



Ressource Boden

**Forschung und nachhaltige Nutzung
für die Bioökonomie**



**Bundesministerium
für Bildung
und Forschung**

Vorwort

Böden zählen zu unseren wichtigsten Lebensgrundlagen und erfüllen für Mensch und Umwelt vielfältige Funktionen: Sie sind die zentrale Ressource für die landwirtschaftliche Produktion. Als Kohlenstoffspeicher sind Böden unverzichtbar für den Klimaschutz. Sie filtern und speichern Wasser und sind ein Hotspot der Biodiversität.

Böden sind jedoch auch eine stark beanspruchte und nur in langen Zeiträumen erneuerbare Ressource. Der Erhalt und der Schutz dieses komplexen Ökosystems ist daher zu einem elementaren Baustein internationaler Nachhaltigkeitsstrategien geworden. Gesunde Böden tragen etwa zum Erreichen der UN-Nachhaltigkeitsziele bei und sind wichtiges Fundament für ein nachhaltiges, kreislauforientiertes Wirtschaften im Sinne des European Green Deal.

Bewirtschaftete Böden und die auf ihnen wachsenden Pflanzen stehen am Anfang der Wertschöpfungsketten der Bioökonomie. Dieses Konzept nutzt biologische Ressourcen und das Wissen darüber, um mithilfe innovativer Technologien Produkte und Prozesse zu entwickeln. Deutschland ist international Vorreiter in Sachen Bioökonomie. Seit 2010 fördert die Bundesregierung den Wandel hin zum biobasierten nachhaltigen Wirtschaften. Die 2020 veröffentlichte „Nationale Bioökonomiestrategie“ setzt den Rahmen für eine nachhaltige Erschließung und Nutzung biologischer Ressourcen sowie für umweltschonende und naturverträgliche Produktionsverfahren in allen Wirtschaftsbereichen.

Ein Schlüssel für die nachhaltige Nutzung der Böden liegt in den Erkenntnissen aus der anwendungsorientierten Forschung. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat auf den Boden frühzeitig einen

Fokus seiner Forschungs- und Innovationsförderung gelegt: Mit der Initiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“ ging 2015 ein europaweit einzigartiger Förderschwerpunkt für angewandte Bodenforschung an den Start. Zehn interdisziplinäre Forschungsverbünde und das koordinierende BonaRes-Zentrum widmeten sich neun Jahre lang der Frage, wie auf landwirtschaftlich genutzten Böden langfristig und nachhaltig hohe Erträge erzielt werden können, ohne die anderen Bodenfunktionen zu beeinträchtigen.

Mit einem systemischen Ansatz und einer langfristigen Forschungsperspektive hat BonaRes international neue Maßstäbe in der Bodenforschung gesetzt. Mit „Rhizo4Bio“ ging zudem im Jahr 2020 eine Fördermaßnahme an den Start, in der sechs Projektverbünde die Bedeutung der Wurzel-Boden-Kontaktzone – der sogenannten Rhizosphäre – untersuchen und ihr Potenzial für eine nachhaltige Landwirtschaft erschließen wollen.

Diese Broschüre stellt die beiden Fördermaßnahmen, die mit insgesamt 128 Millionen Euro durch das BMBF gefördert werden, genauer vor. Sie porträtiert die Forschungsverbünde in ihrer Vielfalt der Ansätze und stellt die zentralen Ergebnisse kompakt und verständlich dar. So wird das entstandene Know-how anschaulich und unter anderem auch für die landwirtschaftliche Praxis zugänglich. Zudem bettet die Broschüre die Aktivitäten in den europäischen Forschungsraum ein. Denn der Weg zu fruchtbaren und gesunden Böden ist eine internationale Aufgabe – für eine zukunftsfähige Landwirtschaft und eine nachhaltige Bioökonomie.

Ihr Bundesministerium für Bildung und Forschung

Inhaltsverzeichnis

Gesunde Böden für eine nachhaltige Bioökonomie	2
BonaRes: Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie	4
CATCHY – Das Potenzial von Zwischenfrüchten im Ackerbau nutzen	6
INPLAMINT – Höhere Nährstoffeffizienz durch Mikroorganismen	8
SIGNAL – Bäume auf dem Acker für eine nachhaltige Landwirtschaft	10
InnoSoilPhos – Nachhaltiges Phosphor-Management ausloten	12
SUSALPS – Klimaangepasste Nutzung von Grünlandböden im Alpenraum	14
SOIL ³ – Ertragssicherung durch Unterbodenmanagement	16
I4S – Mit Sensortechnologien die Bodenfruchtbarkeit messen	18
SOILAssist – Bodenschutz durch intelligente Landbewirtschaftung	20
DiControl – Mikrobielle Gemeinschaft und Pflanzengesundheit stärken	22
ORDIAMur – Nachbaukrankheit bei Apfel verstehen und bekämpfen	24
BonaRes-Zentrum für Bodenforschung	26
Rhizo4Bio: Den Lebensraum Wurzel verstehen und nachhaltig nutzen	28
BreadAndBeer – Saatgut-Beimpfung für bessere Kornqualität.....	30
CROP – Weizen-Wurzelphänotypen: Der Mix macht's	31
RhizoTraits – Vielfalt im Wurzelraum für zukunftsfähige Anbausysteme.....	32
RhizoWheat – Vorfruchtwirkungen verstehen und prognostizieren	33
RootWayS – Zwischenfrüchte erleichtern den Unterbodenzugang	34
µPlastic – Mikroplastik-Effekte verstehen	35
Ausblick: Boden als Zukunftsthema	36
Impressum	37



Gesunde Böden für eine nachhaltige Bioökonomie

Als Ressource für die Landwirtschaft spielen gesunde Böden eine Schlüsselrolle für eine nachhaltige Bioökonomie. Das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) hat einen europaweit einzigartigen Förderschwerpunkt auf die angewandte Bodenforschung gelegt – ein wesentlicher Beitrag für eine nachhaltige und klimaneutrale Entwicklung.

Das Wissen und das Bewusstsein um die Bedeutung unserer Böden und ihre vielfältigen Ökosystemleistungen ist in den vergangenen Jahren deutlich gewachsen. Fruchtbare Böden sind zentrale Ressource für die landwirtschaftliche Produktion. Sie halten Nährstoff- und Wasserkreisläufe aufrecht, filtern und speichern Wasser. Als Kohlenstoffspeicher und Treibhausgassenke sind sie unverzichtbar für den Klimaschutz. Böden sind zudem Lebensraum für 25 % aller weltweit beschriebenen Arten – eine Organismenvielfalt, die bisher nur in Ansätzen ergründet ist und die ganz wesentlich dazu beiträgt, die Bodenfunktionen aufrecht zu erhalten.

Um die wachsende Weltbevölkerung nachhaltig zu ernähren, die Biodiversität zu wahren und als „Klimaschützer“ sind gesunde und resiliente Böden von großer Bedeutung. Doch der Boden ist nur begrenzt verfügbar und stellt eine endliche Ressource dar, die fortwährend gepflegt und nachhaltig genutzt werden

muss. Durch Klimawandel, Versiegelung und Übernutzung ist die Gesundheit unserer Böden in Gefahr. Ihr Erhalt und Schutz ist daher zu einem elementaren Baustein von Nachhaltigkeitsstrategien geworden.

Boden auf der internationalen politischen Agenda

Die nachhaltige Nutzung unserer Böden und der Bodenschutz tragen wesentlich dazu bei, die 17 UN-Nachhaltigkeitsziele (**Sustainable Development Goals – SDGs**) zu erreichen. Der Bodenschutz ist insbesondere für die SDGs 2 (Kein Hunger), 6 (Sauberes Wasser), 13 (Klimaschutz) und 15 (Landökosysteme) relevant.

Im Rahmen des **European Green Deal**, der Wachstumsstrategie der Europäischen Kommission, heben zahlreiche Teilstrategien die Bedeutung des Bodens für ein nachhaltiges Wachstum hervor. Darunter sind

die **Farm-to-Fork Strategy** und die **EU Soil Strategy für 2030**. Letztere will erreichen, dass sich bis 2050 alle Bodenökosysteme in der EU in einem gesunden Zustand befinden und somit widerstandsfähiger sind.

Als „gesund“ bezeichnet die EU-Kommission Böden, die sich in einem guten chemischen, biologischen und physikalischen Zustand befinden und dauerhaft möglichst viele Ökosystemleistungen erfüllen. Mit der **Soil Monitoring and Resilience Directive** wurde zudem ein Rahmen für den Aufbau einer EU-weiten Infrastruktur zur Überwachung der wichtigsten Gefährdungen der Böden vorgeschlagen.

Auf dem Weg zu gesunden Böden und ihrer nachhaltigen Nutzung braucht es Forschung und Innovation: Im Rahmen des EU-Rahmenprogramms für Forschung und Innovation **Horizon Europe** bieten sich Boden-Forschenden vielfältige Fördermöglichkeiten. Herausragt hier die **Bodenmission „A Soil Deal for Europe“**, in deren Rahmen bis 2030 einhundert „Living Labs“ (Reallabore) und sogenannte Leuchttürme – Orte für die Präsentation von bewährten Praktiken – entstehen, um die Gesundung der Böden voranzutreiben.

Wichtige Ressource für die Bioökonomie

Bewirtschaftete Böden und die auf ihnen wachsenden Pflanzen stehen am Anfang der Wertschöpfungsketten der Bioökonomie. Diese auf biologischen Ressourcen und Verfahren basierende Wirtschaftsform bietet viele hochrelevante Lösungsansätze und kann einen bedeutenden Beitrag zur nachhaltigen Umgestaltung der Agrarproduktion leisten. Eine verstärkte inter- und transdisziplinäre Forschung spielt hierbei eine entscheidende Rolle, um die Potenziale der Bioökonomie zu identifizieren.

Das ist ebenfalls ein zentrales Ziel der 2020 veröffentlichten „**Nationalen Bioökonomiestrategie**“. Damit strebt die Bundesregierung an, die internationale Vorreiterrolle Deutschlands in der Bioökonomie zu stärken, um so die Grundlagen für die Entwicklung zukünftiger Technologien und Arbeitsplätze zu legen. Zudem hat die Bundesregierung ihre bisherige Bioökonomiepolitik verstärkt an dem übergeordneten Ziel der nachhaltigen und klimaneutralen Entwicklung ausgerichtet. Bioökonomie-Ansätze für

BMBF-Förderung zur Bodenforschung

17 Verbundprojekte wurden und werden durch das BMBF gefördert, elf große Konsortien in BonaRes und sechs Verbünde in Rhizo4Bio.

128 Mio. Euro hat das BMBF in die beiden Fördermaßnahmen investiert, die von 2015 bis zum Teil ins Jahr 2027 laufen.

nachhaltige Agrar- und Ernährungssysteme sind von großer Bedeutung für die Anfang 2023 veröffentlichte „**Zukunftsstrategie Forschung und Innovation**“ der Bundesregierung. Die federführend vom BMBF entwickelte Zukunftsstrategie benennt sechs zentrale Zukunftsfelder (Missionen), in denen eine nachhaltige Entwicklung durch Forschung und Innovation beschleunigt werden soll.

Vorreiterrolle in der Bodenforschung

Das BMBF hat auf den Boden frühzeitig einen Fokus seiner Forschungs- und Innovationsförderung gelegt und war hier europaweit Vorreiter: Mit der Initiative „**Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes**“ ging 2015 ein einzigartiger Förderschwerpunkt für angewandte Bodenforschung an den Start. Zehn interdisziplinäre Forschungsverbünde und das koordinierende BonaRes-Zentrum widmeten sich in einer auf dreimal drei Jahre angelegten Förderung der Frage, wie auf landwirtschaftlich genutzten Böden langfristig und nachhaltig hohe Erträge erzielt werden können, ohne die anderen Bodenfunktionen zu beeinträchtigen (S. 4-27).

Mit „**Rhizo4Bio**“ ging zudem im Jahr 2020 eine weitere Bodenforschungsmaßnahme an den Start, in der sechs Projektverbünde die Bedeutung der Wurzel-Boden-Kontaktzone – der sogenannten Rhizosphäre – untersuchen und ihr Potenzial für die Bioökonomie erschließen (S. 28-35).

Diese Broschüre porträtiert die beiden Fördermaßnahmen, die vom BMBF mit insgesamt 128 Millionen Euro gefördert wurden, und macht ihre Beiträge für eine zukunftsfähige Landwirtschaft anschaulich.



BonaRes: Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie

Wie funktioniert das komplexe System Boden? Und wie lässt sich die Fruchtbarkeit bewirtschafteter Böden nachhaltig steigern? Wie kann die Vielfalt der Bodenfunktionen und Ökosystemleistungen gestärkt werden? In der auf dreimal drei Jahre angelegten BMBF-Förderinitiative „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“ haben zehn interdisziplinäre Projektverbände und das virtuelle BonaRes-Zentrum einen bedeutenden Datenschatz gehoben, neues Boden-Wissen erschlossen und praxisrelevante Ansätze entwickelt. Dieses Kapitel gibt einen Überblick über die wichtigsten Erkenntnisse und Ressourcen der BonaRes-Forschungskonsortien.

Mit der im Jahr 2015 – zugleich das Internationale Jahr des Bodens der UN – gestarteten BonaRes-Initiative hat das BMBF die Erforschung und die nachhaltige Nutzung der Ressource Boden bereits frühzeitig in den Vordergrund seiner Bioökonomie-Forschungsförderung gestellt. Der Fokus lag dabei auf Bodenfruchtbarkeit und nachhaltigem Bodenmanagement von bewirtschafteten Böden in Landwirtschaft, Gartenbau und von Grünland.

Zu den zentralen Zielen gehörte,

- das wissenschaftliche Verständnis von Bodenökosystemen zu erweitern
- die Produktivität der Böden und ihre anderen Funktionen zu verbessern
- neue Strategien für eine nachhaltige Nutzung und Bewirtschaftung von Böden zu entwickeln.

Das Besondere an BonaRes ist die **system- und praxisorientierte Ausrichtung** der Forschungsaktivitäten mit langfristiger Perspektive. Um bestimmte Fragestellungen des nachhaltigen Bodenmanagements zu bearbeiten, betrachten die beteiligten Forschenden das ganze System aus Boden-Pflanze-Umwelt und Mensch. In enger Zusammenarbeit mit Akteuren aus der praktischen Landwirtschaft wurden innovative Ansätze für das Bodenmanagement entwickelt. Über den Förderzeitraum von dreimal drei Jahren waren etwa 120 Forschende aus 55 Institutionen an BonaRes beteiligt. Zehn **interdisziplinäre Forschungsverbände** haben dabei ein breites Themenspektrum „beackert“. Es reicht von der Entwicklung innovativer Strategien zur Ressourcenoptimierung, über Agroforstsysteme bis hin zum wissensbasierten Einsatz von Zwischenfrüchten. Auf den folgenden Seiten dieser Broschüre stellen die Konsortien ihre wichtigsten Erkenntnisse vor. Thematisch geordnet werden sie in der folgenden Reihenfolge präsentiert:

- **Nährstoff-/Wasserhaushalt:** CATCHY, INPLA-MINT, SIGNAL, InnoSoilPhos
- **Grünlandmanagement:** SUSALPS
- **Technische Innovationen:** Soil³, I4S, SoilAssist
- **Bodengesundheit:** DiControl, ORDIAmur

Ein wesentliches Ziel von BonaRes war es, die Auswirkungen der landwirtschaftlichen Bodennutzung auf wichtige Bodenfunktionen vorherzusagen. Zu diesen **Ökosystemleistungen** zählen die Biomasse-

produktion, Wasserspeicherung und Wasserqualität, Lebensraum für Organismen, Speicherung von Kohlenstoff und das Recycling von Nährstoffen. Alle diese Funktionen hängen von einer Vielzahl von Bodenprozessen und deren Wechselwirkungen ab, welche sehr empfindlich auf landwirtschaftliche Bewirtschaftungsverfahren reagieren können. Zum Verständnis dieses komplexen Systems wurden in BonaRes daten- und prozessbasierte **Modelle** entwickelt. Zudem sind **Bewertungsinstrumente** und **Entscheidungshilfen** für politische Entscheidungsträger und Landwirtinnen und Landwirte entstanden.

Wissensspeicher für Bodenforschung

Als weiterer Baustein von BonaRes ist mit dem virtuellen **BonaRes-Zentrum** eine zentrale Einrichtung zur Bodenforschung in Deutschland mit internationaler Sichtbarkeit entstanden. Neben der Funktion als Koordinierungsstelle und Forschungspartner für die zehn Projektverbände hat das BonaRes-Zentrum für die Vernetzung der Bodenforschenden auf nationaler und internationaler Eben gesorgt.

Von zentraler Bedeutung ist das **Datenrepositorium** des BonaRes-Zentrums. Es führt alle Daten aus BonaRes und die Daten von Dauerfeldversuchen zusammen. Sie stehen der Bodenforschungs-Community und allen interessierten Nutzenden gemäß den FAIR-Datenprinzipien zur Verfügung. Das **BonaRes-Portal** bietet als Anlaufstelle im Web Informationen zu den BonaRes-Projekten, Zugang zu Daten, Wissen und Werkzeugen für ein nachhaltiges Bodenmanagement.

Kennzahlen zu BonaRes im Überblick

10 große Forschungsverbände und das BonaRes-Zentrum für Bodenforschung wurden gefördert.

108 Mio. Euro hat das BMBF in die Fördermaßnahme zur Bodenforschung investiert.

55 Institutionen und Einrichtungen waren an BonaRes beteiligt.



CATCHY – Das Potenzial von Zwischenfrüchten im Ackerbau nutzen

Wie lassen sich Zwischenfrüchte wie Gelbsef, Phacelia oder Klee zur Entwicklung innovativer Anbausysteme einsetzen, um die Bodenfruchtbarkeit auf den Äckern zu erhalten und zu verbessern? Langzeitversuche des Konsortiums CATCHY mit einzelnen Zwischenfrüchten und Mischungen lieferten dazu interessante Antworten.

Ziel und Weg

Der Ackerbau steht vor vielfältigen Herausforderungen: Neben dem Klimawandel gibt es neue politische und gesellschaftliche Anforderungen. Insbesondere der Zwischenfruchtanbau stellt eine Möglichkeit dar, die Umweltverträglichkeit im Sinne des integrierten Pflanzenbaus zu steigern, ohne dabei die Hauptaufgabe – die Produktion von Lebensmitteln – negativ zu beeinflussen. Zwischenfrüchte werden zwischen zwei Hauptkulturen angebaut. Diese Zwischenkulturen dienen insbesondere der Bodenregeneration und produzieren zugleich Futtermittel. In dem BonaRes-Projekt CATCHY ging es darum, das Potenzial des Zwischenfruchtanbaus besser auszuschöpfen und zur Entwicklung innovativer Anbausysteme beizutragen.

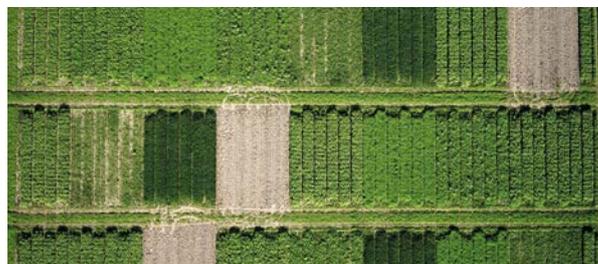
In langjährigen Fruchtfolgeversuchen wurde die Wirkung des Anbaus von verschiedenen Zwischenfruchtarten alleine und artenreichen Gemengen im Vergleich

zur Brache mit folgenden Schwerpunkten untersucht: Bodenstruktur und -qualität, Mikrobiom, Nährstoff- und Wasserhaushalt, Erträge und Rentabilität. Die Langzeitversuche folgten dem Anbauschema Weizen-Zwischenfrucht-Mais. Als Zwischenfrüchte wurden Gelbsef, Phacelia, Rauhafer und Alexandrinerklee als Reinsaaten und in einer Vierer-Mischung eingesetzt. Ebenso wurde eine 12er Mischung erprobt. Die Versuchsstandorte lagen im niedersächsischen Asendorf und im bayerischen Triesdorf.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Ob Haupt- oder Zwischenfrucht: Jede Pflanzenfamilie, -art und -sorte hat ein individuelles Wirkungsspektrum. So düngen Leguminosen (Hülsenfrüchtler) dank stickstofffixierender Knöllchenbakterien an ihren Wurzeln den Boden. Andere Pflanzen durchwurzeln den Boden oder unterdrücken das Wachstum von Unkraut.

Durch die Kombination der unterschiedlichen Funktionen in Saatgut-Mischungen lässt sich das gesamte Wirkungsspektrum erweitern und die Stabilität der Zwischenfrucht erhöhen. **Zwischenfruchtmischungen bieten gegenüber Einzelkomponenten** agronomische, ökologische und gesellschaftliche Vorteile. Voraussetzung ist, dass entsprechend der betriebsindividuellen Zielsetzung eine der Fruchtfolge, dem Standort und dem Saatzeitpunkt angepasste Mischung eingesetzt wird. Außerdem sind die Effekte in intensiv geführten Pflanzenbausystemen schwächer als in extensiveren – dem natürlichen Ökosystem näheren – Produktionssystemen. Der Anbau von Zwischenfrüchten **fördert den Humusaufbau**. Über neun Jahre Zwischenfruchtanwendung stieg der Humusgehalt aller Varianten in den oberen 0–10 cm kontinuierlich um 10–15% an. Dieser Effekt ließ sich jedoch nicht eindeutig von anderen Einflussfaktoren, wie reduzierte Bodenbearbeitung und Fruchtfolge trennen. Die Ergebnisse decken sich jedoch sehr gut mit vergleichbaren Studien und Modellprojektionen im Rahmen des Projekts. Besonders Leguminosen sowie Mischungen mit Leguminosen haben ein hohes Potenzial zum Humusaufbau. Wichtig ist hierbei das Verständnis der Langfristigkeit dieses Prozesses. Eine effektive Steigerung des Humusaufbaus ist nur bei kontinuierlicher Integration von Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge zu erzielen. Durch den Zwischenfruchtanbau werden **Nährstoffverluste minimiert**, die durch Auswaschung in tiefe Bodenschichten mit versickerndem Regenwasser entstehen. Damit ist der Zwischenfruchtanbau ein wichtiges Instrument für den Grundwasserschutz und dient der Umsetzung der Wasserrahmenrichtlinie. Weiterhin



Blick von oben auf den Feldversuch im niedersächsischen Asendorf

verbessern Zwischenfrüchte, besonders in Mischungen, den Aufbau von größeren und stabileren Bodenaggregaten. Diese sind entscheidend für einen besseren Wasserhaushalt und die Stabilität des Bodengefüges gegenüber Verdichtung. Außerdem können negative Einflüsse von notwendigen Bodenbearbeitungsmaßnahmen durch den Zwischenfruchtanbau wieder ausgeglichen werden. Zwischenfrüchte können ein wirksames und umweltfreundliches Instrument sein, um **positive Einflüsse auf mikrobielle Funktionen im Boden** zu erzielen. Die Erhöhung der Pflanzenvielfalt im Zwischenfruchtanbau bewirkt eine größere Vielfalt von aktiven Mikroorganismen im Boden. Je größer diese ist, desto stabiler ist das Ökosystem gegenüber Störungen. Das liegt daran, dass nahezu alle Bodenfunktionen an mikrobielle Prozesse gebunden sind. Da jede Pflanzenart ein standort-individuelles Mikrobiom entwickelt, macht es einen Unterschied, ob und welche Einzelkomponente oder Mischung in der Fruchtfolge platziert wird. Zwischenfrüchte tragen wesentlich zur **Schließung der Nährstoffkreisläufe** im Ackerbau bei. Die Nährstoffaneignung eines Zwischenfruchtbestandes ist dabei abhängig vom Standort, dem Management und der Pflanzenart/-mischung.

Titel: CATCHY – Zwischenfrüchte als agronomische Maßnahme zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit und Ertragssicherheit

Laufzeit: April 2015 – März 2024

Budget: ca. 7,4 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Universität Bremen, Hochschule Weihenstephan-Triesdorf (HSWT), Leibniz-Institut für Pflanzengenetik & Kulturpflanzenforschung (IPK), Leibniz Universität Hannover, Deutsche Saatveredelung AG (DSV)

Website: bonares.de/catchy

Ausblick

Das CATCHY-Projekt hat wichtige wissenschaftliche Erkenntnisse über die vielfältigen Effekte des Zwischenfruchtanbaus im Ackerbau geliefert. Dies ermöglicht die weitere Optimierung des Managements von Zwischenfruchtbeständen. Die Nutzung von Mischungen und die damit gesteigerte Diversität führt zu mehr Resilienz im Pflanzenbausystem. Dieser Mehrwert ist jedoch nur durch kontinuierliche Integration in das Anbausystem zu erzielen. Die Nutzung von Zwischenfrüchten kann nur eine von vielen Maßnahmen darstellen, um resiliente Pflanzenbausysteme zu entwickeln.



INPLAMINT – Höhere Nährstoffeffizienz durch Mikroorganismen

Lassen sich die Nährstoffkreisläufe durch Wechselwirkungen zwischen Boden, Pflanzen und Mikroorganismen optimieren, um Nährstoffverluste zu minimieren und Gewässer und Atmosphäre vor zu hohen Nitratbelastungen und Treibhausgasemissionen zu schützen? Diesen zentralen Fragen ging das Verbundprojekt INPLAMINT nach.

Ziel und Weg

Die moderne Landwirtschaft mit ihrem hohen Düngereinsatz und der intensiven Bodenbearbeitung führt zum Verlust von Kohlenstoff und Nährstoffen aus den Böden. Dies führt zur übermäßigen Belastung der Atmosphäre mit Treibhausgasen und des Grundwassers mit Nitrat. Insbesondere im Winter kommt es regelmäßig zu starken Nitratauswaschungen aus den oberen Bodenschichten ins Grundwasser. Typische Fruchtfolgen mit Wintergetreide nach stickstoffhaltigen Vorfrüchten wie Raps lassen keinen Anbau von schnellwachsenden Zwischenfrüchten zu, die die überschüssigen Nährstoffe binden könnten.

Ziel des Verbundprojekts INPLAMINT war es daher, für diese häufigen Fruchtfolgen eine Lösung zu finden, die überschüssigen Nährstoffe zu binden und langfristig im Boden zu speichern. Der zentrale Ansatz des Projektes war es, die Mikroorganismen im Boden, die

intensiv an den Kohlenstoff- und Nährstoffkreisläufen des Bodens beteiligt sind, gezielt durch Zugabe von kohlenstoffhaltigen Substraten zu stimulieren. Dadurch sollen die Mikroorganismen die Nährstoffe aufnehmen, in eine stabilere Form überführen und für eine langfristige Speicherung im Boden geeignet machen. Hierzu wurden zahlreiche Langzeitversuche im Feld, im Gewächshaus und im Labor an verschiedenen Standorten in Deutschland mit unterschiedlichen Böden und Klimabedingungen durchgeführt.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Der **Abbau von organischer Bodensubstanz** im Herbst ohne entsprechende pflanzliche Nährstoffaufnahme ist die **Hauptursache für Nährstoffverluste aus Ackerflächen**. Allerdings kann Frühjahrstrockenheit auch zu verringerter Aufnahme von Düngernährstoffen während der Wachstumsperiode führen und damit die



Überdachung am Versuchsstandort Klein-Altendorf der Universität Bonn zur Studie von Auswirkungen von frührsommerlicher Trockenheit.

Notwendigkeit der Nährstofffestlegung im Nacherntebereich erhöhen. Die **Zugabe von kohlenstoffhaltigen Substraten** führt bei ausreichender Nährstoffverfügbarkeit zu einer Zunahme der mikrobiellen Biomasse und Aktivität und dadurch zur Stabilisierung von Nährstoffen im Boden. Die Zugabe sollte daher **möglichst im Zeitraum der Herbstmineralisierung** zur direkten Bindung der überschüssigen Nährstoffe erfolgen, aber nicht zu spät und bei sehr feuchten Böden, um nicht die Denitrifikation und damit verbundene Lachgasemissionen zu stimulieren. Es sollten insbesondere **zellulosehaltige Substrate**, wie z.B. Weizenstroh, verwendet werden, die sich als besonders wirksam erwiesen haben. Es konnte auch gezeigt werden, dass Stroheinarbeitung nicht zu einer Erhöhung des Schaderregerdrucks für die Folgekultur führt.

Die vorgeschlagene Maßnahme kann auch zum **Humusaufbau** genutzt werden, da durch die Festlegung der Nährstoffe auch der zugegebene Kohlenstoff fest im Boden gebunden wird. Hierbei sind **mittlere Humusgehalte** (mind. 1% organischer Bodenkohlenstoff, SOC) anzustreben, da sich besonders humusarme Böden durch eine sehr geringe Kohlenstoffeffizienz der Mikroorganismen auszeichnen. Dies führt zu einer schnellen Umsetzung der zugeführten Kohlenstoffsubstrate zu CO₂ und erschwert die Kohlenstoff- und Nährstoffspeicherung im Boden. Daher sollten Ackerböden mit <1% SOC möglichst zügig durch eine **Kombination aus organischer und mineralischer Düngung** über den Schwellenwert von 1% SOC gebracht werden. Dadurch erfolgt dann die mikrobielle Festlegung von Kohlenstoff und Nährstoffen im Boden besonders effizient, ohne zu erhöhter Auswaschung von Nährstoffen und erhöhten Treibhausgasemissionen zu führen, wie wir in einem dreijährigen Freilandversuch zeigen konnten. **Zu hohe Humusgehalte können** hingegen durch verstärkte Herbstmineralisierung zu

einer erhöhten Nährstofffreisetzung führen und damit **kontraproduktiv wirken**. Unsere Versuche zeigten aber auch: der festgelegte Stickstoff steht nicht oder nur sehr eingeschränkt für die Folgekultur zur Verfügung. Er fördert stattdessen die **längerfristige Speicherung von Kohlenstoff und Nährstoffen im Boden**, was zur positiven Klimawirkung und Erhöhung der Klimaresilienz des Bodens beiträgt. Die **Verwendung von Pflanzenkohle und Sägemehl** zur Nährstoffbindung stellte sich als **ökonomisch nicht umsetzbar** heraus, da die Herstellung von Pflanzenkohle nach wie vor zu teuer ist und die Verwendung von Sägemehl zur Nährstoffbindung im Boden in Konkurrenz zur industriellen Verwertung (Pellets, Sperrholz) stehen würde.

Ausblick

Die vorgeschlagenen Maßnahmen stellen eine wichtige ökologische und gesellschaftliche Dienstleistung dar, die entsprechend honoriert werden sollte. Die wirtschaftliche Belastung durch die vorgeschlagenen Maßnahmen wäre insbesondere für kleinere Betriebe auf schwächeren Standorten durch den zusätzlichen Einsatz von Betriebsmitteln und Arbeitsleistung besonders groß. Hierfür sollten finanzielle Anreize geschaffen werden. Zudem ist eine Nachbesserung der Düngeverordnung anzustreben, um die Anhebung der Humusgehalte an schwächeren Standorten zu erleichtern.

Titel: INPLAMINT – Erhöhung der landwirtschaftlichen Nährstoffnutzungseffizienz durch Optimierung von Pflanze-Boden-Mikroorganismen-Wechselwirkungen

Laufzeit: April 2015 – Mai 2024

Budget: 6,2 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Forschungszentrum Jülich GmbH, Freie Universität Berlin, Helmholtz Zentrum München / Technische Universität München, ifeu - Institut für Energie und Umweltforschung Heidelberg GmbH, Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen, Universität zu Köln, Christian-Albrecht-Universität Kiel, Leuphana Universität Lüneburg

Website: bonares.de/inplamint



SIGNAL – Bäume auf dem Acker für eine nachhaltige Landwirtschaft

In Agroforstsystemen wird der Anbau von Ackerpflanzen mit der Nutzung von Bäumen kombiniert. Wie lässt sich damit die Landwirtschaft nachhaltiger gestalten und gleichzeitig eine hohe Produktivität erreichen? Das SIGNAL-Konsortium hat Alley-Cropping-Systeme erforscht, die viele Vorteile von Bäumen in der Landwirtschaft aufzeigen.

Ziel und Weg

Bäume haben in den landwirtschaftlichen Systemen Europas eine lange Tradition, sind aber durch die moderne Landwirtschaft zunehmend verschwunden. Die Integration von Bäumen in die Landwirtschaft in

sogenannten Agroforstsystemen führt zu Wechselwirkungen mit Nutzpflanzen, die bei guter Bewirtschaftung eine Koexistenz von Bäumen und Nutzpflanzen ermöglichen, die produktiv sind und einige natürliche Prozesse nachahmen, die in Reinkulturen nicht vorkommen.



Herbst-Bild vom Feldversuch im thüringischen Dornburg

Ziel des BonaRes-Projekts SIGNAL ist es, die Vor- und Nachteile von Agroforstsystemen im Vergleich zu Reinkulturen zu bewerten. Agroforstsysteme sind sehr vielfältig; SIGNAL hat relativ einfache Alley-Cropping-Systeme untersucht, die aus Pappelreihen bestehen, die als Kurzumtriebsplantagen in Kombination mit einer konventionellen Fruchtfolge angebaut werden. Die Forschenden verglichen diese Agroforstsysteme mit der gleichen Fruchtfolge ohne Bäume und bewerteten die folgenden Ökosystemfunktionen: Ertrag, Kohlenstoffbindung und Treibhausgasmin-derung, Bodennährstoffkreislauf und Wasserregulie- rung, biologische Vielfalt und Erosionsschutz.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die Integration von Pappelreihen hat mehrere agronomische und ökologische Vorteile. Die Anwesenheit von Bäumen verringert zwar die Erträge in den ersten, an die Baumreihe angrenzenden, Pflanzenreihen, dies wird jedoch häufig durch höhere Erträge in der Mitte der Pflanzenreihen kompensiert, sodass es im Vergleich zu Reinkulturen **keine Unterschiede bei den Ernteerträgen** gibt.

Agroforstwirtschaft bindet effektiver Kohlendioxid in Biomasse, Wurzeln und Humus. Darüber hinaus werden in den Böden der Baumreihen ökologische Prozesse angeregt, die andere Treibhausgase, wie Lachgas und Methan, absorbieren. Die **Klimabilanz der Agroforstwirtschaft ist daher wesentlich besser** als die von Reinkulturen. Trotz der positiven Wirkung der Bäume auf den Nährstoffkreislauf unterscheidet sich die Nährstoffverfügbarkeit in den Reinkulturen durch die intensiven Düngergaben nicht wesentlich. Dies wirkt sich auch stark auf die Nährstoffauswaschung aus, die vergleichbar ist. Diese Ergebnisse deuten darauf hin, dass ein **Spielraum für geringere Düngermengen** besteht, ohne dass es zu größeren Ernteverlusten kommt.

In Agroforstsystemen **verbessert sich die Artenvielfalt** im Vergleich zu Reinkulturen erheblich. Innerhalb weniger Jahre wimmelt es in den Baumreihen von Regenwürmern, darunter auch tief grabende Arten, die die Wasseraufnahme des Bodens deutlich verbessern können und in Reinkulturen nicht vorkommen. Auch Spinnen und das Bodenmikrobiom erhöhen die Artenvielfalt, und können zur Schädlingsbekämpfung beitragen. Phytopathologische Untersuchungen zeigen ein **vermindertes Risiko für häufige Pflanzenkrankheiten** im Vergleich zu Reinkulturen. Auch das Risiko der **Winderosion** ist in den Agroforstsystemen im Vergleich zu den Reinkulturen **stark reduziert**. Die hohen Wasserinfiltrationsraten in den Baumreihen als Folge der tief grabenden Regenwürmer lassen vermuten, dass auch das Risiko der Wassererosion reduziert wurde.

Die Ergebnisse des Projekts zeigen, dass die Integration von Bäumen in die Landwirtschaft eine sehr wichtige Rolle bei der Verbesserung der Nachhaltigkeit der Landwirtschaft spielt. Warum also wird die Agroforstwirtschaft angesichts dieser offensichtlichen

Vorteile derzeit nicht stärker genutzt? Unsere wirtschaftlichen Analysen zeigen, dass es derzeit vom Standort abhängt, ob die Agroforstwirtschaft mit der Landwirtschaft ohne Bäume konkurrieren kann. Auf einigen Standorten ist sie bereits wirtschaftlich rentabel, auf anderen haben die Reinkulturen noch leichte Vorteile. Die mit der Anlage von Agroforstsystemen verbundenen **Kosten** sind oft ein wichtiger Grund, der Landwirte davon abhält, Agroforstsysteme zu etablieren. Eine bessere finanzielle Unterstützung der Landwirte bei der Etablierung von Agroforstsystemen, würde einen erheblichen Unterschied machen.

Ausblick

Das Projekt hat viele positive Effekte der Wiedereinführung von Agroforstsystemen gezeigt, und es gibt noch weiteres Verbesserungspotential, nicht nur bei der Optimierung der untersuchten Systeme, sondern auch bei Agroforstsystemen mit anderen Kombinationen von Bäumen und Feldfrüchten. Eine weitere Optimierung der Bewirtschaftung sowie standort- und systemspezifische Anpassungen sind notwendig und können nur durch Pionierlandwirte erreicht werden, die mit der Einführung neuer Formen der Agroforstwirtschaft die Zukunft der Landwirtschaft nachhaltiger gestalten.

Titel: SIGNAL – Nachhaltige Intensivierung der Landwirtschaft durch Agroforstwirtschaft

Laufzeit: Juli 2015 – August 2024

Budget: 8 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Georg-August-Universität Göttingen, Universität Kassel, Julius Kühn-Institut, Brandenburgische Technische Universität Cottbus – Senftenberg, Helmholtz-Zentrum München - Deutsches Forschungszentrum für Gesundheit und Umwelt (GmbH), Universität Hohenheim; Deutscher Fachverband für Agroforstwirtschaft (DeFAF) e.V., Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR)

Website: bonares.de/signal



InnoSoilPhos – Nachhaltiges Phosphor-Management ausloten

Wie kann die begrenzte Ressource Phosphat sparsamer und effizienter eingesetzt werden, um die Pflanzenbestände im Ackerbau mit diesem Hauptnährstoff zu versorgen und unerwünschte Austräge in Gewässer zu vermeiden? Untersuchungen des InnoSoilPhos-Konsortiums lieferten dazu neue Erkenntnisse und praxisrelevante Lösungsvorschläge.

Ziel und Weg

Bergbaulich abbaubares Phosphatgestein, die Grundlage für die Herstellung von Phosphatdüngern, ist eine **begrenzte Georessource**, die zudem hauptsächlich in politisch instabilen Regionen der Welt vorkommt. Die EU hat Phosphat als **kritischen Rohstoff** eingestuft. Andererseits belasten Phosphateinträge in Gewässer deren Qualität; das Phänomen der Eutrophierung von Gewässern wird maßgeblich durch zu hohe Phosphatkonzentrationen verursacht.

Ein nachhaltiges Phosphatmanagement erfordert es, Lösungen zu erarbeiten, wie einerseits die Bestände der Kulturpflanzen ausreichend versorgt und die Gewässer geschützt werden können. Dazu wurde in einem **multi- und interdisziplinären Ansatz** ein Prozessverständnis der P-Umsetzungen im System Boden – Pflanze – Gewässer erarbeitet, um auf dieser Grundlage eine Vielzahl von „Stellschrauben“ zu benennen, die zu

einem nachhaltigen Management dieses essenziellen Hauptnährstoffes genutzt werden können. Die Methoden umfassten quantenchemische Modellierungen, molekular- und mikrobiologische Verfahren, bodenchemische Untersuchungen und Experimente, Metadatenanalysen, klassische Anbauversuche im Gefäß-, Parzellen- und Feldmaßstab, Monitoring des Austragverhaltens auf Einzugsgebietsebene und schließlich Methoden der Governanceforschung.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Quantenchemische Modellierungen auf atomarer Ebene führten zur Erkenntnis, wie die Phosphatbindung an Eisenminerale vom pH, der Struktur der Phosphatverbindungen und der Bedeckung der Minerale mit organischen Molekülen abhängt. Praktische Handlungsanweisungen daraus umfassen die Steuerung des pH-Wertes durch Kalkung und des

Humusgehaltes durch erhöhte Zufuhr organischer Rückstände, um die **P-Fixierung zu minimieren**. Auf der molekularen Ebene wurden neue Erkenntnisse zu den Genen, die den P-Umsatz in Bodenmikroorganismen und Pflanzen steuern, erarbeitet. Von den relevanten Bakteriengruppen sollen einerseits solche gefördert werden, die im Boden natürlicherweise mit anbauwürdigen Zwischenfrucht-Pflanzen assoziiert sind (z.B. Bradyrhizobiacae an Serradella) oder die als zugelassene Stämme für die Entwicklung von Impfpräparaten für P-Recyclingprodukte in Frage kommen (z.B. *Bacillus velezensis*). Solche **P-Recyclingprodukte**, z.B. Biokohlen aus P-reichen Materialien wie Knochen und Klärschlämme wurden in vielfältigen Versuchsansätzen getestet. Dabei zeigte sich übereinstimmend, dass z.B. eine mit Schwefel beladene Knochenkohle eine ähnlich **gute Düngewirkung** hatte, wie der kommerzielle Dünger Tripelsuperphosphat. Zum gleichen Ergebnis führten mehrjährige Parzellen- und Feldversuche mit Knochenkohlen und Biokohle aus Klärschlämmen. Die vertiefte Auswertung von P-Düngungsversuchen in Deutschland und der EU führte zu der Aussage, dass die Bedeutung der P-Düngung für die Ertragshöhe in der Vergangenheit wahrscheinlich deutlich überschätzt wurde.

In allen Gehaltsklassen der P-Versorgung des Bodens führten die empfohlenen P-Düngungen nicht immer zu Mehrerträgen. Signifikante Mindererträge wurden selbst nach Aussetzung der P-Düngung für 36 Jahre nur bei Zuckerrüben, nicht jedoch bei Wintergetreiden festgestellt. Daraus folgt, dass ein **sparsamerer Einsatz**



Maispflanzen im Gefäßversuch mit Mineraldünge-P (TSP), S-angereicherter Knochenkohle (BC^{plus}) und Knochenkohle (BC).

der P-Dünger ökonomisch und ökologisch sinnvoll ist. Untersuchungen des P-Austragsgeschehens in drainierten Flachland-Einzugsgebieten führten zu der Erkenntnis, dass Austräge mit dem Basisabfluss vernachlässigbar klein sind. Dem gegenüber führen **Starkregeneignisse** zu Spitzen des Abflusses und der P-Austräge. Dies kann durch Erosion, oberflächliche und „innere“ Austräge im Bodenprofil, erklärt werden. Solche Abflussspitzen zu vermeiden ist außerordentlich anspruchsvoll und technisch noch nicht zufriedenstellend gelöst. Daher bleibt die Begrenzung der landwirtschaftlichen P-Einträge eine der größten Herausforderungen für ein nachhaltiges P-Management.

Ausblick

Das InnoSoilPhos-Projekt hat vielfältige Möglichkeiten aufgezeigt, wie Dünger-P eingespart und durch Recyclingprodukte ersetzt werden kann. Politisch erfordern eine bessere P-Kreislaufführung, ein effizienterer P-Einsatz und langfristige Ernährungssicherheit einen Instrumenten-Mix. Den größten Druck dahingehend könnte man durch eine Mengensteuerung der Tierhaltung auf EU-Ebene erreichen. Flankierend helfen ein Umbau der EU-Agrarsubventionen nach dem Prinzip „öffentliche Gelder nur noch für öffentliche Leistungen“ und stärkere ordnungsrechtliche Vorgaben zum P-Recycling.

Titel: InnoSoilPhos – Innovative Lösungen für ein nachhaltiges Management von Phosphor im Boden

Laufzeit: März 2015 – Mai 2024

Budget: 9,25 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Universität Rostock, Brandenburgische Technische Universität Cottbus-Senftenberg, TU München, Bergische Universität Wuppertal, Forschungszentrum Jülich GmbH, Julius-Kühn-Institut Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)

Website: bonares.de/innosoilphos



SUSALPS – Klimaangepasste Nutzung von Grünlandböden im Alpenraum

Wie lässt sich Grünland in den Alpen und im Alpenvorland auch im Klimawandel nachhaltig nutzen? In Zusammenarbeit mit Landwirten und Behörden erarbeitete das interdisziplinäre SUSALPS Konsortium hierzu praxisrelevante Forschungsergebnisse aus Experimenten, Langzeit-Feldstudien, Fernerkundung und Modellierung.

Ziel und Weg

Grünland im Alpenraum ist für die Milch- und Fleischproduktion von hohem ökonomischem Wert. Durch Klimawandel und Änderungen der Bewirtschaftung ist die Multifunktionalität von Grünlandökosystemen jedoch stark gefährdet. Dies betrifft wichtige Ökosystemfunktionen, wie Produktivität, Kohlenstoff- und

Stickstoffspeicher, Wasser- und Nährstoffrückhalt, Erosionsschutz und Biodiversität. Das Projekt SUSALPS verwendet Feld- und Laborexperimente, Fernerkundung sowie sozioökonomische und ökosystemare Modellierung mit dem Ziel, ein evidenz- und prozessbasiertes Verständnis der Auswirkungen aktueller und zukünftiger Klima- und Managementbedingungen auf Grünland-Bodenfunktionen zu entwickeln. Unter Berücksichtigung sozioökonomischer Rahmenbedingungen werden daraus nachhaltige Bewirtschaftungsformen abgeleitet. Dafür arbeiten Wissenschaft und Landwirtschaft auf zahlreichen Standorten in Höhenlagen zwischen 1600 und 600 Meter Seite an Seite. Um den Klimawandel zu simulieren, wurden Bodenkerne aus höheren Lagen (kühler, feuchter) in zwei verschiedene tiefere Lagen (wärmer, trockener) versetzt, sodass sich ein Temperaturanstieg von +2°C beziehungsweise +3°C ergab. In einem Wiederbeweidungsprojekt auf einer aufgelassenen Alm wurde zudem die Rolle von Beweidung für die Biodiversität, Wasserqualität und



Grünland-Dauerbeobachtungsfläche in Graswang.

Nährstoff-Vorräte im Boden sowie für kulturelle Ökosystemleistungen untersucht.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Sozioökonomische Analysen zeigen, dass der Klimawandel das Grünlandmanagement und die Erträge der Landwirte bereits beeinflusst. Vor allem veränderte politische Rahmenbedingungen erfordern schnelle Handlungsfähigkeiten der Landwirte (z.B. Düngereordnung). Zudem verdeutlicht eine Befragung, dass mit der Dürre 2018 die **Wahrnehmung des Klimawandels** auch in der Gesellschaft stark gestiegen ist und die Mischung von Wald und Grünland sowie Biodiversität für den Tourismus wichtige Aspekte sind.

Durch **Bodenverpflanzungen** simulierter Klimawandel (+2°C) steigerte die Grünlandproduktivität bei intensiver Bewirtschaftung. Dieser positive Effekt kehrte sich jedoch bei Trockenstress, insbesondere in den Jahren 2018 und 2023, oder bei höheren Temperaturen (+3°C) ins Gegenteil um. Die erhöhte Produktivität durch moderaten Temperaturanstieg ging mit **reduzierter Artenvielfalt** einher. Dagegen führte ein extensives Management unter Klimawandelbedingungen zu keiner Ertragssteigerung, aber zu höherer Resilienz gegenüber Trockenheit. Auf Schnittwiesen ausgebrachter organischer **N-Dünger düngt zunächst den Boden**, sodass die Pflanzen maßgeblich durch Mineralisierung des Bodenhumus ernährt werden. Zusammen mit hohen Dünger-N-

Verlusten (primär NH_3 und N_2) fördert dies v.a. unter intensiver Bewirtschaftung und im Klimawandel einen **Netto-Verlust von Boden-N- und C-Vorräten**. Dies ist auf intensiv bewirtschafteten Standorten durch eine reduzierte Diversität und funktionelle Vielfalt des Mikrobioms zu erklären, während mehr Nitrat für die mikrobielle Denitrifikation (mit gasförmigen N-Verlusten) verwendet wird. **Alternative Düngemethoden** (z.B. Festmist, Gülleverdünnung, bodennahe Ausbringung) sowie weniger Schnitte sind effektive Maßnahmen zur Reduzierung von Nährstoffverlusten.

Im Gegensatz zu gedüngten Schnittwiesen zeigt die extensive Wiederbeweidung einer revitalisierten Projektalm einen signifikanten **Zuwachs der C-Speicherung** bei geringer NO_3^- -Produktion und **konstant hoher Artenvielfalt**. Daher wird Wiederbeweidung aufgegebener Almen zur Reduktion des Treibhausgas-Fußabdrucks der Milchproduktion empfohlen. Die Erkenntnisse der Feldstudien wurden für die Entwicklung eines **prozessbasierten Modells** zur Bewertung von Grünlandfunktionen genutzt. Für regionale Modellanwendungen wurden Fernerkundungsdaten (Schnittthäufigkeit) sowie ein agentenbasiertes Modell (Verteilung von Wirtschaftsdünger) dazu verwendet schlaggenaue Informationen des Grünlandmanagements abzuleiten. Die Simulationen bestätigen **Ertragsrückgänge unter Trockenheit**, die bei gleichbleibender Düngepaxis zu erhöhten Stickstoffverlusten (z.B. N_2O und NO_3^-) führen. Humusreichere Böden hingegen zeigen eine höhere Resilienz gegenüber Dürre. Gemeinsam mit Stakeholdern wurde aus dem Modell das **benutzerfreundliche webbasierte Grünland-Bewertungs-System** (dss.susalps.de/) entwickelt, das es Praktikern ermöglicht, Einflüsse des Managements und des Klimas auf Grünlandfunktionen zu bewerten.

Titel: SUSALPS – Nachhaltige Nutzung von alpinen und voralpinen Grünlandböden unter sich änderndem Klima

Laufzeit: November 2015 – Januar 2025

Budget: 9,3 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Karlsruher Institut für Technologie (KIT), Technische Universität München, Universität Bayreuth, Helmholtz Zentrum München, WWL Umweltplanung und Geoinformatik GbR, Julius-Maximilians-Universität Würzburg, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL)

Website: bonares.de/susalps

Ausblick

SUSALPS konnte durch den interdisziplinären Ansatz mit sozioökonomischen Studien, Feldmessungen, Fernerkundung und Modellierung in enger Zusammenarbeit mit Landwirten und Behörden ein besseres Verständnis der Auswirkungen von Management und Klima auf Grünlandfunktionen erarbeiten. Dank der langen Förderzeit wurden belastbare und praxisrelevante Ergebnisse erzielt, die in konkrete Handlungsempfehlungen übertragen werden konnten. Das entstandene Netzwerk aus Wissenschaft und Praxis bildet derzeit die Grundlage zur Etablierung eines Reallabors.



SOIL³ – Ertragssicherung durch Unterbodenmanagement

Trockene Sommer stellen die Landwirtschaft vor Herausforderungen. Im Unterboden liegen oft ungenutzte Wasser- und Nährstoffressourcen. SOIL³ bietet mögliche Lösungen an: Unterböden können durch mehrjährige Kulturen mit tiefen Wurzeln oder Tiefenlockerung mit Einbringen von Kompost erschlossen werden.

Ziel und Weg

Weltweit steigende Bevölkerungszahlen erfordern größere Anstrengungen, um den resultierenden Bedarf an Nahrungsmitteln umweltverträglich und nachhaltig zu decken. Jedoch nimmt in Deutschland und weltweit der je Einwohner verfügbare Flächenanteil für den Ackerbau ab. Zudem steigt das Risiko von Ernteausfällen durch trockene Sommer, Düngemittel werden knapper und teurer. Ackerböden speichern erhebliche Mengen an Wasser und Nährstoffen nicht nur im Pflughorizont, sondern vor allem in tieferen Bodenbereichen – im Unterboden. Ziel von SOIL³ ist es, den Unterbodenzugang für Nutzpflanzen zu verbessern und so die Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden zu steigern.

In mehrjährigen Feldversuchen wurden biologische Unterbodenmelioration durch tiefwurzelnde Luzerne sowie technische streifenweise Unterbodenmelioration mit Komposteinbringung getestet. Für letztere entfern-

te eine speziell entwickelte und patentierte Maschine zunächst den Oberboden, lockerte den Unterboden bis in 60 cm Tiefe und mischte ihn mit organischem Dünger, bevor der Oberboden zurückgeführt wurde.

Die Versuche fanden auf verschiedenen Böden mit unterschiedlichen Klimabedingungen (Klein-Altendorf, Thyrow, Praxisstandorte) statt und wurden ergänzt durch Auswertungen von Langzeitfeldversuchen und der Bodenzustandserhebung Landwirtschaft.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die innovative SOIL³-Methode vergrößert das von den Pflanzen nutzbare Bodenvolumen, indem sie durch die Unterbodenlockerung den **Eindringwiderstand für die Wurzel verringert**, und durch die Komposteinbringung **Nährstoff-Hotspots schafft** sowie die Wasserspeicherung erhöht.

Sowohl in den Lössböden des Bonner Raumes als auch in sandigen Böden Brandenburgs wuchsen die Wurzeln der Nutzpflanzen bevorzugt in die Meliorationsstreifen und ermöglichten so ein **verbessertes Pflanzenwachstum**. Insgesamt waren die Erträge bei Getreide um 20 bis 25% im Vergleich zur nicht meliorierten Kontrolle erhöht, was für eine **verbesserte Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden** spricht. Auch 7 Jahre nach der Unterbodenmelioration wurde im Mittel noch ein Mehrertrag von 22% erzielt. In Thyrow wurde für Mais im ersten Jahr sogar eine Ertragssteigerung von über 50% erzielt. Bei diesen Ertragssteigerungen sowie Verfahrenskosten von 700 bis 800 Euro pro Hektar zzgl. der Kosten für das eingebrachte organische Düngemittel kann davon ausgegangen werden, dass sich die **SOIL³-Technik nach 3 bis 5 Jahren amortisiert**.

Die SOIL³-Technik ist im Vergleich zu herkömmlichen Eingriffen in den Unterboden weniger invasiv und verzögert eine Rückverdichtung des Unterbodens, vermutlich durch den Kompost und die intensive Durchwurzelung im Bereich der Meliorationsstreifen. Sie fördert sowohl die **Kohlenstoffspeicherung** im Unterboden als auch das **Bodenleben**. Es gibt keine Hinweise auf Risiken durch Pflanzenpathogene oder erhöhte Nitratauswaschung, dafür aber Anzeichen für eine verbesserte Wasser- und damit Nitrataufnahme durch die Pflanze, sowie verstärkte mikrobielle Immobilisierung des Stickstoffs im Unterboden. Einschränkungen können durch die limitierte Verfügbarkeit von Meliorationsmaterialien entstehen. Momentan besteht durch das Inkrafttreten der neuen Bundesbodenschutzver-



Wuchshöhen von Mais ein Jahr nach mechanischer Unterbodenmelioration mit (rechts) und ohne Biokompost (Mitte) im Vergleich zur Kontrolle (links).

ordnung (BBodSchV) im August 2023 eine **unklare Rechtslage** für das Einbringen von organischen Materialien in den Unterboden. Es konnte bislang nicht geklärt werden, ob die BBodSchV, die Düngeverordnung oder die Bioabfallverordnung greift.

Als Zielregion für die SOIL³-Technik wurde vor allem der **nordostdeutsche Raum** ermittelt, wo sandige Böden und trockene Sommer die Agrarproduktion häufig limitieren. Im Unterschied dazu wurde an lehmigen und schluffigen Standorten der Unterbodenzugang vor allem durch tiefwurzelnde Vorfrüchte verbessert, d.h. diese Standorte eignen sich insbesondere für eine biologische Unterbodenmelioration oder eine Kombination aus SOIL³-Technik mit Luzerneanbau. Die stickstofffixierende **Luzerne schafft Bioporen** und begünstigt ebenfalls Ertragssteigerungen von nachfolgendem Getreide in Trockenjahren.

Titel: SOIL³ – Nachhaltiges Unterbodenmanagement

Laufzeit: Oktober 2015 – Januar 2025

Budget: 13 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Technische Universität München, Forschungszentrum Jülich GmbH, Freie Universität Berlin, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Ecologic Institute, Humboldt-Universität zu Berlin, Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung e.V.

Website: bonares.de/soil3

Ausblick

Durch die Kombination aus Tiefenlockerung und Komposteinbringung können v.a. an trockenen, sandigen Standorten die Erträge gesteigert und so ein Beitrag zu einer nachhaltigen Landwirtschaft geleistet werden. Wichtig ist die Überprüfung der regionalen Eignung sowie der Rechtslage. Aufgrund anhaltender Ertragssteigerung sehen wir großes Marktpotenzial für die SOIL³-Technik, während Luzerneanbau neben ertragssteigernden Effekten auch aufgrund weiterer Vorteile wie Kohlenstoffspeicherung, Beikrautregulierung und Stickstofffixierung breit gefördert werden sollte.



I4S – Mit Sensortechnologien die Bodenfruchtbarkeit messen

Im Projekt I4S entwickeln Forschende ein System zur ortsspezifischen Steuerung der Bodenfruchtbarkeit. Es nutzt Bodensensoren, Modelle und ein nutzerfreundliches Entscheidungsunterstützungssystem, um Ressourcen effizienter zu nutzen, Umweltbelastungen zu mindern und die landwirtschaftliche Produktivität zu optimieren.

Ziel und Weg

Auf vielen landwirtschaftlichen Betrieben wird der Ackerschlag konventionell flächeneinheitlich bewirtschaftet. Dabei bleibt jedoch die teilweise erhebliche Variabilität der Bodeneigenschaften und damit des Düngebedarfs innerhalb des Schlages unberücksichtigt. Dies führt oft zu ineffizienter Düngung: Einige Flächen erhalten zu viel Dünger, was Ressourcen verschwendet und zu Umweltbelastung führt, während andere unterversorgt bleiben, wodurch das Ertragspotenzial nicht ausgeschöpft wird.

Eine ortsspezifische Bewirtschaftung kann die Düngung an diese unterschiedlichen Bedarfe anpassen. Dafür ist es notwendig, die Bodenvariabilität hochauflösend zu erfassen. Laboranalysen sind hierfür zu teuer und aufwändig. Bodensensoren bieten eine schnelle und kostengünstige Lösung. Obwohl diese Technologien verfügbar sind, werden sie jedoch in der Land-

wirtschaft noch kaum angewendet. Um die Akzeptanz von Präzisionslandwirtschaft in der Praxis zu erhöhen, müssen die hochauflösenden Sensordaten in ein leicht zu bedienendes Entscheidungsunterstützungssystem eingebunden werden, das auf die Bedürfnisse der Landwirtinnen und Landwirte zugeschnitten ist.



RapidProfiler-Sensorplattform für das Scannen von Bodenprofilen

Das Ziel des Projekts „I4S – Intelligence for Soil“ ist deshalb die Entwicklung eines Systems, das ortsspezifische Empfehlungen zur Düngung und anderer Bewirtschaftungsmaßnahmen gibt, um die Bodenfruchtbarkeit zu erhalten und Umweltbelastungen zu mindern.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Im Rahmen von I4S wurde eine **Multisensorplattform**, der sogenannte **RapidMapper**, für die hochauflösende Kartierung des Oberbodens entwickelt und getestet. Er ist die weltweit einzige Sensorplattform, die mit den vier Sensortechnologien pH-Elektroden, elektrische Leitfähigkeit, Nahinfrarot- und Gammaskopie ausgestattet ist (vgl. großes Bild S.18).

Mit dieser Kombination kann eine Reihe von Bodeneigenschaften verlässlich erfasst werden, darunter Bodentextur, Humusgehalt, pH-Wert und Makronährstoffe. Gerade durch die Fusion der Daten verschiedener Sensoren kann die Qualität der abgeleiteten **Bodeneigenschaftskarten** zukünftig weiter verbessert werden.

Neben diesen etablierten Sensoren forscht das Projekt auch an **neuen Technologien für die Bodenkartierung** wie Röntgenfluoreszenz, laserinduzierte Plasmaspektroskopie und Raman-Spektroskopie. Diese Sensoren bieten die Möglichkeit, noch präzisere Daten zu sammeln und die Vorhersagbarkeit von Bodeneigenschaften weiter zu verbessern.

Eine weitere Innovation des Projekts ist die Entwicklung einer zweiten Multisensorplattform, dem sogenannten **RapidProfiler**, der es ermöglichen wird, **Bodenprofile bis in eine Tiefe von einem Meter zu scannen**. Diese vielfältigen Daten können genutzt werden, um 3D-Bodenkarten vom gesamten Wurzelraum zu erzeugen.

Zur besseren Nutzung der Sensordaten wurden in I4S Boden-Pflanze-Modelle integriert, welche die Dynamik von Nährstoffen und Wasser im Laufe der Vegetationsperiode simulieren. Auf Grundlage der Sensordaten, statischer und dynamischer Modelle wurde ein Entscheidungsunterstützungssystem entwickelt, mit dem Bodeneigenschaftskarten und hochauflösende Düngeapplikationskarten erstellt werden können.

Ausblick

Die Vision von I4S ist es, sensorbasierte Bodenkartierung in der landwirtschaftlichen Praxis zu etablieren. Durch die Entwicklung benutzerfreundlicher Entscheidungssysteme, die Sensordaten, Bodenkarten und Düngealgorithmen kombinieren, soll die Bodenbewirtschaftung präziser werden. Dies unterstützt eine nachhaltigere Landwirtschaft, welche sowohl wirtschaftliche Vorteile erzielt als auch Umweltbelastungen verringert und Bodenfunktionen verbessert.

Titel: I4S– Intelligence for Soil

Laufzeit: Juli 2015 – Februar 2025

Budget: 11 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Leibniz-Institut für Agrartechnik und Bioökonomie e.V. (ATB); Bundesanstalt für Materialforschung und -prüfung (BAM), Ferdinand-Braun-Institut gGmbH, Leibniz-Institut für Höchstfrequenztechnik; Forschungsverbund Berlin e.V.; Hahn-Schickard-Gesellschaft für angewandte Forschung e.V.; Technische Universität München; Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn; Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg; Universität Potsdam; Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF) e.V.

Website: bonares.de/i4s



SOILAssist – Bodenschutz durch intelligente Landwirtschaft

Wie lässt sich der Bodenschutz bei der Befahrung von Ackerflächen optimieren? Welche Werkzeuge braucht die Praxis für die Planung und Umsetzung einer nachhaltigen Bodenbewirtschaftung? On-farm research auf Praxisbetrieben des Konsortiums SOILAssist mit aktueller Landtechnik und innovativen Verfahren liefert dazu Antworten.

Ziel und Weg

In den letzten Jahrzehnten sind landwirtschaftliche Maschinen immer größer und schwerer geworden. Sie können hohe Lasten in den Boden eintragen und unter ungünstigen Bedingungen zu Verdichtung führen, was die Bodenstruktur schädigt und die Funktionsfähigkeit sowie das ökonomische und ökologische Leistungsvermögen des Bodens einschränkt. Zudem erfordern teure Spezialmaschinen eine hohe Auslastung, was dazu führt, dass Ackerflächen oft zu suboptimalen Zeiten befahren werden. Hier setzt SOILAssist an. Ziel ist es, den landwirtschaftlichen Bodenschutz bei der Befahrung von Ackerflächen ganzheitlich zu betrachten. Das bedeutet, die Bodenstruktur durch angepasstes Management zu erhalten und negative Veränderungen zu erkennen und zu vermeiden. Dafür wurden auf Ackerflächen in Niedersachsen und Schleswig-Holstein Methoden untersucht (z.B. Befahrungsversuche, UAV-Befliegungen, Interviews), um bodenschonende Verfahren praxisnah

zu bewerten und weiterzuentwickeln. Darauf basierend wurden Tools und Modelle zur Befahrungsplanung auf verschiedenen Skalen und zur Optimierung während der Feldbefahrung entwickelt. Zudem fließen die SOILAssist-Erkenntnisse mit Informations- und Unterrichtsmaterial in die Praxis und die Politikberatung ein.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Der Bodenschutz kommt bei der Befahrung von Ackerflächen oft zu kurz, sei es durch zu hohe Bodenfeuchten, Radlasten und Überrollhäufigkeiten der eingesetzten Technik oder den Termindruck durch Wetter oder Liefertermine. Bodenverdichtung ist ein räumlich und zeitlich sehr **dynamischer Prozess**. Modellergebnisse aus SOILAssist mit den Modellen FiTraM, SaSCiA und SDiF zu Befahrungsintensität, Verdichtungsgefährdung und bodenphysikalischen Veränderungen von der Feld- bis zur nationalen Skala, zeigen eine **hohe**

Heterogenität der Belastungen und Gefährdungen durch Befahrung. Diese treten sowohl innerhalb von Ackerflächen als auch zeitlich innerhalb der Saison und zwischen den Jahren auf.

Um Verdichtungen zu vermeiden, müssen daher **Maschinenbelastungen an die aktuellen Bodenbedingungen angepasst** werden. SOILAssist entwickelte ein Assistenzsystem, das Maschinenparameter und Fahrtrouten optimiert. Sensoren zeigen die aktuelle Bodenbelastung an, und das System schlägt konkrete Maßnahmen wie **Reifeninnendruckanpassung oder Reduzierung der Maschinenlast** vor, wie z.B. Verringerung der Bunkerkapazität. Durch die **Optimierung der Fahrtrouten** aller Fahrzeuge kann die Gesamtbelastung des Feldes deutlich verringert werden. Basierend auf dem aktuellen Feldzustand stellt ein Routenplanungstool jedem Fahrzeug optimierte Routen zur Verfügung, um die negativen Auswirkungen der Befahrung zu minimieren. Eine Prozessüberwachung erkennt kritische Zustände, passt Parameter an und ermöglicht auch die Online-Neuplanung bei teilweise abgeernteten Feldern.

Die Entscheidungsmatrix „Befahrbarkeit“ wurde entwickelt, um Landwirten ein Planungswerkzeug für vorausschauendes, bodenschonendes Management zu bieten. Dazu wird die Verdichtungsempfindlichkeit des Bodens der Bodenbelastung durch Landmaschinen für unterschiedliche Kulturen, Arbeitsgänge und Techniken taggenau gegenübergestellt. Kurzfristige Vorhersagen zur Befahrbarkeit (isabel.dwd.de) können die **aktuelle Arbeitsplanung** unterstützen, Informationen



Teilweise Begrünung des Vorgewendens

zu mittleren Befahrbarkeitstagen (daten.ktbl.de/feldarbeitstage/) sind Grundlagen für die **Investitions- und Einsatzplanung von Maschinen**. Bewirtschafter sind sich einig, dass Bodenbelastungen vermieden werden sollten, stehen jedoch bzgl. der Umsetzung oft in Konfliktsituationen, was die Anwendung von Maßnahmen erschwert. Planungstools werden dabei als hilfreich angesehen. In der Aus- und Fortbildung werden wichtige Bodenparameter zu Verdichtungsfolgen nicht immer umfassend thematisiert. **Neue Lehrmaterialien** aus dem SOILAssist Projekt unterstützen zukünftig bei der Wissensvermittlung. In SOILAssist wurden relevante Maßnahmen identifiziert, die den Bodenschutz bei der Befahrung von Ackerflächen stärken und Verdichtungen vermeiden. Sie umfassen technische, Management- sowie acker- und pflanzenbauliche Maßnahmen. Entscheidend ist die **ganzheitliche Betrachtung des Anbausystems** – von der Technik über Verfahren und Planung bis zur Umsetzung auf dem Feld.

Ausblick

Das SOILAssist-Projekt liefert wichtige Erkenntnisse zu den Auswirkungen unterschiedlicher Befahrungen im Ackerbau auf den Boden. Es wurden praxisnahe Tools und Modelle entwickelt, um die Bewirtschaftung zu optimieren und Bodenschädigungen zu verringern. Zudem entstanden Formate, um aktuelle Forschungsergebnisse in Praxis und Ausbildung zu integrieren. Dies stärkt den Bodenschutz und bietet Lösungen für Problemfelder wie Bodenverdichtung und Erosion. Vor dem Hintergrund des Klimawandels und steigenden politischen und gesellschaftlichen Anforderungen, liefert SOILAssist einen Baustein für eine nachhaltigere Bodennutzung im Ackerbau.

Titel: SOILAssist – Nachhaltige Sicherung und Verbesserung von Bodenfunktionen durch intelligente Landbewirtschaftung

Laufzeit: Juli 2015 – Januar 2025

Budget: ca. 7 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Johann Heinrich von Thünen-Institut Bundesforschungsinstitut für Ländliche Räume, Wald und Fischerei, Christian-Albrechts-Universität Kiel (CAU), Universität Osnabrück (UOS), Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI)

Website: bonares.de/soilassist



DiControl – Mikrobielle Gemeinschaft und Pflanzengesundheit stärken

Derzeit wissen wir sehr wenig darüber, wie pflanzenbauliche Maßnahmen die Boden-Mikrobiota sowie Pflanzenwachstum und -gesundheit beeinflussen. Das Konsortium DiControl hat in Langzeitversuchen dazu interessante Einblicke zutage gefördert.

Ziel und Weg

Boden ist die wichtigste Ressource für die Produktion von Nahrungsmitteln. Die Vielzahl an Mikroorganismen (Bakterien, Pilze) im Boden (Boden-Mikrobiota) sind an nahezu allen Bodenprozessen beteiligt und daher von enormer Bedeutung für Bodenfruchtbarkeit und damit für Pflanzenwachstum und -gesundheit. Mikroorganismen stellen nicht nur die für das Pflanz-

zenwachstum notwendigen Nährstoffe bereit, sondern helfen der Pflanze besser mit Stressbedingungen umzugehen. Um das nützliche Potential der Boden-Mikrobiota in der landwirtschaftlichen Praxis zu nutzen, ist ein besseres Verständnis des Einflusses von Anbaumaßnahmen auf die Boden-Mikrobiota notwendig. Dieses zu erarbeiten ist Ziel des Projektes DiControl. In Langzeitversuchen wurde der Einfluss von Bodenbearbeitung, Düngungsregime, Vorfrucht und die Anwendung von nützlichen Mikroorganismen auf die mikrobielle Gemeinschaft im Boden und in der Rhizosphäre untersucht. Die Rhizosphäre ist der Raum, in dem die Pflanze mit dem Boden und deren Mikroorganismen interagiert. Im Projekt wurden insbesondere die Wechselwirkung der Pflanze mit der mikrobiellen Gemeinschaft in der Rhizosphäre und deren Einfluss auf Pflanzenwachstum und -gesundheit untersucht. Zu den Versuchsstandorten gehörte der Langzeitversuch der Hochschule Anhalt in Bernburg sowie die Demonstrationsanlage „Ackerbausysteme“ der HU Berlin in Thyrow.



Modellpflanze Mais im Langzeitversuch der Hochschule Anhalt in Bernburg.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Charakteristisch für den Boden eines jeden Standortes ist eine bestimmte mikrobielle Gemeinschaft. Anbaumaßnahmen wie Bodenbearbeitung, Düngungsregime und Vorfrucht verändern diese Gemeinschaften. Im Vergleich zur herkömmlichen N-Düngung und pflügender Bodenbearbeitung zeigte sich bei einer **nicht-wendenden Bodenbearbeitung und reduzierter N-Düngung eine höhere mikrobielle Biomasse** im Boden. Dies wirkte sich positiv auf Pflanzenwachstum und die -gesundheit aus. Auch organische im Vergleich zu mineralischer Düngung förderte die Pflanzengesundheit. Veränderungen in der Boden-Mikrobiota waren auch durch die Vorfrucht in Bezug auf das Auftreten von pilzlichen Gattungen mit bekannten Pflanzenpathogenen zu beobachten. Mais z.B. führt zur Anreicherung von Septoria im Boden während die Vorfrucht Raps Verticillium unterstützte. Anbaumaßnahmen beeinflussen die Mikrobiota der Rhizosphäre. Deren Zusammensetzung und Komplexität unterscheidet sich deutlich von der im Boden, da die Pflanze einen selektiven Einfluss ausübt. Die Pflanze selektiert über Wurzelausscheidungen bestimmte Mikroorganismen aus dem Boden und unterstützt spezifische Gemeinschaften in der Rhizosphäre. Projektergebnisse zeigen, dass insbesondere die **Bodenbearbeitung die Profile der Wurzelausscheidungen verändert**. So scheidet Winterweizen im Boden unter nicht-wendender Bodenbearbeitung eine höhere Menge an bioaktiven

sekundären Metaboliten aus. Die dadurch bedingte veränderte Pflanzen-Mikroorganismen-Interaktion in der Rhizosphäre wirkte sich positiv auf die Pflanzengesundheit aus. Analysen von physiologischen Stressindikatoren unterstreichen die höhere Toleranz dieser Pflanzen gegenüber Stressfaktoren. Die positive Wirkung von nützlichen Mikroorganismen auf die Pflanze ist vielfach belegt, doch wird oft von variierenden Wirkungen unter Feldbedingungen berichtet. Voraussetzung für eine positive Wirkung von applizierten nützlichen Mikroorganismen auf die Pflanze ist deren Etablierung in der Rhizosphäre. Im Rahmen des Projektes wurde die Wirkung eines Konsortiums aus **drei nützlichen Mikroorganismen** (*Bacillus atrophaeus* ABi03, *Pseudomonas* sp. RU47, *Trichoderma harzianum* OMG16) in Abhängigkeit von der Anbaupraxis und dem Anbaujahr auf einem Standort untersucht. Unabhängig von diesen Faktoren war eine erfolgreiche Etablierung der einzelnen Mikroorganismen in der Rhizosphäre gegeben. Perioden von Trockenheit reduzieren die Nährstoffverfügbarkeit für die Pflanze und verursachen physiologische Stressreaktionen. Unter diesen Bedingungen konnte gezeigt werden, dass die Behandlung der Pflanzen mit dem Konsortium nicht nur das **Wachstum verbesserte**, sondern auch die **Stressreaktion der Pflanze deutlich reduzierte**. Unter mehr optimalen Wachstumsbedingungen war in den mit dem Konsortium behandelten Pflanzen eine verbesserte Pflanzengesundheit nachzuweisen.

Ausblick

Das Projekt DiControl hat relevante wissenschaftliche Ergebnisse zum Einfluss von Anbaumaßnahmen auf die Boden-/Rhizosphären-Mikrobiota und deren Wirkung auf die Pflanze-Mikroorganismen-Interaktion in der Rhizosphäre unter Berücksichtigung der Pflanzengesundheit gewonnen. Pflanzenbauliche Maßnahmen wie nicht-wendende Bodenbearbeitung und reduzierte N-Düngung als auch die Anwendung von nützlichen Mikroorganismen als Konsortium können die Resilienz von Anbausystemen unterstützen.

Des Weiteren wurde gezeigt, dass die Anwendung von nützlichen Mikroorganismen als Konsortium die Pflanze im Umgang mit Stressfaktoren unterstützt. Die Ergebnisse können die nachhaltige Bewirtschaftung von derzeitigen Anbausystemen fördern und zu deren Resilienz beitragen.

Titel: DiControl – Auswirkungen des pflanzenbaulichen Managements sowie der Anwendung mikrobieller Biokontrollstämme auf Bodengesundheit und Suppressivität gegenüber Pathogenen

Laufzeit: Mai 2015 – Februar 2025

Budget: ca. 5,6 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Leibniz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau (IGZ) e.V.; Hochschule Anhalt University of Applied Sciences (AUAS), Julius Kühn-Institut (JKI), Universität Hohenheim, Helmholtz Zentrum München; Universität Bielefeld, Zeppelin Universität

Website: bonares.de/dicontrol



ORDIAMur – Nachbaukrankheit bei Apfel verstehen und bekämpfen

Was verursacht die Nachbauprobleme in Baumschulen und Obstbaubetrieben, die wiederholt in demselben Boden Apfel anbauen? Das interdisziplinäre Team von ORDIAMur hat sich mit dem komplexen Thema befasst und basierend auf neuesten Erkenntnissen nachhaltige Gegenmaßnahmen entwickelt und getestet.

Ziel und Weg

In Obstbaumschulen und Apfelanlagen drohen weltweit große Verluste, wenn Apfel in Böden gepflanzt wird, auf denen vorher bereits Apfel angebaut wurde. Die Ursachen dieser Nachbauprobleme sind nicht vollständig aufgeklärt, und nachhaltige Managementmaßnahmen fehlen. Im BonaRes-Projekt ORDIAMur sollten Alternativen zur chemischen Bodendesinfektion entwickelt werden, die auf einem besseren Verständnis der Apfelnachbaukrankheit beruhen und ökonomisch und ökologisch vertretbar sind. Dazu haben sich Forschende aus 14 deutschen Hochschulen und Forschungseinrichtungen mit dem Thema befasst. An drei Standorten wurden durch wiederholten Apfelanbau nachbaukranke Referenzflächen geschaffen und Kontrollparzellen angelegt, auf denen kein Apfel kultiviert wurde. Im Boden aus diesen Flächen wurden Humus, Nährstoffe und Struktureigenschaften erfasst sowie die Organismen, vor allem Nematoden, Pilze und Bakterien, mit klassischen

Isolationsansätzen und modernen Sequenzierungstechniken charakterisiert. Pflanzen, die in Nachbau- und Kontrollböden gewachsen sind, wurden auf Unterschiede in der Genexpression und in den Gehalten sekundärer Inhaltsstoffe in Wurzeln untersucht. Wichtige Partner waren zudem Betriebe, die für Risikoanalysen befragt und in denen Gegenmaßnahmen getestet wurden.



Apfelwurzels-Wachstum im Nachbau-Boden (rechts) im Vergleich zum Kontrollboden (links).

Die wichtigsten Erkenntnisse

Je nach Verfügbarkeit neuer Flächen ist die Nachbaurkrankheit in der Apfel- und mehr noch in der Obstbaumerzeugung ein Problem, für das eine kommerziell verfügbare Diagnostik und wirtschaftliche, zuverlässig wirksame Gegenmaßnahmen fehlen. Die **Unternehmen** gehen mit Nachbaurisiken überwiegend **pragmatisch** um. Apfelwurzeln reagieren auf die Nachbaurkrankheit und produzieren **phenolische Inhaltsstoffe, darunter Abwehrstoffe (Phytoalexine)**, die zum Teil in den Boden abgegeben werden. Dieser Abwehrmechanismus junger Pflanzen wird jedoch zum Problem, wenn die genannten Substanzen an der Schnittstelle Boden – Pflanzenwurzel zur Anreicherung von Mikroorganismen führen, die in der Lage sind, diese Substanzen zu tolerieren. Die Diversität des Rhizosphärenmikrobioms, das wichtige Funktionen für das Pflanzenwachstum bereitstellt, ist dadurch reduziert. Interessant ist, dass mikrobielle Gene, die Enzyme für den Abbau phenolischer Substanzen codieren, weniger stark in Nachbau-Böden abgelesen werden. Auffällig war, dass die Nachbaurkrankheit ein sehr **lokal auftretendes Phänomen** ist. Sowohl das Ungleichgewicht in den Bodenorganismen als auch die Reaktion der Pflanze sind örtlich stark begrenzt. Es wurden Mikroorganismen isoliert, die die beobachteten Defizite ausgleichen könnten, wenn man Boden oder Pflanzen mit ihnen animpft: Ein Inokulum, bestehend aus einem Bakterienstamm, der phenolische Verbindungen abbauen kann, einem pflanzenwachstumsfördernden Bakterienstamm und arbuskulären Mykorrhizapilzen, wurde in Gewächshausversuchen getestet. Dieses **Inokulum** zeigt positive Effekte bei der Behandlung der Nachbaurkrankheit ebenso wie ein zweites Inokulum aus einer Mischung bereits bekannter pflanzenwachstumsfördernder Bakterien und Pilze. Versuche unter Feldbedingungen auf den Referenzflächen und bei Praxispartnern lassen allerdings bisher nur teilweise positive Wirkungen der Inokulationen erkennen. Eine weitere derzeit geprüfte Möglichkeit, ein **resilientes, vielfältiges Bodenmikrobiom wiederherzustellen**, besteht in der Kultur von **Zwischenfrüchten**, insbesondere Zwischenfruchtmischungen in Kooperation mit dem BonaRes-Projekt CATCHY. Auch bei den größeren Bodenlebewesen bestehen deutliche Unterschiede in den Gemeinschaften von Nematoden und Springschwänzen in Nachbau- und Kontrollböden. Die in der Literatur postulierte Beteiligung phytopathogener Nematoden konnte nicht bestätigt werden.

Vielmehr sind bestimmte **freilebende Nematoden** und die mit ihnen assoziierten Mikroorganismen von Bedeutung. **Tolerante Pflanzen** wären ein nachhaltiger Lösungsansatz. Deshalb wurden Apfelunterlagen und -wildarten in nachbaurkrankten Böden getestet. Keiner der getesteten Genotypen war auf allen Böden tolerant. Einzelne Genotypen waren jedoch in bestimmten Böden überlegen. Das Konsortium konnte zeigen, dass Apfelpflanzen in nachbaurkrankten Böden stark veränderte Genexpressionsmuster aufweisen, die es erlaubten, **Indikatorgene** zu identifizieren mit denen die Schwere der Nachbaurkrankheit, aber auch die Effektivität von Gegenmaßnahmen bewertet werden kann.

Ausblick

Das Projekt ORDIAmur läuft noch bis Ende März 2025. Derzeit laufen Auswertungen eines großen Zentralexperiments, mit dem Faktoren identifiziert werden sollen, die das Risiko für Nachbaurkrankheit vorherzusagen helfen. Damit soll den Produzenten die Anbauplanung erleichtert werden. Darüber hinaus läuft die Testung der abgeleiteten Managementmaßnahmen, die darauf abzielen, das Bodenleben diverser und resilienter zu machen.

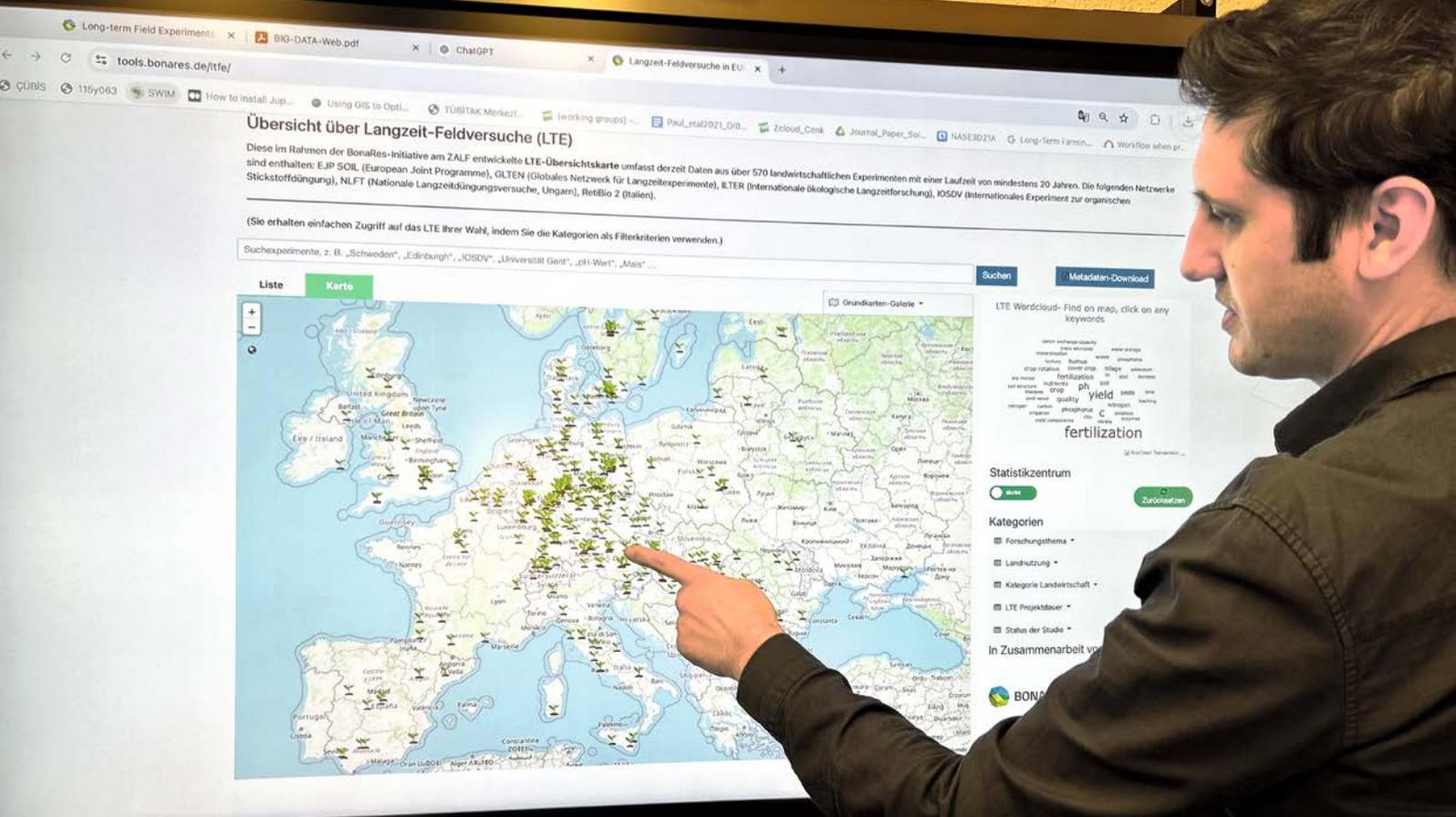
Titel: ORDIAmur – Überwindung der Nachbaurkrankheit mithilfe eines integrierten Ansatzes

Laufzeit: November 2015 – März 2025

Budget: ca. 10,2 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover, Landwirtschaftskammer Schleswig Holstein, Julius Kühn-Institut, Helmholtz-Zentrum München, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung, Universität Bayreuth, Technische Universität Braunschweig, Hochschule für Wirtschaft und Technik Dresden, Zentrum für Betriebswirtschaft im Gartenbau e.V., Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, Hochschule Bonn-Rhein-Sieg, Technische Universität Dortmund, Leibniz-Zentrum für Agrarlandwirtschaftsforschung (ZALF) e.V., Humboldt Universität zu Berlin

Website: bonares.de/ordiamur



BonaRes-Zentrum für Bodenforschung

Das virtuelle BonaRes-Zentrum ist das koordinierende Projekt innerhalb von BonaRes und unterstützt die Projekte bei der Forschung zur nachhaltigen Bodennutzung. Es stellt Forschungsergebnisse, Daten, Modelle und Anwendungen über ein Webportal bereit und fördert das Bewusstsein für den Boden als nachhaltige Ressource in der Öffentlichkeit.

Ziel und Weg

Das übergeordnete Ziel des BonaRes-Zentrums ist die Etablierung einer Akteursgemeinschaft, die die wissenschaftlichen Grundlagen für ein nachhaltiges Bodenmanagement verbessert und dabei die Produktivität landwirtschaftlich genutzter Flächen sowie den Erhalt weiterer wesentlicher Bodenfunktionen berücksichtigt. Als wichtige Produkte werden gemeinsam mit den Verbundprojekten Datenbestände und Modellwerkzeuge entwickelt, um die Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf die Bodenfruchtbarkeit und andere Bodenfunktionen zu bewerten und vorherzusagen. Daraus werden Handlungsempfehlungen für die Landwirtschaft und Politik abgeleitet. Um dieses Ziel zu erreichen, stärkt das BonaRes-Zentrum das öffentliche Bewusstsein für den Boden als Ressource. Es unterstützt und integriert die Grundlagenforschung der Verbundprojekte und stellt ein Datenrepository bereit, über das frei verfügbare bodenbezogene Daten, einschließlich der Daten landwirtschaftlicher Dauerfeldversuche, zugänglich sind. Weiterhin liefert es soft-

waregestützte Entscheidungshilfen (Modelle) für die Praxis, die auf aktuellen wissenschaftlichen Erkenntnissen beruhen und geeignete Indikatoren zur Bewertung der Bodenfunktionen und der Auswirkungen von Bewirtschaftungsmaßnahmen liefern. Alle entwickelten Infrastrukturen und Produkte sind langfristig über das BonaRes-Portal bonares.de zugänglich.



Öffentliche Diskussionsveranstaltung mit Buchautoren.

Die wichtigsten Erkenntnisse

Die große Herausforderung des Systemansatzes von BonaRes war, Forschende verschiedener boden- und landwirtschaftsbezogener Disziplinen zusammenzubringen und eine **gemeinsame Sprache** zu finden. Dieses wurde neben der interdisziplinären Zusammenarbeit innerhalb der Projekte über **thematische Workshops, gemeinsame Publikationen, Statusseminare und Konferenzen** erreicht.

Es wurde ein bodenbezogenes **Repositorium für Forschungsdaten und Langzeit-Feldexperimente**, eine **Online-Karte europäischer Dauerfeldversuche** und eine **Bodenprofildatenbank** eingerichtet (*bonares.de/research-data*). Über diese Plattform werden die Daten der BonaRes- und Rhizo4Bio-Verbünde sowie externer Projekte nach neuesten Standards zur freien Nachnutzung bereitgestellt.

Eine besondere wissenschaftliche Herausforderung des BonaRes-Zentrums lag in der **Zusammenführung des vorhandenen und neu gewonnenen Wissens über Bodenprozesse** und ihre komplexen Wechselwirkungen. Ein Hauptaugenmerk lag auf dem Verständnis der Bedeutung von Bodenorganismen und deren Interaktion in einer physikalisch und chemisch sehr heterogenen Umgebung. Es wurde die "Knowledge Library" (*klibrary.bonares.de*) eingerichtet, eine **frei zugängliche Wissensdatenbank**, die das in der Literatur vorhandene Wissen über den Einfluss von Bewirtschaftungsmaßnahmen auf Bodenfunktionen standortspezifisch zusammenfasst.

In Zusammenarbeit mit den Verbundprojekten wurden die **Modellwerkzeuge BODIUM und BODIUM4Farmers** (*bonares.de/bodium*) entwickelt, die in der Lage sind, die Auswirkungen von Bodenbewirtschaftungsmaßnahmen auf die Bodenfunktionen vorherzusagen, wobei die lokalen Bedingungen in Bezug auf Bodentyp, Landnutzung und Klima berücksichtigt werden. Als wichtige Grundlage für die Modellierung wurden mit Hilfe verschiedener Methoden der Regionalisierung **hochauflösende Karten relevanter Bodeneigenschaften** für die Skala von Deutschland erzeugt. Der systemische Ansatz berücksichtigt auch die **Wechselwirkungen mit den sozialen und wirtschaftlichen Systemen**, die einen erheblichen Einfluss auf Entscheidungen in der Bodenbewirtschaftung und damit auf die natürliche Umwelt haben. Bodenfördernde Bewirtschaftungsop-

tionen werden auf ihre sozialen, ökonomischen und ökologischen Wirkungen auch unter zukünftig zu erwartenden Rahmenbedingungen analysiert, und auf dieser Basis werden politische Steuerungsinstrumente vorgeschlagen. Damit kann ein wichtiger Beitrag zum nachhaltigen Interessenausgleich zwischen Ökonomie und Ökologie erwartet werden.

Über verschiedene **Maßnahmen der Öffentlichkeitsarbeit**, wie Messeauftritten, der Erstellung von Merkblättern und Lehrmaterialien, der Citizen Science-Aktion „Expedition Erdreich“ sowie der Schirmherrschaft über den Boden des Jahres 2024 „Ackerboden“ hat das BonaRes-Zentrum zur Wahrnehmung des Bodens als essenzielle Ressource beigetragen. Produkte und Dienstleistungen sowie wissenschaftliche Ergebnisse des BonaRes-Programms werden über ein **Web-Portal** (*bonares.de*) dauerhaft zur Verfügung gestellt.

Ausblick

Das BonaRes-Zentrum für Bodenforschung hat mit dem Datenrepositorium, der Online-Karte der Dauerfeldversuche, den BODIUM- und BODIUM-4Farmers-Modellen, dem Assessment Portal und dem BonaRes-Webportal wichtige Strukturen für eine nachhaltige Bodennutzung geschaffen, die durch die Projektpartner auch langfristig zur Verfügung gestellt werden. Durch die integrierende Arbeit des BonaRes-Zentrums ist eine interdisziplinäre Gemeinschaft aus Forschenden und weiteren Akteuren entstanden, die fachkundige Expertise zur nachhaltigen Bodenbewirtschaftung liefern kann.

Titel: BonaRes-Zentrum für Bodenforschung

Laufzeit: Juli 2015 – Januar 2025

Budget: ca. 21,1 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Helmholtz Zentrum für Umweltforschung – UFZ (Koordination), Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung (ZALF), Technische Universität München, Senckenberg Museum für Naturforschung, Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe, Justus-Liebig-Universität Gießen

Website: bonares.de/bonares-centre



Rhizo4Bio: Den Lebensraum Wurzel verstehen und nachhaltig nutzen

Pflanzenwurzeln sind bedeutende Schnittstellen im Ökosystem Boden und Ansatzpunkt für Ackerbau und Bodenmanagement. Das Zusammenspiel aus Pflanzenwurzeln und deren unmittelbarer Umwelt ist ein biologischer Schlüsselprozess, den Forschende besser verstehen und nutzen wollen, um die Landwirtschaft nachhaltiger zu gestalten. Die Erforschung der Wurzel-Boden-Kontaktzone steht daher im Mittelpunkt der BMBF-Fördermaßnahme „Pflanzenwurzeln und Bodenökosysteme: Bedeutung der Rhizosphäre für die Bioökonomie – Rhizo4Bio“.

Der biologisch aktivste Teil des Bodens ist die sogenannte **Rhizosphäre**. Das ist der Bereich des Bodens, der direkt von einer lebenden Wurzel beeinflusst wird. Er erstreckt sich in der Regel einige wenige Millimeter um das Wurzelgewebe herum. Hier finden Wechselwirkungen zwischen der Pflanze, dem Boden und einer dichten mikrobiellen Gemeinschaft statt, die von der Pflanze aktiv durch Wurzelausscheidungen (Exsudate) gesteuert werden kann.

Die vielen organischen Verbindungen, welche die Pflanzen dem Boden zuführen, machen die Rhizosphäre zu einem **Ort erhöhter Aktivität von Bodenorganismen** – dem Edaphon. Zu den wichtigsten Bodenbewohnern zählen Mikroorganismen wie Bakterien, Archaeen, Pilze sowie wirbellose Tiere wie Würmer und Insekten. Sie sind am Ab- und Umbau der organischen Substanz im Boden beteiligt und tragen mit ihrer Stoffwechselaktivität zur dauerhaften Bodenfruchtbarkeit bei.

An der Schnittstelle zwischen Boden, Pflanze und Bodenorganismen laufen Prozesse ab, die das Wachstum, die Nährstoffaufnahme und die Toleranz der Pflanzen gegenüber biotischem und abiotischem Stress beeinflussen. Die Prozesse in der Rhizosphäre haben einen erheblichen Anteil an der Ertragsbildung von Nutzpflanzen. Diese Vorgänge zu verstehen und sogar zu steuern, birgt ein enormes Potenzial für die nachhaltige Landwirtschaft.

Wechselwirkungen von Wurzel und Umwelt erforschen

Hier setzt die Fördermaßnahme „**Rhizo4Bio**“ an: Im Rahmen seiner Bioökonomie-Forschungsförderung fördert das Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) damit **sechs interdisziplinäre Forschungsverbände**, die angewandte Grundlagenforschung betreiben. Dafür stellt das BMBF in zwei Förderphasen über sieben Jahre rund 20 Millionen Euro bereit.

Das wichtigste Ziel: Mit ihrer Forschung wollen die sechs Verbände dazu beitragen, die unterirdischen Interaktionen zwischen Pflanzenwurzeln und deren unmittelbarer Umwelt aus Boden und Bodenorganismen aufzuklären. Denn wer diese Prozesse besser

versteht, kann sie nutzen, um die Pflanzenproduktivität zu erhöhen. Zudem hilft das Wissen, um Schädlinge besser abzuwehren und Nutzpflanzen widerstandsfähiger gegenüber abiotischem Stress als Folge von Wetterextremen zu machen. Auch eröffnen sich neue Wege, um den Gebrauch von Mineraldünger und Pestiziden zu verringern. Deshalb adressieren die sechs Verbände anwendungsorientierte Themenfelder in der Landwirtschaft, für die Rhizosphären-Prozesse von Bedeutung sind. Dazu zählen:

- Stickstoff- und Kohlenstoffkreislauf im Kontext von Biodiversität, Bodenstruktur und Management
- Ressourcennutzungseffizienz landwirtschaftlicher Pflanzenbestände
- Nachhaltige Wachstumsunterstützung der Kulturpflanze durch gesunde Böden
- Minimierung negativer Umweltauswirkungen bei der landwirtschaftlichen Produktion

Zur Unterstützung dieser Forschungsarbeiten wird zusätzlich eine mobile Service-Plattform zur Bohrkernentnahme für die Wurzel- und Bodenanalyse entwickelt.

Auf den folgenden Seiten dieser Broschüre stellen die Rhizo4Bio-Verbundprojekte ihre Forschungsaktivitäten und bisherigen Ergebnisse in kompakten Porträts vor. Die Konsortien sind eng mit der „BonaRes“-Forschungscommunity verknüpft. Informationen und der Datenschatz aus Rhizo4Bio-Projekten sind über das BonaRes-Webportal verfügbar.

BMBF-Förderung zu Rhizo4Bio im Überblick

6 Forschungsverbände wurden im Rahmen von Rhizo4Bio gefördert. Hinzu kommt eine mobile Service-Plattform zur Bohrkernentnahme für die Wurzel- und Bodenanalyse.

20 Mio. Euro hat das BMBF seit dem Jahr 2020 in die Fördermaßnahme investiert, die über insgesamt sieben Jahre laufen wird.

15 Forschungseinrichtungen sind beteiligt.



Rhizo4Bio-Projekt BreadAndBeer

Saatgut-Beimpfung für bessere Kornqualität

Im organischen Landbau erfolgt der Anbau von Winterweizen und Sommergerste bei geringer Stickstoffdüngung. Infolge des Klimawandels ist mit erhöhtem Stress, insbesondere durch häufigere Dürrezeiten zu rechnen. Aus Gewächshausexperimenten ist bekannt, dass das Bakterium *Hartmannibacter diazotrophicus* abiotischen Stress bei Getreide mildern und Stickstoff fixieren kann.

Um die Experimente vom Gewächshaus in die Praxis zu übertragen, bewertet der Forschungsverbund das Potenzial der Beimpfung von Saatgut mit dem *H. diazotrophicus* in Feldexperimenten an verschiedenen Standorten. Neben dem Kornertrag stehen die Kornqualität als Backweizen und Braugerste sowie die Überlebensfähigkeit des beimpften Bakteriums und dessen Interaktion mit der Pflanzenwurzel im Fokus der Analysen. Zusätzliche

Analysen des Mikrobioms der Rhizosphäre sollen zum Verständnis der potenziellen Auswirkungen der Beimpfung auf das natürliche Bodenmikrobiom beitragen.

Durch die Beimpfung des Saatguts wurden im Feldexperiment über drei Jahre signifikant erhöhte Gehalte an Rohprotein, Stärke und Amylose im Kornertrag nachgewiesen, während der Ertrag im Vergleich zu unbeimpften Varianten nur geringfügig erhöht war. Die Proteinfractionen Gliadin und Glutenin waren im Weizenkorn signifikant erhöht. Da Gliadine zur Teigviskosität und Glutenine zur Teigelastizität beitragen und darüber hinaus das Teigvolumen erhöht war, wurde die Backqualität von Winterweizen durch die Beimpfung verbessert. Mittels quantitativer molekularer Methoden konnte das Bakterium *H. diazotrophicus* 273 Tage nach der Aussaat an der Weizenwurzel und an den Wurzeln der Sommergerste noch bis zum Tag 119 nach der Aussaat nachgewiesen werden. Zum Zeitpunkt der Getreideblüte bzw. Milchreife wurde das Mikrobiom der Rhizosphäre mittels molekularer Methoden analysiert. Hierbei zeigte sich eine unverändert hohe Diversität der Bakterien und kein Einfluss durch *H. diazotrophicus*.

Der Forschungsschwerpunkt wird nun auf eine potentiell verbesserte Trockenresistenz von Gerste gelegt, wobei die Interaktion zwischen *H. diazotrophicus* mit der Pflanze näher analysiert wird. Weitere Feldexperimente an anderen Standorten sollen die positiven Ergebnisse auf die Ertragsqualität bestätigen.

Projekttitle: BreadAndBeer – Produktion von Weizen und Gerste mit reduziertem Input im ökologischen Landbau

Laufzeit: Februar 2020 – Juli 2027

Budget: ca. 1 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Justus-Liebig Universität Gießen (Koordination), Universität Hohenheim

Website: bonares.de/bread-and-beer

Rhizo4Bio-Projekt CROP

Weizen-Wurzelphänotypen: Der Mix macht's

Die Anpassung von Wurzelsystemen in Pflanzenbeständen ist ein wichtiger Ansatzpunkt zur Erhöhung der Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz, um Agrarökosysteme widerstandsfähiger gegen Extremwetterereignisse wie Trockenstress zu machen und Nährstoffverluste zu minimieren. Das Forschungsprojekt „CROP“ zielt darauf ab, die Resilienz von Agrarsystemen gegenüber Trockenstress zu verbessern sowie die Kohlenstoffstabilisierung im Boden und die Stickstoffnutzungseffizienz zu erhöhen.

Zentraler Ansatz ist der kombinierte Anbau von Weizensorten mit komplementären Wurzelsystemen (flach- und tiefwurzelnd). Das interdisziplinäre Forschungsteam verbindet Labor- und Feldexperimente mit mathematischer Modellierung, um Austausch- und Transportprozesse von Wasser, Kohlenstoff und Stickstoff sowie die mikrobielle Abundanz und Aktivität im System Boden-Pflanze zu analysieren.

Die bisherigen Ergebnisse zeigen, dass komplementäre Wurzelsystemarchitekturen mit geeigneten Weizensorten umgesetzt werden können. Der Anbau des tiefwurzelnden Weizengentyps erhöhte die Wasseraufnahme und die Aktivität mikrobieller Enzyme in tieferen Bodenschichten. Dieses Ergebnis deutet auf eine nutzbringende Auswirkung auf die Wasseraufnahmedy-

namik und den mikrobiellen Nährstoffumsatz hin. Das mathematische Modell ermöglichte die Simulation von Pflanzenarchitektur und -wachstum, Photosynthese, gekoppelten Wasser- und Stoffflüssen innerhalb der Pflanze, der Rhizodeposition und dem Wachstum und der Aktivität der Mikroorganismen im Boden.

In der zweiten Phase des Projekts testen die Projektpartner das neue Anbausystem mit zwei zentralen Feldexperimenten unter Stickstofflimitierung und Trockenstress. Das integrierte strukturell-funktionelle Pflanzen- und Bodenmikrobiommodell wird um zwei wesentliche Prozesse erweitert (Freisetzung von Biopolymeren, Wachstum von arbuskulären Mykorrhizapilzen). CROP trägt damit zu einem besseren Verständnis des Nutzens von Sortenmischungen mit komplementären Wurzelarchitekturen bei und stellt ein Prognosewerkzeug zur Verfügung.

Projekttitle: CROP – Kombination von komplementären Wurzelphänotypen für widerstandsfähigere Agrarökosysteme

Laufzeit: März 2020 – September 2027

Budget: ca. 2,9 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Forschungszentrum Jülich GmbH, Universität Hohenheim, University of Queensland (Australien), Justus-Liebig-Universität Gießen

Website: bonares.de/crop



Rhizo4Bio-Projekt RhizoTraits

Vielfalt im Wurzelraum für zukunftsfähige Anbausysteme

Infolge des Klimawandels werden Getreidepflanzen längeren und häufigeren Dürrezeiten ausgesetzt sein. Wie gut sie diesen Stress überstehen, hängt von ihren Wechselwirkungen mit Wasser, Nährstoffen, Bakterien und Pilzen im Boden ab. Der Forschungsverbund „RhizoTraits“ will der unterschiedlich ausgeprägten Widerstandsfähigkeit von Getreidesorten genauer auf den Grund gehen. Dazu untersuchen die Forschenden unter der Leitung der Universität Bayreuth, welche Eigenschaften von Wurzeln und der angrenzenden Rhizosphäre Pflanzen widerstandsfähiger für Klimaveränderungen machen. Alte Getreidesorten sind die Hoffnungsträger der Forschenden. Die Annahme ist, dass in alten Sorten noch Eigenschaften vorhanden sind, die ein wichtiger Schlüssel für die Trockenresistenz der Pflanzen sein können. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf großen Phänotypisierungs-Experimenten. Hier wachsen in bierkastengroßen Boxen alte und moderne Maissorten, entweder unter optimaler Bewässerung oder unter Trockenstress. Durch Glasscheiben an den Seiten der Boxen kann das Wurzelwachstum dokumentiert werden. Zudem werden Wurzeleigenschaften, wie die Wurzellänge und Exsudation (Ausscheidung organischer Verbindungen) aufgenommen, die Mikroorganismen im Wurzelbereich analysiert und Wasserflüsse vom Boden

in die Pflanzen gemessen. Die Erträge der Sorten, die unter Trockenstress im Phänotypisierungs-Experiment besonders auffallen, testet das Team in groß angelegten Feldversuchen auf verschiedenen Böden und unter verschiedenen klimatischen Bedingungen. Die erhobenen Daten werden zur Verbesserung eines Modells eingesetzt, das voraussagt, wie sich vorteilhafte Wurzeleigenschaften auf die Erträge unter aktuellen und zukünftigen klimatischen Szenarien auswirken. Zudem analysieren die Forschenden die historische Entwicklung der Ertragsdaten von Getreidepflanzen in Bayern, um Rückschlüsse auf die langfristigen Veränderungen ziehen zu können. Die gewonnenen Erkenntnisse sollen in Empfehlungen für die landwirtschaftliche Praxis und die Pflanzenzüchtung umgesetzt werden, um so zu einer Verbesserung der Qualität und Quantität von Ernteerträgen unter Klima-Extremen beizutragen.

Projekttitle: RhizoTraits – Rhizosphären-Merkmale erhöhen die Resilienz der Erträge in modernen Anbausystemen

Laufzeit: Februar 2020 – April 2027

Budget: 3,8 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Universität Bayreuth (Koordination), Technische Universität München, Karlsruher Institut für Technologie, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft

Website: bonares.de/rhizotraits





Rhizo4Bio-Projekt RhizoWheat

Vorfruchtwirkungen verstehen und prognostizieren

Winterweizen ist flächenmäßig die weltweit bedeutendste Feldfrucht und steht bei der Produktionsmenge an zweiter Stelle. Auf globaler Ebene ist seit einigen Jahren eine Abnahme der Steigerung der Produktionsmenge zu beobachten, welche in den letzten Jahren die für die Sicherung der Welternährung als notwendig erachtete Produktionssteigerung von 1–1,5% pro Jahr unterschritten hat.

Die vor Winterweizen angebaute Frucht hat einen großen Einfluss auf die Erträge, wobei insbesondere unter Trockenstressbedingungen negative Wirkungen einer Getreidevorfrucht besonders stark sind. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf einer Kombination von langjährigen Feldversuchen auf zwei Standorten mit kontrastierenden Vorfrüchten zu Winterweizen sowie auf Versuchen unter kontrollierten Bedingungen z.B. in sogenannten Rhizoboxen, in denen Bodenmaterial aus den Feldversuchen genutzt wird. Die Rhizoboxen ermöglichen es, sehr detaillierte Beobachtungen und Messungen direkt an der Wurzel und im Wurzelumfeld, der sogenannten Rhizosphäre vorzunehmen.

In den Versuchen werden umfangreiche Messungen zur Ertragsbildung, zum Wurzelwachstum, zu verschiedenen Bodenparametern und zur Zusammensetzung des Bodenmikrobioms und der Enzymaktivität in der Rhizosphäre und im Gesamtboden mit innovativen Methoden vorgenommen. Hierbei reicht die Beobachtungsskala vom Pflanzenbestand im Parzel-

lenversuch bis hinunter auf die molekulare Ebene. Die in den Versuchen gewonnenen Daten sollen für die prozessorientierte Modellierung der Ertragsbildung von Winterweizen nach unterschiedlichen Vorfrüchten genutzt werden. Der Schwerpunkt liegt hierbei auf einer verbesserten Abbildung der Wurzelfunktion.

Erste Ergebnisse zeigen eine komplexe Wechselwirkung zwischen direkten stofflichen Effekten der Vorfrucht, einer Verschiebung des Mikrobioms sowie einer modifizierten Genregulation in der Pflanze mit negativen Effekten einer Getreidevorfrucht auf Wurzelwachstum und Ertragsbildung.

Projekttitle: RhizoWheat – Rhizosphärenprozesse und Ertragsdepressionen in Weizenfruchtfolgen

Laufzeit: März 2020 – Februar 2027

Budget: ca. 5,7 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel (Koordination), Verein der Zuckerindustrie e.V. – Institut für Zuckerrübenforschung, Forschungszentrum Jülich GmbH, Julius Kühn-Institut Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen (JKI)

Website: bonares.de/rhizowheat



Rhizo4Bio-Projekt RootWayS

Zwischenfrüchte erleichtern den Unterbodenzugang

Das Ziel des Projekts ist es, optimale Zwischenfruchtmischungen für den Maisanbau zu entwickeln. Durch die Wurzelkanäle tiefwurzelnder Zwischenfruchtmischungen soll der Zugang der Folgefrucht Mais zum Unterboden und den dort gespeicherten Wasser- und Nährstoffressourcen erleichtert werden. Angesichts zunehmender Trockenperioden in Folge des Klimawandels soll hierdurch die Versorgung des Mais sichergestellt werden. In den Zwischenfruchtmischungen wird das Prinzip der Nischenkomplementarität genutzt. Flach- und tiefwurzelnde Zwischenfrüchte (Kreuzblütler, Gräser, Leguminosen) werden kombiniert, um tiefeichende

Wurzelkanäle auch während der kurzen Wintersaison zu generieren. Die chemische und mikrobiologische Charakterisierung der Zwischenfruchtwurzelkanäle und ihrer Wechselwirkungen mit der Rhizosphäre von Mais gibt hierbei Aufschluss über die Nutzbarkeit von Zwischenfruchtwurzelkanälen durch die Folgefrucht Mais. Mittels Tracermethoden wurde der schnelle und effiziente Zugang von Mais zu unterirdischen Nährstoffen und Wasser über die Wurzelkanäle der Zwischenfrüchte dokumentiert. Mittels drohnengestützter Thermografie wurde eine Hochskalierung der Wasser- und Nährstoffnutzung durch Mais auf die Feldebene entwickelt. Die Einbindung dieser Daten in Anbaumodelle ermöglicht eine Vorhersage des Maisertrags in Abhängigkeit von der Bewirtschaftung. Die Ergebnisse des Projektes lassen darauf schließen, dass insbesondere Zwischenfruchtmischungen mit Gräsern das Potenzial haben, für Mais als Folgefrucht die Nährstoff- und Wasseraufnahme aus dem Unterboden zu verbessern und zur längerfristigen Kohlenstoffspeicherung im Unterboden beizutragen. Das Projekt RootWayS konzentrierte sich in der ersten Förderphase auf winterharte Zwischenfrüchte, um Stickstoff-Verluste im Frühjahr zu minimieren. Die Einbeziehung von nicht winterharten Zwischenfrüchten kann jedoch die Fähigkeit der Hauptkulturen verbessern, die durch die Wurzeln der Zwischenfrüchte generierten Bioporen zu besiedeln und wiederzuverwenden. In der zweiten Förderphase sollen nun die erprobten Zwischenfruchtmischungen mit nicht winterharten Mischungskomponenten ergänzt werden.

Projekttitle: RootWayS – Wir machen den Weg frei: Tiefwurzelnde Zwischenfruchtmischungen erleichtern den Zugang zu Unterbodenressourcen

Laufzeit: April 2020 – März 2027

Budget: ca. 3,7 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Georg-August-Universität Göttingen, Eberhard Karls Universität Tübingen, Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH (UFZ), Forschungsinstitut für biologischen Landbau Frick

Website: bonares.de/rootways

Rhizo4Bio-Projekt μ Plastic

Mikroplastik-Effekte verstehen

Mikroplastik (Plastikteilchen kleiner als 5 mm) ist ein Problem globalen Ausmaßes; Neben marinen Ökosystemen sind vor allem landwirtschaftliche Böden besonders mit diesen Partikeln belastet, da sie nicht nur passiv eingetragen werden, sondern auch Teil des landwirtschaftlichen Managements sind. Der Forschungsverbund „ μ Plastic“ untersucht die Auswirkungen von Mikroplastikpartikeln insbesondere in der Rhizosphäre, der Schnittstelle zwischen Pflanzen und Boden.

Dazu untersuchen die Forschenden unter der Leitung der Freien Universität Berlin, welche Veränderungen in Bodenprozessen und in der mikrobiellen Biodiversität von unterschiedlichen Mikroplastik-Partikeln im Wurzelraum wichtiger Kulturpflanzen hervorgerufen werden. Ferner erfasst der Forschungsverbund Konsequenzen für Ertrag und Pflanzenqualität. Der Schwerpunkt des Projektes liegt auf Gewächshausexperimenten, aber auch Labor- und Mesokosmen-Versuche im Freiland werden durchgeführt. Die Böden, wichtige Agrarbö-

den Deutschlands, werden im Rahmen des Projektes mit Weizen und anderen Kulturpflanzen kultiviert nachdem Sie mit verschiedenen Mikroplastikpartikeln versetzt wurden. Ziel ist es unter anderem zu verstehen, (a) in welchen Böden (b) bei welchen Kulturpflanzen die Mikroplastikeffekte besonders ausgeprägt sind und (c) warum und wie Mikroplastik mit anderen abiotischen und biotischen Bodenfaktoren wechselwirkt. Das Team untersucht dafür das Boden- und Wurzel-assoziierte Mikrobiom inklusive der arbuskulären Mykorrhizapilze und setzt diese Daten mit Pflanzenwachstum und wichtigen Rhizosphärenprozessen in Bezug. Bereits zu Projektbeginn konnte eine richtungsweisende Einordnung von Mikroplastik in die Reihe anderer Umweltverschmutzungen vorgenommen werden: Mikroplastik hat zum Teil völlig andere Wirkmechanismen als andere chemische Schadstoffe. Es konnte gezeigt werden, dass Mikroplastikeffekte auf das Wachstum von Weizenpflanzen sehr stark vom Bodentyp abhängen, sogar die Richtung der Effekte (von positiv bis negativ) war stark vom Bodentyp beeinflusst. Auch Bodeneigenschaften wie Bodenaggregation und hydraulische Leitfähigkeit hingen sehr stark vom Bodentyp ab. In weiteren Versuchen soll nun erforscht werden, welche Mechanismen hauptsächlich für diese Effekte verantwortlich sind, und wie sich Kulturpflanzen in ihren Reaktionen auf Mikroplastik unterscheiden.

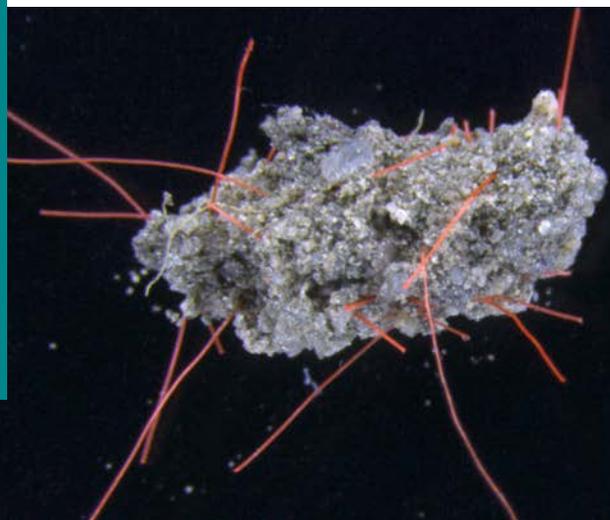
Projekttitle: μ Plastic – Verständnis der Effekte von Mikroplastik auf Rhizosphärenprozesse und -wechselwirkungen in landwirtschaftlichen Böden

Laufzeit: Februar 2020 – Januar 2027

Budget: 2 Mio. Euro

Kooperierende Institutionen: Freie Universität Berlin (Koordination), Helmholtz Zentrum München, Forschungszentrum Jülich GmbH

Website: bonares.de/microplastic



Ausblick: Boden als Zukunftsthema

Mehr als neun Jahre angewandte Bodenforschung im Rahmen der BMBF-Fördermaßnahmen BonaRes und Rhizo4Bio haben eindrucksvolle Spuren hinterlassen: Das belegen nicht nur mehr als 700 Publikationen in Fachjournalen. Mehrfach wurden Forschende aus den Konsortien für ihre Arbeiten mit Nachwuchspreisen ausgezeichnet. Konferenzen und Tagungen haben dazu beigetragen, die Bodenforschungscommunity in Deutschland zu vernetzen und zu stärken. Gleichzeitig gab es vielfältige Kooperationsveranstaltungen mit der praktischen Landwirtschaft. Mit Aktionen wie „Boden des Jahres 2023 – Der Ackerboden“, die „Expedition Erdreich“ oder Messeauftritten, Ausstellungen und Wissenschaftskommunikation ist es zudem gelungen, in der breiten Öffentlichkeit das Bewusstsein für die Bedeutung der Böden zu schärfen. Das Wissen aus der angewandten Bodenforschung steht der Politik zur Verfügung, zum Beispiel für die anstehende Reform des Bundesbodenschutzgesetzes (BBodSchG) von 1998.

Trotz Auslaufens der BonaRes-Förderung im Jahr 2025 kann die Bodenforschung hierzulande auch in Zukunft von den aufgebauten Strukturen profitieren: Die Dateninfrastrukturen werden in den kommenden sechs Jahren erhalten und im Rahmen von institutioneller Förderung verstetigt. Das Datenrepositorium wird künftig vom Leibniz-Zentrum für Agrarlandwirtschaftsforschung (ZALF) weitergeführt. Auch die Existenz der Datenbank Dauerfeldversuche und der Bodenprofil-Datenbank ist gesichert. Das Wissen ist auch weiterhin über das BonaRes-Webportal zugänglich. Die systemische Modellierung mit den Modellen BODIUM und BODIUM4Farmers sowie der Betrieb der Knowledge Library werden am Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung – UFZ weitergeführt, und auch der Austausch innerhalb der wissenschaftlichen Community soll fortgesetzt werden.

Perspektive Europa

Die Bodenforschung aus BonaRes und Rhizo4Bio hat international eine hohe Sichtbarkeit erlangt. Viele

der Akteure sind bereits stark in den Europäischen Forschungsraum eingebunden. Auf EU-Ebene ergeben sich auch in Zukunft vielfältige Fördermöglichkeiten für Bodenforschende. Das gilt insbesondere für das Rahmenprogramm für Forschung und Innovation „Horizont Europa“. In der Bodenmission „A Soil Deal for Europe“ geht es darum, bis 2050 die Gesundheit und Wiederherstellung der Böden in der EU zu erreichen. Um die Ziele der EU-Kommission umzusetzen, sollen bereits bis zum Jahr 2030 einhundert sogenannte Living Labs und Leuchttürme entstehen, die Lösungen für die Bodengesundheit und ein nachhaltiges Bodenmanagement erarbeiten. Im Jahrestakt werden von der EU-Kommission Aufrufe zur Einreichung von Vorschlägen für die Living Labs veröffentlicht. Fördermöglichkeiten für Bodenforschende eröffnen zudem die sogenannte Klima-Mission, die Gewässer-Mission sowie andere Ausschreibungen im Cluster 6 („Lebensmittel, Bioökonomie, natürliche Ressourcen, Landwirtschaft und Umwelt“) von Horizont Europa. In den sogenannten Partnerschaften als Förderinstrument ist die Ressource Boden ebenfalls relevant, etwa in der Partnerschaft „AGROECOLOGY“. Der Weg zu fruchtbaren und gesunden Böden ist eine internationale Aufgabe – für eine zukunftsfähige Landwirtschaft und eine nachhaltige Bioökonomie.

Nationale Kontaktstelle Bioökonomie und Umwelt

Die Nationale Kontaktstelle Bioökonomie und Umwelt berät und informiert zu den Themen und Ausschreibungen des Clusters 6 von „Horizont Europa“ und den Missionen „A Soil Deal for Europe“ und „Restore our Ocean and Waters“. Der kostenfreie und vertrauliche Service umfasst individuelle Beratung zu kleinen und großen Fragen, die Durchsicht von Skizzen und Anträgen sowie ein umfassendes Angebot an Informations- und Schulungsveranstaltungen.

nks-bio-umw.de

Impressum

Herausgeber

Bundesministerium
für Bildung und Forschung (BMBF)
Referat Nachhaltiges Wirtschaften; Bioökonomie
11055 Berlin

Diese Publikation wird als Fachinformation des Bundesministeriums für Bildung und Forschung kostenlos herausgegeben. Sie ist nicht zum Verkauf bestimmt und darf nicht zur Wahlwerbung politischer Parteien oder Gruppen eingesetzt werden.

Bestellungen

schriftlich an
Publikationsversand der Bundesregierung
Postfach 48 10 09
18132 Rostock
E-Mail: publikationen@bundesregierung.de
Internet: bmbf.de
oder per
Tel.: 030 18 272 272 1
Fax: 030 18 10 272 272 1

Stand

November 2024

Text

Informationsplattform bioökonomie.de
c/o BIOCOM Interrelations GmbH

BonaRes-Zentrum für Bodenforschung
und die Forschungskonsortien aus den Fördermaßnahmen
BonaRes und Rhizo4Bio

Redaktionelle Begleitung

Projekträger Jülich

Gestaltung

BIOCOM Interrelations GmbH

Druck

BMBF

Bildnachweise

Titel: UFZ/André Künzelmann
S.2: Kletr - stock.adobe.com
S. 4: BIOCOM Interrelations GmbH/Oliver Päßler
S. 6: Norman Gentsch
S. 7: Dörte Schwenecker
S. 8: Rüdiger Reichel
S. 9: Rüdiger Reichel
S. 10: Marcus Schmidt/Edzo Veldkamp
S. 12: Nora Vitow
S. 13: K. Panten
S. 14: A. Bramsiepe; M. Dannenmann
S. 16: Universität Bonn/Oliver Schnittmann
S. 17: ZALF/Michael Sommer
S. 18: ATB/Robin Gebbers, ATB/ManuelGutjahr
S. 20/21: Thünen
S. 22: JKI Braunschweig/Doreen Babin
S. 24: Lukas Lühs/PLOS ONE Lucas et al. CC BY 4.0
S. 26: ZALF/Katrin Christin Meier; Ute Wollschläger
S. 28: Oleg Malshakov - stock.adobe.com
S. 30: Silvia Schnell
S. 31: Adrian Lacher
S. 32: Nicolas Tyborski
S.: 33: Klaus Sieling
S. 34: CAU/Iris Zimmermann
S. 35: Anika Lehmann

