



Unterbodenmanagement

Grundlagen, Entscheidungshilfen
und sozio-ökonomische Aspekte

Martina I. Gocke¹, Sara L. Bauke¹, Miriam Athmann², Michael Baumecker³, Anne E. Berns⁴, Axel Don⁵, Thomas Gaiser¹, Holger Gerdes⁶, Julien Guigue⁷, Farshid Jahanbakhshi¹, Timo Kautz³, David-Paul Klein³, Ingrid Kögel-Knabner⁷, Matthias Rillig⁸, Michael Schlöter⁷, Oliver Schmittmann¹, Andrea Schnepf⁴, Kathlin Schweitzer³, Sabine Seidel¹, Tobias Selzner⁴, Laura Skadell⁵, Michael Sommer⁹, Amit Srivastava¹, Wulf Amelung¹

¹Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, ²Universität Kassel, ³Humboldt-Universität zu Berlin, ⁴Forschungszentrum Jülich, ⁵Thünen-Institut, ⁶Ecologic Institute, ⁷Technische Universität München, ⁸Freie Universität Berlin, ⁹Leibniz-Zentrum für Agrarlandschaftsforschung



Gefördert durch:



Bundesministerium
für Forschung, Technologie
und Raumfahrt



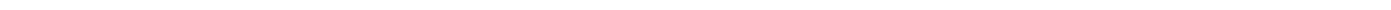
Gefördert durch:



Zusammenfassung

Liebe Leserinnen und Leser,

dieses Handbuch vermittelt Grundkenntnisse über den Unterboden und praxisrelevante Aspekte der Unterbodenmelioration. Es wird das Potential des Unterbodens für die Wasser- und Nährstoffversorgung von Nutzpflanzen und somit seine Rolle für eine nachhaltige Landwirtschaft erläutert. Es wird ein Überblick über bereits existierende Maßnahmen der Unterbodenmelioration gegeben, und zwar sowohl über mechanische als auch biologische, auf tiefwurzelnden Vorfrüchten basierende Verfahren. Basierend auf über neun Jahren Forschung im Verbundprojekt Soil³ wird die darin entwickelte mechanische Methode zur Unterbodenmelioration – eine streifenweise tiefe Bodenlockerung mit Einbringung von organischem Material – hinsichtlich ihrer Funktionsweise, bisherigen Erfolgen sowie möglichen Risiken vorgestellt. Um potentiellen Anwenderinnen und Anwendern die Möglichkeit zu geben, individuell zu entscheiden, ob ihr Betrieb für eine Art der Unterbodenmelioration geeignet ist und Ertragsanstiege zu erwarten sind, wurde eine frei zugängliche deutschlandweite online *Impact Assessment Platform* entwickelt.



Glossar

Ackerkrume	gepflügter, oberster Bereich des Bodens
Biopore	durch Regenwürmer oder Wurzeln entstandener Hohlraum
Bodenhorizont	meist oberflächenparallel verlaufende Zone, die durch jeweils mehr oder weniger einheitliche, aber typische Eigenschaften und Merkmale charakterisiert ist und sich dadurch von darüber und darunter liegenden Zonen unterscheidet
Bodenverdichtung	Prozess, durch den die Lagerungsdichte des Bodens zunimmt, das Porenvolumen abnimmt und sich die Porengrößenverteilung verändert; kann durch Pflügen, Überfahrten mit schweren Maschinen oder auf natürliche Weise (z.B. Sackung) auftreten
BZE-LW	Bodenzustandserhebung-Landwirtschaft
Durchwurzelungstiefe	standortabhängige Tiefe, bis zu der die Wurzeln in den Boden eindringen können
Humus	im Boden akkumulierte, mehr oder weniger stark umgewandelte organische Substanz
Melioration	Bodenkulturmaßnahmen, die der Verbesserung des Wasser- und Nährstoffhaushaltes sowie der Bodenstruktur dienen
Bodenmikroorganismen	Bakterien, Pilze, Protisten etc. – alle Organismen < 50 µm, die im Boden leben
Oberboden	oberster, humoser Bereich des Bodens
Pflugsohle	verdichtete Bodenschicht zwischen gepflügtem Oberboden und dem Unterboden
Unterboden	beginnt unter der Ackerkrume bzw. unterhalb des Humushorizontes
Wurzelhemmende Schicht	natürliche oder durch Menschen verursachte Barriere im Boden, die das vertikale Wurzelwachstum verhindert

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	2
Glossar	3
1. Warum Unterbodenmanagement?	5
2. Der Unterboden in landwirtschaftlich genutzten Böden	6
2.1 Der Unterboden	6
2.2 Ressourcen und ihre Zugänglichkeit im Unterboden	6
2.3 Optionen der Unterbodenbewirtschaftung	7
3. Die SOIL ³ -Technik	10
3.1 Durchführung	10
3.2 Bisherige Erfolge	12
3.3 Chancen, Unsicherheiten und ökologische Risiken	12
3.4 Rechtliche Rahmenbedingungen	13
4. Regionale Entscheidungshilfen	15
4.1 Auswahl der organischen Düngemittel	16
4.2 Bisherige Erfahrungen mit Erträgen und Ertragsqualität	17
4.3 Nachhaltigkeit der Effekte	17
4.4 Kosten des Verfahrens	17
5. Die <i>Impact Assessment Platform</i>	19
Referenzen	21
Weiterführende Literatur	22
Impressum	23

1. Warum Unterbodenmanagement?

Weltweit steigende Bevölkerungszahlen verlangen größere Anstrengungen, um den daraus resultierenden steigenden **Bedarf an Nahrungsmitteln sozial- und umweltverträglich sowie nachhaltig zu decken**. Gleichzeitig sinkt in Deutschland und weltweit die je Einwohner verfügbare Ackerfläche, die auf Gewinnmaximierung ausgerichtete Intensivierung der Pflanzenproduktion führt verstärkt zu Bodendegradation, und Klimawandel, der sich in Deutschland unter anderem in der Zunahme von heißen und trockenen Sommern äußert, erhöht das Risiko von Ertragsverlusten. Darüber hinaus nimmt die Verfügbarkeit von Düngemitteln ab bzw. die Kosten hierfür steigen.

Die Bewirtschaftung landwirtschaftlicher Böden findet hauptsächlich im Oberboden, der sogenannten Ackerkrume statt, welche in der Regel nicht tiefer als 30 cm ist. In diesem Bodenvolumen entwickeln sich bevorzugt Pflanzenwurzeln und finden dort die Ressourcen, die unter günstigen klimatischen Bedingungen und bei ausreichendem Ressourceneinsatz, zum Beispiel über Düngemittel, die Produktivität landwirtschaftlicher Systeme weitgehend sicherstellen.

Tiefere Bodenbereiche unterhalb des Pflughorizontes – der Unterboden – beinhalten ebenfalls erhebliche Mengen an Wasser und Nährstoffen. Diese **können gerade in trockenen Jahren, wenn Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit im Oberboden reduziert sind, zur Ertragssicherung und zur Steigerung der Produktivität beitragen**.

Für eine nachhaltige Nutzung unserer Böden liegt es daher nahe, den Unterboden ins Agrarmanagement einzubeziehen, um die Ertragsfähigkeit der Böden gegenüber externen Einflussfaktoren zu stabilisieren und langfristig ihr Ertragspotential zu sichern und die landwirtschaftliche Produktivität zu steigern.

Unterbodenmanagement bietet neue Optionen, um eine höhere Ertragssicherheit und Widerstandsfähigkeit der Kulturen gegenüber Trockenstress und anderen Umwelteinflüssen zu erreichen, sowohl in der ökologischen Landwirtschaft als auch in anderen Anbausystemen. Noch existieren für ein nachhaltiges Unterbodenmanagement **Hindernisse, die überwunden werden müssen**. Einerseits fehlt vielerorts noch das Bewusstsein für die Bedeutung des Unterbodens für das Pflanzenwachstum. Andererseits gilt es, die räumliche Zugänglichkeit der Unterbodenressourcen für die Nutzpflanzen zu verbessern. Schließlich müssen **Vorteile und mögliche Risiken** einer Unterbodenbearbeitung gegeneinander abgewogen werden, idealerweise durch die Prüfung der **regionalen beziehungsweise standortspezifischen Eignung** des Bodens für eine Unterbodenmelioration.

Dieses Handbuch beinhaltet Entscheidungsgrundlagen und Empfehlungen, wie und unter welchen Gegebenheiten und mit welchen Chancen und Risiken ein Unterbodenmanagement nachhaltig umgesetzt werden kann. Der Fokus liegt sowohl auf den abiotischen und biotischen Gegebenheiten als auch auf der ökonomischen Machbarkeit.

2. Der Unterboden in landwirtschaftlich genutzten Böden

2.1 DER UNTERBODEN

Die durchschnittliche Bearbeitungstiefe in der konventionellen Landwirtschaft beträgt in Deutschland im Mittel etwa 30 cm (Schneider und Don 2019). Daraus ergibt sich eine Aufteilung des Ackerbodens in den Oberboden, sowie den **Unterboden unterhalb von 30 cm**. Während die Obergrenze des Unterbodens recht sicher bestimmt ist, gibt es keine scharfe Definition für dessen Untergrenze, da diese in unbearbeiteten Böden davon abhängt, wie tiefgründig sich der Boden entwickelt hat, beziehungsweise ab welcher Tiefe sich das Ausgangsmaterial der Bodenbildung (Gestein oder Sediment) befindet.

Im Gegensatz zum Oberboden ist der **Unterboden weniger stark durchwurzelt**. Charakteristisch für Unterböden sind ein **höherer Eindringwiderstand für die Pflanzenwurzel**, ein **langsamerer Kohlenstoff- und Nährstoffumsatz** und eine **geringere biologische Aktivität**. Verglichen mit dem humosen, gepflügten Oberboden sind Kohlenstoff und Nährstoffe im Unterboden nicht so gleichförmig verteilt, sondern es gibt lokale Anreicherungs- und Verarmungszonen.

2.2 RESSOURCEN UND IHRE ZUGÄNLICHKEIT IM UNTERBODEN

Eine besondere Bedeutung für die Landwirtschaft hat der Unterboden aufgrund seiner Fähigkeit, große Mengen pflanzenverfügbaren Wassers zu speichern.

Dieses Wasserreservoir kann den Nutzpflanzen helfen, sich auch in Trockenzeiten mit Wasser zu versorgen und damit Dürreperioden im Spätfrühling oder Sommer zu überbrücken. Anders als der Oberboden ist der Unterboden viele Dezimeter, manchmal wenige Meter mächtig. Über diese Tiefe gesehen, können die Wasser- und Nährstoffvorräte riesig sein.

Unter den Standortbedingungen in Deutschland speichern Unterböden etwa **zwei Drittel der Wasservorräte und mehr als die Hälfte der Nährstoffe** (Kautz et al. 2013). Unterböden sind auch im Vergleich zum Oberboden durch eine deutlich unterschiedliche Mikroorganismengemeinschaft charakterisiert, die weniger stark mit der Pflanze um Nährstoffe konkurriert als jene im Oberboden. Leider ist ein Großteil dieser im Unterboden gespeicherten Ressourcen für die Pflanzenwurzel nicht zugänglich, da es sogenannte **wurzelhemmende Schichten** gibt, wie zum Beispiel stark verdichtete Bodenbereiche, aber auch Bereiche mit ungünstigen chemischen Bedingungen, welche das Hineinwachsen der Pflanzenwurzel in den tieferen Unterboden erschweren.

Derartige **wurzelhemmende Schichten** können durch Menschen verursacht sein, wie Verdichtungen der Pflugsohle durch den Einsatz schwerer Landtechnik mit hohen Radlasten und das häufige Befahren des Ackerschlages (Abbildung 1). Häufig sind wurzelhemmende Schichten natürlichen Ursprungs und zum Beispiel durch Ablagerungen oder Einwaschung

von tonigem Material (Abbildung 2) oder durch Versauerung während der Bodenbildung oder hohen Grundwasserstand entstanden. Flächenmäßig weisen 71 % der deutschen Ackerflächen wurzelhemmende Schichten innerhalb des ersten Bodenmeters auf.

zwischen 10 und 80 % ihres Wasser- und Nährstoffbedarfes aus dem Unterboden decken können. Der Beitrag des Unterbodens für die Ertragsentwicklung kann also sehr hoch sein. Doch um Wasser und Nährstoffe aus dem Unterboden nutzen zu können, muss der physikalische Eindringwiderstand für Wurzeln in den Boden möglichst gering sein. Über ein geeignetes Management lässt sich dies verwirklichen.

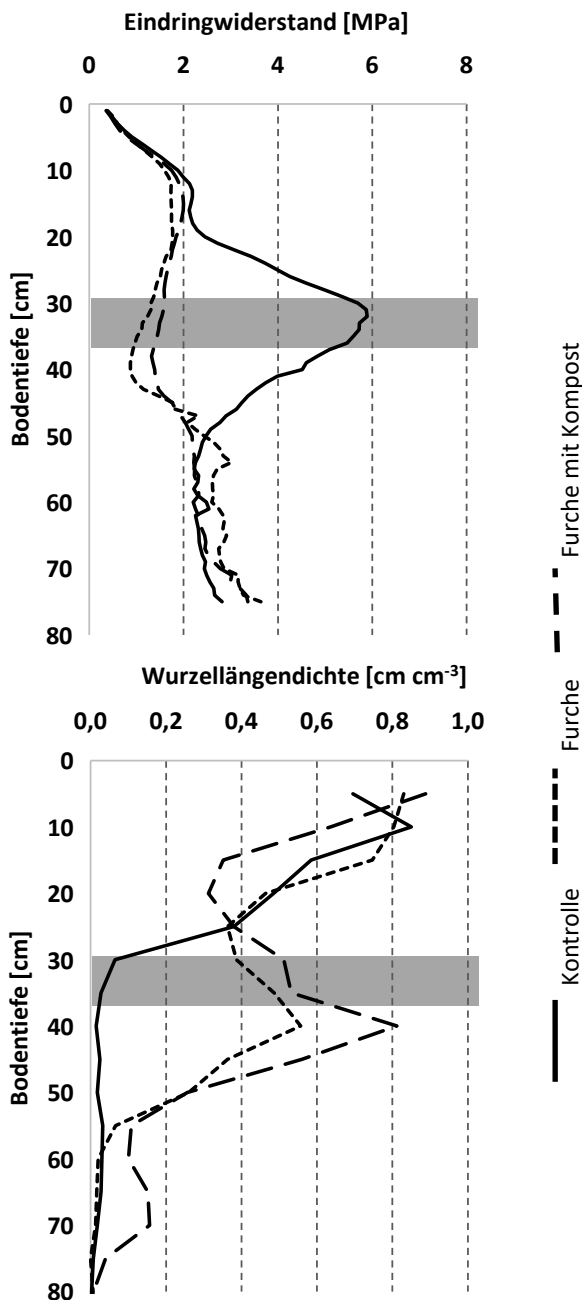


Abbildung 1: Eindringwiderstand [MPa] zwei Jahre nach Unterbodenmelioration im Frühjahr 2021 und Wurzellängendichte [cm cm^{-3}] von Silomais im Anbaujahr 2021. Grau hinterlegt ist die Pflugsohle durch die Bodenbearbeitung vor Versuchsbeginn. Die aktuelle Bodenbearbeitungstiefe mittels Grubber beträgt 15 cm, die Tiefe der Furchen im Soil³-Verfahren 45 cm.

Aufgrund des sehr unterschiedlichen Unterbodenzugangs und unterschiedlicher Wurzelsysteme ist auch die Nutzung von Ressourcen aus dem Unterboden sehr variabel. Man geht heute davon aus, dass Nutzpflanzen

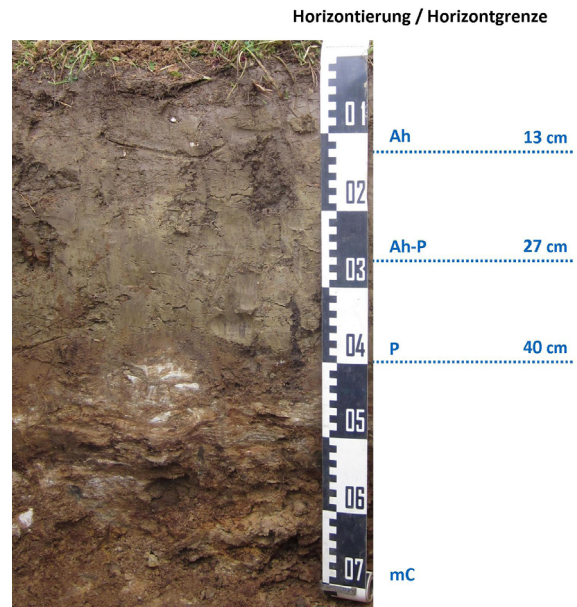


Abbildung 2: Standort 3167 der BZE-LW mit hohen Tongehalten (im P-Horizont) und hohen Steingehalten (im mC-Horizont) als Beispiel für wurzelhemmende Schichten.

Ah = humoser Oberbodenhorizont; Ah-P = Übergangshorizont; P = Unterbodenhorizont mit hohem Tongehalt; mC = Untergrundhorizont aus nicht grabbarem Ausgangsmaterial der Bodenbildung.

2.3 OPTIONEN DER UNTERBODENBEWIRTSCHAFTUNG

Um das Ertragspotenzial von Ackerböden sicherzustellen ist es sinnvoll, Unterböden mit ihren beachtlichen Vorräten an Wasser und Nährstoffen in nachhaltige landwirtschaftliche Bewirtschaftungsstrategien einzubinden. Hierbei gilt es, wurzelhemmende Schichten aufzubrechen oder zu durchdringen und neue Bodenverdichtungen zu vermeiden. Um das Wurzelwachstum in den Unterboden zu erleichtern, existieren verschiedene mechanische und biologische Verfahren.

Bei mechanischen Verfahren der Unterbodenbearbeitung wird zwischen nicht-wendenden, wendenden und mischenden/lockernden Techniken unterschieden (Abbildung 3).

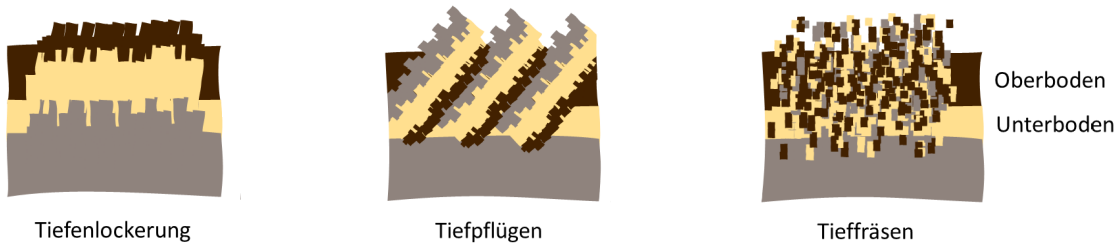


Abbildung 3: Schematische Darstellung der unterschiedlichen Arten der mechanischen Unterbodenbearbeitung (modifiziert nach Schneider et al. 2017).

TIEFENLOCKERUNG

Ziele der Tiefenlockerung (teilweise auch „Tiefgrubbern“ oder „tiefes Meißeln“) sind die Auflockerung der Bodenstruktur und die Reduktion der Lagerungsdichte des Unterbodens, ohne dabei die einzelnen Bodenhorizonte zu wenden oder zu vermischen. Hierzu werden spezielle Tiefenlockerungsgeräte (zum Beispiel Stechhublockerer, Tiefenmeißel) eingesetzt, die bis in 60 cm Tiefe durch den Boden gezogen werden. Anschließend muss die gelockerte Struktur biologisch stabilisiert werden, zum Beispiel durch den Anbau von Kulturen mit tiefreichendem Wurzelsystem wie Luzerne oder Klee. Um die Bodenstruktur zu schonen, darf eine Tiefenlockerung nur auf trockenen Böden durchgeführt werden, was energetisch aufwändig sein kann. Die Lockerungseffekte sind allerdings oft nur von kurzer Dauer, da die meisten Böden einer natürlichen Sackung und Wiederverdichtung unterliegen. Daher muss die Maßnahme regelmäßig wiederholt werden, was sie für den routinemäßigen Einsatz in der Landwirtschaft zu teuer macht.

TIEFPFLÜGEN

Beim Tiefpflügen handelt es sich um eine wendende, einmalige Bodenmelioration, welche bis in mindestens 50 cm Tiefe reicht und meist zur Durchbrechung von Verhärtungshorizonten eingesetzt wird. Dazu drehen einscharige Tiefpflüge den Boden um 270° und pflügen Oberbodenmaterial in den Unterboden. Dadurch kann der Kohlenstoffgehalt im Unterboden erhöht werden, da humusreiches Oberbodenmaterial in den Unterboden eingebracht wird. Dies kann auch dazu führen, dass mehr pflanzenverfügbares Wasser im humusreicheren Unterboden gespeichert werden kann. Allerdings verringern sich durch das Vermischen von Ober- und Unterboden Humus- und Nährstoffgehalte der Ackerkrume, und erreichen erst nach Jahrzehnten wieder das ursprüngliche Niveau. Auf lehmigen Standorten kann die Bodenstruktur – und damit die Bodenfruchtbarkeit – nachhaltig geschädigt werden. Mittel- bis langfristige Ertragseinbußen bis zu einer irreversiblen Minderung der Bodenfruchtbarkeit sind die Folge.

TIEFENDURCHMISCHUNG

Werden bei der Unterbodenbearbeitung der Oberboden und Unterboden miteinander vermischt und somit die Bodenhorizonte komplett zerstört, so spricht man vom Tiefendurchmischen. Diese Technik kann entweder auf dem ganzen Acker (zum Beispiel mit einer tiefen Bodenfräse) oder in Streifen mit ungestörtem Boden dazwischen (zum Beispiel mit einer Tiefspatenfräse) durchgeführt werden. Wie beim Rigolen im Weinbau ist diese Technik allerdings sehr teuer in der Durchführung, und sie birgt ebenfalls das Risiko, den nährstoffreichen Oberboden mit nährstoffarmem Unterbodenmaterial zu vermischen.

TIEFLOCKERN OHNE WENDEN DES BODENS (PARAPFLUG)

Beim Tieflockern ohne Wenden des Bodens wird der Boden bis zu einer Tiefe von 50 cm mit Meißelscharen gelockert, angehoben und wieder abgelegt. Der Vorteil bei diesem Verfahren ist, dass eine ganzflächige Lockerung erfolgt und diese Maßnahme direkt nach der Aussaat durchgeführt werden kann. Damit kann beim Anbau von Wintergetreide dem Boden eine längere Zeit der natürlichen Sackung eingeräumt werden, ohne dass ein Befahren der gelockerten Fläche erfolgt.

In vorindustriellen Zeiten wurde der Boden überwiegend mit von Tieren gezogenen Pflügen bearbeitet, und die Pflugtiefe überstieg nur sehr selten 20 cm. Nur durch manuelles Graben konnten auch tiefere Bereiche des Bodenprofils erreicht werden. Erst die im Zuge der Industrialisierung entwickelten und mit Dampf oder Verbrennungsmotoren betriebenen Maschinen erlaubten ab 1950 eine maximale Bearbeitungstiefe von über 200 cm. In Norddeutschland und den Niederlanden wurden mit diesen Verfahren Moore für die landwirtschaftliche Nutzung erschlossen. Auch in Podsolon, Pseudogleyen und anderen Bodenprofilen mit wurzelhemmenden Schichten wurden durch tiefe Bearbeitung die Erträge für die Landwirtschaft gesteigert. Allerdings waren die entwi-

ckelten Techniken der Unterbodenlockerung und des Tiefpflügens vor allem wirtschaftlich oft nicht nachhaltig. Folglich wurden die Maßnahmen in den 1970er Jahren größtenteils eingestellt.

BIOLOGISCHE UNTERBODENMELIORATION

Neben der mechanischen Unterbodenmelioration gibt es die Möglichkeit, den **Zugang zu Unterbodenressourcen anhand von tiefreichenden Bioporen zu ermöglichen**. Dies sind mehr oder weniger vertikal verlaufende Hohlräume, die durch Pflanzen mit Pfahlwurzeln oder durch Regenwürmer gebildet werden. Meist folgen die Regenwürmer den Bahnen ehemaliger Pflanzenwurzeln, das heißt durch den Anbau tiefwurzelnder Vor- und Zwischenfrüchte lässt sich die Bioporenbildung und damit der physikalisch erleichterte Zugang in den Unterboden fördern. Die **biologische Unterbodenmelioration** ist damit weniger invasiv als die technische Unterbodenmelioration, insbesondere in Kombination mit dem Anbau

von tiefwurzelnden Futterpflanzen wie Leguminosen. Als besonders wirkungsvoll erweist sich der mehrjährige Anbau tiefwurzelnder Futterpflanzen, weil mit zunehmender Anbaudauer größere Wurzeldurchmesser zu erwarten sind und die vergleichsweise lange Bodenruhe zudem Regenwurmpopulationen fördert. Bioporen sind jedoch nur in bestimmten Böden (zum Beispiel Lössböden) langfristig stabil, der zur Verfügung stehende Betrag für die Fixkostendeckung (Deckungsbeitrag) von solchen Futterleguminosen ist niedriger als bei anderen Kulturen, und für viehlos wirtschaftende Betriebe bleibt die Nutzung des Schnittguts eine Herausforderung.

Eine neuartige Kombination aus oben genannten Ansätzen bietet die im Folgenden beschriebene Soil³-Technik (siehe auch www.bonares.de). Der dargestellte Forschungsstand ergibt sich aus über neun Jahren Forschung im Verbundprojekt Soil³.

3. Die SOIL³-Technik

Im Allgemeinen kann die Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden gesteigert werden, wenn es für die Pflanzen attraktiv ist, in Wurzeln zu investieren die den Unterboden erschließen. Diese Attraktivität kann durch folgende Maßnahmen gesteigert werden:

- Verringerung des physikalischen Eindringwiderstandes für die Wurzel
- Schaffung von Nährstoff-Hotspots im Unterboden
- Wasserspeicherung im Unterboden, wenn der Oberboden saisonal austrocknet

Aufbauend auf dem Wissen über früher verwendete Techniken (siehe vorheriger Abschnitt) wurde im Rahmen des BMFTR-geförderten Verbundprojektes Soil³ (2015 bis 2025) eine neue Methode der mechanischen Unterbodenmelioration entwickelt und getestet mit dem Ziel, die Nutzung des Unterbodens für das Pflanzenwachstum zu optimieren. Das Soil³-Verfahren kombiniert die streifenweise mechanische Lockerung des Unterbodens in einer Tiefe von 30 bis 60 cm mit einer Einmischung von Kompost oder anderen organischen Düngemitteln. Diese bringen einerseits Nährstoffe in den Unterboden und können andererseits Wasser speichern. Vorteil des Verfahrens ist hierbei, dass, anders als bei klassischen Unterbodenbearbeitungstechniken (Tabelle 1), die Bearbeitung nicht auf der gesamten Fläche sondern in Streifen erfolgt. Das streifenweise in den Unterboden eingebrachte Material verhindert, dass sich der Boden nach der Lockerung wieder verdichtet und fördert somit die Bildung der

biologischen Bodenstruktur. Der Abstand der Streifen ist so gewählt, dass ein Optimum zwischen benötigtem Maschinen- und Materialeinsatz und den erzielten Ertragseffekten im Gesamtbestand erreicht wird. Das patentierte Verfahren setzt somit auf eine praxistaugliche Technologie und ökonomischen Betriebsmitteleinsatz.

3.1 DURCHFÜHRUNG

Die Melioration geschieht dreireihig in einem Arbeitsgang mit drei Metern Arbeitsbreite. Die hierfür entwickelte Maschine ist in Abbildung 4 dargestellt:



Abbildung 4: Seitliche Ansicht der Soil³-Maschine (© O. Schmittmann).

Im ersten Arbeitsschritt wird der Oberboden mit einem Pflugschar in einem Streifen von 30 cm Breite und Tiefe aufgenommen und seitlich abgelegt. Anschließend wird (A) mit Hilfe eines tiefen Lockerungszinkens der Unterboden in einer Breite von 30 cm und einer Tiefe von 30 bis 60 cm aufgerissen. Direkt im Anschluss wird das organische Düngemittel mit definierter Dosierung vom Vorratsbehälter (B) über einen Injektionskanal hinter dem Lockerungszinken dem Unterboden zugeführt und mischt sich in den zurückfallenden Bodenstrom. Je nach Beschaffenheit des Bodens kann nachfolgend noch ein weiterer Lockerungszinken zur besseren Durchmischung oder ein Tiefenrad zur leichten Rückverfestigung des Unterbodens eingebaut werden. Abschließend wird der Oberboden (C) mit einem Scherblech zurückgeführt. Durch den Arbeitsabstand von 1 m und die Breite der Streifen von 30 cm bleiben 70 cm zwischen den Streifen

unbearbeitet. Zur Melioration scheinen 30 t Kompost pro Hektar ausreichend, wenngleich die Langzeitfeldversuche derzeit zumeist auf eingearbeiteten Mengen von 50 t Kompost pro Hektar beruhen.

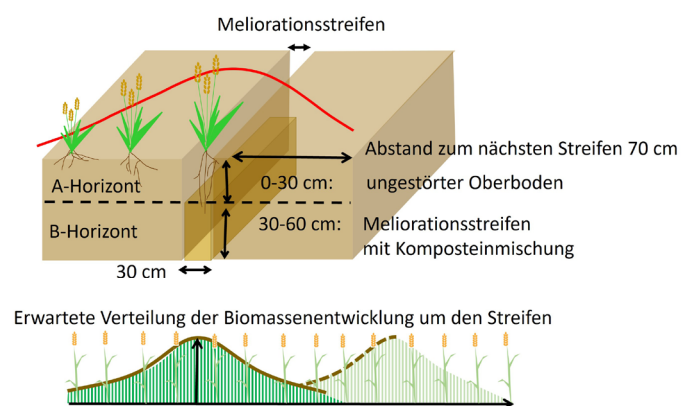


Abbildung 5: Prinzip der Soil3-Technik (oben). Erwartete Biomasseentwicklung (unten): Gauß'sche Verteilung um die Streifen und ganzflächig homogene Verteilung im Bestand.

Tabelle 1: Verfügbare technische Verfahren der Unterbodenbearbeitung.

	WENDEND	LOCKERND	MISCHEND	ERHALT DER BODENSCHICHTUNG	MATERIAL-EINBRINGUNG	GANZFLÄCHIGE BEARBEITUNG	SCHAFFUNG VON NÄHRSTOFFHOTSPOTS	STRUKTUR-STABILISIERUNG	WASSER-SPEICHERUNG
PFLÜGE									
Rigolpflug	x	x	x			x			(x)
ANGETRIEBENE MISCHENDE MASCHINEN									
Spatenmaschine rotierend		x	x			x			(x)
Stech-Hubspatenmaschine		x	(x)	(x)		x			(x)
STARRE ZINKEN									
Parapflug		x	(x)	x		x			x
Tiefengrubber		x	x	(x)		x			x
Tiefenmeißel		x		x		var.			
ANGETRIEBENE ZINKEN									
Abbruchlockerer		x		x		var.			
Stech-Hublockerer		x		x		var.			
INJEKTIONSTECHNIK									
Soil ³ -Technik		x	x*	x	x	30 %	x	x	x

x = trifft zu; (x) = trifft bedingt zu; var. = variabel einstellbar, * zonal abgegrenzt innerhalb 0-30 und 30-60 cm

Die Melioration sollte auf einer Stoppelfläche, zum Beispiel nach der Getreideernte geschehen, da in dieser Zeit der Eindringwiderstand für die Technik und die Bodenfeuchte und Struktur am geeignetsten sind. Eine ausreichende Zugkraft (Traktion) und die hohe Tragfähigkeit des Stoppelfeldes gewährleisten eine optimale Schonung des Bodens. Günstig wirkt sich eine anschließende Bodenruhe aus, in der sich der Boden „setzen“ kann. In dieser Phase ist der Anbau einer Zwischenfrucht empfehlenswert. Ab dem folgenden Frühjahr kann mit einer Sommerung und danach mit betriebsüblicher Fruchtfolge gewirtschaftet werden. Abbildung 5 skizziert das Soil³-Prinzip. Demonstrationsversuche befinden sich zum Beispiel an den Standorten Klein Altendorf nahe Bonn sowie auf der Dauerversuchsstation in Thyrow, Brandenburg.

3.2 BISHERIGE ERFOLGE

Die Versuche an den Dauerversuchsstationen in Klein Altendorf (lehmiger Standort) und in Thyrow (sandiger Standort) sowie an ausgewählten Praxisstandorten zeigten folgende positive Ergebnisse:

- Steigerung des Kornertrages von Getreide bis zu 22 % und des Biomasseertrages von Silomais bis zu 57 % über mindestens fünf Jahre nach Durchführung der Maßnahme
- Maximalertragsgewinne vor allem in trockenen Sommern
- Die Ergebnisse gehen einher mit einer besseren Wassernutzung und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden.
- Aufgrund der besseren Wasser- und Nährstoffaufnahme finden sich bislang keine Hinweise auf einen vermehrten Stickstoffaustrag.
- Es finden sich ebenfalls keine Hinweise auf eine Beeinträchtigung des Bodenlebens.
- Positive Effekte sind teilweise noch sieben Jahre nach dem ersten Eingriff nachweisbar.

Allerdings gibt es auch Jahre, in denen kein Ertragsge-
winn oder, im Falle von Roggen, in extrem trockenen Jahren Konkurrenz um Wasser von Pflanzenwurzeln in und zwischen den Furchen zu beobachten war. Es bestehen also Chancen und Risiken, und die Effekte sind vermutlich sorten-, boden- und witterungsspezifisch.

3.3 CHANCEN, UNSICHERHEITEN UND ÖKOLOGISCHE RISIKEN

Das neu entwickelte Soil³-Verfahren bringt verschiedene Vor- und Nachteile mit sich. Positiv bemerkbar macht sich, dass die Technik

- ähnlich wie bisherige Verfahren eine Ertragssteigerung bewirken kann,
- im Vergleich zu anderen Methoden der Unterbodenmelioration als weniger invasiv angesehen werden kann, da hierbei die Horizontabfolge des Bodenprofils außerhalb der Meliorationsstreifen nicht zerstört wird,
- durch die Kompostearbeitung eine Rückverdichtung des Unterbodens verhindert oder verlangsamt,
- durch intensive Durchwurzelung innerhalb der Furchen den Zugang zum Unterboden offenhält,
- durch die Kompostearbeitung zu einer erhöhten Kohlenstoffspeicherung im Unterboden führt, und
- die Aktivität des Bodenlebens durch die Kompostearbeitung fördert.

Folgende Nachteile beziehungsweise Unsicherheiten bestehen hinsichtlich der Anwendung der Soil³-Technik:

- Eine ungleichmäßige Abreife der Kulturen durch die streifenweise Lockerung und Kompostearbeitung ist theoretisch möglich, wenngleich dies bisher bei einem Streifenabstand von 1 m als nicht kritisch eingeschätzt wird.
- Die Maschine ist bislang nicht kommerziell verfügbar.
- Die Verfügbarkeit von geeignetem Kompost ist gegebenenfalls limitiert.
- Für das Soil³-Verfahren besteht momentan eine unklare Rechtslage (siehe nächster Abschnitt).

Nitrat in der Bodenlösung kann ins Grundwasser ausgewaschen werden. Die Stickstoffgehalte im Kompost liegen zwischen 8 und 17 kg Stickstoff pro Tonne, mit höheren Gehalten im Bioabfall- als im Grünschnittkompost. Gerade wenn Kompost in den Unterboden eingebracht wird, besteht die Sorge, dass es zu verstärkter Nitratbildung und Auswaschung kommen könnte.

Forschungsstand: Alle bisherigen Arbeiten im Soil³-Projekt lieferten keine Hinweise darauf, dass die Einarbeitung von Kompost die Nitratauswaschung verstärkt. In einem Gewächshausexperiment nahm die Nitratkonzentration im Sickerwasser bereits nach zwei Tagen sehr stark ab, und in den zentralen Feldversuchen wurden mit Hilfe von Sickerwassersammlern keine signifikanten Nitratauswaschungen gefun-

den. Gründe hierfür sind vermutlich die verbesserte Wasser- und damit auch Nitrataufnahme der Pflanzen, sowie die verstärkte mikrobielle Immobilisierung, das ist die Aufnahme des verfügbaren Stickstoffs durch Bodenmikroorganismen, mit anschließendem Einbau des Stickstoffs in ihre Biomasse. Möglicherweise gibt es zusätzlich erhöhte Denitrifikationsraten; letzteres wurde bislang nicht abschließend getestet. Mit dem üblichen Anbau von tiefwurzelnden Zwischenfrüchten kann die Stickstoffauswaschung ohnehin gut eingedämmt werden.

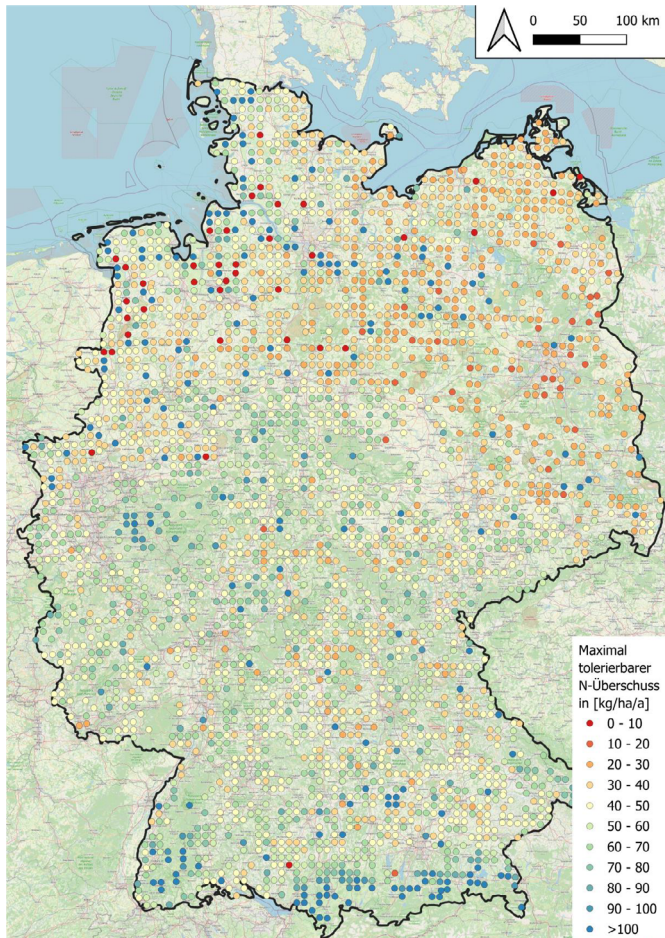


Abbildung 6: Karte der maximal tolerierbaren Stickstoff-Überschüsse (aus der Masterarbeit „Nitratauswaschungsgefahr in landwirtschaftlich genutzten Böden Deutschlands – Einfluss der Bodeneigenschaften“ von T. Cordes).

Zur allgemeinen Beurteilung des Nitratauswaschungsrisikos spielen Standorteigenschaften eine Rolle, wie der effektive Wurzelraum, die Bodentextur und die Niederschlagsmengen unmittelbar nach Komposteinarbeitung bis zur Etablierung der Zwischenfrucht. Mittels der Bodendaten aus der BZE-LW ließen sich Regionen identifizieren, in denen Nitratauswaschung nach Kompostausbringung zumindest theoretisch ein erhöhtes Risiko darstellen könnte (Abbildung 6).

Dies sind vor allem Standorte in Süd- und Nordwestdeutschland. Es gibt damit also nur eine Teilüberlappung mit unten genannten Zielregionen für eine potenzielle Anwendung der Soil³-Technik.

Theoretisch wäre es denkbar, dass sich im Kompost bestimmte Pathogene anreichern, vor allem wenn die Herstellung nicht fachgerecht erfolgt (zum Beispiel nicht ausgereift) und der Kompost mit Schimmelpilzen oder anderen Pathogenen belastet ist. Ebenso könnten sich Pathogene anreichern, wenn der Kompost in einen zu feuchten Boden eingebracht wird und dadurch der weitere Rotteprozess gehemmt wird. Die Untersuchungen im Soil³-Projekt lieferten jedoch keine Indizien dafür, dass nach Einbringen von Kompost in tiefere Bodenbereiche die Abundanz von Pathogenen erhöht wird.

Forschungsstand: In den zentralen Feldversuchen wurden nach der Unterbodenmelioration **weder Hinweise auf pilzliche Pflanzenpathogene** (z.B. Trichoderma) **noch auf pathogene Bakterien** im Unterboden gefunden. Dies schließt zwar nicht aus, dass bestimmte Bakterien auch als fakultativ pathogen angesehen werden können und insbesondere bei geschwächten Pflanzen Krankheiten auslösen; beobachtet haben wir letzteres jedoch in unseren Versuchen bislang nicht. Wir stufen das Pathogenrisiko bei sachgerechtem Unterbodenmanagement daher als klein ein.

3.4 RECHTLICHE RAHMENBEDINGUNGEN

Prinzipiell sind drei Verordnungen auf das Soil³-Verfahren anwendbar. Nach der Vollzugsverordnung des Bundesbodenschutzgesetzes ist die Soil³-Technik verboten. Ihr übergeordnet sind die Düngeverordnung und die Bioabfallverordnung, welche das Ausbringen von Kompost prinzipiell erlauben, den Unterboden aber nicht explizit erwähnen. Im Detail: In der neuen Vollzugsverordnung des Bundes-Bodenschutzgesetzes (BBodSchV) vom 1. August 2023 wird in Paragraph 6, Absatz 11 das Ausbringen von Kompost in den Unterboden untersagt:

§ 6 Allgemeine Anforderungen an das Auf- oder Einbringen von Materialien auf oder in den Boden

(11) Vor dem Auf- oder Einbringen von Materialien in den Unterboden oder Untergrund ist bei Hinweisen auf erhöhte Gehalte an organischem Kohlenstoff der Gehalt an organischem Kohlenstoff nach Anlage 3 Tabelle 1 zu bestimmen. Beträgt der Gehalt mehr als 1 Massepro-

zent, dürfen die Materialien nur auf- oder eingebracht werden, wenn der organische Kohlenstoff in den Materialien natürlich vorkommt oder auf einen zulässigen Anteil an mineralischen Fremdbestandteilen zurückzuführen ist und die Materialien nicht aus dem Oberboden stammen. Es ist sicherzustellen, dass durch Abbauprozesse der organischen Substanz, insbesondere auch nach dem Auf- oder Einbringen, keine schädlichen Bodenveränderungen zu besorgen sind und die Nährstoffzufuhr nach Menge und Verfügbarkeit unter Berücksichtigung der zu erwartenden Abbauprozesse dem Bedarf der vorhandenen oder künftigen Vegetation angepasst ist. **Das Einbringen von nährstoffreichen organischen Materialien, insbesondere Klärschlamm, Kompost oder Gärsubstrate, in den Unterboden oder Untergrund ist auch im Gemisch mit Bodenmaterial, Baggergut oder anderen mineralischen Materialien unzulässig.** Die Anforderungen der Sätze 1 bis 3 gelten nicht für die Umlagerung von Materialien im Rahmen des Braunkohletagebaus.

Unklar ist jedoch, ob die BBodSchV im Falle der Soil³-Technik zur Anwendung kommt, da es sich um ein neues Verfahren handelt, das zum Zeitpunkt des Inkrafttretens der BBodSchV nicht bekannt war.

Möglicherweise gilt in diesem Fall die **Düngeverordnung** (DüV), da das Prinzip der Soil³-Technik auf der Einbringung von organischen Düngemitteln basiert. In der DüV ist das Ausbringen von Kompost in den Boden vorgesehen, allerdings wird der Unterboden in der DüV nicht explizit erwähnt. Es ist damit ungeklärt, ob die Nichterwähnung des Unterbodens bedeutet, dass automatisch die DüV greift, oder ob sie bedeutet, dass die DüV als übergeordnetes, allgemeineres Gesetz hier Handlungsspielraum lässt.

Des Weiteren wäre möglich, dass im Falle der Soil³-Technik die **Bioabfallverordnung** (BioAbfV) greift, da es sich bei Kompost um eine Art von Bioabfall handelt. Ähnlich wie in der DüV findet sich aber auch in der BioAbfV keine konkrete Information zum Unterboden. Auch hier ist zu klären, ob diese Nichterwähnung die Anwendung verbietet oder zulässt.

Forschungsstand: Unterschiedliche Rechtsberatungen der Antragsteller des Soil³-Projektes führten hier zu unterschiedlichen Aussagen. Möglicherweise werden verschiedene örtliche Behörden hier unterschiedlich entscheiden, weshalb wir empfehlen, diesbezüglich die lokalen Behörden gegebenenfalls um Rat beziehungsweise Zustimmung zu bitten.

Nach der **rechtlichen Auffassung ist die Definition von Unterboden** eine andere als oben erwähnt. Während in der Bodenkunde der Bereich unterhalb der Ackerkrume als Unterboden definiert wird, ist der Unterboden in der BBodSchV pedogenetisch definiert, also als Bodenhorizont unterhalb des A-Horizontes. In vielen Böden, vor allem in Parabrauerden und Schwarzerden, kann der A-Horizont jedoch als AL- oder Axh-Horizont bis in 60 cm Tiefe reichen. Eine Einarbeitung von Kompost bis in 60 cm Bodentiefe wäre in solchen Fällen keine Einarbeitung in den Unterboden, sondern eine Einarbeitung in den tieferen Oberboden und wäre gemäß BBodSchV gegebenenfalls erlaubt.

Eine **Klärung des Sachverhaltes** zwischen den Juristen und Entscheidungsträgern des Bundesministeriums für Umwelt, Klimaschutz, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUKN), des BMFTR sowie des Bundesministeriums für Landwirtschaft, Ernährung und Heimat (BMLEH) wäre sehr begrüßenswert.

4. Regionale Entscheidungshilfen

Die Chancen, Erträge mit einem Unterbodenmanagement zu verbessern, variieren für verschiedene Böden und Klimata und somit für verschiedene Regionen. Sowohl Verfahrenskosten als auch Langlebigkeit der Effekte müssen berücksichtigt werden, um individuell abwägen zu können, ob und wann sich das potenzielle Kosten-Nutzenverhältnis der Soil³-Technik für den jeweiligen Betrieb günstig gestalten könnte.

Forschungsstand: In der folgenden Abbildung 7 sind potenzielle Regionen für ein Unterbodenmanagement markiert. Die Bodendaten entstammen der Bodenzustandserhebung-Landwirtschaft (BZE-LW) des Thünen-Institutes. Es ist deutlich zu erkennen, dass die Unterbodenmelioration vor allem für den nordostdeutschen

Raum, wo sandige Böden und trockene Sommer die Agrarproduktion häufig limitieren, gewinnbringend sein könnte. Weniger geeignete Standorte finden sich auf den schweren Böden mit höheren Niederschlagsmengen, wie in Bayern oder Baden-Württemberg. Für klassische Verfahren der Unterbodenmelioration wie Tiefenlockerung und Tiefpflügen wurde der höchste Nutzen für trockene Standorte beziehungsweise sandige Böden abgeleitet. In den meisten Fällen ist dann auch die Soil³-Technik vielversprechend, mit den genannten Vorteilen, dass eine Verdünnung des Oberbodens mit Unterbodenmaterial vermieden wird und sich eine Unterbodenlockerung nachhaltiger aufrechterhalten lässt.

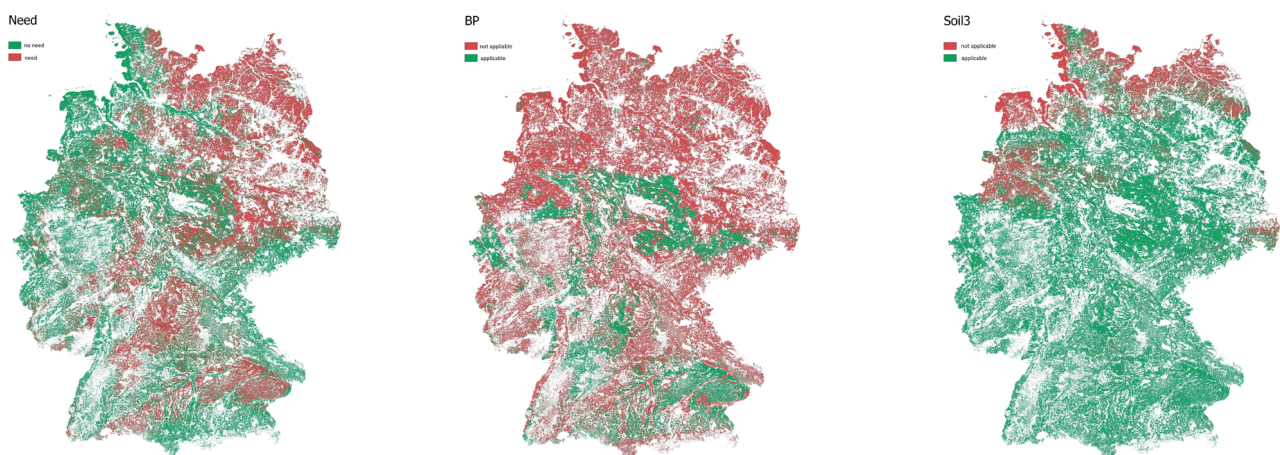


Abbildung 7: Deutschlandkarten zum A) Bedarf für Unterbodenmelioration, B) Eignung für biologische Unterbodenmelioration z.B. durch tiefwurzelnde Vorfrüchte und C) Eignung für die Soil³-Technik der mechanischen Unterbodenmelioration. Zu A: grün – kein Bedarf, rot – Bedarf; zu B und C: grün – geeignet, rot – nicht geeignet.

Im Unterschied zu den mechanischen Verfahren bilden sich stabile Bioporen durch tiefwurzelnde Vorfrüchte und Regenwürmer vor allem an lehmigen und schluffigen Standorten, insbesondere in Lössböden, so dass sich diese Regionen insbesondere für eine biologische Unterbodenmelioration eignen (Abbildung 7). Solche biologischen Verfahren vermeiden zugleich das Risiko, dass der Oberboden durch mechanische Unterbodenlockerung verdichtet, was möglich ist, wenn sie auf zu feuchtem Substrat erfolgt.

In die Ableitung von Gebieten beziehungsweise Standorten mit potenzieller Eignung für die gewinnbringende Anwendung des Soil³-Verfahrens gingen neben Bodenart und Klima auch weitere Informationen ein. So hat das Thünen-Institut für Agrarklimaschutz über 3000 Standorte der BZE-LW bis in 100 cm Tiefe ausgewertet. Als wichtige zusätzliche Standortfaktoren für die Unterbodenmelioration wurden neben einer spezifischen Bodentextur und bestimmten klimatischen Bedingungen außerdem die Tiefgründigkeit des Bodens, ein geringer Steingehalt, sowie ein hoher Grundwasserflurabstand berücksichtigt. Diese Recherche bestätigte, dass die Soil³-Technik mit einer Kombination aus Tiefenlockerung und Komposteinbringung vor allem im Nordosten Deutschlands gut für die Erschließung des Unterbodens geeignet ist, wobei es auch in Rheinland-Pfalz, Südhessen und Unterfranken einige geeignete Regionen gibt. Zwar wurde der Prototyp der Soil³-Maschine für Lössböden im Bonner Umland entwickelt; allerdings ist für Lössstandorte die Soil³-Technik gegen die Alternative der biologischen Unterbodenmelioration abzuwägen. Durch Weiterentwicklung und Testung der Maschine im Berliner/Brandenburger Raum sowie Integration einer Überlastsicherung kann die Technik auch in anderen Regionen angewendet werden.

Um die Relevanz sozioökonomischer Faktoren rund um das Thema Unterbodenmelioration zu beleuchten, hat das Ecologic Institute im Rahmen einer Akzeptanzanalyse untersucht, was landwirtschaftliche Akteure davon halten, Maßnahmen zur Verbesserung des Unterbodens anzuwenden, um sich besser an den Klimawandel anzupassen. Die Ergebnisse zeigen drei unterschiedliche Perspektiven hinsichtlich der Anwendung der Soil³-Technik sowie des Anbaus von Luzerne. Während einige Akteure der Tiefenlockerung in Verbindung mit der Einarbeitung von Kompost in den Unterboden aufgeschlossen gegenüberstehen, haben andere Bedenken gegen-

über der Methode und halten sie in der Praxis für kaum durchführbar. Eine dritte Gruppe von Akteuren bevorzugt eindeutig biologische Ansätze wie den Luzerneanbau. Trotz der unterschiedlichen Auffassungen sehen alle drei Perspektiven in der Unterbodenbearbeitung einen sinnvollen Ansatz zur Anpassung an die veränderten Klimabedingungen.

Im Rahmen der Akzeptanzanalyse wurde auch deutlich, dass neben geophysischen, klimatischen und wirtschaftlichen Aspekten weitere sozioökonomische Aspekte ebenfalls eine Rolle spielen können, wenn es um die praktische Umsetzung von Maßnahmen der Unterbodenbearbeitung geht. Konkret wurde eine Reihe von Faktoren ermittelt, die die Bereitschaft zur Anwendung bestimmter Techniken zur Verbesserung des Unterbodens beeinflussen: wirtschaftliche und betriebliche Erwägungen, vorhandenes Bewusstsein für die Funktionen des Unterbodens, vorhandenes Umweltbewusstsein, individuelle Normen und Überzeugungen sowie die individuelle Risikowahrnehmung. Schlussfolgernd kann festgehalten werden, dass eine größere Akzeptanz für Unterbodenmelioration im Ökolandbau, in Betrieben mit Eigenbewirtschaftung und in pfluglos wirtschaftenden Betrieben vorherrscht. Die Verfügbarkeit von Förderinstrumenten und die Notwendigkeit von ausreichend vorhandenem Kompost bilden außerdem wichtige Rahmenbedingungen für die Anwendung des Soil³-Verfahrens. Das Umsetzungspotential ist also von vielerlei Faktoren abhängig, deren Relevanz sich je nach Region, Betriebstyp und individueller Einstellung unterscheiden kann.

4.1 AUSWAHL DER ORGANISCHEN DÜNGEMITTEL

Traditionell wurde tiefe Bodenbearbeitung nicht mit der Einbringung von organischen Düngemitteln kombiniert. Die Ausbringung von Wirtschaftsdüngern wie Kompost ist in der Praxis bisher auf den Oberboden (bis 30 cm Tiefe) begrenzt. Anders als durch Zugabe von Stroh oder Sägespänen, werden durch Bioabfälle wie Kompost oder Grünschnitt zusätzlich zur Lockerung des Bodengefüges auch Nährstoffe in den Boden eingebracht.

Forschungsstand: Im Verbundprojekt Soil³ wurde das Einbringen verschiedener Materialien in den Unterboden, wie Bioabfallkompost, Grünschnittkompost, Stroh oder Sägespäne hinsichtlich ihrer Effekte auf Bodenstruktur, Wassergehalt, mikrobieller Gemeinschaft, Durchwurzelung und Erträge getestet. Entsprechend wurde die Soil³-Maschine so weiterentwickelt, dass sie

im Bedarfsfall auch für rieselfähiges Schüttgut (Stroh-pellets) geeignet ist. Es zeigte sich jedoch, dass das Einbringen von Kompost in den ersten Gewächshaus- und Feldexperimenten zu den stärksten Ertragseffekten führt (siehe nächster Abschnitt)

Von enormer Bedeutung bei der Kompostauswahl ist das Nährstoffverhältnis. In Laborversuchen hat sich gezeigt, dass ein **weites C:N-Verhältnis** von etwa 30 die Speicherung des aus dem Kompost austretenden Stickstoffs in der mikrobiellen Biomasse fördert und so der Nitratauswaschung entgegenwirken kann. Die Effekte sind etwas stärker in lehmigem als in sandigem Boden ausgeprägt. Weitere wichtige Aspekte bei der Kompostauswahl sind die **regionale Verfügbarkeit** sowie die **Qualität** (zum Beispiel Plastikgehalte).

4.2 BISHERIGE ERFAHRUNGEN MIT ERTRÄGEN UND ERTRAGSQUALITÄT

Das Ergebnis ehemaliger Unterbodenbearbeitung (Tiefpflügen, Tiefenlockerung, tiefes Mischen) war oft uneinheitlich. Eine Auswertung der verfügbaren Studien zeigte, dass mechanische Unterbodenmelioration zu einer durchschnittlichen Ertragssteigerung von 6 % führt, wobei der Nutzen an Standorten mit wurzelhemmenden Schichten am höchsten war. Ertragsminderungen durch tiefe Bodenbearbeitung wurden vor allem in Böden mit sehr instabiler Struktur (> 70 % Schluffgehalt) beobachtet. Gleichzeitig gilt es, die Fruchtbarkeit des Oberbodens nicht negativ zu beeinflussen, wie zum Beispiel durch eine Durchmischung von Oberboden- mit Unterbodenmaterial.

Forschungsstand: Bemerkenswerterweise konnte in den zentralen Feldversuchen des Soil³-Projektes sowohl in den Lössboden des Bonner Raumes als auch in sandigen Böden Brandenburgs beobachtet werden, dass die Nutzpflanzen von oben und seitlich in die Meliorationsstreifen wuchsen, wodurch sich aufgrund der gesteigerten Wasser- und Nährstoffversorgung dort mehr Wurzelbiomasse bildete. Insgesamt waren die **Erträge bei Getreide um ca. 20 bis 25 %** im Vergleich zur Kontrolle (ohne Unterbodenmelioration) **erhöht**, was für eine verbesserte Wasser- und Nährstoffaufnahme aus dem Unterboden spricht. Für **Mais** wurde unter den **trockenen Bedingungen in Thyrow** im ersten Jahr sogar eine **Ertragssteigerung von über 50 %** nach Anwendung der Soil³-Technik erzielt.

Die Proteingehalte lagen durchschnittlich um 0,2 bis 0,3 % höher als bei der Kontrollvariante ohne Melioration. In ähnlicher Höhe unterschieden sich auch die Kornfeuch-

ten. Bedingt durch die bessere Wasser- und Nährstoffversorgung, verzögert sich folglich auch die Abreife.

4.3 NACHHALTIGKEIT DER EFFEKTE

In der Vergangenheit wurde häufig beobachtet, dass positive Effekte durch alleinige mechanische Eingriffe in den Unterboden nicht erhalten werden konnten. Wie schnell die Effekte zurückgingen, hing von der Art des Meliorationsverfahrens, aber auch von der Bodenart, dem Bodenleben und der Art der nachfolgenden Bodenbewirtschaftung ab. Insbesondere die positiven Effekte einer einmaligen Tiefenlockerung waren bereits nach wenigen Jahren nicht mehr nachweisbar.

Maßnahmen des Tiefpflügens und Tiefdurchmischens bleiben dagegen auch über Jahrzehnte erhalten.

Gerade in den sandigen Tiefumbruchsböden, sog. Rigotrep-solen Nordwestdeutschlands wurden auch 50 bis 60 Jahre später noch erhöhte Kohlenstoffvorräte, verstärkte Durchwurzelung des Unterbodens sowie erhöhte Erträge der heutigen Kulturen beobachtet. Dagegen neigten Rigotrepsole mit hohem Schluffanteil zur Rückverdichtung mit reduzierter Wurzelbiomasse und eventuellen Ertragsausfällen (Alcántara et al. 2017, Burger et al. 2024).

Forschungsstand: Zu der kombinierten Tiefenlockerung mit Komposteinbringung gibt es noch keine Langzeitergebnisse über mehrere Jahrzehnte. Die Soil³-Technik wurde erstmals 2016 in Lössboden bzw. 2019 in Sandboden angewandt und die Effekte kontinuierlich über mehrere Jahre dokumentiert. In den ersten zwei Jahren nach der Anwendung wurden neben einer verringerten Lagerungsdichte verbesserte Durchwurzelung, erhöhte Erträge (Abbildung 8), Kohlenstoff- und Wasservorräte, mikrobielle Diversität und Nährstoffaufnahme festgestellt (Jakobs et al. 2017, Ittner et al. 2020, Bauke et al. 2024). Die Ertragssteigerungen verliefen in den nachfolgenden Jahren, auch aufgrund unterschiedlicher Witterungsbedingungen, nicht linear, jedoch wurde **auch sieben Jahre nach der Unterbodenmelioration ein Mehrertrag von bis zu über 40 % für Winterweizen** erzielt (Abbildung 8; 22 % im Mittel).

4.4 KOSTEN DES VERFAHRENS

Zur Bearbeitung der kompletten Ackerfläche sind die Kosten für den Maschinen- (Anschaffung oder Anmietung) und Betriebsmitteleinsatz (Diesel), sowie der Arbeitszeitbedarf im Allgemeinen hoch. Dementsprechend sind Verfahren zur Unterbodenmelioration nur dann betriebswirtschaftlich sinnvoll, wenn die zusätzlichen Kosten

durch entsprechende Ertragssteigerungen ausgeglichen werden.

Forschungsstand: Im Verbundprojekt Soil³ wurden in der Entwicklungsphase und während der Versuchsanlagen verfahrenstechnische Daten erhoben, die es ermöglichen, die Verfahrenskosten abzuschätzen.

Die Flächenleistung und der Einsatzumfang sind neben den Ertragseffekten entscheidende Größen zur Bestimmung des Break-Even-Points für das Verfahren. Die Kalkulation zeigt, dass die proportionalen Spezialkosten mit über 90 % den größten Einfluss auf die Verfahrenskosten haben. Diese wiederum werden wesentlich durch den jährlichen Einsatzumfang und möglichst geringen Anteil an Nebenzeiten (unter anderem Straßentransport, Schlaggröße) bestimmt. Die Verfahrenskosten liegen im Bereich von **700 bis 800 € pro Hektar zuzüglich Kosten für das eingebrachte organische Düngemittel**. Bei einem derzeitigen Weizenpreis von 250 € pro Tonne und einem Ertrag von 7 Tonnen pro Hektar müsste also der Ertrag einmalig um etwa 60 % gesteigert werden, beziehungsweise in drei Folgejahren um jeweils 20 %, damit sich die Investition rechnet. Für einen niedrigeren Weizenpreis könnten bis zu vier Jahre Ertragssteigerungen von 20 % nötig sein. In unseren bisherigen Feldversuchen werden diese Zahlen erreicht, nicht jedoch in allen Praxisversuchen. Hier zeigte sich die Bedeutung der gleichmäßigen Durchmischung des Kompostes mit dem Unterboden von 30 bis 60 cm. Tiefer Kompostablagen führten dazu, dass die Pflanzenwurzeln diesen Bereich nicht oder zu spät erreichen und hierdurch Effekte ausblieben.

Aufgrund der Ertragssteigerung über mehrere Jahre besteht in den bereits genannten Zielregionen für geeignete Böden ein großes Marktpotenzial, insbesondere auf sandigen und lehmigen Standorten mit einem hohen Risiko von Trockenperioden im Frühsommer.

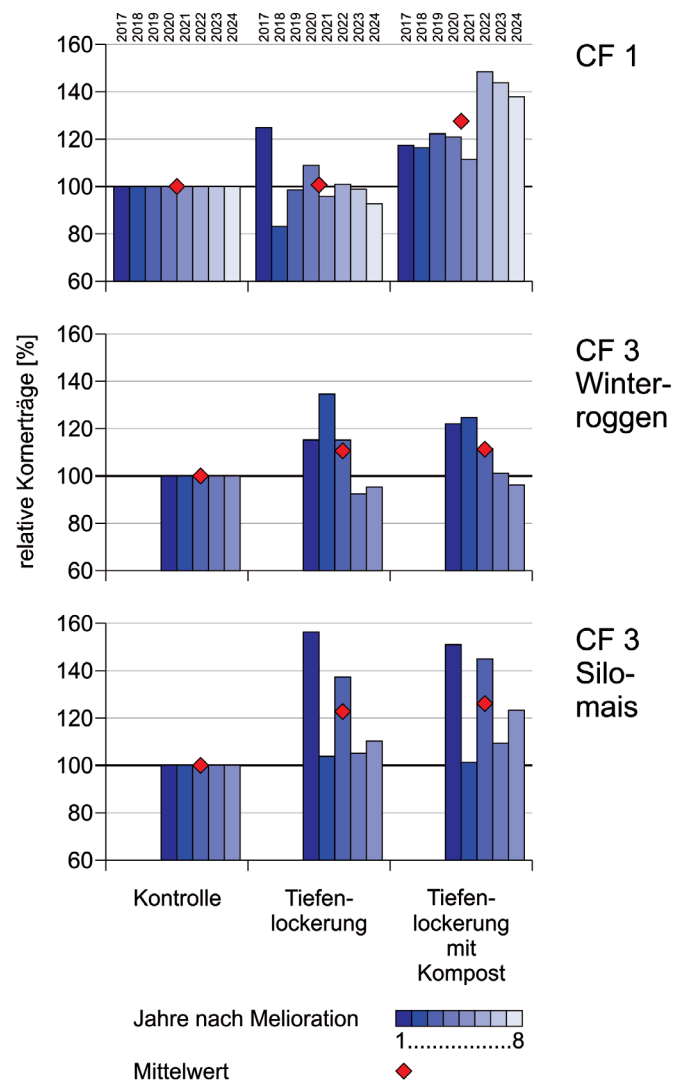


Abbildung 8: Kornträge relativ zur nicht meliorierten Kontrolle A) in CF1 bei Bonn 1 Jahr bis 7 Jahre nach Melioration, B) und C) in CF3 bei Thyrow 1 bis 5 Jahre nach Melioration.

Fruchtfolge CF1: 2017 Sommergerste 2018 Winterweizen 2019 Wintergerste 2020 Hafer 2021 Winterweizen 2022 Wintergerste 2023 Winterweizen 2024 Wintergerste

5. Die *Impact Assessment Platform*

Um die Auswirkungen von biologischen und mechanischen Meliorationsmaßnahmen auf die Ernteerträge in Deutschland abzuschätzen, wurde eine modellbasierte Plattform zur Wirkungsabschätzung (*Impact Assessment Platform*, IAP) entwickelt. Sie ist öffentlich zugänglich und kann als Entscheidungshilfe genutzt werden. Über die Eingabe standortspezifischer Daten bietet die IAP Landwirten und Entscheidungsträgern Einblicke in potenzielle Ertragsvorteile verschiedener Unterbodenmanagementverfahren in ihren Regionen. Für die Entwicklung der IAP wurde die Open-Source-Modellplattform SIMPLACE (Enders et al. 2023) verwendet, mit der verschiedene Aspekte des landwirtschaftlichen Systems (zum Beispiel Pflanzenwachstum, Nährstoffaufnahme, Stickstoffdynamik im Boden) vereinfacht dargestellt (simuliert), und die durchschnittlichen jährlichen Ernteerträge auf Kreisebene (regionalstatistik.de) geschätzt wurden. Dies beinhaltet die Berücksichtigung standortspezifischer Beschränkungen des Pflanzenwachstums, insbesondere der Bodenverdichtung. Die IAP ist auf dem BonaRes-Serviceportal dauerhaft und kostenlos verfügbar:

<https://www.bonares.de/soil3/iap-map>

Das Modell wurde in GIS integriert, um Meliorationseffekte auf fünf Hauptkulturen in der Fruchtfolge Sommergerste, Wintergerste, Winterraps, Hafer, Winterweizen

und Wintergerste zu simulieren. Das Modell wurde zuvor anhand von mehrjährigen Feldversuchsdaten zu mechanischer (Bauke et al. 2024) und biologischer Unterbodenmelioration (Behrend et al. 2025) kalibriert, die an der Versuchsstation Klein-Altendorf bei Bonn erhoben wurden. Für die Regionalisierung auf die nationale Ebene wurde das Modell anhand von beobachteten Ertragsdaten aus den Jahren 1999 bis 2021 für Landkreise mit verfügbaren empirischen Ertragsdaten weitergehend kalibriert, um eine robuste Grundlage für die nachfolgenden Analysen zu schaffen. Die erforderlichen Daten für regionale Simulationen, wie zum Beispiel Bodendaten, einschließlich der Bioporendichte, wurden vom Thünen-Institut aus der BZE-LW zur Verfügung gestellt (Poeplau et al. 2020). Diese Daten ermöglichten die Simulationen über alle Agrarstandorte Deutschlands mit einer Auflösung von 8 km, insgesamt 3.304 Simulationspunkte, um das gesamte Land zu repräsentieren. Anschließend wurden Klimadaten von 1999 bis 2021 aus der Datenbank des Deutschen Wetterdienstes (DWD) eingearbeitet (dwd.de). Ertragsstatistiken auf subnationaler Kreisebene wurden zusammen mit Daten zu Aussaat-, Blüte- und Ernteterminen aus der DWD-Phänologiedatenbank zusammengestellt. Diese Datensätze erlauben eine regional-spezifisch genaue Darstellung der agronomischen Bedingungen durch das Modell.

Das kalibrierte Modell dient als Grundlage für die Bewertung der Auswirkungen verschiedener Unterbodenmelio-

rationstechniken auf die durchschnittlichen Ernteerträge auf Kreisebene. Es wurden vier Szenarien bewertet: zwei biologische und zwei mechanische Ansätze des Unterbodenmanagements. Die biologischen Techniken umfassen den Voranbau von Wegwarte (Vorfrucht mit Pfahlwurzeln, Szenario PC; Abbildung 9) und Luzerne (Leguminose mit Pfahlwurzeln, Szenario PL), um die Struktur des Unterbodens vor dem Anbau der Hauptkultur zu verbessern. Diese Strategie zielt darauf ab, die Bodenverdichtung auf natürliche Weise zu verringern, die Struktur des Unterbodens zu verbessern und die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen, um so ein günstigeres Umfeld für die Wurzelentwicklung und folglich den Ertrag zu schaffen. Zu den mechanischen Szenarien gehören die Tiefenlockerung des Unterbodens (Szenario DL) und die Tiefenlockerung mit Einbringung von organischem Material in den Unterboden (Szenario DLB). Diese Unterbodenmanagementmaßnahmen sollen die Bodenstruktur verbessern, die Bioporendichte erhöhen, die Wasser- und Nährstoffaufnahme insbesondere aus dem Unterboden verbessern, und das Wurzel- und Sprosswachstum erhöhen.

Die IAP schätzt die Verbesserungen der mittleren Jahreserträge für fünf Hauptkulturen, die in einer Fruchtfolge mit vier Unterbodenmeliorationstechniken angebaut werden (die Melioration findet vor Sommergerste statt), im Vergleich zu einer Kontrolle ohne Melioration über den Zeitraum 1998–2021 (vier vollständige Fruchtfolgen). Über alle Kulturen und Jahre hinweg profitieren insbesondere die Sommerungen vom Anbau von Wegwarte und Luzerne (Szenarien PC und PL) vor allem im Nordosten und einigen westlichen Gebieten des Landes. Darüber hinaus führen die mechanischen Meliorationstechniken (Szenarien DL und DLB) insbesondere in Mittel-, West- und Süddeutschland zu Ertragsvorteilen im Vergleich zur Kontrolle. Winterkulturen reagieren auf eine Tiefenlockerung mit Einbringung von organischem Material in den Unterboden (DLB) besonders positiv. Winterungen profitieren im Allgemeinen sowohl bei biologischer als auch bei mechanischer Bewirtschaftung stärker als Sommer-

ungen und weisen in den meisten Regionen das größte Potenzial für Ertragssteigerungen auf. Es ist zu beachten, dass Ertragseinbußen durch Schädlinge und Unkräuter im Modell nicht berücksichtigt wurden.

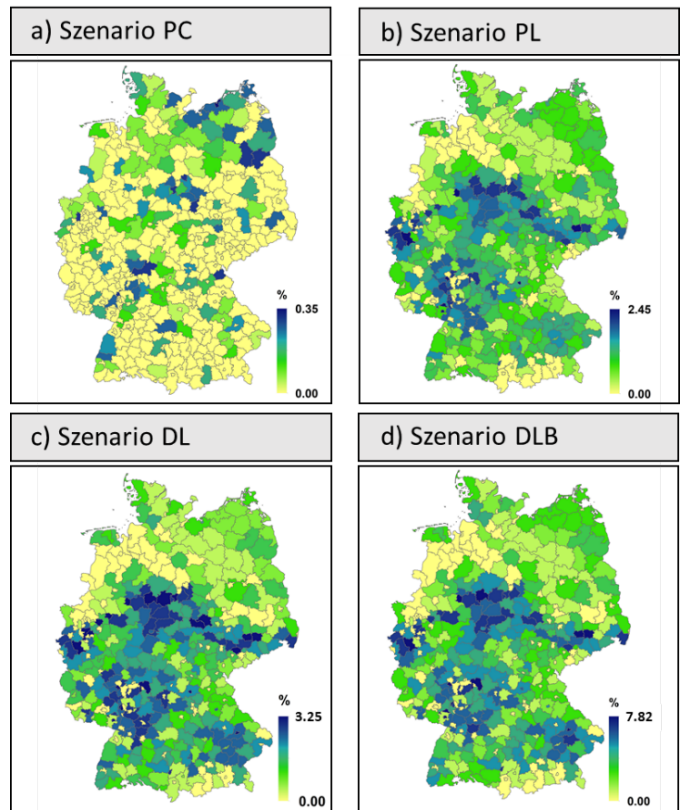


Abbildung 9: Die relativen Veränderungen des simulierten mittleren Jahresertrages von Sommergerste (%) bei Anwendung biologischer und mechanischer Bodenverbesserungstechniken auf Kreisebene in Deutschland. Der simulierte mittlere Jahresertrag von Sommergerste im Zeitraum 1999–2021, betrachtet als Basislinie; a) Szenario PC: Vorfruchtanbau von Zichorie, b) Szenario PL: Vorfruchtanbau von Luzerne, c) Szenario DL: Tiefenlockerung des Unterbodens und d) Szenario DLB: Tiefenlockerung mit Einarbeitung von Biokompost.

Referenzen

- Alcántara V., Don A., Vesterdal L., Well R., Nieder R. 2017. Stability of buried carbon in deep-ploughed forest and cropland soils - implications for carbon stocks. *Scientific Reports* 7, 1-12. Doi: 10.1038/s41598-017-05501-y.
- Bauke S.L., Seidel S.J., Athmann M., Berns A.E., Braun M., Gocke M.I., Guigue J., Kautz T., Kögel-Knabner I., Ohan J., Rillig M., Schlöter M., Schmittmann O., Schulz S., Uhlig D., Schnepf A., Amelung W. 2024. Short-term effects of subsoil management by strip-wise loosening and incorporation of organic material. *Soil & Tillage Research* 236, 105936. Doi: 10.1016/j.still.2023.105936.
- Behrend D., Athmann M., Han E., Küpper P.M., Perkons U., Bauke S.L., Köpke U., Kautz T., Gaiser T., Seidel S.J. 2025. Do biopores created by perennial fodder crops improve the growth of subsequent annual crops? A synthesis of multiple field experiments. *Field Crops Research* 322, 109687. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2024.109687>.
- Burger D.J., Bauke S.L., Schneider F., Kappenberg A., Gocke M.I. 2024. Root-derived carbon stocks in formerly deep-ploughed soils - A biomarker-based approach. *Organic Geochemistry* 190, 104756. Doi: 10.1016/j.orggeochem.2024.104756.
- Enders A., Vianna M., Gaiser T., Krauss G., Webber H., Srivastava A.K., Seidel S.J., Tewes A., Rezaei E.E., Ewert F. 2023. SIMPLACE-a versatile modelling and simulation framework for sustainable crops and agroecosystems. *In Silico Plants* 5, diad006. Doi: 10.1093/insilicoplants/diad006.
- Kautz T., Amelung W., Ewert F., Gaiser T., Horn R., Jahn R., Javaux M., Kemna A., Kuzyakov Y., Munch J.-C., Pätzold S., Peth S., Scherer H.W., Schlöter M., Schneider H., Vanderborght J., Vetterlein D., Walter A., Wiesenberger G.L.B., Köpke U. 2013. Nutrient acquisition from arable subsoils in temperate climates: a review. *Soil Biology & Biochemistry* 57, 1003-1022. Doi: 10.1016/j.soilbio.2012.09.014.
- Ittner S., Gerdes H., Athmann M., Bauke S.L., Gocke M., Guigue J., Jaiswal S., Kautz T., Schmittmann O., Schulz S., Seidel S. 2020. The impact of subsoil management on the delivery of ecosystem services. *BonaRes Series* 2020/5. Doi: 10.20387/BonaRes-BSZH-QBKN.
- Jakobs I., Schmittmann O., Schulze Lammers P. 2017. Short-term effects of in-row subsoiling and simultaneous admixing of organic material on growth of spring barley (*H. vulgare*). *Soil Use and Management* 33, 620-630. Doi: 10.1111/sum.12378.
- Poeplau C., Don A., Flessa H., Heidkamp A., Jacobs A., Prietz R. 2020. Erste Bodenzustandserhebung Landwirtschaft — Kerndatensatz. *OpenAgrar*. Doi: 10.3220/DATA20200203151139.
- Schneider F., Don A., Hennings I., Schmittmann O., Seidel S.J. 2017. The effect of deep tillage on crop yield - What do we really know? *Soil & Tillage Research* 174, 193-204. Doi: 10.1016/j.still.2017.07.005.
- Schneider F., Don A. 2019. Root-restricting layers in German agricultural soils. Part I: Extent and cause. *Plant and Soil* 442, 433-451. Doi: 10.1007/s11104-019-04185-9.
- DWD-Phänomenologie-Datenbank zugänglich von: https://www.dwd.de/DE/leistungen/phaeno_sta/phaenosta.html?nn=16102
- Subnationale Ebene "Kreis" zugänglich von: <https://www.regionalstatistik.de/>

Weiterführende Literatur

- Bauke S.L., von Sperber C., Tamburini F., Gocke M.I., Honermeier B., Schweitzer K., Baumecker M., Don A., Sandhage-Hofmann A., Amelung W. 2018. Subsoil phosphorus is affected by fertilization regime in long-term agricultural experimental trials. *European Journal of Soil Science* 69, 103-112. Doi: 10.1111/ejss.12516.
- Burger D.J., Schneider F., Bauke S.L., Kautz T., Don A., Amelung W. 2023. Fifty years after deep-ploughing: effects on yield, roots, nutrient stocks and soil structure. *European Journal of Soil Science* 74, e13426. Doi: 10.1111/ejss.13426.
- Chiba A., Vitow N., Baum C., Zacher A., Kahle P., Leinweber P., Schlöter M., Schulz S. 2024. Earthworm activities change phosphorus mobilization and uptake strategies in deep soil layers. *Applied Soil Ecology*, 193, 105168. Doi: 10.1016/j.apsoil.2023.105168.
- Frelüh-Larsen A., Hinzmann M., Ittner S. 2018. The 'Invisible' Subsoil: An Exploratory View of Societal Acceptance of Subsoil Management in Germany. *Sustainability* 10, 3006. Doi: 10.3390/su10093006.
- Gocke M.I., Don A., Heidkamp A., Schneider F., Amelung W. 2021. The phosphorus status of German cropland – An inventory of top- and subsoils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 184, 51-64. Doi: 10.1002/jpln.202000127.
- Han E., Li F., Perkons U., Küpper P.M., Bauke S.L., Athmann M., Thorup-Kristensen K., Kautz T., Köpke U. 2021. Can pre-crops uplift subsoil nutrients to topsoil? *Plant and Soil* 463, 329-345. Doi: 10.1007/s11104-021-04910-3.
- Koch M., Boselli R., Hasler M., Zörb C., Athmann M., Kautz T. 2021. Root and shoot growth of spring wheat (*Triticum aestivum* L.) are differently affected by increasing subsoil biopore density when grown under different subsoil moisture. *Biology and Fertility of Soils* 57, 1155-1169. Doi: 10.1007/s00374-021-01597-7.
- Ittner S., Gerdes H., Kiresiewa Z. 2022. The impact of subsoil management on the delivery of ecosystem services: An economic valuation for Germany. *BonaRes Series* 2022/2. Doi: 10.20387/BonaRes-WVC6-YJ14.
- Jakobs I., Schmittmann O., Athmann M., Kautz T., Schulze Lammers P. 2019. Cereal Response to Deep Tillage and Incorporated Organic Fertilizer. *Agronomy* 9, 296. Doi: 10.3390/agronomy9060296.
- Schmittmann O., Christ A., Schulze Lammers P. 2021. Subsoil Melioration with Organic Material-Principle, Technology and Yield Effects. *Agronomy* 11, 1970. Doi: 10.3390/agronomy11101970.
- Schmittmann O., Christ A., Schulze Lammers P. 2023. Technology and yield effects of subsoil melioration by admixing organic materials. *Proceeding of 2023 American Society of Agricultural and Biological Engineers Annual International Meeting*. Doi: 10.13031/aim.202300455.
- Schmittmann O., Schulze Lammers P. 2023. Assessing Subsoil Conditions with an ASABE Conform Vertical Penetrometer-Development and Evaluation. *Sensors* 23, 1306. Doi: 10.3390/s23031306.
- Schneider C., Kiresiewa Z., Gerdes H., Pazmino Murillo J., Skaddell L., Sakhaee A., Schneider F., Don A. 2024. Regionalised factors for successful implementation of subsoil management: Evidence from three case studies in Germany. *BonaRes Series* 2024/3. Doi: 10.20387/BonaRes-n2ta-v096.
- Schneider F., Don A. 2019. Root-restricting layers in German agricultural soils. Part II: Adaptation and melioration strategies. *Plant and Soil* 442, 419-432. Doi: 10.1007/s11104-019-04186-8.



Impressum

HERAUSGEBER:

BONARES-ZENTRUM

BonaRes steht für „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie“. Bei BonaRes handelt es sich um eine Fördermaßnahme des Bundesministeriums für Forschung, Technologie und Raumfahrt (BMFTR) im Rahmen der Forschungsstrategie BioÖkonomie 2030 – Unser Weg zu einer biobasierten Wirtschaft.

AUTOR:INNEN:

Martina I. Gocke, Sara L. Bauke, Miriam Athmann, Michael Baumecker, Anne E. Berns, Axel Don, Thomas Gaiser, Holger Gerdes, Julien Guigue, Farshid Jahanbakhshi, Timo Kautz, David-Paul Klein, Ingrid Kögel-Knabner, Matthias Rillig, Michael Schlöter, Oliver Schmittmann, Andrea Schnepf, Kathlin Schweitzer, Sabine Seidel, Tobias Selzner, Laura Skadell, Michael Sommer, Amit Srivastava, Wulf Amelung

SATZ UND LAYOUT:

Luise Ohmann (UFZ)
Miriam Hantzko (UFZ)

WWW.BONARES.DE

INFO@BONARES.DE

LIZENZ:

Die Inhalte dieser Broschüre stehen unter der Lizenz CC BY. Für weitere Informationen zur Verbreitung und Veränderung der Inhalte siehe: <https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>.

DOI:

10.5281/zenodo.17037064