

Applikation von Mikroorganismen-Präparaten zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten

Dieses Faktenblatt wurde im Rahmen des Pilotprojekts «Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden» erarbeitet und die Resultate werden im Schlussbericht zum Monitoring durch Agroscope weiter eingeordnet.

Mikroorganismen steuern zentrale Prozesse des Kohlenstoffkreislaufs im Boden: sie zersetzen organische Substanz, bauen eigene Biomasse auf und steuern damit den Kohlenstoffumsatz. Eine hohe mikrobielle Substratnutzungseffizienz führt dazu, dass mehr Kohlenstoff in mikrobielle Biomasse und stabile organische Verbindungen überführt und weniger als CO₂ freigesetzt wird. Über Stabilisierungsprozesse, etwa durch die Bildung von Aggregaten oder Bindungen an mineralische Oberflächen, kann organischer Kohlenstoff längerfristig im Boden gespeichert werden. Zudem fördern bestimmte Mikroorganismen indirekt den Pflanzeneintrag, indem sie das Wurzelwachstum, die Nährstoffverfügbarkeit oder die Stresstoleranz der Pflanzen verbessern. Diese Prozesse sind wissenschaftlich gut untersucht. Mikrobielle Präparate sollen diese natürlichen Prozesse gezielt unterstützen, etwa durch Förderung des Pflanzenwachstums, Stabilisierung organischer Substanz oder verbesserte Aggregatbildung. Feldstudien zeigen bislang keinen statistisch gesicherten und langfristig nachgewiesenen Anstieg der Bodenkohlenstoff-Vorräte durch die Applikation mikrobieller Präparate. Für viele mikrobielle Präparate ist die Überlebensrate eingebrachter Mikroorganismen gering, und eine dauerhafte Etablierung im bestehenden Bodenmikrobiom konnte bisher meist nicht nachgewiesen werden. Plausible positive Effekte bestehen insbesondere bei arbuskulären Mykorrhizapilzen, für welche experimentelle Studien einen positiven Einfluss auf den Bodenkohlenstoff zeigen. Ein verlässlicher Nachweis eines langfristigen Anstiegs der Bodenkohlenstoff-Vorräte unter Praxisbedingungen ist jedoch auch bei arbuskulären Mykorrhizapilzen bislang noch begrenzt.

Monitoring: Ein Nachweis von Veränderungen von Bodenkohlenstoff-Vorräten ist nur langfristig mit einem Bodenmonitoring möglich. Für die meisten Präparate wären vorerst wissenschaftliche Versuche notwendig, um die Wirksamkeit zu untersuchen. Bei arbuskulären Mykorrhizapilzen bieten sich Versuche unter Praxisbedingungen im Feld mit spezifischer wissenschaftlicher Begleitung an.

Empfehlungen: Aufgrund der bislang begrenzten Evidenz wird eine allgemeine Anwendung mikrobieller Präparate zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten derzeit nicht empfohlen. Wirksamer ist die Förderung des bestehenden Bodenmikrobioms, beispielsweise durch organische Düngung und reduzierte Bodenbearbeitung. Eine Wirkung von Präparaten wie Komposttee oder EM ist bisweilen nicht belegt. Forschung zu standortspezifischen mikrobiellen Konsortien oder zur Anwendung von Präparaten mit arbuskulären Mykorrhizapilzen kann in Zukunft neue Erkenntnisse liefern. Im Rahmen von Praxisforschung kann gerade die Anwendung von Präparaten mit arbuskulären Mykorrhizapilzen in der Bündner Landwirtschaft zu interessanten Erkenntnissen führen.

Vertrauen in die Wirksamkeit	Mittlere Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz
Zeithorizont	-
Technische Bereitschaft	Grundlagenphase - Validierungsphase
Annahmen Skalierung Graubünden	-
Potenzial Graubünden	-



Inhalt

1	Emissionsprozess	1
2	Technisches Potenzial	1
2.1	Wirkungsmechanismus der Minderungsmassnahme	1
2.2	Technisches Potenzial der Minderungsmassnahme	5
2.3	Vertrauen in die Wirksamkeit	5
3	Systembetrachtung.....	5
3.1	Synergien	5
3.2	Limitierungen, Zielhierarchien	6
3.3	Kostenbetrachtungen	6
4	Überlegungen zum umsetzbaren Potential Kanton Graubünden	6
4.1	Erfahrungen aus den Pilotprojekten	6
5	Förderung und Überwachung	6
5.1	Monitoring, Reporting and Verification	6
5.2	Existierende und mögliche weitere Förderprogramme und Instrumente	6
6	Fazit und Empfehlung	7
7	Literatur.....	8

Impressum

Copyright: Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden, Casis 2026
 Autor:innen: B. Kulli, R. Berger, A. Mathis und J. Frei (ZHAW), C. Zosso (Agroscope)
 Fotos: Adobe Stock (2025). Magnified exploration of grassroots [KI-generiert], erweitert.
 Datum: Juni 2026

Dieses Faktenblatt wurde im Rahmen des Pilotprojekts «Klimaneutrale Landwirtschaft Graubünden» erarbeitet und die Resultate werden im Schlussbericht zum Monitoring durch Agroscope weiter eingeordnet.



1 Emissionsprozess

Der funktionellen Einheit Mikroorganismen werden in der Regel Bakterien, viele Pilze, mikroskopische Algen und Protozoen zugeordnet. Je nach Boden können mehr als 10 Millionen von ihnen pro Gramm Boden vorkommen (Blume et al., 2010). Ihnen kommt für den Kohlenstoffumsatz im Boden eine besonders wichtige Rolle zu (Abbildung 1). Bei geeigneter Artenzusammensetzung können sie das Pflanzenwachstum fördern und damit den Kohlenstoffeintrag erhöhen. Je nachdem wie effizient sie Kohlenstoff abbauen und zu welchen Anteilen sie beim Abbau Kohlenstoff zu CO_2 veratmen oder eigene Biomasse aufbauen, verändert sich die Dynamik des Kohlenstoffumsatzes (Tao et al., 2023). Auch die Emission von anderen Treibhausgasen (THG) kann sich, je nach Aktivität der Mikroorganismen, verändern. Diese Flüsse, z.B. von Lachgas, müssen bei der Beurteilung der Klimawirkung berücksichtigt werden (Guenet et al., 2021). Die Diversität und Aktivität der Mikroorganismen wird stark durch die landwirtschaftliche Praxis beeinflusst (Bender et al., 2016; Schwalb et al., 2023). In der Landwirtschaft besteht je nach Intensität der Nutzung immer das Risiko, dass Böden durch die mikrobiologische Aktivität zu CO_2 Quellen werden, wenn ihnen nicht genügend organisches Material zurückgegeben wird. So haben Böden durch die landwirtschaftliche Nutzung viel Kohlenstoff verloren (Keel et al., 2019; Sanderman et al., 2017). In vielen Regionen hält dieser Trend weiter an und könnte sich mit dem Klimawandel weiter verschärfen (De Rosa et al., 2024; Riggers et al., 2021).

2 Technisches Potenzial

2.1 Wirkungsmechanismus der Minderungsmaßnahme

Zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten, aber auch zur Verbesserung des Bodenlebens, Förderung der Pflanzengesundheit, des Pflanzenwachstums oder der Freisetzung von Pflanzennährstoffen werden Böden zum Teil mit mikrobiellen Präparaten behandelt. In diesem Faktenblatt wird unterschieden zwischen möglichen direkten und indirekten Mechanismen von mikrobiellen Präparaten zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten.

Direkte Mechanismen sind mikrobiell unterstützte Prozesse, die unmittelbar zur Kohlenstoffanreicherung im Boden beitragen – sei es durch eine erhöhte Substratnutzungseffizienz oder durch die Stabilisierung von Bodenkohlenstoff im Bodengefüge durch die Mikroorganismen.

Indirekte Mechanismen umfassen Prozesse, bei welchen Mikroorganismen über die Förderung des Pflanzenwachstums, der Stressresistenz oder der Wurzelexsudation wirken. Dadurch kann mehr pflanzliche Biomasse in den Boden gelangen und so zu höheren Bodenkohlenstoff-Vorräten führen (Mason et al., 2023).

Eine in der Praxis nachweisbare Veränderung von Bodenkohlenstoff-Vorräten nach wenigen Jahren ist generell nicht zu erwarten, da die Anreicherung von Bodenkohlenstoff ein längerfristiger Prozess ist und ein Nachweis mit bestimmten Herausforderungen einhergeht (Krause et al., 2022).

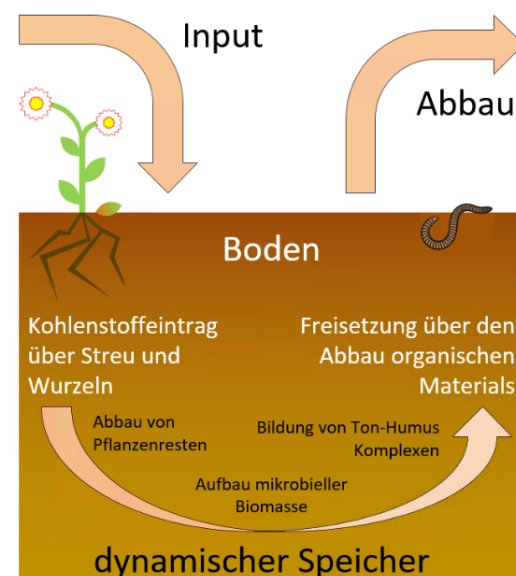


Abbildung 1: Kohlenstoffeintrag und Abbau im Boden als dynamisches Gleichgewicht.

2.1.1 Erhöhte Substratnutzungseffizienz

Wenn Mikroben organisches Bodenmaterial zersetzen, nutzen sie einen Teil davon zum Wachsen und um ihre Zellstrukturen aufzubauen. Je nach Zusammensetzung des Boden-Mikrobioms wird bei der Verwertung organischer Verbindungen unterschiedlich viel Kohlenstoff für den Aufbau



mikrobieller Biomasse genutzt oder veratmet und so als CO₂ freigesetzt. Ein hoher Anteil an Biomasseaufbau im Verhältnis zur CO₂ Abgabe wird als hohe «Nutzungseffizienz» bezeichnet. Die Überreste abgestorbener Mikroorganismen bleiben als sogenannte «Nekromasse» im Boden zurück und können Bindungen zu mineralischem Material eingehen oder in Bodenaggregate eingebunden und damit im Boden stabilisiert werden. Abgestorbene Mikroorganismen können daher tendenziell zum stabilen Kohlenstoffpool mit langen Verweilzeiten im Boden gezählt werden, was bedeutet, dass eine Mikrobengesellschaft mit hoher Nutzungseffizienz den Aufbau von Kohlenstoff-Vorräten fördert (Kallenbach et al., 2016).

2.1.2 Verbesserte Stabilisierung der organischen Bodensubstanz

Die Überreste abgestorbener Mikroorganismen können stark mit mineralischem Bodenmaterial assoziiert sein, was sie vor Abbau schützt. Zudem können Ausscheidungen gewisser Mikroorganismen sehr stabil sein oder die Aggregatbildung unterstützen, wodurch Kohlenstoff physisch eingeschlossen und geschützt wird. Besonders effektiv sind dabei bestimmte Mikroben wie Pilze oder Actinomyceten, die Netzwerke bilden oder widerstandsfähige Strukturen erzeugen (Mason et al., 2023). Gemäss Kallenbach et al. (2016) sind Pilze in der Nutzung des Kohlenstoff effizienter als Bakterien. Manche bauen langlebigere organische Moleküle auf und fördern stabile Verbindungen mit mineralischen Bodenoberflächen. Ein hohes Pilz zu Bakterien Verhältnis kann durch bodenschonende Landwirtschaft unterstützt werden (Mason et al., 2023).

2.1.3 Erhöhter Pflanzeneintrag

Spezifische nützliche – also weder parasitäre noch pathogene – Mikroorganismen können das Pflanzenwachstum fördern. Ein verbessertes Pflanzenwachstum kann wiederum über vermehrte Wurzel-ausscheidungen, abgestorbene Wurzeln oder eine Zunahme an Ernterückständen potenziell zu einem höheren Kohlenstoffeintrag in den Boden beitragen. Das FiBL Faktenblatt «Mikrobielle Biostimulationen» fasst die Wirkung von Mikroorganismen auf die Pflanzengesundheit, das Pflanzenwachstum und

weitere Bodenprozesse gut zusammen (Symnack et al., 2022). Beispielsweise:

- Die Prozesse der atmosphärischen Stickstoff-Fixierung, der Nitrifikation und Denitrifikation im Stickstoffkreislauf werden alleine durch Mikroorganismen katalysiert (Bender et al., 2016). Damit beeinflussen sie die chemische Form, in welcher Stickstoff im Boden vorhanden und für die Pflanzen verfügbar ist.
- Mikroorganismen sorgen im Boden massgeblich für die Lösung von Nährstoffen und erhöhen deren Verfügbarkeit für die Pflanzen (Khan et al., 2009; Mason et al., 2023; Saha et al., 2016).
- Mykorrhizapilze sind ein Bindeglied zwischen Pflanzen und mineralischen Nährstoffen und erhöhen nachweislich die Nährstoffaufnahme von Pflanzen (Berruti et al., 2016).
- Endophytische Pilze, die nicht nur in Blättern, Wurzeln und Samen leben, sollen die Photosyntheseleistung und somit die Kohlenstofffixierung der Pflanze steigern und damit den Kohlenstoffeintrag in den Boden fördern (Mason et al., 2023).
- Nützliche Mikroorganismen können ausserdem die Toleranz von Pflanzen gegenüber ungünstigen Boden- und Umweltbedingungen erhöhen (Mason et al., 2023; Symnack et al., 2022).

2.1.4 Etablierung und Wirkung spezifischer mikrobieller Präparate auf den Boden

Mikrobielle Präparate sind Produkte, die lebende Mikroorganismen enthalten und als Pulver, Granulat oder Flüssigkeit gezielt auf Böden oder Pflanzen ausgebracht werden. Sie sollen natürliche Prozesse unterstützen und damit eine positive Wirkung auf Boden und/oder Pflanzen haben. Im folgenden Abschnitt wird der Stand des Wissens über die Wirkung mikrobieller Präparate bei Applikation auf den Boden dargestellt. Ihre Wirkung im Stall oder in der Behandlung von Hofdünger wurde in diesem Faktenblatt ausgeklammert.

Generell weist die Überlebensrate von eingebrachten Mikroorganismen im Boden eine grosse Bandbreite auf. Manche Mikroorganismen sind bereits nach Stunden oder Tagen kaum mehr nachweisbar,



während andere sich etablieren und nach Jahren noch wiedergefunden werden können. Die grosse Mehrheit der Präparate, die im Labor und im Gewächshaus pflanzenfördernde Eigenschaften zeigen, können sich jedoch im Feld nicht etablieren (Boussageon et al., 2025; Russ et al., 2023). Mikrobemischungen mit sich ergänzenden Organismen haben in natürlichen Böden eine höhere Überlebenschance als einzeln zugegebene Mikroorganismen (Liu et al. 2023). Allerdings ist die Wirkung von mikrobiologischen Präparaten im Feld oft nur minimal, da die eingebrachten Arten unter der Konkurrenz und Unterdrückung durch das einheimische Bodenmikrobiom leiden, was im Laufe der Zeit zu einer geringeren Überlebensrate und einem schwächeren Beimpfungseffekt führt. Mikrobiologische Präparate aus Pilzen scheinen eine bessere Überlebenschance im Boden zu haben als Bakterien (Andrews et al., 2024; Paula et al., 2020). Möller et al. (2023) haben in ihrem Bericht zum Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben "regenerative Landwirtschaft" keinen Effekt der Applikation von Mikroorganismen oder Flächenrotten auf das Bodenmikrobiom oder den Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten festgestellt.

In den folgenden Abschnitten wird die Studienlage für einzelne bekanntere Präparate kurz zusammengefasst.

- **Komposttee:** Für Komposttee (flüssiger Extrakt aus Kompost) liegt bisher keine umfassende Evidenz hinsichtlich seiner langfristigen Wirkung auf die Anreicherung von Bodenkohlenstoff-Vorräten vor. Komposttee wird angewendet, um die Pflanzengesundheit zu fördern und den Boden mit Mikroorganismen anreichern (Michel et al., n.d.). In der Forschung wird Komposttee vorrangig als pflanzenstärkendes und wachstumsförderndes Mittel untersucht, das durch die Bereitstellung von löslichen Nährstoffen, Mikroorganismen und bioaktiven Substanzen kurzfristig zur Bodenbelebung beiträgt (De Corato, 2020). Im Feld wurde jedoch kein signifikanter Effekt der Applikation von Komposttee auf die Diversität oder Zusammensetzung der Mikroorganismen festgestellt (Möller et al., 2023). Belastbare quantitative Daten zur Wirkung von Komposttee Applikation im Feld auf

Bodenkohlenstoff-Vorräte sind nicht vorhanden.

- **Pfeiffer Lübke Präparat:** Gemäss der Herstellerfirma ist das Pfeiffer-Lübke-Präparat ein Mikrobenpräparat aus einer Vielfalt aerober Mikroorganismen, welche den Abbau organischer Substanz und den Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten fördern. Bei der Entwicklung des Präparats wurde auf Bodenorganismen fokussiert. Gemäss bionika.ch fördern die vielfältigen aeroben Mikroorganismen den Abbau organischen Materials und die effiziente Humusbildung im Kompost und im Boden. Die Ansiedlung aerober Bodenorganismen in einem gut belüfteten Landwirtschaftsboden ist grundsätzlich möglich, unter Berücksichtigung der in Kapitel 2.1.4. dargelegten Einschränkungen. Wissenschaftliche Literatur mit quantitativen Daten zur Wirkung des Präparats auf Bodenkohlenstoff-Vorräte in Feldversuchen ist nicht vorhanden.
- **Effektive Mikroorganismen (EM):** EM sind eine Mischkultur aus Milchsäurebakterien, Photosynthese-Bakterien und Hefen. Nebst anderen Einsatzgebieten werden sie als Stimulanzien und Booster für die biologische Aktivität von Böden verstanden. Mikroorganismen dieser Gruppen können im Boden eine positive Wirkung entfalten, das Pflanzenwachstum fördern und / oder am Abbau von organischem Material beteiligt sein. EM sind durch ihre Milchsäurebakterien und Hefen eher auf anaerobe (sauerstofffreie) Verhältnisse optimiert. Daher sind sie in gut durchlüfteten Böden in ihrem Potenzial eingeschränkt. Es gibt einige Studien, die für einzelne Bodenparameter und Ernteerträge einen positiven Effekt von EM gefunden haben (Olle and Williams, 2013). Eine aktuelle Schweizer Studie hat den Effekt von EM auf biologische und chemische Bodeneigenschaften untersucht. Dabei wurde lebendiges EM und sterilisiertes EM verwendet, um den Effekt der Düngewirkung des Präparats auszuschliessen. In dieser Untersuchung konnte kein Effekt der EM-Applikation auf die Bodenparameter festgestellt werden. Auch dann nicht, wenn eine EM-Lösung appliziert wurde, die das 100-fache der empfohlenen Dosis enthielt. Mittels molekularbiologischer Messungen konnte nur bei der 100-fachen Dosis noch einige der EM-Organismen im Boden festgestellt werden. Das



Potenzial einer bleibenden Ansiedelung und Wirkung von EM in einem sonst biologisch aktiven Feldboden ist demnach als gering einzustufen (Oberholzer et al., 2024). Wissenschaftliche Literatur mit quantitativen Daten zur Wirkung des Präparats auf Bodenkohlenstoff-Vorräte in Feldversuchen ist nicht vorhanden.

- **Mykorrhiza Präparate:** Arbuskuläre Mykorrhizapilze können eine Symbiose mit Pflanzen eingehen, bei welcher der Pilz das Wurzelsystem der Pflanze erweitert, die Aufnahme von Wasser und Nährstoffen verbessert und im Gegenzug pflanzliche Kohlenhydrate erhält. Es wurde gezeigt, dass die Ausbringung von Mykorrhiza Präparaten den Maisertrag auf manchen Flächen deutlich erhöhen kann, während auf anderen Flächen keine oder sogar leicht negative Effekte auf das Pflanzenwachstum gefunden wurden (Lutz et al., 2023). Parihar et al., (2020) halten in ihrem Review Artikel fest, dass 4-25% des durch die Pflanze fixierten Kohlenstoffs an Mykorrhiza-Pilze weitergegeben werde, welches diese teilweise als Protein in den Boden ausscheiden. Dabei gehen die Autoren von einer Menge von 10-100 g C pro m² und Jahr aus. Dazu kommt die Biomasse der Pilzhyphen selbst, die 54-900 kg C pro ha ausmachen kann, die Aggregatbildung fördert und damit wiederum den Abbau von im Aggregat eingelagertem Kohlenstoff hemmt. Wie in Kapitel 2.1 erwähnt, geht auch Kallenbach et al. (2016) davon aus, dass Pilze ein höheres Potenzial haben stabile, Kohlenstoffverbindungen zu schaffen und Komplexe zwischen organischem Material und Ton zu fördern. Eine Metaanalyse über 62 Versuche aus 19 Studien ergab einen mittleren Anstieg des Bodenkohlenstoffs durch die Applikation von arbuskulären Mykorrhiza (Conti et al., 2025). Dieser Effekt konnte vor allem in

Topfexperimenten nachgewiesen werden, während er unter Feldbedingungen nicht statistisch signifikant war. Auch waren die Standortbedingungen ausschlaggebend, wobei der Effekt auf sandigen, kohlenstoffarmen Böden ausgeprägter war als auf tonreichen oder bereits kohlenstoffreichen Böden. Mykorrhiza haben somit grundsätzlich das Potenzial, zu einem Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten beizutragen, wobei die Datenlage noch limitiert ist (Conti et al., 2025).

2.1.5 Fazit

Mikroorganismen-Gesellschaften haben einen grossen Einfluss auf das dynamische Kohlenstoffgleichgewicht im Boden und verschiedene Mechanismen sind bereits gut erforscht.

Plausible Wirkungsmechanismen von Mikroorganismen-Präparaten auf Bodenkohlenstoff-Vorräte konnten bisher für gängige Präparate nicht hergeleitet und Effekte in Feldversuchen nicht nachgewiesen werden. Von den in Kapitel 2.1.4 vorgestellten Präparaten ist die Wirkung arbuskulärer Mykorrhizapilze auf den Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten am besten begründet und durch experimentelle Studien grundsätzlich gestützt. Die Evidenz für einen verlässlichen Anstieg der Bodenkohlenstoffvorräte unter Praxisbedingungen ist jedoch derzeit noch begrenzt.

Für besonders degenerierte oder biologisch eingeschränkte Böden ist eher ein Effekt zu erwarten als für biologisch aktive Böden, da es die bestehende Mikroorganismengesellschaft ist, die es künstlich eingebrachten Organismen erschwert sich zu etablieren.

Einfluss der Bewirtschaftung auf das Boden-Mikrobiom:

Organische Düngung fördert im Vergleich zu Mineraldüngern Mikroorganismen-Gesellschaften mit höherer Kohlenstoffeffizienz, welche mehr mikrobielle Biomasse aufbauen und damit auch Bodenkohlenstoff-Vorräte anreichern können (Ashraf et al., 2022). Unter anderem im Rahmen des DOK-Versuchs (Biologisch-Dynamisch vs. Biologisch-Organisch vs. Konventionell) wurde gezeigt, dass die Art der Düngung die Mikroorganismen-Gesellschaft beeinflusst (Hartmann et al., 2015). Es ist davon auszugehen, dass primär die Menge und chemische Form des im organischen Dünger vorhandenen Kohlenstoffs und die Verfügbarkeit der Nährstoffe die Mikroorganismen-



Gesellschaft im Boden formen. Die Stöchiometrie, also das Verhältnis von Kohlenstoff (C), Stickstoff (N), Phosphor (P) und anderen Nährstoffen im Pflanzenmaterial, beeinflusst die Qualität des Kohlenstoffs, der durch abgestorbene Pflanzen oder Wurzelausscheidungen in den Boden gelangt. Organische Substanz mit einem C:N-Verhältnis von 20–25:1 wird beispielsweise schneller abgebaut und besser in mikrobielle Biomasse überführt, während nährstoffarme Substanz mit hohem C:N-Verhältnis (>30:1) zu Stickstoffmangel und verlangsamtem Abbau führen kann (Mason et al., 2023). Das Überleben und sich im Boden etablieren, der in den organischen Düngern vorhandenen Mikroorganismen spielt eine untergeordnete Rolle (Andrews et al., 2024; Paula et al., 2020; Semenov et al., 2021). Die Applikation von Pflanzenschutzmitteln, wie auch die Art und Weise der Bodenbearbeitung haben ebenfalls einen Effekt, eine Reduktion oder der Verzicht auf Pflügen fördert beispielsweise Pilze und erhöht potenziell das Potenzial der Kohlenstoffsequestrierung (Malik et al., 2016).

Eine gewisse Einflussnahme ist somit über die landwirtschaftliche Bewirtschaftungsform möglich, die gezielte Nutzung einzelner mikrobieller Taxa mit bestimmten funktionellen Eigenschaften (z. B. hohe mikrobielle Wachstumsrate oder Kohlenstoffnutzungseffizienz, CUE) ist in der Praxis jedoch schwierig. Eigenschaften wie die Nutzungseffizienz oder spezifische Ausscheidungen können derzeit mangels wissenschaftlicher Evidenz nicht gezielt zur Förderung des Kohlenstoffaufbaus herangezogen werden.

2.2 Technisches Potenzial der Minderungsmaßnahme

Das Potenzial, den Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten allein durch die Zugabe mikrobiologischer Präparate zu fördern, ist derzeit nur für einzelne Präparate wissenschaftlich gestützt. Insbesondere für arbuskuläre Mykorrhizapilze bestehen plausible Wirkungsmechanismen sowie experimentelle Hinweise auf eine Förderung der Bodenkohlenstoff-Vorräte. Ein verlässlicher Nachweis eines langfristigen Anstiegs der Bodenkohlenstoff-Vorräte unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen steht jedoch noch aus. Zielführender bleibt eine landwirtschaftliche Praxis, welche das vorhandene Bodenmikrobiom fördert.

2.3 Vertrauen in die Wirksamkeit

Während verschiedene Mechanismen zur Rolle von Mikroorganismen im Bodenkohlenstoff-Kreislauf gut erforscht sind, gibt es bisher nur sehr begrenzte Evidenz für die Wirksamkeit der meisten Präparate. Eine Ausnahme bilden arbuskuläre Mykorrhizapilze, für welche experimentelle Hinweise auf einen positiven Einfluss auf Bodenkohlenstoff-Vorräte vorliegen. Die Evidenz aus Feldstudien ist jedoch auch hier begrenzt. Nach einem vom IPCC entwickelten Bewertungsschema ist das Vertrauen in die Wirksamkeit mikrobieller Präparate zur Erhöhung des

Bodenkohlenstoffs am ehesten in der Kategorie «Mittlere Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz» einzuordnen (Mastrandea et al, 2010).

Vertrauen in die Wirksamkeit Bezüglich Übereinstimmung und Qualität der Evidenz in der akademischen Literatur		
5 Hohe Übereinstimmung & Robuste Evidenz	4 Mittlere Übereinstimmung & Robuste Evidenz	3 Geringe Übereinstimmung & Robuste Evidenz
4 Hohe Übereinstimmung & Mittlere Evidenz	3 Mittlere Übereinstimmung & Mittlere Evidenz	2 Geringe Übereinstimmung & Mittlere Evidenz
3 Hohe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz	2 Mittlere Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz	1 Geringe Übereinstimmung & Begrenzte Evidenz

Abbildung 2: Einschätzung des Vertrauens in die Wirksamkeit nach Mastrandea et al. (2010).

3 Systembetrachtung

3.1 Synergien

Bei der Applikation gewisser Präparate sind positive Effekte auf andere Parameter als die Bodenkohlenstoff-Vorräte nachgewiesen, wie beispielsweise im FibL Faktenblatt «Mikrobielle Biostimulanzien» aufgezeigt wird, unter anderem auch für arbuskulären Mykorrhizapilzen (Symnack et al., 2022). Dies betrifft beispielsweise eine erhöhte Resistenz gegenüber Pathogenen und Trockenstress von Pflanzen, sowie eine Steigerung der Pflanzenproduktion.

Es besteht zudem die Möglichkeit, dass sich die Landwirte:innen durch die Evaluation und



Anwendung mikrobieller Präparate vertieft mit der Bodenbiologie auseinandersetzen und dadurch Massnahmen zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten ergreifen.

3.2 Limitierungen, Zielhierarchien

Da die Wirksamkeit der meisten mikrobiellen Präparate für den Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten nicht belegt ist und auch für arbuskuläre Mykorrhizapilze unter Praxisbedingungen bislang kein belastbarer Nachweis eines langfristigen Anstiegs der Bodenkohlenstoff-Vorräte vorliegt, fallen Aufwand sowie allfällige zusätzliche Befahrungen der Flächen und der damit verbundene Treibstoffverbrauch bei einer Gesamtbewertung negativ ins Gewicht.

3.3 Kostenbetrachtungen

Die Massnahme ist aufwändig oder generiert Kosten, hat aber keine belegte Wirkung, beziehungsweise lediglich begrenzte Evidenz für einzelne Präparate wie arbuskuläre Mykorrhizapilze unter experimentellen Bedingungen. Komposttee oder EM können selbst hergestellt werden, der Kauf der dafür nötigen Ausrüstung liegt im Rahmen von einigen hundert Franken. Es können auch Produkte gekauft werden, die bereits Mikroorganismen enthalten.

Gemäss den oben beschriebenen Erkenntnissen ist zu erwarten, dass diese wiederholt angewendet werden müssten, was zu jährlich wiederkehrenden Kosten führen würde. Somit ist die Massnahme derzeit als nicht wirtschaftlich einzustufen.

4 Überlegungen zum umsetzbaren Potential Kanton Graubünden

Da bislang kein belastbarer Nachweis eines langfristigen Nutzens mikrobieller Präparate für den Aufbau von Bodenkohlenstoff unter Praxisbedingungen vorliegt, wird eine allgemeine Förderung der Massnahme nicht empfohlen. Präparate mit arbuskulären Mykorrhizapilzen könnten im Rahmen von Praxisexperimenten unterstützt werden.

Aufgrund der extensiven Nutzung vieler Flächen im Kanton Graubünden und dem hohen Anteil an natürlichem Grünland ist grundsätzlich davon auszugehen, dass die bestehenden Mikroorganismengemeinschaften eine eher hohe Kohlenstoffeffizienz haben. Zudem hätten es ausgebrachte Mikroorganismen schwer, sich in diesen meist stabilen Beständen zu etablieren.

4.1 Erfahrungen aus den Pilotprojekten

Im Rahmen des Projekts Klimaneutrale Landwirtschaft (KNL) Graubünden wurden auf einzelnen Betrieben mikrobielle Präparate direkt auf den Boden appliziert. Dabei wurden Komposttee und das Pfeiffer Lübke Präparat verwendet. Bei der Anwendung von Komposttee wurde eine Verbesserung der Bodengesundheit wahrgenommen, während der Betrieb, der das Pfeiffer Lübke Präparat angewendet hat, eine gleichbleibende Bodenqualität rapportiert.

5 Förderung und Überwachung

5.1 Monitoring, Reporting and Verification

Eine allfällige Wirkung könnte durch ein Bodenmonitoring untersucht werden, wobei für einen Nachweis Jahre bis Jahrzehnte notwendig sind. Zurzeit gibt es viele Forschungsprojekte, die sich der Entwicklung von Präparaten mit einzelnen oder mehreren aufeinander abgestimmte Mikroorganismen widmen. Es ist nicht ausgeschlossen, dass es

wirkungsvolle Produkte gibt oder in Zukunft solche entwickelt werden. Weitere Forschung ist deshalb notwendig, um vertiefte Erkenntnisse über die Wirkung bodenspezifischer mikrobieller Präparate zu gewinnen (Mason et al., 2023).

5.2 Existierende und mögliche weitere Förderprogramme und Instrumente

Nicht existent.



6 Fazit und Empfehlung

Eine Förderung des Ausbringens mikrobieller Präparate zur Bodenverbesserung als isolierte Massnahme ist nach heutigem Wissensstand nicht ausreichend wissenschaftlich belegt, um eine allgemeine Förderung zu rechtfertigen. Für die meisten mikrobiellen Präparate fehlt ein belastbarer Nachweis, dass sie zum Aufbau von Bodenkohlenstoff-Vorräten beitragen. Eine Ausnahme bilden arbuskuläre Mykorrhizapilze, für welche plausible Wirkungsmechanismen und experimentelle Hinweise auf einen positiven Einfluss auf Bodenkohlenstoff-Vorräte vorliegen. Ein langfristiger Anstieg der Bodenkohlenstoff-Vorräte unter landwirtschaftlichen Praxisbedingungen konnte bisher jedoch nicht belastbar nachgewiesen werden.

Das Ausbringen von Hofdünger oder Kompost, allenfalls in Kombination mit Präparaten, ist eine

wirkungsvolle Massnahme zur Förderung der Bodenlebewesen und kann sich über die Zusammensetzung der Mikroorganismengemeinschaft auch positiv auf die Kohlenstoffeffizienz auswirken. Des Weiteren fördert eine Reduktion oder ein Verzicht von Bodenbearbeitungsmassnahmen und Pflanzenschutzmitteln die Pilzgemeinschaften im Boden, was wiederum die Kohlenstoffeffizienz des Mikrobioms erhöhen kann.

Langfristige Feldversuche sowie Untersuchungen zur Entwicklung der Mikroorganismengemeinschaften und der Bodenkohlenstoff-Vorräte unter Praxisbedingungen sind notwendig, um das Potenzial mikrobieller Präparate verlässlich beurteilen zu können.



7 Literatur

- Andrews, E.M., Tabassum, M., Galatis, E.G., Yao, E.H., Gaudin, A.C.M., Lazcano, C., Brown, P.H., Khalsa, S.D.S., 2024. Almond hull and shell organic matter amendments increase microbial biomass and multifunctionality in orchard soil and the undisturbed organic layer. *Applied Soil Ecology* 197, 105321. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105321>
- Ashraf, M.N., Waqas, M.A., Rahman, S., 2022. Microbial Metabolic Quotient is a Dynamic Indicator of Soil Health: Trends, Implications and Perspectives (Review). *Eurasian Soil Sc.* 55, 1794–1803. <https://doi.org/10.1134/S1064229322700119>
- Bender, S.F., Wagg, C., van der Heijden, M.G.A., 2016. An Underground Revolution: Biodiversity and Soil Ecological Engineering for Agricultural Sustainability. *Trends in Ecology & Evolution* 31, 440–452. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2016.02.016>
- Berruti, A., Lumini, E., Balestrini, R., Bianciotto, V., 2016. Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes. *Front. Microbiol.* 6. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2015.01559>
- Blume, H.-P., Brümmer, G.W., Horn, R., Kandeler, E., Kögel-Knabner, I., Kretzschmar, R., Stahr, K., Wilke, B.-M., Thiele-Bruhn, S., Welp, G., 2010. Scheffer/Schachtschabel - Lehrbuch der Bodenkunde, in: *Lehrbuch der Bodenkunde*. Spektrum Akademischer Verlag, Heidelberg, pp. 1–6. https://doi.org/10.1007/978-3-8274-2251-4_1
- Boussageon, R., Eigenmann, M., Frommenwiler, J., Van Der Heijden, M.G.A., 2025. Poor Quality of Commercial Arbuscular Mycorrhizal Inoculants Used for Agriculture and Home Gardening. *J of Sust Agri & Env* 4, e70107. <https://doi.org/10.1002/sae2.70107>
- Conti, G., Urcelay, C., Gundel, P. E., & Piñeiro, G. (2025). The potential of arbuscular mycorrhizal fungi to improve soil organic carbon in agricultural ecosystems: A meta-analytical approach. *Functional Ecology*, 39(4), 1016–1030. <https://doi.org/10.1111/1365-2435.14753>
- De Corato, U., 2020. Agricultural waste recycling in horticultural intensive farming systems by on-farm composting and compost-based tea application improves soil quality and plant health: A review under the perspective of a circular economy. *Science of The Total Environment* 738, 139840. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.139840>
- De Rosa, D., Ballabio, C., Lugato, E., Fasiolo, M., Jones, A., Panagos, P., 2024. Soil organic carbon stocks in European croplands and grasslands: How much have we lost in the past decade? *Global Change Biology* 30, e16992. <https://doi.org/10.1111/gcb.16992>
- Guenet, B., Gabrielle, B., Chenu, C., Arrouays, D., Balesdent, J., Bernoux, M., Bruni, E., Caliman, J., Cardinael, R., Chen, S., Ciais, P., Desbois, D., Fouche, J., Frank, S., Henault, C., Lugato, E., Naipal, V., Nesme, T., Obersteiner, M., Pellerin, S., Powlson, D.S., Rasse, D.P., Rees, F., Soussana, J., Su, Y., Tian, H., Valin, H., Zhou, F., 2021. Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biology* 27, 237–256. <https://doi.org/10.1111/gcb.15342>
- Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P., Widmer, F., 2015. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME J* 9, 1177–1194. <https://doi.org/10.1038/ismej.2014.210>
- Kallenbach, C.M., Frey, S.D., Grandy, A.S., 2016. Direct evidence for microbial-derived soil organic matter formation and its ecophysiological controls. *Nat Commun* 7, 13630. <https://doi.org/10.1038/ncomms13630>
- Keel, S.G., Anken, T., Büchi, L., Chervet, A., Fliessbach, A., Flisch, R., Huguenin-Elie, O., Mäder, P., Mayer, J., Sinaj, S., Sturny, W., Wüst-Galley, C., Zihlmann, U., Leifeld, J., 2019. Loss of soil organic carbon in Swiss long-term agricultural experiments over a wide range of management practices. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 286, 106654. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2019.106654>
- Khan, M.S., Zaidi, A., Wani, P.A., 2009. Role of Phosphate Solubilizing Microorganisms in Sustainable Agriculture - A Review, in: Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Véronique, S., Alberola, C. (Eds.), *Sustainable Agriculture*. Springer Netherlands, Dordrecht, pp. 551–570. https://doi.org/10.1007/978-90-481-2666-8_34



- Krause, H.-M., Stehle, B., Mayer, J., Mayer, M., Steffens, M., Mäder, P., Fließbach, A., 2022. Biological soil quality and soil organic carbon change in biodynamic, organic, and conventional farming systems after 42 years. *Agron. Sustain. Dev.* 42, 117. <https://doi.org/10.1007/s13593-022-00843-y>
- Liu, X., Mei, S., Salles, J.F., 2023. Inoculated microbial consortia perform better than single strains in living soil: A meta-analysis. *Applied Soil Ecology* 190, 105011. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2023.105011>
- Lutz, S., Bodenhausen, N., Hess, J., Valzano-Held, A., Jan Waelchli, Deslandes-Hérolde, G., Schlaeppli, K., Van Der Heijden, M.G.A., 2023. Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi. *Nat Microbiol* 8, 2277–2289. <https://doi.org/10.1038/s41564-023-01520-w>
- Malik, A.A., Chowdhury, S., Schlager, V., Oliver, A., Puissant, J., Vazquez, P.G.M., Jehmlich, N., Von Bergen, M., Griffiths, R.I., Gleixner, G., 2016. Soil Fungal:Bacterial Ratios Are Linked to Altered Carbon Cycling. *Front. Microbiol.* 7. <https://doi.org/10.3389/fmicb.2016.01247>
- Mason, A.R.G., Salomon, M.J., Lowe, A.J., Cavagnaro, T.R., 2023. Microbial solutions to soil carbon sequestration. *Journal of Cleaner Production* 417, 137993. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137993>
- Mastrandrea, M. D., Field, C. B., Stocker, T. F., Edenhofer, O., Ebi, K. L., Frame, D. J., Held, H., Kriegler, E., Mach, K. J., Matschoss, P. R., Plattner, G.-K., Yohe, G. W., & Zwiers, F. W. (2010). Guidance note for lead authors of the IPCC Fifth Assessment Report on consistent treatment of uncertainties. (IPCC Guidance Note). ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/05/uncertainty-guidance-note.pdf
- Michel, V., Rieger, L., Rubi, A., n.d. Komposttee: Praktische Informationen, Vor- und Nachteile.
- Möller, K., Dr. Sven Höcker, Völz, A., G J Sauter, Flaig, H., J Breuer, 2023. Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben “regenerative Landwirtschaft” - Abschlussbericht. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.11116.13444>
- Oberholzer, S., Herrmann, C., Bodenhausen, N., Krause, H.-M., Mestrot, A., Ifejika Speranza, C., Jarosch, K.A., 2024. No effect on biological or chemical soil properties when amended with effective microorganisms for improved cover crop decomposition. *Applied Soil Ecology* 197, 105358. <https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2024.105358>
- Olle, M., Williams, I.H., 2013. Effective microorganisms and their influence on vegetable production – a review. *The Journal of Horticultural Science and Biotechnology* 88, 380–386. <https://doi.org/10.1080/14620316.2013.11512979>
- Parihar, M., Rakshit, A., Meena, V.S., Gupta, V.K., Rana, K., Choudhary, M., Tiwari, G., Mishra, P.K., Pattanayak, A., Bisht, J.K., Jatav, S.S., Khatri, P., Jatav, H.S., 2020. The potential of arbuscular mycorrhizal fungi in C cycling: a review. *Arch Microbiol* 202, 1581–1596. <https://doi.org/10.1007/s00203-020-01915-x>
- Paula, F.S., Tatti, E., Thorn, C., Abram, F., Wilson, J., O’Flaherty, V., 2020. Soil prokaryotic community resilience, fungal colonisation and increased cross-domain co-occurrence in response to a plant-growth enhancing organic amendment. *Soil Biology and Biochemistry* 149, 107937. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2020.107937>
- Riggers, C., Poeplau, C., Don, A., Frühauf, C., Dechow, R., 2021. How much carbon input is required to preserve or increase projected soil organic carbon stocks in German croplands under climate change? *Plant Soil* 460, 417–433. <https://doi.org/10.1007/s11104-020-04806-8>
- Russ, D., Fitzpatrick, C.R., Teixeira, P.J.P.L., Dangel, J.L., 2023. Deep discovery informs difficult deployment in plant microbiome science. *Cell* 186, 4496–4513. <https://doi.org/10.1016/j.cell.2023.08.035>
- Saha, M., Maurya, B.R., Meena, V.S., Bahadur, I., Kumar, A., 2016. Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India. *Biocatalysis and Agricultural Biotechnology* 7, 202–209. <https://doi.org/10.1016/j.bcab.2016.06.007>
- Sanderman, J., Hengl, T., Fiske, G.J., 2017. Soil carbon debt of 12,000 years of human land use. *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* 114, 9575–9580. <https://doi.org/10.1073/pnas.1706103114>
- Schwalb, S.A., Li, S., Hemkemeyer, M., Heinze, S., Joergensen, R.G., Mayer, J., Mäder, P., Wichern, F., 2023. Long-term differences in fertilisation type change the bacteria:archaea:fungi ratios and reveal a heterogeneous



- response of the soil microbial ionome in a Haplic Luvisol. *Soil Biology and Biochemistry* 177, 108892. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2022.108892>
- Semenov, M.V., Krasnov, G.S., Semenov, V.M., Ksenofontova, N., Zinyakova, N.B., Van Bruggen, A.H.C., 2021. Does fresh farmyard manure introduce surviving microbes into soil or activate soil-borne microbiota? *Journal of Environmental Management* 294, 113018. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113018>
- Symnaczik, S., Mäder, P., Romano, I., 2022. Mikrobielle Biostimulanzien, *Faktenblatt* 2022/Nr. 1417.
- Tao, F., Huang, Y., Hungate, B.A., Manzoni, S., Frey, S.D., Schmidt, M.W.I., Reichstein, M., Carvalhais, N., Ciais, P., Jiang, L., Lehmann, J., Wang, Y.-P., Houlton, B.Z., Ahrens, B., Mishra, U., Hugelius, G., Hocking, T.D., Lu, X., Shi, Z., Viatkin, K., Vargas, R., Yigini, Y., Omuto, C., Malik, A.A., Peralta, G., Cuevas-Corona, R., Di Paolo, L.E., Luotto, I., Liao, C., Liang, Y.-S., Saynes, V.S., Huang, X., Luo, Y., 2023. Microbial carbon use efficiency promotes global soil carbon storage. *Nature* 618, 981–985. <https://doi.org/10.1038/s41586-023-06042-3>