

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



Nachhaltiges Unterbodenmanagement (Sustainable Subsoil Management)

Schlussbericht der Forschungszentrum Jülich GmbH

Teile I und II

Zuwendungsempfänger: Forschungszentrum Jülich GmbH, 52428 Jülich	Förderkennzeichen: 031B1066C
Laufzeit des Vorhabens: 01.04.2022 – 31.05.2025 (kostenneutral verlängert)	
Berichtszeitraum: 01.04.2022 – 31.05.2025	Berichterstatter: Dr. Anne Berns

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autor:innen.

I. Kurzdarstellung des Vorhabens

1. Aufgabenstellung

Pflanzen können zwischen 10 % bis 80 % ihres Nährstoff- und Wasserbedarfs aus dem Unterboden beziehen. Trotz dieses erheblichen Potenzials wird der Unterboden in nachhaltigen Bewirtschaftungsstrategien bislang kaum berücksichtigt. Das Soil³-Konsortium untersucht deshalb, wie und in welchem Umfang der Unterboden bewirtschaftet werden kann, um Pflanzenerträge zu sichern oder sogar zu steigern – und zwar durch eine verbesserte Nährstoff- und Wassernutzungseffizienz von Feldfrüchten.

Die zentrale Hypothese ist, dass die Nährstoff- und Wasseraufnahme aus dem Unterboden gesteigert werden kann, wenn es für die Pflanze vorteilhaft ist, in das Wachstum von Unterbodenwurzeln zu investieren. Solche günstigen Bedingungen entstehen insbesondere, wenn der mechanische Widerstand des Unterbodens gering ist, wenn sich dort lokale Nährstoff-Hotspots befinden oder wenn im Unterboden ausreichend Wasser gespeichert ist, das während saisonaler Trockenperioden im Oberboden als Reserve dienen kann.

Am Ende der ersten Phase konnte das Projektkonsortium geeignete Optionen zur Einbeziehung des Unterbodens in die nachhaltige Bodenbewirtschaftung vorschlagen. In der zweiten Phase des BonaRes-Programms wurde gezeigt, dass diese auch zu Ertragssteigerungen am Standort führten. In der dritten Phase dieses Projektes gilt es nun, diese Effekte zu quantifizieren und auch die Nachhaltigkeit der Unterbodenmelioration zu untersuchen und im besten Fall vorherzusagen, da dies eine wichtige Voraussetzung zur Akzeptanz der Landwirte und damit der Implementierung ist. Dies erfolgt durch Kombination von Stabilisotopendaten, zur Bestimmung der Aufnahmetiefe und der Nährstoffquelle, und klassischen physikochemischen Parametern zur Bestimmung der Nährstoffnutzungseffizienz (nutrient use efficiency, NUE) (FZJ-I). Die ermittelten NUE-Faktoren können anschließend durch die Modellierung von FZJ-IIa interpretiert werden, um quantitative Informationen zur Nährstoffnutzung auf den Feldversuchen abzuleiten. FZJ-IIa wird das virtuelle Boden-Wurzel-System so anzupassen, um, auf Einzelpflanzenebene Szenarien zu rechnen, wie sich eine Manipulation des Unterbodens auf die Nährstoffaufnahme auswirkt. Ebenso werden die Input-Parameter für Modellierungen auf der Feldskala geliefert werden, die für die Impact Assessment Plattform (Produktkategorie 4) relevant sind. Zur Beurteilung der Langlebigkeit der Maßnahmen sollen mit Hilfe von Micro-Computertomographie zu verschiedenen Zeiten nach der Unterbodenmelioration dreidimensionale Aufnahmen der Bodenstruktur gemacht und ausgewertet werden (FZJ-IIb). Diese Aufnahmen sollen darüber hinaus genutzt werden, um die Bodenstrukturveränderungen für Interessenten ansprechend visuell darzustellen. Dies ist wichtig, um Landwirte und Stakeholder überzeugen zu können, dass mit einer Implementierung der Soil³-Technik insgesamt auch andere Ökosystem-Dienstleistungen verbessert werden. Die Informationen dienen ebenfalls zur Erarbeitung der gemeinsamen Outreach-Materialien.

Das vorliegende Teilprojekt trägt zu den Zielen von Soil³ bei, indem es (i) ein virtuelles Boden-Wurzelsystem entwickelt, um den Einfluss der Unterbodenbearbeitung auf die Nährstoffaufnahme auf Einzelpflanzenebene zu simulieren und Eingabeparameter für die Feldmodelle zu liefern, (ii) die Nährstoffverwertungseffizienz (NUE) aus dem Unterboden eines repräsentativen Makronährstoffs (das

Erdalkalimetall Mg) und eines Mikronährstoffs (das Übergangsmetall Fe) und die Begrenzung der Hauptnährstoffnutzungstiefe durch ein geogenes Tracerelement (Sr) in Feldversuchen, und (iii) durch die Quantifizierung von Strukturveränderungen im Unterboden und die Vorhersage der Langlebigkeit von Unterbodenverbesserungstechniken. Letzteres umfasst eine Parametrisierung der Messungen des Eindringwiderstands von Bodenproben als Funktion des Bodenwassergehalts und eine Bewertung der Bodenstrukturentwicklung mittels Mikro-Computertomographie (μ CT). In Kombination mit der Modellierung des Wurzelwachstums wird dies dazu beitragen, die Auswirkungen auf die gesamte Wurzelentwicklung abzuschätzen.

Das Gesamtvorhaben liefert so praxisrelevantes Wissen und Entscheidungshilfen für die bislang vernachlässigte Ressource Unterboden. Damit unterstützt es die Ziele der Nationalen Forschungsstrategie Bioökonomie 2030: eine ressourceneffiziente Landwirtschaft, die angesichts wachsender Ressourcenknappheit und des Klimawandels zukunftsfähig bleibt.

2. Voraussetzungen, unter denen das Vorhaben durchgeführt wurde

Das Verbundvorhaben Soil³ wurde durch die Universität Bonn (UB-BK) koordiniert und bestand aus den Projektpartnern Universität Bonn (UB, mit den Gruppen Bodenkunde [UB-BK], Landtechnik [UB-ILT] und Pflanzenbau [UB-PB]), Technische Universität München (TUM, mit den Gruppen Bodenkunde [TUM-BK] und Mikrobiologie [TUM-MIK]), Forschungszentrum Jülich GmbH (FZJ, mit den Gruppen Terrestrische Biogeochemie [FZJ-I] und Umweltmodellierung [FZJ-II]), Freie Universität Berlin (FU), Thünen-Institut für Agrarklimaschutz (TI), Ecologic GmbH (EC), Humboldt Universität Berlin (HU, mit den Gruppen [HU-I] und [HU-II]).

Da die Forschungszentrum Jülich GmbH neben der analytischen und technischen Grundausstattung nicht über ausreichend Mittel und Personal verfügte, um dieses Projekt durchzuführen, wurden zwei 100% Post-Doc-Stellen besetzt, welche vollständig durch das BMBF finanziert wurden.

3. Planung und Ablauf des Vorhabens

Die Bearbeitung der Arbeitspakete in Teilprojekt FZJ-I entwickelte sich weitestgehend nach Plan. Nach einem guten Drittel der Laufzeit hat Post-Doc Dr. David Uhlig das Institut verlassen, da ihm eine sehr attraktive Nachwuchsgruppenleiterstelle an der FU Berlin angeboten wurden. Da es uns nicht gelang, eine:n adäquate:n Wissenschaftler:in zur weiteren Bearbeitung des Unterprojekt FZJ-I (Stabilisotope) zu finden, wurde Herr Fabian Kuhlen im Anschluss an seine erfolgreiche Ausbildungszeit als Chemie-Laborant im Projekt angestellt. Dies war möglich da wir Herrn Fabian Kuhlen im Rahmen seiner Ausbildung bereits ins Projekt eingebunden hatten und er dadurch mit allen grundsätzlichen Labor-Techniken im Soil³-Projekt vertraut war, mit Ausnahme der Spezialanalysen an der Multikollektor-ICP-MS. Die Analysen an der MC-ICP-MS wurden entsprechend durch Frau Dr. Bei Wu und Dr. Anne Berns übernommen. Diese Umbesetzung erfolgte kostenneutral nach einer beantragten Umwidmung der Personalmittel der Wissenschaftlerstelle (E13) in Technikermittel (E8-E10).

Ursprünglich sollte die Gruppe „Terrestrisches Imaging“ (FZJ-IIb) die zeitliche Entwicklung der Bodenstruktur nach der Unterbodenbearbeitung erfassen und modellieren. Aufgrund der plötzlichen Kündigung der Gruppenleiterin Prof. Kröner kurz vor Start des Projekts mussten diese Arbeitspakete nochmal überarbeitet und neu verteilt werden. Da die intensivste Zusammenarbeit in Produkt 4 (Prediction of success) zwischen FZJ-IIb und FZJ-IIa (Prof. Schnepf) vorgesehen war, hat sich Frau

Prof. Schnepf bereit erklärt die Aufgaben aus Meilenstein 412 sowie Meilenstein 421 mit leichten Änderungen in ihren Arbeitsplan zu integrieren. Der Ansatz von Frau Prof. Kröner wurde dabei durch eine Erweiterung des Wurzelbodenmodells um eine zeitlich veränderliche Lagerungsdichte und entsprechend veränderten hydraulischen Eigenschaften des Bodens sowie Wurzelwachstums ersetzt. Anstelle der in Meilenstein MS132 geplanten neuen Erfassung des Eindringwiderstandes erfolgte die Parametrisierung auf der Grundlage von Daten aus Phase 2. Die entwickelten Modelle können zu einem späteren Zeitpunkt jederzeit mit detaillierteren Daten neu parametrisiert werden. MS621 (Visualisierung der Penetrationsmessungen) wurde ersatzlos gestrichen. Im Zuge dieser Anpassungen wurden auch die zwei vorgesehenen Doktorandenstellen für FZJ-IIa und FZJ-IIb durch eine Post-Doc-Stelle für FZJ-II ersetzt.

Wir beziehen uns im Folgenden auf den Projektantrag mit den genehmigten Änderungen vom 23.6.2022 und 20.09.2022.

Zeitlicher Ablauf

FZJ-I

PK	Unterprodukt	Phase III											
		Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	
		2022				2023				2024			
0	030 Link to BonaRes												[MS031]
1	130 Assessment of subsoil access								[MS131]				
2	320 Nutrient use efficiency								[MS322]	[MS321]			
3	530 Science												[MS532]
	630 Schools												[MS632; MS633]
	640 Science												[MS641; MS643]

FZJ-II

PK	Unterprodukt	Phase III											
		Jahr 1				Jahr 2				Jahr 3			
		I	II	III	IV	I	II	III	IV	I	II	III	
		2022				2023				2024			
0	030 Link to BonaRes												[MS031]
2	320 Nutrient use efficiency								[MS323]				
	410 Scaling								[MS411]				[MS412]
	420 Longevity												[MS421]
3	530 Science												[MS532]
	630 Schools												[MS632; MS633]
	640 Science												[MS643]

Meilenstein-Bezeichnungen

Meilensteine FZJ-I	
Nr.	Bezeichnung
MS031	Datenweitergabe an BonaRes Datenzentrum
MS131	Ermittlung der Nährstoffnutzungseffizienz mittels Stabilisotope
MS321	Standort-spezifische Fraktionierungsfaktoren
MS322	Physikochemische Daten zur Modellierung der Nährstoffnutzungseffizienz und -aufnahme
MS532	Gemeinsame Synthese-Publikation
MS632	Factsheets zu Unterboden und dessen Bearbeitung
MS633	Lehrmaterial
MS641	Entwicklung eines Isotopenleitfadens
MS643	Factsheets/ Diashow
Meilensteine FZJ-II	
Nr.	Bezeichnung
MS031	Datenweitergabe an BonaRes Datenzentrum
MS323	Bestimmung der Nährstoffaufnahmeeffizienz
MS411	Bereitstellung von Metamodellen komplexer Prozesse im Boden-Wurzelsystem
MS412	Kombinieren von Daten zum Eindringwiderstand mit der Wurzelwachstumsmodellierung
MS421	Szenarioanalysen zur Langlebigkeit der Unterbodenbearbeitung
MS532	Gemeinsame Synthesepublikation
MS632	Factsheets zu Unterboden und dessen Bearbeitung
MS633	Lehrmaterial
MS643	Factsheet(s) / Diashow

4. Wissenschaftlicher und technischer Stand, an den angeknüpft wurde

Der allgemeine wissenschaftliche und technische Hintergrund unseres Projekts hat sich nicht geändert und ist im Vorschlag für Phasen I und II ausführlich dargelegt. Wir werden nun hauptsächlich den Stand der wissenschaftlichen und technischen Erkenntnisse wiedergeben, die während Phase II bekannt wurden und für unsere Aufgaben in Phase III relevant sind.

4.1. Virtuelle Boden-Wurzel-Systeme (FZJ-II)

In der ersten Phase wurde ein virtuelles Boden-Wurzel-System (VSRS) entwickelt, das den Wasserfluss und Nährstofftransport im Boden (Mai et al., 2019) sowie das Wachstum von 3D-Wurzelarchitekturen unter Berücksichtigung der Wechselwirkungen mit den Bodeneigenschaften (Schnepf et al., 2018) simulieren kann. Dieses Modell wurde erfolgreich eingesetzt, um die Phosphataufnahme von Reis zu prognostizieren, der 52 Tage lang in Bodensäulen unter sowohl begrenzten als auch ausreichenden Wasser- und Phosphatbedingungen wuchs. Das Modell war in der Lage, den relativen Beitrag verschiedener Wurzeltypen und Wurzelteile zur Gesamtaufnahme zu quantifizieren (De Bauw et al., 2020). In Reiszusammensetzungen lassen sich zwei Haupttypen von Seitenwurzeln unterscheiden: lange und dünne L-Typ-Seitenwurzeln und kurze und dünne S-Typ-Seitenwurzeln. Bei begrenzter Wasserverfügbarkeit kompensierten die L-Typ-Seitenwurzeln der Reiswurzeln den Verlust der Phosphataufnahme durch die S-Typ-Seitenwurzeln, indem sie Phosphat aus tieferen Bodenschichten aufnahmen. In der zweiten Phase wurde dieses Modell weiterentwickelt, um den Transport von gelösten Stoffen innerhalb der Wurzeln zu ermöglichen und somit die Simulation der Hormonproduktion und des Hormontransports mit dem Transpirationsstrom zu den Blättern zu ermöglichen. Dies ermöglicht den Vergleich verschiedener Stomata-Kontrollmechanismen und ihrer Auswirkungen auf den Pflanzenstress

unter Trockenbedingungen. Das Modell wurde weiter ausgebaut, um die Wasserdynamik im Boden-Wurzel-System unter Feldbedingungen und über die gesamte Vegetationsperiode auf Einzelpflanzenebene simulieren zu können. In Eloundou (2021) wurde dieses Modell für das zentrale Feldversuch von Soil³ auf dem Campus Klein Altendorf parametrisiert.

Das Wurzelarchitekturmodell wurde mit der Pflanzenmodellierungsplattform SIMPLACE gekoppelt. Das gekoppelte Modell war in der Lage, das Wurzelwachstum und die Entwicklung der oberirdischen Biomasse im Laufe der Zeit in einem Boden vorherzusagen, der mit streifenweiser Untergrundlockerung bewirtschaftet wurde. Die Pflanzen auf dem Streifen profitierten von der Untergrundlockerung und einer verbesserten Wurzelentwicklung im heißen und trockenen Jahr 2018, während die Erträge außerhalb des Streifens im Jahr 2017 höher waren, als der Stress spät einsetzte und ausgeprägt war (Seidel et al., 2022). Zusätzlich wurden die zugrundeliegenden mechanistischen Modelle zur Wurzelwasser-aufnahme in Bezug auf numerische Genauigkeit und Rechenbedarf evaluiert (Khare et al., 2022). Die Studie zeigte, dass unter Trockenbedingungen eine genaue Abbildung der Rhizosphärengradienten notwendig ist, um die berechnete Transpiration nicht stark zu überschätzen, deren explizite Diskretisierung den Rechenaufwand jedoch in unpraktikabler Weise erhöht. Zugleich konnte demonstriert werden, dass vereinfachte 1D-Modelle der Rhizosphäre, wie von Mai et al. 2019 vorgestellt, eine rechnerisch effiziente und ausreichend genaue Alternative darstellen. Auf Basis der Ergebnisse wurde die explizite Berücksichtigung von Rhizosphärengradienten als essenzielle Anforderung für in Ertrags- und Landoberflächenmodellen einbindbare, hochskalierte 1D-Senkenterme identifiziert.

4.2. Effizienz der Nährstoffnutzung (FZJ-I)

Isotopenverhältnisse von Metalloiden eignen sich dazu den biogeochemischen Kreislauf von Metallelementen nicht nur nachzuvollziehen, sondern auch zu quantifizieren. Bezuglich ersteres ist bekannt, dass Pflanzen schwere Mg Isotope bevorzugt aufnehmen und leichte Mg Isotope innerhalb der Pflanze von den Wurzeln über den Stamm in die Blätter weitertransportieren. Darauf aufbauend haben Wang et al. (2020) mittels eines experimentellen Ansatzes entdeckt, dass die landwirtschaftliche Nutzpflanze Weizen den Transport von Mg aus der Bodenlösung durch die Wurzel in die Pflanze in Abhängigkeit der Mg Konzentration in der Bodenlösung durch das Wechseln von passiver zu aktiver Aufnahme und vice versa reguliert. Außerdem zeigten Court et al. (2021) mittels Mg Isotopenanalysen, dass auch Waldbäume rasch auf die Veränderung der Bioverfügbarkeit von Mg im Boden durch Kalkung reagieren. Bezuglich der quantitativen Anwendung von Mg Isotopenverhältnissen im Boden-Pflanze System kommt dem sogenannten Isotopenfraktionierungsfaktor eine besondere Bedeutung zu. Dieser beziffert das Ausmaß der Verschiebung des Isotopenverhältnisses während der Nährstoffaufnahme, also von der Bodenlösung in die Pflanze und ist pflanzenspezifisch. Bislang sind nur wenige solcher Fraktionierungsfaktoren experimentell bestimmt worden, nämlich u.a. für Weizen (Black et al. 2008), Mais (Wrobel et al. 2021), Klee und Weidelgras (Bolou-Bi et al. 2010) sowie Zuckerahorn (Kimmig et al. 2018). Unter Anwendung solcher Fraktionierungsfaktoren ist es Uhlig et al. (2017) gelungen nachzuweisen, dass 50-100 % der Elemente, die in partikulärer Form aus einem Waldökosystem exportiert werden, zuvor durch die Biosphäre zykliert wurden. Darüber hinaus wiesen Wang et al. (2021) auf einem bewirtschafteten Ackerboden nach, dass selbst nach 100 Jahren Kalkung die

Roggenpflanzen bis zu 75 % des Magnesiums verwerten. Uhlig et al. (2022) untersuchte die Mg-Isotopenzusammensetzung des Bodens ($\delta^{26}\text{Mg}_{\text{soil}}$), der bioverfügbaren Fraktion ($\delta^{26}\text{Mg}_{\text{bioav}}$) und der Pflanzenorgane Stängel, Blatt und Ähre von Weizen und Gerste (dreierlei als Sprossmasse zusammengefasst ($\delta^{26}\text{Mg}_{\text{plant}}$)) in unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen eines Luvisols (Campus Klein-Altendorf, Bonn). Die $\delta^{26}\text{Mg}_{\text{plant}}$ -Werte einer Pflanzenart auf unterschiedlich bewirtschafteten Parzellen waren isotopisch identisch. Allerdings zeigte die Mg-Isotopenzusammensetzung der bioverfügbaren Fraktion ($\delta^{26}\text{Mg}_{\text{bioav}}$) einen systematischen Offset zwischen der Kontrolle und den Parzellen in der die Tiefenlockerung mit der Einarbeitung von Biokompost (DLB) kombiniert wurde. Dieser Offset lässt sich durch die Zersetzung organischer Substanz und den Eintritt isotopisch schweren Mg's in die bioverfügbare Fraktion erklären. Die aus den Felddaten abgeschätzten „scheinbaren“ Isotopenfraktionierungsfaktoren ($\Delta^{26}\text{Mg}_{\text{plant-bioav}}$) haben gezeigt, dass Winterweizen ($\Delta^{26}\text{Mg}_{\text{wheat-bioav}} = 0,63 \text{ ‰}$) und Sommergerste ($\Delta^{26}\text{Mg}_{\text{barley-bioav}} = 0,34 \text{ ‰}$) Mg unterschiedlich stark während der Aufnahme von Mg fraktionieren. Das heißt, Weizen ist besser geeignet als Gerste um den Erfolg der Unterbodenbewirtschaftung mithilfe des Mg-Isotopen-basierten Instruments zu bewerten. Zudem wurde konzeptionell gezeigt, dass der Mg-Isotopen-Proxy quantitativ angewendet werden kann, um beispielsweise die relative Menge von Mg zu quantifizieren, die landwirtschaftliche Nutzpflanzen aus dem Boden aufgenommen haben. Die Feldstudie am Campus Klein Altendorf belegt allerdings auch, dass die Aufbringung MgCO_3 -haltiger Substanzen auf die Felder eine Herausforderung für den quantitativen Ansatz darstellt.

Bezüglich des Mikronährstoffs Fe untersuchten Guelke und von Blanckenburg (2007) in einem Topfversuch Pflanzen der Fe-Aufnahme-Strategie I (Reduktion) und der Strategie II (Komplexierung) und stellten fest, dass alle Pflanzen der Strategie I stark mit leichten Fe-Isotopen angereichert waren, wobei die jüngsten Pflanzenorgane die stärksten Fraktionierungen aufwiesen. Im Gegensatz dazu wiesen die untersuchten Pflanzen der Strategie II (Mais, Hafer und Weizen) eine Anreicherung schwerer Isotope (etwa 0.4 ‰ schwerer) als der pflanzenverfügbare Pool auf. Interessanterweise stellten Guelke-Stelling und von Blanckenburg (2012) in einem Folgeexperiment mit Strategie-II-Pflanzen, in dem statt Boden Sand in Kombination mit einer Nährstofflösung als Substrat zum Einsatz kam, fest, dass in allen Pflanzenorganen und Wachstumsstadien eine konsistente Anreicherung der leichten Eisenisotope um ca. 0.5 ‰ im Vergleich zur Nährösung vorlag, welches auf das ausreichende Eisenangebot zurückgeführt wurde. Die Autoren stellten die Hypothese auf, dass die, meist als vernachlässigbar beschriebene, konstitutive Eisen(III)-Reduktase-Strategie (Bienfait and Lüttge, 1988; Bienfait, 1985, 1989; Briat et al., 1995; Marschner and Römheld, 1994) zum vorherrschenden Fe-Aufnahmeprozess wurde. Ferner untersuchten Wu et al., (2021) den Einfluss einer Langzeit-Kalkung auf die Fe-Isotopenzusammensetzung von Winterroggen und stellten fest, dass, obwohl die Isotopenzusammensetzung im Boden keine signifikanten Änderungen zeigte, 100 Jahre Kalkung im Vergleich zur ungekalkten Kontrolle zu einer schwereren Fe-Isotopenzusammensetzung von Winterroggen führten. Beißmann (2021) untersuchte in einem ^{57}Fe -markierten Wurzelausschlußexperiment die Fähigkeit von arbuskulären Mykorrhiza Pilzen (arbuscular mycorrhizal fungi, AMF) den Einfluss von AMF auf die Eisenaufnahme in Sommergerste und ob AMF pflanzenverfügbares Eisen aus schwerlöslichen Fe(hydr)-oxiden mobilisieren können. Obwohl die AMF-Inokulation höhere

Wurzeltrockengewichte und eine verbesserte Wasseraufnahme während der Reife bewirkte, waren keine signifikanten Mengen an ^{57}Fe in den Pflanzen festzustellen. Dies lag sehr wahrscheinlich an einer zu geringen Kolonisierungsintensität, welche bei Gerste nicht ungewöhnlich ist. Die These, dass AMF Eisen aus schwerlöslichen Verbindungen lösen und in die Pflanze transportieren können, konnte aufgrund des sehr hohen analytischen Fehlers weder bestätigt noch widerlegt werden.

Stabile Isotope von Metalloiden sind zwar geeignet, um die Nährstoffnutzungseffizienz zu ermitteln, verlieren jedoch an Bedeutung, wenn es darum geht Nährstoffquellen der Pflanzen atmosphärischer, biologischer und/oder geogener Natur zu identifizieren. Hierzu eignen sich radiogene Isotopensysteme wie jene vom Element Strontium ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Im Nahrungsmittelvertrieb wird das radiogene Sr-Verhältnis bereits eingesetzt, um die geografische Herkunft von höherpreisigen Lebensmitteln wie Kaffee (Rodrigues et al. 2011) und Wein (Coldwell et al. 2022) unter Anwendung sogenannter „Isocapes“ nachzuweisen, um Falschetikettierung und damit Betrug aufzudecken. Neben dieser großskaligen Anwendung lassen sich radiogene Isotopensysteme auch kleinskalig anwenden, um beispielsweise die Nährstoffaufnahmetiefe einer Pflanze in einem Bodenprofil zu ermitteln. So ist es Uhlig et al. (2020) mittels des traditionellen Isotopensystems ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$) und einem innovativen Isotopensystem ($^{10}\text{Be}(\text{meteorisch})/^{9}\text{Be}$) gelungen nachzuweisen, dass Nährstoffe, die aus der organischen Auflage des Waldbodens rezykliert werden, ursprünglich aus mehreren Meter Tiefe aufgenommen wurden. Unter Einbeziehung atmosphärischer Einträge entdeckten Bedel et al. (2017) ferner, dass die Ca-Aufnahmetiefe von Bäumen an Ca-armen Standorten bevorzugt aus tiefen Bodenschichten erfolgt, währenddessen an Ca-reichen Standorten Ca gleichmäßig über das gesamte Bodenprofil hinweg aufgenommen wird. Uhlig et al., (2023) untersuchte den Erfolg der Unterbodenbearbeitung (Tiefenlockerung oder Einsatz von Luzerne als tiefwurzelnde Vorfrucht, beides in Kombination mit Kompostuntertermischung) hinsichtlich des Nährstoffhaushalts in der Sprossmasse, der austauschbaren Fraktion im Boden und im Gesamtboden sowie der Nährstoffaufnahmetiefe anhand der Elementzusammensetzung und des radiogenen Sr-Isotopenverhältnisses ($^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$). Unabhängig von der angewandten Unterbodenbearbeitung konnten keine negativen Auswirkungen auf den Nährstoffhaushalt in der Sprossmasse und im Boden festgestellt werden. Im Gegenteil, der Na-Gehalt in der Sprossmasse stieg durchgängig an, wenn die Unterbodenbearbeitung mit Kompostuntertermischung einherging. Darüber hinaus zeigte die $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältniss als Indikator für die durchschnittliche Nährstoffaufnahme der Pflanzen zwei wichtige Erkenntnisse. Erstens führte die Untergrundlockerung allein zu einer intensiveren Beteiligung der flacheren Bodenhorizonte an der Nährstoffaufnahme als in der Kontrollgruppe. Zweitens führte die Tiefenlockerung mit Kompostuntertermischung zu einer Vertiefung der durchschnittlichen Nährstoffaufnahme unterhalb der Tiefe der Kompostuntertermischung. Diese Vertiefung könnte durch biosensorische Wurzeln ausgelöst worden sein, die nicht nur erhöhte Mengen an bioverfügbarem Na unterhalb der Tiefe der Kompostuntertermischung aufspürten, sondern auch dieses aus Kompost stammende Na nutzten, um die Wassernutzungseffizienz der Pflanzen während einer Sommerdürre zu verbessern. Insgesamt führt die Unterbodenbearbeitung durch tiefes Auflockern mit Kompost zu einer Vertiefung der mittleren Nährstoffaufnahme und einer Nährstoffanreicherung aus der Tiefe in den Oberboden, wodurch sie sich als vielversprechendere Bodenbewirtschaftungsmethode erweist, um Bodenressourcen über den bisher intensiv bewirtschafteten Oberboden hinaus in Zukunft zu nutzen.

Literaturverzeichnis zu Punkt I.4

- Bauke, S.L.; C. von Sperber, N. Siebers, F. Tamburini, W. Amelung, Biopore effects on phosphorus biogeochemistry in subsoils, *Soil Biol. Biochem.* 111 (2017) 157-165.
- Beißmann, J.C., The ability of arbuscular mycorrhizal fungi to transport iron from poorly soluble compounds into spring barley (*Hordeum vulgare*), Masterarbeit an der RWTH Aachen, Fakultät für Mathematik, Informatik und Naturwissenschaften. Online available at: <http://hdl.handle.net/2128/27561>
- Bedel, L.; A. Poszwa, G. van der Heijden, et al., Unexpected calcium sources in deep soil layers in low-fertility forest soils identified by strontium isotopes (Lorraine plateau, eastern France). *Geoderma* 264 (2016) 103–116. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.09.020
- Bienfait, H.F., 1985. Regulated Redox Processes at the Plasmalemma of Plant-Root Cells and Their Function in Iron Uptake. *J Bioenerg Biomembr* 17, 73-83.
- Bienfait, H.F., 1989. Prevention of Stress in Iron-Metabolism of Plants. *Acta Bot Neerl* 38, 105-129.
- Bienfait, F., Lüttge, U., 1988. On the function of 2 systems that can transfer electrons across the plasma-membrane. *Plant Physiol Bioch* 26, 665-671.
- Black, J.R., Epstein, E., Rains, W.D., Yin, Q.Z., Casey, W.H., 2008. Magnesium-isotope fractionation during plant growth. *Environ. Sci. Technol.* 42, 7831–7836. <https://doi.org/10.1021/es8012722>
- Bolou-Bi, E.B., Poszwa, A., Leyval, C., Vigier, N., 2010. Experimental determination of magnesium isotope fractionation during higher plant growth. *Geochim. Cosmochim. Acta* 74, 2523–2537. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2010.02.010>
- Briat, J.F., Fobis-Loisy, I., Grignon, N. et al., 1995. Cellular and molecular aspects of iron metabolism in plants. *Biol Cell* 84, 69-81.
- Brodrribb, Timothy J et al., Xylem and stomata, coordinated through time and space, *Plant, Cell & Environment* 40 (2017) 872–880.
- Choat, B.; S. Jansen, et al., Global convergence in the vulnerability of forests to drought, *Nature* 491 (2012) 752–755. doi: 10.1038/nature11688.
- Coldwell, B.C., Pérez, N.M., Vaca, M.C., Pankhurst, M.J., Hernández, P.A., Rodriguez, G.V.M., Padrón, E., Asensio-Ramos, M., Ribeiro, S., Santos, J.F., 2022. Strontium Isotope Systematics of Tenerife Wines (Canary Islands): Tracing Provenance in Ocean Island Terroir. *Beverages* 8, 1–19. <https://doi.org/10.3390/beverages8010009>
- Court, M., Heijden, G. Van Der, Louvat, P., Caro, G., Bouchez, J., Pollier, B., Didier, S., Saint-andre, C.N.L., 2021. Mg isotope composition in beech forest ecosystems and variations induced by liming: insights from four experimental sites in Northern France. *Biogeochemitsry* 153, 115–134. <https://doi.org/10.1007/s10533-021-00766-y>
- Daly, K.R.; S.R. Tracy, N.M.J. Crout, S. Mairhofer, T.P. Pridmore, S.J. Mooney, et al., Quantification of root water uptake in soil using X-ray computed tomography and image-based modelling, *Plant Cell Environ* 41 (2018) 121-133.
- Eloundou, F. B.: 2021 Parameterize Models of Root-Soil Interaction using Experimental Data. Masterarbeit, BTU Cottbus – Senftenberg.
- Garnier, J.; J.M. Garnier, C.L. Vieira, A. Akerman, J. Chmeleff, R.I. Ruiz, et al., Iron isotope fingerprints of redox and biogeochemical cycling in the soil-water-rice plant system of a paddy field, *Sci. Total Environ.* 574 (2017) 1622-1632.
- Guelke, M. & von Blanckenburg, F. 2007. Fractionation of stable iron isotopes in higher plants. *Environmental Science & Technology*, 41, 1896-1901. Doi:10.1021/es062288
- Guelke-Stelling, M. & von Blanckenburg, F. 2012. Fe isotope fractionation caused by translocation of iron during growth of bean and oat as models of strategy I and II plants. *Plant and Soil*, 352, 217-231. Doi:10.1007/s11104-011-0990-9
- Huber, K.; J. Vanderborgh, M. Javaux, H. Vereecken, Simulating transpiration and leaf water relations in response to heterogeneous soil moisture and different stomatal control mechanisms, *Plant and Soil* 394 (2015) 109–126. doi: 10.1007/s11104-015-2502-9.
- Khare, D., Selzner, T., Leitner, D., Vanderborgh, J., Vereecken, H., Schnepf, A. (2022): Root System Scale Models Significantly Overestimate Root Water Uptake at Drying Soil Conditions. *Frontiers in Plant Science* 13, 798741. Doi: 10.3389/fpls.2022.798741
- Kimmig, S.R., Holmden, C., Bélanger, N., 2018. Biogeochemical cycling of Mg and its isotopes in a sugar maple forest in Québec. *Geochim. Cosmochim. Acta* 230, 60–82. <https://doi.org/10.1016/j.gca.2018.03.020>
- Landl, M.; K. Huber, A. Schnepf, J. Vanderborgh, M. Javaux, A.G. Bengough, et al., A new model for root growth in soil with macropores, *Plant Soil* 415 (2017) 99-116.
- Mai, T.H.; A. Schnepf, H. Vereecken, J. Vanderborgh, Continuum multiscale model of root water and nutrient uptake from soil with explicit consideration of the 3D root architecture and the rhizosphere, *Plant Soil* 439 (2019) 273–292.
- Marschner, H., Römheld, V., 1994. Strategies of Plants for Acquisition of Iron. *Plant Soil* 165, 261-274.
- Postma, J.A.; C. Kuppe, M.R. Owen, N. Mellor, M. Griffiths, M.J. Bennett, et al., OPENSIMROOT: widening the scope and application of root architectural models, *New Phytol* 215 (2017) 1274-1286.
- Rodrigues, C., Brunner, M., Steiman, S., Bowen, G.J., Nogueira, J.M.F., Gault, L., Prohaska, T., Máguas, C., 2011. Isotopes as tracers of the Hawaiian coffee-producing regions. *J. Agric. Food Chem.* 59, 10239–10246. <https://doi.org/10.1021/jf200788p>
- Schnepf, A.; D. Leitner, M. Landl, G. Lobet, T.H. Mai, S. Morandage, et al., CRootBox: a structural-functional modelling framework for root systems, *Ann Bot-London* 121 (2018) 1033-1053.

- Seidel, S. J., Gaiser, T., Srivastava, A. K., Leitner, D., Schmittmann, O., Athmann, M., Kautz, T., Guigue, J., Ewert, F., Schnepf, A. (2022): Simulating Root Growth as a Function of Soil Strength and Yield with a Field-Scale Crop Model Coupled with a 3D Architectural Root Model. *Frontiers in Plant Science* 13, 865188. doi: 10.3389/fpls.2022.865188
- Uhlig, D.; J.A. Schuessler, J. Bouchez, J.L. Dixon, F. von Blanckenburg, Quantifying nutrient uptake as driver of rock weathering in forest ecosystems by magnesium stable isotopes, *Biogeosciences* 14 (2017) 3111-3128.
- Uhlig, D.; W. Amelung, F. von Blanckenburg, Mineral nutrients sourced in deep regolith sustain long-term nutrition of mountainous temperate forest ecosystems. *Global Biogeochemical Cycles* 34 (2020) e2019GB006513. doi: 10.1029/2019GB006513
- Uhlig D., Wu, B., Berns, A. E., Amelung, W. (2022): Magnesium stable isotopes as a potential geochemical tool in agronomy - constraints and opportunities. *Chemical Geology* 611, 121114. doi: 10.1016/j.chemgeo.2022.121114
- Uhlig, D. (2022): Geochemical and isotope data on magnesium stable isotopes as a potential geochemical tool in agronomy - constraints and opportunities. GFZ Data Services. doi: 10.5880/fidgeo.2022.003
- Uhlig, D., Berns, A. E., Wu, B., Amelung, W. (2023): Mean nutrient uptake depths of cereal crops change with compost incorporation into subsoil – evidence from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios. *Plant Soil* 489:613–628. doi: 10.1007/s11104-023-06047-x
- Wrobel, Katarzyna, Karasinski, J., Tupys, A., Negrete, M.A.A., Halicz, L., Wrobel, Kazimierz, Bulska, E., 2020. Magnesium – Isotope Fractionation in Chlorophyll-a Extracted from Two Plants with Different Pathways of. *Molecules* 25, 1–12. <https://doi.org/doi:10.3390/molecules25071644>
- Wu, B., Wang, Y., Berns, A.E., Schweitzer, K., Bauke, S.L., Bol, R., Amelung, W. (2021): Iron isotope fractionation in soil and graminaceous crops after 100 years of liming in the long-term agricultural experimental site at Berlin-Dahlem, Germany. *European Journal of Soil Science* 72, 289-299. Doi: 10.1111/ejss.12944

5. Zusammenarbeit mit anderen Stellen

Am 21. Februar 2023 fand eine Videokonferenz statt in der Dr. Kathlin Schweitzer (HU-I) die neu erstellte Datenbank zu CF3 teilte und ausführlich erläuterte. Vom 7. bis 9. August 2023 erfolgte zusammen mit HU-I eine Beprobung des zentralen Feldversuchs CF3 in Berlin-Thyrow.

Sonja Habbinga vom Team ATML Visualization & Interactive HPC des Jülich Supercomputing Centre (JSC) unterstützte die Erstellung der Videos zur Visualisierung von Wurzelwachstum und dessen Funktionen in Böden sowie Visualisierung der Arbeitsschritte der Soil³ Methode.

II. Eingehende Darstellung der Ergebnisse

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

1.1. Projekt-Koordination (Produkt 0)

Unterprodukt 030: Verlinkung mit BonaRes Datenzentrum (FZJ-I und FZJ-II)

FZJ-I und FZJ-II unterstützten alle Aktivitäten der Koordination. Daten und Codes wurden disziplinabhängig in spezialisierte Repositorien (GFZ Data Services und GitHub) hochgeladen und stehen zur Verfügung, sobald die entsprechenden Publikationen veröffentlicht sind. Dabei handelt es sich um gemessene Daten, Codes, Modelloutputs und relevante Postprocessing-Skripte. Daten, die in spezialisierte Repositorien hochgeladen wurden, wurden über ein Metadatenblatt im BonaRes-Repositorium verlinkt. [MS031]

1.2. Durchführung CFs und DFs (Produkt 1)

Unterprodukt 130: Abschätzung des Unterboden-Zugangs (FZJ-I)

In Zentralfeldversuch CF3 in Thyrow wurden Elementkonzentrationen sowie das radiogene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnis, $\delta^{26}\text{Mg}$ -Werte und $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte in Bodenschichten, Roggen- (BBCH 85) und Maispflanzen (BBCH 71-73) bestimmt (Abb. 1 bis 3). Interessanterweise zeigen die Sr-Verhältnisse sowohl in Roggen als auch in Mais, dass keine Nährstoffaufnahme aus der Kompostschicht erfolgt ist, obwohl die Pflanzen erwiesenmaßen in diese Schicht hineingewachsen sind (siehe Abschlussbericht HU Berlin). Dies wird durch die Unveränderlichkeit der mittleren Nährstoffaufnahmetiefe bei verschiedenen Behandlungsmethoden belegt, was darauf hindeutet, dass die primäre Nährstoffquelle für das Pflanzenwachstum in dem hier untersuchten, sandigen Retisol unabhängig von der angewandten Unterbodenbewirtschaftung im Oberboden verblieb (Abb. 1).

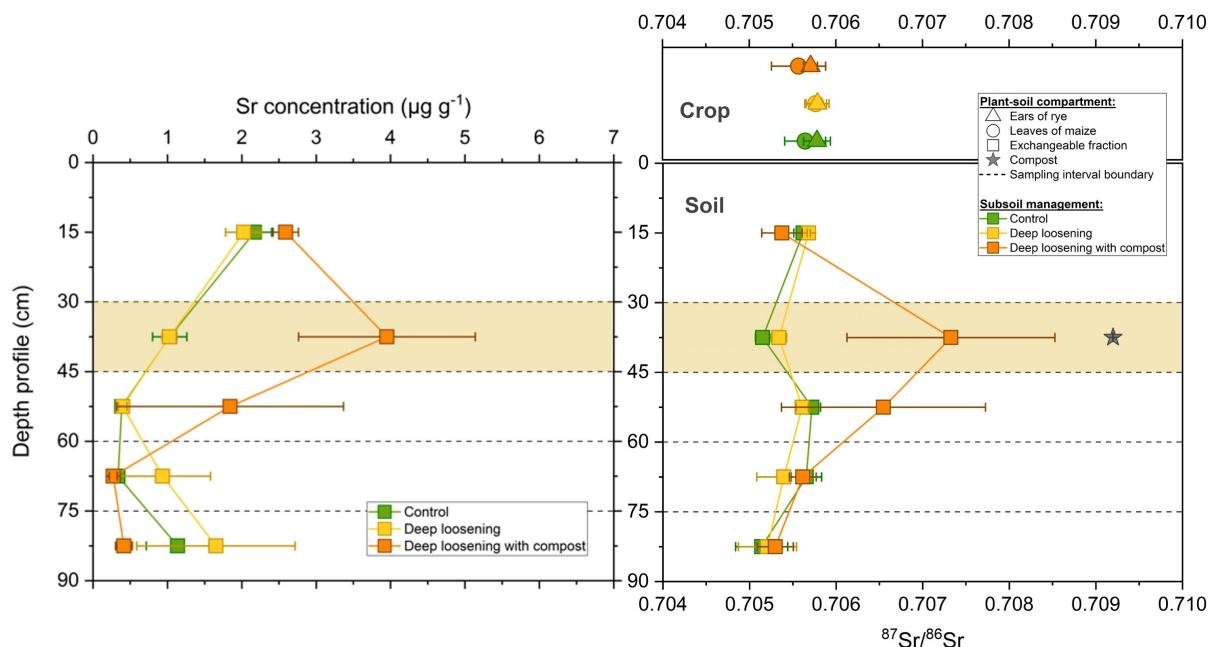


Abb. 1: Radiogene $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ -Verhältnisse von Maisblättern und Winterroggenähren sowie der austauschbaren Sr-Fraktion der Bodenprofile in CF3 unter verschiedenen Unterbodenbewirtschaftungsformen. Die Fehlerbalken geben die Standardfehler des Mittelwerts von drei Feldwiederholungen an. Der horizontale beigefarbene Balken stellt die Bodenschicht dar, in die Kompost eingearbeitet wurde.

Die $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte der pflanzenverfügbaren Fe-Fraktion in den beprobten Bodenschichten zeigten weder signifikanten Änderungen zwischen den Bearbeitungsvarianten noch von einer Schicht zur nächsten. Im Biokompost lag der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Wert bei 0,25 ‰, der beprobte Biokompost aus der DLB-Variante zeigte einen $\delta^{56}\text{Fe}$ -Wert der zwischen dem Biokompost und dem Boden lag. Obwohl die Fe-Konzentrationen in den Roggenähren in der geschlitzten Variante mit eingearbeitetem Biokompost (DLB) signifikant erhöht waren, waren die Mittelwerte der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte in den Roggenähren identisch zu denen in der ungestörten Kontrolle (C). Ein Fraktionierungsfaktor $\Delta^{56}\text{Fe}$ von $0,40 \pm 0,04$ ‰, wie in der Kontrolle zu sehen, wurde bereits von Guelke & von Blanckenburg (2007) für Mais, Weizen und Hafer auf sandigem Boden beschrieben. Diese Verschiebung der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte zu positiveren Werten in der Pflanze zeigt eine Anreicherung von schweren Fe-Isotopen gegenüber der Nährstoffquelle an, welche durch den Aufnahmemechanismus per Komplexierung von Fe(III) bedingt ist. Eine Aufnahme von Fe aus dem Nährstoffpool des Biokompost hätte eine Verschiebung der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte von ca. 0,10 ‰ erwarten lassen. Die weniger defizitärer Bedingungen hätten zudem auch zu einer Runterregulierung des Komplexierungsmechanismus führen können, was zu einer weiteren Verschiebung der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte in Richtung negativere $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte führen könnte. Beide Prozesse hätten eine Reduzierung des Fraktionierungsfaktor $\Delta^{56}\text{Fe}$ zur Folge. Dies ist im Falle der Biokompostvariante (DLB) im Mittel nicht der Fall. Die Tiefenlockerungsvariante (DL) und die Biokompostvariante (DLB) zeigten allerdings eine erhöhte Variabilität zwischen den einzelnen Wiederholungen (Abb. 2). Diese größeren Variabilitäten in den DL- und der DLB-Varianten, die durch Verschiebungen der $\delta^{56}\text{Fe}$ -Werte in beide Richtungen bedingt waren, zeigen an, dass die Verfügbarkeit des Eisens im Boden, und damit der notwendige Aufwand für die Nährstoffaufnahme in die Pflanze, durch ein solches Unterbodenmanagement verbessert werden kann, aber nicht muss und dass es ebenfalls zu einer Verschlechterung kommen kann. Diese mögliche veränderte Eisenverfügbarkeit scheint allerdings bereits allein durch die mechanische Bearbeitung bedingt zu sein und ist erstaunlicherweise unabhängig vom eingebrachten Kompost.

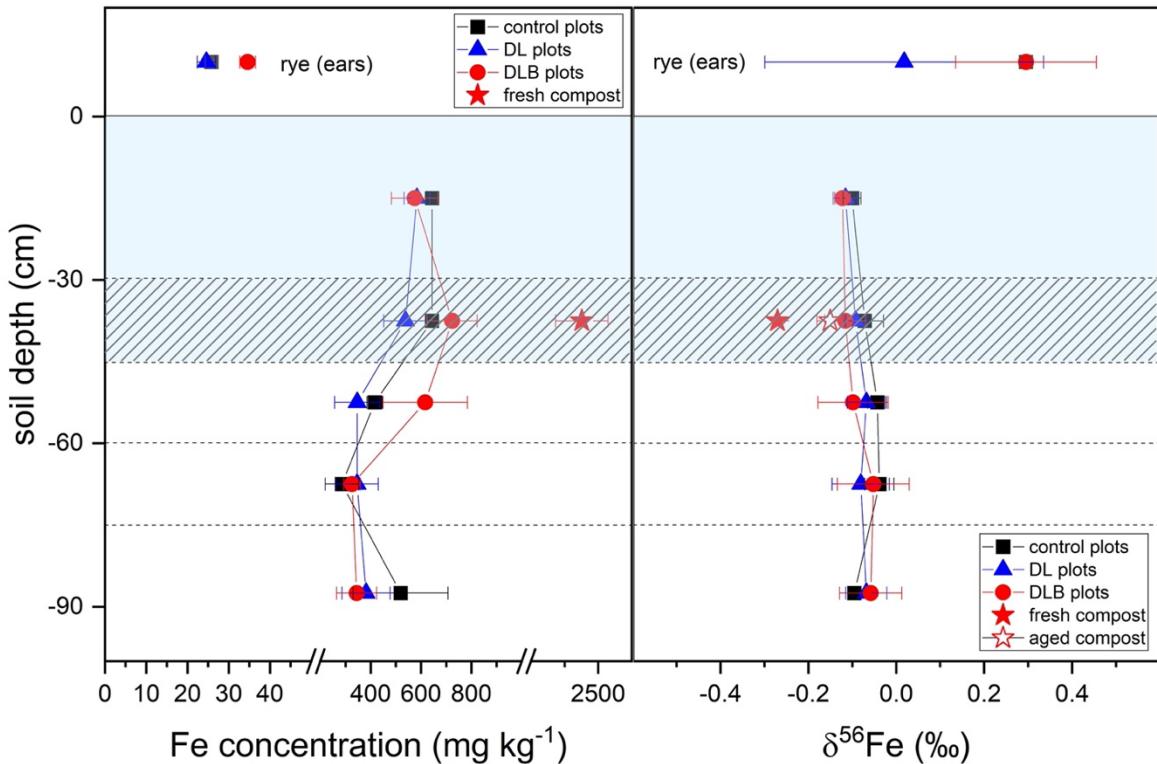


Abb. 2: Fe-Konzentration und Isotopenzusammensetzung von Winterroggenähren und der pflanzenverfügbaren Fe-Fraktion der Bodenprofile in CF3 in den Parzellen der Kontrollgruppe (schwarze Quadrate), der tiefen Lockerung (DL, blaue Dreiecke) und der tiefen Lockerung mit Einarbeitung von Biokompost (DLB, rote Kreise) sowie die des frischen (roter Stern) und des eingearbeiteten Komposts (rot/weißer Stern). Letzterer wurde aus der Kompostschicht beprobt. Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen der beprobenen Bodenschichten an. Die blau unterlegten Bodenschichten stellen den durchwurzelten Bereich dar; die schraffierte Fläche zeigt die Schicht an, in die Kompost eingearbeitet wurde. Die Fehlerbalken geben den Standardfehler des Mittelwerts von drei Feldwiederholungen an.

Die Einarbeitung von Biokompost erhöhte die Mg-Konzentration in der Bodenschicht, in die der Kompost eingearbeitet wurde. Ähnlich wie bei Sr und Fe zeigte die Mg-Konzentration in den plots mit Biokompost aufgrund der ungleichmäßigen Vermischung von Kompost und Boden eine höhere Heterogenität. Die Mg-Konzentration zeigte bei Roggen keinen signifikanten Unterschied, während Mais, der auf DL- und DLB-plots wuchs, eine geringere Mg-Konzentration zeigte. Diese ist jedoch für das Wachstum ausreichend. Der eingearbeitete Biokompost hatte einen deutlichen Einfluss auf die Mg-Isotopenzusammensetzung der Bodenschicht, in die er eingearbeitet wurde, welche eine schwerere Mg-Isotopensignatur wie die des Komposts hatte. Die Mg-Isotopenzusammensetzung der beiden Pflanzen unterschied sich zwischen den Behandlungen nicht, sodass keine Wirkung des Komposts festzustellen war (Abb. 3). Zusammen mit den Ergebnissen für Sr und Fe können wir feststellen, dass die Tiefenlockerung und die Einarbeitung von Biokompost in den Unterboden nur in begrenztem Umfang zur Pflanzenernährung im sandigen Boden bei CF3 beigetragen haben.

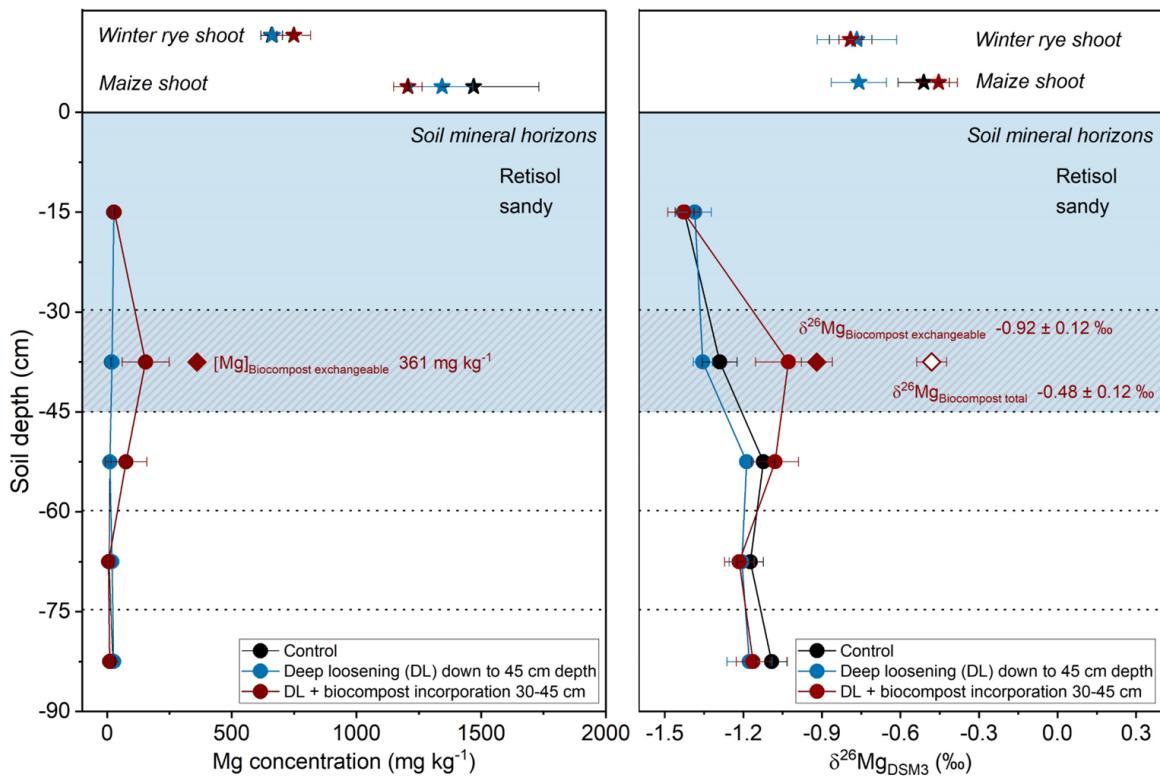


Abb. 3: Mg-Konzentration und Isotopenzusammensetzung von Winterroggen, Mais und der austauschbaren Mg-Fraktion der Bodenprofile in CF3 in den Parzellen der Kontrollgruppe (schwarz), der tiefen Lockerung (blau) und der tiefen Lockerung mit Einarbeitung von Biokompost (rot) sowie die des eingearbeiteten Komposts. Die gestrichelten Linien zeigen die Grenzen der beprobten Bodenschichten an. Der Kompost wurde in 30-45 cm Tiefe eingebracht.

Unsere Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine tiefgehende Lockerung unter Einarbeitung von Biokompost die Nährstoffverfügbarkeit im Boden verbessern kann. Die Aufnahme dieser zusätzlichen Nährstoffe im Unterboden durch Nutzpflanzen blieb jedoch begrenzt. Da die geringe Wasserhaltekapazität sandiger Böden die Nährstoffaufnahme hemmen kann, unterstreichen unsere Ergebnisse die Bedeutung der Bodenwasserretention für den zukünftigen Erfolg von Unterbodenbewirtschaftungsstrategien in solchen Böden. Die Daten stützen ebenfalls die Ergebnisse der anderen Projektpartner, dass das Pflanzenwachstum auf den Standorten in Brandenburg überwiegend wasserlimitiert ist. [MS131]

1.3. Evaluierung der Nachhaltigkeit (Produkt 3)

Unterprodukt 320: Nährstoffnutzungseffizienz (FZJ-I, FZJ-II)

Die Isotopenfraktionierungsfaktoren zu CF3 wurden aus den in MS 131 ermittelten Isotopenverhältnissen in Boden und Pflanzen bestimmt. Der Fraktionierungsfaktor Δ für $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ in CF3 ist 0,00 für Winterroggen und Mais in allen drei Varianten. Die Fraktionierungsfaktoren $\Delta^{56}\text{Fe}$ für Winterroggen liegen bei $0,40 \pm 0,04 \text{ ‰}$ für die Kontrolle, $0,42 \pm 0,25 \text{ ‰}$ für die Biokompostvariante (DLB) und bei $0,13 \pm 0,49 \text{ ‰}$ für die Lockerungsvariante (DL). Die Fraktionierungsfaktoren $\Delta^{26}\text{Mg}$ für Winterroggen sind $0,68 \pm 0,10 \text{ ‰}$ (Kontrolle), $0,80 \pm 0,35 \text{ ‰}$ (DL) und $0,64 \pm 0,04 \text{ ‰}$ (DLB). Für Mais liegen die $\Delta^{26}\text{Mg}$ -Werte bei $0,96 \pm 0,09 \text{ ‰}$ (Kontrolle), $0,80 \pm 0,07 \text{ ‰}$ (DL) und $0,97 \pm 0,10 \text{ ‰}$ (DLB). Alle

drei Isotopensysteme zeigten an, dass die Hauptaufnahme dieser Nährstoffe in den oberen 30 cm erfolgte. In Anlehnung an die von Uhlig et al. (2022) ermittelten Aufnahmefaktoren f_{uptake} , als Maß für die Nutzungseffizienz in Campus Klein-Altendorf, wurden folgende Nährstoffnutzungseffizienzfaktoren in Berlin-Thyrow, bezogen auf die ermittelte Hauptschicht der Nährstoffaufnahme 0-30 cm, für die Nährstoffe Fe und Mg ermittelt. Die Eisenaufnahme in Mais in den Varianten Kontrolle (C), Tiefenlockerung (DL) und Biokompost (DLB) zeigte keine signifikante Änderung zwischen den Varianten: $f_{\text{Fe/C}} = 0,06 \pm 0,01$, $f_{\text{Fe/DL}} = 0,05 \pm 0,00$ und $f_{\text{Fe/DLB}} = 0,05 \pm 0,02$. Im Falle von Roggen lagen die Faktoren um eine Größenordnung drunter und zeigten ebenfalls keine signifikanten Unterschiede: $f_{\text{Fe/C}} = 0,006 \pm 0,002$, $f_{\text{Fe/DL}} = 0,006 \pm 0,000$ und $f_{\text{Fe/DLB}} = 0,008 \pm 0,001$. Die Mg-Aufnahme in Roggen war ebenfalls unbeeinflusst von den Bearbeitungsmaßnahmen $f_{\text{Mg/C}} = 2,7 \pm 0,8$, $f_{\text{Mg/DL}} = 2,7 \pm 0,9$ und $f_{\text{Mg/DLB}} = 2,8 \pm 0,8$. Nur die Mg-Aufnahme von Mais zeigte einen Effekt in der Biokompost-Variante, in der der Faktor geringer ausfiel als in der Kontrolle und der reinen Tiefenlockerung: $f_{\text{Mg/C}} = 86 \pm 38$, $f_{\text{Mg/DL}} = 84 \pm 55$ und $f_{\text{Mg/DLB}} = 67 \pm 23$. [MS321]

Weiterhin wurden tiefenabhängige Sorptionsisothermen von Mg, P, Mn und Ca in den Varianten DL und DLB in CF3 bestimmt. Für Fe und Sr konnten nur vereinzelte Punkte der Isothermen bestimmt werden, da der lösliche Anteil in dem wässrigen Sorptionsmedium (0,2M KNO₃) meist zu gering war, um zuverlässig gemessen zu werden. [MS322]

Das neue Boden-Wurzel-Modells ermöglicht die Berechnung von Gesamtaufnahme und Tiefenprofilen der Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dynamischen 3D-Simulationen; Code und Setup sind vollständig implementiert. Erste Ergebnisse für Stickstoff (N) und Phosphor (P) wurden bereits generiert, wobei die Parametrisierung auf Basis der verfügbaren Daten erfolgt ist. Die vollständigen Daten für die Elemente Sr, Mg und Fe lagen erst zum Projektende vor, sodass die Modellierung dieser Elemente noch nicht vollständig parametrisiert werden konnte. Die Simulationen bestätigten jedoch, dass der überwiegende Teil der Wasseraufnahme in Thyrow CF3 in den oberen 30 cm des Bodens erfolgt – ein Befund, der auch durch die Isotopendaten für Sr, Mg und Fe gestützt wird. Nur unmittelbar am Meliorationsstreifen zeigten die Modelle eine deutliche Zunahme der Wasseraufnahme aus tieferen Bodenschichten. In der Praxis ließ sich allerdings keine verstärkte Aufnahme von Sr, Mg oder Fe aus größeren Tiefen nachweisen. Zwar wuchsen die Maispflanzen auf dem mit Kompost versehenen Meliorationsstreifen signifikant höher, sie wiesen jedoch geringere Mg-Konzentrationen auf als in der Lockerungsvariante und der Kontrolle. Dies deutet darauf hin, dass die verbesserte Wasserverfügbarkeit nicht – wie ursprünglich angenommen – zu einer erhöhten Nährstoffaufnahme zur Produktion der größeren Pflanzenmasse führt, sondern die Pflanzen vielmehr in die Lage versetzt, vorhandenes Magnesium effizienter zu nutzen.

Die Metaanalyse von Lopez et al. (2023) von 50 Feldstudien untersuchte, wie sich Stickstoff- (N), Phosphor- (P) und Kaliummangel (K) auf das Wurzelsystem von Nutzpflanzen auswirken. Die Ergebnisse zeigten, dass N-Mangel und P-Mangel im Allgemeinen die Wurzellänge und Biomasse reduzierten, jedoch die Wurzellänge pro Sprossbiomasse erhöhten, wobei die stärksten Auswirkungen bei P-Mangel auftraten, was die unterschiedlichen Reaktionen der Wurzelplastizität auf Nährstoffstress unter Feldbedingungen deutlich macht. [MS323]

1.4. Erfolgsvoraussage (Produkt 4)

Unterprodukt 410: Unterboden-Prozesse auf verschiedenen Skalen (FZJ-II)

Zur Verbesserung der Prozessbeschreibung der Wurzelwasseraufnahme in Metamodellen zur Ertragsrechnung wurden vereinfachte 1D-Senkenterme abgeleitet. Diese 1D-Terme ermöglichen eine rechnerisch effizientere Beschreibung der Wasseraufnahme, basierend auf der dreidimensionalen, hydraulischen Wurzelarchitektur. Die 1D-Senkenterme aus Vanderborght et al. (2021) wurden weiterentwickelt, um die bodenhydraulischen Eigenschaften der Rhizosphäre explizit zu berücksichtigen (Schnepf et al., 2023, Vanderborght et al., 2023). Die Einbeziehung des Rhizosphären-Modells ermöglicht eine genauere Abbildung von Trockenstress und resultierenden Wachstumslimitationen in Ertragsmodellen. Die entwickelten Funktionen erlauben es, die Wurzelwasseraufnahme aus dem Boden allein aus der Kenntnis der Bodenwasserpotentialen sowie der potenziellen Transpirationsrate zu berechnen, und Phänomene wie Kompensation, hydraulische Umverteilung und hydraulic lift zu beschreiben (Vanderborght et al. 2024).

Die bisherigen Ergebnisse zur Hochskalierung mechanistischer Wurzelwasseraufnahme-Modelle mittels 1D-Senkenterme wurden in Leitner et al. (2025) zusammenfassend evaluiert. Hierbei wurden sowohl die früheren Arbeiten zu numerischen Fehlern der zugrunde liegenden mechanistischen Modelle (Khare et al., 2022, Schnepf et al., 2023) als auch 1D-Senkenterme unterschiedlicher Komplexitätsstufen (Vanderborght et al., 2021, 2023) berücksichtigt. Die systematische Bewertung der Hochskalierungsansätze (Leitner et al., 2024) dient Anwendern als Entscheidungshilfe, um einen ausgewogenen Kompromiss zwischen Rechenaufwand und numerischer Genauigkeit für ihre spezifische Anwendung zu finden. In Vanderborght et al. (2024) wird der 1D-Senkenterm weiter vereinfacht und als Gleichung präsentiert, die speziell für Ertrags- oder Landoberflächenmodelle geeignet ist. Die Gleichung ähnelt in ihrer Form bekannten empirischen Senkentermen, unterscheidet sich jedoch dadurch, dass sie aus der hydraulischen Wurzelarchitektur und der perirhizalen Zone abgeleitet ist. Diese leicht einzubindende Gleichung wird der wissenschaftlichen Gemeinschaft über das Manuskript zur Verfügung gestellt und in einem gerade entstehenden Buch „CPlantBox with Python“ (Leitner et al., in prep.) über ein Code-Beispiel beschrieben. Wir betreiben aktiven Outreach, um den neuen 1D-Senkenterm zu verbreiten, unter anderem haben wir dazu Kontakt zu den Entwicklern von Bodium. Die Entwickler der Modelle SIMPLACE und AgroC haben bereits mit der Implementierung des 1D-Senkenterms begonnen. [MS 411]

Das virtuelle Boden-Wurzel-System wurde mit Gleichungen aus Morandage et al. (2021) erweitert, um basierend auf Messungen von Penetrationswiderstand, Lagerungsdichte und Bodenwassergehalt das Wurzelwachstum in Folge verschiedener Unterbodenmanagement-Maßnahmen simulieren zu können. Um hierbei auch Anpassungen der bodenhydraulischen Parameter berechnen zu können, die sich aus zeitlichen Änderungen der Lagerungsdichte ergeben (Bodensetzung), wurden die Gleichungen aus Assouline et al. (2006) im Modell implementiert. Zur Abbildung des Meliorationsstreifens wurde die im Modell bisher auf horizontale Bodenschichten begrenzte Handhabung variabler bodenhydraulischer Parameter um die Eingabe vertikaler Schichten erweitert. Da der Rechenaufwand bei der Verwendung mehrerer Sätze bodenhydraulischer Parameter (hier 12) stark ansteigt, wurde das Modell durch die parallele Verwendung mehrerer Nachschlagetabellen für das Wasserpotential in der Rhizosphäre

rechnerisch optimiert. Hierdurch werden Simulationen längerer Wachstumsperioden möglich. Darüber hinaus wurde das Modell um das simultane Wachstum mehrerer Wurzelsysteme sowie deren simultane Wasseraufnahme innerhalb einer gemeinsamen Bodendomäne erweitert. Damit kann die auf Einzelpflanzenebene nicht abbildbare Unterbodenheterogenität der Feldversuche im Modell durch eine periodische Bodendomäne, die mehrere in Interaktion stehende Pflanzen beinhaltet, berücksichtigt werden. Die Periodizität der Domäne erlaubt es hierbei, die kleinste repräsentative Einheit der Versuchsanlage bei Berücksichtigung der experimentellen Pflanzendichte abzubilden.

Für das so erweiterte virtuelle Boden-Wurzel-System wurde eine Modell-Vorlage für den sandigen Standort CF3 erstellt. Hierbei wurden für die Biokompost-Variante des Winterroggens die standortspezifischen Messdaten zu bodenhydraulischen Parametern, Klima, Lagerungsdichte, Penetrationswiderstand, Wurzelwachstum, und Bodenwassergehalt zur Parametrisierung und Kalibrierung des Modells genutzt. Das Ergebnis des simulierten Wurzelwachstums und der simulierten Wasseraufnahme des Pflanzenbestandes über eine Simulationsperiode von 60 Tagen ist in Abbildung 4 dargestellt.

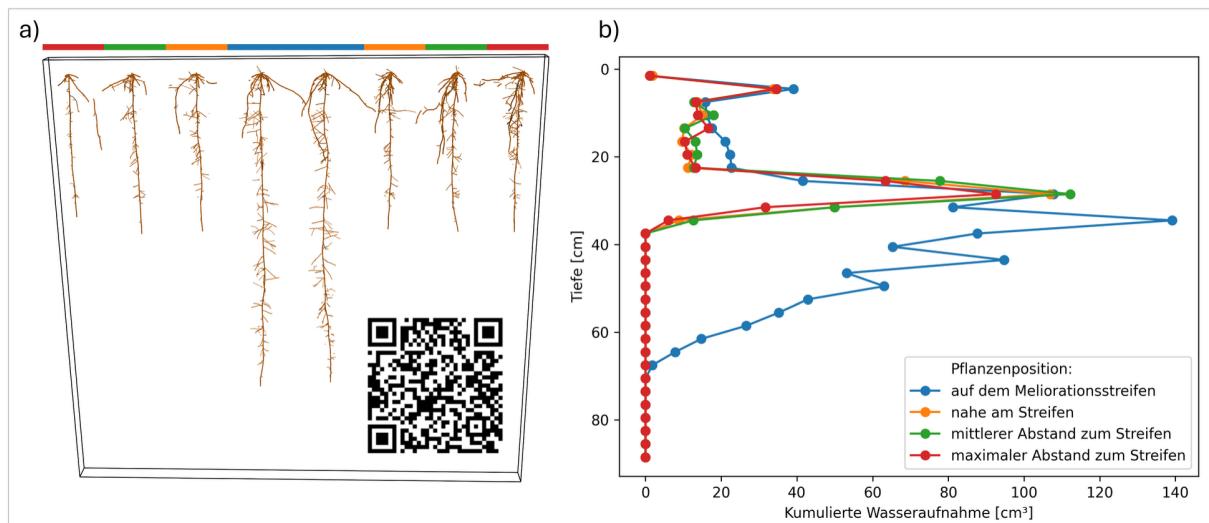


Abb. 4: Simuliertes Wurzelwachstum (a) und kumulierte Wasseraufnahme über Tiefe (b) des Winterroggens in einer periodischen Bodendomäne ($100 \times 4 \times 90$ cm) am Ende der Simulationsperiode von 60 Tagen auf dem sandigen Standort CF3. Gezeigt ist die Tiefenlockerung mit Biokompost. Die Farben kennzeichnen die Pflanzenposition relativ zum Meliorationsstreifen. Die Wasseraufnahme in b) ist jeweils für die zwei Wurzelsysteme pro relative Position zum Meliorationsstreifen zusammengefasst. Der QR-Code verlinkt zu einem Video, welches Wurzelwachstum und Bodenwasserpotenzial über die Simulationsperiode zeigt.

Es treten deutliche Unterschiede im Wurzelwachstum zwischen den Saatpositionen auf dem Meliorationsstreifen (blau) und daneben (orange, grün, rot) auf, während die seitlichen Saatpositionen untereinander nur geringfügig variieren (Abb. 4a). Das verstärkte Wurzelwachstum auf dem Streifen ist in der Simulation vor allem auf ein für die Wurzeln günstigeres Bodenprofil zurückzuführen: Durch die Tiefenlockerung wird ein wachstumshemmender Verdichtungshorizont aufgebrochen und der eingebrachte Kompost schafft ein lokales Reservoir mit erhöhter Wasserhaltekapazität. Beide Effekte senken den Penetrationswiderstand im Bodenprofil und ermöglichen ein tieferes und rascheres Vordringen der Wurzeln in den Unterboden. Das daraus resultierende verstärkte Tiefenwachstum führt zu deutlich erhöhter Wasserverfügbarkeit und -aufnahme aus tieferen Bodenschichten (siehe Abb. 4b).

Da der sandige Oberboden am Standort nur eine sehr geringe Wasserhaltekapazität besitzt und als Folge von Evapotranspiration selbst bei durchschnittlichen Niederschlägen rasch austrocknet, reduziert diese Anbindung an tiefere Wasservorräte den Trockenstress der Pflanzen auf dem Streifen. Als weiteren Faktor weist das Modell auf eine passive hydraulische Umverteilung von Wasser hin, bei der die Wurzeln nachts Wasser aus feuchteren, tieferen Bodenschichten in die wurzelnahen Bereiche des Oberbodens verlagern (hydraulic lift). Dadurch wird das Wurzelwachstum nicht nur im Unterboden, sondern auch in den oberen Bodenschichten (oberhalb der Komposteinbringung) stabilisiert. Die beschriebenen Effekte sind im verlinkten Video (Abb. 4, QR-Code) anschaulich dargestellt. [MS 412]

Unterprodukt 420: Langlebigkeit der Effekte des Unterboden-Managements (FZJ-II)

Zur Szenarioanalyse der Langlebigkeit der Effekte des Unterboden-Managements wurde die analytische Lösung der Fokker-Planck Gleichung nach Leij et al. (2002a, 2002b) implementiert. Die Gleichung beschreibt die Setzung eines durch Pflügen gelockerten und zunächst relativ homogenen Bodens ausgehend von einer gemessenen Anfangs-Porengrößenverteilung. Der Verdichtungsprozess wird dabei als eine Kombination aus (i) Verringerung der mittleren Porengröße, (ii) Verbreiterung der Porengrößenverteilung und (iii) Abnahme der Gesamtporosität abgebildet. Abbildung 5a zeigt dies exemplarisch anhand einer Szenarioanalyse für den Sandboden von CF3, wobei Stärke und relative zeitliche Länge der Bodensetzung variiert wurden.

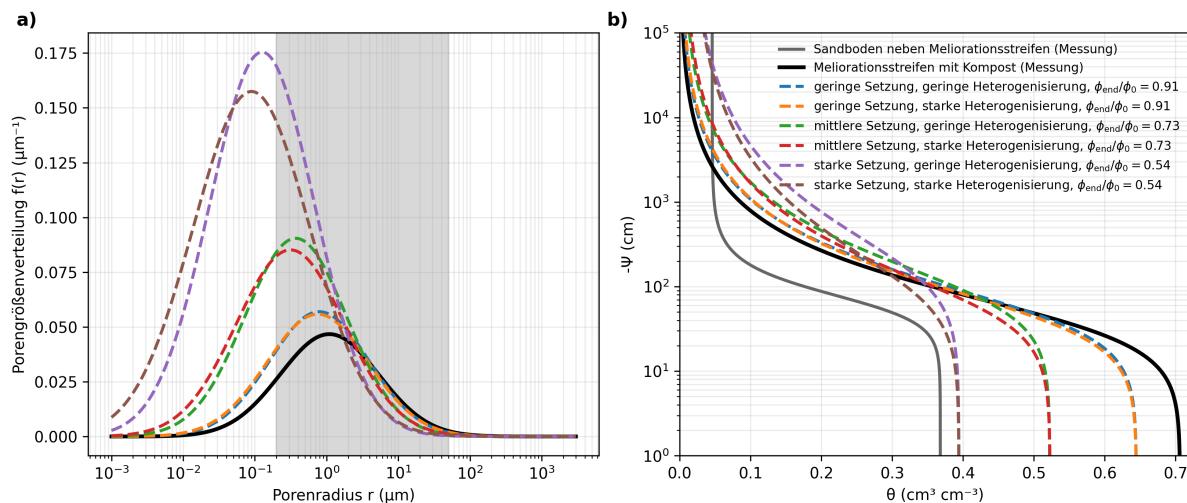


Abb. 5: Simulierte Entwicklung der Porenstruktur des Meliorationsstreifens (CF3) im Vergleich zum umliegenden Sandboden. (a) Porengrößenverteilungen der Ausgangsschicht (schwarz) und der sechs Setzungsszenarien (gestrichelt, simuliert). Der grau hinterlegte Bereich markiert den pflanzenverfügbaren Porenbereich ($0,2\text{--}50\text{ }\mu\text{m}$). (b) Aus denselben Szenarien abgeleitete Wasserretentionskurven mit Referenzkurven für den Meliorationsstreifen (schwarz) und den umliegenden Sandboden (grau). Die Stärke der Setzung in den Szenarien wird durch das Verhältnis zwischen angenommener Endporosität (ϕ_{end}) und initial gemessener Porosität (ϕ_0) beschrieben.

Da der tatsächliche Endzustand des Bodens noch nicht erreicht wurde, wurde angenommen, dass der Meliorationsstreifen im Maximalfall auf die gemessene hydraulische Porosität des umliegenden Sandbodens rückverfestigen kann. Die aus den Messdaten abgeleitete Ausgangs-Porengrößenverteilung des Meliorationsstreifens weist ein sehr hohes Porenvolumen im für die

Wasserverfügbarkeit relevanten Mittelporenbereich (0,2–50 µm) auf. Mit zunehmender Setzung verschiebt sich die Porenverteilung zu kleineren Porenradien und wird breiter: Grobporen gehen verloren, sehr feine Poren (Totwasser) nehmen zu. In den daraus abgeleiteten Wasserretentionskurven (Abb. 5b) zeigt sich dies als schrittweise Abnahme des Sättigungswassergehaltes bei Zunahme des Residualwassergehaltes. Alle simulierten Szenarien liegen jedoch - selbst bei maximaler angenommener Rückverfestigung der Porosität auf das Niveau des umliegenden Sandes - oberhalb der Wasserhaltefähigkeit des unbearbeiteten Sandbodens. Die Szenarioanalyse legt somit nahe, dass die Kompost-Einmischung selbst im Szenario mit der stärksten Rückverfestigung noch eine deutliche Verbesserung der Wasserspeicherkapazität gegenüber dem unbehandelten Sandboden bewirkt. Diese Hypothese wurde darüber hinaus durch die Einbindung der bodenhydraulischen Parameter der Szenarioanalyse in die unter MS 412 vorgestellte Modell-Vorlage untersucht. Die Simulationen mit dem Boden-Wurzel-Modell weisen hier ebenfalls darauf hin, dass die bodenhydraulischen Eigenschaften selbst nach einer Rückverfestigung noch in besseren Wachstumsbedingungen für die Wurzeln resultieren sollten, da die erhöhte Wasserspeicherkapazität weiterhin zu einer Erniedrigung des Penetrationswiderstandes führt.

Da innerhalb des Projektes keine zeitlich aufgelösten Messkampagnen zur Entwicklung der Porengrößenverteilung bzw. der Wasserhaltekurven durchgeführt wurden, und solche Daten auch in der Literatur rar sind, wurde die verfügbare Einzelmessung von CF3 genutzt, um mit der Lösung nach Leij et al. (2002a, 2002b) eine physikalisch begründete Szenarioanalyse für die zukünftige Entwicklung des Bodens zu erstellen. Zusätzlich wurde eine an Chandrasekhar et al. (2019) angelehnte inverse Parametrisierung implementiert, die die Verifizierung und datenbasierte Bestimmung der Modellparameter, insbesondere des Drift Terms, anhand einer zeitlich aufgelösten Messreihe derselben Bodenschicht ermöglicht und im virtuellen Boden-Wurzel-Modell für künftige, dichter beprobte Untersuchungen zur Verfügung steht. [MS 421]

1.5. Kommunikation (Produkt 5)

Unterprodukt 530: Kommunikation mit der wissenschaftlichen Community (FZJ-I, FZJ-II)

Zwei gemeinsame Synthesepublikationen zu nachhaltiger Unterbodenbewirtschaftung (Bauke et al. 2022) und zu den Auswirkungen verschiedener Bewirtschaftungsmaßnahmen auf den organischen Kohlenstoffbestand in Langzeitfeldversuchen (Gocke et al. 2023) wurden erfolgreich veröffentlicht. Darüber hinaus hat FZJ-II sich an der Publikation von Vogel et al. (2024) beteiligt, in der die Darstellung von biologischen Prozessen in Bodenmodellen diskutiert wird. FZJ-I und -II haben Beiträge zur EGU-session BG 3.13 im April 2024 beigetragen. [MS 532]

1.6. Lehrmaterial (Produkt 6)

Unterprodukt 630: Schulen (FZJ-I, FZJ-II)

In Zusammenarbeit mit dem Jülich Super Computing Center (JSC) wurde eine Blender-Vorlage zur Erstellung von Videos angefertigt. Ein Video, welches den Einfluss von Bodenverdichtung auf die Wurzelsystementwicklung und Wasseraufnahme von Pflanzen darstellt, wurde erstellt. Zusätzlich wurden die Arbeitsschritte des Soil³-Verfahrens anschaulich animiert. Am 30.6.2023 wurden Techniken, Erkenntnisse und obiges Video aus dem Soil³-Projekt im Rahmen des Berufspraktikums des Schülerlabors JuLab vorgestellt (Jahrgangsstufen 9-11/Q1). Zudem wurde ein Factsheet zu

Wurzelwachstum und Nährstoffaufnahme erstellt. Das Video zum Wurzelwachstum wird auf dem Factsheet verlinkt. Das von der Uni Kassel entwickelte Schülerexperiment zur "Nährstoff- und Wasserversorgung der Pflanzen, Nutzung von Bioporen" wird ins Experimente-Portfolio des FZJ-Schülerlabors JuLab eingebunden (Sek. 1, 5. – 6. Klasse). [MS 632]

Das Video zum Wurzelwachstum wurde fertig gestellt, über Sciebo verfügbar gemacht, und mittels QR-Codes auf dem Factsheet verlinkt. [MS 633]

Unterprodukt 640: Wissenschaft (FZJ-I, FZJ-II)

Der erfolgreiche Einsatz von radiogenen Sr-Isotopenverhältnissen zur Feststellung von Änderungen in der Aufnahmetiefe von Nährstoffen wurde am 20.04.2023 zur Publikation akzeptiert und ist seit dem 08.05.2023 online im open access verfügbar (Uhlig et al., 2023). [MS 641]

Es wurde ein Video erstellt, welches die Durchführung der Soil³-Maßnahme in Kombination mit dem resultierenden Wurzelwachstum (MS633) darstellt. Das Video wurde prominent auf der Landing Page von www.soil3.de platziert, wurde auf Konferenzen wie dem BonaRes Closing Event 2024 und der EGU 2024 präsentiert, und ist per QR-Code abrufbar (Abb. 6). Das Video wird zusammen mit den Outreach-Materialien in Zukunft unter folgender Adresse verfügbar sein: <https://www.bonares.de/service-portal/projects/sustainable-subsoil-management> [MS 643]



Abb. 6: Ausschnitte des kombinierten Outreach-Videos und QR-Code zum Video auf Sciebo. Das Video kann auch auf der Landing Page von Soil³ durch Anklicken des Bilds (links) abgespielt werden.

Literaturverzeichnis zu Punkt II.1

- Assouline, S. (2006): Modeling the Relationship between Soil Bulk Density and the Water Retention Curve. *Vadose Zone Journal* 5:554–563, doi:10.2136/vzj2005.0083.
- Bauke, S.L., Amelung, W., Bol, R., Brandt, L., Brueggemann, N., Kandeler, E., Meyer, N., Or, D., Schnepf, A., Schloter, M., Schulz, S., Siebers, N., von Sperber, C., Vereecken, H. (2022): Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 185: 773–792. doi: 10.1002/jpln.202200357.
- Chandrasekhar, P., Kreiselmeier, J., Schwen, A., Weniger, T., Julich, S., Feger, K.-H., Schwärzel, K. (2019): Modeling the evolution of soil structural pore space in agricultural soils following tillage. *Geoderma*, 353: 401-414. (doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.07.017)
- Gocke, M. I., Guigue, J., Bauke, S.L., Barkusky, D., Baumecker, M., Berns, A.E., Hobley, E., Honermeier, B., Kögel-Knabner, I., Koszinski, S., Sandhage-Hofmann, A., Schmidhalter, U., Schneider, F., Schweitzer, K., Seidel, S., Siebert, S., Skadell, L.E., Sommer, M., von Tucher, S., Don, A., Amelung, W. (2023): Interactive effects of

- agricultural management on soil organic carbon accrual: a synthesis of long-term field experiments in Germany. *Geoderma* 438, 116616. (doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116616)
- Guelke, M., von Blanckenburg, F. (2007): Fractionation of stable iron isotopes in higher plants. *Environ. Sci. Technol.* 41, 1896-1901. doi:10.1021/es062288j
- Khare, D., Selzner, T., Leitner, D., Vanderborght, J., Vereecken, H., Schnepf, A. (2022): Root System Scale Models Significantly Overestimate Root Water Uptake at Drying Soil Conditions. *Frontiers in Plant Science* 13, 798741. doi: 10.3389/fpls.2022.798741
- Leij, F. J., Ghezzehei, T. A. and Or, D. (2002), Analytical Models for Soil Pore-Size Distribution After Tillage. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 66: 1104-1114. (doi.org/10.2136/sssaj2002.1104)
- Leij, F. J., Ghezzehei, T. A., Or, D. (2002): Modeling the dynamics of the soil pore-size distribution. *Soil & Tillage Research*, 64: 61-78. (doi.org/10.1016/S0167-1987(01)00257-4)
- Leitner, D., Schnepf, A., and Vanderborght, J. (2025): From hydraulic root architecture models to efficient macroscopic sink terms including perirhizal resistance: Quantifying accuracy and computational speed, *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, 29, 1759–1782. doi: 10.5194/hess-29-1759-2025
- Morandage, S., Vanderborght, J., Zörner, M., Cai, G., Leitner, D., Vereecken, H., Schnepf, A. (2021): Root architecture development in stony soil. *Vadose Zone J.* 2021;e20133, <https://doi.org/10.1002/vzj2.20133>.
- Schnepf, A., Black, C.K., Couvreur, V., Delory, B.M., Doussan, C., Heymans, A., Javaux, M., Khare, D., Koch, A., Koch, T., Kuppe, C.W., Landl, M., Leitner, D., Lobet, G., Meunier, F., Postma, J.A., Schäfer, E.D., 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.
- Uhlig, D., Berns, A. E., Wu, B., Amelung, W. (2023): Mean nutrient uptake depths of cereal crops change with compost incorporation into subsoil – evidence from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios. *Plant Soil* 489:613–628. doi: 10.1007/s11104-023-06047-x
- 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
- Vanderborght J., Leitner D., Schnepf, A. Couvreur V., Vereecken, H., Javaux, M. (2023): Combining root and soil hydraulics in macroscopic representations of root water uptake. *Vadose Zone J.* 2023;e20273, <https://doi.org/10.1002/vzj2.20273>.
- Vanderborght, J., Couvreur V., Meunier F., Schnepf A., Vereecken, H., Bouda M., Javaux, M. (2021): From hydraulic root architecture models to macroscopic representations of root hydraulics in soil water flow and land surface models. *HESS* 25, 4835–4860, <https://doi.org/10.5194/hess-2021-14>.
- Vogel, H.J., Amelung, W., Baum, C. et al. How to adequately represent biological processes in modeling multifunctionality of arable soils. *Biol Fertil Soils* 60, 263–306 (2024). <https://doi.org/10.1007/s00374-024-01802-3>

2. Zahlenmäßiger Nachweis

Eine gesonderte Erfassung und die Berichterstattung aller Projektausgaben sind durch die Finanzverwaltung der Forschungszentrum Jülich GmbH erfolgt. Die beantragten Mittel haben sich auf die Positionen Personalkosten inkl. 30% overhead (96,6 %), Verbrauch (1,6 %), Invest (0,8 %) und Reisemittel (1,0 %) verteilt.

3. Notwendigkeit und Angemessenheit der geleisteten Arbeit

Alle durchgeführten Forschungsarbeiten waren aufgrund der anspruchsvollen Aufgabenstellung des Teilprojekts, der damit verbundenen umfangreichen analytischen Erfordernisse, sowie der organisatorischen und logistischen Herausforderungen bei den Probenahmen in Berlin-Thyrow notwendig und angemessen.

4. Voraussichtlicher Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse

Mit dem Unterbodenmanagement wird eine bisher nicht wirtschaftlich genutzte Ressource für eine effiziente Nutzung durch landwirtschaftliche Kulturpflanzen zugänglich gemacht. In Phase I wurden die Arbeiten zunächst für den projektinternen Nutzen optimiert während in Phase II auch spätere Anwender und Nutzer berücksichtigt wurden. Das Konsortium entwickelt dabei einzigartige Indikatorssysteme für die Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden, um landwirtschaftliche Maßnahmen zu steuern und deren Erfolg zu bewerten. Die wissenschaftliche Weiterentwicklung des Projektes wurde in Phase III im Sinne einer umfassenden, systembasierten Bewertung von Agrarlandschaften fortgeführt.

Eine wissenschaftliche Herausforderung für die Modellierung in diesem Projekt ist der Skalenübergang von der Prozess-Skala auf der Einzelwurzel- und Pflanzenebene zur Management-Skala. Im Rahmen von Soil³ wurden das Hochskalieren und die Parametrisierung größerskaliger Modelle auf Basis von detaillierten kleinskaligen Simulationen mit verschiedenen Methoden umgesetzt. Die erste Methode ist eine brute-force Methode, bei der eine Feldsimulation dadurch realisiert wird, dass eine entsprechend große Bodendomäne mit multiplen Pflanzenmodelle direkt simuliert wird (siehe Masterarbeit Eloundou 2021¹ und Selzner et al., in prep). Bei der zweiten Methode wird eine einzelne, repräsentative, Pflanze in einer Bodendomäne simuliert, deren Länge und Breite dem Reihen- respektive Pflanzenabstand entsprechen. Weiterhin werden dann an den Seiten periodische Randbedingungen angelegt und so eine Pflanze innerhalb des Bestandes simuliert (Leitner et al. 2025). Die dritte Methode ist eine Koppelung des Wurzelarchitekturmoduls mit einem Ertragsmodell unter Aggregation der 3-dimensionalen Wurzelarchitektur zu einem 1-dimensionalen Tiefenprofil der Wurzellängendichte (Seidel et al. 2022). Diese Hochskalierungsmethode lässt sich für jedes Modell, welches ein 1-dimensionales Bodenmodul besitzt, anwenden, um entsprechende 1-dimensionale Senkenterme für die Wurzelwasseraufnahme zu berechnen, die immer noch die Information über die 3-dimensionale hydraulische Wurzelarchitektur beinhalten (Vanderborgh et al. 2021², 2024).

Mit der Multikollektor-Isotopentechnik zum Tracing anorganischer Nährstoffelemente erhalten wir ein einzigartiges Werkzeug, das sowohl national als auch international grundlagen- und anwendungsorientierte Forschung unterstützt und darüber hinaus eine solide Plattform für Anschlussprojekte über Soil³ hinaus bietet. Das IBG-3 wird das MC-ICP-MS-System sowie die zugehörige periphere nasschemische Aufbereitung langfristig weiterentwickeln und als zentralen Forschungsschwerpunkt etablieren. Ziel ist, das Spektrum der untersuchten Isotopensysteme durch die Einrichtung zusätzlicher Forschungseinheiten (z. B. BMBF- oder Helmholtz-Nachwuchsgruppen, DFG-Forschergruppen) zu erweitern.

Der Gesamterfolg des Projekts Soil³ wird allen beteiligten Partnern positive wissenschaftliche Perspektiven eröffnen. Durch Publikationen sowie Beiträge auf internationalen Konferenzen und Workshops wird die Sichtbarkeit der Institutionen gesteigert und deren Fachkompetenz gestärkt.

Alle Ergebnisse stehen der wissenschaftlichen Gemeinschaft zeitnah zur Verfügung als peer-reviewte Fachartikel (bereits während und nach der Projektlaufzeit), Projektberichte und Konferenz-Paper sowie freie Quellcodes der Boden-Wurzel-Modelle. Der gegenseitige Transfer von Fachwissen und Praxiserfahrungen zwischen den Partnern vertieft die wissenschaftlichen Kenntnisse beider Seiten und bildet die Basis für zukünftige Projekte und Forschungsarbeiten. Die gewonnenen Erkenntnisse werden zudem dazu beitragen, relevante Politikprozesse zu informieren, etwa die Weiterentwicklung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms (ProgRess), die regelmäßige Evaluation der Nationalen Nachhaltigkeitsstrategie und mögliche Vorhaben zur Ausarbeitung einer Bodenschutzgesetzgebung im Rahmen der europäischen Bioökonomiestrategie.

¹ Eloundou, F. (2021): Parameterization of Root-Soil Interaction Models using Experimental Data. Masterarbeit an der Brandenburgischen Technischen Universität Cottbus-Senftenberg, Fakultät für Umwelt und Naturwissenschaften.

² Vanderborgh, J., Couvreur V., Meunier F., Schnept A., Vereecken, H., Bouda M., Javaux, M. (2021): From hydraulic root architecture models to macroscopic representations of root hydraulics in soil water flow and land surface models. HESS 25, 4835–4860.

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

Die Entwicklung internationaler Forschungsvorhaben mit ähnlichen Forschungsinhalten wurde seitens der Koordination regelmäßig geprüft; zusätzlich haben wir in den für unser spezifisches Teilprojekt relevanten Themen die internationale Literatur verfolgt.

Zum Zeitpunkt der Berichtsschreibung gibt es eine widersprüchliche Gesetzeslage ob organische Materialien wie Kompost in den Unterboden eingebracht werden dürfen. (siehe dazu die Stellungnahme im Bericht des Koordinators, UB-BK)

6. Erfolgte oder geplante Veröffentlichungen der Ergebnisse

6.1. Veröffentlichungen

Begutachtete Soil³-Veröffentlichungen

- **Khare, D., Selzner, T., Leitner, D., Vanderborght, J., Vereecken, H., Schnepf, A.** (2022): Root System Scale Models Significantly Overestimate Root Water Uptake at Drying Soil Conditions. *Frontiers in Plant Science* 13, 798741. doi: 10.3389/fpls.2022.798741
- **Bauke, S.L., Amelung, W., Bol, R., Brandt, L., Brueggemann, N., Kandeler, E., Meyer, N., Or, D., Schnepf, A., Schloter, M., Schulz, S., Siebers, N., von Sperber, C., Vereecken, H.** (2022): Soil water status shapes nutrient cycling in agroecosystems from micrometer to landscape scales. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 185: 773-792. doi: 10.1002/jpln.202200357.
- **Seidel, S. J., Gaiser, T., Srivastava, A. K., Leitner, D., Schmittmann, O., Athmann, M., Kautz, T., Guigue, J., Ewert, F., Schnepf, A.** (2022): Simulating Root Growth as a Function of Soil Strength and Yield with a Field-Scale Crop Model Coupled with a 3D Architectural Root Model. *Frontiers in Plant Science* 13, 865188. doi: 10.3389/fpls.2022.865188
- **Uhlig D., Wu, B., Berns, A. E., Amelung, W.** (2022): Magnesium stable isotopes as a potential geochemical tool in agronomy - constraints and opportunities. *Chemical Geology* 611, 121114. doi: 10.1016/j.chemgeo.2022.121114
- **Uhlig, D.** (2022): Geochemical and isotope data on magnesium stable isotopes as a potential geochemical tool in agronomy - constraints and opportunities. GFZ Data Services. doi: 10.5880/fidgeo.2022.003
- **Uhlig, D., Berns, A. E., Wu, B., Amelung, W.** (2023): Mean nutrient uptake depths of cereal crops change with compost incorporation into subsoil – evidence from ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr ratios. *Plant Soil* 489:613–628. doi: 10.1007/s11104-023-06047-x
- **Gocke, M. I., Guigue, J., Bauke, S.L., Barkusky, D., Baumecker, M., Berns, A.E., Hobley, E., Honermeier, B., Kögel-Knabner, I., Koszinski, S., Sandhage-Hofmann, A., Schmidhalter, U., Schneider, F., Schweitzer, K., Seidel, S., Siebert, S., Skadell, L.E., Sommer, M., von Tucher, S., Don, A., Amelung, W.** (2023): Interactive effects of agricultural management on soil organic carbon accrual: a synthesis of long-term field experiments in Germany. *Geoderma* 438, 116616. doi: 10.1016/j.geoderma.2023.116616
- Lopez, G., Ahmadi, S.H., Amelung, W., Athmann, M., Ewert, F., Gaiser, T., Gocke, M.I., Kautz, T., Postma, J., Rachmilevitch, S., Schaaf, G., Schnepf, A., Stoschus, A., Watt, M., Yu, P., Seidel, S.J. (2023): Nutrient deficiency effects on root architecture and root-to-shoot ratio in arable crops. *Frontiers in Plant Science* 13. doi: 10.3389/fpls.2022.1067498.
- **Schnepf, A., Black, C.K., Couvreur, V., Delory, B.M., Doussan, C., Heymans, A., Javaux, M., Khare, D., Koch, A., Koch, T., Kuppe, C.W., Landl, M., Leitner, D., Lobet, G., Meunier, F., Postma, J.A., Schäfer, E.D., 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.
- **Selzner, T., Horn, J., Landl, M., Pohlmeier, A., Helmrich, D., Huber, K., Vanderborght, J., Vereecken, H., Behnke, S., Schnepf, A.** (2023): 3D U-Net Segmentation Improves Root System

Reconstruction from 3D MRI Images in Automated and Manual Virtual Reality WorkFlows. Plant Phenomics 5. doi: 10.34133/plantphenomics.0076.

- **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
- **Bauke, S. L., Seidel, S. J., Athmann, M., Berns, A. E., Gocke, M. I., Guigue, J., Kautz, T., Kögel-Knabner, I., Ohan, J., Rillig, M., Schloter, M., Schmittmann, O., Schulz, S., Uhlig, D., Schnepf, A., Amelung, W.**: (2024): Short-term effects of subsoil management by strip-wise loosening and incorporation of organic material. Soil & Tillage Research 236: 105936. doi: 10.1016/j.still.2023.105936
- Baker, D.N., **Selzner, T.**, Göbbert, J.H., Scharr, H., Riedel, M., Hvannberg, E.P., **Schnepf, A.**, Zielasko, D. (2025): VRoot: A VR-Based application for manual root system architecture reconstruction. Plant Phenomics 7. doi: 10.1016/j.plaphe.2025.100013.
- Leitner, D., **Schnepf, A.**, and **Vanderborght, J.** (2025): From hydraulic root architecture models to efficient macroscopic sink terms including perirhizal resistance: Quantifying accuracy and computational speed, Hydrol. Earth Syst. Sci., 29, 1759–1782. doi: 10.5194/hess-29-1759-2025
- **Kaufmann, M.S., Klotzsche, A., van der Kruk, J., Langen, A., Vereecken, H., Weihermüller, L.** (2025): Assessing soil fertilization effects using time-lapse electromagnetic induction. Soil 11:267-285. doi: 10.5194/soil-11-267-2025.

Soil³-Veröffentlichungen ohne peer review

- **Gerdes, H.**, Kiresiewa, Z., Schneider, C., Dengler, F., **Ittner, S.**, in Zusammenarbeit mit dem **Soil³-Konsortium** (2024): Empfehlungen für die Umsetzung eines nachhaltigen und gesellschaftlich akzeptierten Unterbodenmanagements in Deutschland, Ecologic Institut Berlin. https://www.soil3.de/de/bilder-und-videos/soil3_politikpapier.pdf
- **Gocke, M.I., Bauke, S.L., Athmann, M., Baumecker, M., Berns, A.E., Don, A., Gaiser, T., Gerdes, H., Guigue, J., Jahanbakhshi, F., Kautz, T., Klein, D.P. Kögel-Knabner, I., Rillig, M., Schloter, M., Schmittmann, O., Schnepf, A., Schweitzer, K., Seidel, S., Selzner, T., Skadell, L., Sommer, M., Srivastava, A., Amelung, W.** (2025): Unterbodenmanagement - Grundlagen, Entscheidungshilfen und sozio-ökonomische Aspekte. Zenodo. doi: 10.5281/zenodo.17037064
- **Selzner, T., Schnepf, A., Berns, A.E.**, Habbinga, S. (2025): Wurzelwachstum und Nährstoffaufnahme. BONARES FACT SHEET #5.3, Forschungszentrum Jülich GmbH. <https://www.bonares.de/uploads/attachments/cm70j2kch0fbx0jo59n2hmi0n-factsheetssoil3-fin-v1.pdf>

Thematisch verwandte Veröffentlichungen von Soil³-Personal mit externen Partnern

- **Schnepf, A.**, Carminati, A., Ahmed, M. A., Ani, M., ..., **Vanderborght, J.**, Vetterlein, D. (2022): Linking rhizosphere processes across scales: Opinion. Plant and Soil 478:5–42. doi: 10.1007/s11104-022-05306-7
- **Selzner, T.**, Habbinga, S. et al. (2023), video contribution (3D animation of root growth in compacted and non-compacted soil to illustrate the role of the root system in the plant's access to soil resources such as water and nutrients) to the Apple ebook "Soil Quality: 10 Plant Nutrition" by C. Scanlan, D. Weaver, R. Bell, R. Borrett and M. Cheng, published by SoilsWest (<https://soilswest.org.au/new-ebook-embaces-latest-science-for-nutrition-management/>, <https://books.apple.com/au/book/soil-quality-10-plant-nutrition/id6469590736>). (video link: <https://fz-juelich.sciebo.de/s/kny7srYsaC5CmMN>)
- Vogel, H.J., **Amelung, W.**, ..., **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 60: 263-306. doi: 10.1007/s00374-024-01802-3.

- Yu, P., ..., **Schnepf, A.**, ..., Hochholdinger, F. (2024): Seedling root system adaptation to water availability during maize domestication and global expansion. *Nature Genetics* 56. doi: 10.1038/s41588-024-01761-3.
- **Selzner, T.**, Baker, D., Landl, M., Leitner, D., Lobet, G., **Schnepf, A.** (2025): Coupling of MRI and Modelling. In: A Pohlmeier, S Staph, S Haber-Pohlmeier (eds) *NMR in Plants and Soils: New Developments in Time-domain NMR and Imaging*. Royal Society of Chemistry. doi: 10.1039/9781837673452.
- Wacker, T.S., van der Bom, F., Delory, B.M., Vetterlein, D., Postma, J.A., Nagel, K.A., **Schnepf, A.**, Dresboll, D.B. (2025): Back to the roots: standardizing root length density terminology. *Plant and Soil* 511: 91-98. doi: 10.1007/s11104-024-07075-x.
- Giraud, M., Sircan, A.K., Streck, T., Leitner, D., Lobet, G., Pagel, H., **Schnepf, A.** (2025): In silico analysis of carbon stabilisation by plant and soil microbes for different weather scenarios. *EGUphere* 2025: 1-76. doi: 10.5194/egusphere-2025-572.

Eingereichte Veröffentlichungen:

- Liu, M., **Wu, B.**, **Berns, A.E.**, **Schweitzer, K.**, **Amelung, W.**: Subsoil amelioration improves root growth but not nutrient uptake from dry sandy subsoil. Submitted to *Geoderma*.

Veröffentlichungen in Vorbereitung:

- Leitner, D., Giraud, M., Hack, J., Heck, A., Javaux, M., Kopp, E., Landl, M., Lobet, G., Pagel, H., Santos Vianna M., **Selzner, T.**, **Schnepf, A.**: CPlantBox with Python, *in-silico* Plants.
- **Berns, A. E.**, **Wu, B.**, **Amelung, W.**: Subsoil amelioration does not alter Fe uptake from dry sandy subsoil.
- **Wu, B.**, Liu, M., **Berns, A. E.**, **Amelung, W.**: Subsoil management on dry sandy soil improved Mg uptake efficiency by maize.

6.2. Konferenzbeiträge / Workshopbeiträge

Chair

- **Schnepf, A.**: Topic 5.1: Model-based prediction of the dynamic of soil functions – model approaches and tools. BonaRes Conference “Soil as a Sustainable Resource”, Berlin, 15.-17. Mai 2023.

Vorträge

- **Uhlig, D.**, **Berns, A. E.**, **Wu, B.**, **Amelung, W.**: Mean nutrient uptake depths of cereal crops change with compost incorporation into subsoil – evidence from $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios and potential for Mg stable isotopes. BonaRes Conference “Soil as a Sustainable Resource”, Berlin, 15.-17. Mai 2023.
- **Berns, A. E.**, **Selzner, T.**, Helmrich, D. **Schnepf, A.**: Nachhaltiges Unterbodenmanagement in der Landwirtschaft. Berufsfundungspraktikum des JuLab, Jülich, 30. Juni 2023.
- **Selzner, T.**, **Gaiser, T.**, **Srivastava, A.**, **Schmittmann, O.**, **Athmann, M.**, **Kautz, T.**, **Gerdes, H.**, **Schneider, F.**, **Don, A.**, **Schnepf, A.**, **Seidel, S.**: Eine web-basierte Plattform zur Information von Entscheidungsträgern über die Wirkungen von Unterbodenbewirtschaftungsmaßnahmen. Bonares Konferenz 2024 „Böden als Grundlage einer nachhaltigen Landwirtschaft“, Leipzig, 28.-29. Mai 2024.

Poster

- **Selzner, T.**, Habbinga, S., **Schnepf, A.**: Embedding of root-soil-interaction simulations into virtual environments to create engaging outreach materials. BonaRes Conference “Soil as a Sustainable Resource”, Berlin, 15.-17. Mai 2023.

- **Berns, A. E., Uhlig, D., Wu, B., Amelung, W.**: Non-traditional stable isotopes in agricultural systems. Bonares Konferenz 2024 „Böden als Grundlage einer nachhaltigen Landwirtschaft“, Leipzig, 28.-29. Mai 2024.
- **Berns, A. E., Uhlig, D., Wu, B., Schweitzer, K., Bauke, S. L., Kuhn, A. J., Bol, R., Amelung, W.**: Exploring non-traditional metal(loid) stable isotope tools for agricultural systems, EGU General Assembly 2024, Wien, 14.–19. April 2024, EGU24-20148. (doi:10.5194/egusphere-egu24-20148).
- **Selzner, T., Berns, A. E., Leitner, D., Schnepf, A.**: Model-based evaluation of the impact and longevity of a novel sustainable subsoil melioration method (Soil³ method) on root growth, EGU General Assembly 2024, Wien, 14.–19. April 2024, EGU24-8136. (doi:10.5194/egusphere-egu24-8136)

6.3. Master- und Bachelorarbeiten

(keine)

6.4. Doktorarbeiten

- Liu, M., “Alterations of the nutrient uptake depth as inferred from radiogenic strontium isotopes in two case studies: a forest ecosystem and an agricultural field.”, Universität Bonn (Prof. Amelung), eingereicht am 30.10.2025.
- **Kaufmann, M.**, “Electromagnetic Induction and Ground-Penetrating Radar for Soil Monitoring”, RWTH Aachen (Prof. Jan van der Kruk), eingereicht am 15.10.2025.