



INPLAMINT

Increasing agricultural nutrient-use efficiency by
optimizing **p**lant–soil–**m**icroorganism **i**nteractions

TP UKiel

Schlussbericht

- Förderkennzeichen:** 031B1062E
- Zuwendungsempfänger:** Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Christian-Albrechts-Platz 4
24118 Kiel
- Ausführende Stelle:** Christian-Albrechts-Universität zu Kiel
Agrar- und Ernährungswissenschaftliche Fakultät
Institut für Pflanzenbau und Pflanzenzüchtung
- Projektleitung:** Prof. Dr. Henning Kage
kage@pflanzenbau.uni-kiel.de
0431 – 880 3472
- Autoren Endbericht:** Steffen Rothardt, Henning Kage
- Laufzeit & Berichtszeitraum:** 01.06.2021 – 31.08.2024

Das diesem Bericht zugrundeliegende Vorhaben wurde mit Mitteln des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt gefördert. Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autoren.

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



BONARES

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Langfristiges Ziel des Verbundprojektes war die Entwicklung neuer Managementstrategien für die Optimierung der Stickstoffnutzungseffizienz in pflanzenbaulichen Produktionssystemen durch Ausnutzen der Interaktion zwischen Pflanzen und dem Bodenmikrobiom. Dazu sollten zunächst Schlüsselprozesse des Nährstoffumsatzes und -flusses identifiziert werden, bei denen die Wechselwirkung zwischen Pflanzen, Boden und Mikroorganismen eine wesentliche Rolle für die nährstoffeffiziente Biomasseproduktion spielt. Durch mathematische Modellierung sollten Interaktionen zwischen diesen Prozessen und Boden- sowie Klimabedingungen quantifiziert werden. Am Ende stand Ableitung geeigneter Managementstrategien zur Optimierung landwirtschaftlicher Biomasseproduktion für unterschiedliche Boden- und Klimabedingungen.

Die konkrete Problemstellung stellt die Auswaschung von Nitrat (NO_3^-) in der Übergangszeit zwischen Ernte und Nährstoffaufnahme durch die Folgekultur dar. Dabei handelt es sich um den größten Verlustpfad von Stickstoff (N) in ackerbaulichen Systemen. Nach Verfrachtung in andere Ökosystemkompartimente führt das ausgewaschene Nitrat zu indirekten Lachgasemissionen und trägt somit zu einer Belastung des Klimas bei.

In Norddeutschland und weiteren Regionen Mitteleuropas nimmt Winterraps eine tragende Rolle in den Fruchtfolgen ein. Nach Anbau von Winterraps treten im Herbst vergleichsweise hohen Nitratmengen im Boden auf. Dementsprechend besteht ein hohes Risiko von Auswaschungsverlusten und Lachgasemissionen. Die Gründe hierfür sind teilweise erhöhte Restnitratmengen zum Zeitpunkt der Ernte, Ernterückstände mit einem geringen N-Immobilisationspotential sowie die geringe N-Aufnahme der typischen Folgefrucht Winterweizen vor Winter. Ähnliche, wenn nicht sogar höhere N-Verluste können nach Anbau von Ackerbohnen auftreten, bei denen sowohl Restnitratmengen als auch N-Mengen in den Ernterückständen höher sind als bei Winterraps.

I.2 Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Vorhaben wurde von einem interdisziplinären Konsortium aus sieben Forschungseinrichtungen durchgeführt. In regelmäßigen Projekttreffen wurde zwei Mal pro Jahr der Stand der eigenen Arbeit vorgestellt und zukünftige Kooperationen besprochen.

Das Versuchsgut Hohenschulen der CAU Kiel bot beste Bedingungen für die Durchführung der Feldversuche. Die Arbeitsgruppe Kage der Abteilung Acker- und Pflanzenbau besaß das nötige Wissen zur Planung, Betreuung und anschließender Auswertung der angedachten Versuche. Auch für die Entwicklung eines Simulationsmodells zur Abbildung der Feldbeobachtungen bestanden beste Voraussetzungen (Kage and Stützel, 1999). Inhaltlich bestanden Bezüge zu weiteren Projekten zu THG-Emissionen im Ackerbau, welche in von der FNR bzw. dem BMBF geförderten Projekten bearbeitet wurden.

I.3 Planung und Ablauf des Vorhabens

Das Vorhaben ist in drei Phasen von je drei Jahren gegliedert. In der ersten Drei-Jahres-Periode wurden die grundlegenden Mechanismen der Pflanze-Boden-Mikroorganismen-Wechselwirkungen in Abhängigkeit von Fruchtfolge und Bodentyp, Bodentemperatur und Bodenfeuchte sowie vom Dünge- und Bodenzusatzstoffregime untersucht. In der zweiten Phase lag der Schwerpunkt auf Untersuchungen zu den stöchiometrischen Nährstoffbeziehungen zwischen Pflanze, Boden und Mikroorganismen. In der dritten Phase wurden die neuartigen Managementoptionen, die in der ersten und zweiten Projektphase entwickelt worden sind, an unterschiedlichen Standorten implementiert und unter realen Bedingungen getestet. Hierbei lag ein Fokus auf der Untersuchung der Wirksamkeit der entwickelten Managementmaßnahmen unter unterschiedlichen Boden- und Witterungsbedingungen sowie unter starker fröhsommerlicher Bodentrockenheit. Außerdem wurde zur Untersuchung der langfristigen Auswirkungen der vorgeschlagenen Optionen der Feldversuch aus dem Jahr 2015 fortgeführt und beprobt.

Das Vorhaben war in der dritten Förderphase in fünf Arbeitspakete untergliedert, die folgende Schwerpunkte hatten: Synthese der in den Phasen I und II gewonnenen Daten und Ergebnisse (AP1), Transfer des in INPLAMINT entwickelten Managementansatzes mit Verwendung von organischen Bodenzusatzstoffen zur Bindung von

überschüssigem Stickstoff auf andere Regionen und klimatische Bedingungen in Feldversuchen (AP2), Evaluierung der Effekte der Managementmaßnahmen auf Sozioökonomie und Umwelt (AP3), Entwicklung von Managementempfehlungen und Entscheidungshilfen sowie Politikberatung (AP4), und schließlich der Koordination des Vorhabens und der Datenbereitstellung für das BonaRes-Datenzentrum (AP5).

I.4 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Beim Umsatz organischer Masse wird Stickstoff in der Biomasse der Mikroorganismen selbst und bei deren Absterben in zunächst wasserunlösliche organische Verbindungen gebunden und ist somit vor Auswaschung geschützt. Ist nicht genügend Stickstoff in den von den Bodenmikroorganismen umgesetzten C-Quellen vorhanden um den eigenen Bedarf zu decken, wird der Bodenlösung mineralischer Stickstoff (N_{\min}) entzogen. Dieser Mechanismus wird als mikrobielle Immobilisation bezeichnet. Die Einbringung kohlenstoffreicher und stickstoffarmer Biomasse, sogenannte High Carbon Amendments (HCA), kann diesen Effekt verstärken. Durch den temporären Rückhalt in der mikrobiellen Biomasse wird die Freisetzung von N_{\min} verzögert, womit die zeitliche Synchronisation von N-Verfügbarkeit und N-Aufnahme verbessert werden kann. In Phase I & II wurde untersucht inwieweit mit dem Nach-Ernte-Management der Erntestereste (Residuen) Einfluss auf diesen Prozess genommen werden kann. Dabei wurden folgende Management-Optionen getestet:

- Belassen und Einarbeiten der Vorfruchtresiduen (übliche Praxis)
- Austausch der Vorfruchtresiduen und Einarbeitung von Winterweizenstroh bzw. Sägemehl
- Bergung der Vorfruchtresiduen potentiell zur alternativen Verwertung (Biogas, Industrierohstoff, Verkohlung o.ä.)

Als Schlussfolgerung unserer Aktivitäten in Phase I & II kann festgehalten werden, dass die Einarbeitung von Wintergetreidestroh am Versuchsstandort Hohenschulen (I) den Anstieg des N_{\min} -Gehaltes im Herbst abpuffert, (II) die direkten Lachgasemissionen zwischen August und März signifikant verringert (Rothardt et al., 2021) und (III) Ertragseffekte auf Winterweizen und die nachfolgende Wintergerste hat. Die betriebsinterne Umlagerung hat sich als sozio-ökonomisch effizienteste Quelle für das Stroh herausgestellt. Daher wurden weiterhin Untersuchungen angestellt, die die

Konsequenzen dieses Verfahrens für die auf den Winterweizen folgende Wintergerste im Fokus hatten (AP 2.1.2).

In den Daten des großen Feldversuchs gab es Anzeichen dafür, dass eine eingeschränkte Wasserverfügbarkeit zu Beginn der Vegetationsperiode (Frühjahrstrockenheit) die N-Aufnahme der Pflanze limitiert, was zu Überschüssen an Stickstoff aus ungenutzter Düngung und Mineralisation und damit zu hohen Rest-Nitratmengen nach der Ernte führt. Daher und zur Bewertung der Übertragbarkeit der Erkenntnisse aus den Phasen I & II wurde am Kieler Versuchsstandort sowie auf drei weiteren Versuchstationen, betreut durch Projektpartner, ein Versuchsaufbau etabliert, der die Untersuchung der Wechselwirkung von Maßnahmen des Residuen-Managements und der Bodenfeuchte ermöglicht (AP 2.1.1).

I.5 Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Keine.

II. Eingehende Darstellung

II.1 Verwendung der Zuwendung und des erzielten Ergebnisses im Einzelnen, mit Gegenüberstellung der vorgegebenen Ziele

II.1.1 AP 1: Synthese der Daten aus Phase I und II

Die Zusammenführung der Erkenntnisse aus Phase I & II sowie die Ableitung von Handlungsempfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis aus Phase III unter der Koordination der Projektpartner vom FZJ unterstützten wir kontinuierlich mit den herausgearbeiteten Kernpunkten unserer Forschung und Abbildungen für Vorträge und Berichte. Beim letzten Projekttreffen in Jülich konnten etliche Punkte als finale Ergebnisse von 9 Jahren INPLAMINT festgehalten werden:

Die Handlungsempfehlungen werden in Form von Postern und Vorträgen sowohl bei der BonaRes-Fachtagung in Leipzig (Mai 2024) als auch bei den Feldtagen der DLG (Juni 2024) Landwirten_innen, Berater_innen und Vertretern_innen der Landwirtschaftsindustrie präsentiert werden. Des Weiteren ist ein zusammenfassender Flyer zur Weitergabe durch das BMBF und aller Projektpartner vorgesehen (s. auch Kapitel II.1.6).

II.1.2 AP 2.1.1: Wechselwirkungen von HCA und Dürre unter Feldbedingungen

Eines der Hauptziele in Phase III von INPLAMINT bestand darin, zu zeigen, dass unser Ansatz der gezielten HCA-Applikation zur N-Verlust-Reduktion, der im Langzeitexperiment in Kiel bestätigt wurde, unter einer Vielzahl verschiedener Standortbedingungen (Boden und Klima) wirksam und daher allgemein anwendbar ist (AP 2: Übertragung des INPLAMINT HCA-Ansatzes auf andere Regionen und Bedingungen). Dazu wurden Versuche an vier Versuchsstandorten im Norden, Osten, Süden und Westen Deutschlands durchgeführt, die sich in der Bodenart (sandig bis lehmig) und den klimatischen Bedingungen (von ozeanisch bis kontinental) unterscheiden, da diese Parameter einen entscheidenden Einfluss auf das Wachstum von Pflanzen und Mikroorganismen und die Nährstoffdynamik im Boden haben.

Der Versuch auf dem Versuchsgut wurde das erste Mal bereits zur Nach-Ernte-Periode im Sommer 2021 etabliert. Abbildung 1 zeigt die Faktoren des Versuchs, der in der Saison 2022/23 auf einem anderen Schlag wiederholt wurde.

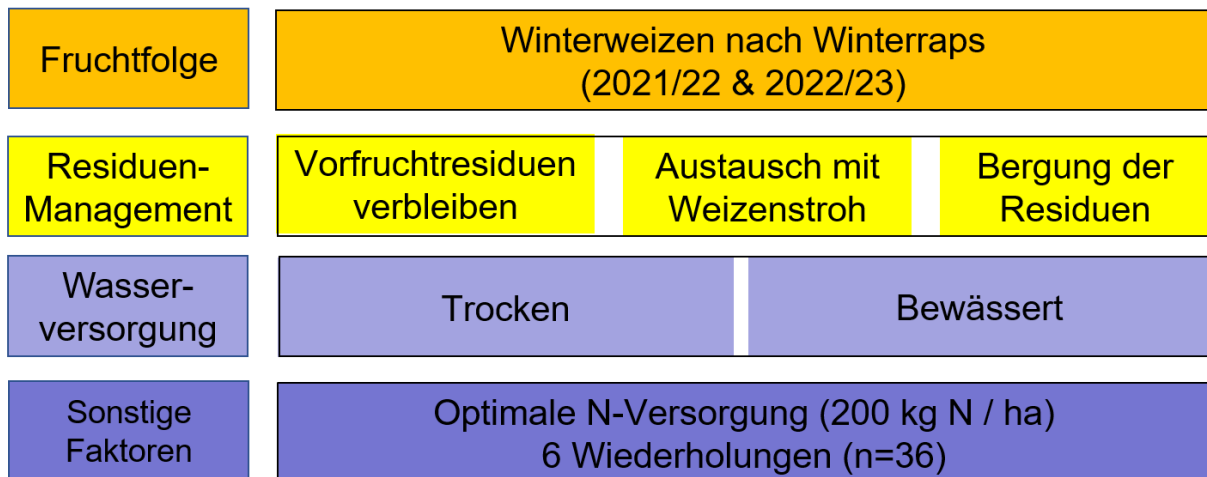


Abbildung 1: Schema des Versuchs zur Untersuchung des HCA-Ansatzes unter variierenden Boden- und Klimabedingungen sowie nach Frühjahrstrockenheit.

Die Unterschiede in der Wasserversorgung wurden durch Tröpfchenbewässerung bzw. der Installation von Regendächern über den Versuchspartellen induziert (Abbildung 2). Für den Beginn der Kontrastbehandlung wurde das Entwicklungsstadium EC31 (Schossen) gewählt. Von da an wurde für 6 Wochen Niederschlag von den trockenen Partellen abgehalten, während die restlichen Partellen neben dem regulären Niederschlag ca. 2x wöchentlich künstliche Bewässerung erhielten (~15 mm / Woche).



Abbildung 2: Mobile Regendächer (links) und Tröpfchenbewässerung (rechts).

Auf Hohenschulen sowie an allen weiteren Versuchsstandorten wurden entscheidende Pflanzen-, Boden- und mikrobielle Diversitäts- und Aktivitätsparameter analysiert und die Nährstoffdynamik, -Verluste und -Nutzungseffizienz aus Daten ermittelt, die die Projektpartner in regelmäßigen Abständen in gemeinsamen Probenahmen sammelten.

Im Folgenden werden ausschließlich Ergebnisse des von der Uni Kiel betreuten Versuchs auf Hohenschulen aus den Jahren 2021 bis 2023 präsentiert. Es ist geplant standortübergreifende Analysen einzelner Aspekte in wissenschaftlichen Fachzeitschriften zu publizieren.

Im Mittel der beiden Versuchsjahre lag der durchschnittliche Trockenmasse-Kornertrag mit Bewässerung bei $89 \pm 9.5 \text{ dt ha}^{-1}$, und war damit fast 20 dt ha^{-1} höher als nach Frühjahrstrockenheit ($69.5 \pm 9.5 \text{ dt ha}^{-1}$, Abbildung 3). Die Mittelwerte der unterschiedlichen Varianten der Nach-Ernte-Behandlung unterschieden sich jedoch kaum.

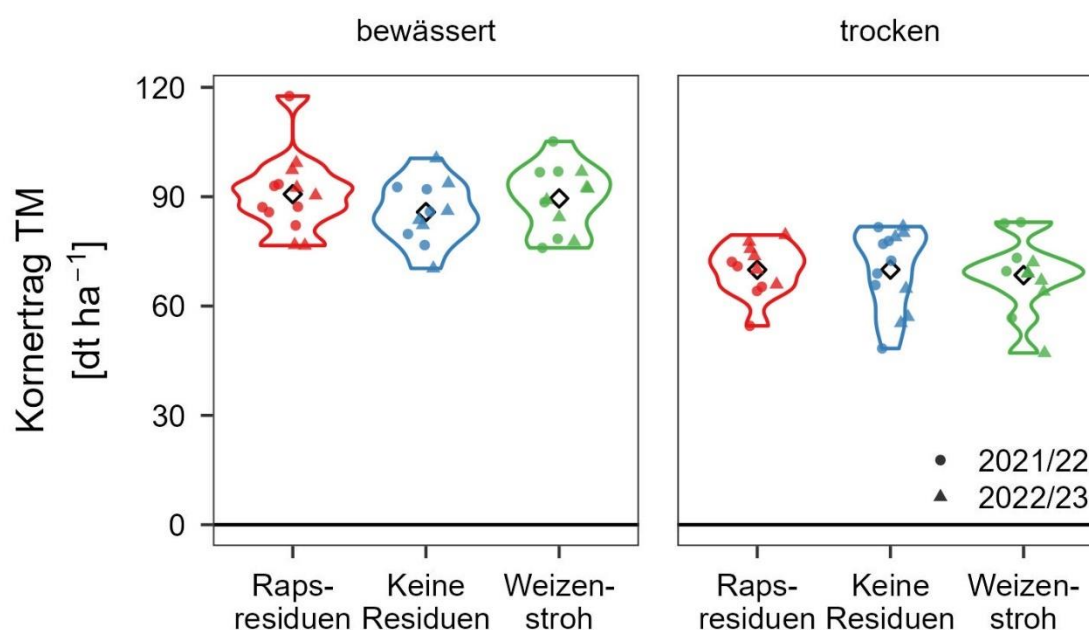


Abbildung 3: Trockenmasse (TM) Kornerträge Winterweizen mit 200 kg N ha^{-1} je Feuchteszenario und Residuenmanagement-Variante. Weiße Rauten repräsentieren das arithmetische Mittel.

Da Frühjahrstrockenheit die N-Aufnahme durch Winterweizen reduziert, die Düngung im Versuch aber nicht angepasst wurde, verblieb auf den entsprechenden Parzellen nach der Ernte im Durchschnitt 12 kg N ha^{-1} mehr ungenutzter mineralischer Stickstoff

im Boden als auf Parzellen mit Bewässerung (Abbildung 4). Die Gehalte in der bewässerten Variante unterscheiden sich nicht je nach Residuenmanagement. Dies spricht dafür, dass die N-Aufnahme in allen Fällen nicht beeinträchtigt war und am potentiellen Maximum lag. Nach Frühjahrstrockenheit war eine Differenzierung zu beobachten: während für die Variante mit der üblichen Praxis die Vorfrucht-Residuen einzuarbeiten N_{\min} -Gehalte von durchschnittlich $57 \pm 16 \text{ kg N ha}^{-1}$ zu beobachten waren, lag der Wert der beiden anderen Varianten bei $44 \pm 13 \text{ kg N ha}^{-1}$. Obwohl der sich der Unterschied nicht als statistisch signifikant belegen lässt, gibt er doch Hinweise auf die mögliche Mineralisationsdynamik: während es mit den Vorfrucht-Residuen nach der Trockenheit zur Mineralisation von N aus dem Stroh kommt, unterbleibt dies bei der Weizenstroh-Variante (= anhaltende Immobilisation) und ohne Residuen (= dauerhafte Verluste im Winter). Es kann also geschlussfolgert werden, dass anhaltende Immobilisation induziert durch die HCA-Einarbeitung unter bestimmten Bedingungen einem erhöhten N_{\min} -Gehalt (über Bedarf der Pflanze) entgegenwirkt, wenn die N-Aufnahme durch trockenere Verhältnisse reduziert war.

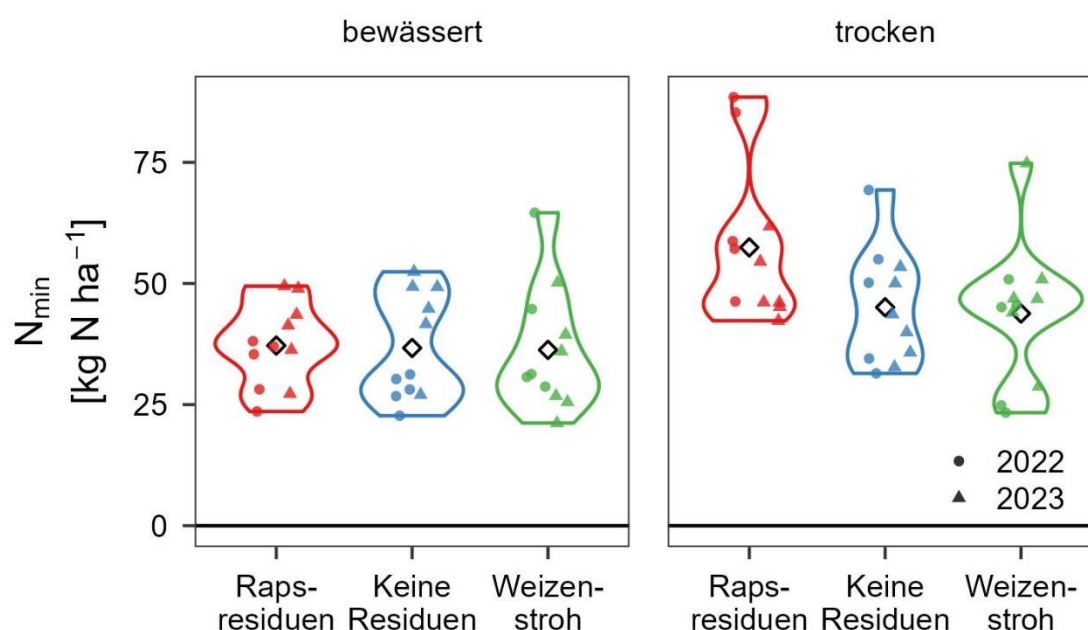


Abbildung 4: Gehalt an mineralischem Stickstoff in 0-90 cm Tiefe nach der Ernte von Winterweizen (gedüngt mit 200 kg N ha^{-1}) je Feuchteszenario und Residuenmanagement-Variante. Weiße Rauten repräsentieren das arithmetische Mittel.

II.1.3 AP 2.1.2: Optimierung des HCA-Managements bei sich veränderndem Klima

In Phase I & II wurde die betriebs-interne Umlagerung von Weizenstroh als effizienteste Option des Residuenmanagements identifiziert. Um die Datenbasis für die praktische Umsetzung unseres HCA-Ansatzes zu verbreitern, wurden in einem Feldversuch auf dem Versuchsgut Hohenschulen die Auswirkungen auf die Wintergerstenentwicklung bei konsequentem Residuenmanagement untersucht (Abbildung 5). Aufgrund der Vorerfahrungen beschränkten sich die getesteten Behandlungsvarianten auf

- Verbleib und Einarbeitung der Winterweizenresiduen,
- deren Austausch mit Rapsstroh
- und die Entfernung aller oberirdischen Erntereste.

Fruchtfolge	Wintergerste nach Winterweizen nach Winterraps (Ernte behandelter Gerste in 2021, 2022 & 2023)			
Residuen- Management	Vorfruchtresiduen verbleiben	Austausch mit Rapsstroh	Bergung der Residuen	
N- Düngestufen	0 kg N ha ⁻¹	80 kg N ha ⁻¹	160 kg N ha ⁻¹	240 kg N ha ⁻¹
4 Wiederholungen (n=48)				

Abbildung 5: Schema des Versuchs zur Untersuchung der Auswirkungen des HCA-Ansatzes bei konsequenter Anwendung auf Fruchtfolge-Ebene.

Die N_{\min} -Gehalte nach der Ernte von Winterweizen sind in der Regel vergleichsweise niedrig. Im Feldversuch fanden wir im Durchschnitt über alle Parzellen und Jahre 30 ± 8 kg N ha⁻¹ in 0-90 cm. Entsprechend unserer Hypothese war die N-Verfügbarkeit für die auflaufende Gerste im Herbst höher, wo keine bzw. die weniger immobilisierenden Rapsresiduen eingearbeitet wurden. Dieser Vorteil zeigte sich bereits zu Anfang Dezember in einem höheren Bedeckungsgrad dieser Parzellen (Daten nicht gezeigt). Der Entwicklungsvorsprung hielt in allen Düngestufen bis zur Ernte an und schlug sich nieder sowohl in höheren Erträgen als auch in einem niedrigeren N_{opt} (Abbildung 6). N_{opt} ist definiert als die agronomisch optimale Düngemenge, ab der sich weitere Ertragssteigerungen wirtschaftlich nicht rentieren (Dhakal and Lange, 2021).

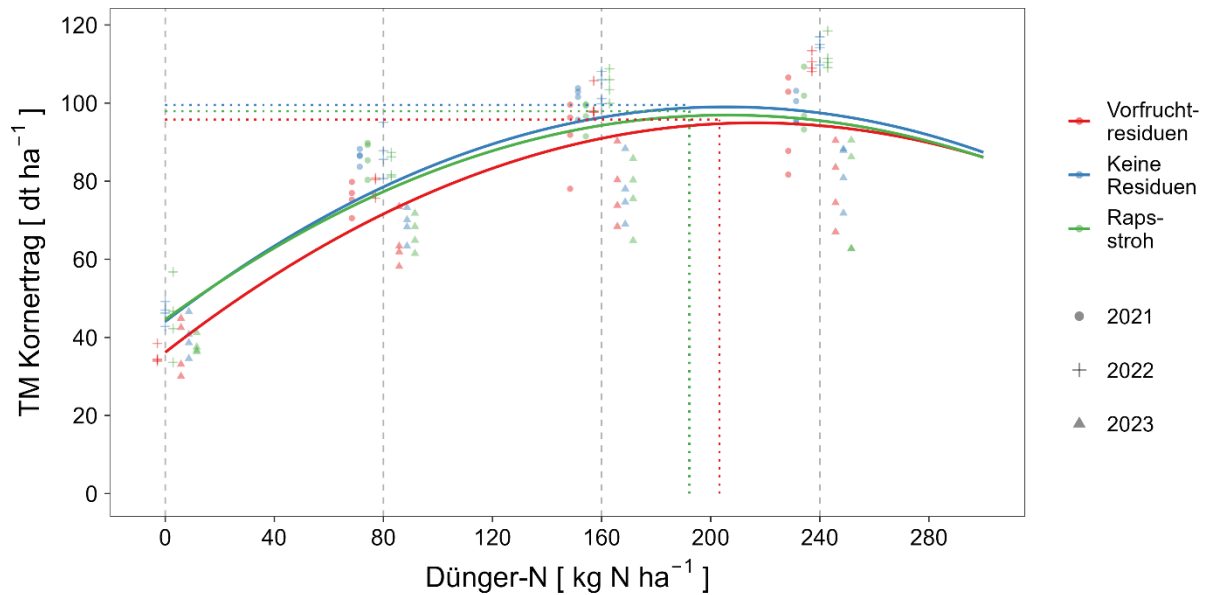


Abbildung 6: Quadratische Ertragsfunktionen angepasst an die Trockenmasse der Kornerträge von Wintergerste 2021 bis 2023 (farbige Punkte); graue vertikale gestrichelte Linien zeigen die Dünge-stufen im Versuch an, farbige gepunktete Linien markieren N_{opt} und Y_{opt} .

Während sich die wirtschaftlich optimal zu erzielenden Erträge (Y_{opt}) kaum unterscheiden, ist N_{opt} mit Rapsstroh bzw. nach Bergung der Erntereste durchschnittlich um 5 % niedriger als beim üblichen Verbleib des Weizenstrohs (n.s.).

Aggregiert mit den entsprechenden Trockenmassen der Kornerträge und dem Korn-N-Gehalt ergeben sich deutliche Unterschiede der beiden alternativen Behandlungen zur üblichen Praxis hinsichtlich der Stickstoff-Nutzungs-Effizienz (NUE), hier gerechnet als Quotient von N-Ertrag und Dünger-N, sowie der N-Bilanz (= N-Ertrag – Dünger-N, Abbildung 7).

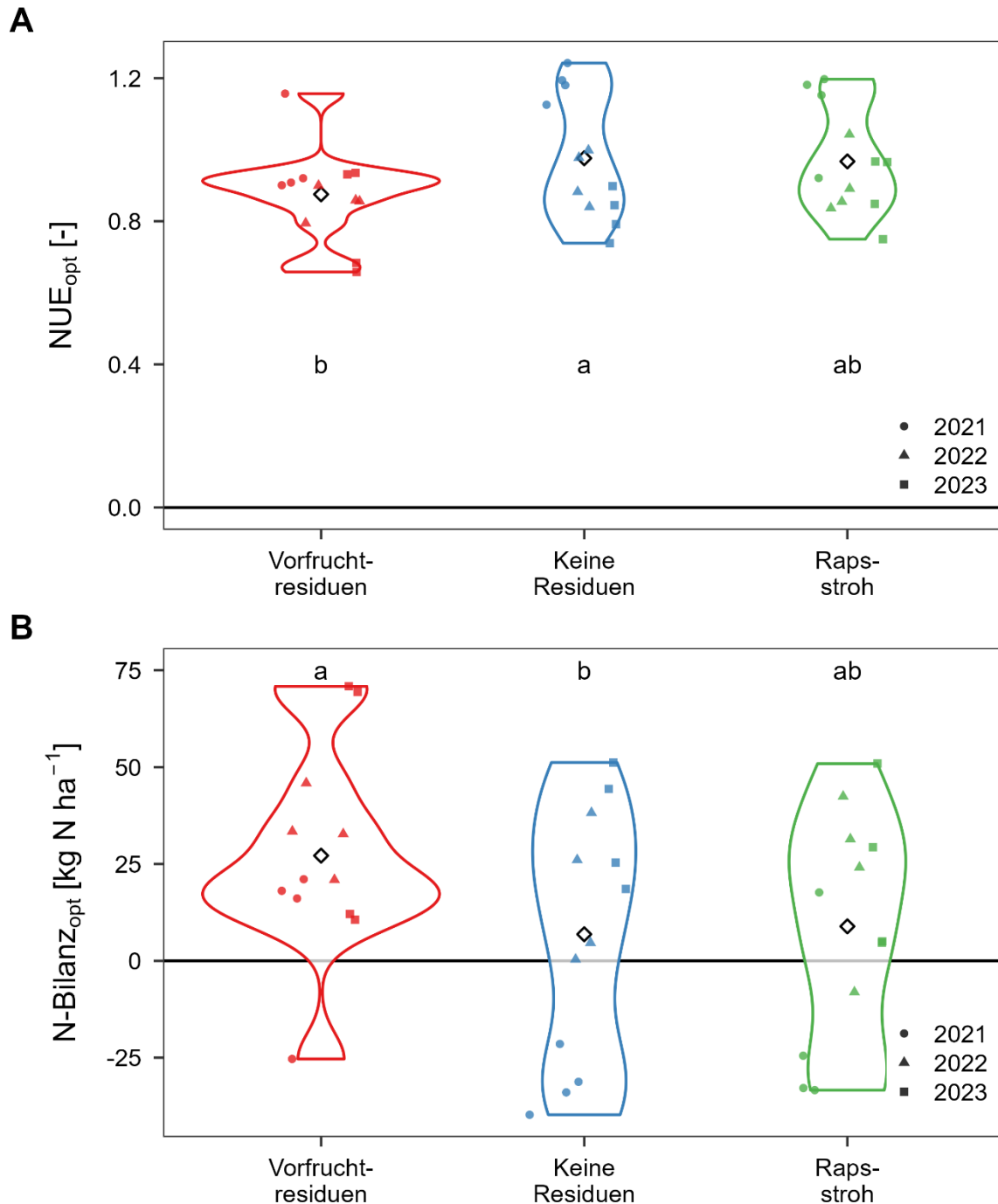


Abbildung 7: (A) Stickstoff-Nutzungs-Effizienz bei N_{opt} ($NUE_{opt} = Y_{opt} * N_{Grain} / N_{opt}$) und (B) N-Bilanz bei N_{opt} ($= N_{opt} - (Y_{opt} * N_{Grain})$). Weiße Rauten repräsentieren das arithmetische Mittel, kleine Buchstaben zeigen signifikante Unterschiede der Mittelwerte an ($p < 0.05$).

Die mittleren N_{min} -Gehalte in 0-90 cm zur Gerstenernte unterscheiden sich nicht in Abhängigkeit des Residuenmanagements (Abbildung 8). Dies verdeutlicht, dass mit der N-Düngermenge unter dem Optimum die maximale Aufnahme in allen Varianten erreicht wurde.

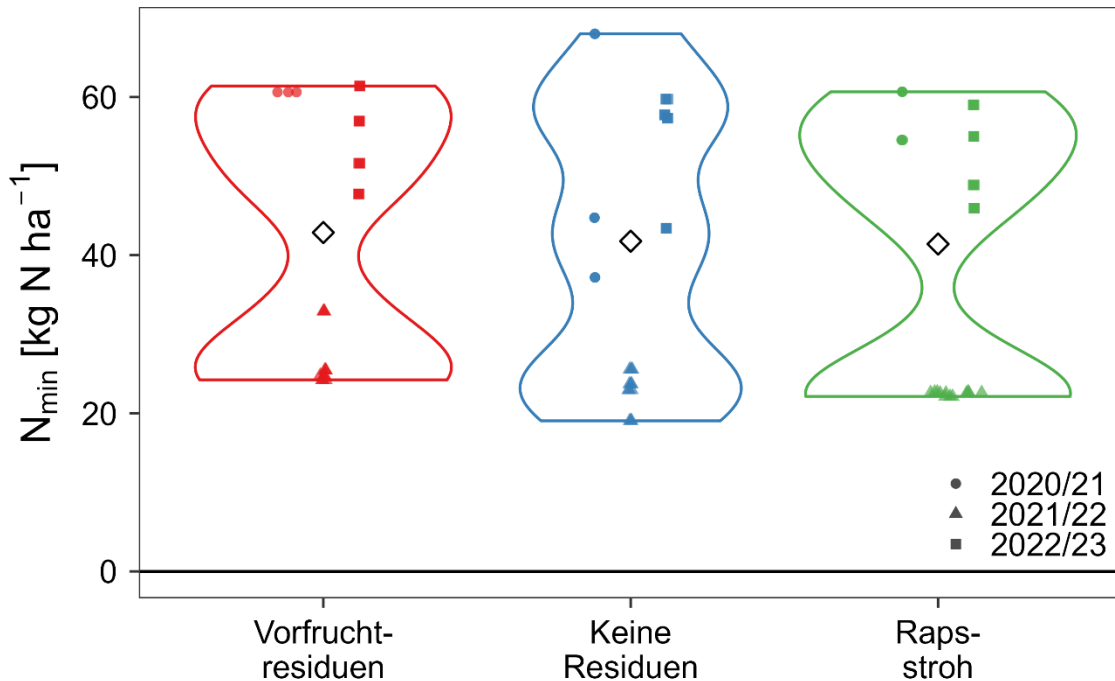


Abbildung 8: N_{min}-Gehalte in 0-90 cm zur Ernte von Wintergerste mit 160 kg N ha⁻¹. Weiße Rauten repräsentieren das arithmetische Mittel.

II.1.4 AP 3.2.1: Entwicklung & Anwendung eines umwelt- und sozioökonomischen Modellierungsansatzes

Die sozioökonomisch-ökologische Bewertung der entwickelten Residuenmanagement-Optionen durch die Partner aus Nürtingen (HfWU) unterstützten wir mit der Weitergabe und Erläuterung unserer Ergebnisse der vorangegangenen Projektphasen. Die Simulation der Bewirtschaftung auf Betriebs-Ebene konnte mit dem Kieler Pflanzen-Boden-Prozessmodell bislang nicht erfolgen. Grund dafür ist der Mangel an validierten Wachstumsmodellen für Ackerbohnen und Wintergerste, die in anderen Projekten entwickelt werden sollten.

II.1.5 AP 4.1: Empfehlungen für Landwirte_innen

Aufgaben 4.1.3: Regionalisierte Empfehlungen zur N-Düngung

Der Wesentliche Einfluss der vorgeschlagenen Management-Optionen auf N-Düngungsempfehlungen erfolgt über mittel- bis langfristige Veränderungen des Bodenkohlenstoff- und -stickstoffhaushalts sowie der Bodennitratdynamik und -auswaschung denkbar. Da die Simulation einer wiederkehrenden Behandlung auf Fruchtfolge- bzw. Betriebsebene aus in Kapitel II.1.4 angeführten Gründen nicht möglich war, kann der

Effekt über das 1. Jahr nach der Behandlung hinaus nicht allgemeingültig quantifiziert und keine regional angepasste N-Düngungsempfehlung gegeben werden.

Um das Potenzial von Residuenmanagement zur Minderung von N-Auswaschungsverlusten unter Winterweizen in einem weiteren räumlichen Kontext zu bewerten, haben wir jedoch eine modellgestützte Simulationsstudie durchgeführt, die die Auswirkungen der Einarbeitung von Raps- und Winterweizenstroh sowie eine residuulose Variante an 10 Standorten über einen Zeitraum von 25 Jahren simuliert (Rothardt and Kage, 2024). Ausgangslage waren erhöhte Rest-N_{min}-Gehalte (60 kg N ha⁻¹ in 0-90 cm) wie sie nach der Ernte von Winterraps und Ackerbohnen beobachtet werden können. Besonderes Augenmerk lag auf Extremwetterperioden (überdurchschnittliche Sickerwassermengen im Herbst/Winter und Trockenperioden im Frühjahr), wie sie im Zuge des Klimawandels vermehrt auftreten können. Zur Bewertung der Maßnahmen wurden u.a. der Düngemittelbedarf nach DüV (2020), und die N-Bilanz (Stoff-BilV, 2018) ermittelt (Deliverable D2). Eine Diskussion weiterer Parameter findet sich in Rothardt und Kage (2024).

Die Ergebnisse zeigen, dass die Niederschläge an den ausgewählten Untersuchungsstandorten einen größeren Einfluss auf die N-Auswaschung haben als die lokalen Bodeneigenschaften. Die Einarbeitung von Winterweizenstroh reduzierte die Netto-N-Mineralisierung im Herbst um durchschnittlich 12 kg N ha⁻¹ im Vergleich zur üblichen Praxis, bei der das Vorfruchtstroh auf der Fläche verbleibt. Die Behandlungseffekte auf die N-Auswaschungsverluste blieben jedoch gering (n.s.). Der größte Teil des ursprünglichen N-Überschusses verbleibt befindet sich während der Vegetationsperiode noch in den Schichten des Bodenprofils, die den Weizenwurzeln zugänglich sind. Dies war selbst in Jahren mit außergewöhnlich hoher Sickerwassermenge der Fall. Nach der Einarbeitung von Winterweizenstroh war die N-Verfügbarkeit durch die anhaltende Immobilisierung reduziert. Dies führte im Schnitt über alle Standorte und Jahre zu negativen Ertragseffekten von 11 ± 5 kg N ha⁻¹. An 7 von 10 Standorten konnte ohne Einarbeitung von Ernteresten die niedrigste N-Bilanz beobachtet werden (Abbildung 9). Die hohen N-Überschüsse nach der Einarbeitung von Weizenstroh deuten abermals darauf hin, dass die N-Verfügbarkeit durch die anhaltende Immobilisierung herabgesetzt wurde.

Die Ergebnisse der Studie unterstreichen die Notwendigkeit den Management-bedingten Effekt auf die Mineralisierung bei der Schätzung des Düngemittelbedarfs nach DüV zu berücksichtigen. Dies würde dazu beitragen, die agronomische Produktivität zu optimieren und gleichzeitig das Risiko von Nährstoffverlusten durch Auswaschung zu minimieren.

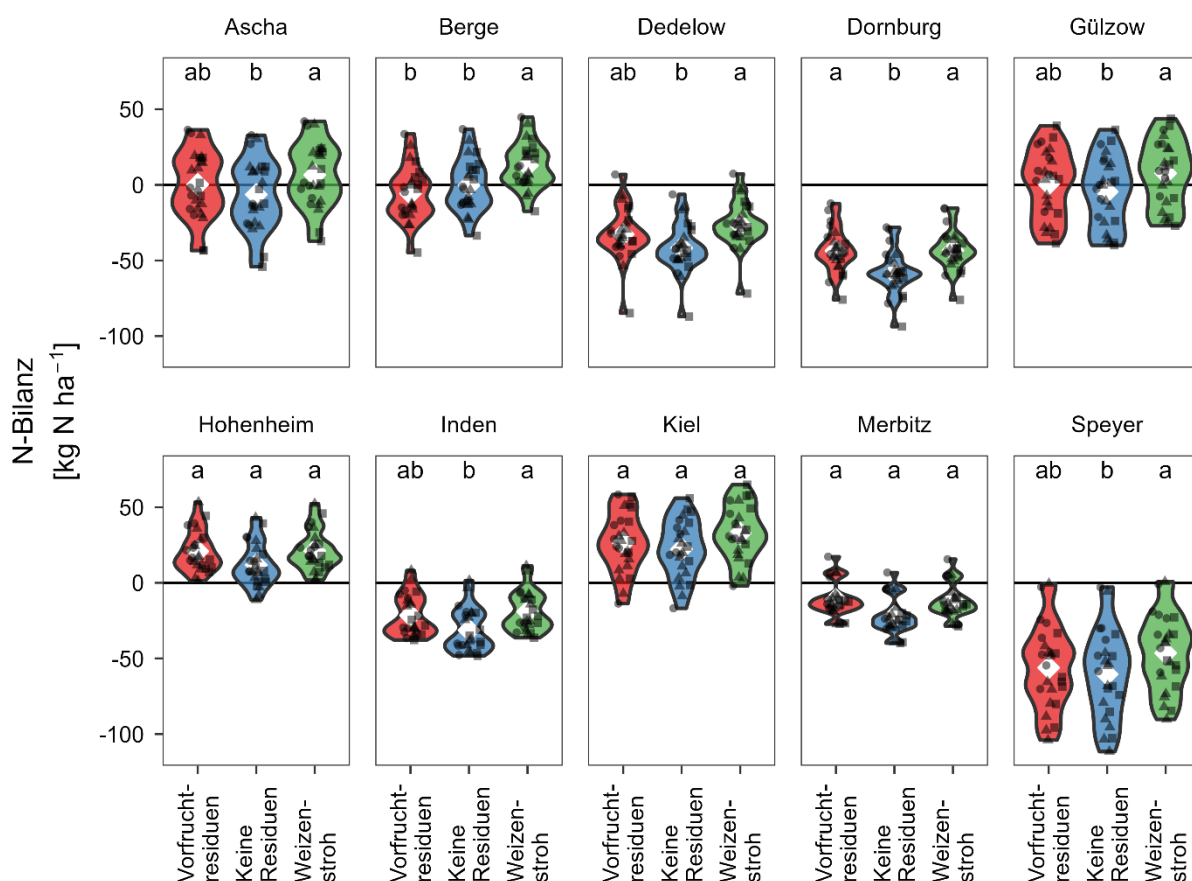


Abbildung 9: Modellerte N-Bilanz nach Winterweizen für die Szenarien-Standorte mit Düngung nach DüV im Schnitt von 1991-2018. Dunkle Punkte entsprechen Einzelwerten, weiße Rauten dem arithmetischen Mittel, Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede je Standort.

Über die langfristigen Auswirkungen wiederholter HCA-Einarbeitung kann nur gemutmaßt werden: Der Gehalt an organischer Substanz im Boden (soil organic matter, SOM) müsste ansteigen. In Folge dessen käme es zu mehr N-Freisetzung durch eine gesteigerte Mineralisierung des vergrößerten SOM-Kompartiments. Dies könnte einerseits zu Düngesparungen führen, aber auch wieder zu einem erhöhten Verlustrisiko durch Herbstmineralisation, wenn die N-Aufnahmekapazität vieler Kulturen gering ist.

Die in der Studie verwendeten Boden-C/N-Mineralisierungsmodul und das Pflanzenwachstumsmodell werden derzeit in ein webbasierte Düngereberatungstool für Winterweizen eingebunden (Kage et al., 2024). Die noch in der Entwicklung befindliche App soll mittelfristig in die etablierte Beratungsplattform www.isip.de integriert werden.

II.1.6 AP 4.2: Verbreitung

Aufgabe 4.2.1: Präsentationen und Veröffentlichungen für Landwirte

Deliverable D18 & D19: Vortrag bei DLG-Feldtagen & zwei Veröffentlichungen

Auf den DLG-Feldtagen 2022 haben wir unseren Ansatz der HCA-Behandlung am BonaRes-Messestand in Form eines Posters präsentiert. Ein wissenschaftlicher Mitarbeiter war einen Tag vor Ort um der interessierten Öffentlichkeit Rede und Antwort zu stehen. Unser Beitrag zu den DLG-Feldtagen 2024 (nach Berichterstellung) wird ebenfalls ein Poster mit den zusammenfassenden Ergebnissen und Handlungsempfehlungen darstellen.

II.1.7 AP 4.3: Politikberatung

Aufgabe 4.3.3: Synthesebericht und Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger

Die Erstellung des Synthese-Berichts, koordiniert vom Projektpartner FZJ, werden wir mit der Bereitstellung von Daten, Abbildungen und abgeleiteten Erkenntnissen unterstützen. Auf dem Projekttreffen in Jülich (April 2024) wurden vom gesamten Konsortium die Handlungsempfehlungen aus 9 Jahren INPLAMINT-Forschung zusammengestellt.

II.1.8 Ergebnis (Deliverable) D2: N-Bilanzberechnung auf Fruchtfolgeebene, standortspezifische Modellierung von Behandlungseffekten unter unterschiedlichen Boden- und Klimabedingungen, Folgenabschätzung der vorgeschlagenen Bewirtschaftungsoptionen

Die Stickstoffbilanz auf Fruchtfolgeebene (Gleichung I) wurde berechnet, um die mittelfristigen Auswirkungen der vorgeschlagenen Managementoptionen auf das gesamte Anbausystem zu bewerten.

$$N - \text{Bilanz}_{\text{Fruchtfolge}} = \sum N - \text{Erträge} - \sum \text{Dünger} - N$$

Gleichung I

Als Berechnungsgrundlage dienten Ertragsdaten aus dem großen Feldversuch, da hier von 2015 bis 2023 sechs vollständige Durchläufe der beiden untersuchten Fruchtfolgesequenzen (Winterweizen – Wintergerste – Winterraps bzw. Ackerbohne) im Nachgang eines Residuen-Managements kultiviert worden waren. Abbildung 10 zeigt die berechneten Werte der einzelnen Wiederholungen der sechs Durchläufe (kleine Symbole), deren Verteilung (Violin-Diagramme) und die jeweiligen Mittelwerte (weiße Rauten). Aufgrund der Düngung von Winterraps über Bedarf (240 kg N ha^{-1}) fällt die N-Bilanz der entsprechenden Fruchtfolge höher aus für die Ackerbohnen-Fruchtfolge, für die nur die mittlere N-Fixierungsleistung der Leguminose von ca. 224 kg N ha^{-1} einbezogen wurde. Im Vergleich innerhalb der Fruchtfolge weist nur die Einarbeitung von Sägemehl höhere Werte als die Kontrolle auf. Dies verdeutlicht noch einmal die langfristige Festlegung von N beim Abbau des ligninreichen Holzprodukts, was bei einheitlicher Düngung niedrigere N-Erträge bedingt. Im Falle der Weizenstroh-Behandlung kann davon ausgegangen werden, dass festgelegter Stickstoff mittelfristig der N-Aufnahme durch die Pflanze wieder zur Verfügung steht und sich Ertragseffekte auf Ebene der Fruchtfolge aufheben.

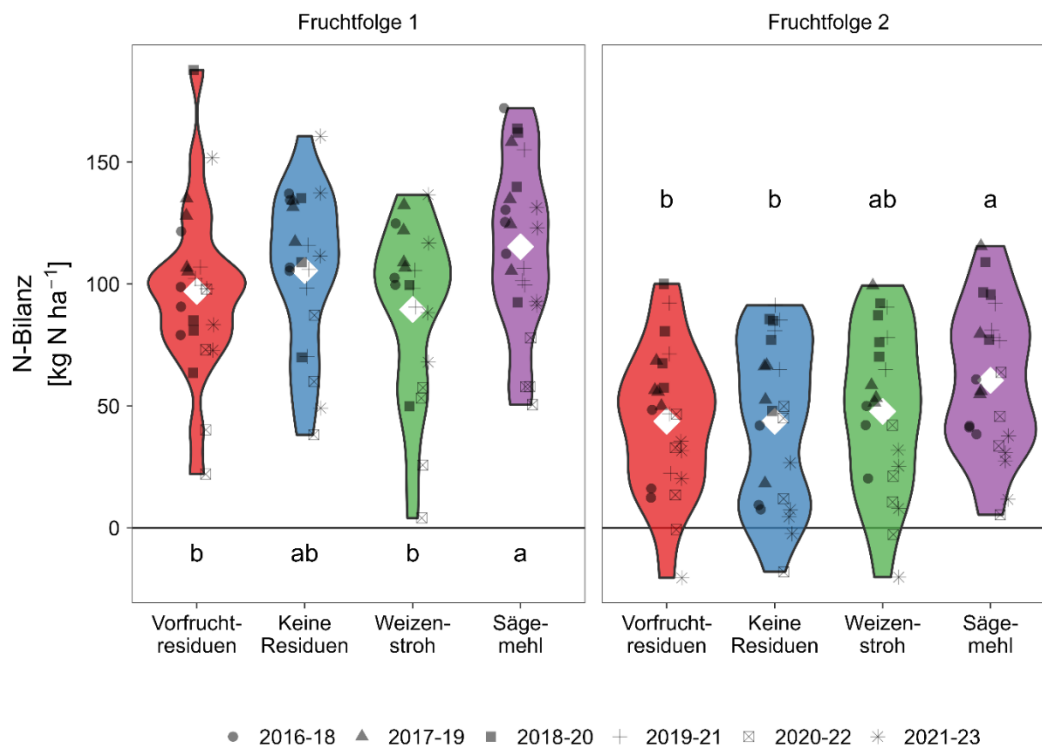


Abbildung 10: N-Bilanz auf Fruchtfolge-Ebene basierend auf 6 vollständigen Durchläufen der Sequenzen Winterweizen (2016-2021, 200 kg N ha⁻¹) - Wintergerste (2017-2022, 50 kg N ha⁻¹) – Winterrapen (Fruchfolge 1, 240 kg N ha⁻¹) bzw. Ackerbohne (Fruchfolge 2, mittlere N-Festlegung 224 kg N ha⁻¹) (2018-2023). Weiße Rauten repräsentieren das arithmetische Mittel, Kleinbuchstaben zeigen signifikante Unterschiede an (p < 0.05).

Die N-Bilanz für Winterweizen nach Residuenmanagement an weiteren Standorten wurde bereits im Kontext regionalisierter Düngempfehlungen in Kapitel II.1.5 diskutiert.

II.1.9 Deliverable D3: Bewertung der langfristigen Auswirkungen von HCA-Behandlungen auf verschiedene Bodenzustandsparameter

Die Analyse der Stickstoff-Entzüge (= N-Ertrag = TM Kornertrag x N-Gehalt) des Langzeit-Feldversuchs (Publikation in Vorbereitung) gab Hinweise auf mittelfristige Effekte der Behandlungen auf Ebene der Fruchtfolge (Abbildung 11). Die Einarbeitung von Weizenstroh und Sägemehl führte im ersten Jahr nach der Behandlung zu Ertragseinbußen, was mit anhaltender Stickstoffimmobilisation in der Vegetationsperiode zusammenhängt. In der Weizenstrohvariante wurde dieser Nachteil im zweiten Jahr ausgeglichen, was dafürspricht, dass ehemals festgelegter Stickstoff re-mineralisiert

wurde. Die durch Zugabe von Sägemehl induzierte Immobilisation hielt jedoch weiter an, was wiederum zu niedrigeren Gerstenerträgen führte.

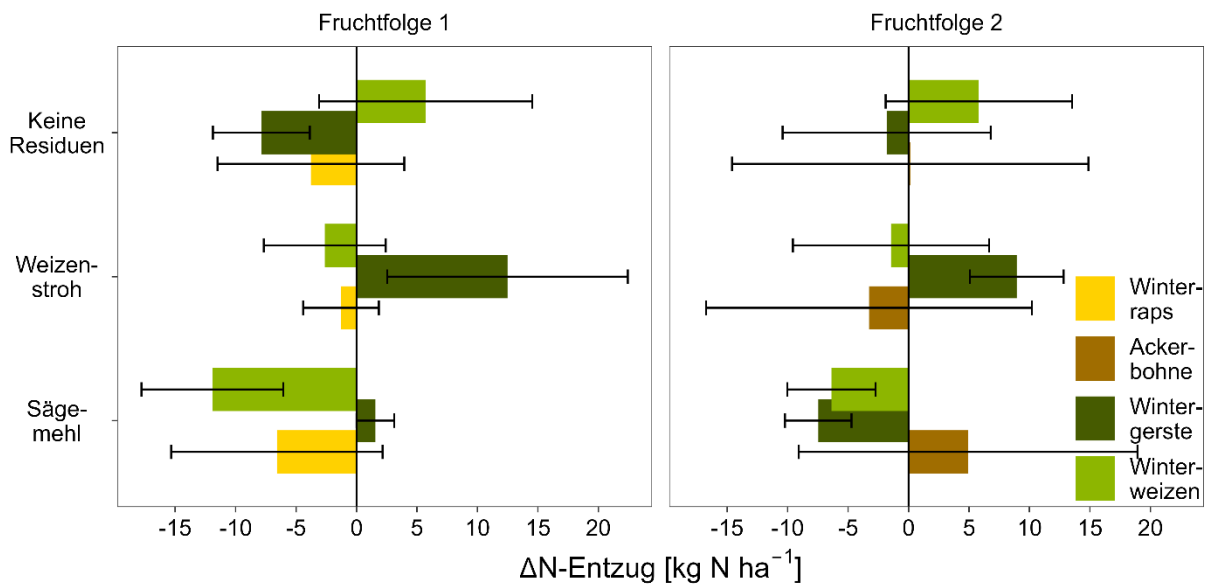


Abbildung 11: Differenz der N-Entzüge je Kultur im Vergleich zur Kontrollbehandlung (Einarbeitung der Vorfruchtresiduen), gemittelt über 6 Vegetationsperioden à 4 Wiederholungen je Kultur, N-Düngung von Winterweizen = 200 kg N ha^{-1} = nahe am lokalen Optimum, Gerste 50 kg N ha^{-1} , Wintererbsen 240 kg N ha^{-1} , Ackerbohne ungedüngt; Fehlerbalken geben den Standardfehler an.

Im dritten Jahr nach der Behandlung sind die Behandlungseffekte vernachlässigbar klein, was auch damit zusammenhängen dürfte, dass Winterraps an dieser Stelle über Bedarf gedüngt wurde (um erneute kritische Ausgangsbedingungen für die Behandlungen zu schaffen) und Ackerbohnen, als Leguminosen, ihren N-Bedarf über symbiotische Stickstofffixierung decken. Durch die Entfernung der Vorfruchtresiduen kam es durchschnittlich zu positiven Ertragseffekten auf Winterweizen und im zweiten Jahr eher zu Ertragseinbußen bei der Gerste. Während im ersten Jahr der Mineralisierung des Humusvorrats keine mikrobielle Immobilisation entgegenwirkte, also der Pflanze potentiell mehr N zur Verfügung stand, wurde im zweiten Jahr aufgrund fehlender Erntereste kein Stickstoff durch den Abbau von Biomasse frei.

Eine Arbeitshypothese lautet, dass der durch die Einarbeitung insbesondere von Sägemehl langfristig festgelegte Stickstoff zur Anreicherung von organischem Kohlenstoff im Boden beiträgt. Der Stickstoff ist also nicht verloren, sondern wird langfristig in einem neuen Mineralisationsgleichgewicht aus der organischen Bodensubstanz freigesetzt. Um diese Vermutung zu belegen wurden im Frühjahr 2023 nach 8 Versuchsjahren auf allen Parzellen Bodenproben aus den obersten 30 cm entnommen. Ziel der Untersuchung der Proben auf Makronährstoffe wie N, P und K sowie den Gehalt an organischem C durch unseren Projektpartner UCol ist ein Vergleich des Effekts der unterschiedlichen Behandlungen auf den Bodennährstoffhaushalt. Die Untersuchung ist zum Zeitpunkt der Berichterstellung noch nicht abgeschlossen.

II.1.10 Deliverable D13: Vergleich des BODIUM-Modellansatzes des BonaRes Centers und dem eigenem Modellierungsansatz, Bewertung der Vorhersagegenauigkeit und Präsentation der Entwicklungsstrategie

Zur Erreichung dieses Ziels wurde im Sommer 2023 Kontakt mit dem BonaRes-Center aufgenommen (Frau Dr. König, Herr Dr. Weller). Das BODIUM-Modell war zu diesem Zeitpunkt bereits lauffähig allerdings in einem Entwicklungszustand, der die Benutzung durch Außenstehende verhinderte. Zur BonaRes-Center-internen Vergleichsrechnung sollte daher zunächst der in Rothardt und Kage (2023) diskutierte und veröffentlichte Datensatz dienen. Ergänzende Angaben zum Modell und eine umfassende Parameterliste wurden übermittelt. Ein Vergleich der Ergebnisse der beiden Ansätze und eine abschließende Bewertung lag zum Zeitpunkt der Berichterstellung nicht vor.

II.1.11 Deliverable D17: Regionalisierte Berechnungen für $N_{opt} = f(HCA)$

Überschneidung mit Task 4.1.3: Regionalisierte Empfehlungen zur N-Düngung

Der Parameter N_{opt} beschreibt die ökonomisch optimale N-Düngungshöhe, bei der der Gewinn aus einer weiteren Ertragssteigerung die zusätzlichen Düngerkosten nicht rechtfertigt (Dhakal and Lange, 2021). Da N_{opt} erst im Nachhinein bestimmt werden kann (*ex post*), ist es nur indirekt für die Bemessung einer optimalen Stickstoffdüngungshöhe geeignet. Hierzu kann es jedoch beitragen, indem Faktoren identifiziert werden, die vor der Düngung bekannt sind und einen Effekt auf die Lage des Düngungsoptimums aufweisen.

Ein langjährig mittleres N_{opt} wird in der Regel standortspezifisch aus mehrjährigen Ertragsdaten aus N-Steigerungsversuchen (mindestens 4 N-Düngeintensitätsstufen von 0 bis Überdüngung) mit Hilfe von regionalen Marktpreisen für Stickstoffdünger und dem Verkaufserlös der jeweiligen Kultur abgeleitet. Mit Hilfe der im Projekt gewonnenen Daten und Erkenntnissen sollte untersucht werden inwieweit sich ein regionales N_{opt} in Abhängigkeit der HCA-Behandlung verändert. Dazu haben wir zwei Ansätze verfolgt:

1. Übertrag der prozentualen Veränderung aus den Feldversuchsdaten
2. Sensitivitätsanalyse im Rahmen unserer Modellierungsaktivitäten für 10 Standorte (Kapitel II.1.5)

Zu Ansatz 1: Aus quadratischen Ertragsfunktionen (N-response-curves), angepasst an die Ertragsdaten für Winterweizen aus den Jahren 2016 bis 2021, wurde je Behandlung das mittlere N_{opt} ermittelt. Das Verfahren und die Datengrundlage werden in Rothardt & Kage (2023) im Detail beschrieben. Für Winterweizen nach Winterraps ließ sich kein Unterschied zwischen den Behandlungen statistisch absichern. In der Ackerbohnen-Fruchtfolge lag N_{opt} für Winterweizen nach der Einarbeitung von Winterweizenstroh 6 % höher als bei üblicher Nachernte-Behandlung ($206 \pm 30 \text{ kg N ha}^{-1}$). Mit Sägemehl betrug die Veränderung sogar 8 %. Die jeweiligen mit N_{opt} zu erreichenden Erträge (Y_{opt}) unterschieden sich dabei nicht signifikant.

Aus den Versuchen mit Wintergerste (s. Kapitel II.1.3) ergab sich mit der gleichen Methodik eine mittlere potentielle Einsparung bei N_{opt} von 5 %, wenn Weizenstroh

betriebs-intern umgelagert würde. Damit hebt dich der Effekt auf Fruchtfolge-Ebene nahezu auf, was sich ja auch in den Ergebnissen von Kapitel II.1.8 widerspiegelt.

Zu Ansatz 2: Szenarien: 10 Standorte, WW nach Raps (hoher Rest- N_{\min} , leicht abbaubare Erntereste), 3 Managements, 25 Jahre Wetterdaten. Düngung nach DüV: ausgehend von einem N-Bedarfswert für A/B-Weizen von 230 kg N ha^{-1} bei einem Ertragsniveau von 8 t ha^{-1} . Dieser Wert wurde gemäß des Vorfruchtabschlags bei Winterraps um 10 kg N ha^{-1} . Des Weiteren erfolgten standortspezifische Anpassungen des Werts i. A. des Ertragsniveaus im Durchschnitt der vergangenen fünf Jahre, des Bodenhumusgehalts und vor allem des N_{\min} -Gehalts im Frühjahr als direkte Folge des Residuenmanagements. Standorte mit Lage in Gewässerschutzgebieten, bei denen eine weitere Reduktion dieses Düngebedarfs um 20% erfolgt, wurden nicht berücksichtigt. Für die Ermittlung des N_{opt} wurden folgende Preisannahmen gemacht: für Backweizen (A/B-Qualität) 265 € t^{-1} unabhängig vom Proteingehalt und für Stickstoffdünger wurde ein Mittel von Kalk-Ammon-Salpeter und Harnstoff von $1,93 \text{ € kg N}^{-1}$ definiert. Im Gegensatz zu den N-response-Kurven aus den Versuchsdaten wurden die Ergebnisse dieser Modellierungsstudie mit einer Quadratisch-Plateau-Funktion (QP) gefittet, welche einen Ertragsanstieg bis zum Scheitelpunkt der quadratischen Funktion annimmt und ab dem Scheitelpunkt einen konstanten Ertrag (Y_{max}) postuliert. Die Anwendbarkeit des Parameters N_{opt} wird in der Praxis durch Vorschriften in der Düngeverordnung (DüV, 2020) allerdings künstlich beschränkt. Der mit Hilfe der dort beschriebenen Vorgehensweise abgeleitete Düngebedarf (maximal zulässige Düngergabe) liegt in der Regel unterhalb von N_{opt} . Darüber hinaus berücksichtigt die aktuelle Düngebedarfsermittlung keine Option des Residuenmanagements.

II.1.12 Beitrag zu anderen Arbeitspaketen

In Phase III konnten dem BonaRes-Repository 13 Datensätze übergeben werden, welche sich auf eine Publikation beziehen (Rothardt and Kage, 2024), und somit der Öffentlichkeit zugänglich sind (AP 5). Bis zum Ende der Projektlaufzeit ist die Einstellung von sieben weiteren Datensätzen vorgesehen.

Im Rahmen der Aktivitäten des AP 2 wurden gemeinsame Probennahmen mit den Projektpartnern aus Jülich durchgeführt. An die Partner aus Köln, München und Lüneburg wurden Boden- und Vegetationsproben aus den Versuchen für

Laboruntersuchungen versandt. Teile der Ergebnisse der gemeinsamen Forschung wurden in Vorträgen bereits der wissenschaftlichen Gemeinschaft vorgestellt. Auswertungen der verschiedenen Aspekte sollen in begutachteten Zeitschriftenartikeln als gemeinsame Arbeiten veröffentlicht werden.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Ein Großteil der verausgabten Mittel wurde für Personal eingesetzt. Zur Durchführung des Vorhabens wurden ein Doktorand, eine technische Angestellte und studentische Hilfskräfte engagiert. Neben den regelmäßigen Probennahmen wurde kontinuierlich die Auswertung der Untersuchungsergebnisse entwickelt. Die Zwischenergebnisse wurden auf Projekttreffen und wissenschaftlichen Konferenzen präsentiert, wofür auch Mittel zur Deckung der Reisekosten eingesetzt wurden.

Ein weiterer wesentlicher Anteil der Ausgaben entfällt auf die Anlage und Pflege der Feldversuche auf dem Versuchsgut Hohenschulen sowie die Beschaffung des verwendeten Sägemehls. Die Analyse der Proben wurde zum großen Teil im eigenen Labor durchgeführt, wofür immer wieder Verbrauchsgüter angeschafft werden mussten. Die Herstellung der mobilen Regendächer und die Beschaffung der Bewässerungsanlage konnte größtenteils aus Restmitteln der 2. Phase finanziert werden.

Auf Antrag wurde eine mittelneutrale Verlängerung bis 31.8.2024 bewilligt. Diese Zeit wurde genutzt, um Datenübergabe bzw. -konservierung sicherzustellen. Außerdem befinden sich zwei Publikationen, die auf Projektdaten beruhen, kurz vor der Einreichung bei wissenschaftlichen Fachzeitschriften.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Die durchgeführten Arbeiten waren der anspruchsvollen Aufgabenstellung des Projektes angemessen und zur Erreichung der Projektziele notwendig.

II.4 Voraussichtlicher Nutzen, insbesondere der Verwertbarkeit des Ergebnisses im Sinne des fortgeschriebenen Verwertungsplans

II.4.1 Wirtschaftliche Erfolgsaussichten

Von der Erhöhung der Nährstoffnutzungseffizienz profitieren Produzenten_innen und Verbraucher_innen nicht nur direkt finanziell durch den reduzierten Einsatz von

Düngemitteln sondern und vor allem indirekt durch die Vermeidung von Umweltbelastungen.

Das Vorhaben hat eine klare Anwendungsperspektive, die jedoch weniger in einer Kostenreduktion als in einer erhöhten Umweltverträglichkeit der landwirtschaftlichen Produktion zu sehen ist. Gleichzeitig hat es jedoch Grundlagenforschungscharakter mit dem Ziel die Prozesse des Nährstoffumsatzes und der Nährstoffflüsse weiter aufzuklären und im Feldmaßstab zu quantifizieren. Eine zentrale Rolle spielt die Abbildung der Prozesse in einem numerischen Modell, welches die Grundlage für ein Online-Düngeberatungstool bildet (Kage et al., 2024). Dieses soll Landwirte_innen unterstützen den Nährstoffbedarf ihrer Bestände realistisch einzuschätzen und Düngergaben entsprechend anzupassen.

II.4.2 Wissenschaftliche und/oder technische Erfolgsaussichten

Das verbesserte Pflanzen-Boden-Interaktionsmodell der Arbeitsgruppe Kage (Kage and Stützel, 1999) ermöglicht die umfassende Bewertung des Potentials von Managementoptionen zur Verbesserung der Nährstoffnutzungseffizienz. Damit kann die Entwicklung nachhaltiger Verfahren vorangetrieben werden, die die Leistung der landwirtschaftlichen Produktion weiter erhöhen bei gleichzeitiger Reduktion negativer Umweltauswirkungen.

Alle Daten und Ergebnisse der erfolgten Untersuchungen werden über die Datenbank des BonaRes-Repositorys (Modul B) sowohl der Forschungsgemeinschaft als auch der Öffentlichkeit über die Projektlaufzeit hinaus zur Verfügung gestellt. Wesentliche wissenschaftliche Ergebnisse wurden und werden in begutachteten internationalen Zeitschriften veröffentlicht und auf wissenschaftlichen Konferenzen (*stakeholder-workshops*) präsentiert.

II.4.3 Wissenschaftliche und wirtschaftliche Anschlussfähigkeit

Unsere Forschungen bestätigen, dass die Applikation organischer Masse bzw. Residuen mit weitem C:N-Verhältnis das Potential besitzt N-Verluste zu reduzieren. Es hat sich jedoch gezeigt, dass die Steuerung des Prozesses und vor allem die zeitnahe bedarfsorientierte Wiederfreisetzung des immobilisierten Stickstoffs nicht trivial sind. Die vorgeschlagenen Optionen weisen dahingehend Verbesserungspotential auf. Die

wirtschaftliche Rentabilität der untersuchten Methoden scheint auch nicht gegeben zu sein, solange die Kosten für etwaige Umweltauswirkungen der N-Verluste nicht internalisiert werden. Bis dahin stellt die bisher gängige Praxis das Stroh der Vorfrucht auf dem Feld zu belassen die beste Managementoption dar, um noch höhere N-Verluste zu vermeiden.

Das durch die Arbeiten in diesem Projekt gewonnene Verständnis des Nährstoffkreislaufs wird in Zukunft dazu dienen die Forschungsaktivitäten der Arbeitsgruppe Kage und anderer Institutionen zu spezifizieren. Sowohl die Erfahrungen aus den praktischen Versuchen als auch die Weiterentwicklung des Simulationsmodells bilden den Ausgangspunkt für weitere Aktivitäten.

II.5 Während der Durchführung des Vorhabens dem ZE bekannt gewordenen Fortschritt auf dem Gebiet des Vorhabens bei anderen Stellen

Die Vielzahl der Studien zum Thema Nach-Ernte-Management zur Reduzierung von N-Verlusten verdeutlicht zum einen den Bedarf an solchen Maßnahmen und zum anderen unterstreichen die Ergebnisse die Abhängigkeit der Wirksamkeit der untersuchten Maßnahmen von den Materialeigenschaften und den Umweltparametern, was die Ableitung konkreter Handlungsempfehlungen erschwert. Im Folgenden werden zwei Studien beispielhaft angeführt:

In der Studie von Kinnula et al. (2021) wurde die Anwendung kompostierter und kalkstabilisierter gemischter Zellstoffschlamm (*pulp mill sludges*, PMS) als HCA gemäß unserem Ansatz zur Minimierung des Risikos der N-Auswaschung aus Ackerland getestet. Die Ergebnisse legen nahe, dass PMS das Potenzial haben, die N-Auswaschung zu reduzieren. Die Autoren betonen jedoch, dass die langfristige Immobilisation von N bei der Planung des Nährstoffbedarfs der Folgekulturen berücksichtigt werden muss, was sich mit unseren Schlussfolgerungen deckt.

Einen etwas anderen Ansatz verfolgten Frerichs et al. (2022) indem sie den Nitrifikationshemmer 3,4-Dimethylpyrazolosphat (DMPP) im Herbst direkt auf die kritischen Ernterückstände von Spinat anwendeten. Die Idee bestand darin, den N_{\min} -Anstieg im Herbst zu reduzieren und somit das N-Verlustpotenzial zu verringern. Sie kamen jedoch zu dem Schluss, dass die Auswirkungen von DMPP gering waren und die lediglich die Verschiebung der Bodenbearbeitung auf das Frühjahr der vielversprechendste Ansatz zur Reduzierung von N-Verlusten in der Nebensaison zu sein scheint. Dies setzt allerdings eine entsprechende Fruchtfolge mit Zwischenfrüchten oder der Eignung von Brache voraus.

Libi et al. (2023) betonten im Fazit ihrer Studie, dass die Bodentextur und die Rückstandsqualität eine entscheidende Rolle bei der Kohlenstoffmineralisierung spielen. Ein kinetisches Modell erster Ordnung lieferte die beste Anpassung für alle Behandlungen in ihrem Inkubationsexperiment, welches mehrerer Rückstandsmanagements einschloss. Damit wurde bestätigt, dass der Modellansatz, wie er für unsere Forschung verwendet wurde, für die Vorhersage der C- und N-Mineralisation in verschiedenen Boden-Ernterest-Systemen geeignet ist.

Das Verständnis des Prozesses und der Faktoren des Nährstoffkreislaufs im Boden bleibt weiterhin unvollständig, insbesondere im Hinblick auf die Wechselwirkungen zwischen Bodeneigenschaften und dem Abbau von Biomasse. Ein tieferes Wissen über die Reaktionen von Agrarökosystemen auf bestimmte Managementmaßnahmen ist entscheidend für die Steuerung der Kohlenstoffsequestrierung im Boden und die Bekämpfung des Klimawandels. Die präzise Vorhersage dieser Reaktionen ist von großer Bedeutung für die Bewertung bestehender Produktionsmethoden sowie für die Entwicklung neuer nachhaltiger Ansätze.

II.6 Erfolgte oder geplanten Veröffentlichungen der Ergebnisse

Rothardt, S., R. Fuß, I. Pahlmann, und H. Kage. „Post-Harvest N₂O Emissions Can Be Mitigated With Organic Amendments“. *Frontiers in Environmental Science*, 2021. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712013>.

Chen, Hao, Christoph Rosinger, Sergey Blagodatsky, Rüdiger Reichel, Bo Li, Amit Kumar, Steffen Rothardt, u. a. „Straw Amendment and Nitrification Inhibitor Controlling N Losses and Immobilization in a Soil Cooling-Warming Experiment“. *Science of The Total Environment*, 2. Februar 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.162007>.

Rothardt, Steffen, und Henning Kage. „Model-based assessment of biomass incorporation to mitigate nitrogen losses from arable fields in Central Europe“. *Frontiers in Agronomy* 5 (2023). <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1155187>.

Rothardt, Steffen, und Henning Kage. „Simulation-Based Assessment of Residue Management to Mitigate N Loss Risk in Winter Wheat Production“. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 9. Januar 2024. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10331-8>.

Bukowiecki, Josephine, Till Rose, Katja Holzhauser, Steffen Rothardt, Maren Rose, Martin Komainda, Antje Herrmann, und Henning Kage. „UAV-Based Canopy Monitoring: Calibration of a Multispectral Sensor for Green Area Index and Nitrogen Uptake across Several Crops“. *Precision Agriculture*, 27. Februar 2024. <https://doi.org/10.1007/s11119-024-10123-2>.

Rothardt, S., Kage, H., 2024. Simulation-based assessment of residue management to mitigate N loss risk in winter wheat production. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 128, 53–71. <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10331-8>.

Bereits in Arbeit sind zwei weitere Artikel:

Rothardt, Steffen, Henning Kage & Insa Kühling. „Long-term Effects of Residue Management on Nitrogen Use Efficiency and Crop Yields” – über Ertragseffekte des Residuenmanagements.

Rothardt, Steffen, Jessica Clayton, Rüdiger Reichel, Nicolas Brüggemann, Henning Kage, und Michael Bonkowski. „N Limitation on Microbial Decomposition after Incorporation of Faba Bean Residues”. – auf Basis von Gefäß- und Inkubationsversuchen mit Bodenproben aus dem Feldversuch in Kiel bei den Projektpartnern in Köln und Jülich

III. Literaturverzeichnis

- Chaves, B., Redin, M., Giacomini, S.J., Schmatz, R., Léonard, J., Ferchaud, F., Recous, S., 2021. The combination of residue quality, residue placement and soil mineral N content drives C and N dynamics by modifying N availability to microbial decomposers. *Soil Biol. Biochem.* 163. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2021.108434>
- Dhakal, C., Lange, K., 2021. Crop yield response functions in nutrient application: A review. *Agron. J.* 113, 5222–5234. <https://doi.org/10.1002/agj2.20863>
- DüV, 2020. Verordnung über die Anwendung von Düngemitteln, Bodenhilfsstoffen, Kultursubstraten und Pflanzenhilfsmitteln nach den Grundsätzen der guten fachlichen Praxis beim Düngen² (Düngeverordnung - DüV).
- Frerichs, C., Glied-Olsen, S., De Neve, S., Broll, G., Daum, D., 2022. Crop Residue Management Strategies to Reduce Nitrogen Losses during the Winter Leaching Period after Autumn Spinach Harvest. *Agronomy* 12, 653. <https://doi.org/10.3390/agronomy12030653>
- Janz, B., Havermann, F., Lashermes, G., Zuazo, P., Engelsberger, F., Torabi, S.M., Butterbach-Bahl, K., 2021. Effects of crop residue incorporation and properties on combined soil gaseous N₂O, NO, and NH₃ emissions - A laboratory-based measurement approach. *Sci. Total Environ.* 151051. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151051>
- Kage, H., Rose, T., Neukam, D., 2024. ShinyHumeWheat [WWW Document]. URL <https://agronomykiel.shinyapps.io/shinyHUMEWheat/> (accessed 4.30.24).
- Kage, H., Stützel, H., 1999. HUME: an object-oriented component library for generic modular modelling of dynamic systems. *Model. Crop. Syst.* 299–300.
- Kinnula, S., Kanerva, S., Soinne, H., Toivonen, M., Joonas, J., Tuulos, A., Parviainen, T., Kinnunen, O., Kivelä, J., 2021. Pulp mill sludges as a solution for reducing the risk of mineral nitrogen leaching from agriculture. *Agric. Food Sci.* <https://doi.org/10.23986/afsci.142012>
- Lashermes, G., Recous, S., Alavoine, G., Janz, B., Butterbach-Bahl, K., Ernfors, M., Laville, P., 2021. N₂O emissions from decomposing crop residues are strongly linked to their initial soluble fraction and early C mineralization. *Sci. Total Environ.* 150883. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150883>
- Libi, R.P., Kaleeswari, R.K., Janaki, P., Uma, D., Karthikeyan, S., 2023. Exploring the mystery of soil carbon mineralization: Insights from incubation experiments and kinetic modeling. *J. Appl. Nat. Sci.* 15(2), 704–712. <https://doi.org/10.31018/jans.v15i2.4576>
- Rezgui, C., Trinsoutrot-Gattin, I., Benoit, M., Laval, K., Riah-Anglet, W., 2021. Linking changes in the soil microbial community to C and N dynamics during crop residue decomposition. *J. Integr. Agric.* 20, 3039–3059. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(20\)63567-5](https://doi.org/10.1016/S2095-3119(20)63567-5)
- Rothardt, S., Fuß, R., Pahlmann, I., Kage, H., 2021. Post-Harvest N₂O Emissions Can Be Mitigated With Organic Amendments. *Front. Environ. Sci.* <https://doi.org/10.3389/fenvs.2021.712013>
- Rothardt, S., Kage, H., 2024. Simulation-based assessment of residue management to mitigate N loss risk in winter wheat production. *Nutr. Cycl. Agroecosystems.* <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10331-8>
- Rothardt, S., Kage, H., 2023. Model-based assessment of biomass incorporation to mitigate nitrogen losses from arable fields in Central Europe. *Front. Agron.* 5. <https://doi.org/10.3389/fagro.2023.1155187>

- StoffBilV, 2018. Verordnung über den Umgang mit Nährstoffen im Betrieb und betriebliche Stoffstrombilanzen (Stoffstrombilanzverordnung - StoffBilV).
- Taveira, C.J., Farrell, R.E., Wagner-Riddle, C., Machado, P.V.F., Deen, B., Congreves, K.A., 2020. Tracing crop residue N into subsequent crops: Insight from long-term crop rotations that vary in diversity. *Field Crops Res.* 255, 107904. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2020.107904>