

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)



RhizoWheat

Rhizo4Bio (Phase 1): RhizoWheat — Rhizosphärenprozesse und Ertragsdepressionen in Weizenfruchtfolgen

TP B (FZJ)

Schlussbericht Phase I (Teile I-III)

Förderkennzeichen: 031B0910B

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH
52425 Jülich

Ausführende Stelle: Forschungszentrum Jülich GmbH
Institut für Bio- und Geowissenschaften
Agrosphäre (IBG-3)
Wilhelm-Johnen-Straße
52425 Jülich

Projektleiter: Prof. Dr. Nicolas Brüggemann
n.brueggemann@fz-juelich.de
Telefon: 02461-61-8643

Laufzeit & Berichtszeitraum: 01.03.2020-28.02.2024

GEFÖRDERT VOM



Bundesministerium
für Bildung
und Forschung

I. Kurzdarstellung

I.1 Aufgabenstellung

Im Verbundprojekt wurde der Komplex der wurzelbedingten Ertragsminderung von Weizen in Selbstfolge untersucht. Der Ertragsabfall von Weizen in Selbstfolge wurde häufig ausschließlich dem Erreger *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (Ggt) zugeschrieben. Ergebnisse vor Beginn des Vorhabens zeigten jedoch, dass eine vergleichsweise breite Verschiebung des Rhizosphärenmikrobioms als Folge unterschiedlicher Vorfrüchte in Weizen zu beobachten ist. Die primären Ziele des Verbundprojektes lagen in der Aufklärung und Quantifizierung der Schlüsselprozesse, welche zum Ertragsabfall von Weizen in Selbstfolge beitragen, wobei der Fokus auf den Rhizosphärenprozessen lag. Methodisch werden unterschiedliche, komplementäre Ansätze auf unterschiedlichen Skalenebenen kombiniert. Das Zielsystem wurde sowohl in existierenden Langzeit-Feldversuchen als auch in Rhizobox/Container-Versuchen mit Methoden untersucht, die von DNA/RNA-Profilung der Rhizosphäre über die Untersuchung und Modellierung von Stoffflüssen und -umsetzungen in der Rhizosphäre bis zur Fernerkundung reichen. Hierdurch konnten vertiefte Kenntnisse über die komplexen Wechselwirkungen der biologischen, biogeochemischen und physikalischen Prozesse gewonnen werden, die das Ertragsminderungssyndrom in Selbstfolge von Weizen verursachen. Mechanistische, mathematische Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität wurden in einem Modellverbund genutzt, um die Prozesskenntnisse zu integrieren und zur quantitativen Extrapolation im Hinblick auf Ertragseffekte und deren Wechselwirkung mit den Umweltbedingungen zu nutzen. Perspektivisch können aus dem im Projekt gewonnenen Verständnis agronomische oder züchterische Ansätze entwickelt werden, diesen Ertragsverlust zumindest teilweise zu vermeiden. Hierbei ist z.B. an die Selektion toleranterer Genotypen oder die gezielte Beeinflussung des Rhizosphärenmikrobioms zu denken.

I.2 Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Weizen ist, gemessen an der Anbaufläche, weltweit das wichtigste Grundnahrungsmittel. Jahrzehntlang stiegen die Erträge linear, was zu einer Verbesserung der Weizenerzeugung und der Ernährungssicherheit führte. In vielen Ländern hat diese Ertragssteigerung aufgehört, und derzeit ist der Anstieg der Weizenproduktion geringer als das Bevölkerungswachstum. Im Rahmen eines im Vorfeld zu diesem Vorhaben durchgeführten Projekts (BMBF-IPAS/BRIWECS) wurde jedoch gezeigt, dass der züchterische Fortschritt bei Weizen in Bezug auf den Ertrag selbst unter ungünstigen Umweltbedingungen immer noch linear ist. Dies führte zu der Hypothese, dass zunehmende Anteile von Weizen nach Weizen (Stoppelweizen) in Fruchtfolgen und die Ausdehnung des Weizenanbaus auf ungünstigere Regionen die Hauptursache für den Rückgang der durchschnittlichen Weizenerträge sind, der mit den bereits vorherrschenden Auswirkungen des Klimawandels einhergeht. Der Ertragsrückgang bei Stoppelweizen wurde häufig auf die schädliche Wirkung von bodenbürtigen Krankheitserregern und ausschließlich auf die Auswirkungen von *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* (take-all disease) zurückgeführt. Dieser Krankheitserreger führt zu einer Seneszenz der Weizenwurzelsysteme. Dies steht im Einklang mit der Feststellung, dass der Ertragsrückgang bei Stoppelweizen unter Trockenstressbedingungen, d. h. bei trockenem Wetter oder auf Standorten mit begrenzter Bodenwasserversorgung, höher ist. Auch die Stickstoffausnutzung von Stoppelweizen ist deutlich geringer als bei Erstweizen. Ob dies auf eine erhöhte Wurzelalterung oder eine mikrobielle N-Immobilisierung innerhalb oder außerhalb der Rhizosphäre zurückzuführen ist, war jedoch vor Beginn dieses Vorhabens noch unklar. Vorläufige Ergebnisse vor Beginn des Vorhabens deuteten jedoch darauf hin, dass eine breitere Verschiebung

des Rhizosphären-Mikrobioms als Folge des Weizens als Vorrucht stattfindet und dass diese Verschiebung an der verstärkten Seneszenz der Wurzeln und dem damit einhergehenden Ertragsrückgang beteiligt sein könnte. Diese Hypothese wurde auch durch ältere Beobachtungen gestützt, wonach der Ertragsrückgang in manchen Jahren ohne die typischen sichtbaren Symptome von take-all auftritt, und wurde in diesem Vorhaben eingehend untersucht.

I.3 Ablauf des Vorhabens

Zur Bearbeitung des Vorhabens waren alle technischen und personellen Voraussetzungen erfüllt. Für die Laborversuche standen voll ausgestattete chemische und physikalische Labore mit modernster Analytik zur Verfügung. Es wurden Experimente unter kontrollierten Bedingungen in speziell entwickelten Rhizoboxen und Pflanzröhren mit Weizen und Böden mit unterschiedlicher Vorkultur sowohl im Gewächshaus als auch im Freiland durchgeführt. Wurzelwachstum und Seneszenz des sich entwickelnden Wurzelsystems werden über die Zeit verfolgt und bewertet. Die Wurzelexsudation wurde nach Pulsmarkierung der Weizenpflanzen mit $^{13}\text{CO}_2$ durch Extraktion des Bodens und Analyse der Extrakte untersucht. Durch ^{15}N - und ^{18}O -Markierung wurden der mikrobielle N-Umsatz in der Rhizosphäre sowie die pflanzliche N- und Wasseraufnahme aus verschiedenen Bodentiefen in Abhängigkeit von der krankheitsbedingten Seneszenz des Wurzelsystems bestimmt.

Ein 3-dimensionales, funktional-strukturelles Wurzelarchitekturmodell wurde entwickelt und anhand gemessener Wurzellängendichten und Mini-Rhizotronbilder parametrisiert. Die Wurzelwasseraufnahme ist ein komplexer dynamischer und räumlich heterogener Vorgang. Trotzdem brauchen die meisten Ertragsmodelle einen 1-dimensionalen Senkenterm, der die Wurzelwasseraufnahme aus dem Boden beschreibt. Wir haben daher komplexe 3-dimensionale, funktional-strukturelles Wurzelarchitekturmodelle getestet sowie auf deren Basis einen 1-dimensionalen Senkenterm entwickelt und evaluiert.

I.4 Wesentliche Ergebnisse

Das Teilprojekt FZJ beteiligte sich an allen Arbeitspaketen in Zusammenarbeit mit den Kooperationspartnern des Gesamtvorhabens.

Alle Rhizoboxen- und Röhrenversuche im Gewächshaus und Freiland konnten sehr gut den im Feld zu beobachtenden Rückgang der Wuchsleistung und des Ertrags von Winterweizen in Selbstfolge reproduzieren. Wir konnten zeigen, dass diese Minderung von Biomasse und Ertrag mit einer verringerten Kohlenstoffverlagerung vom Blatt in die oberirdischen Pflanzenteile sowie auch in die Wurzeln und in die Rhizosphäre des Weizens in Selbstfolge einherging. Die verringerte Wurzelbiomasse von Weizen in Selbstfolge führte auch zu einer verringerten Wasser- und Nährstoffaufnahme sowie zu einer signifikanten Veränderung des Mikrobioms in der Rhizosphäre.

Hinsichtlich des 3-dimensionalen, funktional-strukturellen Wurzelarchitekturmodells zeigte sich, dass in Abwesenheit von Stressfaktoren wie Trockenheit oder Nährstoffmangel ein einziger Parametersatz ausreicht, um die Wurzelentwicklung über verschiedene Jahre vorherzusagen, wenn die Bodentemperatur berücksichtigt wird. Diese Methode ermöglicht es, Genotyp-spezifische Wurzelparameter aus Felddaten abzuleiten.

Der im Vorhaben entwickelte 1-dimensionale Senkenterm hat eine ähnliche Form wie klassische Senkenterme, ist ähnlich einfach zu implementieren, aber ersetzt empirische Parameter durch physikalisch und biologisch sinnvolle Parameter.

II. Eingehende Darstellung

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

II.1.1 Rhizoboxenexperiment 1 (Tasks 1.2, 2.2, 3.2, 4.3)

In diesem Versuch untersuchten wir, wie sich die Fruchtfolgepositionen von Winterweizen auf die pflanzeninterne Allokation von frisch assimiliertem Kohlenstoff (C) in ober- und unterirdische Pflanzenteile sowie in Wurzelexsudate, einer Energiequelle für Bodenmikroben, auswirken und dadurch das Bodenmikrobiom beeinflussen. Dies war vor Beginn des Vorhabens noch weitgehend unbekannt.

Im Gewächshaus wurde ein Rhizoboxenversuch mit Winterweizen durchgeführt, der in Boden nach Raps (W1), nach einem Jahr Winterweizen (W2) und nach drei aufeinander folgenden Jahren Winterweizen (W4) angebaut wurde. In aufeinanderfolgenden Winterweizen-Fruchtfolgen kam es zu einem starken Biomasse- und Ertragsrückgang (Abb. 2d), der von deutlichen Veränderungen im Wurzelwachstum begleitet wurde (Abb. 3).

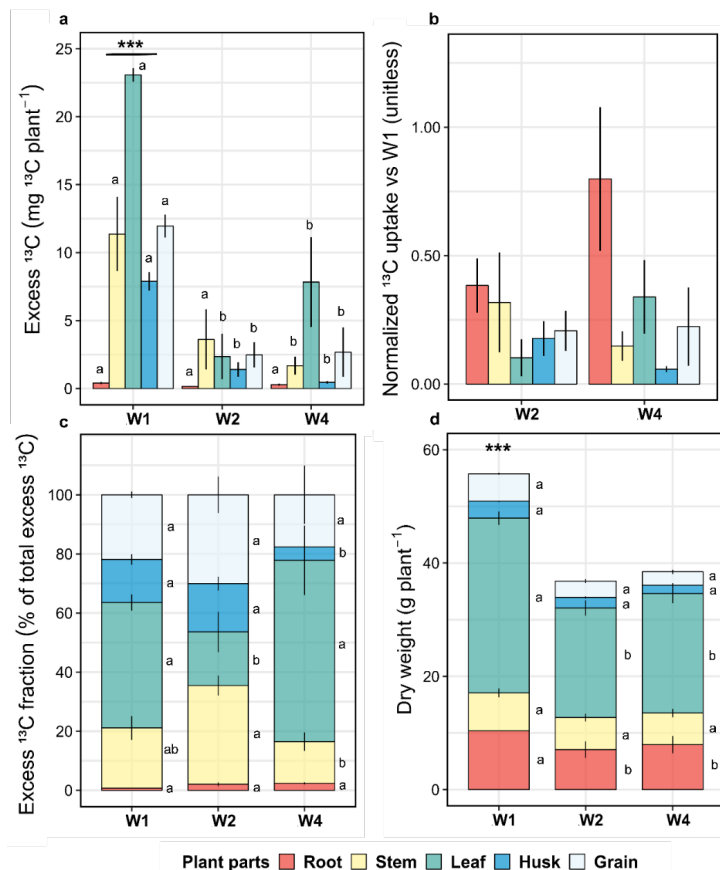


Abbildung 2. (a) Absoluter ¹³C-Überschuss, (b) normalisierte ¹³C-Aufnahme von W2 und W4 im Vergleich zu W1, (c) relativer ¹³C-Überschussanteil und (d) Trockengewicht von Wurzeln, Stängeln, Blättern, Spelzen und Körnern von drei Fruchtfolgepositionen von Winterweizen im Stadium der Kornreife (BBCH 92). W1 = erster Weizen, W2 = zweiter Weizen und W4 = vierter Weizen nach Raps. Sternchen kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen über alle Pflanzenteile mit * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$. Innerhalb der einzelnen Pflanzenteile weisen unterschiedliche Kleinbuchstaben auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche hin.

Mithilfe eines neuartigen experimentellen Ansatzes, der die Echtzeit-Quantifizierung von ¹³CO₂ aus der Wurzelatmung nach ¹³CO₂-Pulsmarkierung verwendet, konnten wir zeigen, dass die Vorgängerkulturen die ober- und unterirdische C-Allokation in Winterweizen stark beeinflussen. Unseres Wissens ist dies das erste Mal, dass eine solche zerstörungsfreie Echtzeit-Methode eingesetzt wurde, um den Verbleib von photosynthetisch assimilierten C in Winterweizen zu verfolgen und die Auswirkungen der Vorfrüchte auf den Boden und die nachfolgende Kultur zu verstehen.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

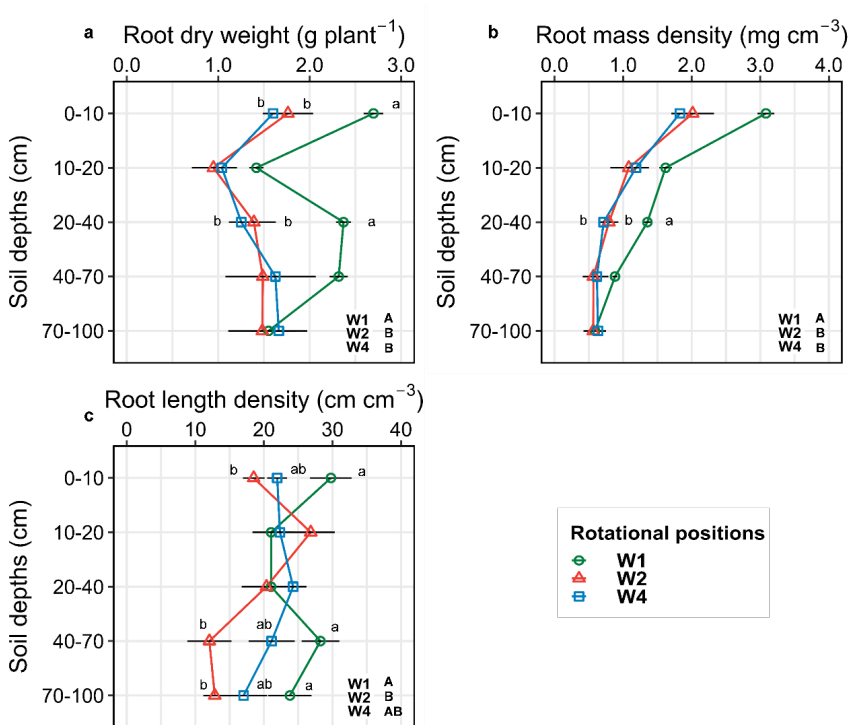


Abbildung 3. Wurzeltrockengewicht (a), Wurzelmasse-dichte (b) und Wurzellängendichte (c) von drei Fruchtfolgepositionen von Winterweizen im Stadium der Kornreife (BBCH 92). W1 = erster Weizen, W2 = zweiter Weizen und W4 = vierter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Großbuchstaben in jeder Teilabbildung weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen hin. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen in jeder Bodentiefe auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche.

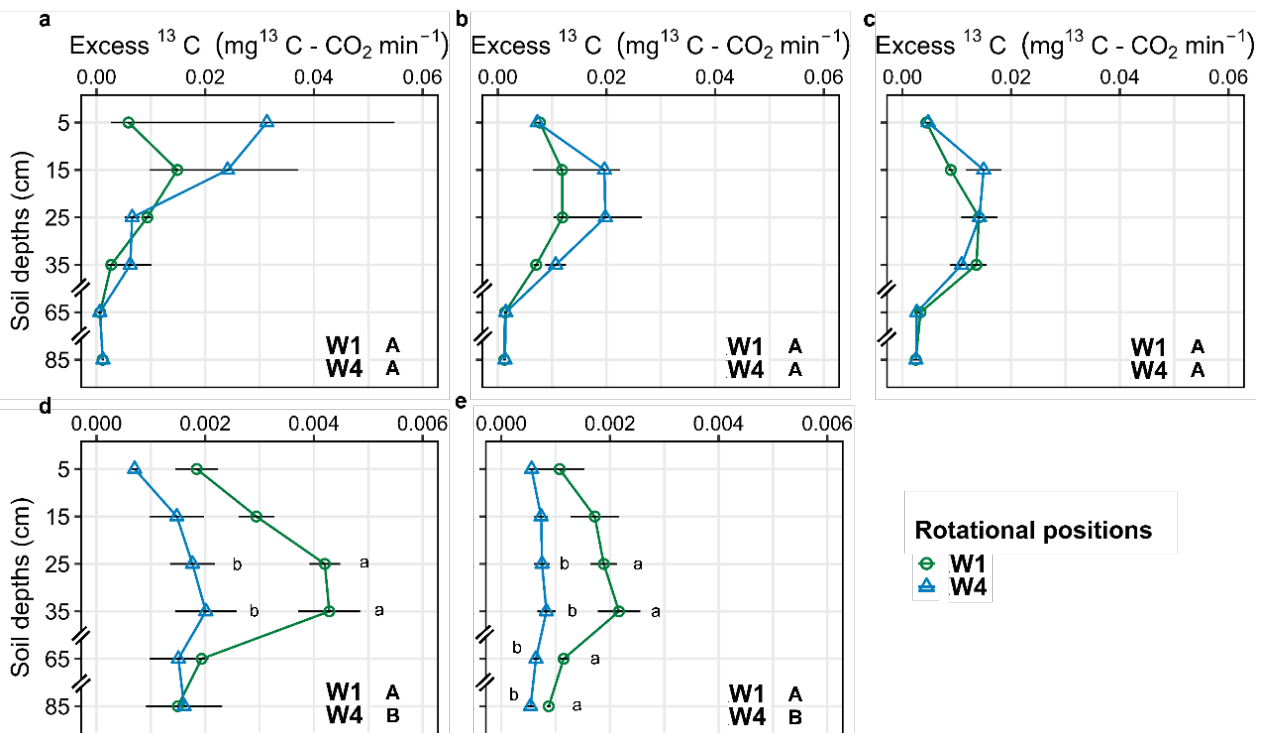


Abbildung 4. Überschüssiges ¹³C der Bodenatmung in zwei unterschiedlichen Winterweizenfruchtfolgen 0 (a), 1 (b), 2 (c), 10 (d) und 25 (e) Tage nach der Markierung (DAL). Die Pflanzen wurden während der späten Blüte (BBCH 69) markiert. W1 = erster Weizen und W4 = vierter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Großbuchstaben in jeder Teilabbildung weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen hin. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen in jeder Bodentiefe auf einem Niveau von $p \leq 0,05$.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

Wir verwendeten ein automatisches Probenahmesystem auf der Basis von gaspermeablen Schläuchen, um den ^{13}C -Überschuss der Bodenatmung in sechs Tiefen und zu fünf verschiedenen Zeitpunkten zu messen. In W1 wurde im Vergleich zu W4 ein höherer ^{13}C -Überschuss in der Bodenatmung gemessen, insbesondere im Oberboden in späteren Wachstumsstadien (Abb. 4). Unsere Studie zeigte erstmals einen Mechanismus auf, durch den die Fruchtfolgeposition von Winterweizen die Verteilung von frisch assimiliertem C über und unter der Erde beeinflusst. Winterweizen nach Raps hielt die unterirdische Allokation von frisch assimiliertem C länger aufrecht als in Selbstfolge angebaute Winterweizen und baute mehr von diesem C in seine Biomasse ein, wohingegen bei aufeinanderfolgenden Winterweizen-Fruchtfolgen weniger ^{13}C aufgenommen wurde (Abb. 2a+b). Ein höherer ^{13}C -Überschuss des DOC und der mikrobiellen Biomasse wurde ebenfalls in W1 und W4 im Vergleich zu W2 festgestellt (Abb. 5).

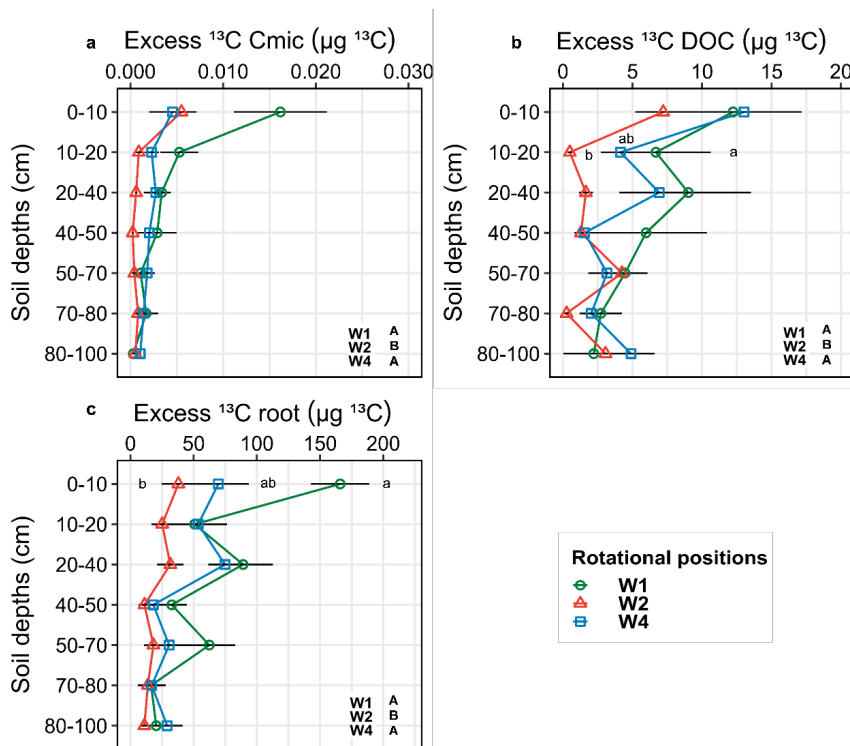


Abbildung 5. Absoluter ^{13}C -Überschuss der (a) mikrobiellen Biomasse C (Cmic), (b) des gelösten organischen Kohlenstoffs (DOC) und (c) der Wurzelbiomasse in drei Fruchtfolgepositionen von Winterweizen im Stadium der Kornreife (BBCH 92). W1 = erster Weizen, W2 = zweiter Weizen und W4 = vierter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Großbuchstaben in jeder Teilabbildung weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen hin. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen in jeder Bodentiefe auf einem Niveau von $p \leq 0,05$.

Darüber hinaus fanden wir heraus, dass die beiden unterschiedlichen Fruchtfolgepositionen W1 und W2 mit signifikanten Unterschieden im mineralischen N-Gehalt des Bodens sowie von Schlüsselenzymen des C- und N-Kreislaufs im Boden einhergingen (Abb. 6), die letztlich mit einem erhöhten Wurzelwachstum und erhöhten Ertrag in W1 verbunden waren.

Zudem untersuchten wir zusammen mit Partner JKI die Abundanz von Bakterien und Archaeen und deren Dynamik im Boden (Abb. 8). Als Reaktion auf die geringere N-Verfügbarkeit im Unterboden von W2 zum Zeitpunkt der Aussaat reicherten die Pflanzen ihr Rhizosphärenbiom mit N-fixierenden, nitrifizierenden und denitrifizierenden, also wichtigen an den N-Umsetzungen des Bodens beteiligten Mikroben an. Dieser Unterschied zwischen W1 und W2 eine blieb auch bis zum Stadium der Kornreife weitgehend erhalten, gleichzeitig gingen die Pflanzenwuchsleistung und der Kornertrag in W2 im Vergleich mit W1 zurück (Abb. 7).

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

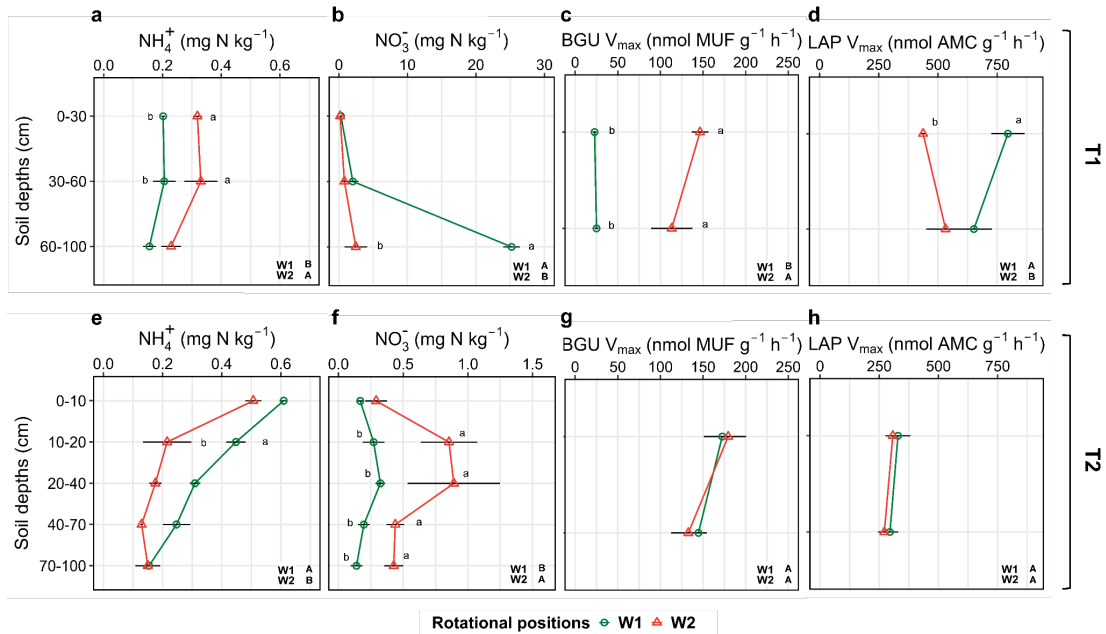


Abbildung 6. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf NH_4^+ -N (a, e), NO_3^- -N (b, f), maximale Geschwindigkeit (V_{max}) von β -Glucosidase (BGU; c, g) und Leucin-Aminopeptidase (LAP; d, h) des folgenden Winterweizens zum Zeitpunkt der Bestockung (BBCH 29) und Kornreife (BBCH 90). W1 = erster Weizen und W2 = zweiter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Großbuchstaben in jeder Teilfläche weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen hin. Innerhalb jeder Bodentiefe kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$.

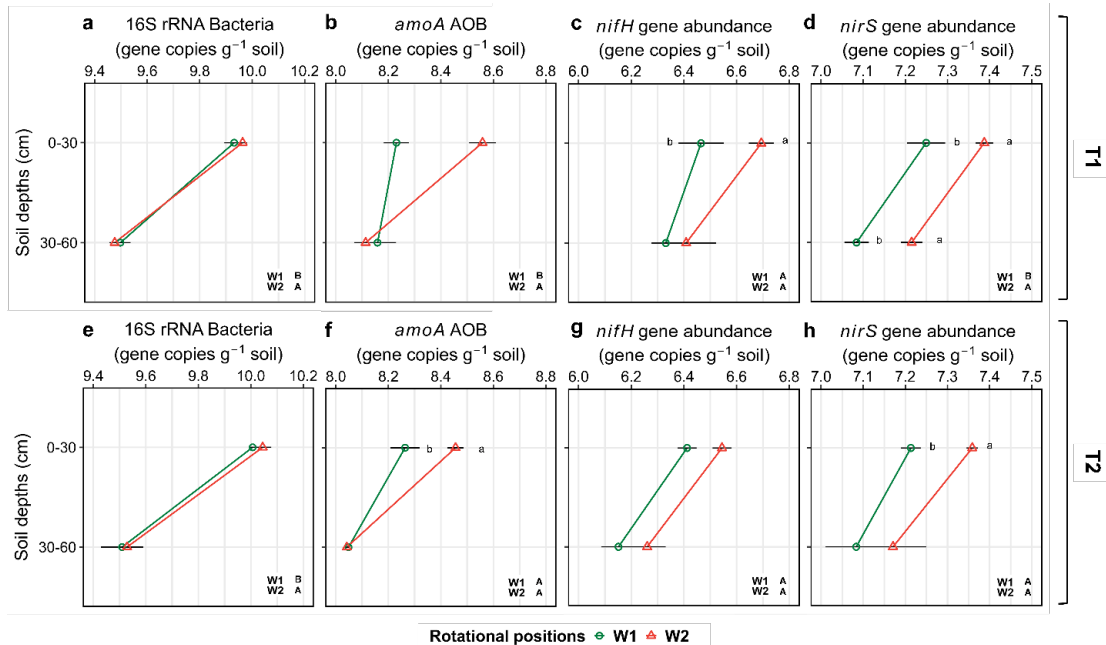


Abbildung 7. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf die 16S rRNA von Bakterien (a, e), die Abundanz des *amoA*-Gens von Ammoniak-oxidierenden Bakterien (AOB; b, f), die Abundanz des *nifH*-Gens (c, g) und die Abundanz des *nirS*-Gens (d, h) im wurzelbeeinflussten Boden des folgenden Winterweizens zum Zeitpunkt der Bestockung (BBCH 29) und der Kornreife (BBCH 90). W1 = erster Weizen und W2 = zweiter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Großbuchstaben in jeder Teilabbildung weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen hin. Innerhalb jeder Bodentiefe kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

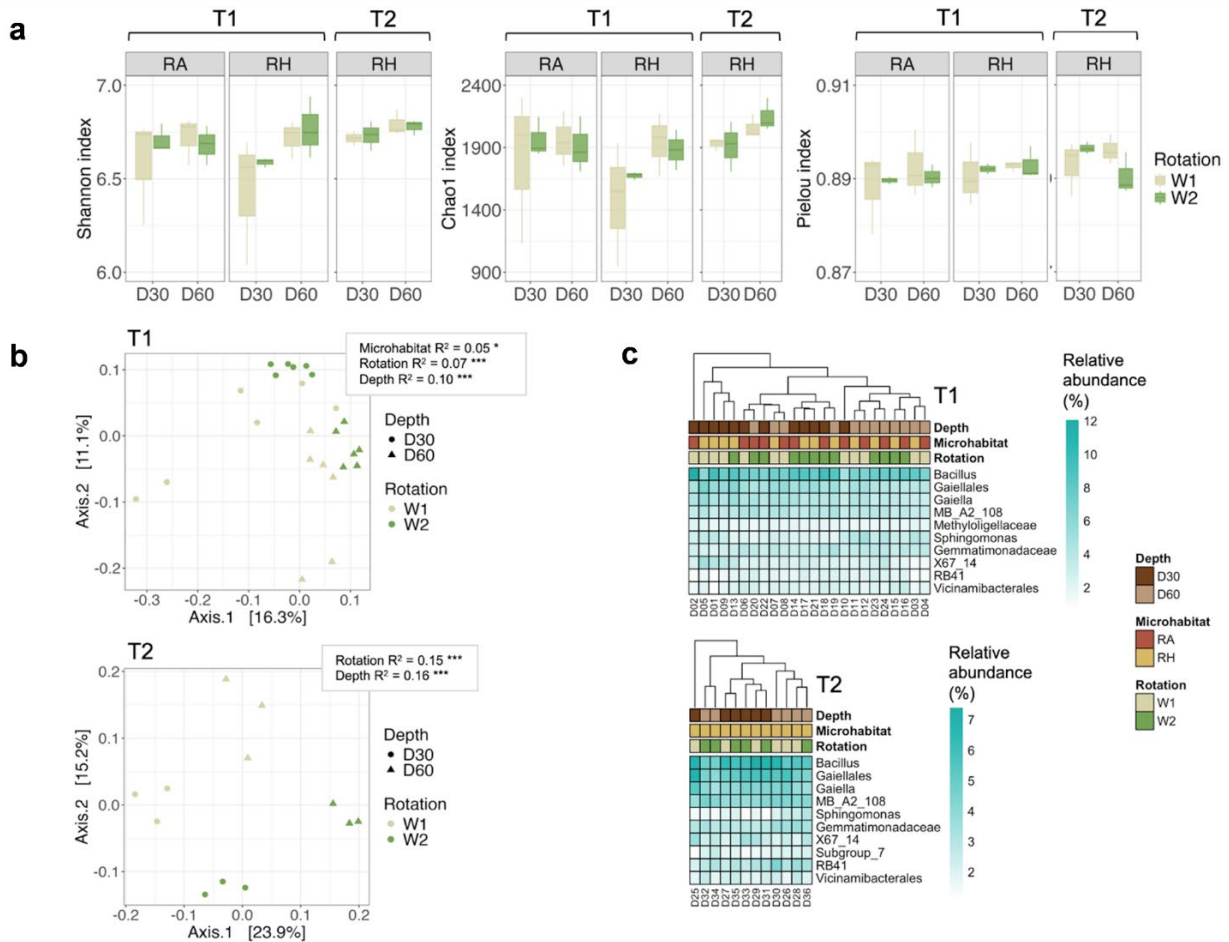


Abbildung 8. Diversität von Bakterien und Archaeen in zwei Pflanzenentwicklungsstadien (T1 = BBCH 29, Bestockung; T2 = BBCH 92, Kornreife), getrennt nach Bodentiefe (D30, 0-30 cm; D60, 30-60 cm), Mikrohabitat (RA = wurzelbeeinflusster Boden; RH = Rhizosphäre) und Fruchtfolgeposition (W1 = erster Weizen nach Raps; W2 = zweiter Weizen nach Raps), basierend auf 16S rRNA-Genamplikon-Sequenzierungsdaten. (a) Alpha-Diversitätsmetriken, einschließlich Shannon-Diversität, Chao1-Reichhaltigkeit und Pielou-Ebenheit (analysiert mit Mann-Whitney-U-Test mit nach der Bonferroni-Methode angepassten p-Werten). Vertikale Balken stellen Standardfehler dar. (b) Beta-Diversität, gemessen mit Bray-Curtis-Dissimilarität und visualisiert durch multidimensionale Skalierung (MDS), mit statistischer Analyse durch PERMANOVA. (c) Relative Häufigkeit der zehn am häufigsten vorkommenden Taxa in T1 und T2. Signifikanzniveaus: * $p < 0,05$; *** $p < 0,001$.

Insgesamt deuten unsere Ergebnisse der $^{13}\text{CO}_2$ -Pulsmarkierung auf eine verstärkte Aufnahme von kürzlich assimiliertem C in die pflanzliche Biomasse von W1 (Winterweizen nach Raps) im Vergleich zu W2 (sukzessiv angebautem Winterweizen) hin. Ein größerer Teil dieses allokierten C wurde direkt durch Wurzelexsudation oder indirekt durch die heterotrophe Nutzung der Wurzelstreu in die mikrobielle Biomasse aufgenommen (Abb. 5a). Die Ergebnisse unseres Versuchs verdeutlichen die langanhaltende Auswirkung vorangegangener Kulturen auf die N-Verfügbarkeit im Boden und das Wachstum der nachfolgenden Winterweizenkultur und verbessern unser mechanistisches Verständnis des Pflanze-Boden-Feedbacks von unterschiedlichen Winterweizen-Fruchtfolgen im Hinblick auf die ober- und unterirdische Allokation von frisch assimiliertem C. Die erhöhte und anhaltende C-Investition in das Wurzelsystem von W1 wird durch eine höhere und längere allgemeine Pflanzenvitalität überkompensiert, was letztlich zu einem höheren Ertrag führt, wohingegen die geringerer C-Allokation in sukzessiv angebauten Winterweizen zu einer verringerten Wurzeleistung und damit zu einem potenziell geringeren Ertrag führt.

II.1.2 Rhizoboxenexperiment 2 (Tasks 1.2, 2.2, 3.2, 4.2)

Wir führten einen Rhizoboxenversuch im Freiland mit sandig-lehmigem Ackerboden vom Standort Hohenschulen bei Kiel durchgeführt. Winterweizen wurde in Boden nach Raps (KW1), nach einer Winterweizen-Saison (KW2) und nach drei aufeinanderfolgenden Winterweizen-Saisons (KW4) angebaut. In diesem Versuch wendeten wir zusammen mit den Partnern CAU-Phyt und JKI die Methode der Zymographie an, um die räumliche Verteilung und Menge der Freisetzung von Glucose (GLU) in der Rhizosphäre von Winterweizen zu beobachten sowie Veränderungen in der Aktivität der an wichtigen C- und N-Umsetzungen im Boden beteiligten Enzyme β -Glucosidase (BGU) und Leucin-Amino-peptidase (LAP) zu quantifizieren. Zudem wurden verschiedene biochemische und mikrobielle Eigenschaften des Bodens und der Rhizosphäre in Abhängigkeit von der Position in der Fruchtfolge (KW1, KW2 oder KW4) gemessen. Wie im ersten Rhizoboxenexperiment wiesen KW2 und KW4 im Vergleich zu KW1 ein geringeres Wachstum auf (Abb. 9).

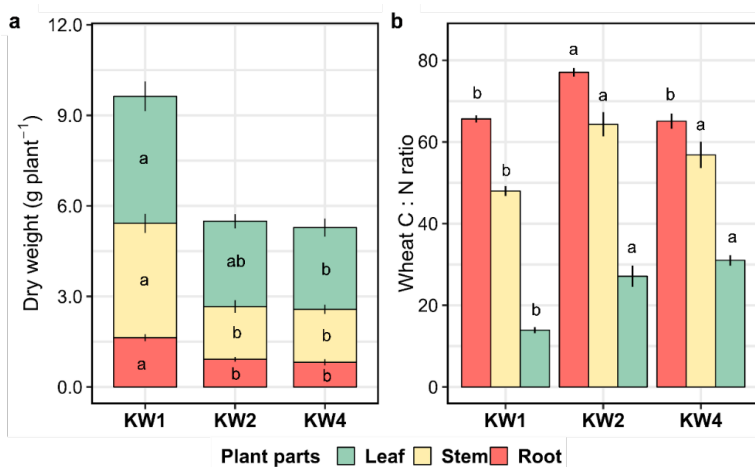


Abbildung 9. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf das Wurzel-, Stängel- und Blatttrockengewicht (a) und das C:N-Verhältnis (b) des folgenden Winterweizens bei Beginn der Stängelstreckung (BBCH 30). KW1 = erster Weizen, KW2 = zweiter Weizen und KW4 = vierter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen. Innerhalb jedes Pflanzenteils kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$.

Die Eigenschaften des Wurzelwachstums zeigten eine starke plastische Reaktion, mit einer höheren Wurzellängendichte, einem höheren mittleren Wurzeldurchmesser und einer geringeren spezifischen Wurzellänge für KW1 im Vergleich zu KW2 und KW4 (Abb. 10).

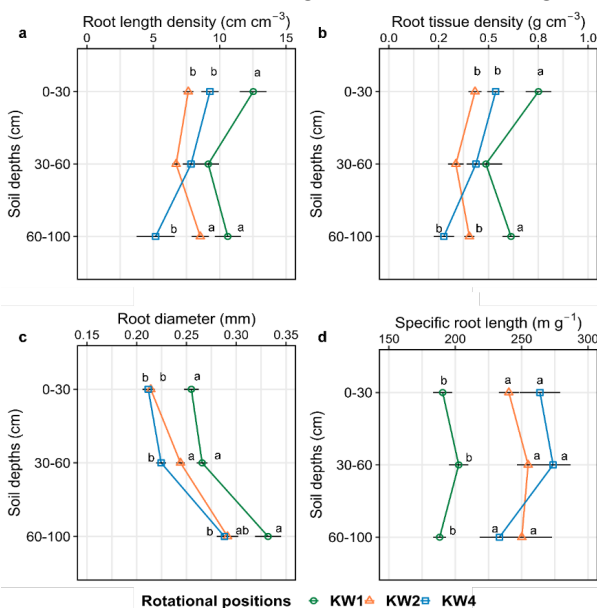


Abbildung 10. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf die Wurzellängendichte (a), die Wurzelgewebedichte (b), den durchschnittlichen Wurzeldurchmesser (c) und die spezifische Wurzellänge (d) des folgenden Winterweizens bei Beginn der Halmstreckung (BBCH 30) in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm). KW1 = erster Weizen, KW2 = zweiter Weizen und KW4 = vierter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen in Kiel, Deutschland. Innerhalb jeder Bodentiefe kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

Der Boden von KW1 wies eine geringere mineralische N-Konzentration (Abb. 11) und mikrobielle Biomasse (Abb. 12) als KW2 und KW4 auf, was zu einem höheren C:N-Verhältnis führte.

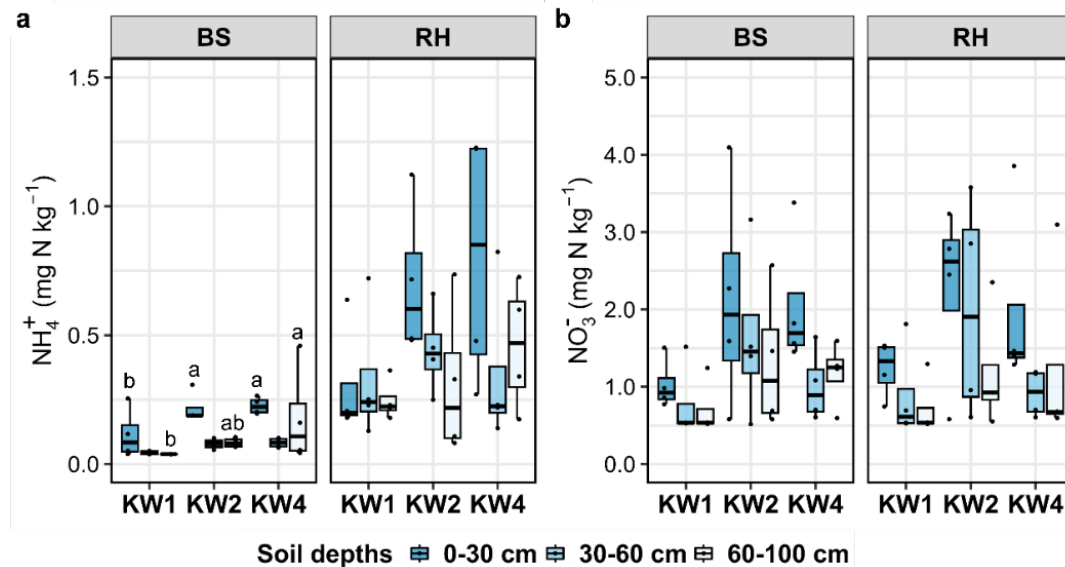


Abbildung 11. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf NH_4^+ -N (a) und NO_3^- -N (b) des nachfolgenden Winterweizens zu Beginn der Halmstreckung (BBCH 30) in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm und zwei Bodenkompartimenten Schüttboden (BS) und Rhizosphärenboden (RH). KW1 = erster Weizen, KW2 = zweiter Weizen und KW4 = vierter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen in Kiel, Deutschland. Innerhalb jeder Bodentiefe und jedes Bodenkompartiments kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche.

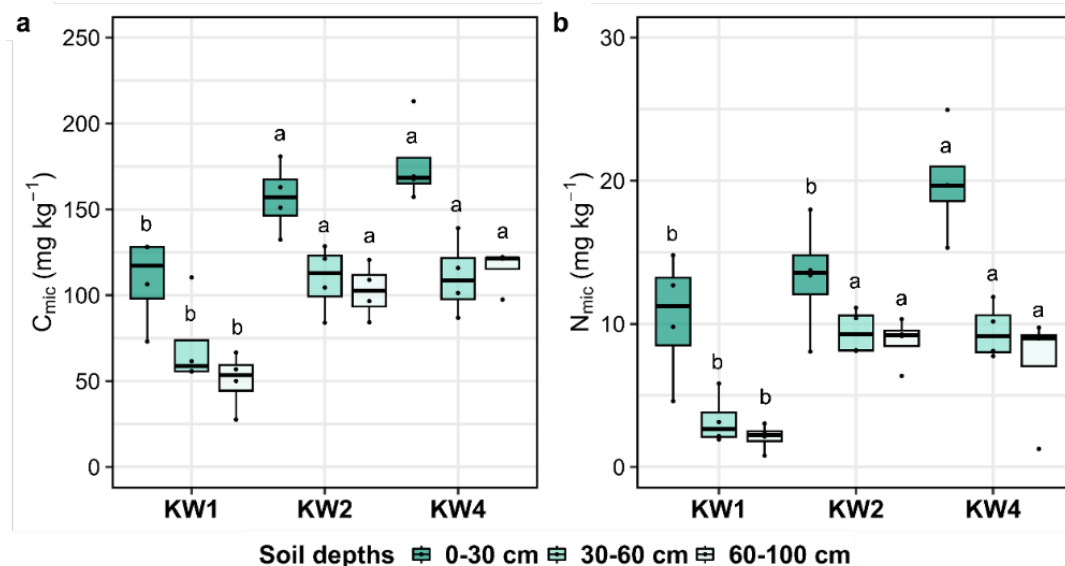


Abbildung 12. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf die mikrobielle Biomasse Kohlenstoff (C_{mic} , a) und die mikrobielle Biomasse Stickstoff (N_{mic} , b) des nachfolgenden Winterweizens bei Beginn der Halmstreckung (BBCH 30) in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm. KW1 = erster Weizen, KW2 = zweiter Weizen und KW4 = vierter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen in Kiel, Deutschland. Innerhalb jeder Bodentiefe kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

Die Zymographie zeigte eine größere rhizosphärische Ausdehnung von BGU und LAP im Bodenprofil von KW1 als in KW2 und KW4 (Abb. 13).

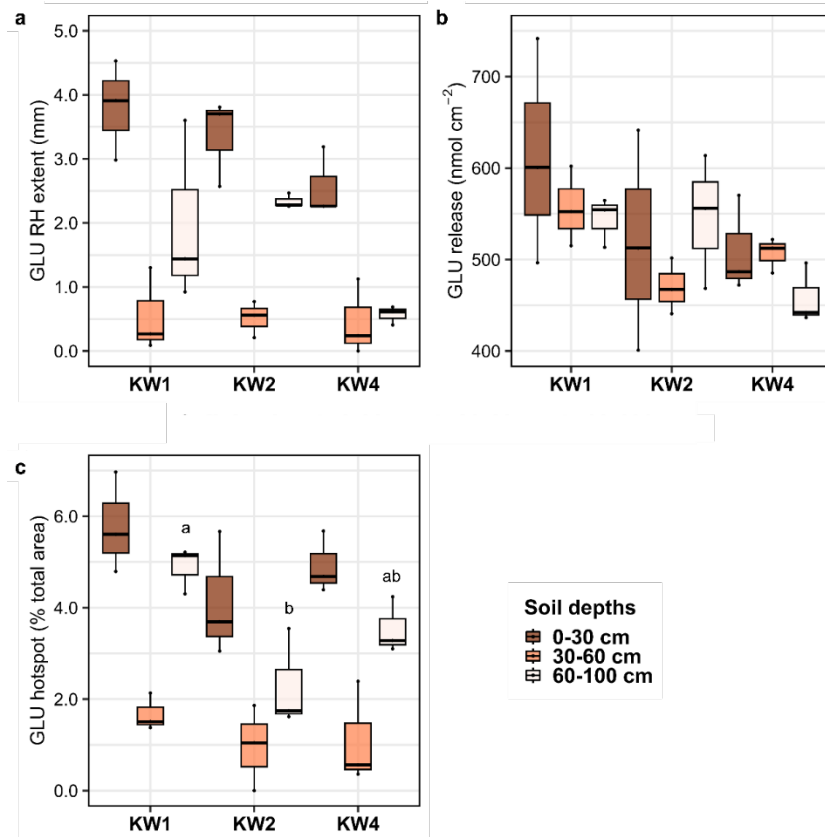


Abbildung 13. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen auf die Ausdehnung der Glukose-Rhizosphäre (RH, a), die Freisetzung (b) und den Hotspot-Anteil (c) des folgenden Winterweizens bei Beginn der Halmstreckung (BBCH 30) in den Bodentiefen 0-30 cm, 30-60 cm und 60-100 cm. KW1 = erster Weizen, KW2 = zweiter Weizen und KW4 = vierter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen in Kiel, Deutschland. Innerhalb jeder Bodentiefe und jedes Bodenkompartmente kennzeichnen unterschiedliche Kleinbuchstaben signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen auf einem Niveau von $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche.

Geringerer gelöster organischer Kohlenstoff und Hotspot-Bereiche von GLU in der Rhizosphäre der aufeinanderfolgenden KW führten möglicherweise zu einer Dysbiose mit den Bodenmikroben. KW4 wies einen höheren mikrobiellen Artenreichtum auf als KW1, während die Bodentiefe und die Fruchtfolgeposition den größten Teil der Varianz in den mikrobiellen Bodengemeinschaften erklärten. Actinobacteriota, Proteobacteria, Chloroflexi, Gemmatimonadota und Crenarchaeota waren die am häufigsten vorkommenden Phyla mit deutlichen Unterschieden zwischen den Fruchtfolgepositionen in verschiedenen Bodentiefen.

II.1.3 Rhizoboxenexperiment 3 (Tasks 1.2, 2.2, 3.3, 4.2)

Die Rhizoboxen wurden weiterentwickelt, um die Bodentemperatur entlang des Bodenprofils regulieren und damit ein möglichst realistisches (naturnahes) Bodentemperaturprofil einstellen zu können (Abb. 14). Dies ermöglichte es uns, in Zusammenarbeit mit den Partnern CAU-Phyt und JKI einen Rhizoboxenversuch im Freiland durchzuführen, bei dem KW1 und KW2 mit und ohne Inokulation mit einem pflanzenwachstumsfördernden Bakterium (PGPB) der Gattung *Bacillus* verglichen wurden. In diesem Versuch waren die Pflanzen den Wetterbedingungen im Freiland ausgesetzt, während die Bodentemperatur auf realistischem Niveau gehalten werden konnte, was die Aussagekraft unserer Ergebnisse erhöhte. Die Pflanzen wurden am Ende der Bestockung geerntet (BBCH 29). Wir haben die Reaktion der Pflanzen auf die PGPR-Inokulation gemessen und die Nährstoffdynamik in der Rhizosphäre und in der Rhizoebene der Wurzeln ermittelt. Die Dynamik des Wurzelwachstums wurde mit WinRhizo gemessen. Die Datenanalyse für diesen Versuch ist noch nicht abgeschlossen.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)



Abbildung 14. Links: Winterweizen, wachsend in den neu entwickelten Rhizoboxen, die eine realistische Einstellung des Bodentemperaturprofils und damit Freilandversuche unter realistischen Witterungsbedingungen ermöglichen. Rechts: Zymogramm, welches in diesem Versuch im Wuchsstadium BBCH 29 angefertigt wurde.

KW2 wies im Vergleich zu KW1 eine geringere Pflanzenbiomasse auf, analog zu den Rhizoboxenexperimenten 1 und 2 (Abb. 15a).

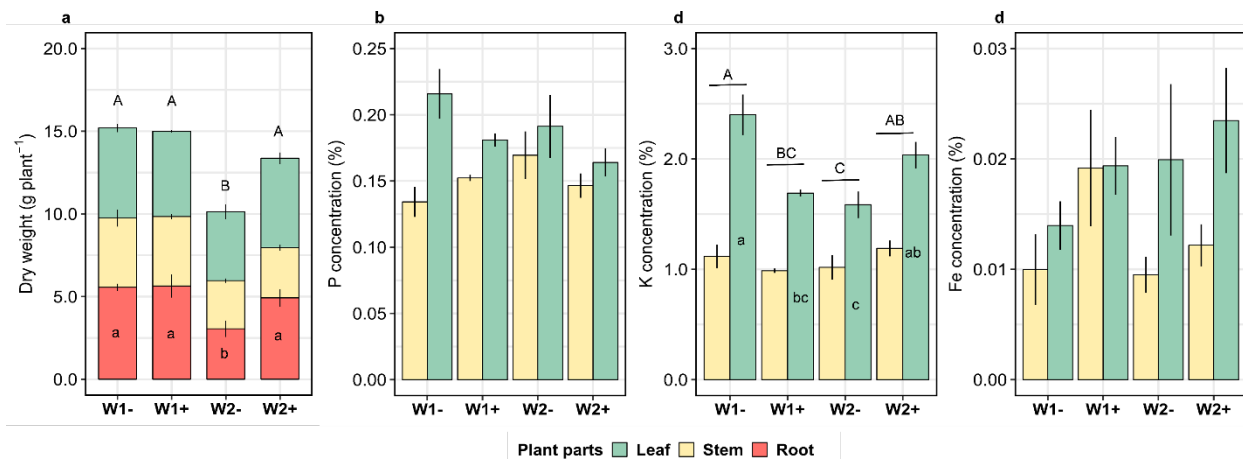


Abbildung 15. Auswirkung der Fruchtfolgepositionen und der Saatgutinokulation mit *Bacillus pumilus* auf Wurzel-, Stängel- und Blatttrockengewicht (a), P % (b), K % (c), Fe % (d) des folgenden Winterweizens zu Beginn der Stängelstreckung (BBCH 30). W1 = erster Weizen und W2 = zweiter Weizen nach Raps im Boden des Versuchsbetriebs Hohenschulen in Kiel, Deutschland. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgepositionen bei $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für multiple Vergleiche.

Die Inokulation des Saatguts mit dem nützlichen *Bacillus pumilus* milderte die ansonsten sehr reproduzierbare Wachstums- und Ertragsverringering von Winterweizen in Selbstfolge (W2) erheblich, wie der Vergleich zwischen W2- (W2 ohne Saatgutinokulation) und W2+ (W2 mit Saatgutinokulation) zeigt (Abb. 15a). Weitergehende Analysen, v.a. zum Mikrobiom, waren bei Erstellung dieses Berichts noch nicht abgeschlossen. Diese werden Aufschluss darüber geben, ob dieser Effekt hauptsächlich auf ein verbessertes Wurzelwachstum und eine verbesserte Nährstoffaufnahme zurückzuführen ist, oder auf eine Unterdrückung von Pathogenen durch die PGPB-Inokulation.

II.1.4 Pflanzröhrenversuch im Freiland (Tasks 3.3, 4.3, 5.1)

Schließlich wurde ein weiterer Freilandversuch mit Boden vom Versuchsstandort Göttingen durchgeführt, in dem das C-, N- und H₂O-Aufnahme- und -verteilungsverhalten sowie Wuchsleistung und Ertrag von GW1 und GW2 mit und ohne Kompostzugabe verglichen wurden. Ziel war es, das

Potenzial von Kompost, die Wachstumsverringering von W2 abzumildern, die durch die negativen Effekte der Vorfrucht verursacht wird, zu untersuchen. Um die Pflanzen natürlichen Umweltbedingungen auszusetzen, wurde der Weizen in PVC-Röhren in leeren Lysimeterhohlräumen in der Freiland-Lysimeteranlage des FZJ angebaut, die mit einer dicken Styroporschicht gegen Witterungseinflüsse isoliert waren. Damit konnte ein realistisches Bodentemperaturprofil erreicht werden, was wir mit Temperaturmessungen belegen konnten. Die Röhren verfügten über zwei vertikale Reihen von Löchern auf gegenüberliegenden Seiten, um während der gesamten Wachstumsphase der Pflanzen Bodenproben entnehmen zu können. Die Pflanzen wurden mit ^{15}N -markiertem Ammoniumsulfat (10 Atom-% ^{15}N) markiert, das mit unmarkiertem Kalkammonsalpeter gemischt wurde, der in drei Wachstumsstadien der Pflanzen ausgebracht wurde. Die Pflanzen wurden im frühen Blühstadium (BBCH 59) mit 99,9 Atom-% $^{13}\text{CO}_2$ markiert und außerdem mit $^1\text{H}^2\text{HO}$ ($\delta^2\text{H} = 43000 \text{ ‰}$) und H_2^{18}O ($\delta^{18}\text{O} = 5000 \text{ ‰}$), das in 25 bzw. 50 cm Bodentiefe injiziert wurde. Die erste Bodenprobe wurde 3 Tage nach der $^{13}\text{CO}_2$ -Markierung entnommen. Dann wurden die Pflanzen im Stadium der Kornreife geerntet und verschiedene biochemische Parameter des Pflanzenwachstums quantifiziert. In diesem Versuch wies der in Selbstsukzession angebaute Winterweizen, wie in allen Rhizoboxenversuchen auch, ein verringertes Wachstum auf, was sich auch negativ auf den Kornertrag auswirkte (Abb. 16a).

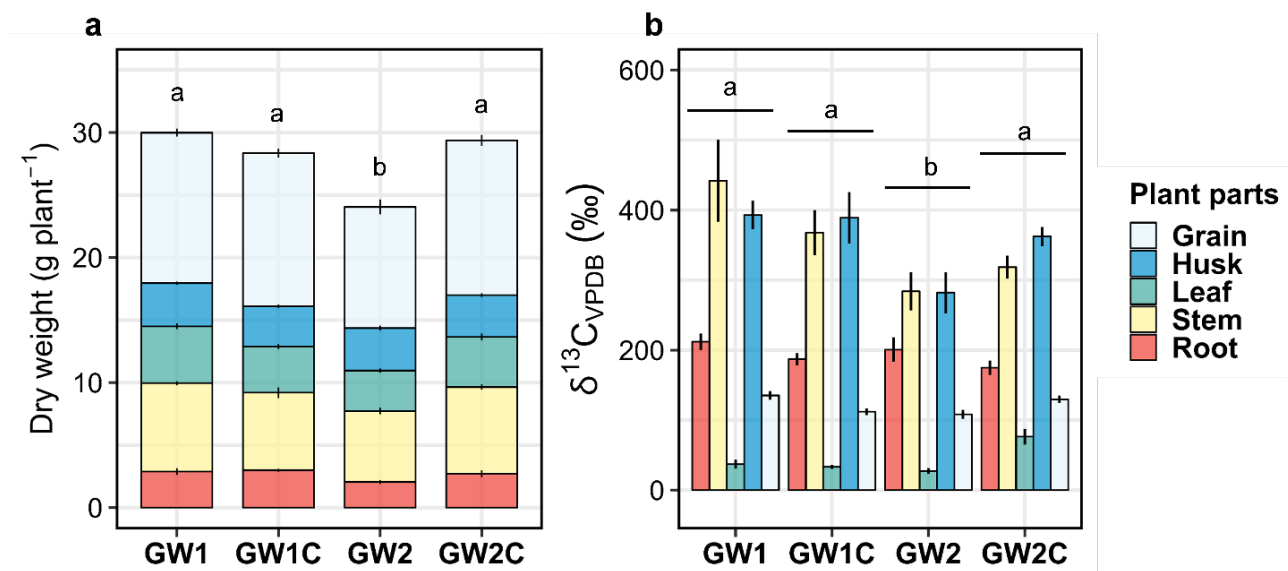


Abbildung 16. Auswirkung der Fruchtfolgeposition des Winterweizens und der Kompostausbringung auf das Trockengewicht der Pflanzen (a) und die $\delta^{13}\text{C}$ -Werte von Wurzeln, Stängeln, Blättern, Spelzen und Körnern (b) im Stadium der Kornreife (BBCH 92). GW1 = erster Weizen und GW2 = zweiter Weizen nach Raps. Unterschiedliche Kleinbuchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Rotationspositionen bei $p \leq 0,05$ gemäß ANOVA mit Bonferroni-Korrektur für Mehrfachvergleiche.

Gleichzeitig zeigte die $^{13}\text{CO}_2$ -Pulsmarkierung Unterschiede in den C-Allokationsmustern mit deutlich niedrigeren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten in der Biomasse von GW2 (Abb. 16b). Die Ausbringung von Kompost milderte diese Wachstumsverringering deutlich ab, wie sich in den höheren $\delta^{13}\text{C}$ -Werten der Biomasse von GW2C und das damit verbundene Trockengewicht der Pflanzen zeigen. Weitere Analysen liefen noch zum Zeitpunkt der Berichtserstellung und werden Aufschluss über die biochemischen Mechanismen im Boden geben, die diese Reaktion steuern.

II.1.5 Simulation von Wurzelwachstum und Seneszenz als Funktion von Vorrucht und Umweltbedingungen (Task 2.3)

Ziele dieses Tasks waren die Entwicklung eines vereinfachten 1D- und eines detaillierten 3D-Wurzelwachstumsmodell unter Nutzung der in den Feldversuchen und Rhizobox-Experimenten erhobenen Wurzeldata.

Da die Auswertung der Minirhizotronen-Daten länger als geplant dauerte, wurde mit der Arbeit auf Grundlage eines von der CAU-Ag zur Verfügung gestellten Datensatzes aus einem älteren 3-jährigen Feldversuch begonnen. Auf deren Basis wurde das in der CAU-Ag zu Projektbeginn bereits vorliegende 1D-Wurzelwachstumsmodell um eine Zeitraum- und tiefenspezifische Schätzung der kleinräumigen Variabilität der Durchwurzelungsintensität erweitert. Grundlage war die Annahme log-normaler Verteilungsfunktionen.

Parallel dazu wurde das am FZJ entwickelte funktional-strukturelle Wurzelarchitekturmodul des CPlantBox Modells (Giraud et al. 2023) anhand der Felddaten der CAU-Ag für diesen Standort genotypspezifisch parameterisiert (Abb. 17). Der Virtual Field Root Sampling Ansatz von Morandage et al. (2019) wurde dafür adaptiert, unter Berücksichtigung der in verschiedenen Tiefen gemessenen Bodentemperatur.

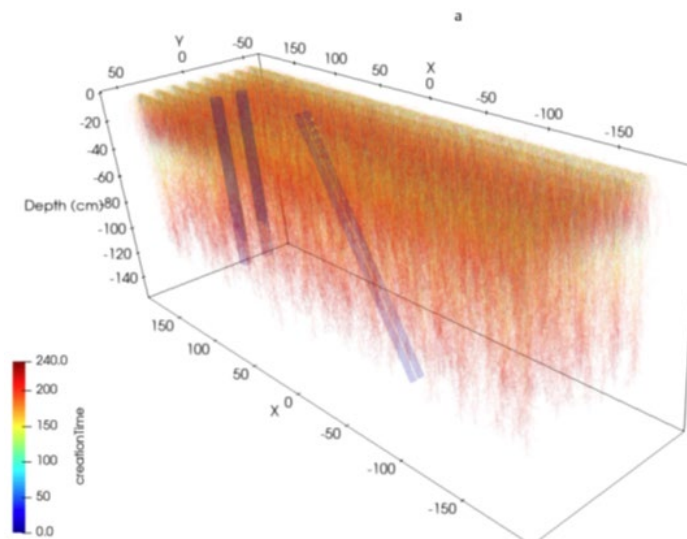


Abbildung 17. Modellsetup für das virtuelle Field Root Sampling: Individuelle Realisierungen von Weizenpflanzen des CPlantBox Modells werden in agronomisch korrektem Pflanzen- und Reihenabstand simuliert. Virtuelle Bodenbohrkerne und Mini-Rhizotubes ermöglichen den detailgetreuen Nachbau der realen Feldmessungen.

Zudem wurde das Modell erweitert, um die Wurzelseneszenz abzubilden. Hierfür wurde ein Wachstumsstopp bei gegebenem Wurzelalter eingeführt. Die Auswirkungen der Wurzelseneszenz auf die Wurzelfunktionalität wurde anhand der Parameter K_{rs} und SUF bestimmt. K_{rs} ist ein Skalar mit der Dimension T^{-1} , der die Fähigkeit des Gesamtwurzelsystems, Wasser zu leiten, beschreibt. SUF (-) ist ein Vektor, der den Anteil jeder Bodenschicht an der Gesamtwasseraufnahme des Wurzelsystems beschreibt und sowohl von der Wurzelarchitektur als auch den hydraulischen Eigenschaften der einzelnen Wurzelsegmente abhängt. Wurzelseneszenz bewirkt eine Verringerung der Bodentiefe, aus der Wasser aufgenommen werden kann, sowie eine geringere Gesamtwasserleitfähigkeit des Wurzelsystems.

II.1.6 Modellierung von Bodenwasserhaushalt und Wassernutzungseffizienz (Task 5.4)

Ein wichtiger Parameter für die Wurzelwasseraufnahme unter Berücksichtigung des Rhizosphärenwiderstands ist der äußere Radius des 1D radialsymmetrischen Wasserflussmodells. Er bestimmt, wieviel Bodenvolumen jeder einzelnen Wurzel zur Verfügung steht, um daraus Wasser aufzunehmen. Um den Begriff gegenüber allgemeinen Rhizosphärenprozessen abzugrenzen, verwenden wir seit Vanderborght et al. (2023) den Begriff „perirhizal zone“, wenn wir das Bodenvolumen meinen, das einer einzelnen Wurzel in Abhängigkeit vom Abstand zu anderen Wurzeln zur Verfügung steht. Im einfachsten Fall ist der äußere („perirhizal“) Radius r_{rhiz} (L) eine Funktion der Wurzellängendichte, RLD (L L⁻³), $r_{\text{rhiz}} = \sqrt{\frac{1}{RLD \pi}}$. Diese oft verwendete Funktion beruht jedoch auf der Annahme, dass alle Wurzeln in dem betrachteten Bodenvolumen gleich verteilt sind. Dies kann in einer größeren Bodenschicht eine zu grobe Annahme sein. Eine Möglichkeit, die Heterogenität der Wurzelverteilung zu berücksichtigen, ist die Verwendung von Voronoi Diagrammen (Kohl et al. 2007). Abbildung 18 zeigt die Aufteilung des Bodenvolumens zu jedem Wurzelsegment einer 3D Wurzelarchitektur anhand von Voronoi Diagrammen.

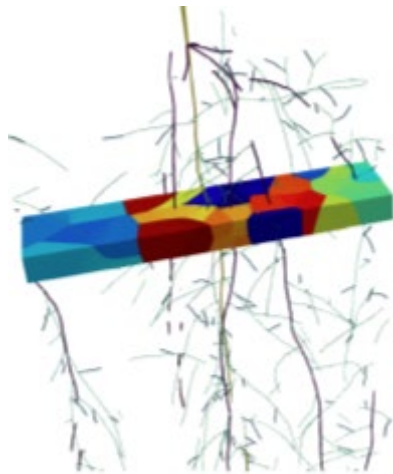


Abbildung 18. 3D-Voronoi-Diagramm einer Bodenschicht. Jedes Element hat einen Wurzelknoten als Zentrum und die Grenzflächen befinden sich in der Mitte des Abstands zwischen den benachbarten Knoten.

Auf Basis des Volumens jedes 3D-Voronoi-Diagrammelements wird der Radius des entsprechenden Zylinders als äußerer („perirhizal“) Radius angenommen. Angewandt auf die Wurzelsysteme des Winterweizens am Standorts Ruthe in den Jahren 1995, 1996 und 1997 wurden die entsprechenden Histogramme der äußeren Radien für verschiedene Bodenschichten und deren dynamische Entwicklung über die Zeit analysiert (Abbildung 19 - Abbildung 21). Aufgrund unterschiedlicher Klimaverhältnisse haben sich die Pflanzen in den drei Jahren unterschiedlich und unterschiedlich schnell entwickelt und damit auch das Bodenvolumen unterschiedlich schnell erschlossen. Die Histogramme der äußeren Radien innerhalb der Bodenschichten zeigen alle eine rechtsschiefe Form. Die meisten Wurzelsegmente haben also ein kleines Bodenvolumen (ausgedrückt durch einen kleinen äußeren Radius) zur Verfügung, aber wenige Wurzelsegmente, die vorwiegend am Rand des Wurzelsystems positioniert sind, haben ein großes Bodenvolumen zur Verfügung.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

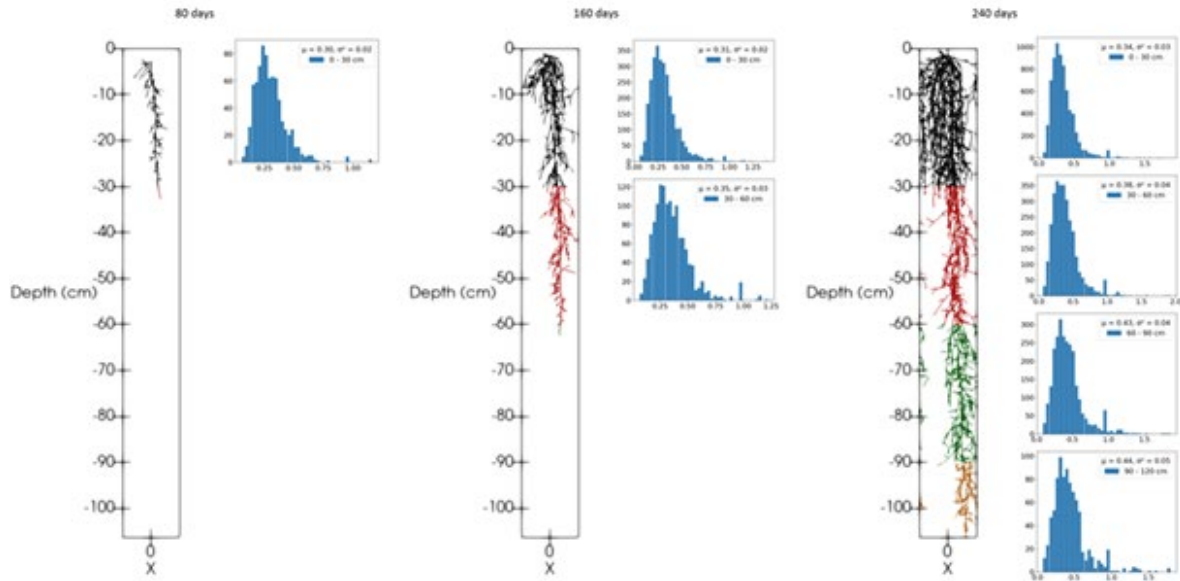


Abbildung 19. Äußere (“perirhizal”) Radien des Winterweizenwurzelsystems in 30 cm tiefen Bodenschichten des Standort Ruthe im Jahr 1995.

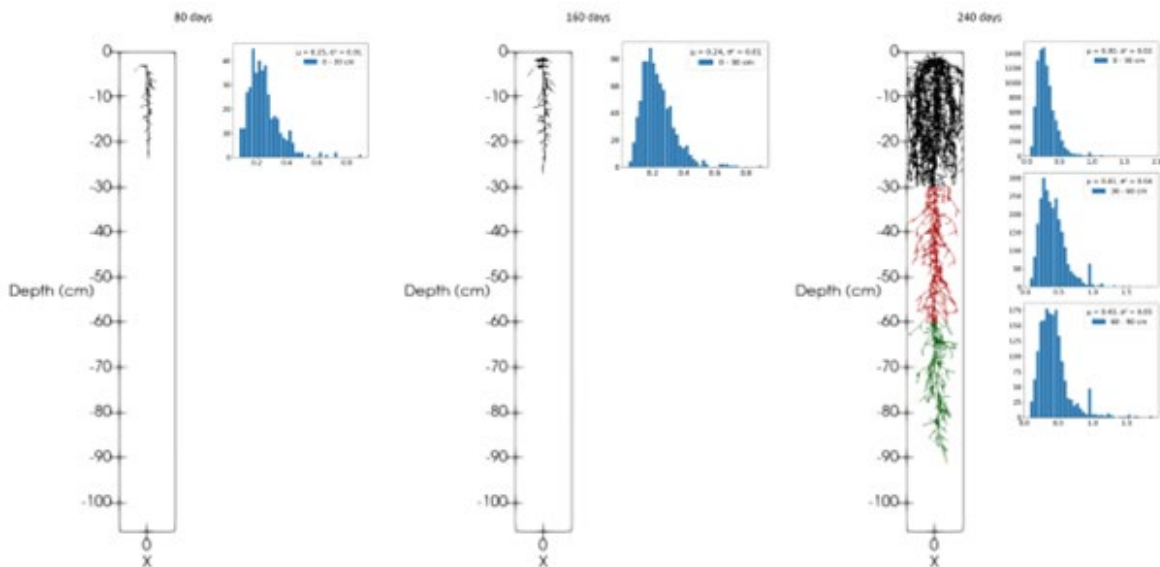


Abbildung 20. Äußere (“perirhizal”) Radien des Winterweizenwurzelsystems in 30 cm tiefen Bodenschichten des Standort Ruthe im Jahr 1996.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

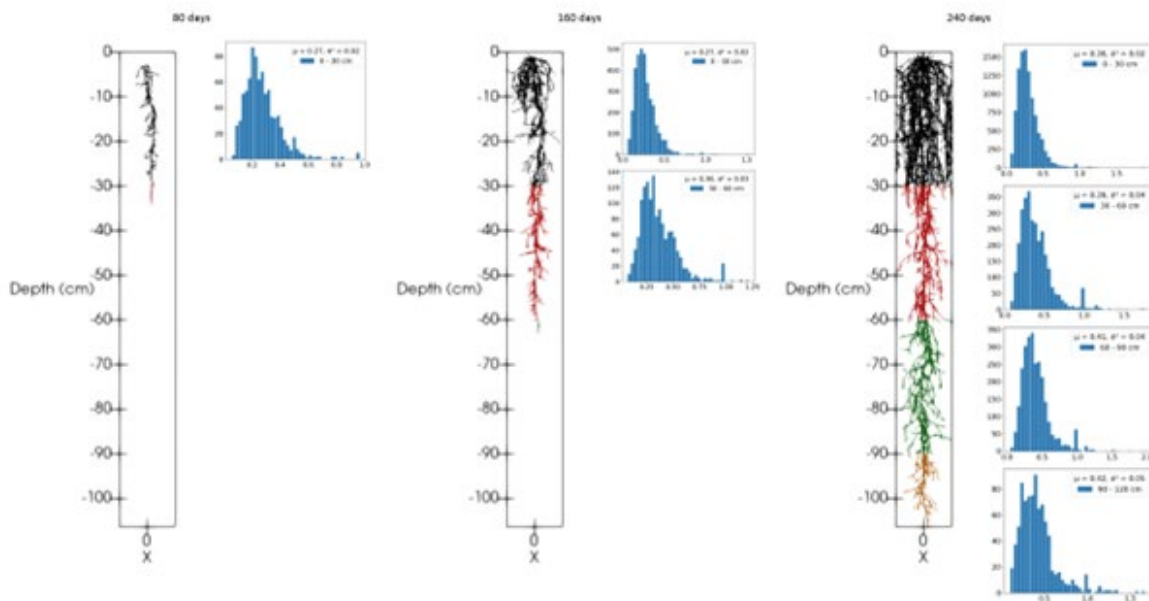


Abbildung 21. Äußere (“perirhizal”) Radien des Winterweizenwurzelsystems in 30 cm tiefen Bodenschichten des Standort Ruthe im Jahr 1997.

II.1.7 Parameterisierung des Weizenwachstumsmodells auf Basis der detaillierten 3D Modellsimulationen (Task 6.3)

Im Berichtszeitraum erfolgte die Aggregation der 3D-Modellanalysen für Ertragsmodelle. Der Link ist ein neuer Senkenterm für Wurzelwasseraufnahme aus dem Boden, der in 1D-Ertragsmodellen eingebaut werden kann und auf der Basis der 3D-hydraulischen Wurzelarchitektur sowie des Rhizosphärenwiderstandes zum Wasserfluss hergeleitet wurde. Das Konzept ist in Abbildung 22 dargestellt.

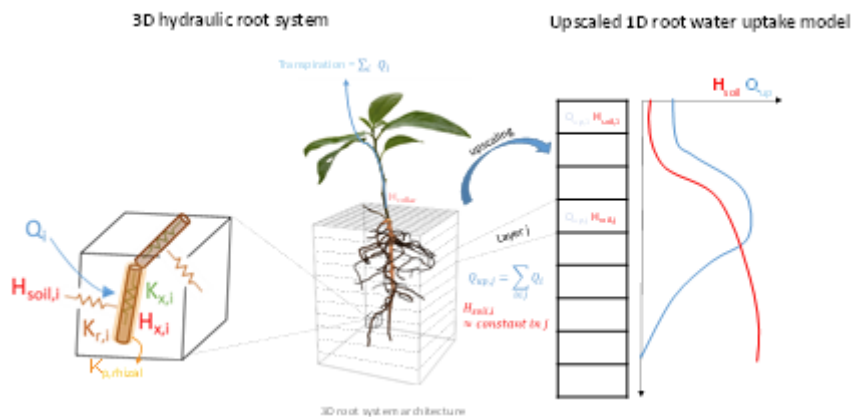


Abbildung 22. Durch Upscaling wurde aus der komplexen 3D-Modellierung, die die 3D-Wurzelarchitektur, deren hydraulische Eigenschaften, sowie den zusätzlichen Widerstand zum Wasserfluss in der Rhizosphäre berücksichtigt, ein 1D-Senkenterm für Ertragsmodelle entwickelt.

Die Formulierung ist vergleichbar mit gängigen Senkentermen für Wurzelwasseraufnahme, wie der von Feddes (Feddes et al., 1978) oder Feddes-Jarvis (Šimůnek und Hopmans, 2009). Die Parameter des neuen Senkenterms haben eine physikalische bzw. biologische Bedeutung und können auf Basis der 3D-hydraulischen Wurzelarchitektur und der hydraulischen Eigenschaften des Bodens

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

berechnet werden. Phänomene wie „hydraulic redistribution“ und „root water uptake compensation“ ergeben sich nun automatisch aus der Formulierung.

Der neue Senkenterm, der die Wurzelwasseraufnahme Q_i ($L T^{-1}$) aus Bodenschicht i beschreibt, ist in Gleichung 1 dargestellt.

$$(1) \quad Q_i = \begin{cases} \alpha_i(H_{bs,i})SUF_i \frac{T_p}{\omega_c} & \omega < \omega_c \\ \alpha_i SUF_i \frac{T_p}{\omega_c} - \frac{\alpha_i SUF_i}{[H_{bs,i}-H_c] - \left[\frac{\alpha_i SUF_i}{\sum H_{bs,i}-H_c} \right]} \left[\frac{\omega}{\omega_c} - 1 \right] T_p & \omega \geq \omega_c \end{cases}$$

T_p ($L T^{-1}$) ist die potenzielle Transpiration, H_{bs} (cm) das bulk soil-Bodenwasserpotential, H_c (cm) das kritische Bodenwasserpotential (permanenter Welkepunkt). SUF (-) stellt den Anteil der gesamten Wurzelwasseraufnahme durch das Wurzelsystem aus der i -ten Schicht dar, wenn die Wasserpotenziale an der Boden-Wurzel-Grenzfläche in der Wurzelzone einheitlich sind, und kann aus der 3D hydraulischen Wurzelarchitektur berechnet werden. a , w und w_c sind die neuen Modellparameter, die aus der 3D hydraulischen Wurzelarchitektur sowie der bodenhydraulischen Parameter und der Kenntnis der analytischen Lösung der 1D radialsymmetrischen numerischen Lösung des Wasserflussmodells in der Rhizosphäre berechnet werden. $\alpha_i = \frac{K_{srs,i}[H_{bs,i}-H_c]}{K_{rs}[-H_c]}$, $\omega = \frac{\sum SUF_i \alpha_i T_p}{K_{rs}[-H_c]}$

a_i ist das Verhältnis aus der maximal mögliche Wasseraufnahme aus Schicht i ($H_{collar}=H_c$) bei gegebenem Bodenwasserpotential $H_{bs,i}$ und der potentiell möglichen Wasseraufnahme aus dieser Schicht (bei gesättigtem Boden, $H_{bs,i}=0$). w ist das Verhältnis der maximal möglichen Wasseraufnahme über alle Bodenschichten bei gegebenen Wasserpotentialen und der potenziell möglichen Wasseraufnahme bei gesättigtem Boden. w_c ist das Verhältnis der potenziellen Transpiration und der potenziell möglichen Wasseraufnahme bei gesättigtem Boden. K_{rs} ist die effektive Wasserleitfähigkeit des Wurzelsystems und kann aus der 3D-hydraulischen Wurzelarchitektur berechnet werden (Vanderborght et al. 2021). In der effektiven Boden-Wurzel-Wasserleitfähigkeit K_{srs} steckt der zusätzliche Widerstand zum Wasserfluss in der Rhizosphäre bei austrocknendem Boden (Schröder et al. 2008), berechnet auf Basis der 1D-radialsymmetrischen Wasserflussgleichung in der Rhizosphäre.

Mit dieser Formulierung ist es gelungen, gängige bekannte Senkenterme für die Wurzelwasseraufnahme, wie sie in Ertragsmodellen verwendet werden, neu zu formulieren. Die Form ähnelt den bisher genutzten Senkentermen und ist deshalb einfach in Ertragsmodelle einzubauen. Die Herleitung ist jedoch mechanistisch (prozessbasiert) hergeleitet und ermöglicht automatisch die Beschreibung von Phänomenen wie „hydraulic redistribution“ und „root water uptake compensation“. Die Herleitung und Evaluierung ist in Vanderborght et al. (2024) beschrieben.

Eine wichtige Eigenschaft der neuen Formulierung ist, dass der Stressfaktor a nicht nur von den Pflanzeigenschaften, sondern auch von den Bodeneigenschaften abhängt. Wie beispielhaft in Abb. 16a dargestellt, hat dieselbe Pflanze in einem grobkörnigen Boden früher Stress als in einem feinen Boden. Der Faktor w_c hängt nicht nur von den Bodeneigenschaften ab, sondern auch vom „atmospheric demand“, der potentiellen Transpiration (siehe Abbildung 23).

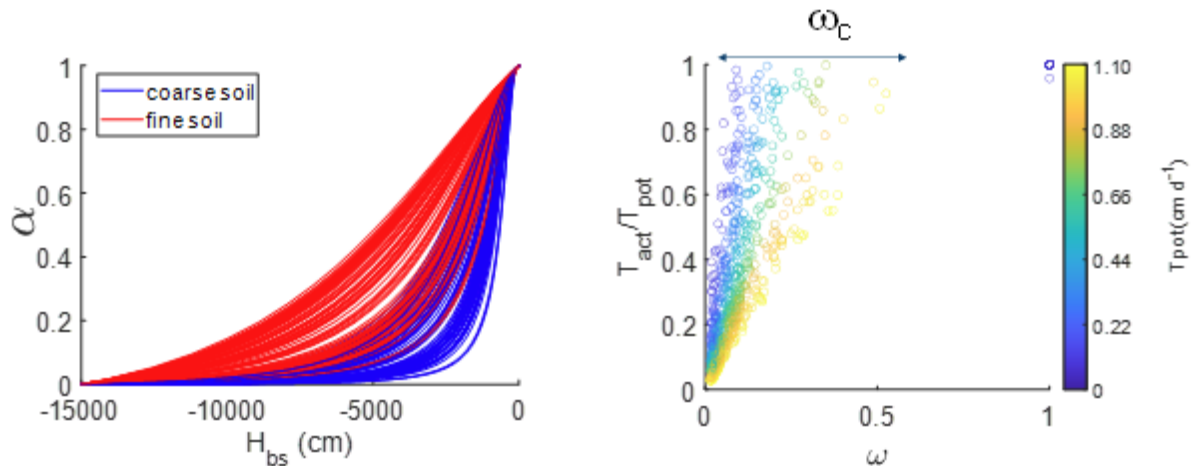


Abbildung 23. (a) α als Funktion des Bodenwasserpotentials für einen groben und einen feinen Boden. (b) Je größer der „atmospheric demand“, desto größer ist der Faktor w_c .

Die Einbußen an Genauigkeit sowie der Gewinn an Rechengeschwindigkeit bei jedem Vereinfachungsschritt wurde systematisch von Leitner et al. (2024) evaluiert.

II.2 Wichtigste Positionen des zahlenmäßigen Nachweises

Ein Großteil der verausgabten Mittel wurde für Personal eingesetzt. Die Arbeiten im TP B dieses Vorhabens wurden von den Doktoranden Nikos Kaloterakis und Sibghat Ullah durchgeführt. Dies war erforderlich, um die anspruchsvollen Arbeiten im Projekt durchführen zu können. Die Arbeiten umfassten: die Planung, Aufbau und Durchführung von Rhizoboxen- und Röhrenversuchen im Gewächshaus und Freiland, die Pulsmarkierung mit diversen isotopisch markierten Substanzen (¹³CO₂, ¹⁵NH₄⁺, ¹H²HO, H₂¹⁸O), die Probenahme und Analyse von Pflanzen- und Bodenproben, Wurzelwaschen, -scannen und -analyse, Datenauswertung, Statistik und Synthese (N. Kaloterakis); Modellentwicklung und -anwendung (S. Ullah), sowie Schreiben von Publikationen und Präsentation der Ergebnisse auf diversen Konferenzen (beide Doktoranden). Des Weiteren fielen Kosten für Materialbeschaffung für die Experimente und Kosten für Konferenz- und Statusseminarreisen an.

II.3 Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Eine Bearbeitung der im Vorhaben geplanten Aufgabenstellungen mit Erreichen der Zielsetzung war ohne staatliche Förderung nicht möglich, denn die umfangreichen durchzuführenden Arbeiten (siehe II.1) konnten ohne zusätzlich eingestelltes wissenschaftliches und technisches Personal nicht geleistet werden. Wir nutzten darüber hinaus verfügbare eigene Ressourcen, vor allem die Forschungsinfrastruktur (Büroräume und Ausstattung, IT-Systeme, Versuchstechnik, Labore). Die erhaltenen Zuwendungen stehen in angemessenem Verhältnis zu den umfangreichen erzielten Ergebnissen und waren in ihrem Umfang zur Erreichung der Projektziele allesamt notwendig.

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

Die in diesem Projekt erzielten Ergebnisse werden sowohl in wissenschaftlich begutachteten Fachzeitschriften veröffentlicht als auch über Datenbanken öffentlich verfügbar gemacht. Darüber hinaus werden die Ergebnisse der landwirtschaftlichen Praxis über praxisnahe Veröffentlichungen

zugänglich gemacht. Sie leisten einen dauerhaften Beitrag, die Effekte der Ertragsminderung von Weizen in Selbstfolge in Böden und im speziellen in der Rhizosphäre zu verstehen und Managementfaktoren zu identifizieren, mit deren Hilfe der Anbau von Weizen nach Weizen optimiert werden kann. Des Weiteren wurden die Ergebnisse im Rahmen der jährlichen BonaRes- und Rhizo4Bio-Statusseminare bzw. -Konferenzen sowie auf weiteren nationalen und internationalen Tagungen präsentiert und damit einer breiten wissenschaftlichen Öffentlichkeit zugänglich gemacht.

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

Das Modell CPlantBox wurde während der Projektlaufzeit von RhizoWheat in parallelen Projekten weiterentwickelt, die die Modellentwicklung in diesem Bereich in RhizoWheat (Task 4.4, Erweiterung des funktional-strukturellen Wurzelarchitekturmodells um weitere Funktionen) obsolet machten. Landl et al. (2021) nutzte im Rahmen des DFG SPP Rhizosphäre das Modell CPlantBox in Verbindung mit einer analytischen Lösung für Punkt- und Linienquellen zur Simulation der räumlich-dynamischen Verteilung von Wurzelausscheidungen im Boden, und führte eine Hotspot- und Hotmoment-Analyse durch. Giraud et al. (2023) erweiterte im Rahmen des Rhizo4Bio-Projekts „CROP“ das Modell CPlantBox für die 3D-Architektur der Pflanze um ein Photosynthesemodul, welches es ermöglicht, den gekoppelten Wasserfluss und Kohlenstofftransport innerhalb der 3D-Pflanzenstruktur nach der Münch-Theorie zu simulieren. In dieser Modellversion muss die Wurzelausscheidungsrate nicht vorgegeben werden, sondern ist Ergebnis der Modellsimulation, abhängig von der Photosynthese, Kohlenstofftransport zu den Organen, Pflanzenwachstum und -erhaltung sowie dem Kohlenstoffgehalt im Boden. Die gewonnene Zeit wurde für die Umstellung auf die neue DuMux-Version sowie Benchmarking im internationalen Kontext genutzt.

II.6 Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen

Bisher durch oder unter Beteiligung von Partner FZJ im Rahmen dieses Vorhabens veröffentlichte Artikel:

Kaloterakis N, Rashtbari M, Razavi BS, Braun-Kiewnick A, Giongo A, Smalla K, Kummer C, Kummer S, Reichel R, **Brüggemann N**, 2024. Preceding crop legacy modulates the early growth of winter wheat by influencing root growth dynamics, rhizosphere processes and microbial interactions. *Soil Biology & Biochemistry* **191**, 109343. doi: 10.1016/j.soilbio.2024.109343

Kaloterakis N, Kummer S, Le Gall S, Rothfuss Y, Reichel R, **Brüggemann N**, *im Druck*. Reduced belowground allocation of freshly assimilated C contributes to negative plant-soil feedback in successive winter wheat rotations. *Plant and Soil*. doi: 10.1007/s11104-024-06696-6

Leitner D, **Schnepf A**, Vanderborght J, 2024. From hydraulic root architecture models to efficient macroscopic sink terms including perirhizal resistance: Quantifying accuracy and computational speed. *EGUsphere* 2024: 1-38. doi: 10.5194/egusphere-2024-1319

Schnepf A, Black CK, Couvreur V, Delory BM, Doussan C, Heymans A, Javaux M, Khare D, Koch A, Koch T, Kuppe CW, Landl M, Leitner D, Lobet G, Meunier F, Postma JA, Schafer ED, Selzner T, Vanderborght J, Vereecken H, 2023. Collaborative benchmarking of functional-structural root architecture models: Quantitative comparison of simulated root water uptake. *In Silico Plants* **5**. doi: 10.1093/insilicoplants/diad005

Vanderborght J, Couvreur V, Javaux M, Leitner D, **Schnepf A**, Vereecken H, 2024. Mechanistically derived macroscopic root water uptake functions: The α and ω of root water uptake functions.

Schlussbericht RhizoWheat Phase I – TP B (FZJ)

Vadose Zone Journal **23**, e20333. doi: 10.1002/vzj2.20333

Vogel HJ, Amelung W, Baum C, Bonkowski M, Blagodatsky S, Grosch R, Herbst M, Kiese R, Koch S, Kuhwald M, König S, Leinweber P, Lennartz B, Müller CW, Pagel H, Rillig MC, Rüschoff J, Russell D, **Schnepf A**, Schulz S, Siebers N, Vetterlein D, Wachendorf C, Weller U, Wollschläger U, 2024. How to adequately represent biological processes in modeling multifunctionality of arable soils. *Biology and Fertility of Soils*. doi: 10.1007/s00374-024-01802-3

In Vorbereitung:

Kaloterakis N, Braun-Kiewnick A, Giongo A, Rashtbari M, Zamberlan P, Razavi BS, Smalla K, Reichel R, **Brüggemann N**. The rotational position of winter wheat shapes the bacterial and archaeal community, contributing to a negative plant-soil feedback and yield decline.

Kaloterakis N, Braun-Kiewnick A, Giongo A, Rashtbari M, Razavi BS, Babin D, **Brüggemann N**. Potential of the bacterium *Bacillus pumilus* to alleviate early growth reduction in successive wheat rotations.

Kaloterakis N, Braun-Kiewnick A, Giongo A, Rashtbari M, Razavi BS, Babin D, **Brüggemann N**. Potential of compost to alleviate yield decline in wheat growing in self-succession.

Ullah S, Leitner D, Vanderborght J, Kage H, **Schnepf A**. Virtual root sampling for root architecture parameter estimation.

Ullah S, Koch H.-J., Grunwald D, Arnhold J, **Schnepf A**. Root architecture traits of roots with and without early root senescence.

Verwendete Literatur

Feddes RA, Kowalik PJ, & Zaradny H, 1978. Simulation of field water use and crop yield. In F. W. T. Penning de Vries & H. H. van Laar (Eds.), *Simulation of plant growth and crop production* (pp. 194–209). Simulation monographs. Pudoc.

Giraud M, *et al.*, 2023. CPlantBox: a fully coupled modelling platform for the water and carbon fluxes in the soil–plant–atmosphere continuum. *in silico Plants* **5**, diad009. doi: 10.1093/insilicoplants/diad009

Landl M, *et al.*, 2021. Simulating rhizodeposition patterns around growing and exuding root systems. *in silico Plants* **3**. doi: 10.1093/insilicoplants/diab028

Schröder T, Javaux M, Vanderborght J, Korfgan B & Vereecken H, 2008. Effect of local soil hydraulic conductivity drop using a three-dimensional root water uptake model. *Vadose Zone Journal* **7**, 1089–1098. doi: 10.2136/vzj2007.0114

Šimůnek J & Hopmans JW, 2009. Modeling compensated root water and nutrient uptake. *Ecological Modelling* **220**, 505–521. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2008.11.004

Vanderborght J *et al.*, 2021. From hydraulic root architecture models to macroscopic representations of root hydraulics in soil water flow and land surface models. *Hydrology and Earth System Sciences* **25**, 4835–4860. doi: 10.5194/hess-25-4835-2021

Vanderborght J, Couvreur V, Javaux M, Leitner D, Schnepf A & Vereecken H, 2024. Mechanistically derived macroscopic root water uptake functions: The α and ω of root water uptake functions. *Vadose Zone Journal* **23**, e20333. doi: 10.1002/vzj2.20333

Berichtsblatt

1. ISBN oder ISSN	2. Berichtsart (Schlussbericht oder Veröffentlichung) Schlussbericht
3. Titel Rhizo4Bio (Phase 1): RhizoWheat — Rhizosphärenprozesse und Ertragsdepressionen in Weizenfruchtfolgen, TP B (FZJ)	
4. Autor(en) [Name(n), Vorname(n)] Brüggemann, Nicolas, Prof. Dr.	5. Abschlussdatum des Vorhabens 29.02.2024
	6. Veröffentlichungsdatum 31.08.2024
	7. Form der Publikation Schlussbericht
8. Durchführende Institution(en) (Name, Adresse) Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52425 Jülich	9. Ber. Nr. Durchführende Institution
	10. Förderkennzeichen 031B0910B
	11. Seitenzahl 22
12. Fördernde Institution (Name, Adresse) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Kapelle-Ufer 1 11055 Berlin	13. Literaturangaben 7
	14. Tabellen –
	15. Abbildungen 23
16. Zusätzliche Angaben Keine.	
17. Vorgelegt bei (Titel, Ort, Datum) Projekträger Jülich, Bioökonomie (BIO), Bioressource (BIO 6); Forschungszentrum Jülich GmbH, 31.08.2024	
18. Kurzfassung Im Verbundprojekt wurde der Komplex der wurzelbedingten Ertragsminderung von Weizen in Selbstfolge untersucht. Der Ertragsabfall von Weizen in Selbstfolge wurde häufig ausschließlich dem Erreger <i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i> (Ggt) zugeschrieben. Ergebnisse vor Beginn des Vorhabens zeigten jedoch, dass eine vergleichsweise breite Verschiebung des Rhizosphärenmikrobioms als Folge unterschiedlicher Vorfrüchte in Weizen zu beobachten ist. Die primären Ziele des Verbundprojektes lagen in der Aufklärung und Quantifizierung der Schlüsselprozesse, welche zum Ertragsabfall von Weizen in Selbstfolge beitragen, wobei der Fokus auf den Rhizosphärenprozessen lag. Methodisch werden unterschiedliche, komplementäre Ansätze auf unterschiedlichen Skalenebenen kombiniert. Das Zielsystem wurde sowohl in existierenden Langzeit-Feldversuchen als auch in Rhizobox/Container-Versuchen mit Methoden untersucht, die von DNA/RNA-Profilung der Rhizosphäre über die Untersuchung und Modellierung von Stoffflüssen und -umsetzungen in der Rhizosphäre bis zur Fernerkundung reichen. Hierdurch konnten vertiefte Kenntnisse über die komplexen Wechselwirkungen der biologischen, biogeochemischen und physikalischen Prozesse gewonnen werden, die das Ertragsminderungssyndrom in Selbstfolge von Weizen verursachen. Mechanistische, mathematische Simulationsmodelle unterschiedlicher Komplexität wurden in einem Modellverbund genutzt, um die Prozesskenntnisse zu integrieren und zur quantitativen Extrapolation im Hinblick auf Ertragseffekte und deren Wechselwirkung mit den Umweltbedingungen zu nutzen. Perspektivisch können aus dem im Projekt gewonnenen Verständnis agronomische oder züchterische Ansätze entwickelt werden, diesen Ertragsverlust zumindest teilweise zu vermeiden. Hierbei ist z.B. an die Selektion toleranterer Genotypen oder die gezielte Beeinflussung des Rhizosphärenmikrobioms zu denken.	
19. Schlagwörter Rhizosphärenprozesse, Pflanze-Boden-Mikroorganismen-Interaktionen, Ertragsdepression bei Weizen in Selbstfolge	
20. Verlag	21. Preis

Document Control Sheet

1. ISBN or ISSN	2. Type of document (e.g. report, publication) Final report
3. Title Rhizo4Bio (Phase 1): RhizoWheat — Rhizosphere processes and yield decline in wheat crop rotations, TP B (FZJ)	
4. Author(s) (family name, first name(s)) Brüggemann, Nicolas, Prof. Dr.	5. end of project 29.02.2024
	6. publication date 31.08.2024
	7. form of publication Final report
8. Performing organization(s) (name, address) Forschungszentrum Jülich GmbH Institut für Bio- und Geowissenschaften – Agrosphäre (IBG-3) Wilhelm-Johnen-Straße 52425 Jülich Germany	9. originator's report no.
	10. reference no. 031B0910B
	11. no. of pages 22
12. Sponsoring agency (name, address) Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) Kapelle-Ufer 1 11055 Berlin	13. no. of references 7
	14. no. of tables -
	15. no. of figures 23
16. Supplementary notes None.	
17. Presented at (title, place, date) Projekträger Jülich, Bioökonomie (BIO), Bioressource (BIO 6); Forschungszentrum Jülich GmbH, 31/7/2024	
18. Abstract <p>In the joint project, the complex of root-induced yield reduction of wheat in self-succession was investigated. The yield decline of wheat in self-succession was often attributed exclusively to the pathogen <i>Gaeumannomyces graminis</i> var. <i>tritici</i> (Ggt). However, results before the start of the project showed that a comparatively broad shift of the rhizosphere microbiome can be observed as a consequence of different preceding crops in wheat. The primary objectives of the joint project were to elucidate and quantify the key processes that contribute to yield loss in self-sown wheat, with a focus on rhizosphere processes. Methodologically, different complementary approaches are combined at different scale levels. The target system was investigated in existing long-term field experiments as well as in rhizobox/container experiments using methods ranging from DNA/RNA profiling of the rhizosphere to the investigation and modeling of material fluxes and transformations in the rhizosphere and remote sensing. This has provided in-depth knowledge of the complex interactions between the biological, biogeochemical and physical processes that cause the yield reduction syndrome in self-sequencing wheat. Mechanistic simulation models of varying complexity were used in a model network to integrate the process knowledge and to use it for quantitative extrapolation with regard to yield effects and their interaction with environmental conditions. In the future, the understanding gained in the project can be used to develop agronomic or breeding approaches to at least partially avoid this yield loss. This could include, for example, the selection of more tolerant genotypes or the targeted influencing of the rhizosphere microbiome.</p>	
19. Keywords Rhizosphere processes, plant-soil-microorganism interactions, yield depression in self-successive wheat	
20. Publisher	21. Price