



BONARES

BonaRes-Schriftenreihe 2024/3| DOI: 10.20387/BonaRes-n2ta-v096

Schneider, Ch., Kiresiewa, Z., Gerdes, H.,
Pazmino Murillo, J., Skadell, L., Sakhaee, A.,
Schneider, F., Don, A.

Regionalisierte Faktoren für die erfolgreiche Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung: Evidenz aus Deutschland

„Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“ ist ein vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) gefördertes Forschungsprogramm.

www.bonares.de

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research



BONARES

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research

Impressum

Herausgeber: BonaRes – Zentrum für Bodenforschung
c/o Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung UFZ
Department Bodensystemforschung
Theodor-Lieser-Str.4 | 06120 Halle (Saale), Deutschland
Telefon: (+49) 345 558 5226 | E-Mail: info@bonares.de
Web: www.bonares.de

Titel	Regionalisierte Faktoren für die erfolgreiche Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung: Evidenz aus Deutschland
Autoren	Christian Schneider - Ecologic Institut, Berlin Zoritz Kiresiewa - Ecologic Institut, Berlin Holger Gerdes - Ecologic Institut, Berlin Julia Pazmino Murillo - Ecologic Institut, Berlin Laura Skadell - Thünen Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig Ali Sakhaee - Thünen Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig Florian Schneider - Thünen Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig Axel Don - Thünen Institut für Agrarklimaschutz, Braunschweig
Kontakt	christian.schneider@ecologic.eu
Datum	Februar 2025
Kurzfassung	<p>Landwirtschaftsbetriebe und andere Interessengruppen in Deutschland sehen die Unterbodenmelioration als effektives Mittel zur Verbesserung der Wasserspeicherung im Unterboden an, die bewirkt, dass temporäre Wasserdefizite besser überbrückt werden können. Darüber hinaus erkennen sie an, dass Unterbodenmelioration Starkregenereignisse abmildern kann, da sie die Infiltration und Versickerung von Wasser im Boden verbessert. Aufbauend auf dieser Auffassung analysiert dieser Beitrag relevante förderliche und hinderliche Faktoren für die Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung in einem regionalen Kontext, wobei der Schwerpunkt auf (i) geophysikalischen Bedingungen und (ii) relevanten sozioökonomischen Kriterien in ausgewählten Regionen Deutschlands liegt. Zu diesem Zweck haben wir die Potenziale, die Unterbodenmelioration bietet, sowie den Bedarf in drei Bundesländern in Deutschland kartiert und regionale Agrarstatistiken im Hinblick auf relevante sozioökonomische Kriterien analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen diskutieren wir die möglichen Auswirkungen eines Missverhältnisses zwischen geophysikalischen Bedingungen und sozioökonomischen Kriterien auf die erfolgreiche Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung in Deutschland und zeigen Wege auf, wie die identifizierten Hindernisse in der landwirtschaftlichen Praxis und der Politik angegangen werden können.</p>
Schlüsselwörter	Unterboden, soziale Akzeptanz, Soil ³ , BonaRes
Danksagung	Diese Arbeit wurde vom Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) im Rahmen der Fördermaßnahme „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“, Projekt „Soil ³ – nachhaltige Unterbodenbewirtschaftung, Teilprojekt 6“ (Förderkennzeichen 031B0515F) gefördert.
Lizenz	<p>Dieses Werk ist lizenziert unter der Creative Commons Attribution 4.0 International (CC BY 4.0) License. Eine Kopie der Lizenz finden Sie unter creativecommons.org.</p> 



Zusammenfassung

Landwirtschaftsbetriebe und andere Interessengruppen in Deutschland sehen Unterbodenmelioration als effektives Mittel zur Verbesserung der Wasserspeicherung im Unterboden an, die bewirkt, dass temporäre Wasserdefizite besser überbrückt werden können. Darüber hinaus erkennen sie an, dass die Unterbodenmelioration Starkregenereignisse abmildern kann, da sie die Infiltration und Versickerung von Wasser im Boden verbessert. Aufbauend auf dieser Auffassung analysiert dieser Beitrag relevante förderliche und hinderliche Faktoren für die Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung in einem regionalen Kontext, wobei der Schwerpunkt auf (i) geophysikalischen Bedingungen und (ii) relevanten sozioökonomischen Kriterien in ausgewählten Regionen Deutschlands liegt. Zu diesem Zweck haben wir die Potenziale, die Unterbodenmelioration bietet, sowie den Bedarf in drei Bundesländern in Deutschland kartiert und regionale Agrarstatistiken im Hinblick auf relevante sozioökonomische Kriterien analysiert. Basierend auf diesen Ergebnissen diskutieren wir die möglichen Auswirkungen eines Missverhältnisses zwischen geophysikalischen Bedingungen und sozioökonomischen Kriterien auf die erfolgreiche Umsetzung der Unterbodenbewirtschaftung in Deutschland und zeigen Wege auf, wie die identifizierten Hindernisse in der landwirtschaftlichen Praxis und der Politik angegangen werden können.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Kartenverzeichnis.....	iii
Tabellenverzeichnis	iii
1 Einführung.....	4
2 Methoden.....	6
2.1 Geophysikalische Perspektive.....	6
2.1.1 Ausschlusskriterien.....	6
2.1.2 Digitale Bodenkartierung	6
2.1.3 Klassifizierungssystem	7
2.2 Sozioökonomische Perspektive.....	7
2.2.1 Relevante Kriterien und Gewichtung für die sozioökonomischen Karten.....	7
2.3 Kombination von geophysikalischen und sozioökonomischen Perspektiven	10
3 Ergebnisse	11
3.1 Bedarf zur Unterbodenmelioration in den drei Fallstudienregionen	11
3.2 Zusammengeführte Karten der drei Fallstudienregionen mit geophysikalischen Merkmalen.....	12
3.3 Zusammengeführte Karten der drei Fallstudienregionen mit regionalisierten sozioökonomischen Merkmalen	13
4 Diskussion.....	14
4.1 Soil ³ -Technologie.....	15
4.2 Biologische Unterbodenlockerung.....	16
5 Schlussfolgerungen	17
6 Quellenverzeichnis.....	20
Anhang	21
Weitere Veröffentlichungen	31
BonaRes-Reihe	1

Kartenverzeichnis

Karte 1: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für den Handlungsdruck zur Unterbodenmelioration pro Landkreis	11
Karte 2: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für die Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerungen zur Unterbodenmelioration (geophysikalische Perspektive) pro Landkreis	12
Karte 3: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für die Anwendbarkeit der Soil ³ -Technologie zur Unterbodenmelioration (geophysikalische Perspektive) pro Landkreis.....	12
Karte 4: Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerungen zur Unterbodenmelioration (sozioökonomische Perspektive) pro Landkreis	14
Karte 5: Anwendbarkeit der Soil ³ -Technologie zur Unterbodenmelioration (sozioökonomische Perspektive) pro Landkreis.....	14

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Ausschlusskriterien für die Durchführung von Unterbodenlockerung (BD) und/oder Soil ³ -Technologie (Soil ³).....	6
Tabelle 2: Relevanz der sozioökonomischen Kriterien.....	8

1 Einführung

Das Risiko von Ernteausfällen in heißen und trockenen Sommern nimmt aufgrund des Klimawandels sowohl in Deutschland als auch weltweit zu. Eine verbesserte Integration des Unterbodens als Produktionsfaktor in bestehende landwirtschaftliche Systeme kann ein Mittel sein, um dieser Herausforderung zu begegnen, da der Unterboden große Reserven an Wasser, Kohlenstoff und Nährstoffen birgt und somit zur Stabilisierung und sogar Steigerung der Erträge beitragen kann. Das Projekt Soil³ will daher zu einer nachhaltigen Bewirtschaftung des Unterbodens beitragen, indem es die folgenden Maßnahmen entwickelt und erprobt:

- i) Verbesserung der Untergrundeigenschaften durch den Anbau von Luzerne und tiefwurzelnenden Vorfrüchten (biologische Melioration)
- ii) Tiefenlockerung kombiniert mit dem Einbringen von Kompost in tiefe Bodenschichten (Soil³-Technologie) (mechanische Melioration)

In diesem Beitrag wird „biologische Unterbodenlockerung“ als eine Methode der biologischen Unterbodenbewirtschaftung analysiert und diskutiert. Bei der biologischen Unterbodenlockerung werden Pflanzen mit besonders tiefreichenden und kräftigen Wurzeln angebaut, die durchgängige Makroporen (Bioporen) im Unterboden bilden, die den Folgekulturen als „Schnellstraße“ in den Unterboden dienen können (Kautz, 2014). In Deutschland wurde die meiste Forschung zu tiefwurzelnenden Kulturen bisher mit Luzerne (*Medicago sativa* L.) als Futterpflanze durchgeführt (z.B. Gaiser et al., 2012; Kautz & Köpke, 2010). Im Gegensatz dazu umfassen mechanische Techniken zur Unterbodenmelioration das Tiefpflügen, die Tiefenlockerung und den neuartigen Soil³-Ansatz der tiefen Kompost-Einbringung (Frelth-Larsen et al., 2018). Dieser Beitrag konzentriert sich auf den letztgenannten Ansatz, bei dem ein innovatives Einbringungsgerät verwendet wird, das im Rahmen des Soil³-Projekts entwickelt wurde. Mit der Maschine wird organisches Material (z. B. Kompost) in den Unterboden eingebracht, wobei der Oberboden nur minimal beeinträchtigt wird (Schmittmann et al., 2021).

Die erste deutsche Bodenzustandserhebung, die alle landwirtschaftlichen Flächen in Deutschland in einem regelmäßigen Raster von 8 km x 8 km erfasste, ergab, dass 46 % der landwirtschaftlichen Flächen so stark verdichtet sind, dass das Wurzelwachstum eingeschränkt ist – zusätzlich zu anderen hemmenden Faktoren wie Sauerstoffmangel, sandige Struktur und Säuregehalt (Schneider et al., 2019). Angesichts der Herausforderungen des Klimawandels ist es von entscheidender Bedeutung, diese wurzelbeschränkenden Schichten näher zu untersuchen, um ein tieferes Wurzelwachstum zu ermöglichen und Wasser sowie Nährstoffe aus dem Unterboden (> 30 cm Tiefe) zu nutzen, wenn die Ressourcen des Oberbodens (0–30 cm Tiefe) erschöpft sind.

Die Wirksamkeit von Strategien zur Unterbodenmelioration ist jedoch boden- und regionalspezifisch; Ansätze müssen somit auf die örtlichen Standortbedingungen zugeschnitten werden, um erfolgreich zu sein. Wird solch eine Anpassung versäumt, kann dies zu einer verringerten Produktivität, verschlechterten Befahrbarkeit und eingeschränkter Bearbeitbarkeit der Flächen führen. Je nach Methode gibt es unterschiedliche Ausschlusskriterien für die Unterbodenmelioration, die sich auf Bedingungen beziehen, unter denen die Durchführung der Meliorationsmaßnahme entweder gar nicht möglich ist oder mit einem hohen Risiko für negative Nebenwirkungen verbunden ist.

Die Anwendung der Soil³-Technologie ist beispielsweise nicht geeignet für flachgründige Böden – also Böden, bei denen Grundgestein innerhalb der oberen 60 cm des Bodens beginnt. Ein

weiteres Ausschlusskriterium sind nah an der Bodenoberfläche liegende Drainagerohre, die bei der Anwendung der eingesetzten Maschinen beschädigt werden könnten. Außerdem kann Grundwassers zu einer anaeroben Zersetzung des organischen Materials führen, das mit der Soil³-Methode eingebracht worden ist, was zu erheblichen Emissionen von Stickstoffoxid und anderen Treibhausgasen führen kann (Weier et al., 1993). Daher ist auch nah an der Bodenoberfläche liegendes Grundwasser ein Ausschlusskriterium für die Anwendung der Soil³-Technologie.

Der Anbau von Luzerne unterliegt verschiedenen Beschränkungen: Der Gesteins- und Sandgehalt sowie der Säuregehalt des Bodens müssen im Voraus ausgewertet werden, da das Überschreiten bestimmter Grenzwerte die Bildung und das Fortbestehen von Bioporen erschwert oder verhindert. All dies muss geprüft werden, bevor eine geeignete Methode ausgewählt werden kann.

Frühere Untersuchungen haben gezeigt, dass neben geophysikalischen Faktoren auch sozioökonomische Aspekte die Akzeptanz der Unterbodenmelioration in Deutschland beeinflussen können. Hinzmann et al. (2021) identifizierten eine Reihe sozioökonomischer Faktoren, die die Akzeptanz bei landwirtschaftlichen Interessengruppen bestimmen, darunter ökonomische und betriebliche Erwägungen, Risikowahrnehmung, Umweltbewusstsein, persönliche Standards und Überzeugungen sowie das allgemeine Bewusstsein für die Rolle des Unterbodens im Pflanzenbau. Diese Faktoren variieren je nach Region und Betriebstyp.

Angesichts dieser Überlegungen ist es wichtig, die Regionen in Deutschland zu identifizieren, die am besten für die Durchführung von Unterbodenmeliorationsmaßnahmen geeignet sind. Dabei geht es nicht nur darum, degradierte Böden aus geophysikalischer Perspektive zu identifizieren, sondern auch das sozioökonomische Umfeld zu berücksichtigen, das Meliorationsmaßnahmen unterstützen oder behindern kann. Selbst wenn beispielsweise die Anwendung der Soil³-Technologie auf verdichteten Ackerböden die Ernteerträge erheblich steigern könnte, würde diese Verbesserung wenig Anklang finden, wenn die technische Infrastruktur und das erforderliche Kompostmaterial nicht zur Verfügung stehen. Ähnlich kann der Anbau von Luzerne (biologische Unterbodenlockerung) auf Widerstand stoßen, wenn Landwirtschaftsbetriebe Schwierigkeiten haben, die Luzerne-Biomasse zu verwerten oder ihre Anbauflächen für mindestens eine, eher zwei Wachstumsperioden aus dem Produktionszyklus nehmen müssten (Freljh-Larsen et al., 2018).

Ziel dieses Papiers ist es, auf der Grundlage geophysikalischer und sozioökonomischer Faktoren auf Kreisebene zu ermitteln, welche Regionen in den Bundesländern Nordrhein-Westfalen (NRW), Sachsen-Anhalt (ST) und Brandenburg (BB) für die Unterbodenmelioration geeignet sind. Darüber hinaus beleuchten und diskutieren wir Diskrepanzen zwischen diesen Faktoren und schlagen praktikable Strategien vor, um sowohl die soziale Akzeptanz als auch die Effektivität von Unterbodenbewirtschaftungspraktiken in der Landwirtschaft zu verbessern. Durch die Auseinandersetzung mit diesen Diskrepanzen sollen neue Erkenntnisse gewonnen werden, die zu einer Verbesserung der Bodengesundheit und der landwirtschaftlichen Produktivität in verschiedenen landwirtschaftlichen Kontexten in Deutschland führen können.

2 Methoden

2.1 Geophysikalische Perspektive

2.1.1 Ausschlusskriterien

Zur Bewertung des Gesamtpotenzials eines Standorts für die Unterbodenmelioration wurde eine vereinfachte binäre Skala verwendet, um die Ausschlusskriterien darzustellen (1= Kriterium trifft zu; 0= Kriterium trifft nicht zu). Um dies zu ermöglichen, wurden Schwellenwerte definiert, die in Tabelle 1 aufgeführt sind. Trifft ein Ausschlusskriterium auf einen Standort und eine Meliorationsmethode zu, wurde der Standort als ungeeignet für eine Melioration eingestuft. Obwohl diese Schwellenwerte etwas willkürlich waren und die Ergebnisse für einzelne Standorte beeinflussen konnten, blieben die regionalen Muster trotz kleinerer Anpassungen der Schwellenwerte stabil (Ergebnisse nicht gezeigt).

Tabelle 1: Ausschlusskriterien für die Durchführung von biologischer Unterbodenlockerung (BD) und/oder Soil³-Technologie (Soil³)

Eigenschaft	Definition nach Schneider et al. (2020)	Relevante Technologie
Flacher Boden	Nicht abbaubares, festes Grundgestein < 1 m Tiefe	Soil ³ , BD
Gesteinsfragmente	20 Vol-% Gesteinsfragmente (> 2 mm)	BD
Sand	Haupttexturklasse: Sand (nach AD- HOC-AG BODEN (2005))	BD
Säuregehalt	pH _{H2O} < 5	BD
Abflussrohre	Abflussrohren im Unterboden	Soil ³
Grundwasser	Bodenhorizontsymbol „r“	Soil ³ , BD

Quelle: Schneider et al. (2020)

2.1.2 Digitale Bodenkartierung

Unter Verwendung des SCORPAN-Rahmens wurden zweiunddreißig Kovariablen ausgewählt, die den Boden (S-Faktor), das Klima (C-Faktor), den Organismus (O-Faktor), die Topografie und das Relief (R- Faktor), das Ausgangsmaterial und die Lithologie (P-Faktor) sowie die geografische Lage (N-Faktor) repräsentieren, um ein Modell zur räumlichen Vorhersage des Meliorationspotenzials und -bedarfs, der Schüttdichte und des Tongehalts zu entwickeln. Diese räumliche Vorhersage erfolgte für fünf Bodentiefenintervalle (0–10 cm, 10–30 cm, 30–50 cm, 50–70 cm, 70–100 cm) mithilfe der 2,5D-Methode. Bei dieser Methode wird jede Tiefe unabhängig prognostiziert, was die Prognoseunsicherheit verringert (Ma et al., 2021). Die Tiefenintervalle wurden in Anlehnung an den Standard der ersten deutschen Bodeninventur gewählt.

Die räumliche Vorhersage beschränkte sich auf Mineralböden und Ackerland, wobei nicht qualifizierte Proben anhand der Landnutzungskarte (ATKIS Basis-DLM2019) und Moorkarten (Roßkopf et al., 2015) ausgeschlossen wurden. Von den ca. 3100 Proben der Bestandsaufnahme wurden 1917 ausgewählt. Angesichts des binären Charakters des Meliorationspotenzials und -bedarfs wurde der Random-Forest-Algorithmus (RF) für die Klassifizierung gewählt, während RF für die Regression für Lagerungsdichte und Tongehalt verwendet wurde. Die Modellierung umfasste die Abstimmung des Hyperparameters 'mtry' des RF und die

Leistungsbewertung mittels K-facher räumlich verschachtelter Kreuzvalidierung. Für die räumliche Kreuzvalidierung wurde Deutschland in 50 gleich große Schichten unterteilt, die auf einem standardisierten INSPIRE-Gitter von 100 km x 100 km basieren. Aus jeder Schicht wurden Zufallsstichproben entnommen, um fünf Falten zu erstellen, was drei-mal wiederholt wurde. Dieser Ansatz gewährleistet eine robuste Leistungsbewertung.

2.1.3 Klassifizierungssystem

Nach der räumlichen Vorhersage wurden die Karten gegengeprüft, um Regionen zu ermitteln, die als meliorationsbedürftig und -fähig eingestuft wurden. Diese Regionen wurden mit den Karten der deutschen Landkreise überlagert. Die Pixel der Anbauflächen wurden gezählt, um den Prozentsatz der Böden zu bestimmen, die eine Unterbodenmelioration benötigen, und um die Anwendbarkeit bestimmter Techniken (Soil³-Technologie oder biologische Unterbodenlockerung) zu ermitteln. Auf der Grundlage des Prozentsatzes der Überschneidung zwischen Bedarf und Anwendbarkeit wurden fünf Klassen definiert:

- Klasse 1 (0–20 %): geringer Bedarf/Anwendbarkeit
- Klasse 2 (20–40 %): mäßiger Bedarf/Anwendbarkeit
- Klasse 3 (40–60 %): mittlerer Bedarf/Anwendbarkeit
- Klasse 4 (60–80 %): hoher Bedarf/Anwendbarkeit
- Klasse 5 (80–100 %): sehr hoher Bedarf/Anwendbarkeit

2.2 Sozioökonomische Perspektive

2.2.1 Relevante Kriterien und Gewichtung für die sozioökonomischen Karten

Wir haben relevante sozioökonomische Kriterien für die Umsetzung der mechanischen und biologischen Unterbodenmelioration identifiziert (Tabelle 2). Diese basieren auf einer Akzeptanzanalyse von 50 Landwirt:innen und 36 Bodenexpert:innen (Hinzmann et al., 2021) und den Ergebnissen von Aghabeygi et al. (in Vorbereitung)¹, die Schlüsselfaktoren ermittelt und bewertet haben, die für die Umsetzung verschiedener Praktiken der Unterbodenbewirtschaftung entscheidend sind. Die Schlüsselindikatoren wurden spezifiziert und nach ihrer zunehmenden Bedeutung von Faktor (1) bis (3) im Hinblick auf ihr Potenzial zur Einführung der Soil³-Technologie und/oder des Anbaus von Pflanzen, die den Aufbau von Bioporen unterstützen, gewichtet.

¹ Landbesitz, der in Aghabeygi et al. (in Vorbereitung) als wichtiger Faktor für die Umsetzung der Soil³-Technologie angegeben wurde, wurde hier nicht als relevantes Kriterium berücksichtigt, da die Akzeptanzanalyse zeigte, dass er trotz einiger anfänglicher Hinweise keinen signifikanten Einfluss auf die Umsetzung der mechanischen Unterbodenmelioration hat. Während die Gruppe der 'Pioniere' und 'Skeptiker' übereinstimmte, dass Landbesitz kein entscheidender Faktor für die Unterbodenverbesserung ist, war die Gruppe der 'Ökologen' der Ansicht, dass die Soil³-Technologie eher auf eigenem Land umgesetzt würde. Die Wirksamkeit der Soil³-Technologie auf gepachtetem Land hängt jedoch oft von der Pachtlaufzeit ab: langfristige Pachtverhältnisse sind weniger problematisch, während kurzfristige Pachtverhältnisse die Umsetzung erschweren können (siehe Hinzmann et al., 2021).

Tabelle 2: Relevanz der sozioökonomischen Kriterien

Sozioökonomisches Kriterium	Gewichtungsfaktor	Relevanz
Relevanz: Tiefwurzelnde Vorfrüchte		
Betriebstyp: Gemischtbetriebe	3	Es hat sich gezeigt, dass das Vorhandensein von Weiterverwendungsmöglichkeiten für Luzerne ein wesentlicher Faktor für die Akzeptanz des Anbaus ist (Hinzmann et al., 2021). Diese Nutzungsmöglichkeiten sind eng miteinander verbunden: Zum einen können Gemischtbetriebe Luzerne oder andere tiefwurzelnde Pflanzen als Futter für ihr Vieh einsetzen, zum anderen können Betriebe, die hauptsächlich Ackerbau betreiben, Luzerne vermarkten und sie an benachbarte Viehzüchter verkaufen. Darüber hinaus bietet dies eine Reihe von Vorteilen für die Umwelt und fördert geschlossene Kreisläufe in landwirtschaftlichen Systemen. So liefert die Verwendung von Luzerne als Viehfutter nicht nur Futter, sondern erzeugt auch organische Stoffe in Form von Dung. Dieser Dung kann dann als natürlicher Dünger in den Boden zurückgeführt werden, was die Bodengesundheit und Fruchtbarkeit für die Pflanzenproduktion fördert.
Betriebstyp: Ökologische Landwirtschaft	2	Die Ergebnisse der Akzeptanzanalyse (Hinzmann et al., 2021) zeigen, dass ökologische Betriebe tendenziell eher bereit sind, tiefwurzelnde Pflanzen wie Luzerne in ihre Fruchtfolgen zu integrieren. Da der Einsatz von mineralisch-synthetischen Stickstoffdüngern im ökologischen Landbau nicht erlaubt ist, ist das Interesse an Methoden, die organischen Stickstoff binden, erhöhen oder für die Pflanzen verfügbar machen, Teil der Betriebsphilosophie. Dies lässt vermuten, dass das Potenzial für die im Projekt Soil ³ untersuchte biologische Unterbodenlockerung umso größer ist, je höher der Anteil der ökologisch bewirtschafteten Flächen in der Region ist. Es wird davon ausgegangen, dass es einfacher ist, den Anteil tiefwurzelnder Pflanzen in der Fruchtfolge eines Betriebes mit einem bestehenden System nachhaltiger Maßnahmen zu erhöhen, als eine Umstellung bei einer hochspezialisierten konventionellen Fruchtfolge vorzunehmen.
Anteil von Leguminosen	1	Regionen mit intensivem Leguminosenanbau (neben Luzerne) bieten ein günstiges Umfeld für die Einführung von Luzerne und anderen tiefwurzelnden Pflanzen. Dies ist auf mehrere Schlüsselfaktoren zurückzuführen, wie z. B. vorhandene Kenntnisse und Erfahrungen in der Region, (potenzielle) Marktnachfrage, Umweltaspekte und (potenzielle) wirtschaftliche Anreize. Der Anbau von Leguminosen deutet darauf hin, dass die Betriebe in diesen Gebieten die Vorteile wie verbesserte Bodenfruchtbarkeit, geringerer Bedarf an Stickstoffdünger und abwechslungsreichere Fruchtfolgen, bereits erkannt haben. Dieses Verständnis könnte zu einer größeren Akzeptanz und Offenheit gegenüber dem Anbau von Luzerne führen. Eine Unterscheidung zwischen Futter- und Körnerleguminosen könnte ein genaueres Bild ergeben; in den verfügbaren statistischen Daten wurden jedoch beide immer zusammengefasst.
Relevanz: Soil³-Technologie		
Anteil von Sonderkulturen (Gemüse)	1	Da der Anbau von Sonderkulturen (z. B. Spargel, Zwiebeln usw.) zu höheren Einnahmen und Einkünften für Betriebe im Vergleich zu anderen Kulturen führt, könnte unter den Landwirt:innen, die bereits auf diese Kulturen spezialisiert sind, eine größere Bereitschaft bestehen, zusätzlich kostenintensive (ca. 750 Euro / ha)

		<p>Unterbodenbearbeitung durchzuführen. Regionen mit einem überdurchschnittlichen Anteil an Sonderkulturen können daher ein höheres Potenzial für die Umsetzung der Soil³-Technologie aufweisen. Diese Regionen gelten somit als etwas vielversprechender für die Anwendung der Soil³-Technologie.</p>
Regional verfügbarer Kompost	3	<p>Die Umsetzung der Soil³-Technologie erfordert erhebliche Mengen an Kompost (40 m³/ha). Die von Hinzmann et al. (2021) durchgeführte Akzeptanzanalyse kam zu dem Schluss, dass die Verfügbarkeit erheblicher Mengen an gut verrottetem, zertifiziertem Kompost die Bereitschaft der Betriebe, die Soil³-Technologie anzuwenden, erheblich beeinflussen kann. In Deutschland ist die Verteilung der Kompostierungsanlagen von Region zu Region sehr unterschiedlich. So gibt es in Ostdeutschland eine geringere Dichte an Kompostierungsanlagen, was vor allem die geringe Produktionsmenge an Kompost zurückzuführen ist. Die Wahrscheinlichkeit der Einführung der Soil³-Technologie hängt jedoch nicht nur vom Vorhandensein von Kompostieranlagen ab, sondern wird auch maßgeblich von den Produktionskapazitäten dieser Anlagen beeinflusst. Regionen mit leistungsfähigen Kompostierungsanlagen sind besser in der Lage, die für die Anwendung der Soil³-Technologie erforderliche große Nachfrage nach Kompost zu decken.</p>
Relevanz: Tiefwurzelnde Vorfrüchte und Soil³-Technologie		
Anteil der hoch nitratbelasteten Gebiete	3	<p>Die deutsche Nitratverordnung, die der EU-Nitratrichtlinie folgt, unterteilt die Regionen in drei Zonen, die auf dem Grad der Wasserverschmutzung basieren: Grüne Zonen mit geringer Verunreinigung, gelbe Zonen mit mittlerer Verunreinigung und rote Zonen mit hoher Verunreinigung. In Regionen, die als rote oder gelbe Zonen² ausgewiesen sind, wird die Soil³-Technologie höchstwahrscheinlich nur dann angewandt, wenn sie die Risikowahrnehmung der Landwirt:innen nicht unterstützt, dass sie zu einer höheren Nitratverschmutzung des Grundwassers oder der Oberflächengewässer führt (Hinzmann et al., 2021). Daher ist das Potenzial für die Anwendung der Soil³-Methode in roten und gelben begrenzt. In Regionen, in denen der Anteil der Messstellen mit Nitratwerten von 50 mg / l am geringsten ist oder in denen eine Belastung von weniger als 50 mg / l gemessen wurde, ist das Potenzial für die Einführung der Soil³-Technologie am höchsten. Auf der anderen Seite ist in Regionen mit hohen Nitratwerten das Potenzial für eine biologische Bodenverbesserung aufgrund des Nitratfixierungspotenzials hoch.</p>
Produktivität des Bodens (Bodenpunkte)	3	<p>Es wird davon ausgegangen, dass bei einer hohen Bodenproduktivität (gemessen in sogenannten Bodenpunkten) die Notwendigkeit einer besseren Nährstoffaufnahme und Wasserversorgung weniger relevant ist als bei wenig produktiven Böden, die oft eine geringe verfügbare Wasserkapazität für Pflanzen aufweisen. Daher besteht in Gebieten, in denen eine geringere Bodenqualität gegeben ist oder die das Ergebnis einer kontinuierlichen Degradation über Jahrzehnte hinweg sind, ein großes Potenzial für eine effiziente Nährstoffnutzung. Mechanische und biologische Unterbodenbewirtschaftung könnte möglicherweise dazu beitragen, die verfügbaren Bodennährstoffe für Pflanzen zu verbessern (Ning et al., 2022).</p>

² <https://www.umweltbundesamt.de/themen/wasser/grundwasser/ueberwachung-bewertung/ausweisung-nitratbelasteter-gebiete>

Die Karten, die das Potenzial aus sozioökonomischer Sicht darstellen, wurden mit der Geoinformationssystem-Software QGIS erstellt. Die meisten Primärdaten stammen aus Agrarstrukturerhebungen für BB, NRW und ST mit Ausnahme der Karte zur Kompostverfügbarkeit, für die Daten von der Bundesgütegemeinschaft Kompost³ verwendet wurden.

2.3 Kombination von geophysikalischen und sozioökonomischen Perspektiven

Um das gesamte Umsetzungspotenzial für die Unterbodenmelioration zu ermitteln, wurden die Ergebnisse der Bewertung der geophysikalischen und sozioökonomischen Faktoren kombiniert und für jede der Methoden bestimmte Landkreise ausgewählt, die folgende Kombinationen repräsentieren:

- 1) Das Potenzial für die Anwendung einer Unterbodenmeliorationsmethode ist aus geophysikalischer Sicht hoch, aus sozioökonomischer Sicht jedoch gering
- 2) Das Potenzial für die Anwendung einer Unterbodenmeliorationsmethode ist aus geophysikalischer Sicht gering, aus sozioökonomischer Sicht jedoch hoch
- 3) Das Potenzial für die Anwendung einer Unterbodenmeliorationsmethode ist sowohl aus geophysikalischer als auch aus sozioökonomischer Sicht hoch
- 4) Das Potenzial für die Anwendung einer Unterbodenmeliorationsmethode ist sowohl aus geophysikalischer Sicht als aus sozioökonomischer Sicht gering (wird hier nicht weiter behandelt)

Diese Kombinationen werden in den nachstehenden Ergebnissen näher erläutert. In den ausgewählten Landkreisen haben wir genauer untersucht, welche einzelnen Schlüsselindikatoren bei der anschließenden Bewertung dieser Region den größten Einfluss haben. Die beteiligten sozioökonomischen Faktoren sind ebenso voneinander abhängig wie von den geophysikalischen Faktoren. Eine hohe Punktzahl bei einem sozioökonomischen Faktor führt nicht zwangsläufig zu einer hohen Punktzahl bei anderen Faktoren oder den geophysikalischen Indikatoren. Deshalb hat jede Region auf vielen Ebenen mit ihren eigenen Voraussetzungen zu kämpfen.

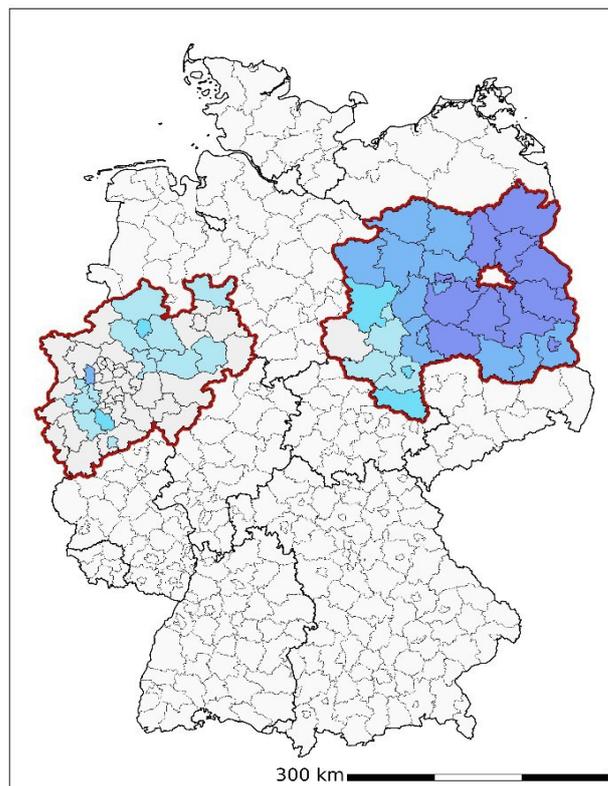
³ <https://www.kompost.de/service/hersteller/-/produkte/karte-anlagen>

3 Ergebnisse

3.1 Bedarf zur Unterbodenmelioration in den drei Fallstudienregionen

Die regionalisierten Karten wurden nach der in Kapitel 2.1.2 beschriebenen Methodik erstellt und sind in den ergänzenden Materialien (Abb. A1–A3) dargestellt. Aus geophysikalischer Sicht war der Bedarf zur Unterbodenmelioration in den drei Fallstudienregionen sehr unterschiedlich, mit einem generell geringen Bedarf (1) zur Unterbodenmelioration in NRW, einem mittleren Druck (3) zur Unterbodenmelioration in ST und einem sehr hohen Bedarf (5) zur Unterbodenmelioration in BB. Daraus ergibt sich der theoretische regionale Bedarf der landwirtschaftlichen Betriebe an Bodenverbesserungsmaßnahmen, um die Nutzung der Bodenressourcen zu erleichtern. Aufgrund der kleinräumigen Variabilität von Böden und Bodeneigenschaften werden auch in Regionen mit geringem regionalem Änderungsdruck einige Feldstandorte einen hohen Bedarf an Untergrundverbesserung haben und umgekehrt einige Feldstandorte in Regionen mit sehr hohem Bedarf einen geringen Meliorationsbedarf aufweisen.

Gewichtung des Bedarfs für biologische Unterbodenlockerung in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Gewichtung des Bedarfs für biologische Unterbodenlockerung



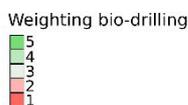
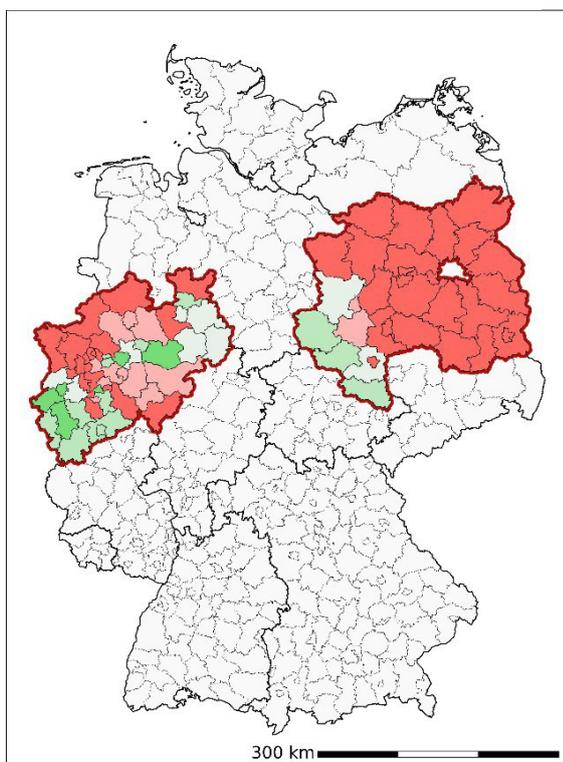
Karte 1: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für den Handlungsdruck zur Unterbodenmelioration pro Landkreis in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg; 1 = sehr gering, 2 = mäßig, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch.

3.2 Zusammengefügte Karten der drei Fallstudienregionen mit geophysikalischen Merkmalen

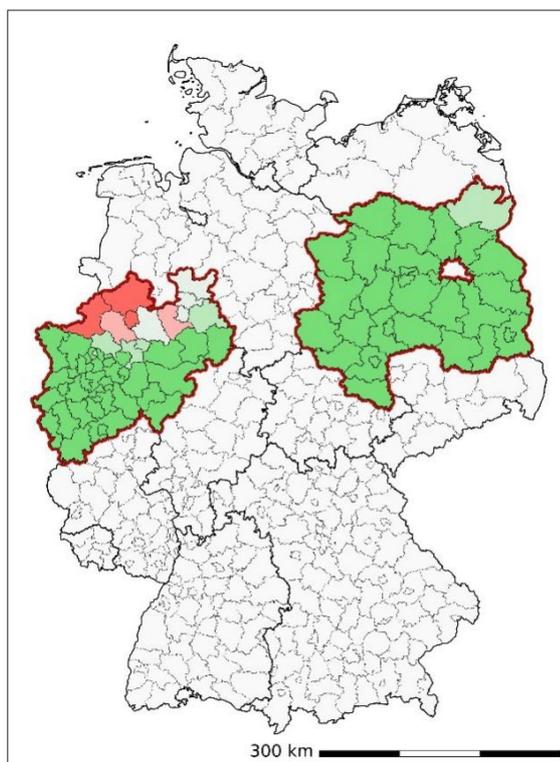
Die Anwendbarkeit der biologischen Unterbodenlockerung als Meliorationsmaßnahme war in BB gering: jeder Landkreis erreichte dort lediglich einen Wert von eins (Karte 2). In ST war die Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung mäßig, mit einem Mittelwert von zwei im gesamten Bundesland. In NRW war die Anwendbarkeit der biologischen Unterbodenlockerung mit einem Mittelwert von zwei im gesamten Bundesland ebenfalls mäßig.

Wie aus Karte 3 hervorgeht, war die Anwendbarkeit der Soil³-Methode in BB sehr hoch, wobei jeder Landkreis einen Wert von fünf erreichte. Auch in ST war die Anwendbarkeit sehr hoch, mit einem Durchschnittswert von fünf im gesamten Bundesland. In NRW war die Anwendbarkeit der Soil³-Methode mit einem Mittelwert von vier landesweit hoch.

Gewichtung für biologische Unterbodenlockerung in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Gewichtung für soil³-Technologie in Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Karte 2: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für die Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung zur Unterbodenmelioration (geophysikalische Perspektive) pro Landkreis in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg; 1 = sehr gering, 2 = mittel, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch.

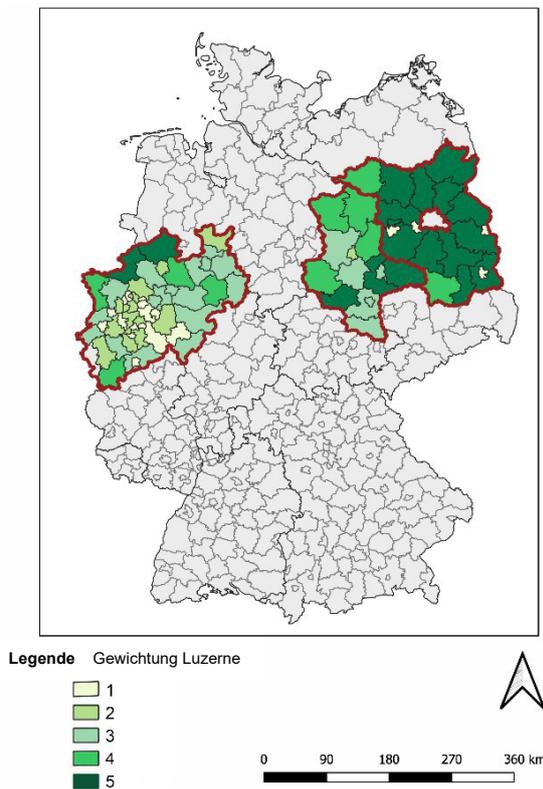
Karte 3: Visualisierung der Bewertungsergebnisse für die Anwendbarkeit der Soil³-Technologie zur Unterbodenmelioration (geophysikalische Perspektive) pro Landkreis in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg; 1= sehr gering, 2= mäßig, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch.

3.3 Zusammengefügte Karten der drei Fallstudienregionen mit regionalisierten sozioökonomischen Merkmalen

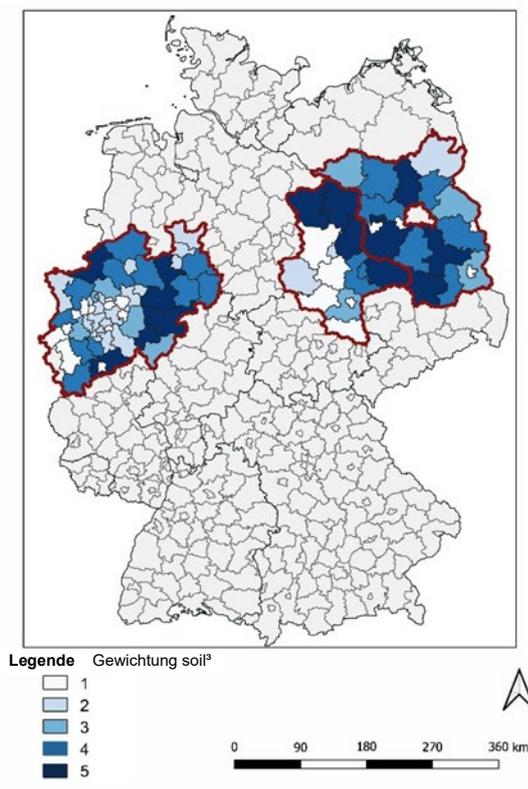
Die Karten 4 und 5 zeigen die Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung und der Soil³-Technologie in den drei Fallstudienregionen aus sozioökonomischer Sicht. Für die biologische Unterbodenlockerung ist die Anwendbarkeit in BB am höchsten, während NRW und ST eine mittlere Anwendbarkeit aufweisen. Das hohe Potenzial in BB ergibt sich aus den zugrunde liegenden Kriterien: Da der überwiegende Teil der Ackerflächen dort Bodenpunkte aufweist, die deutlich unter dem deutschen Durchschnitt liegen, ist das Verbesserungspotenzial, d. h. das Bodenoptimierungspotenzial, groß. Darüber hinaus trifft die niedrige Nährstoff- und Wasserkapazität auf sehr geringe Einschränkung durch die kleine Anzahl von Betrieben in „roten Zonen“ (hohe Nitratbelastung), die durch die Nitratrichtlinie eingeschränkt werden. Zum hohen Potenzial trägt auch der große Anteil an gemischten Betrieben bei, die historisch gesehen Teil der ostdeutschen Landwirtschaft sind. In diesen Betrieben können tiefwurzelnden Vorfrüchten wie Luzerne als Futtermittel für die Viehzucht dienen.

Es muss angemerkt werden, dass die Zahlen für die, hauptsächlich in der Rinderzucht genutzten, Luzerne in BB niedriger sind.

Für die Soil³-Technologie weisen alle drei Fallstudienregionen eine mittlere bis sehr hohe Anwendbarkeit auf, obwohl die Ergebnisse in den einzelnen Bundesländern unterschiedlich ausfallen. Dies liegt daran, dass bei der Soil³-Technologie der Kompost in den Unterboden eingebracht wird und seine regionale Verfügbarkeit daher ein Schlüsselfaktor für die Umsetzung der Methode ist. Die Verfügbarkeit wird eher durch regionale Liefer- und Produktionsketten als durch Landschaftsstrukturen beeinflusst, was dazu führt, dass die Landkreise selbst heterogen sind. Das relativ hohe allgemeine Potenzial ist wiederum auf die Kombination aus geringerer Bodenproduktivität und einem kleinen Anteil von Flächen zurückzuführen, die stark mit Nitrat belastet sind und daher potenziell in der zusätzlichen Speicherung von Stickstoff über organisches Material eingeschränkt sind. Gebiete mit sehr geringem Potenzial sind entweder städtische Zonen, in denen keine landwirtschaftlichen Betriebe existieren, oder besonders fruchtbare Regionen, die bereits über ausreichende Kapazitäten verfügen.



Karte 4: Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung zur Unterbodenmelioration (sozioökonomische Perspektive) pro Landkreis in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg; 1 = sehr gering, 2 = mäßig, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch



Karte 5: Anwendbarkeit der Soil³-Technologie zur Unterbodenmelioration (sozioökonomische Perspektive) pro Landkreis in Nordrhein-Westfalen, Sachsen-Anhalt und Brandenburg; 1 = sehr gering, 2 = mäßig, 3 = mittel, 4 = hoch, 5 = sehr hoch

4 Diskussion

Der Vergleich der drei Bundesländer zeigt, dass NRW weniger Probleme mit durchwurzelungshemmenden Schichten aufgrund von Verdichtung hat als ST und BB (Schneider et al., 2019). Der Trockenstress nimmt von Westen nach Osten zu, mit Ausnahme von trockenheitsanfälligen Regionen wie dem Main- und Oberrheintal (DWD, 2018). Infolgedessen haben verdichtete Ackerflächen in Ostdeutschland, insbesondere in BB, einen höheren Bedarf an Unterbodenverbesserung, um den Zugang zu zusätzlichem pflanzenverfügbarem Wasser im Unterboden zu erleichtern (siehe Karte 1).

Der unterschiedliche Grad an Verdichtung und Trockenstress in den verschiedenen Regionen Deutschlands verdeutlicht die Notwendigkeit einer gezielten und angepassten Bodenmelioration. Wie aus den obigen Karten hervorgeht, besteht jedoch in einigen Regionen eine erhebliche Abweichung zwischen den geophysikalischen und den sozioökonomischen Faktoren, die das Umsetzungspotenzial von Bodenmeliorationsmaßnahmen beeinflussen. Während bestimmte Gebiete geophysikalische Einschränkungen aufweisen, die die Anwendung mechanischer oder biologischer Maßnahmen erschweren, gelten dieselben Regionen aus

sozioökonomischer Sicht als sehr geeignet für solche Maßnahmen. Diese Diskrepanz lässt sich darauf zurückführen, dass sozioökonomische Faktoren - wie die Struktur der landwirtschaftlichen Betriebe, die Verfügbarkeit von Kompost oder die Erfahrungen der Betriebe mit dem Anbau von Leguminosen - die Anwendung von Unterbodenmeliorationsmaßnahmen trotz geophysikalischer Einschränkungen begünstigen können.

Die Analyse sowohl der geophysikalischen als auch der sozioökonomischen Faktoren ergab, dass in Regionen wie ST und BB ein höherer Bedarf an Unterbodenmelioration besteht, die Wahl der Methode jedoch von einer Abwägung der einschränkenden Faktoren abhängt. Zum Beispiel weisen die südwestlichen Regionen von ST und NRW ein mittleres bis hohes sozioökonomisches Potenzial für Bodenmeliorationsmaßnahmen auf, doch schränken geophysikalische Faktoren häufig die Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung oder der Soil³-Technologie ein. So kann es der Fall sein, dass große Gebiete in BB und in Teilen von ST geophysikalisch zwar ungeeignet sind, aber wegen sozioökonomischer Faktoren wie der starken Präsenz von ökologischen Betrieben oder der Verfügbarkeit von Leguminosen der Einsatz von biologischer Unterbodenlockerung in ausgewählten Gebieten dennoch gefördert wird, selbst wenn die allgemeinen geophysikalischen Bedingungen weniger günstig erscheinen.

Es ist jedoch wichtig zu beachten, dass sich alle Werte für Bedarf und Anwendbarkeit auf Durchschnittswerte in den Landkreisen beziehen. Dies bedeutet nicht zwangsläufig, dass jede Anbaufläche in einer ausgewählten Region eine Untergrundverbesserung benötigt oder dass eine bestimmte Methode generell für alle Gebiete geeignet oder ungeeignet ist. Vielmehr zeigen die Daten, dass in einigen Regionen der Bedarf an Unterbodenverbesserung größer ist oder bestimmte Methoden leichter angewendet werden können.

4.1 Soil³-Technologie

Für mechanische Verfahren wie die Soil³-Technologie sind ostdeutsche Gebiete mit verdichteten Böden aus periglazialen Sand, wie BB und ST, aufgrund ihrer geringeren Wasserbilanzen und minimalen pedologischen Einschränkungen besonders vielversprechend (Schneider, 2020). Dies stimmt mit dem allgemeinen geophysikalischen Potenzial für die Soil³-Technologie in diesen Gebieten überein, da aus geophysikalischer Perspektive sowohl in ST als auch in BB ein hohes Anwendungspotenzial vorliegt. Allerdings zeigen nur die östlichen und südöstlichen Teile von BB sowie die nördlichen und zentralen Teile von ST eine höhere Eignung für die Soil³-Technologie aus sozioökonomischer Sicht. Der westliche Teil von ST ist zwar geophysikalisch geeignet, hat aber ein geringes sozioökonomisches Potenzial, was die tatsächliche Umsetzung erschwert. Regionen mit hohem geophysikalischem, aber geringem sozioökonomischem Potenzial, wie der Landkreis Börde in ST, stehen trotz günstiger Bodenverhältnisse vor Herausforderungen bei der Einführung von Meliorationsverfahren. Diese Diskrepanz findet auch in anderen Teilen von ST, wo sozioökonomische Faktoren wie die Struktur der landwirtschaftlichen Betriebe und die Verfügbarkeit von Kompost die Durchführbarkeit der Soil³-Technologie trotz der insgesamt vielversprechenden geophysikalischen Bedingungen einschränken.

Trotz der gegebenen Unterschiede gibt es auch bemerkenswerte Ähnlichkeiten, sowohl aus geophysikalischer als auch aus sozioökonomischer Sicht. In Regionen wie dem Landkreis Oberhavel (BB) stimmen sowohl sozioökonomische als auch geophysikalische Faktoren überein, was auf ein hohes Potenzial für eine erfolgreiche mechanische Untergrundverbesserung hinweist. Auch Gebiete an der Grenze zwischen BB und ST zeigen ein hohes Potenzial für die Bodenverbesserung, da sowohl geophysikalische als auch sozioökonomische Faktoren eine gute Anwendbarkeit der Soil³-Technologie unterstützen. Regionen in NRW sind weniger verdichtet und werden teilweise von fruchtbareren Böden dominiert und weisen eine geringere geophysikalische Notwendigkeit zur Untergrundverbesserung auf (Schneider et al., 2020).

Allerdings könnten sozioökonomische Faktoren wie die Verfügbarkeit von Kompost und der Anbau von Marktfrüchten die Anwendung von Meliorationspraktiken dennoch begünstigen. Das Potenzial der Soil³-Technologie ist besonders hoch in den Regionen rund um Arnsberg und in kleineren Teilen im Osten und Süden von NRW. Nur in einigen nördlichen Kreisen wie Gütersloh, Warendorf, Coesfeld, Borken und Steinfurt wurden diese Gebiete aufgrund geophysikalischer Beschränkungen ausgeschlossen.

Es gibt jedoch Ausnahmen in NRW, in denen sozioökonomische Herausforderungen die Einführung der Soil³-Technologie behindern. Ein Beispiel dafür ist das Fehlen von Kompostierungsanlagen in Düren, was ein erhebliches Hindernis für die Anwendung der Soil³-Technologie darstellt, da die Verfügbarkeit von Kompost entscheidend für ihren Einsatz ist. Darüber hinaus sind 30 % der landwirtschaftlichen Fläche dort von nitratbelastetem Grundwasser betroffen, was ein relativ hoher Prozentsatz ist. Dieser erhöhte Nitratgehalt könnte die Risikowahrnehmung der Landwirt:innen beeinflussen und sie davon abhalten, die Soil³-Technologie anzuwenden, da sie Bedenken bezüglich des Nitratauswaschens von Böden in das Grundwasser haben. Diese Faktoren machen den Landkreis Düren weniger geeignet für die Umsetzung der Soil³-Technologie.

Insgesamt zeigt die Analyse, dass die Soil³-Technologie in Ostdeutschland ein großes Potenzial hat, insbesondere in Gebieten mit verdichteten Böden und niedrigem Wasserhaushalt. Dennoch verhindern sozioökonomische Einschränkungen in bestimmten Regionen eine einfache Umsetzung. In NRW ist die geophysikalische Notwendigkeit zwar geringer, doch spielen sozioökonomische Faktoren wie die Verfügbarkeit von Kompost und die landwirtschaftlichen Strukturen eine entscheidendere Rolle bei der Bestimmung der für die Methode eingesetzten Regionen.

4.2 Biologische Unterbodenlockerung

Im Allgemeinen weisen Regionen in Ostdeutschland, wie BB und ST, eine hohe Prävalenz kompakterer Anbauflächen und erhöhten Trockenstresses auf, was zu einem erheblichen Bedarf an Unterbodenmelioration führt (Schneider, 2020). Aus geophysikalischer Sicht sind diese Gebiete mit Herausforderungen konfrontiert, die den Zugang der Wurzeln zu den Unterbodenressourcen behindern, was in Dürreperioden entscheidend ist. Folglich können Regionen wie Teltow-Fläming, die ein hohes sozioökonomisches Potenzial, aber ungünstige geophysikalische Bedingungen für die Anwendung von biologischer Unterbodenlockerung aufweisen, z. B. hohen Sandgehalt und Grundwasser, das nah an der Bodenoberfläche ist (beides Ausschlusskriterien für biologische Unterbodenlockerung), mit der Wirksamkeit dieser Technologie Schwierigkeiten haben.

Trotz dieser geophysikalischen Einschränkungen ist das sozioökonomische Umfeld in vielen Regionen Ostdeutschlands günstig für die Umsetzung biologischer Meliorationsmaßnahmen. Faktoren wie das Vorhandensein von vielen Gemischtbetrieben, die Zahl der Ökobetriebe und der Anteil des Leguminosenanbaus machen diese Regionen zu geeigneten Kandidaten für den Anbau von Luzerne. In BB weisen die sozioökonomischen Faktoren, trotz der ungünstigen geophysikalischen Bedingungen, die die biologische Unterbodenlockerung nahezu disqualifizieren, auf ein hohes Potenzial für den Luzerneanbau hin.

Laut Karte 4 ist NRW aus sozioökonomischer Sicht weniger geeignet für biologische Unterbodenlockerung. Im Kreis Düren beispielsweise unterstützen gut durchlüftete Böden und ein geeigneter pH-Bereich das Wachstum von Pfahlwurzeln wie Luzerne. Diesen günstigen geophysikalischen Bedingungen stehen jedoch ungünstigere sozioökonomische Bedingungen gegenüber, so dass die Region für die biologische Unterbodenlockerung weniger geeignet ist.

Regionen mit gut durchlüfteten Lössböden, wie z. B. Teile von Mansfeld-Südharz, weisen aufgrund der günstigen Bedingungen für die Bioporenstabilität ein hohes Potenzial für biologische Unterbodenlockerung auf. Dieses Gebiet erfüllt auch alle sozioökonomischen Anforderungen, da es einen hohen Anteil an Gemischtbetrieben und ökologischer Landwirtschaft in der Region gibt und einen erheblichen Bedarf an einem höheren Nitratspeicher im Boden hat. Diese Merkmale machen Regionen wie Mansfeld-Südharz zu wichtigen Schwerpunktgebieten für die Unterbodenmelioration durch biologische Unterbodenlockerung. Politische Richtlinien und Anreize sollten auf solche Regionen ausgerichtet werden, um eine intensivere Anwendung von tiefwurzelnden Vorfrüchten zu fördern, insbesondere solche, bei denen Luzerne angebaut wird.

Im Vergleich zu den anderen Verfahren gibt es für biologische Unterbodenlockerung im Allgemeinen weniger geophysikalisch geeignete Gebiete. Beispielsweise ist in BB und ST, wo der Druck zur Unterbodenmelioration mäßig bis hoch ist, die Gesamtbewertung der geophysikalischen Anwendbarkeit von biologischer Unterbodenlockerung niedriger als in NRW, in denen einige ausgewählte Regionen eine bessere Übereinstimmung zwischen geophysikalischen und sozioökonomischen Faktoren aufweisen. Wie in Regionen wie Soest zu sehen ist, gibt es zwar ein Potenzial für biologische Unterbodenlockerung, doch ist die Gesamtanbaufläche, die einer Verbesserung bedarf, geringer, so dass der unmittelbare Druck für eine Intervention geringer ist.

5 Schlussfolgerungen

Das Potenzial für eine erfolgreiche Umsetzung von Unterbodenmeliorationsmaßnahmen hängt sowohl von geophysikalischen als auch von sozioökonomischen Faktoren ab. Die Optimierung von Strategien zur Unterbodenmelioration erfordert einen integrierten Ansatz, der sowohl die geophysikalischen Einschränkungen bei der Nutzung von Unterbodenressourcen als auch die sozioökonomischen Vorteile berücksichtigt. Regionen mit hohem Potenzial in beiden Aspekten bieten die besten Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung, aber auch andere Regionen können von gezielten Maßnahmen profitieren, die auf ihre spezifischen lokalen Bedingungen eingehen. Unsere Studie gibt einen Hinweis auf die regionale Eignung von Bodenmeliorationsmaßnahmen, wobei die Zahlen lediglich die Wahrscheinlichkeit einer erfolgreichen Umsetzung auf regionaler Ebene angeben. Die Bodenverhältnisse und die landwirtschaftliche Infrastruktur variieren jedoch von Betrieb zu Betrieb und können daher vom regionalen Durchschnitt abweichen.

Ein zentrales Ziel unserer Analyse war es, die Regionen in Deutschland zu ermitteln, die sich am besten für die Untergrundverbesserung eignen, wobei die unterschiedlichen Belastungen, spezifischen Bedürfnisse und die vorherrschenden sozioökonomischen Bedingungen in den drei Fallstudiengebieten berücksichtigt wurden. Unsere Analyse zeigt, dass der Druck zur Untergrundverbesserung in BB am höchsten ist, gefolgt von ST mit einem moderaten Druck und NRW mit dem geringsten Druck. Diese Unterschiede sind auf die unterschiedlichen Agrarstrukturen sowie den geringen Gehalt an verfügbarem Wasser und Nährstoffen im Boden zurückzuführen.

Darüber hinaus hat unsere Analyse gezeigt, dass geophysikalische und sozioökonomische Faktoren nicht untrennbar miteinander verbunden sind. Ein hohes Potenzial in einem dieser Bereiche bedeutet daher nicht zwangsläufig ein hohes Potenzial im anderen. Dies wird deutlich in BB, wo ein hohes sozioökonomisches Potenzial für tiefwurzelnde Kulturen auf ein geringeres geophysikalisches Potenzial trifft, oder in der Region Börde (NRW), wo aus geophysikalischer Sicht ein hohes Potenzial für die Soil³-Technologie besteht, jedoch ein geringes

sozioökonomisches Potenzial vorliegt. Diese Diskrepanzen haben Auswirkungen auf die landwirtschaftliche Bewirtschaftung, die Agrarpolitik und die wissenschaftliche Forschung für eine Implementierung von Unterbodenmaßnahmen.

Auswirkungen auf die Betriebsführung und die Agrarpolitik

Zwei Hauptkategorien von Faktoren beeinflussen diese Entscheidung: geophysikalische und sozioökonomische. Bei politischem Willen zur Verbesserung der Bodenbewirtschaftung können diese Faktoren gezielt angegangen werden, um die landwirtschaftliche Infrastruktur zu stärken und somit die Grundlage für eine erfolgreiche Bodenverbesserung zu schaffen. Geophysikalische Voraussetzungen, wie etwa der Einfluss des Grundwassers oder die Tiefe des Gesteins, die den Einsatz bestimmter Technologien behindern, können nicht verändert werden. Daher sollte sich die Agrarpolitik insbesondere auf die relevanten sozioökonomischen Faktoren konzentrieren, die sowohl auf Landesebene (z. B. Landwirtschaftsministerien) als auch auf Kreisebene (z. B. Landwirtschaftsämter/Landwirtschaftskammern) Ansatzpunkte für die Politik bieten. Zu diesen Faktoren gehören beispielsweise die Verfügbarkeit von lokalem Kompost oder die Zahl der Biobetriebe. Obwohl die für eine potenzielle Umsetzung am besten geeigneten Regionen auf der Grundlage beider Perspektiven priorisiert werden, bleibt die Frage, wie mit den Diskrepanzen umgegangen werden kann: a) in Regionen, in denen die geophysikalischen Bedingungen für die Anwendung der Soil³-Technologie günstig sind, aber sozioökonomische Faktoren deren Anwendung verhindern, und b) in Regionen, die aufgrund ihrer geophysikalischen Merkmale ein hohes Potenzial für biologische Unterbodenlockerung aufweisen, die jedoch als sozioökonomisch nicht rentabel genug erachtet werden.

Wenn in einer bestimmten Region ein dringender Bedarf an Bodenmelioration besteht, ist eine angemessene (politisch gewollte) Reaktion im Hinblick auf die Bodenbewirtschaftung möglicherweise mit großen Herausforderungen verbunden, da der Prozess zeitaufwändig ist. Politische Entscheidungstragende und Betriebe sollten daher frühzeitig handeln und sich mit Fragen wie „Wie kann die Situation verbessert werden?“ und „Welches sind die relevanten Instrumente, um ungünstige sozioökonomische Faktoren zu bekämpfen?“ auseinandersetzen. Das theoretische Potenzial der beiden Bodenverbesserungstechniken lässt sich nicht universell anwenden, da unsere Studie gezeigt hat, dass der Ansatz auf einer regionalen Bewertung mit Wahrscheinlichkeiten unterschiedlicher Gewichtungsfaktoren beruht. Hier ergeben sich jedoch Möglichkeiten für eine effiziente Wasser- und Nährstoffnutzung des Bodens, ein Bedarf, der mit den schwieriger werdenden Klimabedingungen sicherlich zunehmen wird.

Der erste Schritt bei der Entscheidung, die Unterbodenmelioration in einer bestimmten Region zu unterstützen, besteht darin, den aktuellen Stand der Bodenbewirtschaftung zu ermitteln. Wenn in der Region bereits ein Netzwerk zur Unterstützung des Einsatzes von Unterbodenmaßnahmen oder konservierender Bodenbearbeitung existiert, kann dieses ausgebaut und intensiviert werden. Andernfalls ist es entscheidend, die landwirtschaftlichen Betriebe in der Region zu erreichen, um deren Haltung zur Einführung von biologischer Unterbodenlockerung oder der Soil³-Technologie zu verstehen. Hindernisse für die praktische Umsetzung der Bodenmelioration lassen sich am besten im engen Dialog mit Landwirt:innen, landwirtschaftlichen Berater:innen, Bauernverbänden und Technologieanbietern identifizieren. Solche Dialoge sind ein entscheidender Schritt für die erfolgreiche praktische Umsetzung der Unterbodenverbesserung. Die idealen Bedingungen für die Unterbodenverbesserung variieren jedoch von Betrieb zu Betrieb und hängen von den unterschiedlichen Faktoren ab, die in diesem Papier untersucht wurden.

Weitere konkrete Schritte können von politischen Entscheidungstragenden auf verschiedenen Ebenen erwogen werden. Auf Landesebene könnten Landwirtschaftsministerien finanzielle Unterstützung für den Ausbau von Kompostierungsanlagen oder Programme für den verstärkten

Anbau von Luzerne anbieten. Lokale Landwirtschaftsämter wiederum könnten indirekte Maßnahmen konzipieren und umsetzen, wie etwa die Nutzung von Strukturen lokaler Verbände, Netzwerke und Berufsschulen für Kapazitätsaufbau sowie Schulungen oder Informationskampagnen in geeigneten Regionen zur Unterstützung eines besseren Unterbodenmanagements.

In anderen Regionen, in denen ein Missverhältnis der Potenziale die Einführung der Verfahren erschwert, sollte geprüft werden, inwieweit, an welchen einzelnen Feldstandorten und zu welchen Kosten die Unterbodenbewirtschaftung trotz regional ungünstiger Bedingungen noch eine Option ist.

Implikationen für die interdisziplinäre wissenschaftliche Forschung

Unsere Ergebnisse zeigen den Wert der interdisziplinären Forschung zu Themen von großer wissenschaftlicher und gesellschaftlicher Bedeutung. Eine isolierte Betrachtung der geophysikalischen oder sozioökonomischen Ergebnisse hätte zu anderen Schlussfolgerungen hinsichtlich der theoretischen Machbarkeit der Unterbodenmelioration geführt. Dies zeigt, dass komplexe Themen nicht von einer einzigen Disziplin vollständig behandelt werden können. Da die Landwirtschaft ein komplexes System ist, erfordert die Agrarforschung zunehmend interdisziplinäre Arbeiten, die nicht nur die Natur- und Wirtschaftswissenschaften, sondern auch die Geisteswissenschaften einbeziehen. Solch interdisziplinäre Bemühungen sind im Agrarsektor noch ausbaufähig.

Darüber hinaus wird in unserem Bericht auf die Grenzen der Bewertung basierend auf großräumlicher Aufteilung hingewiesen, die keine standortspezifischen Entscheidungen zulässt. Es wird auch eingeräumt, dass nicht alle relevanten Faktoren in einem realen Kontext berücksichtigt wurden. Diese Lücke zeigt Möglichkeiten für weitere interdisziplinäre Forschung auf, die diese Aspekte umfassender untersucht und die praktische Anwendung von Strategien zur Bewirtschaftung des Unterbodens verbessert.

6 Quellenverzeichnis

- Aghabeygi, M., Kiresiewa, Z., Gerdes, H., Schneider, C. (forthcoming): Assessing Criteria for Adopting Sustainable Subsoil Management Practices: An Application of Multinomial Logit Model.
- DLM (2019): BKG (Federal Agency for Cartography and Geodesy): Digitales Basis-Landschaftsmodell (Basis-DLM), Leipzig, 2019.
- DWD Climate Data Center (2018): Multi-annual grids of water balance over Germany, version v1.0, 2018. Reference period between 1971 and 2000. https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/grids_germany/multi_annual/water_balance/. [Last accessed 13 November 2024.]
- Frelih-Larsen, A., Hinzmann, M., & Ittner, S. (2018): The “invisible” subsoil: An exploratory view of societal acceptance of subsoil management in Germany. *Sustainability*, 10(9), 3006.
- Gaiser, T., Perkons, U., Küpper, P. M., Puschmann, D. U., Peth, S., Kautz, T., Pfeifer, J., Ewert, F., Horn, R., & Köpke, U. (2012): Evidence of improved water uptake from subsoil by spring wheat following lucerne in a temperate humid climate. *Field Crops Research*, 126, 56–62.
- Hartmann, S., Gehring, K., & Zellner, M. (2014): Feldfutteranbau. In P. Doleschel & J. Frahm (Eds.), *Landwirtschaftlicher Pflanzenbau* (pp. 719–744). München: BLV Buchverlag.
- Hinzmann, M., Ittner, S., Kiresiewa, Z. & Gerdes, H. (2021): An Acceptance Analysis of Subsoil Amelioration Amongst Agricultural Actors in Two Regions in Germany. *Front. Agron.* 3:660593.doi: 10.3389/fagro.2021.660593. [Last accessed 13 November 2024.]
- Kautz, T. (2014): Research on subsoil biopores and their functions in organically managed soils: A review. *Renewable Agriculture and Food Systems*. 30. 1-10. 10.1017/S1742170513000549.
- Kautz, T. & Köpke, U. (2010): In situ endoscopy: New insights to root growth in biopores. *Plant Biosystems*, 144(2), 440–442.
- Ma, Y., Minasny, B., McBratney, A., Poggio, L., Fajardo, M. (2021): Predicting soil properties in 3D: Should depth be a covariate? *Geoderma*, Volume 383, ISSN 0016-7061, <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114794>. [Last accessed 13 November 2024.]
- Ning, T., Liu Z., Hu, H., Li, G., Kuzyakov, Y. (2022): Physical, chemical and biological subsoiling for sustainable agriculture, *Soil and Tillage Research*, Volume 223, ISSN 0167-1987, <https://doi.org/10.1016/j.still.2022.105490>. [Last accessed 13 November 2024.]
- Poeplau, C., Prietz, R. and Don, A. (2022): Plot-scale variability of organic carbon in temperate agricultural soils—Implications for soil monitoring. <https://doi.org/10.1002/jpln.202100393>. [Last accessed 13 November 2024.]
- Roßkopf, N., Fell, H., Zeitz, J., (2015): Organic soils in Germany, their distribution and carbon stocks, *CATENA* Volume 133, 2015, Pages 157-170, ISSN 0341-8162, <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.05.004> [Last accessed 13 November 2024.]
- Schmittmann, O., Christ, A., Schulze Lammers, P. (2021): Subsoil Melioration with Organic Material—Principle, Technology and Yield Effects. *Agronomy*. 11. 1970. 10.3390/agronomy11101970.
- Schneider, F., Don, A. (2019): Root-restricting layers in German agricultural soils. Part I: extent and cause. *Plant Soil* 442, 433–451. <https://doi.org/10.1007/s11104-019-04185-9> [Last accessed 13 November 2024.]
- Schneider, F. (2020): Root-restricting layers in German agricultural soils: Extent, cause and management strategies. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität, Bonn. Online-Ausgabe in bonndoc: <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:hbz:5-60043> [Last accessed 13 November 2024.]
- Weier, K., Doran, J., Power, J., & Walters, D. (1993): Denitrification and the dinitrogen/nitrous oxide ratio as affected by soil water, available carbon, and nitrate. *Soil Science Society of America Journal*, 57(1), 66–72.

Anhang

Höhe des Bedarfs an
Unterbodenmelioration

- Kein Bedarf
- Bedarf

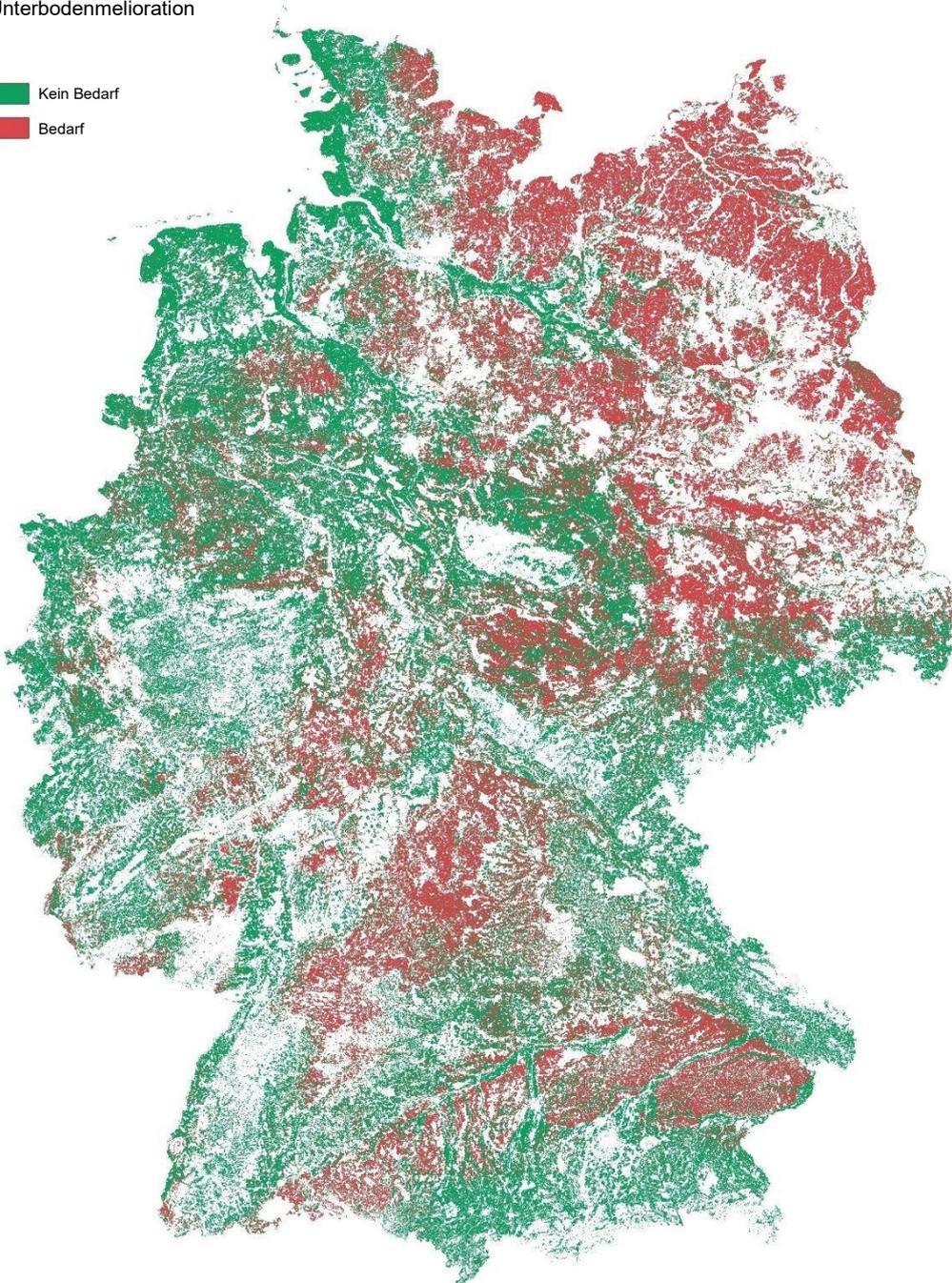


Abbildung 1: Deutschlandkarte, die die Eignung für die Anwendung der Soil³-Technologie zeigt, bei der der Unterboden gelockert und anschließend Kompost eingearbeitet wird. Grüne Flächen zeigen, dass die Methode aufgrund der im Hauptdokument erläuterten Ausschlusskriterien leicht umsetzbar ist. Rote Flächen zeigen, dass die Methode nur schwer umsetzbar ist.

Anwendbarkeit von biolog. Unterbodenbearbeitung

- nicht anwendbar
- anwendbar

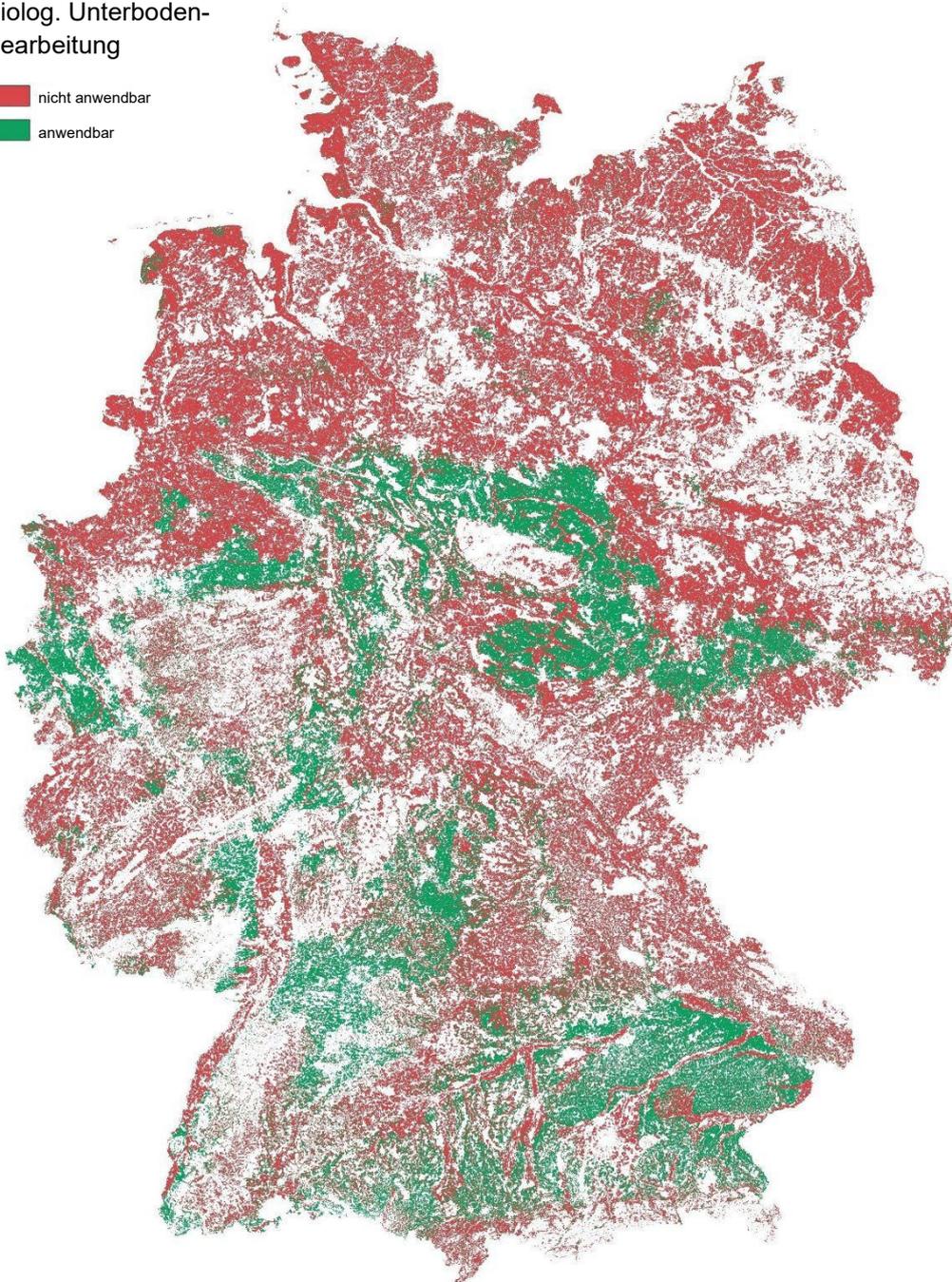


Abbildung 2: Deutschlandkarte, die die Eignung für die Anwendung der biologischen Unterbodenlockerung (bio drilling) mit Erhöhung der Bioporenanzahl im Unterboden zeigt. Grüne Flächen zeigen an, dass die Methode aufgrund der im Hauptteil erläuterten Ausschlusskriterien leicht umsetzbar ist. Rote Flächen zeigen, dass Methode nur schwer umsetzbar ist.

Anwendbarkeit von soil³-Technologie

- nicht anwendbar
- anwendbar

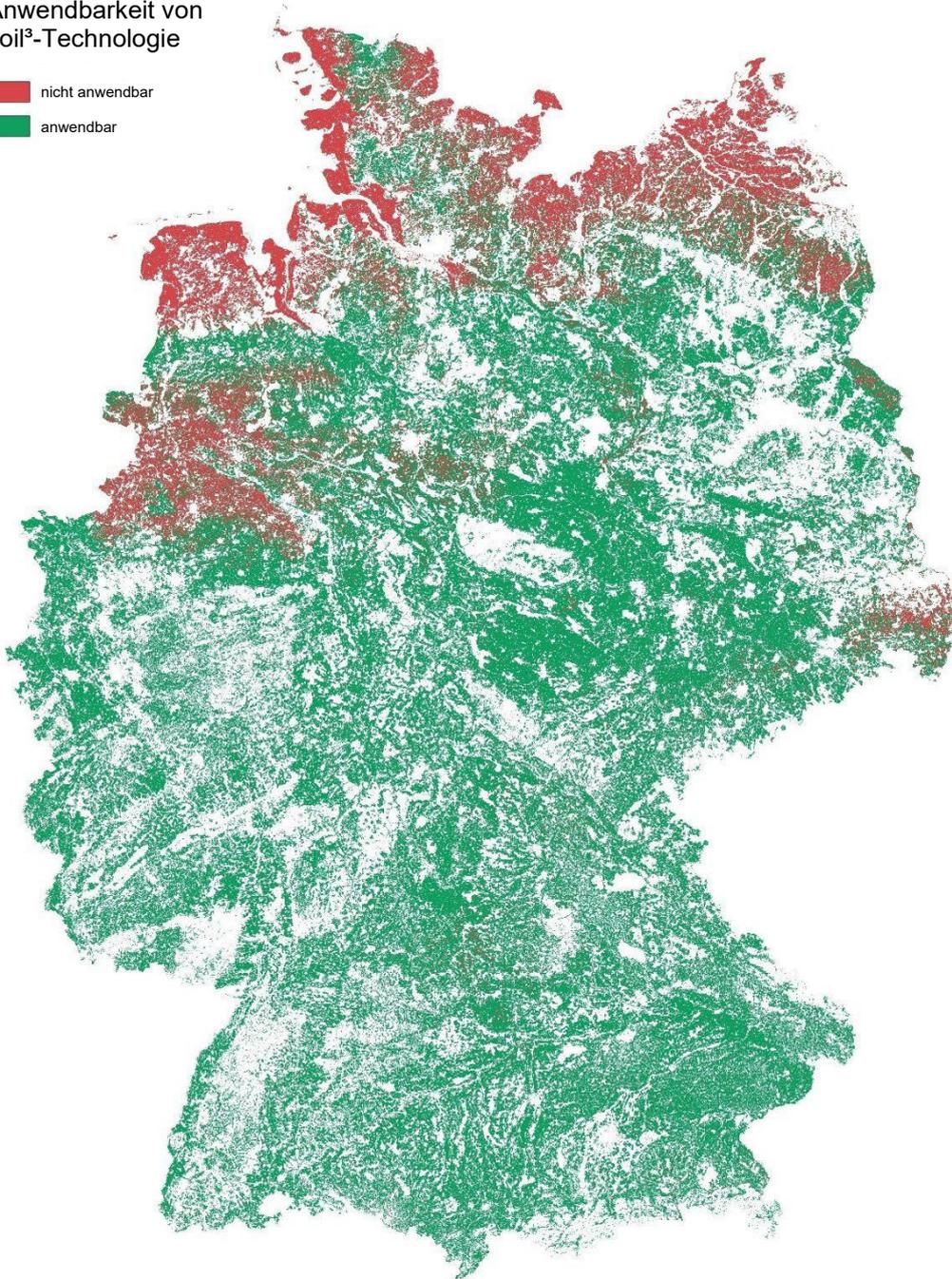
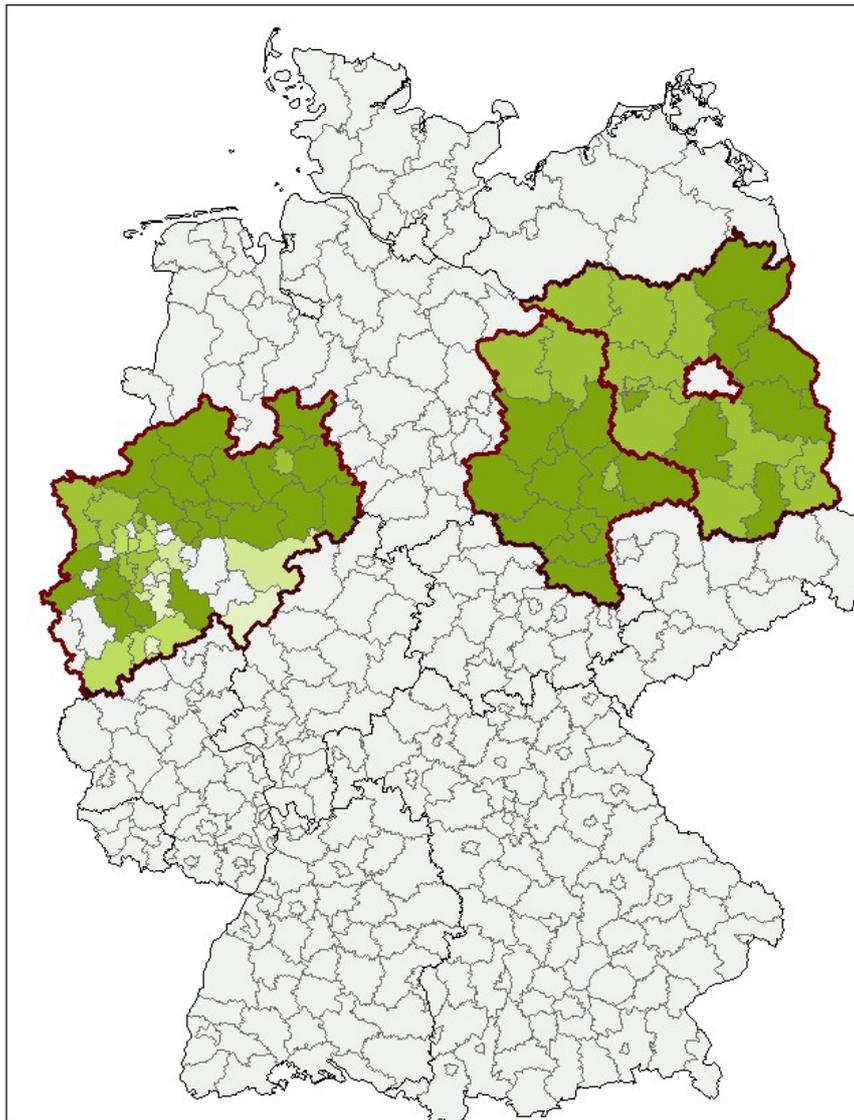
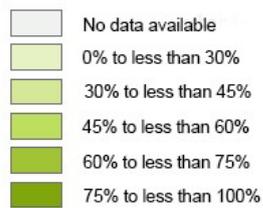


Abbildung 3: Deutschlandkarte, die die Eignung für die Anwendung der Soil3-Technologie zeigt, bei der der Unterboden gelockert und anschließend Kompost eingearbeitet wird. Grüne Flächen zeigen, dass die Methode aufgrund der im Hauptdokument erläuterten Ausschlusskriterien leicht umsetzbar ist. Rote Flächen zeigen, dass die Methode nur schwer umsetzbar ist.

Anzahl Gemischtbetriebe in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Legend:
agricultural land



Editor: Ecologic Institut
Data source: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, DE (2023)
Projection: Transverse Mercator

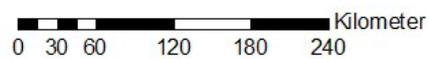
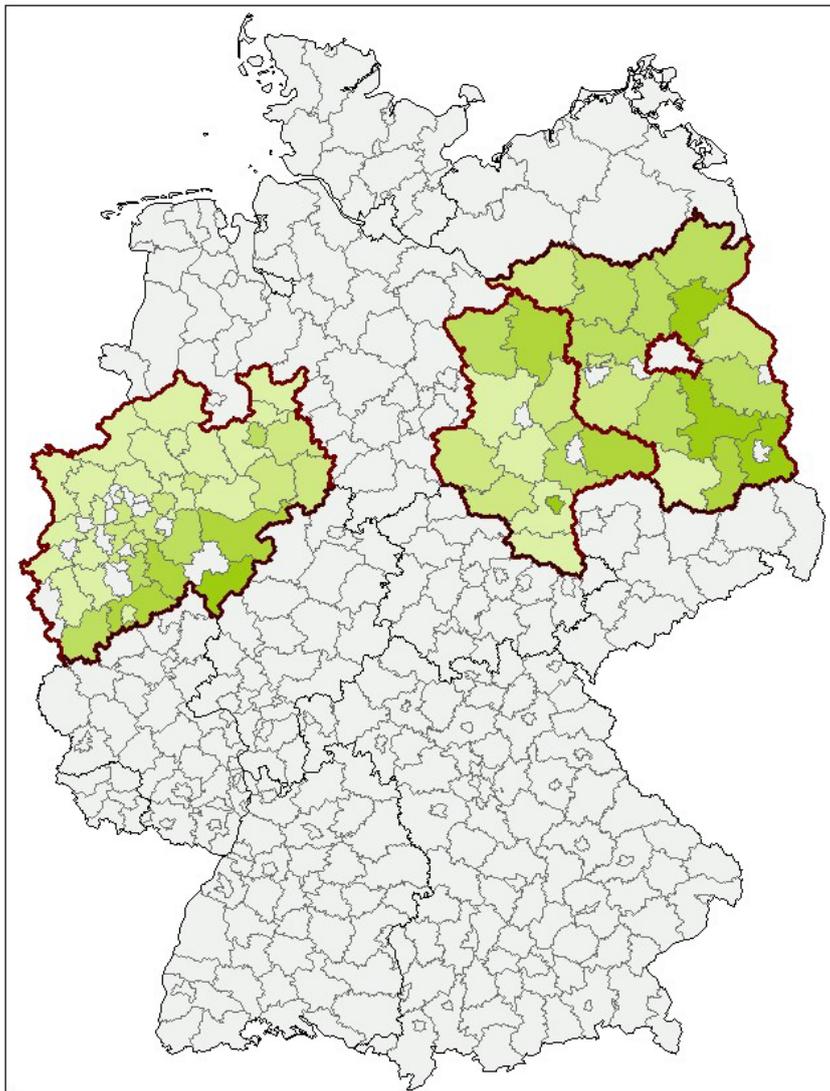


Abbildung 4: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit Darstellung der einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: Anteil der Ackerfläche auf Kreisebene

Ökologische Ackerfläche in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Editor: Ecologic Institut
Data source: Statistische Ämter des Bundes und der Länder, DE (2023)
Projection: Transverse Mercator

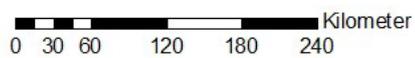
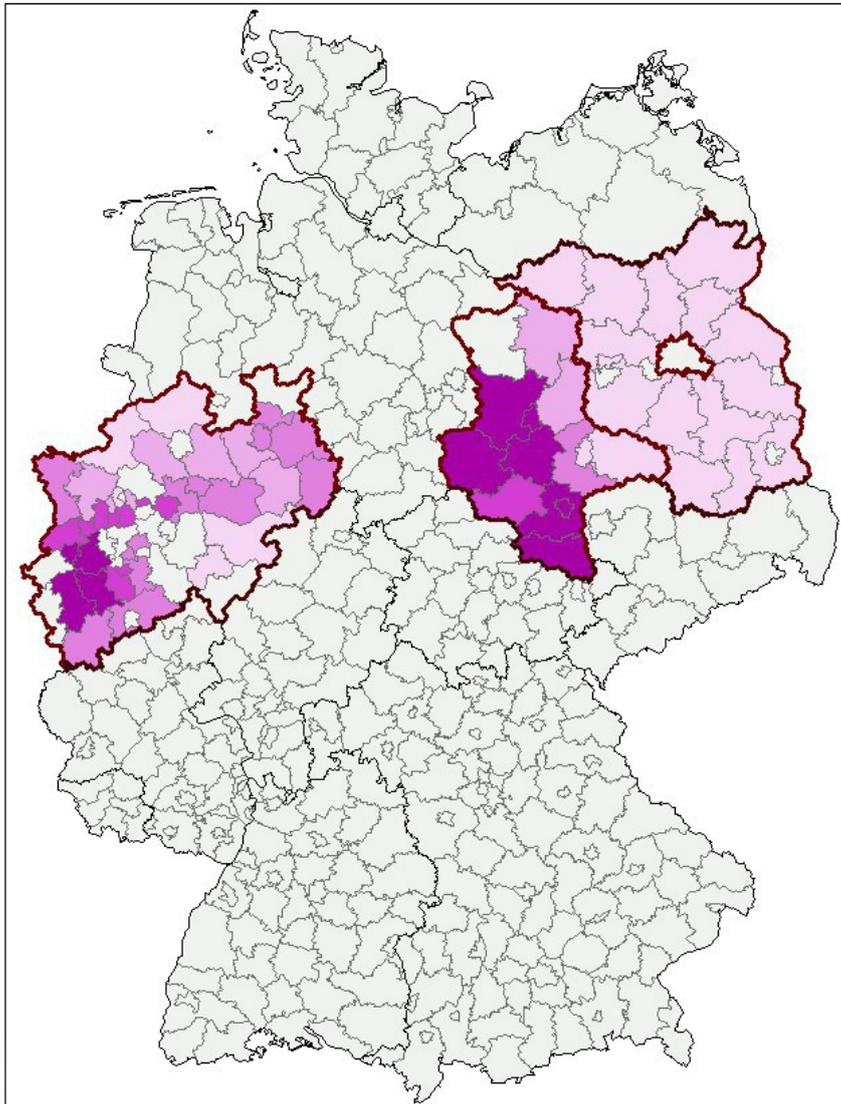
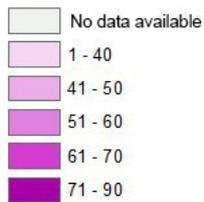


Abbildung 5: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit Darstellung der einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: Anteil der Ackerfläche, die von Bio-Landwirtschaft auf Kreisebene genutzt wird

Karte nach Bodenpunkten in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Legend:
average soil
productivity



Editor: Ecologic Institut
Data source: Gutachterausschuss
für Grundstückswerte Sachsen-Anhalt (2021);
LELF (2022); Geologischer Dienst NRW (2023)
Projection: Transverse Mercator

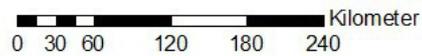
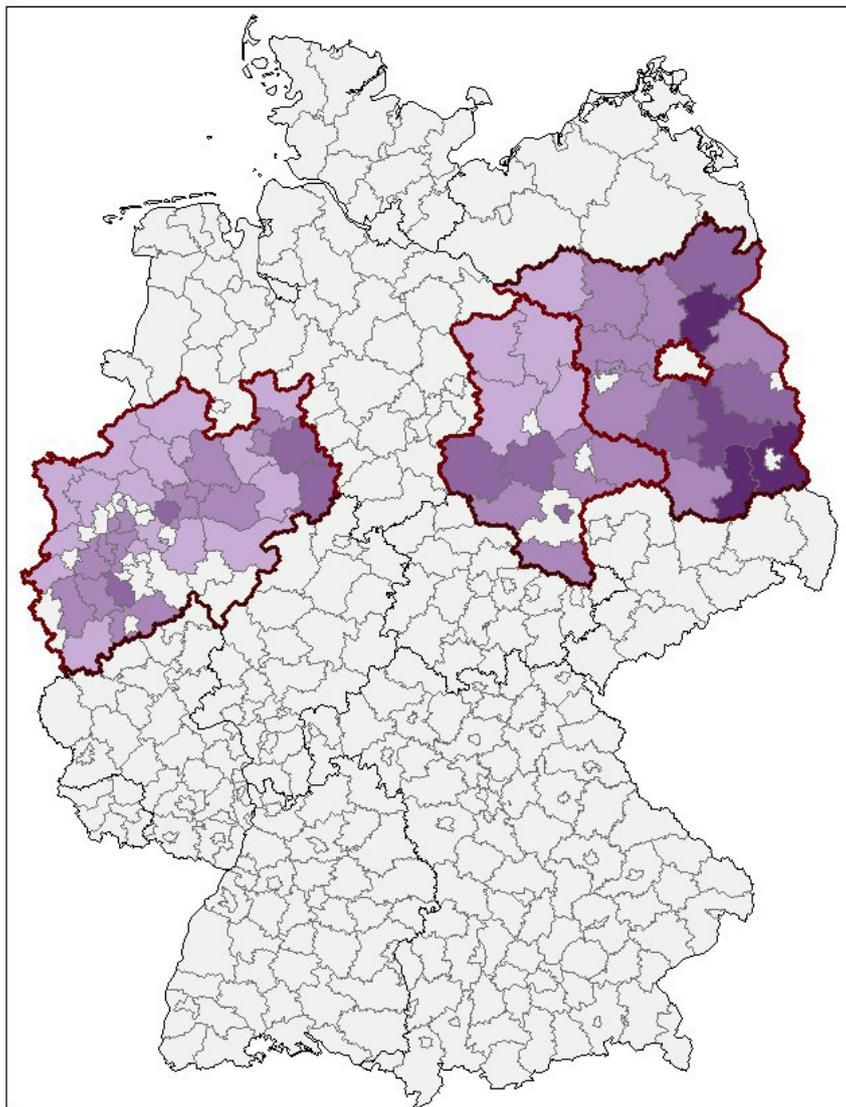
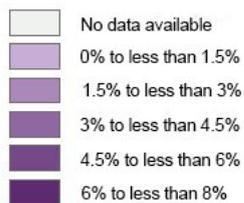


Abbildung 6: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit den einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: durchschnittliches Niveau der Bodenpunkte auf Kreisebene

Anbaufläche von Leguminosen in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Legend:
cultivation area
of legumes



Editor: Ecologic Institut
Data source: Amt für Statistik
Berlin-Brandenburg (2021);
Landwirtschaftskammer NRW (2020);
Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2022)
Projection: Transverse Mercator

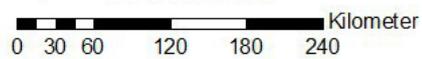
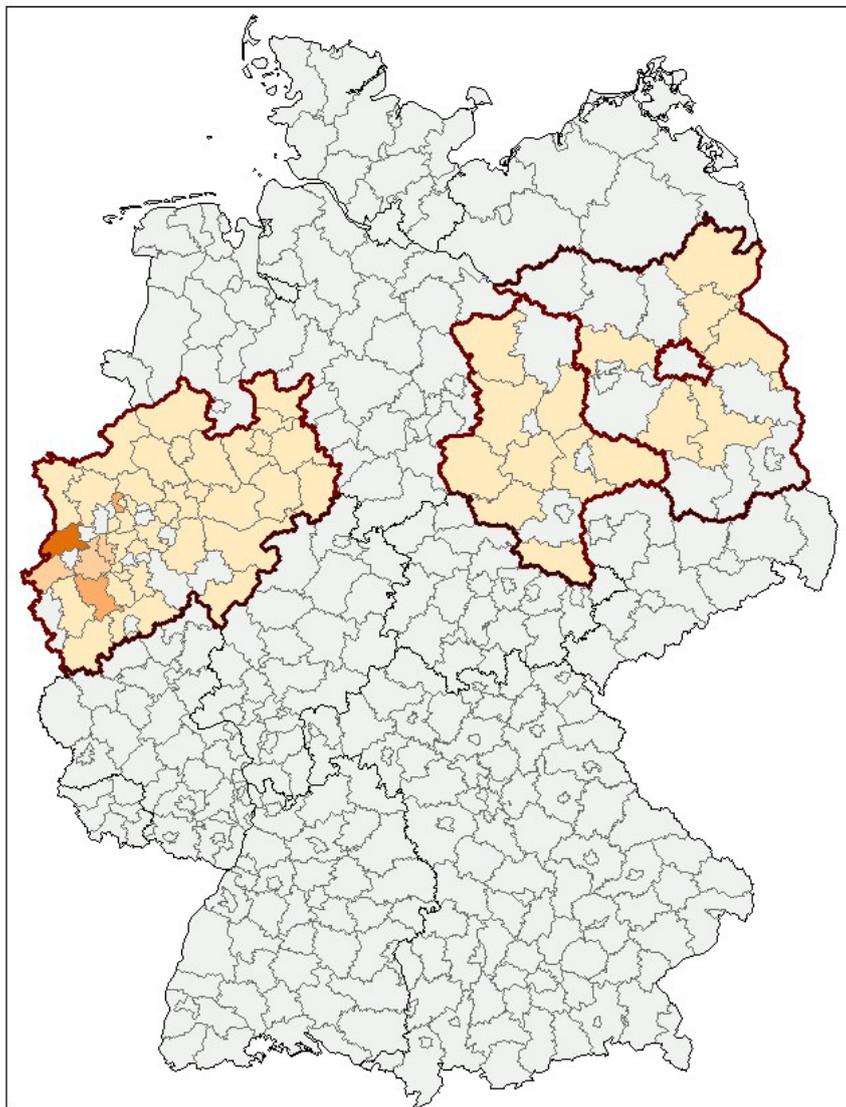
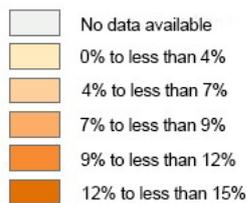


Abbildung 7: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit Darstellung der einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: Anteil der Leguminosen auf Kreisebene

Anbaufläche Sonderkulturen in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Legend:
cultivation area
of special crops



Editor: Ecologic Institut
Data source: Amt für Statistik
Berlin-Brandenburg (2021); IT.NRW (2023);
Statistisches Landesamt Sachsen-Anhalt (2020)
Projection: Transverse Mercator

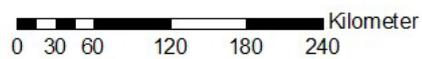
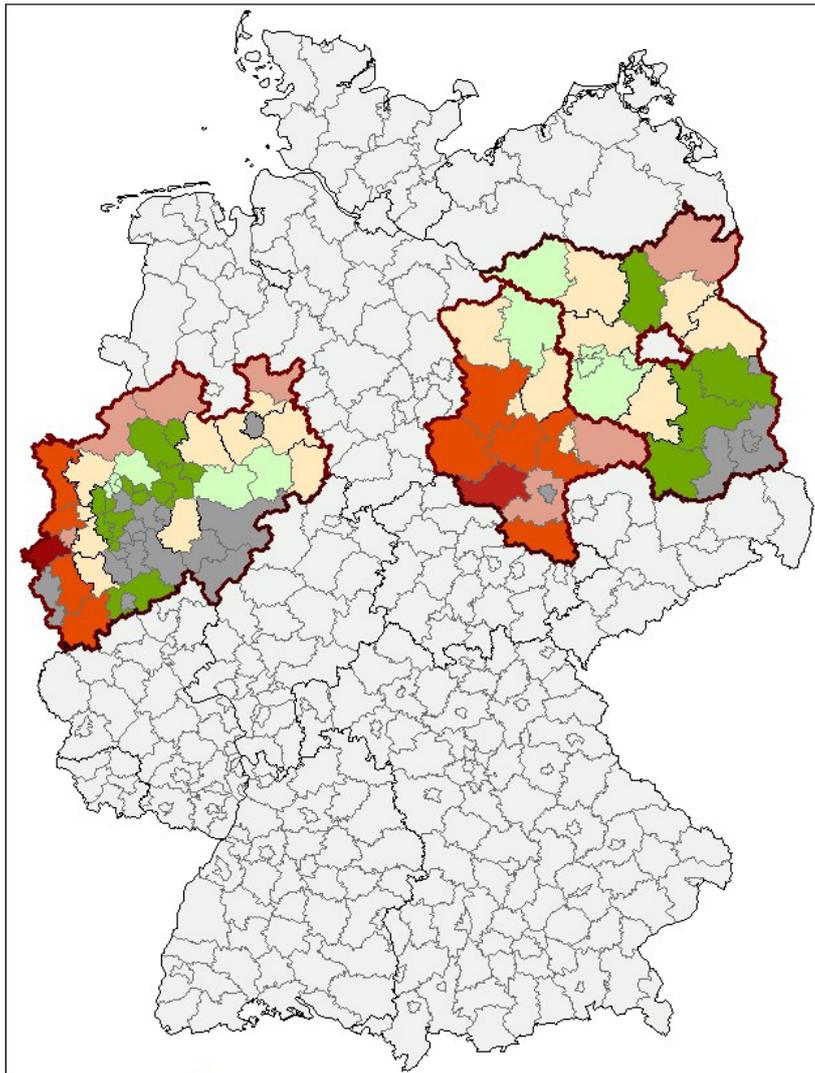
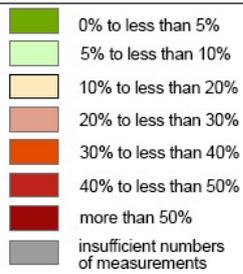


Abbildung 8: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit Darstellung der einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: Anteil der Sonderkulturen auf Kreisebene

Nitratbelastung in
Brandenburg, Nordrhein-Westfalen und Sachsen-Anhalt



Legend:
agricultural
land with more
than 50 mg/l
nitrate



Editor: Ecologic Institut
Data source: VSR-Gewässerschutz e.V. (2023)
Projection: Transverse Mercator



0 30 60 120 180 240 Kilometer

Abbildung 9: Karte der drei Fallstudienregionen NRW, ST und BB mit Darstellung der einzelnen Gewichtungsfaktoren, hier: Anteil der Ackerflächen mit mehr als 50 mg/l (rote Gebiete) durchschnittlichem Nitrat auf Kreisebene

RAL-gütesicherte Kompostierungsanlagen in Deutschland



Quelle: BGK-Bundesgütegemeinschaft Kompost e.V. www.kompost.de, Februar 2025

Abbildung 10: Deutschlandkarte, die die regionale Verteilung der RAL-gütesicherte Anlagen in Deutschland anzeigt. Quelle: Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.

Weitere Veröffentlichungen

- 2024/2 Prilop et al. Formal and informal learning on soil compaction and its prevention in Germany.
DOI: [10.20387/71J3-FD02](https://doi.org/10.20387/71J3-FD02)
- 2024/1 Svoboda et al. Citing soil and agricultural research data.
DOI: [10.20387/BonaRes-Onz6-1v51](https://doi.org/10.20387/BonaRes-Onz6-1v51)
- 2023/1 Donmez et al. Long-Term Field Experiments: Lift the Agricultural Data Treasure.
DOI: [10.20387/BonaRes-7SS0-ZM41](https://doi.org/10.20387/BonaRes-7SS0-ZM41)
- 2022/2 Ittner et al. The impact of subsoil management on the delivery of ecosystem services: An economic valuation for Germany.
DOI: [10.20387/BonaRes-WVC6-YJ14](https://doi.org/10.20387/BonaRes-WVC6-YJ14)
- 2022/1 Svoboda et al. Citing soil and agricultural research data - Publication, DOI provision, citation and versioning of data published via the BonaRes Repository.
DOI: [10.20387/BonaRes-FM2J-C233](https://doi.org/10.20387/BonaRes-FM2J-C233)
- 2021/2 Stumpf et al. Long-Term-Experiments – methods, standardization and modelling.
DOI: [10.20387/BonaRes-FZK2-TF22](https://doi.org/10.20387/BonaRes-FZK2-TF22)
- 2021/1 Svoboda, N. Die BonaRes Data Policy.
DOI: [10.20387/BonaRes-RYCV-30RK](https://doi.org/10.20387/BonaRes-RYCV-30RK)
- 2020/6 Fritsche, J., Svoboda, N. Practical handbook for publishing research data in the BonaRes Repository - Tips & Tricks.
DOI: [10.20387/BonaRes-MVKN-A4MB](https://doi.org/10.20387/BonaRes-MVKN-A4MB)
- 2020/5 Ittner et al. The impact of subsoil management on the delivery of ecosystem services.
DOI: [10.20387/BonaRes-BSZH-QBKN](https://doi.org/10.20387/BonaRes-BSZH-QBKN)
- 2020/4 Wiesmeier et al. CO2 certificates for carbon sequestration in soils: methods, management practices and limitations.
DOI: [10.20387/BonaRes-NEOG-CE98](https://doi.org/10.20387/BonaRes-NEOG-CE98)
- 2020/3 Ledermüller et al. Arbeitsbericht: Verbesserung des physikalischen Bodenschutzes bei der Wirtschaftsdüngerausbringung im Frühjahr - Herausforderungen und Lösungsansätze.
DOI: [10.20387/BonaRes-ESZ2-NRV9](https://doi.org/10.20387/BonaRes-ESZ2-NRV9)
- 2020/2 Siebert, L. Energy Crops and Erosion Control in Germany in the Context of the Bioeconomy Strategy.
DOI: [10.20387/BonaRes-TZKG-FNRC](https://doi.org/10.20387/BonaRes-TZKG-FNRC)
- 2021/1 Wiesmeier et al. CO2-Zertifikate für die Festlegung atmosphärischen Kohlenstoffs in Böden: Methoden, Maßnahmen und Grenzen.
DOI: [10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H](https://doi.org/10.20387/BonaRes-F8T8-XZ4H)



BonaRes-Reihe

In der BonaRes-Schriftenreihe werden verschiedene Formate im Rahmen der Förderinitiative „BonaRes“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) veröffentlicht. Die BonaRes-Reihe erhielt Fördermittel im Rahmen der Fördermaßnahme „Boden als nachhaltige Ressource für die Bioökonomie – BonaRes“, Projekt „BonaRes (Modul B): BonaRes-Zentrum für Bodenforschung, Teilprojekt A, B“ (Förderkennzeichen 031B1064A, B).

BonaRes steht für „Soil as a Sustainable Resource for the Bioeconomy“. Im Fokus von BonaRes steht die nachhaltige Nutzung des Bodens als begrenzte Ressource. BonaRes erweitert das gesicherte Wissen in Bezug auf das System Boden für Wissenschaftler:innen und Entscheidungsträger:innen. Ziel ist es, die Produktivität und alle anderen Bodenfunktionen zu erhalten und zu verbessern sowie neue Strategien für ein nachhaltiges Bodenmanagement zu entwickeln.

Erfahren Sie mehr über BonaRes: www.bonares.de

Senden Sie Ihr Manuskript zur Veröffentlichung an: info@bonares.de



BONARES

SPONSORED BY THE



Federal Ministry
of Education
and Research