GAUG), FKZ 28-1-B2.009-16
- P.H. Petersen Saatzucht Lundsgaard (PHP), FKZ 28-1-B2.010-16
- Thünen-Institut Braunschweig (TI), FKZ 28-1-B2.011-16
- Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen (IfZ), FKZ 28-1-B2.012-16
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen Fachbereich 3.8 Pflanzenbau, Saatgut (LWK NI), FKZ 28-1-B2.013-16

Zusammenarbeit mit anderen Stellen:

- KlimAgrar
- THG-Emoba
- THeKla

Inhalt

A	Hintergrund und Ziele	1
A.I	Einleitung	1
A.II	Projekttablauf	1
A.III	Stand des Wissens	2
	Zwischenfruchtanbau in Deutschland	2
	Direkte und indirekte N ₂ O-Emissionen in ZF-Anbausystemen	3
	Düngerwirkung von ZF in Folgefrüchten	4
	Langfristiges Kohlenstoffsequestrierungspotential durch ZF-Anbau.....	4
	Fernerkundung/Spektraldaten	5
	Gesamtbewertung des Klimaschutzpotentials.....	5
B	Ergebnisse	7
	Datengrundlage & Bewertungskonzept	7
	Versuchsdesign und Infrastruktur (AP1 Lead CAU).....	7
	THG-Bewertungsschema	8
	1. N-Konservierung im Herbst	9
	Anbausystemversuch alle Standorte (AP2 CAU & TI & PHP & IfZ & GAUG & UHOH).....	9
	Kalibrationsversuche KI und GO (AP2.1 Lead CAU & IfZ)	9
	Praxistaugliche Schätzverfahren zur N-Aufnahme von ZF (AP2.2, APb Lead LWK NI).....	11
	Zwischenfruchteinfluss auf Bodenstruktur und Wurzelwachstum (AP2.3 Lead IfZ)	12
	2. Mineralisation der ZF-Biomasse	13
	Mineralisation ZF-Biomasse im Feldversuch (AP 3.1 Lead CAU & IfZ).....	13
	Umsatz und Mineralisation ¹⁵ N markierten Örettichs im Feld (AP3.2 Lead UHOH).....	15
	Mineralisationsverhalten von ZF-Biomassearten und -qualitäten aus Inkubationsversuchen (AP3.3 Lead TI).....	16
	Mineralisation in Abhängigkeit des Umbruchtermins (APc Lead IfZ).....	17
	3. Nitratauswaschung	18
	Datengestützte Abschätzung der Effekte von ZF-Anbausystemen auf die Nitratauswaschung im Feldversuch (AP6.1 Lead TI)	18
	Modellierung der Nitratauswaschung im Zwischenfruchtanbau (AP6.2 Lead CAU)	19
	4. Direkte Lachgasemissionen	21
	N ₂ O-Messungen (AP5.1 Lead TI & GAUG & UHOH).....	21
	Modellierung direkter THG-Emissionen (AP5.2 Lead CAU)	22
	N ₂ O-Emissionen aus ¹⁵ N- und Inkubationsversuchen (AP 3.2 Lead UHOH & AP 3.3 Lead: TI).....	23
	Einfluss des Umbruchtermins auf N ₂ O-Emissionen (APc Lead CAU & IfZ & GAUG)	25
	5. Indirekte Lachgasemissionen	25
	Abschätzung indirekter N ₂ O-Verluste aus Nitratauswaschung (AP6.2 Lead CAU).....	25
	6. Düngbedarf und Ertragspotential in Folgekulturen	26
	Analyse der N-Einsparpotentiale in den Folgefrüchten (AP4.1 Lead CAU)	26
	Praxisempfehlungen zur Reduktion der N-Düngung in Folgefrüchten (AP 4.2 Lead LWK NI).....	27
	7. Langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden (APa Lead TI)	28

Modellierungsansatz	28
Simulationsergebnisse	29
8. Bewertung des ZF-Anbaus unter Klimaschutzaspekten	31
THG-Bilanzierung (AP7.1 Lead CAU & TI).....	31
Implementierungskosten/Ökonomische Bewertung (AP7.2 & APd Lead LWK NI).....	34
Standortdifferenzierte Synthese (alle Projektpartner)	35
Praxistransfer	36
Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit (AP1.1, APe Lead CAU & PHP)	36
Kongressbeiträge	37
C ANHANG	38
Berechnung des Kohlenstoffeintrags für Ernte-Wurzel Residuen von Hauptfrüchten und Zwischenfrüchten	38
Modellierung der Bodenkohlenstoffsequestrierung	40
Vergleich der modellierten Bodenkohlenstoffsequestrierung mit Literaturwerten	42
Referenzen	43
D Nutzen & Verwertung	46
D.I Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises	46
D.II Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit.....	46
D.III Voraussichtlicher Nutzen	46
Angestrebte Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und bereits erteilte Schutzrechte.....	46
Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende.....	46
Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende	46
Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit.....	47
D.IV Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen.....	47
D.V Veröffentlichungen.....	47
E Erfolgskontrollbericht	49
E.I Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen	49
E.II Wissenschaftlich-technisches Ergebnis	49
E.III Fortschreibung des Verwertungsplans	50
E.IV Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben	51
E.V Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer.....	52
E.VI Einhaltung der Kosten- und der Zeitplanung.....	52
F Kurzfassung (Berichtsblatt)	54

Abbildungen

Abbildung 1: Flächenanteil von Winterzwischenfrüchten (ZF) an der Ackerfläche. A. je Bundesland in der Saison 2019/20 (Datenquelle: Bodennutzungshaupterhebung, BMEL/Destatis 2021), B. je 100x100m plus Mittelwerte der Bundesländer in der Saison 2016/2017 (Datenquelle: Fendrich et al., 2023)	2
Abbildung 2: Lage der Versuchsstandorte mit standorttypischen Fruchtfolgesequenzen in Deutschland	7
Abbildung 3: Witterungsverläufe der Versuchsjahre im Vergleich zu den standortspezifischen langjährigen Mittelwerten (in Schwarz), Pfeile kennzeichnen Aussaat und Umbruch/Ernte Termine der ZF und 1. Folgefrucht.	8
Abbildung 4: Schema der Wirkpfade zur ganzheitlichen THG-Bewertung im Zwischenfruchtanbau	8
Abbildung 5: Zeitliche Dynamik der N-Aufnahme in oberirdischer ZF-Biomasse als Differenz zur Brache.....	9
Abbildung 6: Charakteristik (Blattflächenindex BFI, Trockenmasse TM und N-Aufnahme N) von Zwischenfruchtreinsaaten und Mischungen im Kalibrationsversuch am Standort Kiel (Holzhauser et al. 2022).....	10
Abbildung 7: Vorhersagegüte für die N-Aufnahme aus spektraler Reflexion über die simple ratio NIR/red (SR _{red}) (Holzhauser et al. 2022).....	10
Abbildung 8: Lineare Beziehungen zwischen der oberirdischen Frischmasse (kg/m ²) und der N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse von Zwischenfruchtbeständen im Herbst (kg/ha) in Abhängigkeit vom Zwischenfrucht-Typ.....	11
Abbildung 9: Wurzellängendichte von Zuckerrübe nach verschiedenen Zwischenfruchtvarianten am Standort Göttingen (Erntejahr 2019 Hevensen, 2020 Niedernjesa (Grunwald et al. <i>under review</i>)	13
Abbildung 10: C:N-Verhältnisse und maximale N-Aufnahmen vor Winter im Mittel der beiden Versuchsjahre	13
Abbildung 11: Zeitliche Dynamik der Boden-N _{min} -Gehalte (als Unterschied der Zwischenfrucht-Varianten zur Brache) während der ZF-Periode (ungedüngt) und der 1. Folgekultur (optimal gedüngt).....	14
Abbildung 12: A: Differenz der N-Aufnahme der 1. Folgekultur nach Zwischenfrucht gegenüber einer Brache (N-Effekt, Zwischenfrucht minus Brache) in zwei Abschnitten der Vegetationszeit an den Zuckerrüben-Standorten Göttingen und Ihinger Hof und Kiel als Maisstandort ohne N-Mineraldüngung (N0). B: N-Nettomineralisation unter Zuckerrübe (ZR) und Mais nach Ölrettich-Zwischenfrucht in zwei Abschnitten der Vegetationszeit im Mittel der Standorte Göttingen, Ihinger Hof und Kiel und den Jahren 2019 und 2020 mit optimaler N-Mineraldüngung (N2).....	15
Abbildung 13: Ölrettichbürtige N-Aufnahme in Zuckerrübe und Winterweizen aus ¹⁵ N-markiertem ZF-Material	16
Abbildung 14: (a) Abhängigkeit des Boden-N _{min} -Anstiegs bezogen auf den N-Eintrag durch Zwischenfrüchte nach 70 Tagen Inkubation vom C:N Verhältnis der zugegebenen Biomasse, (b) Netto-CO ₂ Emission in den ersten 24 Tagen in Abhängigkeit der zugegebenen Menge löslicher Zellkomponenten (sol-NDS) der Biomasse. (Mittelwerte±SD, n=4).	17
Abbildung 15: Potenzielle Minderung der N-Auswaschung (kg N ha ⁻¹) für die nicht-leguminösen Zwischenfrüchte der sandigen Standorte (Folgefrucht Mais) (links) und der lehmigen Standorte (Folgefrucht Zuckerrübe) (rechts). Gezeigt ist je einmal der berechnete Wert für die einzelnen Zwischenfrüchte (Ölrettich, Rauhafer, Winterroggen; n=16) sowie über alle Zwischenfrüchte zusammen (Gesamt; n = 48).....	19
Abbildung 16: Tiefenverlagerung der Nitratfront (Farbskala Nitratkonzentration) und korrespondierende Boden-N _{min} -Gehalte (Linien) in den Horizonten 0-30, 0-60 und 0-90 cm Tiefe im Unterschied zwischen Brache und mit Zwischenfrucht.	20
Abbildung 17: Violin-Plots der 30-jährigen Simulation der Nitratverlagerung unterhalb von 120 cm exemplarisch für die beiden Standorte Kiel und Ihinger Hof. Symbole kennzeichnen die Situation der zwei Versuchsjahre	20
Abbildung 18: Exemplarischer Ausschnitt im Feld gemessener Lachgasflüsse Anfang 2019 am sandigen Standort Kiel (KI, links) und am lehmigen Standort Ihinger Hof (IH, rechts). Unterschiedlich hohe Emissionen nach Frost-Tau-Ereignis (Ölrettich, Rauhafer Februar) und in Folge intensiverer Bodenbearbeitung (Roggen April/Mai). Jeweils Mittelwerte aus 4 Wiederholungen ±Standardfehler)	21

Abbildung 19: Kumulative direkte Lachgasemissionen im Mittel über beide Versuchsjahre getrennt nach Anbauperiode ZF (heller) und 1. Folgefrucht (dunkler) sowie in Summe über beide Phasen (Zahlen). Ohne Ölrettich und Winterroggen in Göttingen 2019.	22
Abbildung 20: Gegenüberstellung modellierter (HUME) und abgeschätzter (GNOC, IPCC) Werte zu tatsächlich gemessenen direkten Lachgasemissionen in Mais am Standort Hohenschulen (THG-Emoba: Rabah-Nasser & Neukam 2022).....	22
Abbildung 21: Kumulative Lachgasverluste während verschiedener Messzeiträume sowie über den gesamten Versuchszeitraum bis zur ersten Düngung des Winterweizens (Frühjahr). Anteile aus ¹⁵ N-markiertem Ölrettich sind grau hinterlegt.....	23
Abbildung 22: N ₂ O-Emissionen (durchgezogenen Linien, hellere Füllung) und anhand der ¹⁵ N-Anreicherung errechnete zwischenfruchtbürtige N ₂ O-Emissionen (gestrichelte Linien, dunklere Füllung) zu verschiedenen Probenahmeterminen (Tag 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 36, 48 und 60) der (a, c) frisch und (b, d) getrocknet eingearbeiteten Spross- und Wurzelbiomasse der Zwischenfrüchte Grünroggen (blau) und Ölrettich (orange, n=4).	24
Abbildung 23: Kumulative direkte Lachgasemissionen nach unterschiedlichen ZF-Umbruchterminen.....	25
Abbildung 24: Exemplarische Darstellung zur Herleitung der ökonomisch optimalen N-Aufwandmenge in Abhängigkeit der N-Responsefunktion (quadratisch-Plateau), Stickstoff- und Produktpreisen sowie Frühjahrs-N _{min} -Gehalten in 0-90 cm am Beispiel Silomais in Kl.	26
Abbildung 25: Effekte der ZF auf die optimale N-Düngung und den Ertrag. Grün schattierte Bereiche kennzeichnen eine ökonomisch vorteilhafte und rot eine ökonomisch nachteilige Kombination im Verhältnis zur Brache.	27
Abbildung 26: Lineare Regression des optimalen N-Angebots (Frühjahrs-N _{min} + ökonomisch optimale N-Düngermenge) über die N-Aufnahme der Zwischenfrüchte (ZF) vor Winter.....	28
Abbildung 27: Boxplots modellierter mittlerer Sequestrierungsraten [t CO ₂ ha ⁻¹ a ⁻¹] für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren	30
Abbildung 28: Datenherkunft (Formen) und tendenzielle Richtung (Farben) der Be- bzw. Entlastung der gesamten Treibhausgas (THG)-Bilanz	32
Abbildung 29: Jährliche Netto-THG-Bilanz Zwischenfrucht (ZF) vs. Brache. Datengrundlage: artspezifische direkte N ₂ O-Emissionen für ZF+1. Folgefrucht, artübergreifende indirekte N ₂ O-Emissionen ZF, artspezifische N-Düngereinsparung 1.+2. Folgefrucht, artübergreifende Bodenkohlenstoffspeicherung (SOC) bei ZF-Anbau alle 4 Jahre über Zeitraum von 50 Jahren.	33
Abbildung 30: Kostenanteil (in %) des Saatguts und der Aussaat (grau hinterlegte Balkenabschnitte) sowie der Beseitigung der Zwischenfrucht/Beikrautflora (einfarbig hinterlegte Balkenabschnitte) an den gesamten Direkt- und Arbeiterledigungskosten (in €/ha) unter der Bedingung aktuell hoher Faktor- und Produktpreise. Alle Werte basieren auf Preisen ohne Mehrwertsteuer.....	34
Abbildung 31: Monatliche Zugriffsstatistik seit launchen der Projekt Homepage im Mai 2021.....	36

Tabellen

Tabelle 1: Bodeneigenschaften an den Standorten der Anbausystemversuche, Texturen nach KA5, C_{org} in %	7
Tabelle 2: Abgeschätzte indirekte N_2O -Emissionen aus Nitratverlagerung der simulierten Standorte im Unterschied zur Brache. Keine Ausweisung am Standort Uelzen (UE) möglich, da keine echte Brache vorhanden war.	25
Tabelle 3: Gegenüberstellung der Anrechnung von ZF bei der Düngebedarfsermittlung nach DüV mit Ergebnissen des Projektes.	27
Tabelle 4: Ausgestaltung der Fruchtfolgen (FF) in den beiden Szenarios zur langfristigen Bodenkohlenstoffspeicherung durch Zwischenfrüchte (ZF)	29
Tabelle 5: Verwendete Faktoren und Quellen zur Umrechnung der THG-Emissionen in CO_2 -Äquivalente (CO_{2eq}), Nummerierung analog zu Bewertungsschema in Abbildung 4.	31
Tabelle 6: N- und ZF-kostenfreie Leistung (N+ZFKFL) bei aktuell hohem Preisniveau (Stand Herbst 2022) für die Sommerung Zuckerrübe bzw. Mais und Winterung Winterweizen nach den unterschiedlichen Zwischenfrüchten/Brache im Mittel der Standorte und Jahre. Unterschiedliche Kleinbuchstaben signalisieren signifikante Unterschiede zwischen den ZF-Varianten.	34
Tabelle 7: Durchgeführte Projekttreffen, Feldtage und Aktivitäten im KlimAgrar-Verbundvorhaben	36
Tabelle 8: Präsentationen in Form von Vorträgen (V) und Postern (P) auf wissenschaftlichen Konferenzen	37

A HINTERGRUND UND ZIELE

A.I Einleitung

Mit dem Anbau von Zwischenfrüchten (ZF) können vielfältige positive Wirkungen in Ackerbausystemen erzielt werden: Verringerung der Nitratauswaschung, Erosionsschutz oder Erhöhung der Biodiversität. Weniger gut quantifiziert sind die Effekte auf die Treibhausgas (THG)-Emissionen in Form von direkten und indirekten Lachgas (N_2O)-Emissionen sowie auf mögliche Stickstoff (N)-Düngereffekte der Folgefrucht und den Bodenkohlenstoffgehalt. Für eine umfassende Bewertung der Klimawirkung von Zwischenfruchtanbausystemen müssen die standortspezifischen Emissionen, das Minderungspotential in Form von vermiedenen indirekten Emissionen aus Nitratverlagerung sowie durch potenzielle Düngereinsparung der Folgekulturen und das langfristige Kohlenstoffsequestrierungspotenzial berücksichtigt werden. Insbesondere für die N_2O -Verluste werden häufig vereinfachte Abschätzungen mit linearen Faktoren (z.B. IPCC, 2019) für komplexe Zusammenhänge herangezogen.

Im Rahmen des Verbundvorhabens „Minderung von Treibhausgasemissionen in der Pflanzenproduktion durch standortangepasst optimierte Zwischenfruchtanbausysteme“ (THG-ZwiFru) wurden Feldversuche und Simulationsstudien durchgeführt, um folgende Fragestellungen für 4 repräsentative Ackerbaustandorte in Deutschland zu beantworten:

- Wie unterscheiden sich die direkten Lachgasemissionen während der ZF-Anbauphase und der 1. Folgefrucht nach Menge und Qualität der Residuen?
- Können direkte Lachgasemissionen durch geringere indirekte Lachgasemissionen aufgrund verminderter Nitratverlagerung kompensiert werden?
- Wie sieht das optimale N-Angebot nach ZF in der 1. und 2. Folgefrucht aus, um maximale Erträge zu erzielen? Ergeben sich hieraus Möglichkeiten der Düngereinsparung oder positive Ertragseffekte?
- Welche Schätzansätze erlauben eine praxistaugliche Bewertung der ZF-Düngewirkung?
- Welche Bedeutung haben Winterzwischenfrüchte für den langfristigen Humusaufbau in typischen Fruchtfolgen mit Zuckerrübe und Mais?

A.II Projekttablauf

Im Zentrum der experimentellen Arbeiten standen Feldversuche zum ZF-Anbau. An vier Standorten (Kiel, Uelzen, Göttingen, Hohenheim) wurden je Standort in zwei aufeinanderfolgenden Etablierungsjahren jeweils ZF-Anbau-Systemversuche angelegt. Insgesamt wurden somit acht Umwelten (Jahr-Standort-Kombinationen) im Systemversuch abgedeckt, so dass detaillierte Ergebnisse zum Klimaschutzpotential des ZF-Anbaus vorliegen. Nach Vorfrüchten mit hohem N-Verlustpotential (Winterraps, Erbse) wurden ZF aus unterschiedlichen

funktionellen Gruppen (Kruzifere, Gräser, Leguminosen, winterhart) als ungedüngte Reinbestände etabliert. Als 1. Folgefrucht (Sommerung) wurden standorttypisch Mais (sandige Standorte) bzw. Zuckerrübe (lehmgige Standorte) und anschließend einheitlich an allen Standorten Winterweizen als 2. Folgefrucht jeweils als N-Steigerungsversuche angelegt. Somit konnte der Beitrag der ZF zur N-Versorgung der Folgefrüchte differenziert abgeschätzt werden. Lachgasverluste wurden aus im Feld gemessenen direkten Emissionen (geschlossene Hauben) sowie durch Modellierung abgeschätzte indirekte Emissionen aus der Nitratverlagerung quantifiziert. Aus Laborinkubationsversuchen und kleinskaligen Feld- und Laboruntersuchungen mit ^{15}N -markiertem Pflanzenmaterial konnten ergänzende Informationen zur zeitlichen Dynamik der Umsetzungsprozesse von eingearbeiteten/abgefrorenen ZF gewonnen werden. In Kombination mit der Abschätzung der langfristigen Kohlenstoffanreicherung im Boden durch Integration von ZF in Fruchtfolgen konnte so eine systemische Bewertung der Treibhausgasbilanz aus direkten und indirekten Lachgasemissionen, potenzieller Vermeidung von vorgelagerten Herstellungsemissionen der mineralischen N-Düngung und CO_2 -Sequestrierung im Boden standort- und ZF-artspezifisch abgeleitet werden.

Für die praktische Beratung von Landwirten wurde darüber hinaus eine einfache Schätzmethode aus der ZF-Frischmasse vor Winter entwickelt, um die N-Aufnahme der Zwischenfruchtbestände zu quantifizieren sowie die Wirtschaftlichkeit des ZF-Anbaus ermittelt.

A.III Stand des Wissens

Zwischenfruchtanbau in Deutschland

In Deutschland wurden im Jahr 2020 über 3 Mio. ha. Mais und Zuckerrüben angebaut, dies entspricht im Mittel 23 % der Ackerfläche (Destatis 2023). Zusammen mit weiteren Sommerkulturen (Kartoffeln, Körnerleguminosen, Sommergetreide) ergibt sich ein potenzieller Flächenanteil von 29 % (mit Schwankungen unter den Bundesländern zwischen 17 und 49 %),

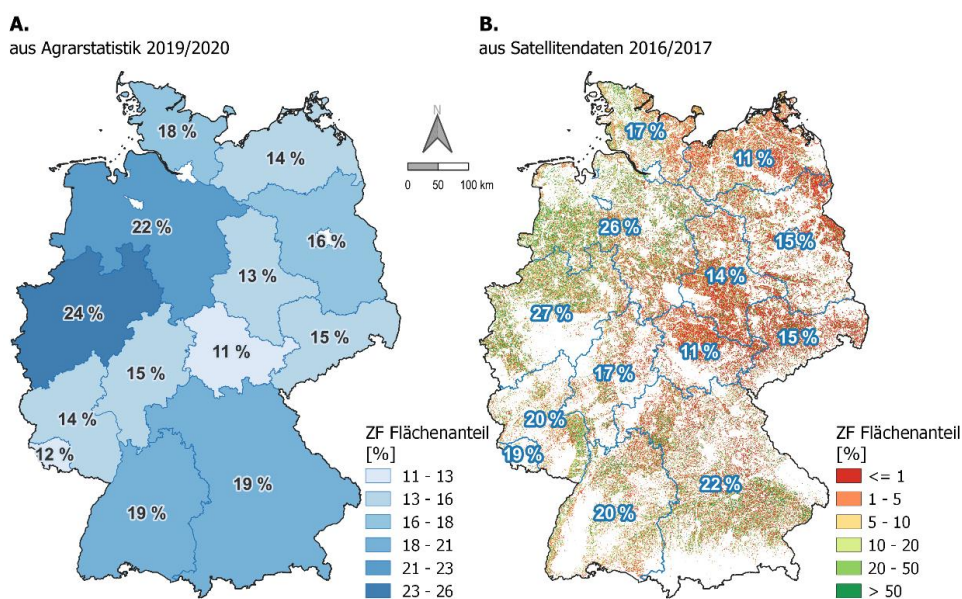


Abbildung 1: Flächenanteil von Winterzwischenfrüchten (ZF) an der Ackerfläche. A. je Bundesland in der Saison 2019/20 (Datenquelle: Bodennutzungshaupterhebung, BMEL/Destatis 2021), B. je 100x100m plus Mittelwerte der Bundesländer in der Saison 2016/2017 (Datenquelle: Fendrich et al., 2023)

der für den ZF-Anbau in Frage kommt. Das tatsächliche Ausmaß von kultivierten Winterzwischenfrüchten fällt mit 18 % (Agrarstatistik) bzw. 19.2 % (Sentinel-2 Satellitendaten) im bundesdeutschen Schnitt deutlich geringer aus (Abbildung 1). Primäre Motivation für die Kultivierung von Winterzwischenfrüchten ist die Verringerung der Nitrat auswaschung auf verlagerungsgefährdeten Standorten mit sandigen Böden und positiven klimatischen Wasserbilanzen im Winterhalbjahr. Auf leichteren Standorten spielt auch die bodenverbessernde Wirkung der ZF eine Rolle. Durch den ZF-Anbau ändert sich nicht nur die Nitratverfügbarkeit im Boden, sondern unter Umständen auch die Sickerwasserspende. Auf Standorten mit weniger günstiger Wasserversorgung ist ggf. die zusätzliche Transpiration während der ZF-Anbauphase bei der Anbauentscheidung zu berücksichtigen, was möglicherweise den geringeren Flächenanteil in Nordostdeutschland (Abbildung 1) erklärt.

Direkte und indirekte N₂O-Emissionen in ZF-Anbausystemen

Zwischenfrüchte können – sofern sie rechtzeitig etabliert werden – im Herbst erhebliche Mengen Stickstoff aufnehmen und damit auf verlagerungsgefährdeten Standorten Nitrat auswaschungsverluste reduzieren (Thapa et al. 2018; Abdalla et al. 2019; Nouri et al. 2022), insbesondere nach diesbezüglich kritischen Früchten wie Winterraps oder Körnerleguminosen (Henke et al. 2008) sowie in Regionen mit hoher Viehbesatzdichte. Die verringerte Nitratverfügbarkeit im Bodenprofil senkt aber nicht nur die N-Auswaschungsgefahr in der anschließenden Sickerwasserperiode über Winter, sondern liefert einen wichtigen Beitrag zum Klimaschutz durch geringere indirekte Lachgasverluste (IPCC 2019). Bei den direkten Lachgasverlusten sieht die Literaturlage zum Effekt von ZF im Vergleich zu Schwarzbrache über Winter weniger eindeutig aus: eine Meta-Analyse von Basche et al. (2014) fasst 40 % der 106 analysierten Einzelstudien mit verringerten N₂O-Emissionen und 60 % mit erhöhten zusammen. Muhammad et al. (2019) fanden erhöhte Emissionen insbesondere bei Leguminosen sowie nach Einarbeitung der ZF-Residuen, wohingegen nach Han et al. (2017) geringere N₂O-Verluste während der ZF-Phase und höhere während der folgenden Hauptfrucht zu insgesamt höheren direkten Lachgasverlusten führten. Allen Übersichtsarbeiten gemeinsam sind allerdings Erkenntnisse prinzipieller Zusammenhänge, dass die Wahl des Betrachtungszeitraumes (nur ZF-Phase, ZF+Hauptfrucht, ganzes Jahr) eine entscheidende Rolle spielt, sowie der grundlegende Einfluss von Standorteigenschaften (Lehm > Sand, feucht > trocken), artspezifischen Parameter (C:N-Verhältnis eng > weit, abfrierend > winterhart) und Einarbeitungsmethode (tief durchmischt > oberflächlich). Die potenziell erhöhten Emissionen stehen im Zusammenhang mit der Zufuhr mikrobiell leicht verfügbarer organischer Substanz, einer erhöhten mikrobiellen Aktivität und O₂-Zehrung, die lokal zu anoxischen Bedingungen führen kann, sowie der Netto-Freisetzung von mineralischem Stickstoff.

Düngerwirkung von ZF in Folgefrüchten

In Abhängigkeit der Menge und Qualität der ZF-Residuen ist eine unterschiedliche Mineralisationsdynamik nach dem Abfrieren bzw. Einarbeiten zu erwarten (Ladan und Jacinthe 2017). Zeitpunkt und Umfang der N-Freisetzung in der Folgefrucht werden dabei sowohl von der Qualität der ZF-Biomasse als auch vom Umbruchzeitpunkt beeinflusst (Thorup-Kristensen 1994; Thorup-Kristensen und Dresbøll 2010). Der C:N-Bereich von 20-30 kennzeichnet dabei den Übergangsbereich zwischen rascher Mineralisation und dominierender Immobilisation (Dabney et al. 2010; Ladan und Jacinthe 2017; Thapa et al. 2018). Obwohl demnach die meisten ZF-Residuen von ihren C:N-Verhältnissen als gut mineralisierbar zu charakterisieren sind, zeigen diverse Studien zur Düngewirkung von ZF keine oder sogar negative Ertragseffekte in der 1. Folgekultur (Crandall et al. 2005; Marcillo und Miguez 2017; Snapp und Surapur 2018). Dies deutet auf zunächst überwiegende Immobilisationseffekte hin, die insbesondere auf weniger auswaschungsgefährdeten Standorten vorliegen können (Hauer et al. 2016). Partiiell kann das auch zur Folgefrucht gegebenen mineralischen N-Dünger betreffen, der als leicht verfügbare N-Quelle von noch nicht umgesetzter Zwischenfruchtbiomasse mit weitem C:N-Verhältnis temporär festgelegt wird. Hierdurch können sich bei knapper N-Versorgung negative Ertragswirkungen ergeben. Es liegen Hinweise vor, dass in der ZF-Biomasse gespeicherter N erst spät in der 1. Folgefrucht oder sogar erst in der 2. Folgefrucht verfügbar wird (Cicek et al. 2015; Gabriel et al. 2016; White et al. 2016). Bei der Prognose der N-Wirkung von ZF auf die Folgefrüchte ist demnach ein komplexes Wirkungsgefüge von Boden, Witterung und Wachstumsbedingungen der ZF sowie der Folgefrüchte zu analysieren.

Langfristiges Kohlenstoffsequestrierungspotential durch ZF-Anbau

Das grundsätzliche Potential zur Anreicherung von Bodenkohlenstoff (SOC) durch regelmäßigen Zwischenfruchtanbau im Oberboden ist umfangreich in der Literatur beschrieben. Übersichtsarbeiten beschreiben einen Anreicherungshorizont von 155 Jahren bis zum Erreichen eines neuen Fließgleichgewichts. Bei jährlichem Zwischenfruchtanbau ergab sich innerhalb von 54 Jahren eine mittlere jährliche SOC-Änderung von 320 kg C ha⁻¹ in den oberen 22 cm (Poeplau und Don 2015). Eine jüngere Meta-Studie fasst globale Versuchsergebnisse zusammen und weist in Abhängigkeit der Bodentextur einen mittleren Anstieg des SOC-Vorrats von 15.5% für ZF im Vergleich zur Brache in den oberen 30 cm aus (Jian et al. 2020). Um das Potential von ZF tatsächlich auch klimawirksam umzusetzen, ist in der gesamten Fruchtfolge auf humuskonservierendes Management zu achten.

In einer räumlich diskreten Abschätzung des C-Sequestrierungspotentials durch ZF für Deutschland kommen Seitz et al. (2022) zu erheblich geringeren jährlichen SOC-Änderungsraten von 30 kg C ha⁻¹ über einen Zeitraum von 50 Jahren. Unter Berücksichtigung der tatsächlichen Fruchtfolgen und der darin vorhandenen Anbaupausen mit Brache-

phasen über Winter wäre allerdings verhältnismäßig einfach eine Verdoppelung und bei Nutzung auch von kürzeren Brachephasen sogar eine Verdreifachung der ZF-Anbaufläche möglich (Seitz et al. 2022). Würden man diese Flächen, auf denen wegen ungünstigerer Temperatur- und Niederschlagsverhältnisse bislang noch keine ZF kultiviert wird, hinzunehmen, so könnten die jährlichen SOC-Änderungsraten auf $90 \text{ kg C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ im Vergleich zur Brache erhöht werden.

Fernerkundung/Spektraldaten

Die Abschätzung relevanter Pflanzenparameter aus spektraler Reflektion stellt eine inzwischen etablierte Methode dar (Weiss et al. 2020). Für die Vegetationszeit der Hauptkulturen ist eine Vielzahl von Indizes und kameraspezifischen Kalibrationen zur Nutzung von Drohnen- und Satellitendaten beschrieben Henrich et al. (2012). Die relevante Wachstumsperiode von Winterzwischenfrüchten im Herbst und der interessante Zeitpunkt zur Quantifikation der Biomasse und N-Aufnahme im Oktober/November stellt auf Grund der insgesamt niedrigen Einstrahlung und flachen Einstrahlungswinkel sowie unbeständigen Witterungsverhältnisse eine besondere Herausforderung für drohnengestützte Datenerhebungen dar. Es gibt nur wenige Publikationen, die sich fernerkundlich mit den Bestandesparametern von Winterzwischenfrüchten beschäftigen (Hively et al. 2015, 2020; Goffart et al. 2021). Die Nutzung von drohnenbasiert erhobenen Multispektraldaten wurde zuvor noch nicht beschrieben.

Gesamtbewertung des Klimaschutzpotentials

Für eine sinnvolle Evaluation der Klimawirkung von ZF muss die gesamte Fruchtfolge des Anbausystems, mindestens aber die 1. und 2. Folgekultur nach der ZF-Phase einbezogen werden. Neben den beschriebenen positiven oder negativen THG-Pfaden, die flächen- oder ertragsbezogen bilanziert werden können, gibt es weitere Einflussfaktoren und Unsicherheiten. Je nach ZF-Art ist unter Umständen eine intensivere Bodenbearbeitung (Pflugeinsatz bei winterharten Gräsern) nötig, die in Interaktion mit der Mineralisationsdynamik oder Düngereignissen sowohl zu erhöhten Lachgasemissionen als auch zu veränderter N-Nachlieferung führen kann. Kaye&Quemada (2017) schätzen in einem Reviewartikel, dass durch ZF-Anbau eine insgesamt höhere THG-Einsparung als durch reduzierte Bodenbearbeitung erzielt werden kann.

Als weiterer Effekt sind ggf. vorgelagerte Emissionen zur Erzeugung von Saatgut und sonstigen Inputs (Grunddünger, PSM) sowie der Dieserverbrauch in allen Anbauschritten miteinzubeziehen. Diese Emissionen unterscheiden sich nur geringfügig zwischen Brache und ZF, spielen in der Gesamtbewertung also eine untergeordnete Rolle.

Der Einfluss von ZF auf die Albedo wird in einigen Studien als ernstzunehmendes Klimaschutzpotential beschrieben (Carrer et al. 2018; Guardia et al. 2019). So geht man davon aus, dass ZF-Bestände heller sind als unbedeckter Boden und dadurch einen erheblichen Einfluss auf den Strahlungs- und Energiehaushalt der Erde haben können. Lugato et al.

(2020) beschreiben sogar ein Szenario, in dem dieser Effekt durch den Anbau besonders Chlorophyll-armer ZF maximiert wird.

Für eine Reduzierung der Klimawirkung von ZF-Anbausystemen sind standortspezifische Detailkenntnisse erforderlich, damit sich die emissionsärmste Kombination von ZF-Art und geeignetem Management identifizieren lässt. Diese standortdifferenzierte Optimierung des ZF-Anbaus im Sinne der Steigerung der Stickstoffeffizienz in Fruchtfolgen und der Treibhausgasminderung ist ein wichtiger Schritt zu mehr Klimaschutz im Pflanzenbau (Flessa et al. 2014).

B ERGEBNISSE

Datengrundlage & Bewertungskonzept

Versuchsdesign und Infrastruktur (AP1 | Lead CAU)

Nach einheitlichem Schema wurden an allen vier Versuchsstandorten (Abbildung 2) wie geplant in den Jahren 2018 und 2019 die jeweils 2,5-jährigen Anbausystemversuche etabliert und alle erhobenen Daten nach standardisiertem Muster in der Projektcloud archiviert (AP1.2).

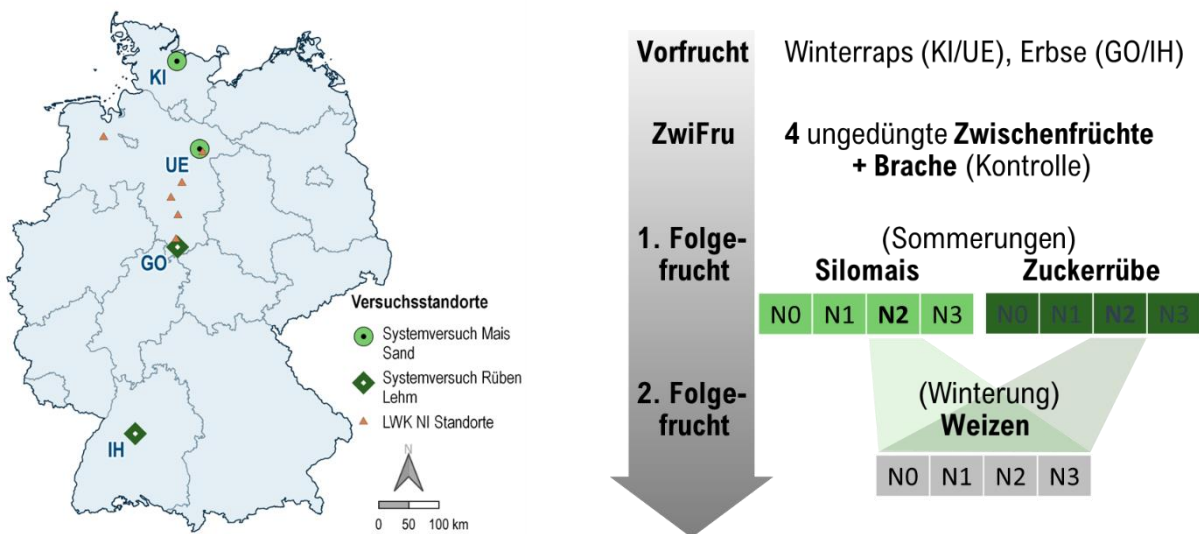


Abbildung 2: Lage der Versuchsstandorte mit standorttypischen Fruchtfolgesequenzen in Deutschland

Die Versuchsstandorte sind anhand der Boden- und Klimaeigenschaften (Tabelle 1, Abbildung 3) charakterisiert. Im Vergleich zum langjährigen Mittel waren die zum Etablierungsjahr 2018 gehörenden Fruchtfolgesequenzen warm und trockener im Gegensatz zu warmen und feuchteren Bedingungen der im Jahr 2019 etablierten Fruchtfolgesequenzen.

Tabelle 1: Bodeneigenschaften an den Standorten der Anbausystemversuche, Texturen nach KA5, C_{org} in %

Tiefe [cm]	Standort	KI		UE		GO		IH	
	Etablierungsjahr	2018	2019	2018	2019	2018	2019	2018	2019
0 - 30	Textur	Sl4	Sl3	Su3	Su3	Ut3	Ut3	Tu4	Tu4
	C _{org}	1.87	1.62	0.99	1.48	1.20	1.38	1.53	1.18
30 - 60	Textur	Sl4	Sl4	Sl2	Su2			Tu4	
	C _{org}	1.53	1.22	0.09	0.25			0.46	
60 - 90	Textur	Sl4	Sl4	Sl2	Su2			Tu3	
	C _{org}	1.27	1.12	0.05	0.07			0.55	

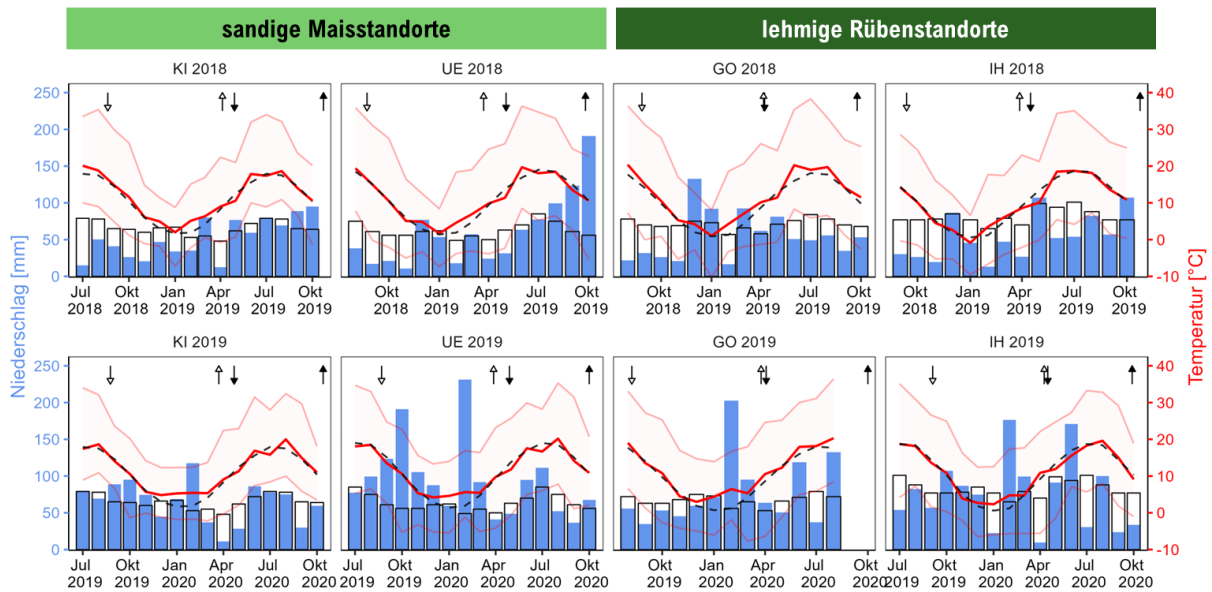


Abbildung 3: Witterungsverläufe der Versuchsjahre im Vergleich zu den standortspezifischen langjährigen Mittelwerten (in Schwarz), Pfeile kennzeichnen Aussaat und Umbruch/Ernte Termine der ZF und 1. Folgefrucht.

THG-Bewertungsschema

Die erzielten Ergebnisse als Beitrag zur Bewertung pflanzenbaulicher Maßnahmen zum Klimaschutz am Beispiel des Zwischenfruchtanbaus orientieren sich am folgenden Schema (Abbildung 4) und stellen zunächst die empirischen Erkenntnisse der einzelnen Schritte (1.-6.) dar, um dann in Kombination mit Modellabschätzungen (5., 7.) zu einer Gesamtbewer-

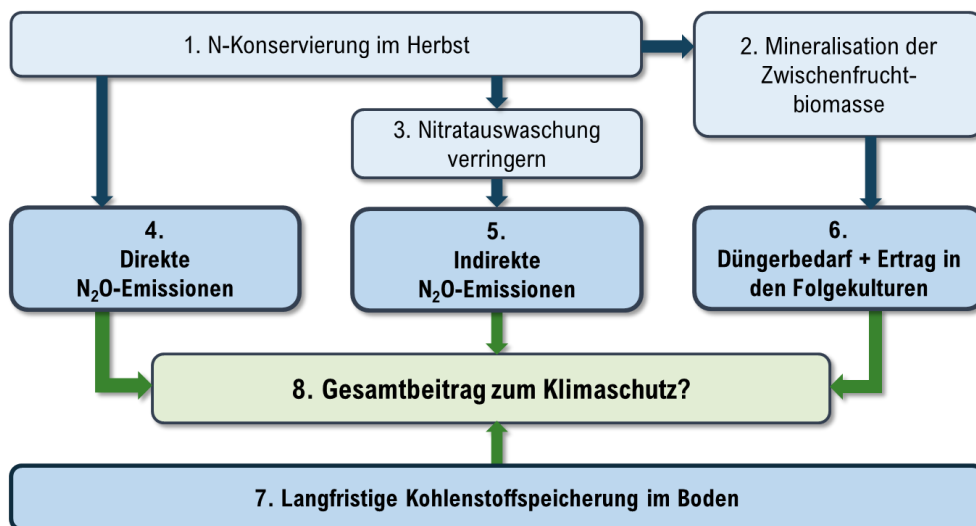


Abbildung 4: Schema der Wirkpfade zur ganzheitlichen THG-Bewertung im Zwischenfruchtanbau

tung (8.) integriert zu werden. Nicht berücksichtigt werden im gezeigten Schema mögliche Wirkungen des Humusaufbaus auf die direkte Lachgasemission. Dieser Punkt wurde im Rahmen des Projekts nicht analysiert.

1. N-Konservierung im Herbst

Anbausystemversuch alle Standorte (AP2 | CAU & TI & PHP & IfZ & GAUG & UHOH)

Im Anbausystemversuch wurden wie vorgesehen an allen vier Standorten in zwei aufeinanderfolgenden Jahren ZF etabliert und deren N-Aufnahme durch regelmäßige Messungen quantifiziert. Am Standort UE entwickelte sich auf den Bracheparzellen durch den Aufwuchs von Ausfallraps eine ähnliche N-Aufnahmedynamik wie in den gesäten ZF-Beständen, der erst Ende November/Anfang Dezember mechanisch beseitigt werden konnte. Daher ist, außer bei den N₂O-Messungen (manuelle Sicherstellung der Brache innerhalb der Hauben), der angestrebte Vergleich der ZF zur Schwarzbrache an diesem Standort nicht sinnvoll möglich (Abbildung 5). Aufgrund eines Düngefehlers am Standort Göttingen im Etablierungsjahr 2019 in der Zuckerrübe nach den ZF Ölrettich und Winterroggen müssen diese Daten bei einigen Auswertungen, die auf destruktiven Erhebungen (Boden-/Pflanzenproben) basieren, ebenfalls ausgeschlossen werden. Davon nicht betroffen sind die Ertragsdaten und N-Steigerungsreihen.

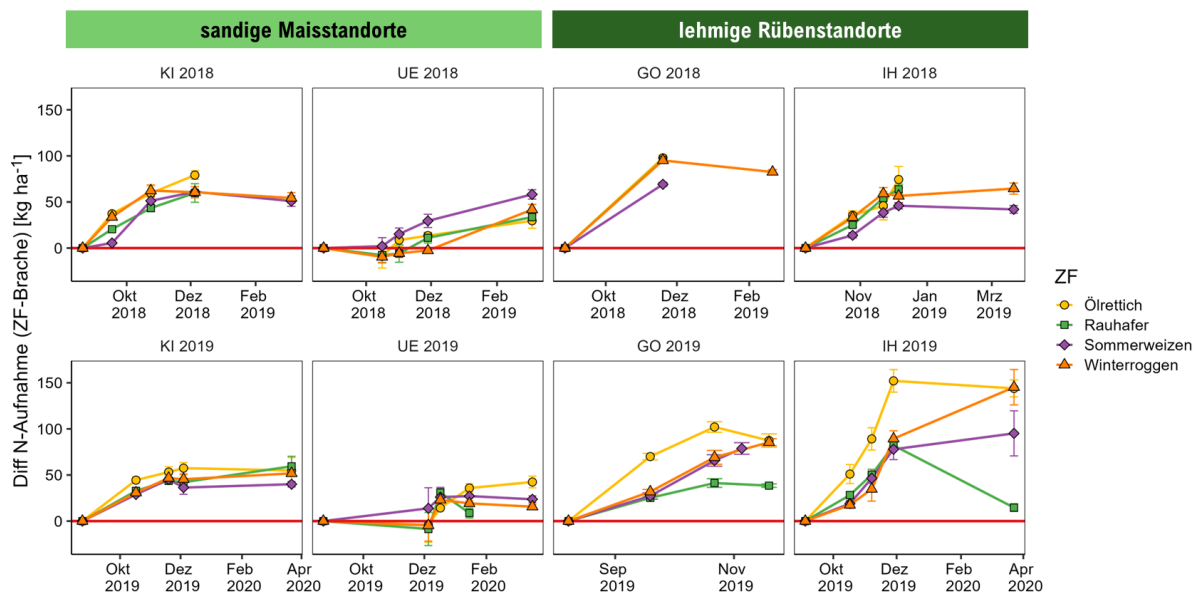


Abbildung 5: Zeitliche Dynamik der N-Aufnahme in oberirdischer ZF-Biomasse als Differenz zur Brache.

Kalibrationsversuche KI und GO (AP2.1 | Lead CAU & IfZ)

Ergänzend zu den Anbausystemversuchen wurden wie geplant zweijährig an zwei Standorten erweiterte Zwischenfruchtversuche mit variiertem Herbstdüngung und Aussaatterminen sowie mit Mischungen der ZF-Arten angelegt und erfolgreich zur Spektraldatenkalibration (Abbildung 6) und Modellparametrisierung genutzt.

Ausgehend von der breiten Variation der Bedingungen im Kalibrationsversuch konnte anhand der zweijährigen Daten eine erste Abschätzung von Blattflächenindex, Trockenmasse und N-Aufnahme aus der spektralen Reflexion hergeleitet werden. Die beste Vorhersagegüte ergab sich für die „simple ratio“ aus Nahinfrarot/rot (SR_{red}) mit den in Abbildung 7 angegebenen Kalibrationsgleichungen für die einzelnen ZF-Arten.

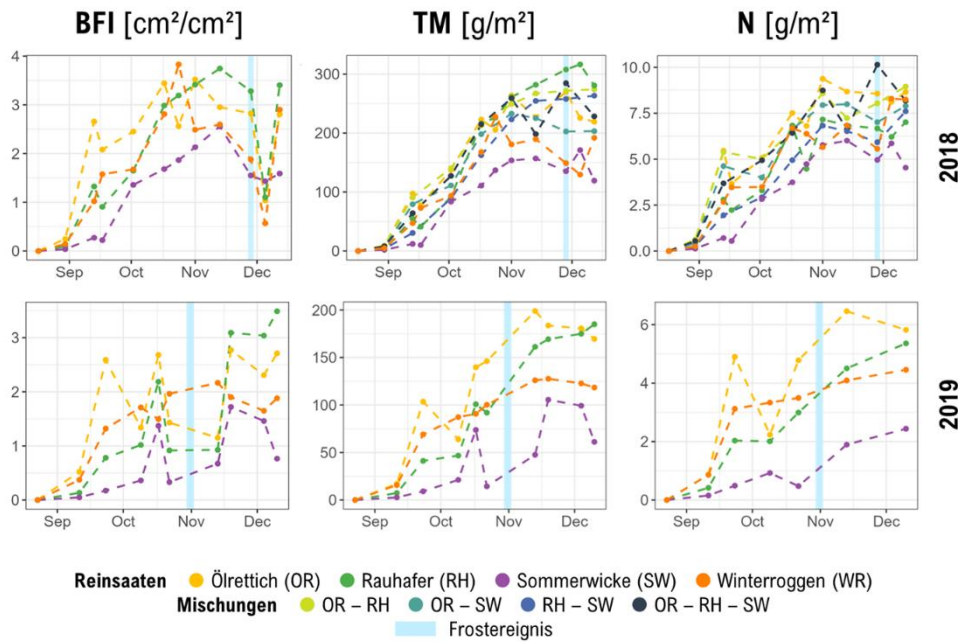


Abbildung 6: Charakteristik (Blattflächenindex BFI, Trockenmasse TM und N-Aufnahme N) von Zwischenfruchtreinsaaten und Mischungen im Kalibrationsversuch am Standort Kiel (Holzhauser et al. 2022)

Für die Datensätze der beiden Kalibrationsversuche bei Göttingen wurde untersucht, ob die oberirdische Biomasse sowie die N- und C-Aufnahme der ZF bzw. Zwischenfruchtmischungen anhand der Spektraldaten mittels verschiedener Ansätze maschinellen Lernens vorherzusagen ist. Aufgrund der geringen Anzahl an Datenpunkten für die einzelnen ZF bzw. Mischungen wurden dafür alle Datenpunkte eines Jahres zusammengekommen. Unabhängig vom Jahr, dem Modellansatz (7 verschiedene Modelle), der Anzahl an Prädiktoren (bis zu 18; 5 Spektralbänder und 13 Vegetationsindices) sowie dem Verhältnis von Trainings- zu Testdaten resultierte diese Vorgehensweise jedoch in Vorhersagen mit einem großen Restfehler. Insbesondere die zwischenjährliche Vorhersage lieferte unzuverlässige Werte, sodass dieser Ansatz nicht weiterverfolgt wurde. Generell ist die geringe Einstrahlung im Spätherbst ein wesentlicher begrenzender Faktor bei der Schätzung von Blattflächenindex und N-Aufnahme aus spektralen Reflexionsmessungen (Bukowiecki et al. 2021).

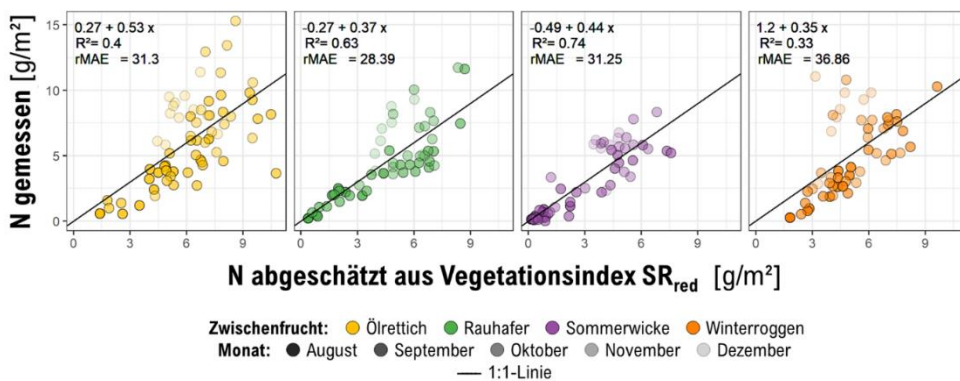


Abbildung 7: Vorhersagegenauigkeit für die N-Aufnahme aus spektraler Reflexion über die simple ratio NIR/red (SR_{red}) (Holzhauser et al. 2022)

Über die im Projektantrag genannten Arbeiten hinaus wurden auch in der Hauptfrucht Zuckerrübe in den Göttinger Anbausystemversuchen Drohnenbefliegungen durchgeführt und

mit demselben Ansatz wie oben beschrieben versucht, die Trockenmasse sowie N-Aufnahme sowohl des Rübenblatts als auch des Rübenkörpers anhand der gewonnenen Spektraldaten vorherzusagen. Trotz einer geringen Anzahl geeigneter Flugtermine gab es hier zumindest innerhalb eines Jahres für einzelne Modellansätze deutlich bessere Ergebnisse als für die ZF in den Kalibrationsversuchen, wobei auch bei diesem Datensatz die überjährige Vorhersage eher schwach ausfiel. Dennoch gibt es für die in diesem Rahmen bisher wenig untersuchte Zuckerrübe aufgrund der durchgeführten Arbeiten vielversprechende Ansätze, auf die in weiteren Untersuchungen aufgebaut werden kann.

Praxistaugliche Schätzverfahren zur N-Aufnahme von ZF (AP2.2, APb | Lead LWK NI)

Auf Grundlage der Versuchsergebnisse aus den Anbausystem- und Kalibrationsversuchen sowie den anschließenden Umbruchversuchen wurde wie geplant ein Schätzrahmen entwickelt, mit dem die oberirdische N-Aufnahme von ZF-Beständen im Feld ermittelt werden kann. In diesem vereinfachten Ansatz bleibt das N-Speicherpotential in der Wurzelbiomasse unberücksichtigt. Für diesen Schätzrahmen muss die oberirdische Frischmasse eines Bestandes auf einer Fläche von 1 m² zum Vegetationsende (Ende Nov., Anfang Dez.) erfasst werden. Dabei sollte der Bestand möglichst abgetrocknet sein und der Erdanhang entfernt werden, um das Ergebnis nicht zu verfälschen. Abbildung 8 zeigt die zugrundeliegende Regression zwischen oberirdischer Frischmasse und N-Aufnahme der Zwischenfrucht anhand von 449 Feldmessungen. 1 kg m⁻² Frischmasse entspricht dabei einer N-Aufnahme von 31.5 kg N ha⁻¹ für diverse Zwischenfruchtarten und Zwischenfruchtmischungen außer reinen Leguminosenbeständen. Bei diesen entspricht 1 kg Frischmasse je m² 49.9 kg N ha⁻¹, wobei eine geringere Schätzgüte der Formel und ein geringerer Stichprobenumfang (n=88) zu beachten sind.

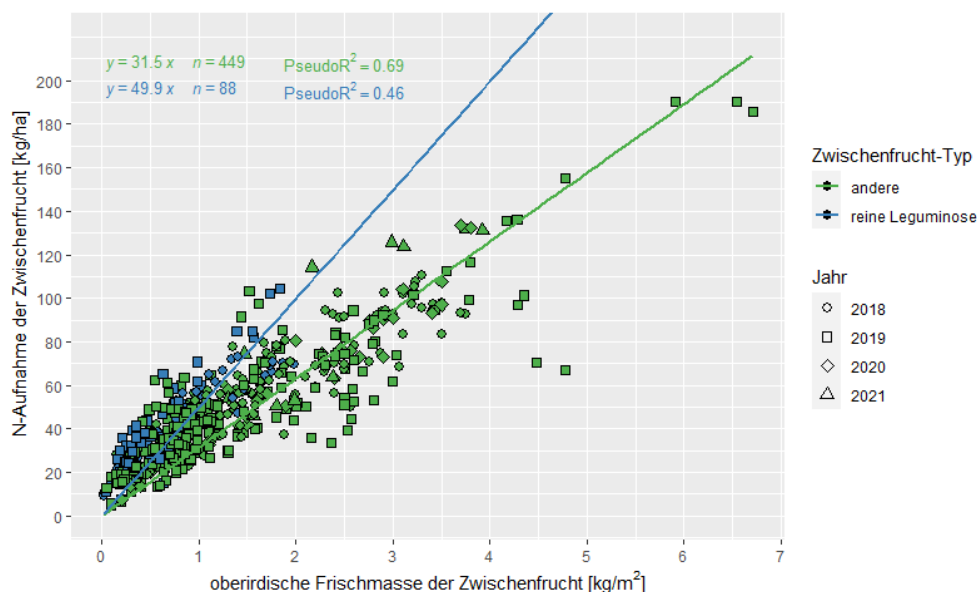


Abbildung 8: Lineare Beziehungen zwischen der oberirdischen Frischmasse (kg/m²) und der N-Aufnahme in der oberirdischen Biomasse von Zwischenfruchtbeständen im Herbst (kg/ha) in Abhängigkeit vom Zwischenfrucht-Typ.

Nichtdestotrotz bestätigen die hier vorgestellten Daten das höhere N-Aufnahme-Potential von Leguminosen-Beständen, das durch bereits vorhandene Schätzformeln von P.H. Petersen (als Gesellschafter der Saaten-Union) attestiert wurde. Diese unterscheiden zwischen reinen Leguminosen (Faktor 43), Mischungen von Leguminosen und Nicht-Leguminosen (Faktor 39) sowie Nicht-Leguminosen (Faktor 35). Anhand der Versuchsdaten zeigte sich allerdings nur ein eindeutiger Unterschied von reinen Leguminosen im Vergleich zu anderen Beständen. Dies kann am geringen Leguminosen-Anteil in den untersuchten Mischungen (unter <50 %) liegen.

Zwischenfruchteinfluss auf Bodenstruktur und Wurzelwachstum (AP2.3 | Lead IfZ)

In den Anbausystemversuchen in Göttingen wurde wie geplant am Ende der Vegetationsperiode zusätzlich zu der oberirdischen auch die unterirdische Zwischenfruchtbiomasse sowie die Wurzellängendichte der ZF bis 60 cm Tiefe quantifiziert. Dabei zeigten sich für die unterirdische Biomasse deutlich höhere Werte für Winterroggen und Ölrettich (unter Einbeziehung der Rettichbiomasse) als für Rauhafer und insbesondere Sommerwicke. Im darauffolgenden Frühjahr wurde unter der nachfolgenden Zuckerrübe die Bodenstruktur anhand verschiedener Parameter untersucht, wobei insbesondere nach Ölrettich eine günstigere Bodenstruktur gefunden wurde als nach Brache, die Werte nach Wicke hingegen waren ähnlich zu denen nach Brache. Auch Winterroggen zeigte einen positiven Effekt, wobei dieser auch durch die im Vergleich zu allen anderen Varianten intensivere Bodenbearbeitung beeinflusst gewesen sein könnte (Grunwald et al. 2023).

Im weiteren Verlauf der Wachstumsperiode wurde im Juli die Durchwurzelung unter der Zuckerrübe nach den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten untersucht. Hierbei wurde die Variante Winterroggen schlussendlich aus der Analyse genommen, da die Interpretation des Ergebnisses durch die unterschiedliche Bodenbearbeitung stark erschwert wurde. Die Wurzellängendichte der Zuckerrübe wurde in 0-20 cm Tiefe insbesondere durch Ölrettich und Rauhafer teils signifikant erhöht, in weiteren Bodentiefen war der Effekt deutlich schwächer ausgeprägt (Abbildung 9). Ursächlich könnten hier einerseits die gefundenen Verbesserungen der Bodenstruktur sein, andererseits aber auch ein gewisser Mangel an Stickstoff (siehe unten), der die Pflanze dazu animiert, stärker zu wurzeln. In beiden Fällen erscheint es schlüssig, dass ZF mit einer höheren Biomasse einen stärkeren Effekt zeigen. Zumindest die Ergebnisse von Göttingen 2020 zeigen möglicherweise stärker den (positiven) Effekt der verbesserten Bodenstruktur, da hier durch eine sehr hohe N-Versorgung des Standortes kein N-Mangel über alle Varianten hinweg gefunden wurde.

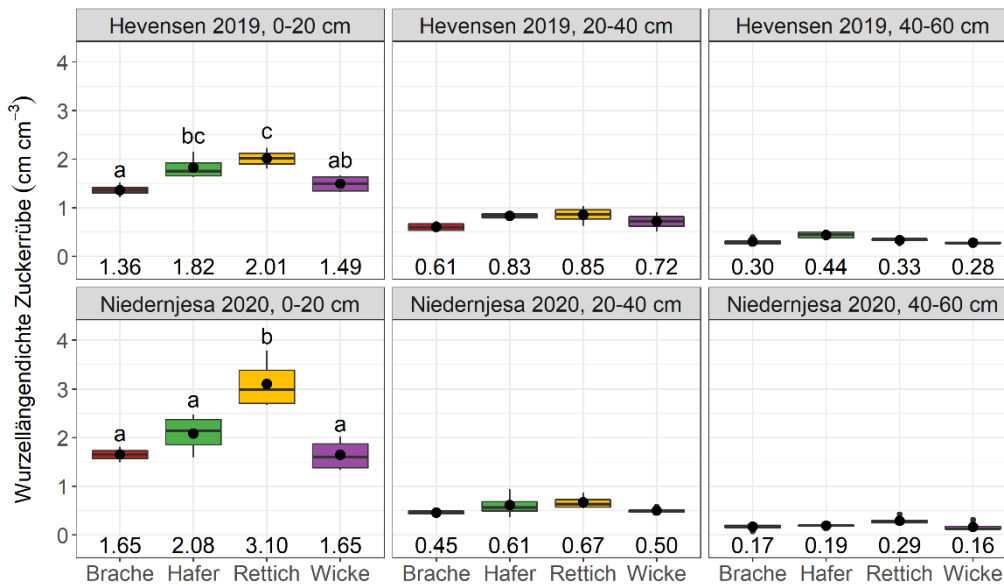


Abbildung 9: Wurzellängendichte von Zuckerrübe nach verschiedenen Zwischenfruchtvarianten am Standort Göttingen (Erntejahr 2019 Hevensen, 2020 Niedernjesa (Grunwald et al. *under review*))

2. Mineralisation der ZF-Biomasse

Mineralisation ZF-Biomasse im Feldversuch (AP 3.1 | Lead CAU & IfZ)

Die Untersuchungen zur Mineralisation der ZF-Biomasse fanden alle wie geplant statt, waren am Standort UE aufgrund der nicht vorhandenen echten Brache allerdings nicht für alle Parameter auswertbar. Die oberirdische ZF-Biomasseentwicklung und darin konservierte N-Menge vor Winter war an allen Standorten in Jahr 2019 größer als im trockenen Herbst 2018 und insgesamt auf den Rübenstandorten größer als auf den Maisstandorten, die im Versuch etwas schwächer entwickelt waren als auf vergleichbaren Praxisflächen (Abbildung 10). Die Rangfolge der gemessenen C:N-Verhältnisse entsprach den Erwartungen aus der Literatur

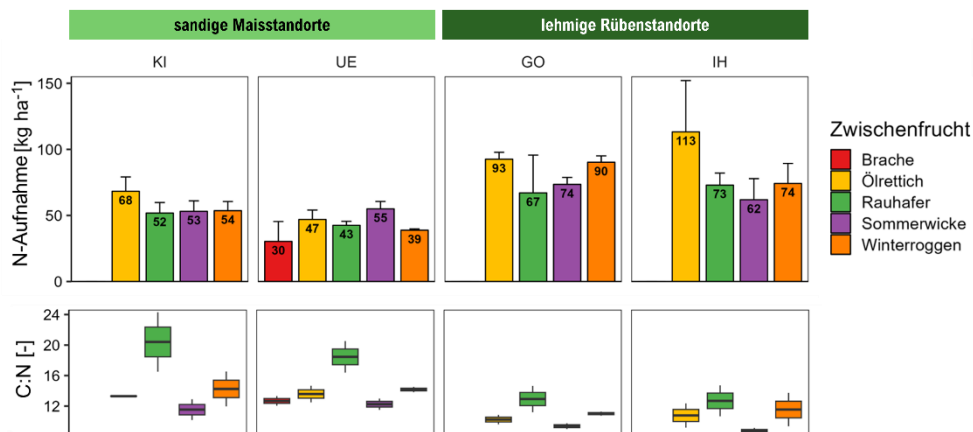


Abbildung 10: C:N-Verhältnisse und maximale N-Aufnahmen vor Winter im Mittel der beiden Versuchsjahre

und variierte etwas ausgeprägter auf den sandigen Standorten (Kühling et al. 2023).

Die Effekte der N-Konservierung in der ZF-Biomasse sind an den geringeren Boden-N_{min} Gehalten unter ZF im Vergleich zur Brache zu erkennen (Abbildung 11). Der geringe Unterschied auf dem sandigen Standort zwischen den Gehalten in 0-60 cm und denen in 0-90 cm lässt vermuten, dass in den unteren 30 cm auch Auswaschung stattgefunden hat. Auf den weniger verlagerungsgefährdeten Lehmstandorten war dies nicht der Fall. Die N_{min}-Dynamik

von Mai bis November (1. Folgefrucht) unterscheidet sich systematisch zwischen den Standortgruppen: Mais nach ZF profitierte von höherer N-Nachlieferung als nach Brache, während die Zuckerrübe unter geringerer N-Verfügbarkeit aus dem Bodenvorrat zu leiden hatte.

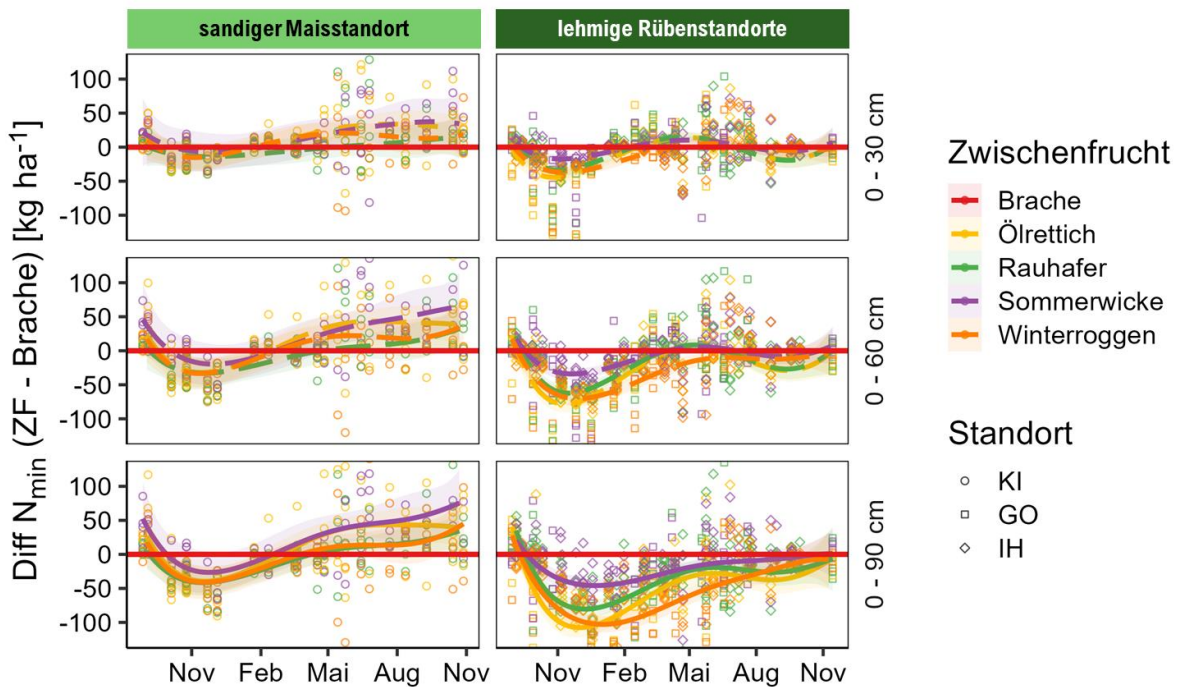


Abbildung 11: Zeitliche Dynamik der Boden-N_{min}-Gehalte (als Unterschied der Zwischenfrucht-Varianten zur Brache) während der ZF-Periode (ungedüngt) und der 1. Folgekultur (optimal gedüngt)

Dies zeigte sich auch im Einfluss der ZF auf die N-Aufnahme der 1. Folgekultur (Abbildung 12 A): Diese wurde unter Zuckerrübe durch alle ZF gegenüber der Brache im Vegetationsabschnitt Juli/August bis Ernte im Herbst deutlich vermindert und nur im Abschnitt Aussaat bis Sommer geringfügig erhöht, insbesondere nach Ölrettich und Wicke (Koch et al. 2022). Demgegenüber war der N-Effekt der ZF unter Mais im frühen Abschnitt neutral, im zweiten Zeitraum jedoch deutlich positiv, ohne Differenzierung zwischen den ZF. Die mineralische N-Düngung zur Folgekultur veränderte die Differenzierung zwischen den Folgekulturen Zuckerrübe und Mais nicht.

Da in dieser Auswertung Zuckerrübe und Mais auf verschiedenen Standorten angebaut wurden, könnte die der Folgekultur zugeschriebene Wirkung auf den N-Effekt auch durch die Standorteigenschaften und nicht durch die Fruchtart verursacht sein. Diese Frage kann durch die Daten weiterer Varianten aus den Anbausystemversuchen anhand des Parameters N-Nettomineralisation beantwortet werden, bei dem neben der N-Aufnahme der Folgekultur auch die Veränderung des N_{min}-Gehaltes des Bodens einbezogen wird: Von allen Standorten standen Daten sowohl von Zuckerrübe als auch von Mais zur Verfügung, die allerdings nur nach Ölrettich-ZF angebaut wurden. Es zeigte sich, dass die Nettomineralisation unter Mais und Zuckerrüben an den Standorten Göttingen und Ihinger Hof gleichgerichtet differenzierte wie am Standort Kiel mit negativen Werten im ersten und ausgeprägt positiven Werten im zweiten Vegetationsabschnitt unter Mais (Abbildung 12 B). Trotz der großen Variation zwi-

schen den Standorten und Jahren (nicht dargestellt) weist dies darauf hin, dass die in Abbildung 12A sichtbaren Unterschiede durch die Folgekultur und nicht durch die Standorteigenschaften verursacht wurden. Zuckerrüben durchwurzelten den Boden deutlich früher und nahmen bis Juli/August bereits ca. 200 kg N ha⁻¹ auf, während Mais zu diesem Zeitpunkt erst ca. 100 kg N ha⁻¹ aufgenommen hatte, verbunden mit einer deutlich geringeren Absenkung des N_{min}-Gehaltes des Bodens (30 vs. 60-90 kg N ha⁻¹ in 0-30 cm Bodentiefe). Die frühzeitige intensivere Durchwurzelung unter Zuckerrübe gegenüber Mais könnte ein in der Literatur für andere Kulturen beschriebenes Rhizosphärenpriming, d.h. eine rhizosphärenbedingte Förderung der N-Mineralisation, bewirkt haben. Ebenso ist auch ein negativer Effekt hoher N_{min}-Gehalte des Bodens auf die Nettomineralisation als kausaler Faktor denkbar: die spätere und geringere N-Aufnahme des Mais führte zu höheren N_{min}-Werten und führte demnach ggf. zu einer verminderten Nettomineralisation.

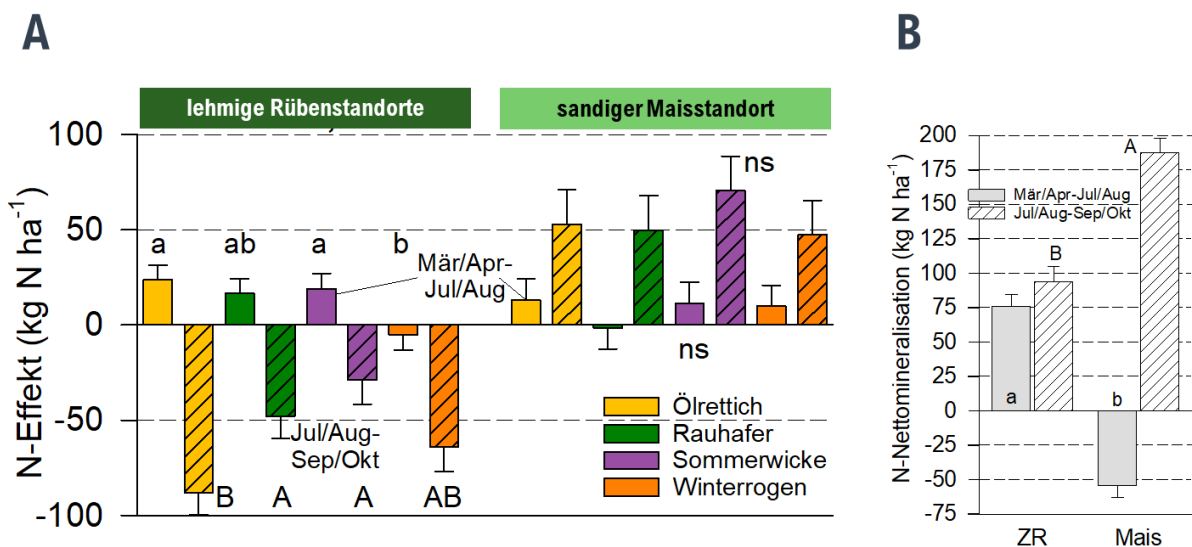


Abbildung 12: **A:** Differenz der N-Aufnahme der 1. Folgekultur nach Zwischenfrucht gegenüber einer Brache (N-Effekt, Zwischenfrucht minus Brache) in zwei Abschnitten der Vegetationszeit an den Zuckerrüben-Standorten Göttingen und Ihinger Hof und Kiel als Maisstandort ohne N-Mineraldüngung (N0). **B:** N-Nettomineralisation unter Zuckerrübe (ZR) und Mais nach Ölrettich-Zwischenfrucht in zwei Abschnitten der Vegetationszeit im Mittel der Standorte Göttingen, Ihinger Hof und Kiel und den Jahren 2019 und 2020 mit optimaler N-Mineraldüngung (N2).

Umsatz und Mineralisation ¹⁵N markierten Ölrettichs im Feld (AP3.2 | Lead UHOH)

Zur Ernte der 1. und 2. Folgefrucht wurden die Erträge sowie die N- und ¹⁵N-Aufnahme in Rübenkörper und Blatt bzw. Korn und Stroh bestimmt. Über die Ergebnisse der ¹⁵N Messungen folgte die Berechnung der Anteile an ölrettichbürtigem N. Steigend mit der über den Ölrettich zugeführten N-Menge konnte in der Sommerung ein Anteil von ölrettichbürtigem N am Gesamt-N zwischen 2.5 % und 13.2 % nachgewiesen werden. Auch im Winterweizen konnte, wenn auch in deutlich geringeren Mengen, ölrettichbürtiger N nachgewiesen werden, wobei dieser aus den auf dem Feld verbliebenen Zuckerrübenblättern zur Verfügung gestellt wurde.

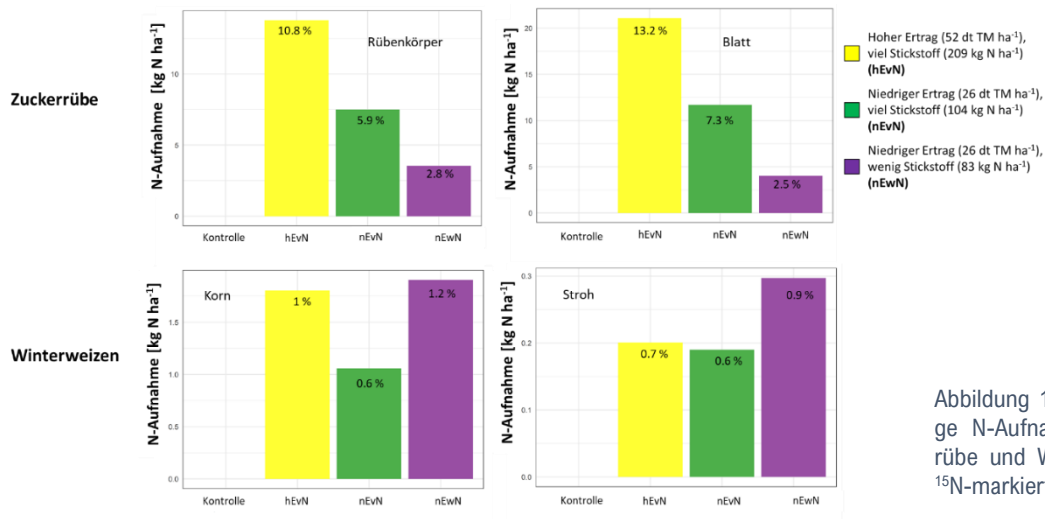


Abbildung 13: Ölrettichbürtige N-Aufnahme in Zuckerrübe und Winterweizen aus ¹⁵N-markiertem ZF-Material

Mineralisationsverhalten von ZF-Biomassearten und -qualitäten aus Inkubationsversuchen (AP3.3 | Lead TI)

In Inkubationsversuchen mit unterschiedlichen (a) Kompartimenten (Spross-, Wurzelbiomasse) zweier (b) Zwischenfruchtarten (Winterroggen, Ölrettich) mit unterschiedlicher (c) Vorbehandlung (frisch, getrocknet eingearbeitet) zeigte sich, dass die Unterschiede in der Mineralisation des zugegebenen zwischenfruchtbürtigen C und N vor allem durch eine unterschiedliche Zusammensetzung von Spross- und Wurzelbiomasse (N-Gehalt, C:N-Verhältnis, lösliche Zellkomponenten) verursacht werden: der Abbau der Wurzeln resultierte in einem geringeren Anstieg des mineralischen Bodennitratgehaltes bezogen auf den N-Eintrag mit der Zwischenfruchtbiomasse im Vergleich zur Sprossbiomasse (Abbildung 14a). In den ersten 24 Tagen der Inkubation war die Mineralisation des Zwischenfrucht-Kohlenstoffs maßgeblich durch die Eintragsmenge an löslichen Zellkomponenten beeinflusst. Die CO₂-Emission stieg entsprechend mit der Menge an eingetragenen löslichen Zellkomponenten an und war für die Varianten mit Sprossbiomassen höher als für die mit Wurzelbiomassen (Abbildung 14b).

Die relative Wiederfindung des ¹⁵N-markierten Stickstoffs der Zwischenfruchtbiomassen in der mikrobiellen Biomasse war für die Wurzeln mit weitem C:N-Verhältnis höher als für die Sproßbiomassen. Dies weist auf eine stärkere mikrobielle Immobilisierung von Wurzel-N hin (nicht gezeigt). Geringe Bodennitratgehalte in den Wurzelvarianten zu Versuchsende ähnlich dem der Kontrolle stützen diese Bewertung (nicht gezeigt). Diese Unterschiede wirkten sich auch auf die Lachgasemissionen aus (s. Kapitel 4, AP 3.2).

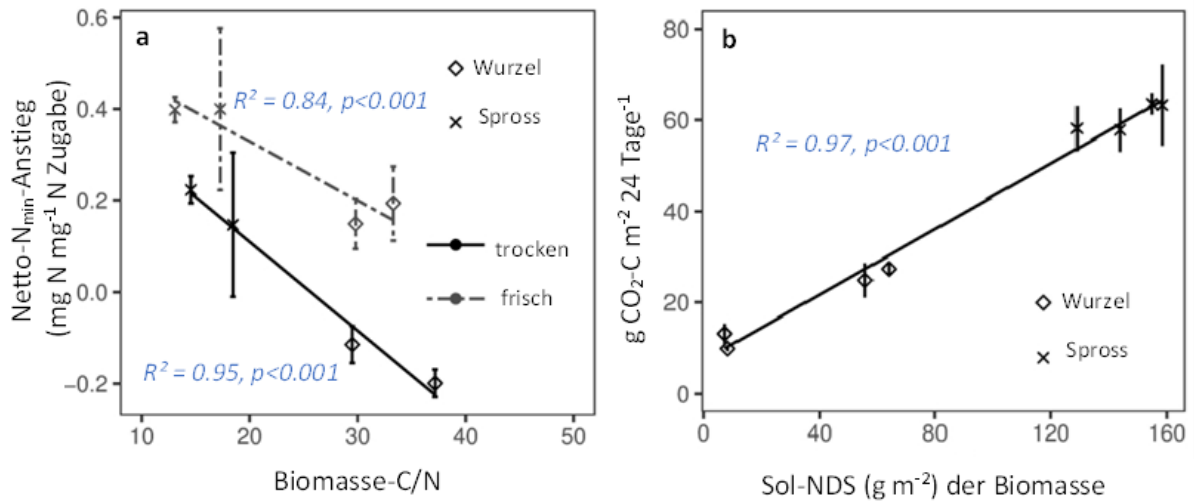


Abbildung 14: (a) Abhängigkeit des Boden-N_{min}-Anstiegs bezogen auf den N-Eintrag durch Zwischenfrüchte nach 70 Tagen Inkubation vom C:N Verhältnis der zugegebenen Biomasse, (b) Netto-CO₂ Emission in den ersten 24 Tagen in Abhängigkeit der zugegebenen Menge löslicher Zellkomponenten (sol-NDS) der Biomasse. (Mittelwerte±SD, n=4).

Mineralisation in Abhängigkeit des Umbruchtermins (APc | Lead IfZ)

Ein Zwischenfruchtumbruch kurz vor oder während des Winters könnte die N-Mineralisation des Biomasse-N fördern und so die N-Versorgung der Folgefrucht steigern. Dies wurde in zwei Versuchen mit Zuckerrüben (LWK, IfZ) und einem Versuch mit Mais (Uni Kiel) als Folgefrucht im Versuchsjahr 2021/22 geprüft. Im LWK-Versuch wurden im Herbst verschiedene Zwischenfruchtvarianten angebaut, während in den anderen Versuchen jeweils nur eine Variante (Weißer Senf, Göttingen bzw. ZF-Mischung, Kiel) vorhanden war. In den letztgenannten Versuchen wurde die Folgefrucht gestaffelt mit 0-200 kg N ha⁻¹ mineralisch gedüngt. Der Versuch der LWK umfasste demgegenüber nur die Varianten ohne und mit optimaler N-Düngung, indem auf einen Bedarfswert von 180 kg N ha⁻¹ aufgedüngt wurde.

Im Göttinger Versuch, in dem in der Senf-Biomasse zum Ende der Vegetationsperiode insgesamt 67,7 kg N / ha gespeichert waren, traten keine erhöhten N_{min}-Werte im Verlauf des Winters nach frühzeitigem Mulchen im Dezember auf. Auch im April bis Juni war kein systematischer Unterschied der N_{min}-Werte nach frühem gegenüber späteren Mulchterminen (Januar bzw. März) zu sehen. Ein Einfluss des Mulchtermins auf die N-Aufnahme der Zuckerrüben und den Zuckerertrag wurde über die verschiedenen Stufen der mineralischen N-Düngung nicht festgestellt, auch gab es keine Wechselwirkung des Mulchtermins mit der Höhe der N-Düngung. Am Standort Kiel war ein gerichteter Einfluss des Mulchtermins weder auf die N_{min}-Werte im Winter und Frühjahr noch auf die Biomasse und die N-Aufnahme des nachfolgenden Mais zu erkennen.

Im Versuch der LWK am Standort Adenstedt hatten die ZF (drei Varianten: Ölrettich, Ölrettich/Wicke, Senf/Erbse/Klee) bis zum Ende der Vegetationszeit im November 50-130 kg N ha⁻¹ in die oberirdische Biomasse aufgenommen und den N_{min}-Wert (0-90 cm) auf ca. 30 kg

N ha⁻¹ gegenüber 130 kg N ha⁻¹ unter der Strohmulch-Kontrolle (Brache) abgesenkt. Nach Winter waren die N_{min}-Werte nach den ZF um 20-30 kg N ha⁻¹ gestiegen, während sie nach Brache um ca. 30 kg N ha⁻¹ vermindert waren. Frühzeitiges Mulchen (Ende November) veränderte diese Werte gegenüber dem späten Mulchtermin im März nicht. Bis zu einer Probenahme im Mai stiegen die Werte anschließend auf 120-140 (ZF) bzw. 160 kg N ha⁻¹ (Brache) an, wenn die Zuckerrüben nicht gedüngt wurden. Mit einer Aufdüngung auf einen Bedarfswert von 180 kg N ha⁻¹ variierten die N_{min}-Werte im Mai in einem weiten Bereich zwischen 230 und 300 kg N ha⁻¹ ohne gerichtete Unterschiede zwischen den Varianten. Die N-Aufnahme der Zuckerrüben im Herbst war bei spätem Mulchen nach allen ZF sowohl ohne als auch mit optimaler N-Mineraldüngung der Zuckerrüben gegenüber Brache deutlich vermindert. Bei frühem Mulchen der ZF war die N-Aufnahme der nachfolgenden Zuckerrüben im Vergleich zum späten Mulchtermin erhöht, erreichte jedoch nur nach Senf/Erbse/Klee gleich hohe Werte wie nach Brache. Der Zuckerertrag wurde ebenfalls durch das frühe gegenüber dem späten Mulchen der ZF erhöht, war jedoch auch mit optimaler N-Düngung der Zuckerrüben niedriger als nach Brache.

Im Gegensatz zu den zuvor beschriebenen Ergebnissen, zeigten Resultate von LWK-Versuchen am Löss-Standort Koldingen (2019/20, 2020/21), dass ein frühzeitiges Mulchen im Vergleich zu einer Kontrollbrache auch zu höheren N_{min}-Werten im Frühjahr und einem geringeren N-Düngebedarf bei gleichem Zuckerertrag führen kann. Festzuhalten bleibt somit, dass die Ergebnisse zum Effekt des vorgezogenen Mulches von ZF auf die N-Versorgung von Zuckerrüben standort- und jahresspezifisch variieren und eine allgemeine Aussage anhand der vorhandenen Daten nicht möglich ist. Die Ergebnisse machen ebenfalls deutlich, dass eine schlag- oder teilschlagspezifische Bestimmung des N_{min}-Wertes im Frühjahr unverzichtbar für eine pflanzenbedarfsgerechte Bemessung der N-Düngung ist.

3. Nitratauswaschung

Datengestützte Abschätzung der Effekte von ZF-Anbausystemen auf die Nitratauswaschung im Feldversuch (AP6.1 | Lead TI)

Die Stickstoffaufnahme von ZF verringert das Risiko der Nitratauswaschung in den Wintermonaten. Je größer die N-Aufnahme und damit die Bindung von mineralischem Bodenstickstoff in der aufwachsenden Zwischenfruchtbiomasse ist, desto größer ist ihr Potenzial, die umwelt- und klimabelastende Nitratauswaschung zu verringern. Wir haben die maximale N-Bindung in der oberirdischen Biomasse von ZF, die nicht zu den Leguminosen gehören, in der Zeit zwischen Zwischenfruchtaussaat und Mitte Dezember zur Abschätzung des Minderungspotenzials der Nitratauswaschung herangezogen. Die N-Gehalte in den Wurzeln blieben unberücksichtigt. Die Wicke wurde bei dieser Betrachtung außen vorgelassen, weil der

Stickstoff in dieser Leguminose sowohl aus dem mineralischen Stickstoffpool des Bodens als auch aus der atmosphärischen N₂-Fixierung stammen kann.

Die N-Bindung in der oberirdischen Zwischenfruchtbiomasse betrug Mitte Dezember für die sandigen Standorte (Folgefrucht Mais) im Mittel (Abbildung 15, grauer Balken) 52.6±14.3 kg N ha⁻¹ und für die lehmigen Standorte (Folgefrucht Zuckerrübe) 85.4±29.0 kg N ha⁻¹. Weder auf den sandigen noch auf den lehmigen Standorten gab es signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Zwischenfruchtarten.

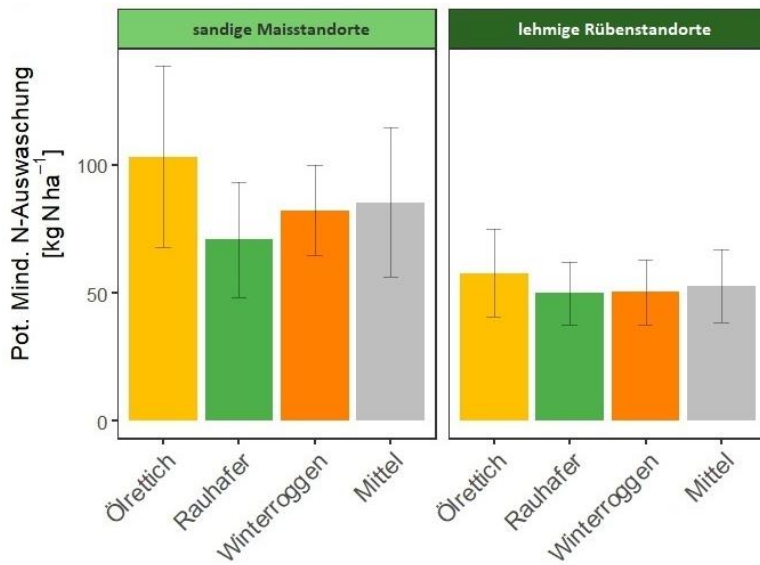


Abbildung 15: Potenzielle Minderung der N-Auswaschung (kg N ha⁻¹) für die nicht-leguminösen Zwischenfrüchte der sandigen Standorte (Folgefrucht Mais) (links) und der lehmigen Standorte (Folgefrucht Zuckerrübe) (rechts). Gezeigt ist je einmal der berechnete Wert für die einzelnen Zwischenfrüchte (Öfrettich, Rauhafer, Winterroggen; n=16) sowie über alle Zwischenfrüchte zusammen (Gesamt; n = 48).

Diese Werte beschreiben das maximale Potenzial der ZF, die Nitratauswaschung zu mindern. Der gewählte Ansatz ist stark vereinfachend und gibt keine Information über die Höhe der tatsächlichen Auswaschung oder die erzielte Auswaschungsminderung, da weder die Wasserbewegung im Boden noch die N-Konzentration im Sickerwasser bekannt ist. Auch bleibt die mögliche Re-Mineralisation von ZF-N nach dem Absterben nicht-winterharter ZF unberücksichtigt.

Modellierung der Nitratauswaschung im Zwischenfruchtanbau (AP6.2 | Lead CAU)

Zur Simulation der Nitratauswaschung wurde ein prozessorientiertes dynamisches Boden-Pflanze-Atmosphäre Modell in der Modellierungsumgebung HUME (Kage 1999) entwickelt. Das strahlungsgetriebene Pflanzenwachstumsmodell wurde standortübergreifend für die einzelnen ZF-Arten anhand der vorliegenden zweijährigen empirischen Versuchsdaten (Blattflächenindex, oberirdische Biomasse, oberirdische N-Aufnahme) parametrisiert. Zur Parametrisierung des Bodenwasser- und Stickstoffhaushalts wurden die standortspezifisch vorliegenden N_{min}-Daten genutzt. Basierend auf den zweijährigen Versuchsdaten wurden dann 30-jährige Modellläufe gerechnet, um eine Einschätzung der mittleren langjährigen Nitratauswaschung zu erhalten. Die langjährigen Wetterdaten wurden aus umliegenden DWD-Stationen interpoliert (Agronomy Kiel 2023).

Für die Nitratfrachten wurden die kumulierten NO_3 -Verluste in 120 cm als maximale Durchwurzelungstiefe der Folgefrüchte angenommen. Bilanziert wurde vom 15. August bis zum 31. März des Folgejahres. In Abbildung 16 sind exemplarisch die Verlagerungen der Nitratfronten für die Standorte KI und IH im Unterschied zwischen Brache und mit ZF-Bewuchs im langjährigen Mittel dargestellt. Auf dem sandigen Standort wird das vorhandene Nitrat über die effektiven Durchwurzelungszone hinaus tiefenverlagert, während auf dem Löss-Standort ein größerer Teil auch ohne ZF innerhalb der Durchwurzelungszone gehalten werden kann.

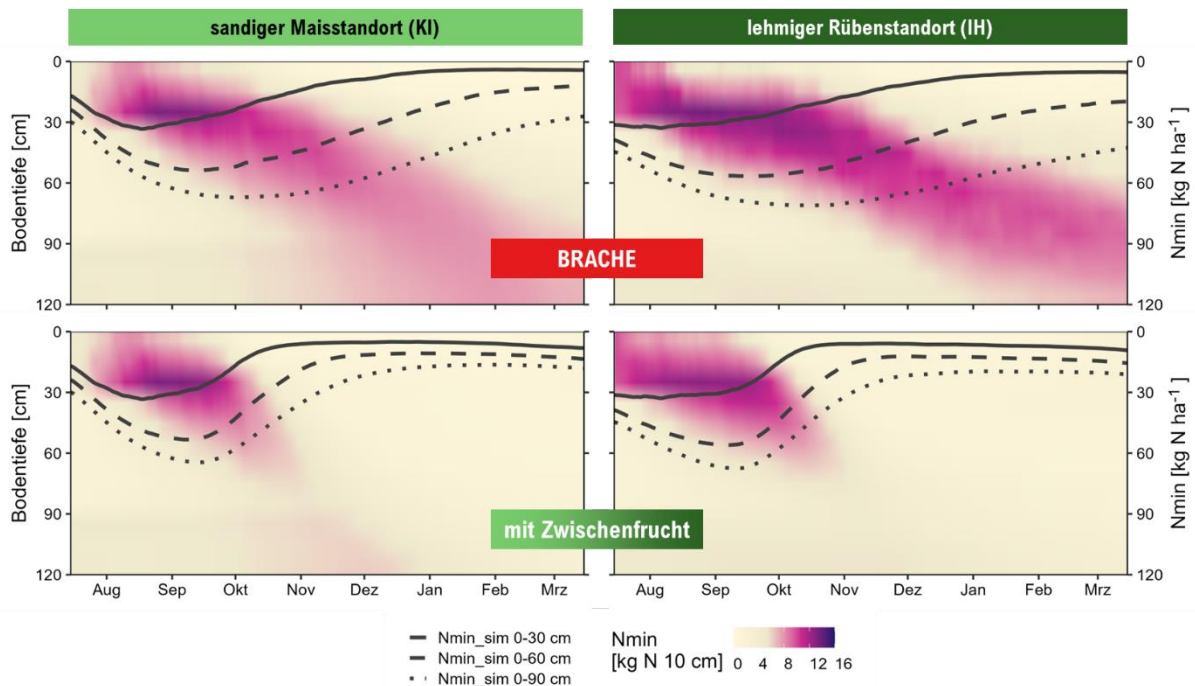


Abbildung 16: Tiefenverlagerung der Nitratfront (Farbskala Nitratkonzentration) und korrespondierende Boden- N_{\min} -Gehalte (Linien) in den Horizonten 0-30, 0-60 und 0-90 cm Tiefe im Unterschied zwischen Brache und mit Zwischenfrucht.

Die Effekte der ZF auf die Nitratverlagerung (Unterschied zwischen Brache und ZF-Varianten) ist auf sandigem Boden mit etwa 30 kg N ha^{-1} deutlich größer als auf den lehmigen Standorten ($8\text{-}13 \text{ kg N ha}^{-1}$), siehe Abbildung 17 exemplarisch für jeweils einen Sand- und Lehmstandort. Die Varianz der simulierten 30 Einzeljahre sowie die Einordnung der beiden Versuchsjahre 2018 und 2019 (Jahr der ZF-Ansaat mit darauffolgender Sickerwasserperiode) zeigt die Notwendigkeit der Modellierung dieser Effekte. Um zu einer verlässlichen Einschätzung der Situation zu gelangen, reichen zweijährige Feldversuche nicht aus.

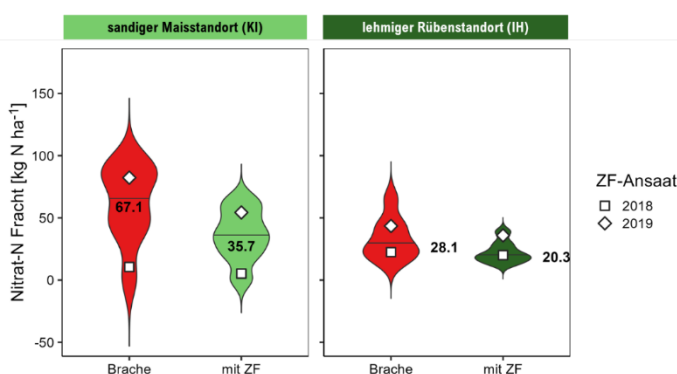


Abbildung 17: Violin-Plots der 30-jährigen Simulation der Nitratverlagerung unterhalb von 120 cm exemplarisch für die beiden Standorte Kiel und Ihinger Hof. Symbole kennzeichnen die Situation der zwei Versuchsjahre

4. Direkte Lachgasemissionen

N₂O-Messungen (AP5.1 | Lead TI & GAUG & UHOH)

Die Treibhausgasmessungen wurden wie geplant im wöchentlichen Rhythmus, ergänzt durch ereignisbezogene Zusatzmessungen, in den ungedüngten ZF und anschließend in ausreichend N-versorgten Parzellen (Stufe N2) der Sommerungen durchgeführt. Die saisonalen N₂O-Emissionen variierten an den Standorten, wobei die lehmigen Standorte insbesondere nach dem Eintrag von ZF-Biomasse mit geringem C:N-Verhältnis (Abfrieren Ölrettich) oder nach Pflugumbruch des Winterroggens höhere Flüsse aufwiesen (Abbildung 18).

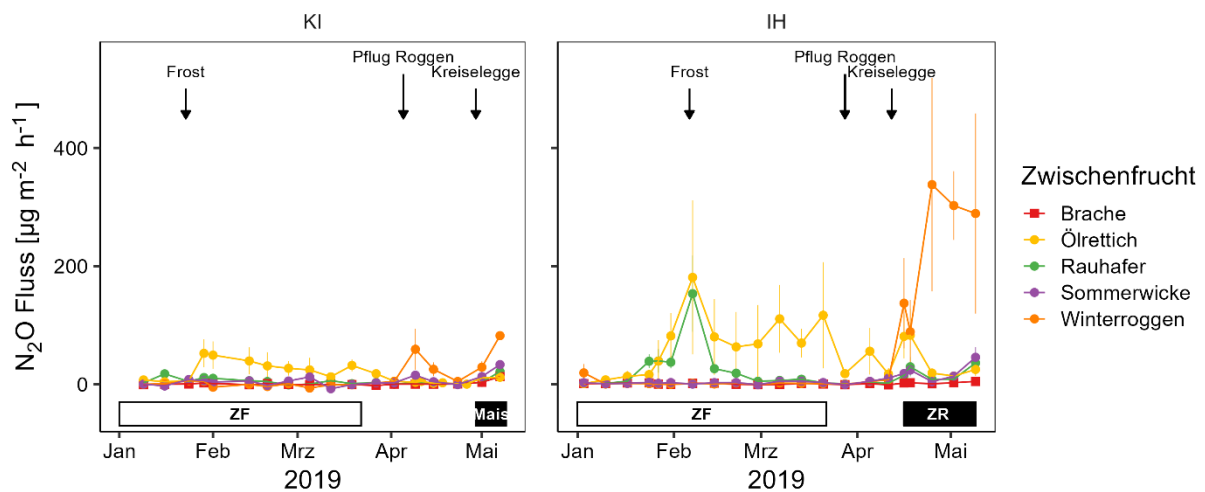


Abbildung 18: Exemplarischer Ausschnitt im Feld gemessener Lachgasflüsse Anfang 2019 am sandigen Standort Kiel (KI, links) und am lehmigen Standort Ihinger Hof (IH, rechts). Unterschiedlich hohe Emissionen nach Frost-Tau-Ereignis (Ölrettich, Rauhafer Februar) und in Folge intensiverer Bodenbearbeitung (Roggen April/Mai). Jeweils Mittelwerte aus 4 Wiederholungen ±Standardfehler)

In der kumulativen Betrachtung über den Zeitraum der Zwischenfrucht und 1. Folgekultur ergeben sich im Mittel über beide Etablierungsjahre für die Standortgruppen größere Unterschiede zwischen ZF und Brache auf den Lehmstandorten (Abbildung 19). Auf allen Standorten machte sich der Pflugeinsatz beim Umbruch von Winterroggen mit den signifikant höchsten N₂O-Verlusten bemerkbar. Die hohen Ölrettich-Emissionen während der ZF-Periode auf den Rübenstandorten sind durch die hohe N-Menge in der Ölrettich-Biomasse sowie durch erhöhte N₂O-Flüsse bei Tau zu erklären.

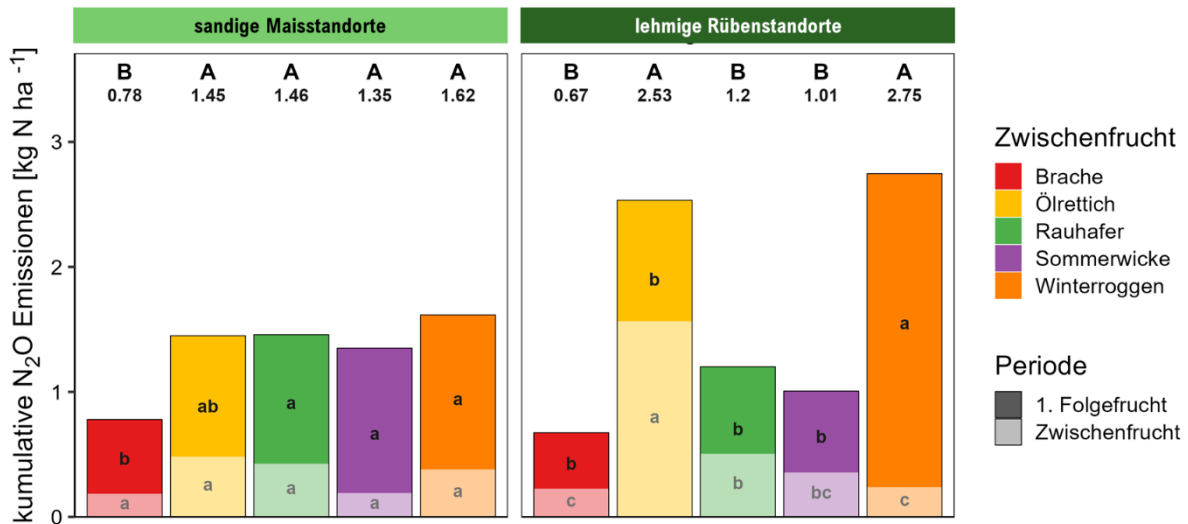


Abbildung 19: Kumulative direkte Lachgasemissionen im Mittel über beide Versuchsjahre getrennt nach Anbauperiode ZF (heller) und 1. Folgefrucht (dunkler) sowie in Summe über beide Phasen (Zahlen). Ohne Ölrettich und Winterroggen in Göttingen 2019.

Modellierung direkter THG-Emissionen (AP5.2 | Lead CAU)

Wie geplant wurde in Vernetzung mit dem von der FNR geförderten Projekt THG-Emoba die Simulation der direkten Lachgasemissionen mit Hilfe des dynamischen Modells HUME am Beispiel des sandigen Maisstandortes KI simuliert. Dieser Ansatz erwies sich als erheblich zielführender im Vergleich zu den linearen Abschätzungen nach IPCC oder GNOC (Abbildung 20)

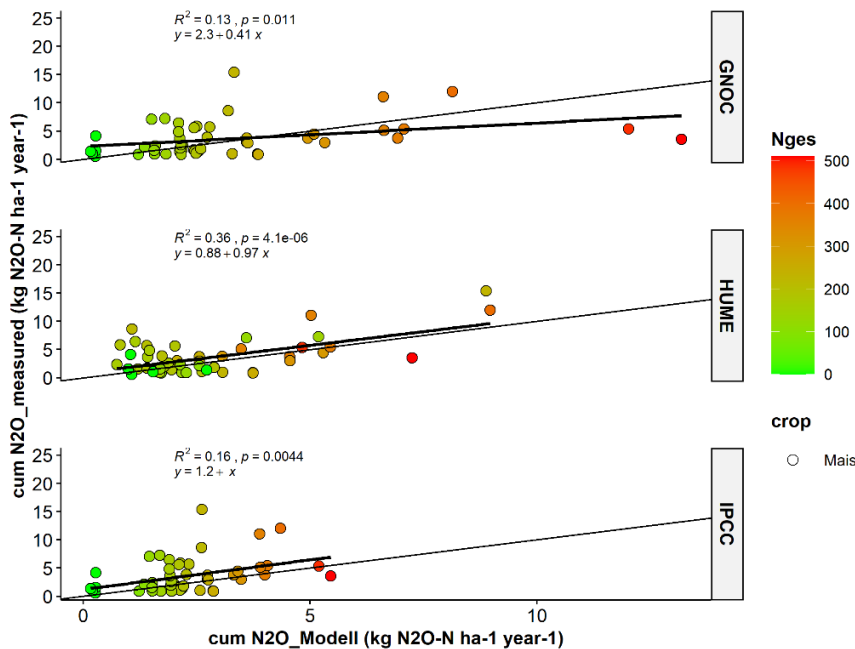


Abbildung 20: Gegenüberstellung modellierter (HUME) und abgeschätzter (GNOC, IPCC) Werte zu tatsächlich gemessenen direkten Lachgasemissionen in Mais am Standort Hohenschulen (THG-Emoba: Rabah-Nasser & Neukam 2022)

N₂O-Emissionen aus ¹⁵N- und Inkubationsversuchen (AP 3.2 | Lead UHOH & AP 3.3 | Lead: TI)

¹⁵N Feldversuch IH

In der kumulativen Betrachtung über die verschiedenen Phasen ergaben sich die höchsten Emissionen nach Abfrieren des Ölrettichs (Abbildung 21). Ebenso konnte hier auch ein Großteil der direkt ölrettichbürtigen N₂O-Emissionen beobachtet werden. Die Variante mit hohen Erträgen und viel N (hEvN) unterschied sich in der Phase des Ölrettichs sowohl von der Kontrolle als auch von den beiden Varianten mit niedrigen Erträgen (nE). Dies lässt sich unter anderem durch den erhöhten Kohlenstoff (C)- und N-Eintrag der abgefrorenen Biomasse erklären, welcher als Substrat für die Denitrifikation zur Verfügung stand. Der intensive Umsatz der ZF und die damit verbundene starke Sauerstoffzehrung dürfte zudem zu anaeroben Bedingungen im Boden geführt haben, was die Denitrifikation ebenfalls förderte.

Die Emissionen während der Phasen Zuckerrübe und Winterweizen befinden sich in allen Varianten jeweils auf einem ähnlichen Niveau. Die gemessenen hohen Emissionen während der Phase des Winterweizens sind insbesondere auf die im Feld verbliebenen Zuckerrübenblätter zurückzuführen. Über die gesamte Messzeit zeigten sich erhöhte mittlere Emissionen in der Variante hEvN, diese unterschieden sich jedoch statistisch nicht von den restlichen Behandlungen.

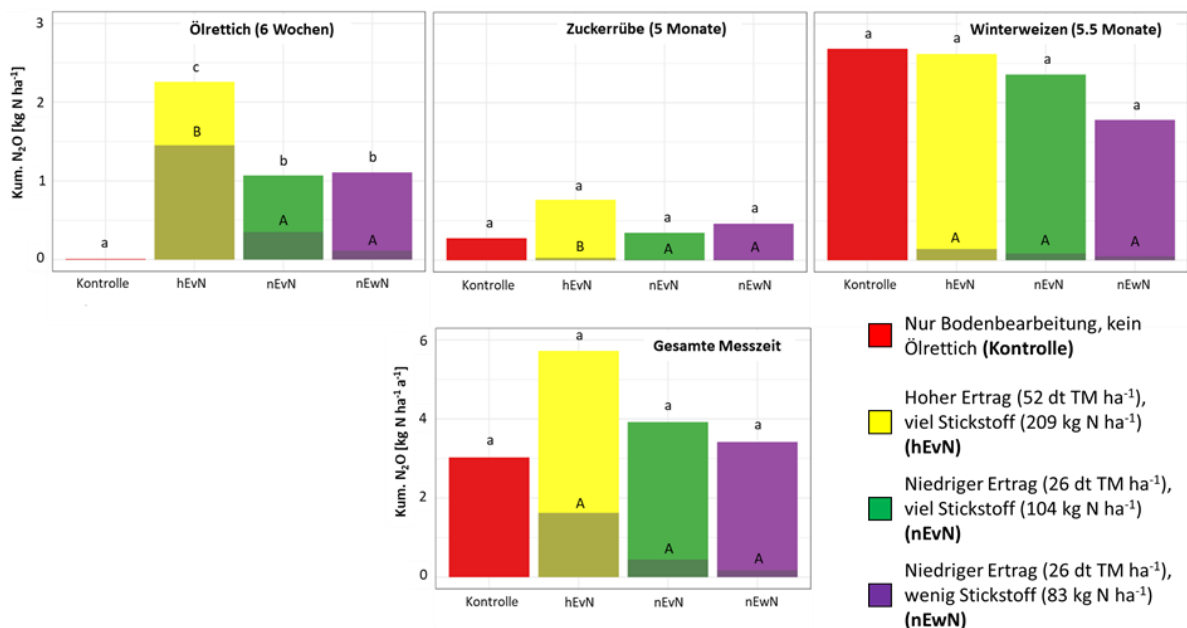


Abbildung 21: Kumulative Lachgasverluste während verschiedener Messzeiträume sowie über den gesamten Versuchszeitraum bis zur ersten Düngung des Winterweizens (Frühjahr). Anteile aus ¹⁵N-markiertem Ölrettich sind grau hinterlegt.

¹⁵N Laborversuch Braunschweig

Der in Kapitel 2 (AP 3.3) bereits in Bezug auf die Mineralisation erörterte Inkubationsversuch zeigte deutliche Einflüsse aller drei variierten Faktoren (Vorbehandlung, Kompartiment, Zwischenfruchtart) auf die N₂O-Emission. Getrocknete Zwischenfruchtbiomasse führte direkt nach der Einarbeitung zu einem Anstieg der N₂O-Emissionen, während es bei der frischen

Biomasse erst ca. fünf Tage später zu einem ersten Anstieg kam (Abbildung 22). Während nach 24 Tagen (grauer Bereich in Abbildung 22) die Höhe der N₂O-Emissionen in den Varianten mit getrockneter Biomasse stark sank und bis zum Versuchsende auf niedrigem Niveau blieb, zeigten die Varianten mit frisch eingearbeiteter Biomasse bis zum Versuchsende erhöhte Emissionen mit Ausnahme der frisch eingearbeiteten Roggenwurzeln. In den Varianten mit eingearbeiteter Sprossbiomasse stammte im Schnitt 62 % des emittierten N₂O-N aus dem ZF-N, während bei der Wurzelbiomasse der Großteil (73 %) aus dem Bodennitratpool stammte (Abbildung 22).

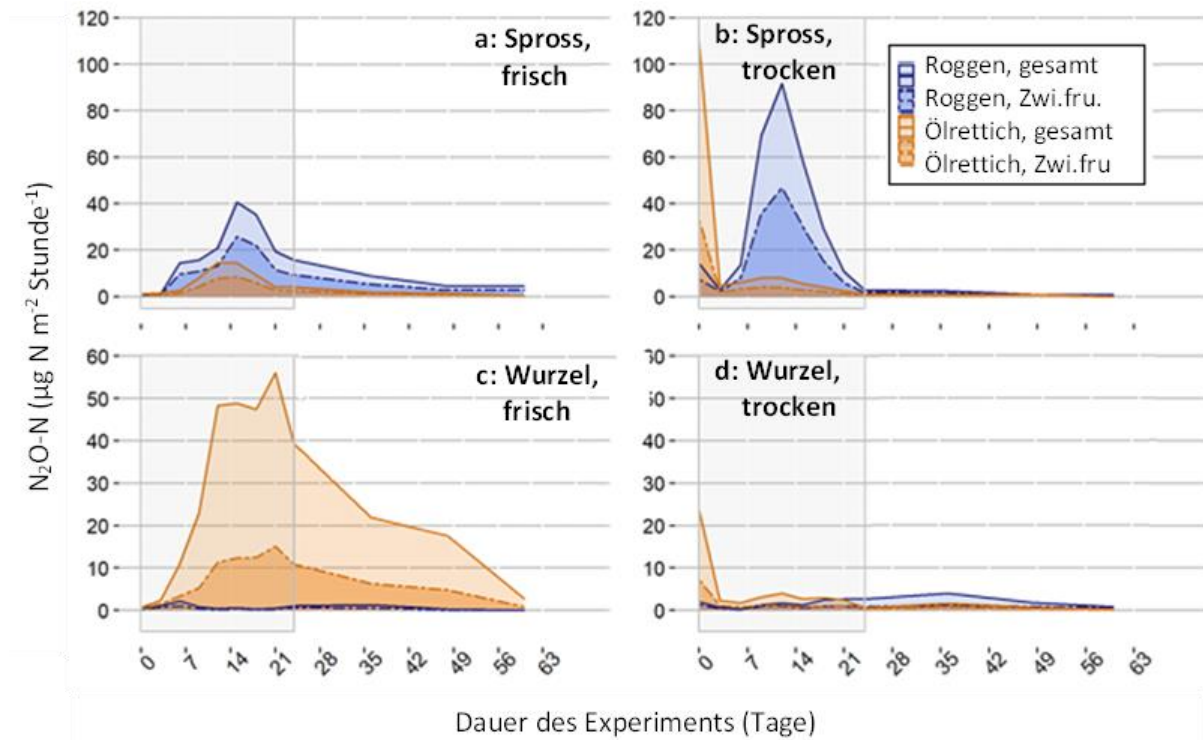


Abbildung 22: N₂O-Emissionen (durchgezogenen Linien, hellere Füllung) und anhand der ¹⁵N-Anreicherung errechnete zwischenfruchtbürtige N₂O-Emissionen (gestrichelte Linien, dunklere Füllung) zu verschiedenen Probenahmeterminen (Tag 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24, 36, 48 und 60) der (a, c) frisch und (b, d) getrocknet eingearbeiteten Spross- und Wurzelbiomasse der Zwischenfrüchte Grünroggen (blau) und Ölrettich (orange, n=4).

Diese Ergebnisse zeigen, ebenso wie die in Kapitel 2 gezeigten Ergebnisse zur Mineralisation der Zwischenfruchtbiomasse, dass Zwischenfruchtwurzel- und -sprossbiomasse sehr unterschiedliche Auswirkungen auf die Umsetzungsdynamik des ZF-N aber auch des mineralischen Boden-N haben. Diese Unterschiede sind für die N-Verfügbarkeit in der Folgekultur und die Optimierung des Düngemanagements relevant. Bedeutend sind diese Unterschiede besonders, wenn die oberirdische ZF-Biomasse geerntet wird und nur die Wurzelbiomasse auf der Fläche verbleibt. Aber auch das Spross-Wurzelverhältnis, welches je nach angebauter ZF-Art deutlich unterschiedlich ausfallen kann, kann die N-Nachlieferung und N-Immobilisierung in der Folgekultur beeinflussen (s. hierzu Kapitel 1.4 / AP 2.3).

Einfluss des Umbruchtermins auf N₂O-Emissionen (APc | Lead CAU & IfZ & GAUG)

Alle Erhebungen konnten wie geplant in bereits bestehenden ZF-Beständen auf Betriebsflächen realisiert werden. Bei der vergleichenden Betrachtung der direkten Lachgasemissionen aus ZF in Abhängigkeit des Umbruchtermins ergibt sich im Beobachtungsjahr 2021/2022 ein unterschiedliches Bild an den beiden Standorten (Abbildung 23). Während auf dem sandigen Maisstandort der frühe Umbruch (Dezember) zu signifikant höheren Emissionen während der ZF-Periode führte und im weiteren Verlauf durch geringere Emissionen unter Mais ausgeglichen wurde, verursachte die spät (Januar) oder ungemulchte (bis März stehen geblieben) ZF am lehmigen Rübenstandort signifikant höhere Emissionen als früh gemulchte oder zum frühen Termin abgefahrene ZF (Kontrolle).

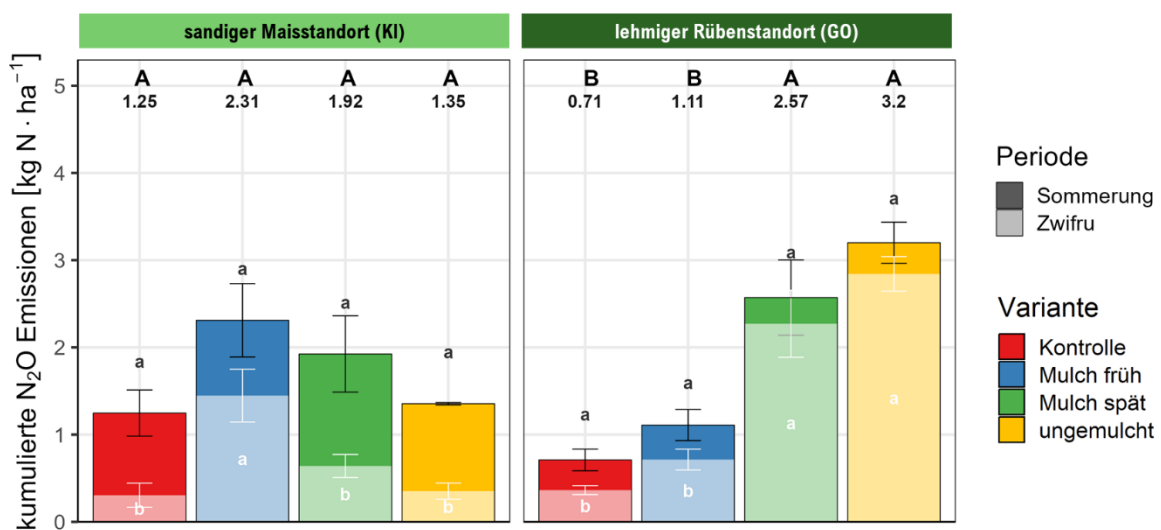


Abbildung 23: Kumulative direkte Lachgasemissionen nach unterschiedlichen ZF-Umbruchterminen.

5. Indirekte Lachgasemissionen

Abschätzung indirekter N₂O-Verluste aus Nitrat Auswaschung (AP6.2 | Lead CAU)

Aus den simulierten Nitratverlagerungsraten über 30 Jahre (1991-2020) an allen Standorten wurden die indirekten Lachgasemissionen nach IPCC (2019) mit einem Anteil von 1.1 % (EF 5) abgeschätzt (Methodik s. auch Tabelle 5). Das durchschnittliche Verlustpotential im 30-jährigen Simulationszeitraum für die einzelnen Standorte im Mittel über alle Zwischenfrüchte ist in Tabelle 2 aufgelistet.

Tabelle 2: Abgeschätzte indirekte N₂O-Emissionen aus Nitratverlagerung der simulierten Standorte im Unterschied zur Brache. Keine Ausweisung am Standort Uelzen (UE) möglich, da keine echte Brache vorhanden war.

	sandige Maisstandorte		lehmige Rübenstandorte	
	KI	UE	GO	IH
reduzierte NO ₃ -Verlagerung durch ZF [kg N ha ⁻¹ a ⁻¹]	31.4	-	7.8	12.9
eingesparte indirekte N ₂ O-Emissionen durch ZF [kg N ₂ O ha ⁻¹ a ⁻¹]	0.54	-	0.13	0.22

6. Düngebedarf und Ertragspotential in Folgekulturen

Analyse der N-Einsparpotentiale in den Folgefrüchten (AP4.1 | Lead CAU)

Wie vorgesehen, konnten aus den Felddaten erhobene N-Steigerungsreihen der 1. und 2. Folgefrüchte herangezogen werden, um die Effekte der ZF auf das optimale N-Angebot und die dazugehörigen Erträge zu quantifizieren (Ausnahme Standort UE, da keine Daten zur Brache vorhanden). Dazu wurden an allen Standorten die N-Responsefunktionen für jede Feldwiederholung aller ZF gefittet und so die ökonomisch optimalen N-Düngehöhen bestimmt (Abbildung 25)

Basierend auf diesen 196 Einzelinformationen konnten dann 16 mittlere Differenzen für die beiden Standortgruppen und Folgefrüchte abgeleitet werden (Abbildung 24). Einschränkung muss die Interpretation der Effekte der legumenen ZF Sommerwicke am Sandstandort Kiel gesehen werden, da die Bestandesetablierung schwierig war und von starkem Ausfall- und Durchwuchs überlagert sein kann.

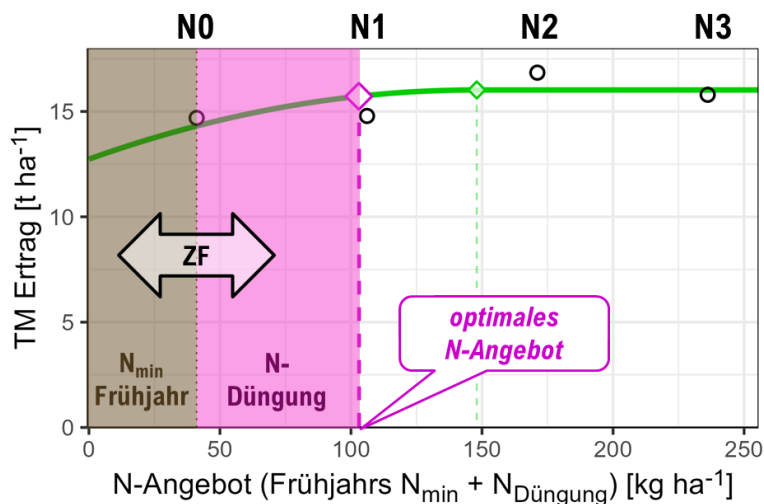


Abbildung 24: Exemplarische Darstellung zur Herleitung der ökonomisch optimalen N-Aufwandmenge in Abhängigkeit der N-Responsefunktion (quadratisch-Plateau), Stickstoff- und Produktpreisen sowie Frühjahrs-N_{min}-Gehalten in 0-90 cm am Beispiel Silomais in Kl.

Dabei zeigt sich eine unterschiedliche Vorzüglichkeit der ZF-Arten, die gut die gegenläufige Mineralisationsdynamik widerspiegelt. Auf sandigem Standort ist die ökonomische optimale N-Düngung nach allen ZF geringer als nach Brache, im Mais allerdings nur nach Ölrettich und Winterroggen auch mit höheren Erträgen verbunden, während der Anbau von Rauhafer und Wicke aufgrund der Mindererträge zu vermeiden ist (Abbildung 25). Auf den Lehmlandorten ergibt sich diese klassische „win-win“ Situation aus höheren Erträgen nach geringer Düngung nur für Rübe nach Wicke und Ölrettich. Für Rübe nach Rauhafer sowie Weizen nach allen ZF ist ein höherer N-Input nötig, um das ökonomische Optimum zu erreichen, dies ist aber nicht als nachteilig einzuschätzen, da es durch höhere Erträge überkompensiert wird (Abbildung 25). Lediglich für Rüben nach Roggen ergibt sich die unvorteilhafte Situation aus höherem N-Bedarf bei gleichzeitig geringeren Erträgen, so dass Roggen als ZF auf lehmigen Rübenstandorten zu vermeiden ist.

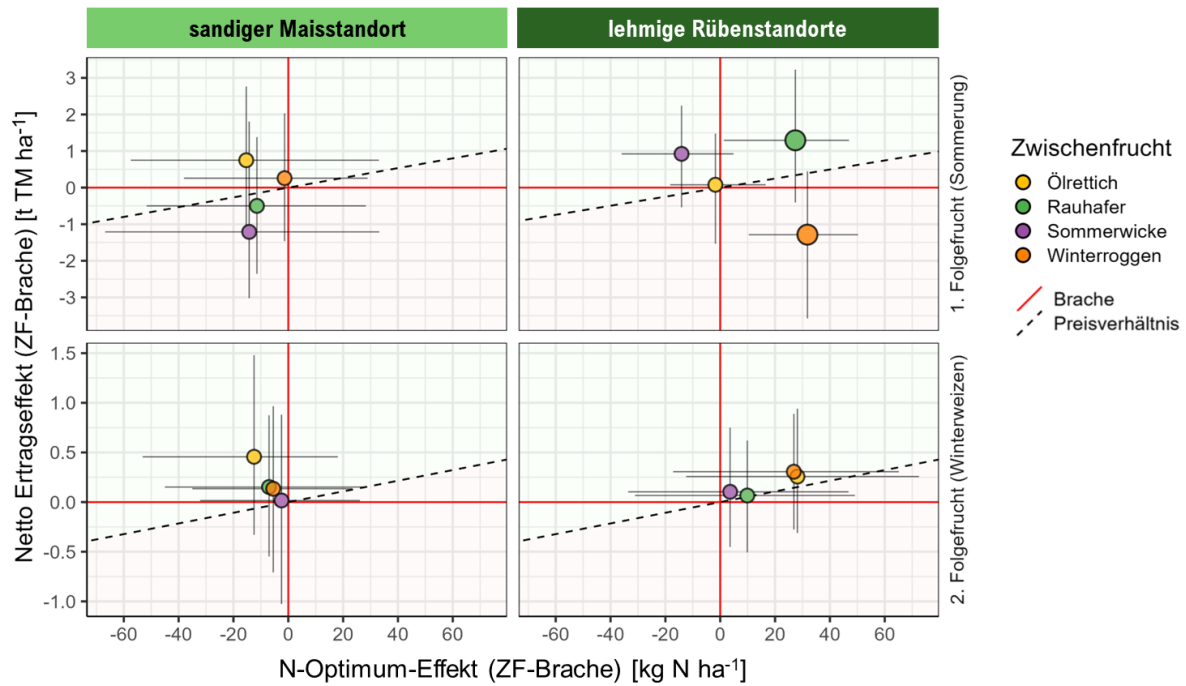


Abbildung 25: Effekte der ZF auf die optimale N-Düngung und den Ertrag. Grün schattierte Bereiche kennzeichnen eine ökonomisch vorteilhafte und rot eine ökonomisch nachteilige Kombination im Verhältnis zur Brache.

Praxisempfehlungen zur Reduktion der N-Düngung in Folgefrüchten (AP 4.2 | Lead LWK NI)

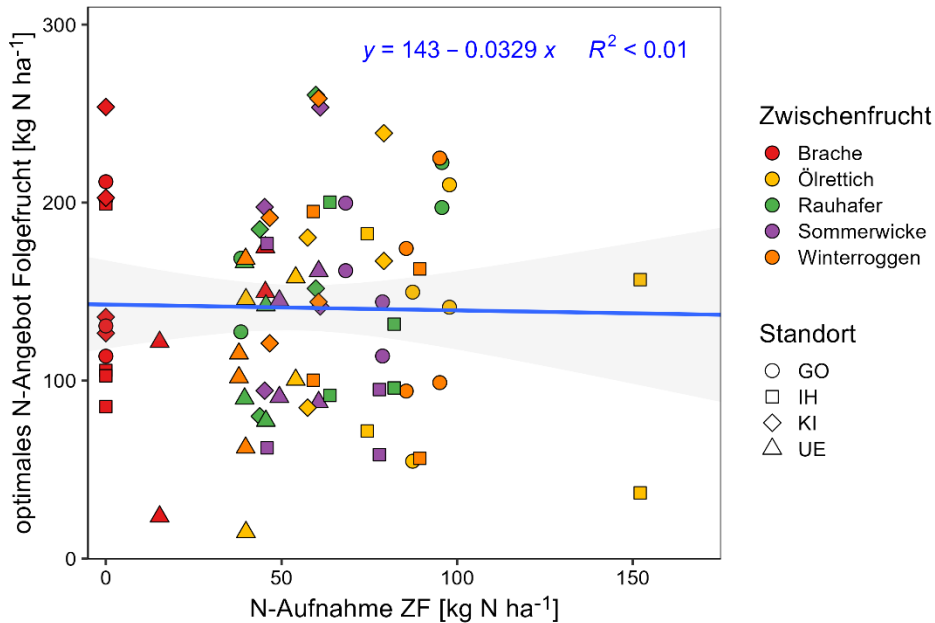
Vergleicht man die Ergebnisse zum optimalen N-Angebot in der 1. Folgekultur nach ZF mit den geltenden Vorgaben der DüV (Tabelle 3), so fällt auf, dass insbesondere der Mindestabschlag in der Kategorie „Nichtleguminosen, abgefroren“ der Leistung des Ölrettich nicht gerecht wird, auch die Wicke („Leguminose, abgefroren“) scheint unterschätzt. Mit Berücksichtigung der unterschiedlichen Frühjahrs-N_{min}-Werte im nächsten Schritt der Düngbedarfsermittlung ergeben sich dann allerdings nur noch geringfügige Unterschiede (vgl. Abbildung 25, Abbildung 26)

Tabelle 3: Gegenüberstellung der Anrechnung von ZF bei der Düngbedarfsermittlung nach DüV mit Ergebnissen des Projektes.

Vorgaben nach DüV	
Zwischenfrucht	Mindestabschlag in kg N/ha
Nichtleguminosen, abgefroren	0
Nichtleguminosen, nicht abgefroren - im Frühjahr eingearbeitet - im Herbst eingearbeitet	20 0
Leguminosen, abgefroren	10
Leguminosen, nicht abgefroren - im Frühjahr eingearbeitet - im Herbst eingearbeitet	40 10
Futterleguminosen mit Nutzung	10
andere Zwischenfrüchte mit Nutzung	0

Ergebnisse THG-ZwiFru	
Unterschiede optimales N-Angebot in kg/ha	
Ölrettich	38 [5...68]
Rauhafer	0 [-17...15]
Winterroggen	26 [-1...70]
Sommerwicke	29 [13...35]

Die alleinige Berücksichtigung der aufgenommenen N-Menge in der ZF-Biomasse vor Winter stellt kein geeignetes Kriterium dar, um die Effekte auf die N-Düngung der Folgekulturen einzuschätzen. In Abbildung 26 ist zu erkennen, dass es keinen statistisch nachweisbaren Zusammenhang zwischen der in der oberirdischen Biomasse gespeicherten N-Menge und dem optimalen N-Angebot (als Summe aus Frühjahrs-N_{min} + ökonomisch optimale Düngermenge) gibt.



7. Langfristige Kohlenstoffspeicherung im Boden (APa | Lead TI)

Modellierungsansatz

Das langfristige Potenzial zur Änderung des Bodenkohlenstoffgehalts (SOC) durch den Anbau von ZF wurde mit Hilfe eines Modellensembles (Seitz et al. 2022), bestehend aus den Modellen RothC und C-Tool (als R-Implementierung in SoilR) in Kombination mit drei allometrischen Funktionen zur Berechnung des Kohlenstoffeintrags aus Ernte- und Wurzelresiduen von Hauptfrüchten (Franko et al. 2011; Jacobs et al. 2018; Rösemann et al. 2021) abgeschätzt. Als Eingangsdaten für die Modellierung werden Informationen zu Kohlenstoffeinträgen aus Ernte- und Wurzelresiduen und organischer Düngung, Klima und Boden benötigt. Die Kohlenstoffeinträge der ZF wurden aus den gemessenen oberirdischen Biomassen (Versuchsdaten) und Wurzel-Spross-Verhältnissen generiert, die wiederum auf Basis von Messungen ober- und unterirdischer Biomassen der ZF am Standort Göttingen abgeleitet wurden. Es wurde angenommen, dass die während der Jahre 2018 und 2019 vorgenommenen Messungen regionalspezifische (GO, IH, KI, UE) mittlere Biomasseentwicklungen repräsentieren. Dieselbe Annahme wurde auch für Bodenkohlenstoffeinträge der im Projekt angebauten Hauptfrüchte getroffen. Waren keine Ertragsmessungen für bestimmte Hauptfrüchte vorhanden, wurden Erträge von Standorten der Bodenzustandserhebung in einem Umkreis

von 50 km herangezogen und gemittelt. Um die Zwischenfruchteffekte auf die Biomasse der Folgefrucht in die Modellierung zu integrieren, wurden variantenspezifische Ernteerträge der 1. und 2. Folgefrucht bei der Berechnung von Kohlenstoffeinträgen aus Ernte- und Wurzelresiduen der Hauptfrucht verwendet. Die nötigen Informationen zu lokalen Klimabedingungen wurden DWD-Rasterdaten der monatlichen Niederschläge, Temperaturen und Globalstrahlung für die Jahre 2018-2021 entnommen (DWD, 2020 a,b,c). Je Standort (GO, IH, KI, UE) wurde je ein Szenario für die standortspezifischen bodenchemischen und -physikalischen Eigenschaften der in 2018 und 2019 etablierten Feldexperimente erstellt.

Die langfristige Veränderung des SOC-Gehalts wurde anhand von zwei unterschiedlichen Szenarios mit standorttypisch angepassten Fruchtfolgen (Tabelle 4) über einen Zeitraum von 50 Jahren simuliert. In den Szenarien wurde angenommen, dass die oberirdischen Ernteresiduen für Winterweizen, Zuckerrübe und Winterraps auf dem Feld verbleiben.

Tabelle 4: Ausgestaltung der Fruchtfolgen (FF) in den beiden Szenarios zur langfristigen Bodenkohlenstoffspeicherung durch Zwischenfrüchte (ZF)

Szenario	FF Maisstandorte	FF Rübenstandorte
1: 2-jähriges ZF Intervall	ZF-Mais-Winterweizen-ZF-Mais- Winterweizen mit Rückführung von jeweils 30 m ³ Gärrest zum Mais	ZF-Zuckerrüben-Winterweizen-ZF-Mais- Winterweizen mit Rückführung von 30 m ³ Gärrest zum Mais
2: 4-jähriges ZF Intervall	ZF-Mais-Winterweizen-Winterraps- Winterweizen mit Rückführung von 30 m ³ Gärrest zum Mais	ZF-Zuckerrüben-Winterweizen- Winterraps-Winterweizen ohne organi- sche Düngung

Simulationsergebnisse

Nach den Modellrechnungen führt die Implementierung von ZF in Mais-Winterweizen- und Zuckerrüben-Winterweizen-Mais-Winterweizen-Fruchtfolgen in zweijährigem Turnus unter den gewählten Versuchsbedingungen zu einer Bodenkohlenstoffsequestrierung, die gemittelt über alle Standorte etwa 357 kg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ für Ölrettich, 403 kg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ für Rauhafer, 302 kg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ für Wicke und 412 kg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ für Roggen bezogen auf einen 50-jährigen Zeitraum entspricht. Bei einem Zwischenfruchtanbau in vierjährigem Turnus in Zuckerrüben-Winterweizen-Winterraps-Winterweizen- bzw. Mais-Winterweizen-Raps-Winterweizen-Fruchtfolgen halbieren sich diese Kohlenstoffvorratsänderungen in etwa und entsprechen 193, 229, 174 und 220 kg CO₂ ha⁻¹ a⁻¹ (Reihenfolge der ZF wie zuvor, Abbildung 27). Standorteffekte waren vor allem beim Vergleich des Standorts Uelzen mit den übrigen drei Standorten zu erkennen. Aufgrund geringerer Biomasseentwicklung der ZF war auch der Zwischenfruchteffekt für Uelzen deutlich kleiner. Im Vergleich zum Mittel der anderen drei Standorte wurden hier für Ölrettich, Rauhafer, Sommerwicke und Winterroggen durch ZF-Anbau nur etwa 54 %, 57 %, 80 % und 38 % der Bodenkohlenstoffsequestrierung der anderen Standorte realisiert.

Beim Vergleich zwischen verschiedenen ZF führt Winterroggen zu den höchsten Sequestrierungsraten gefolgt von Rauhafer (98 % im Vergleich zu Winterroggen), Ölrettich (87 %) und Sommerwicke (73 %). Diese Verhältnisse können sich bei standortspezifischer Betrachtung

tung auch anders verhalten. So zeigte die Sommerwicke in Uelzen mit die höchsten Sequestrierungsraten.

Vergleicht man die Biomassen der Zwischenfrüchte (oberirdischer Anteil gemessen; unterirdischer Anteil mithilfe von Wurzel-Spross Verhältnissen des Standorts Göttingens geschätzt) mit Daten aus der Literatur (Kanders und Berendonk 2013; Poeplau und Don 2015; Lütke-Entrup et al. 2018) wird deutlich, dass die erstgenannten relativ gering ausfallen, was wahrscheinlich mit dem vergleichsweise späten Aussaatzeitpunkt von ZF in den Feldexperimenten zusammenhängt, aber auch durch die Witterung in den beiden Jahren beeinflusst wurde. Die Literaturdaten legen nahe, dass die Biomassen zum Umbruch und damit auch die C Einträge der getesteten ZF durchaus um 50 % bis 100 % höher ausfallen können. Da in den verwendeten Modellen C-Einträge und SOC-Änderungen linear verknüpft sind, würde hieraus eine Steigerung der Sequestrierungsraten um 50 % bis 100 % folgen.

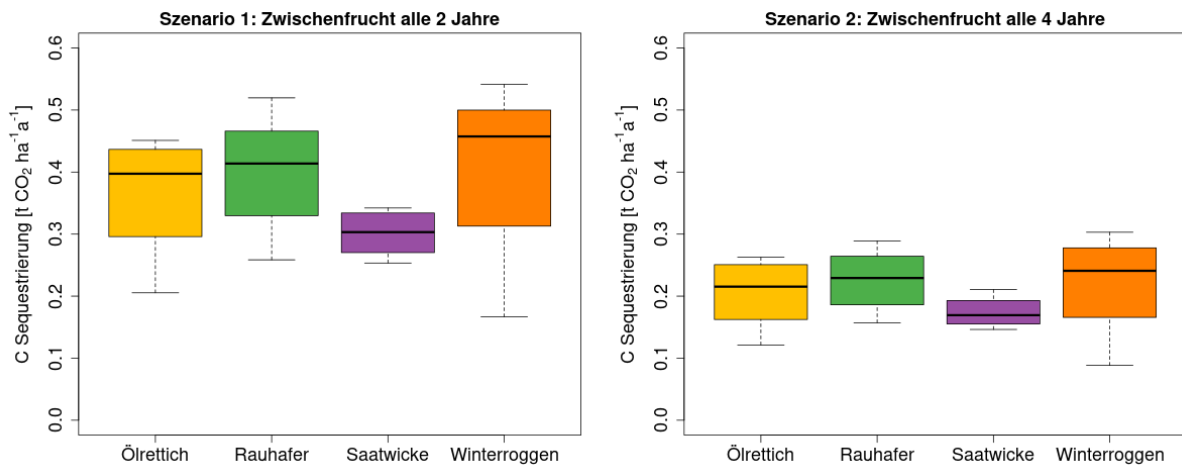


Abbildung 27: Boxplots modellierter mittlerer Sequestrierungsraten [t CO₂ ha⁻¹a⁻¹] für einen Bezugszeitraum von 50 Jahren

Die verwendeten Modelle sind reine Bodenkohlenstoffmodelle, was zu einer Reihe von Restriktionen und Unwägbarkeiten führt. Das Pflanzenwachstum als Ausgangsgröße der C-Eintragsberechnung wird nicht modelliert, sondern wird durch experimentelle Größen und Werte aus der Statistik geschätzt. Insbesondere für die C-Eintragsmodellierung aus ZF ergibt sich die Unsicherheit, ob die benötigten durchschnittlichen Zwischenfruchtbiomassen durch zwei Jahreswerte der eher trockenen Jahre 2018 und 2019 gut repräsentiert werden. Darüber hinaus mag die Stickstoffverfügbarkeit bei Biomasseaufwuchs und Kohlenstoffnutzungseffizienz bei der Umsetzung von Ernteresiduen zu Humus eine Rolle spielen (Jian et al. 2020). Dies wird durch die verwendeten Modelle nicht berücksichtigt.

8. Bewertung des ZF-Anbaus unter Klimaschutzaspekten

THG-Bilanzierung (AP7.1 | Lead CAU & TI)

Summiert man die unter Punkt 4 bis 7 beschriebenen Emissionen der einzelnen Pfade in Form von CO₂-Äquivalenten laut Tabelle 5, lassen sich standortdifferenzierte Gesamtbewertungen vornehmen.

Tabelle 5: Verwendete Faktoren und Quellen zur Umrechnung der THG-Emissionen in CO₂-Äquivalente (CO₂eq), Nummerierung analog zu Bewertungsschema in Abbildung 4.

Pfad	Umrechnung	Faktor	Quelle
4. (direkte N ₂ O-Verluste)	N ₂ O-N → N ₂ O → CO ₂ eq	N ₂ O-N * 44/28 * 273	IPCC AR6 (2022)
5. (indirekte Lachgasverluste)	NO ₃ -N → N ₂ O-N → N ₂ O → CO ₂ eq	NO ₃ -N * EF5 (1.1 %) * 44/28 * 273	(IPCC 2019), IPCC AR6 (2022)
6. (veränderter N-Bedarf)	Herstellungsemissionen KAS-N → CO ₂ eq	KAS-N * 3.67	JRC Database (Edwards et al. 2019)
7. (Boden-Kohlenstoffspeicherung)	SOC → CO ₂ eq	SOC * 44/12	

Die gewonnenen Emissionsdaten stammen sowohl aus Felderhebungen als auch aus Simulationsergebnissen oder daraus abgeleiteten Werten (Abbildung 28) und sind mit unterschiedlichen Unsicherheiten behaftet. Während die im Feld gemessenen Daten eine präzise Differenzierung der untersuchten ZF-Arten erlauben, ist die Aussagekraft für langfristige Effekte bzw. durchschnittliche Witterungsverläufe geringer. Dahingegen erlauben Simulationsergebnisse eine bessere Einordnung der langfristigen Effekte und Aussagen zu repräsentativen Witterungsverläufen, aber keine gesicherte Unterscheidung zwischen den ZF-Arten. Aus diesem Grund wurden die empirischen Daten artspezifisch in die Gesamtbilanz aufgenommen, die simulierten Daten aber nur artübergreifend als generische Zwischenfrucht im Unterschied zur Brache. Unabhängig davon wirken die direkten N₂O-Emissionen aus ZF-Anbau tendenziell belastend auf die gesamte THG-Bilanz, die indirekten N₂O-Emissionen und die langfristige SOC-Speicherung entlastend und der Effekt auf die Herstellungsemissionen der mineralischen N-Düngung kann unterschiedlich ausfallen (vgl. Farben, Abbildung 28).

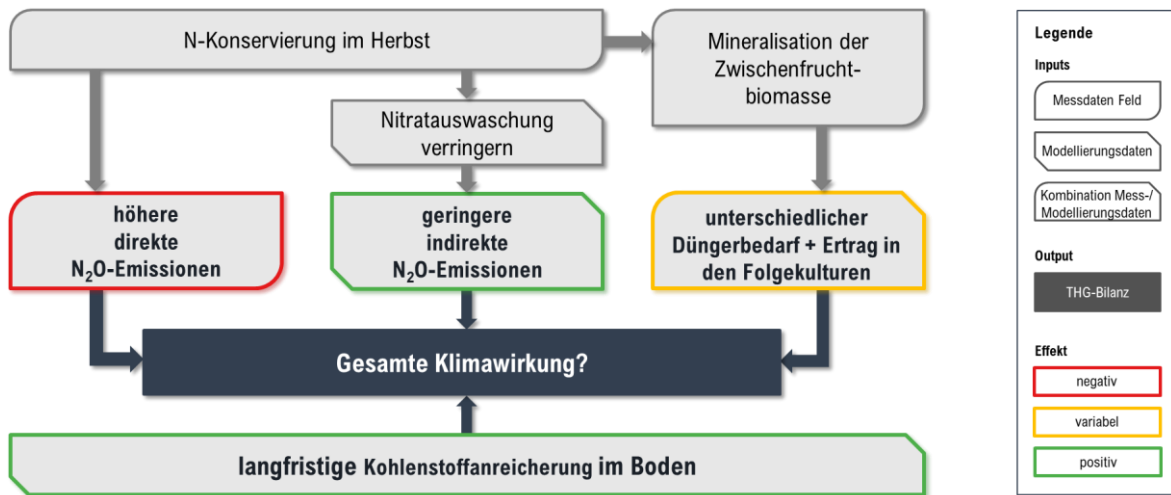


Abbildung 28: Datenherkunft (Formen) und tendenzielle Richtung (Farben) der Be- bzw. Entlastung der gesamten Treibhausgas (THG)-Bilanz

In der Gesamtbilanz der THG-Emissionen der untersuchten ZF im Vergleich zur Brache ergeben sich unter der Annahme eines vierjährigen ZF-Anbaus in den langfristig simulierten Fruchtfolgen gegenteilige Klimaeffekte zwischen den beiden Standortgruppen (Abbildung 29). Auf dem sandigen Mais-Standort ist ein geringfügiger Netto-Klimaschutzeffekt mit einem CO₂-Sequestrierungspotential von -145 kg CO₂eq ha⁻¹ a⁻¹ im Mittel über alle Zwischenfrüchte zu erwarten (Winterroggen gepflügt weist höhere Netto-Emissionen auf als Brache, alle anderen ZF geringere). Auf den lehmigen Rübenstandorten sind die Netto-Emissionen aller ZF-Arten größer als die der Brache (+638 kg CO₂eq ha⁻¹), am geringsten bei Wicke und am höchsten bei gepflügtem Winterroggen.

Im deutlich optimistischeren Szenario mit Fruchtfolgen, in denen in jedem zweiten Jahr ZF angebaut werden, werden auch der Winterroggen vor Mais auf Sand sowie die Sommerwicke auf den lehmigen Rübenstandorten zu knappen Netto-CO₂eq-Senken. Die anderen Situationen bleiben von ihrer Nettowirkung identisch, durch die häufigere Berücksichtigung der langfristigen Bodenkohlenstoffanreicherung fallen die Werte insgesamt um 185 kg CO₂eq ha⁻¹ a⁻¹ geringer aus. Während dieses zweijährige ZF-Szenario in Maisfruchtfolgen durchaus praxisrelevant ist, hat auf den besseren Böden der Rübenstandorte die Fruchtfolge mit vierjährigem ZF-Intervall eine größere Bedeutung.



Abbildung 29: Jährliche Netto-THG-Bilanz Zwischenfrucht (ZF) vs. Brache. Datengrundlage: artspezifische direkte N_2O -Emissionen für ZF+1. Folgefrucht, artübergreifende indirekte N_2O -Emissionen ZF, artspezifische N-Düngereinsparung 1.+2. Folgefrucht, artübergreifende Bodenkohlenstoffspeicherung (SOC) bei ZF-Anbau alle 4 Jahre über Zeitraum von 50 Jahren.

Wie in Abbildung 29 deutlich zu erkennen ist, sind die bei Ölrettich und Roggen auf den Rübenstandorten aufgetretenen hohen direkten Lachgasemissionen durch deren große Klimawirksamkeit („global warming potential“ von 273 im Vergleich zu CO_2) nur schwierig durch Düngereinsparung und/oder Bodenkohlenstoffanreicherung zu kompensieren. Daher gilt es als Klimaschutzstrategie im ZF-Anbau auf lehmigen Standorten die direkten N_2O -Emissionen und auf sandigen Standorten die NO_3^- -Verlagerung zu minimieren.

Auch die relative Vorzüglichkeit der einzelnen ZF-Arten ist unterschiedlich auf den Standorten einzuschätzen: Ölrettich und Rauhafer bieten das größte Klimaschutzpotential in Maisfruchtfolgen auf sandigen Böden, Wicke und Rauhafer verursachen dagegen die geringste Klimawirkung in Rübenfruchtfolgen auf lehmigen Standorten. Auf den Pflugumbruch von winterharten Zwischenfrüchten sollte aus Klimaschutzperspektive auf allen Standorten verzichtet werden. Grundsätzlich gilt, dass eine gute Biomassentwicklung der ZF vor Winter die positiven Wirkungen fördert.

Wir möchten darauf hinweisen, dass mögliche Rückwirkungen eines gesteigerten Humusgehalts auf die direkte Lachgasemission in dieser Betrachtung nicht berücksichtigt sind (Li et al. 2005; Guenet et al. 2020). In der zusammenführenden Darstellung der unterschiedlichen Klimawirkungen von ZF (Abbildung 29) werden weder die zeitliche Begrenzung des Humusaufbaus (Einstellung eines neuen Humusgleichgewichts), noch die potenzielle Klimabelastung durch die Reversibilität des Humusaufbaus bei Beendigung des ZF-Anbaus berücksichtigt. Die einzelnen Bereiche lassen sich über die Ausweisung von CO_2eq in ihrer kurzfristigen Klimawirkung vergleichen. Längerfristig ist der Klimaschutzbeitrag der ZF durch Humusaufbau abnehmend und zudem risikobehaftet. Auf der anderen Seite sind die indirek-

ten Klimaschutzwirkungen der zumindest teilweise beobachteten Ertragssteigerungen nicht in die Bewertung eingeflossen.

Implementierungskosten/Ökonomische Bewertung (AP7.2 & APd | Lead LWK NI)

Neben den reinen N-Effekten müssen für eine praxisrelevante Bewertung auch die zusätzlichen Anbaukosten (Direkt- und Arbeitserledigungskosten) für den Zwischenfruchtanbau zu aktuellen Faktor- und Produktpreisen berücksichtigt werden. Abbildung 30 stellt dies für alle ZF incl. der Kostenanteile einzelner Anbauschritte dar (Tabelle 6). Die Berechnungen basieren auf den Richtwert-Deckungsbeiträgen 2021 der Landwirtschaftskammer Niedersachsen.

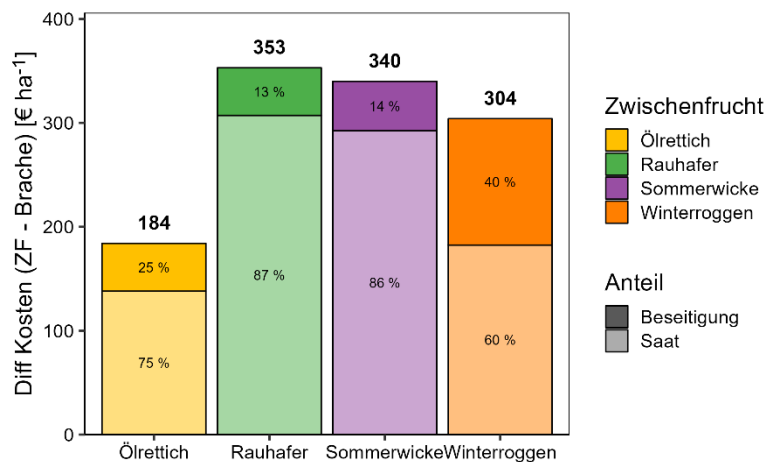


Abbildung 30: Kostenanteil (in %) des Saatguts und der Aussaat (grau hinterlegte Balkenabschnitte) sowie der Beseitigung der Zwischenfrucht/Beikrautflora (einfarbig hinterlegte Balkenabschnitte) an den gesamten Direkt- und Arbeitserledigungskosten (in €/ha) unter der Bedingung aktuell hoher Faktor- und Produktpreise. Alle Werte basieren auf Preisen ohne Mehrwertsteuer.

Es fallen die hohen Direkt- und Arbeitserledigungskosten für das Saatgut und die Aussaat für Rauhafer und Sommerwicke auf. Örettich stellt sich mit 184 €/ha als die kostengünstigste Variante dar, da hier die Saatgutkosten von 104 €/ha vergleichsweise gering sind. Im Fall der winterharten Art Winterroggen stechen die hohen Kosten für die Einarbeitung der Zwischenfrucht mithilfe der Pflugfurche heraus. Die Kosten für die Zwischenfrucht beseitigung machen hier 40 % der Gesamtkosten aus.

Tabelle 6 stellt die Erlöse der Hauptfrüchte Zuckerrüben und Winterweizen dar, bereinigt um die Düngekosten der Hauptfrüchte und die Direkt- und Arbeitserledigungskosten der ZF in Abhängigkeit von der jeweiligen ZF bzw. Brache (N- und ZF-kostenfreie Leistung). Die Werte für Erlöse und Düngekosten basieren auf den Berechnungen der ökonomisch optimalen N-Düngung und des entsprechenden ökonomisch optimalen Ertrags.

Tabelle 6: N- und ZF-kostenfreie Leistung (N+ZFKFL) bei aktuell hohem Preisniveau (Stand Herbst 2022) für die Sommerung Zuckerrübe bzw. Mais und Winterung Winterweizen nach den unterschiedlichen Zwischenfrüchten/Brache im Mittel der Standorte und Jahre. Unterschiedliche Kleinbuchstaben signalisieren signifikante Unterschiede zwischen den ZF-Varianten.

Zwischenfrucht	Brache	Örettich	Rauhafer	Sommerwicke	Winterroggen
Zuckerrübenfruchtfolge, schwere Standorte					
N+ZFKFL €/ha	5129 a	5183 a	4958 a	5090 a	4861 a
Maisfruchtfolge, leichte Standorte					
N+ZFKFL €/ha	4373 a	4425 a	4090 ab	3798 b	4222 ab

Auf den im Versuch untersuchten Zuckerrübenstandorten zeigen sich keine signifikanten Unterschiede in der N- und ZF-kostenfreien Leistung zwischen den ZF im Vergleich zur Brache. Auf den Maisstandorten war die N- und ZF-kostenfreie Leistung für Sommerwicke signifikant geringer als in der Brache, was vermutlich auf den geringen legumenen Effekt der schlecht etablierten Wicke zwischen dominierendem Ausfallraps zurückzuführen ist, der die hohen Saatgutkosten nicht kompensieren konnte.

Standortdifferenzierte Synthese (alle Projektpartner)

In Verbindung der Feldversuchs- und Modellierungsergebnisse zeigten sich große Unterschiede in der Vorzüglichkeit einzelner Zwischenfruchtarten und hinsichtlich der optimalen Anbaustrategien für die jeweiligen Standorteigenschaften.

Auf verlagerungsgefährdeten Sandstandorten im Norden mit typischen Mais-Fruchtfolgen (Kiel, Uelzen) konnten die direkten Lachgasemissionen des ZF-Anbaus durch die Verminderung indirekter Emissionen aus Nitratverlagerung sowie die geringfügig niedrigere N-Düngung im ökonomischen Optimum und langfristige Kohlenstoffanreicherung kompensiert werden. Nicht-winterharte ZF mit guter Biomasseentwicklung wie Ölrettich oder Rauhafer zeigten auf Sandstandorten die größten Effekte. Auf den südlicher gelegenen Lössstandorten mit typischen Zuckerrüben-Fruchtfolgen (Göttingen, Ihinger Hof), auf denen die Nitratverlagerung weniger problematisch einzuschätzen ist, fielen die höheren direkten Lachgasemissionen bei ZF-Anbau stärker ins Gewicht. Durch das hohe Treibhausgaspotential von Lachgas (273-fache CO₂-Wirkung) wurden hier die erhöhten Lachgasemissionen nicht durch positive Leistungen der ZF (verminderter Düngerbedarf, langfristige Kohlenstoffspeicherung) kompensiert. Durch weniger synchrone N-Mineralisation der Zwischenfruchtbiomasse und N-Aufnahme der Folgefrucht Zuckerrübe ergab sich teilweise ein höherer N-Düngerbedarf in den Folgekulturen im ökonomischen Optimum, der allerdings partiell auch zu einer überproportionalen Ertragssteigerung führte. Insbesondere die winterharte ZF Roggen mit anschließender Pflugfurche war dort besonders ungünstig einzuschätzen, während Sommerwicke die geringsten Netto-Gesamtemissionen aufwies.

Auf Sandstandorten überwogen in Summe die positiven Effekte des Zwischenfruchtanbaus. Die Anbauentscheidung sollte dort auf die maximale Reduktion der Nitratverlagerung fokussiert werden. Dahingegen sollte auf Lössstandorten die Minimierung der direkten Lachgasemissionen und Wirkung auf den N-Düngerbedarf der Folgefrüchte im Zentrum der Anbauentscheidung stehen. Mit Blick auf die im Projekt untersuchten ZF führt dies zu unterschiedlicher Vorzüglichkeit von Ölrettich/Rauhafer auf sandigen und Wicke/Rauhafer auf lehmigen Standorten. Neben einer Anbauentscheidung zur reinen Minimierung der THG-Emissionen kann allerdings auch die Berücksichtigung weiterer Ökosystemleistungen standortspezifisch relevant sein.

Praxistransfer

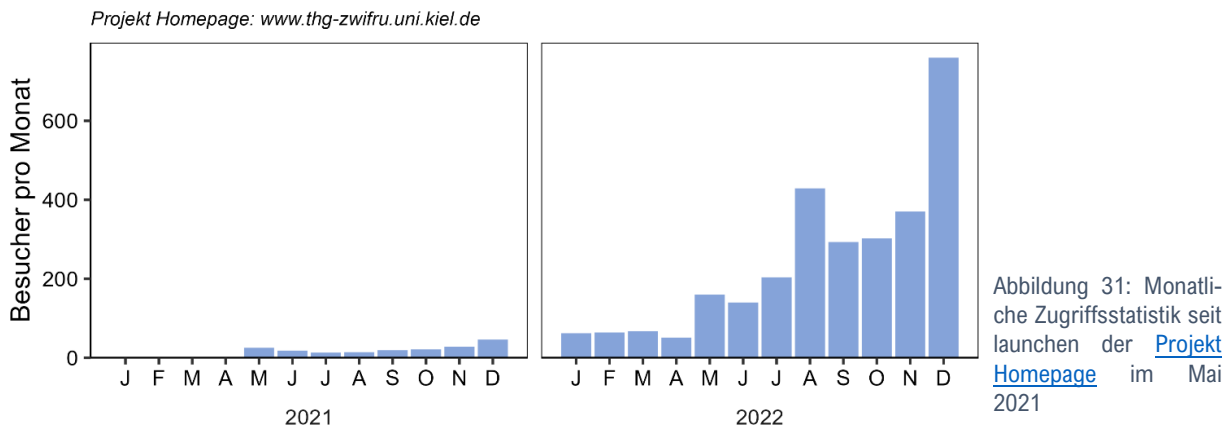
Kommunikation & Öffentlichkeitsarbeit (AP1.1, APe | Lead CAU & PHP)

Die im Projekt erzielten Ergebnisse wurden auf vielfältigen Kanälen in Wissenschaft und Praxis kommuniziert. Projektintern wurden regelmäßige Meetings abgehalten, corona-bedingt zeitweise ausschließlich online. Darüber hinaus wurde im Verbundkontext KlimAgrar mitgewirkt und ein Feldtag mit Zielgruppe Praxis und Beratung veranstaltet (s. Tabelle 7).

Tabelle 7: Durchgeführte Projekttreffen, Feldtage und Aktivitäten im KlimAgrar-Verbundvorhaben

2019	2020	2021	2022
Präsentation auf KlimAgrar Konferenz 7.-8.2.2019 Berlin	3.6.2020 online	15.1.2021 online	15.2.2022 online
26.2.2019 (Hannover)	20.7.2020 online	8.7.2021 online	25.8.2022 Göttingen
28.6.2019 online	29.10.2020 online	Ausrichtung KlimAgrar Arbeitstagung „Strategien im Pflanzenbau“ 22.-23.9.2021 Kiel	Ausrichtung ZF-Feldtag (LWK NI) 12.10.2022 Poppenburg
21.11.2019 (Göttingen)		Präsentation auf KlimAgrar Konferenz 18.-19.11.2021 Berlin	1.12.2022 Göttingen

Im Mai 2021 wurde die Projekt-Homepage mit ersten Ergebnissen ins Netz gestellt, im Jahr 2022 konnten zunehmend steigende Zugriffszahlen registriert werden. Neben den direkten Seitenaufrufen waren Weiterleitungen aus dem Thekla-Verbund die zweitgrößte Besuchergruppe, was eine erfolgreiche Vernetzung innerhalb Deutschlands demonstriert. In einer separaten Rubrik „Praxistransfer“ werden die Eigenschaften der Zwischenfrüchte sowie grundsätzliche Zusammenhänge anschaulich für Praktiker vorgestellt sowie die Versuchsergebnisse anschaulich visualisiert.



Kongressbeiträge

Wissenschaftliche Beiträge zu Projektergebnissen auf nationalen und internationalen Konferenzen sind in Tabelle 8 aufgelistet.

Tabelle 8: Präsentationen in Form von Vorträgen (V) und Postern (P) auf wissenschaftlichen Konferenzen

Jahr	Konferenz	Beitrag	
2019	GPW Berlin	Räbiger et al.: Minderung von Treibhausgasemissionen in der Pflanzenproduktion durch optimierte Zwischenfruchtanbausysteme	P
	DLG Ausschusstreffen	Essich et al.: Vorstellung des Hohenheimer Versuchs	V
	LWK NI Feldtag	Merl & Schaper: Lachgasmessungen in ZF-Beständen	V
2021	GPW Rostock	Kühling/Räbiger et al.: Klimaschutz durch Zwischenfruchtanbau? Ergebnisse eines 3-jährigen Verbundprojektes	V
	Thekla online	Kühling et al.: Potentiale von Zwischenfrüchten in standortangepasst optimierten Anbausystemen als Beitrag zum Klimaschutz	V
2022	IIRB Mons	Koch et al.: How much fertiliser nitrogen can we save through cover crop cultivation?	P
	IIRB Mons	Grunwald et al.: Effects of different cover crops on soil structure and succeeding young sugar beet under contrasting N fertilization	V
	ESA Potsdam	Kühling et al.: Are cover crops climate friendly?	V
	ESA Potsdam	Mikuszies et al.: Impact of cover crop termination time on N mineralisation dynamics and direct N ₂ O emissions	P
	ESA Potsdam	Grunwald et al.: Effects of cover crops with contrasting properties on soil structure and subsequent early sugar beet with varied N fertilization	P
	ESA Potsdam	Koch et al.: Saving fertilizer N in Central European sugar beet cultivation through cover cropping	P
	DBG Trier	Kühling et al.: HUME-CC Ein dynamisches Pflanzenwachstumsmodell für Winterzwischenfrüchte	P
	DBG Trier	Mikuszies et al.: Effekte des Umbruchtermins von Winterzwischenfruchtbeständen auf N-Mineralisation und N ₂ O-Emissionen	P
	DBG Trier	Essich et al.: Einfluss der Qualität und Menge von 15N-markiertem Ölrettich auf die 15N-N ₂ O-Emissionen eines Zuckerrübenbestands	V
	DBG Trier	Frößl et al.: Einfluss verschiedener Zwischenfrüchte auf die N-Mineralisation im ApHorizont einer ackerbaulich genutzten Parabraunerde	P
	DBG Trier	Helfrich et al.: Influence of different cover crops before maize cropping on soil nitrogen dynamics and N ₂ O emissions	P
	N Madrid	Workshop Flessa et al.: Effects of different cover crops before maize cropping on soil nitrogen dynamics and N ₂ O emission	V
	N Madrid	Workshop Kühling et al. Nitrogen immobilisation, mineralisation, and uptake of silage maize and sugar beet following cover crops from different functional groups	V
	N Madrid	Workshop Nasser et al. Cover crop's effect on agricultural soils mineral N dynamics and nitrous oxide emissions (Best Poster Award)	P
	IIRB Tulln	Plant & Soil Grunwald et al.: Effects of different cover crops on succeeding sugar beet fine roots and plant growth	V
	IIRB Tulln	Plant & Soil Koch et al.: Temporal variation of cover crop N supply to subsequent sugar beet and maize	V
	Thekla online	Kühling et al.: Klimaschutzpotenzial von standortangepassten Zwischenfrucht-Anbausystemen	V

C ANHANG

Methodik Kohlenstoff

Berechnung des Kohlenstoffeintrags für Ernte-Wurzel Residuen von Hauptfrüchten und Zwischenfrüchten

Für die Versuchsstandorte in Göttingen lagen Messungen unterirdischer Zwischenfruchtbiomassen für die ZF Ölrettich, Rauhafer, Sommerwicke und Winterroggen in unterschiedlichen Tiefen zum Zeitpunkt maximaler Biomasseentwicklung vor. Um den Kohlenstoffeintrag für Wurzelbiomassen aus ZF für den interessierenden Horizont von 0 – 30 cm Profiltiefe abzuleiten, wurde ein Ansatz nach (Gale und Grigal 1987) zur Beschreibung der Wurzelverteilung in Abhängigkeit von der Tiefe herangezogen:

$$Y = 1 - \beta^d$$

Hier ist Y die mit der Tiefe zunehmende Wurzelfraktion, β ein Parameter und d die Tiefe des Profils in cm. Auf Basis pflanzenspezifisch verfügbarer Daten zur unterirdischen Biomasse am Standort Göttingen wurden pflanzenspezifische Parameter β über Kalibrierung ermittelt (Abbildung A 1, Tabelle A 1). Dabei zeigt sich, dass der geschätzte Anteil der Wurzel im 0-30 cm Tiefenprofil bei Winterroggen (89 %) höher als bei Rauhafer, Sommerwicke (je 79 %) und Ölrettich (60%) ist. Bezogen auf die hier betrachtete Profiltiefe von 0-30 cm ergeben sich damit Wurzel zu Spross Verhältnisse von 0.11 (Ölrettich), 0.24 (Rauhafer), 0.13 (Sommerwicke) und 0.33 (Grünroggen).

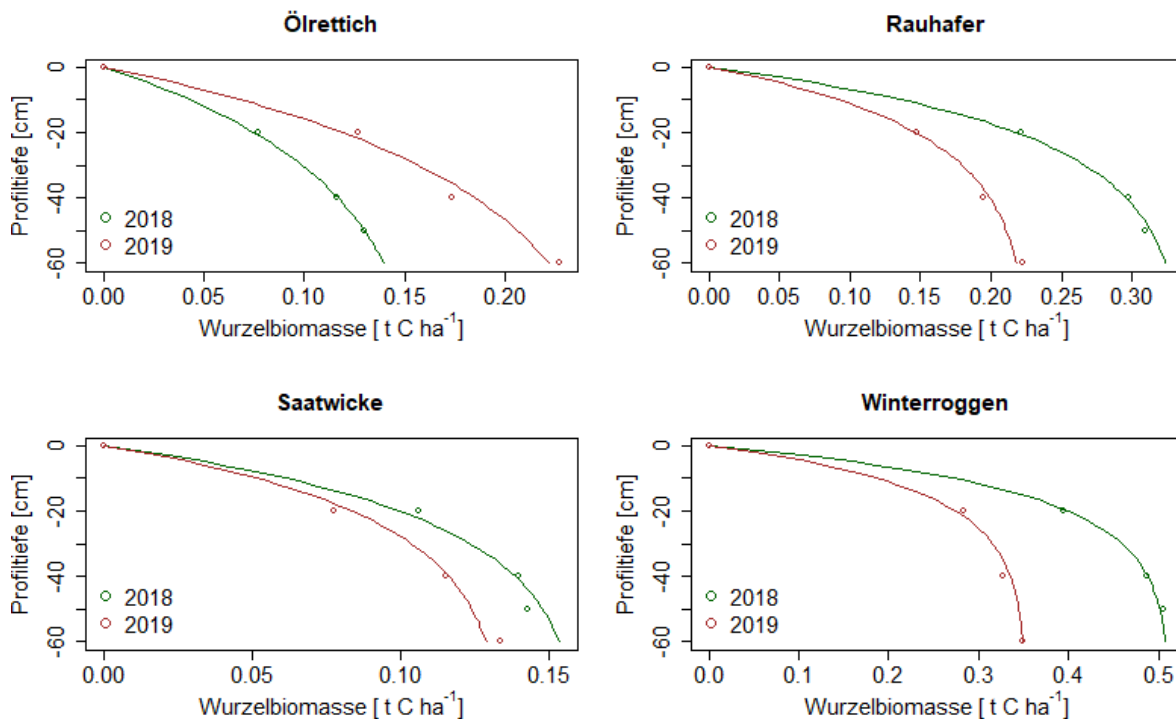


Abbildung A 1: Mit der Tiefe akkumulierte Wurzelbiomasse (CW) in t C ha⁻¹ basierend auf Messungen am Standort Göttingen, sowie die artenspezifisch gefittete Funktion nach (Gale und Grigal 1987)

Tabelle A 1: Pflanzenspezifische Parameter für die Formel nach (Gale und Grigal 1987), abgeleitete Wurzelbiomassen und Anteile der Wurzelbiomasse in den Tiefen 0-20cm und 0-30cm

Zwischenfrucht	β	C_w 2018	C_w 2019	Anteil C_w in 0–20 cm [%]	Anteil C_w in 0–30 cm [%]
Ölrettich	0.97	0.17	0.27	46	60
Rauhafer	0.95	0.34	0.23	64	79
Sommerwicke	0.95	0.16	0.14	64	79
Winterroggen	0.93	0.51	0.35	77	89

Für die Kontrollvarianten ohne Zwischenfruchtanbau nimmt der berechnete mittlere C Eintrag in der Reihenfolge GO, IH, KI, UE ab (Tabelle A 2). Dies gilt sowohl für Fruchtfolge 1 (WW-ZR-WW-Mais bzw. WW-Mais) als auch Fruchtfolge 2 (WW-ZR-Winterraps bzw. WW-Mais-Winterraps). Standortbezogen, führt Fruchtfolge 2 zu höheren Einträgen organischer Biomasse als Fruchtfolge 1. Dabei liegen die Differenzen zwischen Fruchtfolge 1 und 2 im Mittel zwischen $0.36 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $0.44 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, auch wenn im Schnitt etwas mehr Gärreste in Fruchtfolge 1 (Differenz von $0.16 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ausgebracht werden. Dies liegt vor allem an den Ernteresiduen des Winterraps, der die Zuckerrübe bzw. den Silomais aus Fruchtfolge 1 ersetzt.

Tabelle A 2: Mittlerer Kohlenstoffeintrag [$\text{t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$] aus Ernte-Wurzel Residuen und organischer Düngung für die Fruchtfolgen 1 und 2 ohne Anbau von Zwischenfrüchten

Fruchtfolge	Standort	$C_{in_oberirdisch}$	$C_{in_unterirdisch}$	$C_{in \text{ org. Düngung}}$	$C_{in \text{ total}}$
1	GO	2.57	1.42	0.16	4.15
2	GO	3.08	1.44	0	4.51
1	IH	2.32	1.29	0.16	3.76
2	IH	2.83	1.32	0	4.15
1	KI	1.72	1.5	0.31	3.53
2	KI	2.28	1.53	0.16	3.97
1	UE	1.24	1.15	0.31	2.7
2	UE	1.73	1.18	0.16	3.07

Grünroggen führt im Mittel zu den höchsten C Einträgen (Tabelle A 3), die über die Standorte gemittelt etwa 9.8 % bzw. 4.4 % der C-Einträge der Kontrollvarianten für Fruchtfolgen 1 und 2 betragen. Es schließen sich Rauhafer (9.4 % und 4.2 %), Ölrettich (7.6 % und 3.8 %) und Sommerwicke (6.2 % und 2.8 %) an. Beim Vergleich der 4 Regionen bezüglich des C Eintrags aus ZF wird deutlich, dass die Sommerwicke eine relativ geringe Variation aufweist, während die Variabilität für die restlichen ZF recht hoch ist (Variationskoeffizienten zwischen 19 % und 27 %) und der Standort Uelzen typischerweise die geringsten C Einträge für Ölrettich, Rauhafer und Grünroggen zeigt.

(Poeplau und Don 2015) dokumentieren in einer Metastudie Kohlenstoffeinträge aus ZF von im Mittel $1.87 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ (95% Konfidenzintervall zwischen $1.65 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ und $2.09 \text{ t C ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$). Die hier berechneten Werte für den gesamten C- Eintrag aus ZF sind verglichen mit

diesem Wertebereich vergleichsweise gering (Tabelle A 3). Dies zeigt auch ein Vergleich mit in Entrup et al. (2018) und (Kanders und Berendonk 2013) veröffentlichten Wertebereichen von oberirdischen und unterirdischen Biomassen von ZF in Deutschland (Abbildung A 2). Eine wahrscheinliche Ursache für diese Diskrepanz liegt in den Aussaatzeitpunkten der ZF begründet. Mit einer Ausnahme wurden die ZF auf den Versuchsfeldern Ende August bis Anfang September ausgebracht. Anzustreben sind aber relativ frühe Aussaattermine, da die strahlungsreichen Monate August und September essenziell für eine optimale Biomassebildung sind. Für die Berechnung des Kohlenstoffeintrags aus Wurzelexsudaten wurde angenommen, dass dieser 31 % des Eintrags aus der Wurzelmasse entspricht (Jacobs et al. 2020).

Tabelle A 3: Geschätzter mittlerer C-Eintrag aus Zwischenfrüchten in ($t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$) für eine Profiltiefe von 0-30 cm unter GOK

Cin Typ	Zwischenfrucht	GO	IH	KI	UE
C _{Spross}	Ölrettich	1.16	1.22	1.08	0.72
C _{Spross}	Rauhafer	0.94	0.96	1.36	0.74
C _{Spross}	Sommerwicke	0.82	0.7	0.66	0.74
C _{Spross}	Winterroggen	1.16	1.28	0.94	0.58
C _W	Ölrettich	0.16	0.18	0.16	0.1
C _W	Rauhafer	0.3	0.3	0.42	0.24
C _W	Sommerwicke	0.14	0.12	0.14	0.14
C _W	Winterroggen	0.5	0.54	0.42	0.26
C _{total}	Ölrettich	1.32	1.4	1.24	0.82
C _{total}	Rauhafer	1.24	1.26	1.78	0.98
C _{total}	Sommerwicke	0.96	0.82	0.78	0.86
C _{total}	Winterroggen	1.66	1.82	1.36	0.82

C_{Spross} Kohlenstoffeintrag aus der oberirdischen Biomasse
 C_W Kohlenstoffeintrag aus der unterirdischen Biomasse
 C_{total} Kohlenstoffeintrag aus der Gesamtpflanze

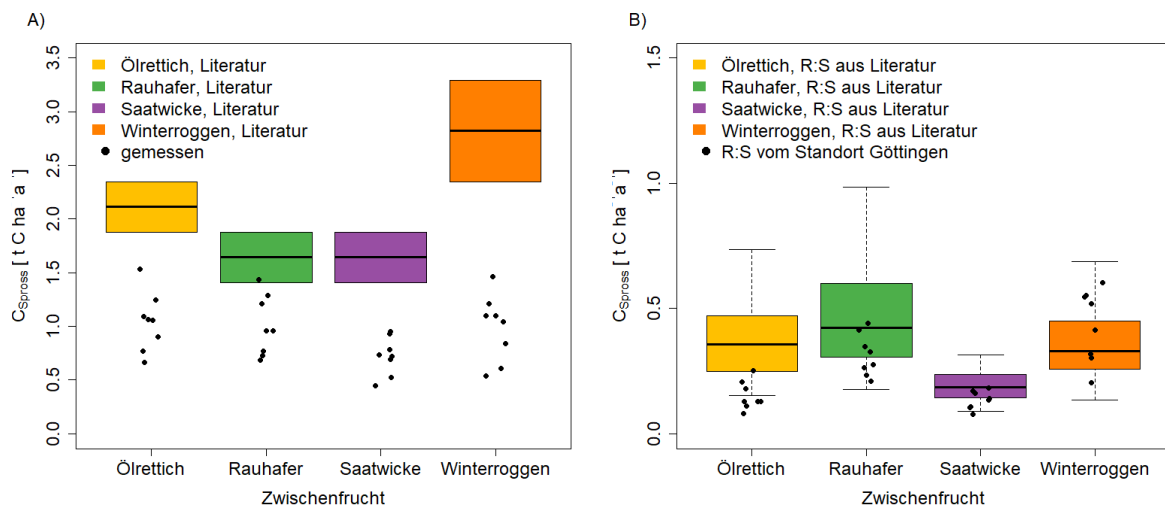


Abbildung A 2: A) Vergleich der C Einträge aus der oberirdischen Biomasse von Zwischenfrüchten zwischen in Entrup et al (2018) und Kander et al. (2013) veröffentlichten Wertebereichen und an den Versuchsstandorten ermittelten Werten; B) Vergleich der C-Einträge aus Wurzeln berechnet mit Wurzel:Spross Verhältnissen aus Entrup et al. (2018) bzw. Kander et al. (2013) und basierend auf Messungen am Standort Göttingen

Modellierung der Bodenkohlenstoffsequestrierung

Der Einfluss von ZF auf die Bodenkohlenstoffsequestrierung wurde aus der Differenz des jeweiligen Zwischenfruchtszenarios und der Kontrollvariante für Fruchtfolge 1 und 2 ermittelt (Abbildung A 3 und Tabelle A 4).

Wie zu erwarten, ergeben sich etwa doppelt so hohe Kohlenstoffsequestrierungsraten wenn der Zwischenfruchtanbau in einem Zweijahresintervall (Fruchtfolge 1) und nicht in einem Vierjahresintervall (Fruchtfolge 2) erfolgt. Gemäß den berechneten C Einträgen zeichnen sich systematische Unterschiede berechneter Sequestrierungsraten zwischen den Standorten (Abbildung 27) und zwischen Zwischenfruchtvarianten ab. Die standörtlich differenzierte Zwischenfruchteffekte sind zum einen auf standortspezifische C-Einträge aus Zwischenfruchtanbau zurückzuführen. Dies wird insbesondere für den Standort Uelzen deutlich, hier sind die Sequestrierungsraten für Ölrettich, Rauhafer und Grünroggen um das zwei- bis dreifache geringer. Darüber hinaus bestimmen in den angewandten Modellen Bodenbedingungen (Tongehalt, C:N Verhältnis) als auch Witterungsbedingungen den Effekt des Zwischenfruchtanbaus, der um so höher ist, je ungünstiger die Bedingungen für die Mineralisierung sind. Die Böden in Uelzen haben mit 4-5 % einen geringeren Tongehalt als die anderen Standorte (11 % bis 25 %), was in der Modellbeschreibung zu höheren Mineralisierungsraten und verminderten Zwischenfruchtanbaueffekten führt. Für alle Standorte außer Uelzen zeichnen sich für Sommerwicke die standortspezifisch geringsten Sequestrierungsraten ab. Darüber hinaus ist eine weitere Differenzierung kaum möglich.

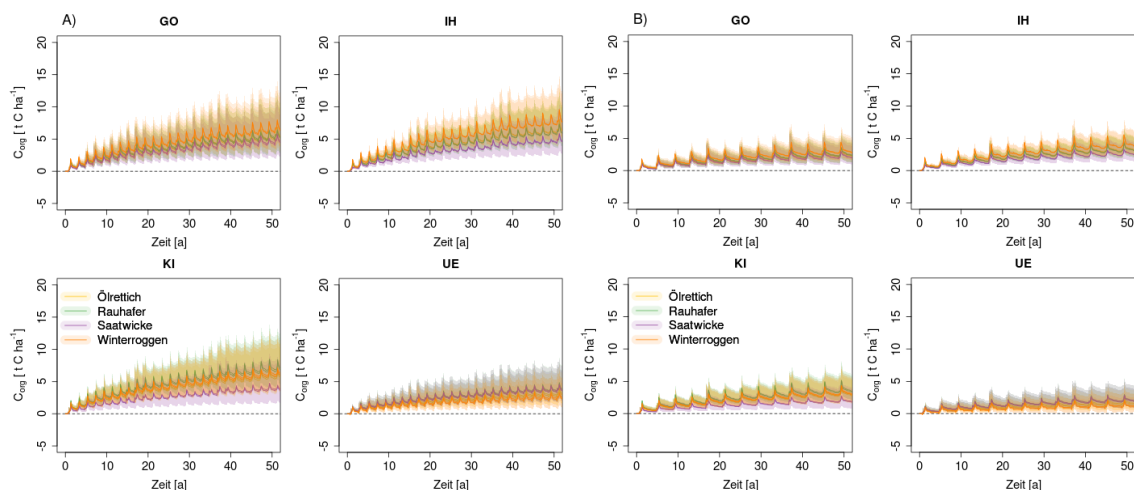


Abbildung A 3: Modellierter Entwicklung der Zwischenfruchteffekte auf die Bodenkohlenstoffvorräte für A) Fruchtfolge 1 und B) Fruchtfolge 2 (schattiert ist der Unsicherheitsbereich des Modellensembles)

Über alle Standorte und ZF (außer Sommerwicke) ergibt sich eine mittlere jährliche CO_2 Minderung durch Bodenkohlenstoffsequestrierung von etwa $390 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$, bei Sommerwicke sind es $300 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bei einem Zweijahresintervall und von etwa $210 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ bzw. $170 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ in einem Vierjahresintervall (Abbildung 27). Spezifische Werte für Standort- und Zwischenfruchtkombinationen können Tabelle A 4 entnommen werden.

Tabelle A 4: Mittlere jährliche Sequestrierungsrate [$t\ C\ ha^{-1}a^{-1}$] durch Zwischenfruchtanbau in einem Intervall von 2 Jahren (Szenario 1) und 4 Jahren (Szenario 2) mit oberen und unteren Werten des Modellensembles

Szenario	ZF	GO	IH	KI	UE
1	Ölrettich	0.1(0.06;0.19)	0.12(0.08;0.2)	0.11(0.07;0.21)	0.06(0.03;0.11)
1	Rauhafer	0.11(0.06;0.2)	0.12(0.08;0.2)	0.14(0.09;0.24)	0.07(0.04;0.13)
1	Sommerwicke	0.09(0.04;0.17)	0.09(0.05;0.17)	0.08(0.03;0.16)	0.07(0.04;0.13)
1	Grünroggen	0.13(0.07;0.22)	0.15(0.1;0.24)	0.12(0.07;0.22)	0.05(0.02;0.1)
2	Ölrettich	0.05(0.03;0.09)	0.07(0.05;0.11)	0.06(0.04;0.12)	0.03(0.02;0.07)
2	Rauhafer	0.06(0.03;0.1)	0.07(0.05;0.11)	0.08(0.05;0.13)	0.04(0.02;0.09)
2	Sommerwicke	0.05(0.02;0.09)	0.06(0.03;0.1)	0.04(0.02;0.09)	0.04(0.02;0.09)
2	Grünroggen	0.06(0.04;0.11)	0.08(0.05;0.13)	0.07(0.04;0.12)	0.03(0.01;0.06)

Vergleich der modellierten Bodenkohlenstoffsequestrierung mit Literaturwerten

In einer Metastudie werten Poeplau und Don (2015) Langzeitexperimente in tropischen (25 % der Daten) und gemäßigten Klimazonen (75 % der Daten) aus, für die jeweils mindestens eine Kontrollvariante ohne Zwischenfruchtanbau und eine Variante mit Zwischenfruchtanbau in jedem Jahr der Fruchtfolge vorliegen. Sie verwenden drei verschiedene Methoden zur Beschreibung des Effekts von ZF auf die Bodenkohlenstoffsequestrierung. Zum einen eine einfache Regressionsgleichung, die die Jahre nach Etablierung zur Sequestrierung in Beziehung setzt, dann ein stochastisches Modell (CRF), welches die Parameter Dauer des Experiments, Beprobungstiefe und Höhe des Standortes über NN zur Schätzung der Sequestrierung verwendet und als drittes eine Simulation mit dem Modell RothC. Die für die Standorte in THG ZWIFRU berechneten Sequestrierungsraten für einen 50-jährigen Zeitraum und ein zweijähriges Anbauintervall streuen zwischen 0.05 und 0.15 $t\ C\ ha^{-1}\ a^{-1}$ mit einem Mittelwert von 0.1 $t\ C\ ha^{-1}a^{-1}$. Dies entspricht in etwa dem unteren Grenzwert der in Poeplau und Don (2015) vorgenommenen Modellierung, welche die untere Grenze des 95% Konfidenzintervalls der C-Eintragsverteilung wiedergibt. Da die für die Feldexperimente ermittelten C Einträge aus ZF relativ gering im Vergleich zu Werten aus Poeplau und Don (2015) sind, ist auch zu erwarten das Gleiches auch für die mittleren Sequestrierungsraten gilt.

Tabelle A 5: Sequestrierungsraten berechnet nach Poeplau und Don (2015) normiert auf einen Zeitraum von 50 Jahren und ein zweijähriges Zwischenfruchtintervall [$t\ C\ ha^{-1}a^{-1}$]

Methode	GO	IH	KI	UE
Lineare Regression	0.16	0.16	0.16	0.16
CRF	0.1414	0.13156	0.1453	0.14425
RothC , 54 Jahre, geringer C Eintrag	0.105	0.105	0.105	0.105
RothC , 54 Jahre, mittlerer C Eintrag	0.115	0.115	0.115	0.115
RothC , 54 Jahre, hoher C Eintrag	0.13	0.13	0.13	0.13

Referenzen

- Abdalla M, Hastings A, Cheng K, et al (2019) A critical review of the impacts of cover crops on nitrogen leaching, net greenhouse gas balance and crop productivity. *Glob Chang Biol* 25:2530–2543. <https://doi.org/10.1111/gcb.14644>
- Agronomy Kiel (2023) Wetterdatenimport DWD. https://agronomykiel.shinyapps.io/ShinyDWD_Download/. Accessed 22 Mai 2023
- Basche AD, Miguez FE, Kaspar TC, Castellano MJ (2014) Do cover crops increase or decrease nitrous oxide emissions? A meta-analysis. *J Soil Water Conserv* 69:471–482. <https://doi.org/10.2489/jswc.69.6.471>
- Bukowiecki J, Rose T, Kage H (2021) Sentinel-2 Data for Precision Agriculture?—A UAV-Based Assessment. *Sensors* 21:2861. <https://doi.org/10.3390/s21082861>
- Carrer D, Pique G, Ferlicoq M, et al (2018) What is the potential of cropland albedo management in the fight against global warming? A case study based on the use of cover crops. *Environ Res Lett* 13:. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aab650>
- Cicek H, Martens JRT, Bamford KC, Entz MH (2015) Forage potential of six leguminous green manures and effect of grazing on following grain crops. *Renew Agric Food Syst* 30:503–514. <https://doi.org/10.1017/S1742170514000349>
- Crandall SM, Ruffo ML, Bollero GA (2005) Cropping system and nitrogen dynamics under a cereal winter cover crop preceding corn. *Plant Soil* 268:209–219. <https://doi.org/10.1007/s11104-004-0272-x>
- Dabney SM, Delgado JA, Collins F, et al (2010) Using Cover Crops and Cropping Systems for Nitrogen Management. In: *Advances in Nitrogen Management*. S 230–281
- Destatis (2023) Anbau auf dem Ackerland in landwirtschaftlichen Betrieben nach Fruchtarten - Jahr - regionale Ebenen. <https://www.regionalstatistik.de/genesis/online?operation=table&code=41141-02-02-4-B&bypass=true&levelindex=0&levelid=1679923859139#abreadcrumb>. Accessed 27 März 2023
- Edwards R, O’Connell A, Padella M, et al (2019) Definition of input data to assess GHG default emissions from biofuels in EU legislation, Version 1d. In: *JRC Sci. Policy Rep.* <https://data.jrc.ec.europa.eu/dataset/e51f4304-7023-4fca-8900-7d206f89b914>. Accessed 9 Nov 2020
- Fendrich AN, Matthews F, Van Eynde E, et al (2023) From regional to parcel scale: A high-resolution map of cover crops across Europe combining satellite data with statistical surveys. *Sci Total Environ* 873:162300. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162300>
- Franko U, Kolbe H, Thiel E, Ließ E (2011) Multi-site validation of a soil organic matter model for arable fields based on generally available input data. *Geoderma* 166:119–134. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2011.07.019>
- Gabriel JL, Alonso-Ayuso M, García-González I, et al (2016) Nitrogen use efficiency and fertiliser fate in a long-term experiment with winter cover crops. *Eur J Agron* 79:14–22. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.04.015>
- Gale MR, Grigal DF (1987) Vertical root distributions of northern tree species in relation to successional status. *Can J For Res* 17:829–834. <https://doi.org/10.1139/x87-131>
- Gentsch N, Heuermann D, Boy J, et al (2022) Soil nitrogen and water management by winter-killed catch crops. *Soil* 8:269–281. <https://doi.org/10.5194/soil-8-269-2022>
- Goffart D, Curnel Y, Planchon V, et al (2021) Field-scale assessment of Belgian winter cover crops biomass based on Sentinel-2 data. *Eur J Agron* 126:126278. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2021.126278>
- Grunwald D, Stracke A, Koch H (2023) Cover crop effects on soil structure and early sugar beet growth. *Soil Use Manag* 39:209–217. <https://doi.org/10.1111/sum.12800>
- Guardia G, Aguilera E, Vallejo A, et al (2019) Effective climate change mitigation through cover cropping and integrated fertilization: A global warming potential assessment from a 10-year field experiment. *J Clean Prod* 241:118307. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118307>
- Guenet B, Gabrielle B, Chenu C, et al (2020) Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Glob Chang Biol*. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Han Z, Walter MT, Drinkwater LE (2017) N₂O emissions from grain cropping systems: a meta-analysis of the impacts of fertilizer-based and ecologically-based nutrient management strategies. *Nutr Cycl Agroecosystems* 107:335–355. <https://doi.org/10.1007/s10705-017-9836-z>
- Hauer M, Koch H-J, Mittler S, et al (2016) Zwischenfruchtanbau, Sortenwahl, N-Düngung: Wirkung auf N-Versorgung und Ertrag von Zuckerrüben sowie auf die Nematodendichte. *Sugar Ind* 141:44–52. <https://doi.org/10.36961/si17157>
- Henke J, Böttcher U, Neukam D, et al (2008) Evaluation of different agronomic strategies to reduce nitrate leaching after winter oilseed rape (*Brassica napus* L.) using a simulation model. *Nutr Cycl Agroecosystems* 82:299–314. <https://doi.org/10.1007/s10705-008-9192-0>
- Henrich V, Krauss G, Götze C, Sandow C (2012) IDB - Index DataBase. <https://www.indexdatabase.de/>. Accessed 26 März 2023
- Heuermann D, Gentsch N, Boy J, et al (2019) Interspecific competition among catch crops modifies vertical root biomass distribution and nitrate scavenging in soils. *Sci Rep* 9:1–11. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-48060-0>

- Heuermann D, Gentsch N, Guggenberger G, et al (2022) Catch crop mixtures have higher potential for nutrient carry-over than pure stands under changing environments. *Eur J Agron* 136:. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2022.126504>
- Hively WD, Duiker S, McCarty G, Prabhakara K (2015) Remote sensing to monitor cover crop adoption in southeastern Pennsylvania. *J Soil Water Conserv* 70:340–352. <https://doi.org/10.2489/jswc.70.6.340>
- Hively WD, Lee S, Sadeghi AM, et al (2020) Estimating the effect of winter cover crops on nitrogen leaching using cost-share enrollment data, satellite remote sensing, and Soil and Water Assessment Tool (SWAT) modeling. *J Soil Water Conserv* 75:362–375. <https://doi.org/10.2489/JSWC.75.3.362>
- Holzhauser K, Rübiger T, Rose T, et al (2022) Estimation of Biomass and N Uptake in Different Winter Cover Crops from UAV-Based Multispectral Canopy Reflectance Data. *Remote Sens* 14:4525. <https://doi.org/10.3390/rs14184525>
- IPCC (2019) N₂O Emissions From Managed Soils, and CO₂ Emissions From Lime and Urea Application. In: 2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. S 1–48
- Jacobs A, Flessa H, Don A, et al (2018) Landwirtschaftlich genutzte Böden in Deutschland - Ergebnisse der Bodenzustandserhebung
- Jacobs A, Poeplau C, Weiser C, et al (2020) Exports and inputs of organic carbon on agricultural soils in Germany. *Nutr Cycl Agroecosystems* 118:249–271. <https://doi.org/10.1007/s10705-020-10087-5>
- Jian J, Du X, Reiter MS, Stewart RD (2020) A meta-analysis of global cropland soil carbon changes due to cover cropping. *Soil Biol Biochem* 143:107735. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107735>
- Kage H (1999) HUME : An object oriented component library for generic modular modelling of dynamic systems
- Kanders MJ, Berendonk C (2013) Zwischenfruchtpass LWK NRW. <https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/lwk-zwischenfruchtpass.pdf>. Accessed 15 Mai 2023
- Kaye JP, Quemada M (2017) Using cover crops to mitigate and adapt to climate change. A review. *Agron Sustain Dev* 37:1–17. <https://doi.org/10.1007/S13593-016-0410-X/FIGURES/4>
- Kemper R, Bublitz TA, Müller P, et al (2020) Vertical Root Distribution of Different Cover Crops Determined with the Profile Wall Method. *Agriculture* 10:503. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110503>
- Kemper R, Döring TF, Legner N, et al (2022) Root traits in cover crop mixtures of blue lupin and winter rye. *Plant Soil* 475:309–328. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05366-9>
- Koch H, Grunwald D, Essich L, Ruser R (2022) Temporal dynamics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) N supply from cover crops differing in biomass quantity and composition. *Front Plant Sci*
- Kühling I, Mikuszies P, Helfrich M, et al (2023) Effects of winter cover crops from different functional groups on soil-plant nitrogen dynamics and silage maize yield. *under Rev Eur J Agron* 148:. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126878>
- Ladan S, Jacinthe P-A (2017) Nitrogen availability and early corn growth on plowed and no-till soils amended with different types of cover crops. *J Soil Sci Plant Nutr* 17:74–90. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017005000006>
- Li C, Frolking S, Butterbach-Bahl K (2005) Carbon Sequestration in Arable Soils is Likely to Increase Nitrous Oxide Emissions, Offsetting Reductions in Climate Radiative Forcing. *Clim Change* 72:321–338. <https://doi.org/10.1007/s10584-005-6791-5>
- Lugato E, Cescatti A, Jones A, et al (2020) Maximising climate mitigation potential by carbon and radiative agricultural land management with cover crops. *Environ Res Lett* 15:094075. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/aba137>
- Lütke-Entrup N, Bodner G, Hötte S, et al (2018) Zwischen- und Zweitfrüchte im Pflanzenbau. Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
- Marcillo GS, Miguez FE (2017) Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. *J Soil Water Conserv* 72:226–239. <https://doi.org/10.2489/JSWC.72.3.226>
- Muhammad I, Sainju UM, Zhao F, et al (2019) Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil Tillage Res* 192:103–112. <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.020>
- Nouri A, Lukas S, Singh S, et al (2022) When Do Cover Crops Reduce Nitrate Leaching? A Global Meta-Analysis. *Glob Chang Biol* 1–14. <https://doi.org/10.1111/gcb.16269>
- Poeplau C, Don A (2015) Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops - A meta-analysis. *Agric Ecosyst Environ* 200:33–41. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.10.024>
- Rösemann C, Haenel H-D, Vos C, et al (2021) Calculations of gaseous and particulate emissions from German agriculture 1990 - 2019 : Report on methods and data (RMD) Submission 2021 BT - Thünen-Report. Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig
- Seitz D, Mareen L, Dechow R, et al (2022) The potential of cover crops to increase soil organic carbon storage in German croplands. *Plant Soil*. <https://doi.org/10.1007/s11104-022-05438-w>
- Snapp S, Surapur S (2018) Rye cover crop retains nitrogen and doesn't reduce corn yields. *Soil*

- Tillage Res 180:107–115.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2018.02.018>
- Thapa R, Mirsky SB, Tully KL (2018) Cover Crops Reduce Nitrate Leaching in Agroecosystems: A Global Meta-Analysis. *J Environ Qual* 47:1400–1411. <https://doi.org/10.2134/jeq2018.03.0107>
- Thorup-Kristensen K (1994) The effect of nitrogen catch crop species on the nitrogen nutrition of succeeding crops. *Fertil Res* 37:227–234. <https://doi.org/10.1007/BF00748941>
- Thorup-Kristensen K, Dresbøll DB (2010) Incorporation time of nitrogen catch crops influences the N effect for the succeeding crop. *Soil Use Manag* 26:27–35. <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2009.00255.x>
- Weiss M, Jacob F, Duveiller G (2020) Remote sensing for agricultural applications: A meta-review. *Remote Sens Environ* 236:111402. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.111402>
- White C., Holmes H., Morris N. (2016) A review of the benefits, optimal crop management practices and knowledge gaps associated with different cover crop species. *AHDB Cereal Oilseeds* While 93

D NUTZEN & VERWERTUNG

D.I Wichtigsten Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Wurden von jedem Projektpartner individuell eingereicht.

D.II Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine Bearbeitung der geplanten Aufgabenstellungen mit Erreichen der Zielsetzung war ohne staatliche Förderung für die beteiligten Projektpartner nicht möglich, denn die umfangreichen durchzuführenden Arbeiten konnten ohne zusätzlich eingestellte Wissenschaftler:innen und Techniker:innen nicht vom Stammpersonal der beteiligten Einrichtungen geleistet werden. Die Projektpartner nutzten darüber hinaus verfügbare eigene Ressourcen, vor allem die Forschungsinfrastruktur (Büroräume und Ausstattung, IT-Systeme, Versuchs-technik, Labore) und unterstützten anteilig durch grundfinanzierte Mitarbeitende (vor Allem bei der Durchführung der Versuche und Projektleitung/-koordination). Die erhaltenen Zuwendungen stehen in angemessenem Verhältnis zu den umfangreichen erzielten Ergebnissen.

D.III Voraussichtlicher Nutzen

Die erzielten Ergebnisse fließen auf unterschiedlichen Ebenen in weitere oder fortlaufende Forschungsaktivitäten ein und finden Berücksichtigung im Wissenstransfer sowohl in der Hochschulbildung als auch in Praxis und Beratung.

Angestrebte Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und bereits erteilte Schutzrechte

Im Rahmen des Projektes wurde wie geplant keine patentrechtlich geschützte Technik oder Erfindung realisiert.

Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende

- Entwicklung und Zusammenstellung von standortangepassten Zwischenfrüchten/Zwischenfruchtmischungen, basierend auf den Projektergebnissen.
- Wissen und Kenntnisse im Bereich der nährstoffangepassten Fruchtfolgesysteme transferieren (Knowhow-Transfer Wissenschaft-Wirtschaft).
- Kennzahlen für die Beratung zu und Berechnung von Zwischenfrüchten in optimierten Fruchtfolgen erarbeiten und deren Transformation für zukünftige Zwischenfruchtprodukte.

Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende

- Erfolgreich veröffentlichte und eingereichte/geplante peer-reviewed Publikationen in internationalen Fachzeitschriften und nationalen Praxisjournalen sowie zahlreiche Präsentationen der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen.
- Die Erkenntnisse des Projektes zur Mineralisation der Zwischenfruchtbiomasse fließen in Kombination mit weiteren laufenden Projekten in die Modellierung des N-Transfers in Anbausystemen ein.

- Stärke Berücksichtigung der N-Wirkung von Zwischenfruchtsystemen bei der Düngeempfehlung (N-Einsparung bzw. adverser Effekt auf Lehmstandorten), Eingang der Ergebnisse in die Beratung zur Umsetzung der bedarfsgerechten Düngung im Rahmen der DüV.

Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

- Basierend auf den Erkenntnissen aus den Versuchen wird die prozessorientierte dynamische Modellierung der Zwischenfruchtwirkung vorangetrieben mit dem Ziel, Prognosemodelle zu entwickeln. Diese sollen in Zukunft Bestandteil der Düngeempfehlung für Landwirte werden.
- Das Projekt liefert essenzielle Vorarbeiten für die differenzierte Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen im Pflanzenbau. Darauf aufbauend wird die Entwicklung einer standortdifferenzierten Abbildung und Minderung direkter und indirekter N₂O-Emissionen im Treibhausgasinventar vorangetrieben.
- Die Ergebnisse der ¹⁵N-Untersuchungen im Feld liefern Inputdaten zur Kalibrierung prozessorientierter Modellierung des C- und N-Umsatzes im Zwischenfruchtbau
- Durch intensive Mitarbeit von Nachwuchswissenschaftler:innen im Rahmen des Projekts wird langfristig Fachpersonal für die Bearbeitung dieser und ähnlicher Fragen der nachhaltigen Landnutzung qualifiziert.

D.IV Fortschritte auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Im parallellaufenden BMBF-geförderten Projekt Catchy wurden ergänzende Detailinformationen zum Unterschied zwischen Reinsaaten und Mischungen nicht-winterharter ZF generiert (Heuermann et al. 2019, 2022; Gentsch et al. 2022). Umfangreiche Versuchsaktivitäten mit ZF an der Uni Bonn kamen zu übereinstimmenden Erkenntnissen hinsichtlich der Boden-N-Dynamik und resultierten in ähnlich geringen N-Wiederfindungsraten in der 1. Folgefrucht (Kemper et al. 2020, 2022).

D.V Veröffentlichungen

peer reviewed Publikationen

Essich, L., Nkebiwe, P.M., Schneider, M., Ruser, R., 2020. Is Crop Residue Removal to Reduce N₂O Emissions Driven by Quality or Quantity? A Field Study and Meta-Analysis. *Agriculture* 10, 546. <https://doi.org/10.3390/agriculture10110546>

Grunwald, D., Stracke, A., Koch, H., 2022. Cover crop effects on soil structure and early sugar beet growth. *Soil Use Manag.* 1–9. <https://doi.org/10.1111/sum.12800>

Koch, H., Grunwald, D., Essich, L., Ruser, R., 2022. Temporal dynamics of sugar beet (*Beta vulgaris* L.) N supply from cover crops differing in biomass quantity and composition. *Front. Plant Sci.* 13. <https://doi.org/10.3389/fpls.2022.920531>

Holzhauser K, Rübiger T, Rose T, Kage H, Kühling I (2022) Estimation of Biomass and N Uptake in Different Winter Cover Crops from UAV-Based Multi-spectral Canopy Reflectance Data. *Remote Sens* 14:4525. <https://doi.org/10.3390/rs14184525>

Kühling I, Mikuszies P, Helfrich M, et al (2023) Effects of winter cover crops from different functional groups on soil-plant nitrogen dynamics and silage maize yield. *under Rev Eur J Agron* 148:. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2023.126878>

under review

Süß C, Kemmann B, Helfrich M, Flessa H. Nitrogen transformation as affected by decomposition of ¹⁵N-labelled cover crop shoots and roots. Submitted to *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*

Grunwald D, Koch H-J. Cover crop effects on fibrous roots and growth of subsequent sugar beet. Submitted to *Plant and Soil*

in preparation

Kühling I, Pahlmann I, et al., Impact of cover crops on optimal N fertilisation rate and yield of first and second subsequent crops

Essich et al.: N₂O release from ¹⁵N-labeled oil radish as affected by C:N ratio and amount.

Kühling et al Simulation of N and C accumulation of winter cover crop species under different environmental conditions

Essich et al Cover crop effects on direct N₂O emissions from sugar beet.

Kühling et al. Nitrate leaching losses and indirect N₂O emissions from arable production systems as affected by catch crops: a multi site study

Nasser et al.: Effect of oil radish on N₂O emissions from maize and sugar beet fields.

Helfrich M, Merl S, Rübiger T, Kühling I, Schlathöler M, Roland Fuß, Henning Kage, Heinz Flessa. Vorläufiger Titel: Cover crops before maize cropping decrease soil N contents, but not N₂O emissions.

Koch et al: Temporal variation of cover crop N mineralization is different under succeeding sugar beet and maize.

Blase A, Grunwald D, Paulus S, Koch H-J: Estimation of sugar beet biomass and N uptake from canopy reflectance data.

Kühling et al: Effect of catch crops on greenhouse gas balance of arable crop rotations.

weitere Beiträge

Bartels, A., Hoffmann, A. (2019): Stickstoff sparen – Klima schonen. *Land Forst – die Stimme der Landwirtschaft* Ausgabe 12/2019, 37-39

Zwischenfrüchte für das Klima. *Wochenblatt für Landwirtschaft und Landleben*, Ausgabe 42/2022, 24–26

Hoffmann, A. (2019): Mit Zwischenfrüchten Stickstoff sparen – das Klima schonen. *Bauernblatt* 31/2019, 14-16

Koch, H-J, Grunwald, D. (2022): Wie viel N liefern Zwischenfrüchte? *Zuckerrübe* 6/2022, 31-33.

Koch, H-J, Stracke, A, Hoffmann, A (2020): Zwischenfrucht und Klimaschutz: Wie passt das zusammen? *Zuckerrübe* 3/2020, 12-14.

Reinhard-Kolempas, M, Hoffmann, A, Kühling, I, Koch, H-J (2022): Wie wirtschaftlich sind Zwischenfrüchte? – Eine Bewertung auf Betriebsebene. *Zuckerrübe* 6/2022, 34-37.

Schaper et al. (2021): Das N-Angebot ist entscheidend. *Land & Forst – die Stimme der Landwirtschaft*, Ausgabe 15/2021, 28–30

Kühling et al. (2023): Steuerung der Stickstoffverfügbarkeit nach Zwischenfrüchten. *Mais – die Fachzeitschrift für Spezialisten*, Ausgabe 2/2023, 8-11.

Das große Potenzial besser nutzen. *Land & Forst – die Stimme der Landwirtschaft*, Ausgabe 42/2022, 18–19

E ERFOLGSKONTROLLBERICHT

E.I Beitrag des Ergebnisses zu den förderpolitischen Zielen

Das Projekt hat einen wesentlichen Beitrag zur Bewertung von pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Senkung der THG-Emissionen mittels standortangepasstem Zwischenfruchtanbau geleistet und damit ein explizites Förderziel der Ausschreibung zum Themenbereich Pflanzenproduktion sowie im Rahmen des Klimaschutzprogrammes 2030 der Bundesregierung: „Senkung der Stickstoffüberschüsse einschließlich Minderung der Ammoniakemissionen und gezielte Verminderung der Lachgasemissionen, Verbesserung der Stickstoffeffizienz“ adressiert. Neben dem unmittelbaren Klimaschutzbeitrag durch verringerte direkte Treibhausgasemissionen lag ein weiterer Schwerpunkt auf der Nitratauswaschung, die nicht nur Ursache für Gewässerbelastungen ist, sondern auch eine wichtige Quelle für indirekte THG-Emissionen darstellt. Daraus ergeben sich zahlreiche Synergieeffekte zu weiteren Schutzziele: Eine an den Zwischenfruchtanbau angepasste N-Düngung erfüllt nicht nur Klimaschutzziele, sondern wirkt darüber hinaus entlastend auf die N-Bilanzüberschüsse der Landwirtschaft. Eine an ZF angepasste N-Düngung hat keine negativen Auswirkungen auf die Produktivität des Anbausystems, ein Zielkonflikt zwischen Klimaschutz und Ernährungssicherheit wird somit vermieden. Im Rahmen der Verlängerungsphase wurde explizit ein weiterer Baustein der Klimaschutzmaßnahmen adressiert: „Humuserhalt und -aufbau im Ackerland“. Die Rolle von Zwischenfrüchten in der Humusdynamik konnte durch die Projektergebnisse standortdifferenziert besser quantifiziert werden und kann nun durch bessere Kenntnis dieser Effekte zur Entwicklung zielgerichteter Strategien für den Humuserhalt und Aufbau beitragen. Die Ergebnisse des Projektes tragen zur Entwicklung von Systemen zur Entscheidungsunterstützung für Landwirte und Berater bei, welche es erlauben, wirksame Minderungsoptionen mit innovativen Empfehlungen in der Praxis umzusetzen.

E.II Wissenschaftlich-technisches Ergebnis

Ergebnis des Projektes ist eine differenziertere und standortspezifische Bewertung der Vorzüglichkeit der untersuchten Zwischenfruchtarten hinsichtlich ihrer systemischen Klimaeffekte. Auf sandigen Standorten in Maisfruchtfolgen sollte die Reduktion der Nitratverlagerung im Fokus stehen, direkte Lachgasemissionen sind eher zu vernachlässigen – günstig erwiesen sich insgesamt Ölrettich und Rauhafer. Auf lehmigen Standorten in Zuckerrübenfruchtfolgen sollte die Minimierung der direkten Lachgasemissionen sowie gute Remineralisation aus ZF-Residuen im Fokus stehen, Nitratverlagerung ist von untergeordneter Bedeutung und kann kaum zur Kompensation der insgesamt höheren N_2O -Verluste beitragen – Wicke erwies sich als günstige Art, während Winterroggen mit Pflugumbruch zu vermeiden ist. Im Detail sind die Ergebnisse in Abschnitt B auf Seite 7-36 beschrieben.

E.III Fortschreibung des Verwertungsplans

FKZ:	28-1-B2.007...013-16
Projekttitel:	Minderung von Treibhausgasemissionen in der Pflanzenproduktion durch standortangepasst optimierte Zwischenfruchtanbausysteme

1. Angestrebte Erfindungen/Schutzrechtsanmeldungen und bereits erteilte Schutzrechte		
Lfd. Nr.	Konkrete Verwertung	Zeithorizont
1.1	Im Rahmen des Projektes war keine patentrechtlich geschützte Technik oder Erfindung vorgesehen, dementsprechend wurde nichts entwickelt.	-

2. Wirtschaftliche Erfolgsaussichten nach Projektende		
Lfd. Nr.	Konkrete Verwertung	Zeithorizont
2.1	Entwicklung und Zusammenstellung von standortangepassten Zwischenfrüchten/Zwischenfruchtmischungen, basierend auf den Projektergebnissen.	1-5 Jahre nach Projektende
2.2	Wissen und Kenntnisse im Bereich der nährstoffangepassten Fruchtfolgesysteme transferieren (Knowhow-Transfer Wissenschaft-Wirtschaft).	1-5 Jahre nach Projektende
2.3	Kennzahlen für die Beratung und Berechnung von Zwischenfrüchten in optimierten Fruchtfolgen erarbeiten und deren Transformation für zukünftige Zwischenfruchtprodukte.	1-5 Jahre nach Projektende

3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende		
Lfd. Nr.	Konkrete Verwertung	Zeithorizont
3.1	Weitere Veröffentlichungen als peer-reviewed Publikationen in internationalen Fachzeitschriften sowie nationalen Praxisjournalen (s. Auflistung geplante Publikationen).	1-2 Jahre nach Projektende
3.2	Weitere Präsentation der Ergebnisse auf nationalen und internationalen Konferenzen	1-2 Jahre nach Projektende

3. Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten nach Projektende		
Lfd. Nr.	Konkrete Verwertung	Zeithorizont
3.3	Anwendung des Bewertungsrahmens für N-Aufnahme in Zwischenfrüchten in der Beratung der Landwirte.	1-5 Jahre nach Projektende
3.4	Präzisere Berücksichtigung der N-Wirkung von Zwischenfruchtsystemen bei der Düngeempfehlung (N-Einsparung bzw. adverser Effekt auf Lehmlandstandorten), Eingang der Ergebnisse in die Beratung zur Umsetzung der bedarfsgerechten Düngung im Rahmen der DüV.	1-5 Jahre nach Projektende
3.5	Implementierung der standortdifferenziert unterschiedlichen Bewertung von Zwischenfruchtsystemen im Kontext der direkten und indirekten Lachgasemission in Ausbildung & Beratung.	1-10 Jahre nach Projektende

4. Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit		
Lfd. Nr.	Nächste Phase / nächste Schritte	Zeithorizont
4.1	Die Erkenntnisse des Projektes zur Mineralisation der Zwischenfruchtbiomasse fließen in Kombination mit weiteren laufenden Projekten in die Modellierung des N-Transfers in Anbausystemen ein und stellen einen wichtigen Schritt zum Entwurf und der Bewertung standortgerechter, klima- und umweltfreundlicher Landnutzungssysteme dar.	1-10 Jahre nach Projektende
4.2	Basierend auf den Erkenntnissen aus den Versuchen wird die prozessorientierte dynamische Modellierung der Zwischenfruchtwirkung vorangetrieben mit dem Ziel, Prognosemodelle zu entwickeln. Diese sollen in Zukunft web-basiert als Bestandteil der Düngeempfehlung für Landwirte werden.	1-5 Jahre nach Projektende
4.3	Das Projekt liefert essenzielle Vorarbeiten für die differenzierte Abbildung von Klimaschutzmaßnahmen im Pflanzenbau. Darauf aufbauend wird die Entwicklung einer standortdifferenzierten Abbildung und Minderung direkter und indirekter N ₂ O-Emissionen im Treibhausgasinventar vorangetrieben.	1-10 Jahre nach Projektende
4.4	Die Ergebnisse der 15N-Untersuchungen im Feld liefern Inputdaten zur Kalibrierung prozessorientierter Modellierung des C- und N-Umsatzes	1-5 Jahre nach Projektende

E.IV Arbeiten, die zu keiner Lösung geführt haben

Keine

E.V Präsentationsmöglichkeiten für mögliche Nutzer

- Shiny Web-App
- Feldtag Poppenburg
- zahlreiche Feldrundgänge durch P.H. Petersen am Standort Uelzen
- Vorstellung von Projektresultaten auf diversen Veranstaltungen und Feldtagen

E.VI Einhaltung der Kosten- und der Zeitplanung

B2.007_CAU

Aufgrund der Covid19-Pandemie und diverser Bearbeiterwechsel kam es teilweise zu einer Verzögerung einzelner Teilaspekte im Vergleich zum ursprünglichen Zeitplan. Am Ende konnten alle Teilziele innerhalb des Budgets realisiert werden.

B2.008_UHOH

Zeit- und Kostenplan konnten gemäß den im Antrag formulierten Vorgaben eingehalten werden.

B2.009_GAUG

Zeit- und Kostenplan konnten gemäß den im Antrag formulierten Vorgaben eingehalten werden.

B2.010_PHP

Aufgrund der Covid19-Pandemie gab es Einschränkungen bei Feldführungen und Veranstaltungen. Abgesehen davon konnten aber alle geplanten Aktivitäten erfolgreich durchgeführt werden und insbesondere der Transfer in die Praxis erfolgreich realisiert werden.

B2.011_TI

Im Zuge der Covid19-Pandemie kam es teilweise zu Verzögerungen einzelner Teilaspekte im Vergleich zum ursprünglichen Zeitplan, welche aber zügig wieder kompensiert werden konnten. Aufgrund einer personellen Umstrukturierung in 2020 und konnte der Inkubationsversuch zum Einfluss von Frost-Tau-Ereignissen auf die Umsetzung von ZF-Biomasse leider nicht durchgeführt werden. Alle weiteren Teilziele wurden innerhalb des Budgets realisiert werden. Ein Manuskript wurde eingereicht und ein weiteres wird in Kürze eingereicht.

B2.012>IfZ

Aufgrund der Covid19-Pandemie und des Wechsels des Projektmitarbeiters kam es teilweise zu einer Verzögerung einzelner Teilaspekte, insbesondere hinsichtlich der Auswertung der Daten. Am Ende konnten aber alle Teilziele innerhalb des Budgets realisiert werden.

B2.013_LWK-NI

Aufgrund der Covid19-Pandemie und des zweifachen Wechsels der Projektmitarbeiterin kam es teilweise zu einer Verzögerung einzelner Teilaspekte wie der Durchführung von Feldtagen

im Vergleich zum ursprünglichen Zeitplan. Am Ende konnten aber alle Teilziele innerhalb des Budgets realisiert werden. Auch ein Feldtag wurde im Oktober 2022 innerhalb des Verlängerungszeitraumes erfolgreich durchgeführt.

F KURZFASSUNG (BERICHTSBLATT)

Feldversuchs- und Modellierungsergebnisse aus einem 4-jährigen Verbundprojekt an 4 Standorten in Deutschland (Kiel, Uelzen, Göttingen, Stuttgart) zeigen große Unterschiede in der standortspezifischen Klimawirksamkeit verschiedener Zwischenfruchtarten. Untersucht wurden dazu vier Winterzwischenfrüchte (Ölrettich, Rauhafer, Sommerwicke, Winterroggen) im Vergleich zur Brache ohne Bewuchs.

Auf verlagerungsgefährdeten Sandstandorten mit typischen Mais-Fruchtfolgen (Kiel, Uelzen) konnte die Gefahr direkter N_2O -verluste durch die Verminderung indirekter Emissionen aus NO_3 -Verlagerung, geringfügig niedrigere optimale N-Düngung und langfristige Kohlenstoffanreicherung kompensiert werden. Nicht-winterharte Zwischenfrüchte mit guter Biomasseentwicklung (Ölrettich, Rauhafer) zeigten dort die besten Effekte. Auf Lössstandorten mit typischen Zuckerrüben-Fruchtfolgen (Göttingen, Stuttgart), mit geringem NO_3 -Verlagerungsrisiko, fielen die höheren direkten N_2O -Emissionen bei Zwischenfruchtanbau stärker ins Gewicht. Die direkten N_2O -Emissionen konnten dort nicht durch positive Leistungen der Zwischenfrüchte (Düngerbedarf, langfristige Kohlenstoffspeicherung) kompensiert werden. Insbesondere die winterharte Zwischenfrucht Roggen mit anschließender Pflugfurche war dort ungünstig einzuschätzen, Sommerwicke wies die geringsten CO_2eq -Gesamtemissionen auf.

Auf Sandstandorten überwogen in Summe die positiven Effekte: Die Anbauentscheidung sollte dort auf die Reduktion der Nitratverlagerung fokussiert werden. Auf Lössstandorten sollte die Vermeidung direkter N_2O -Emissionen und Wirkung auf den N-Düngerbedarf der Folgefrüchte im Zentrum der Anbauentscheidung stehen.