

Mikrobielle Biostimulanzien

Als eine umweltfreundliche Strategie zu einer nachhaltigeren Nutzpflanzenproduktion wird in den letzten Jahren über den Einsatz von organischen Zusatzstoffen, aktiven natürlichen Metaboliten oder nützlichen Mikroben diskutiert. Weltweit gibt es ein steigendes Interesse an dem Einsatz von Wirkstoffen auf mikrobieller Basis und dem gezielten Nutzen ihrer Wechselwirkungen mit den Pflanzen.

Nützliche Mikroben können das Wachstum von Pflanzen fördern, indem sie deren Toleranz gegenüber ungünstigen Boden- und Umweltbedingungen erhöhen oder die Speicherkapazitäten der Pflanzen verbessern. Die Entwicklung spezifischer mikrobieller Impfstoffe, so genannter mikrobieller Biostimulanzien, mit positiven Effekten erweist sich jedoch als sehr schwierig. Eine besondere Herausforderung ist die Eignung für landwirtschaftliche Anwendungen unter verschiedenen Umweltbedingungen.

Derzeit sind einige im Handel erhältliche mikrobielle Biostimulanzien von minderer Qualität oder kompliziert in der Anwendung. Dies führt zu einem Vertrauensverlust bei den Landwirten und Landwirtinnen. Die Qualitätsverbesserung von Rezepturen auf mikrobieller Basis und die Fortschritte im Verständnis der biologischen Mechanismen haben jedoch kontinuierlich dazu beigetragen, die Effizienz der Anwendungen auf dem Feld zu steigern. Dieses Merkblatt fasst die neuesten Forschungsergebnisse zusammen.



Die Rolle der Mikroorganismen im Boden für die Landwirtschaft

Die Grüne Revolution des zwanzigsten Jahrhunderts ermöglichte einen starken Anstieg der weltweiten Nahrungsmittelproduktion. Sie war vor allem durch zwei Entwicklungen gekennzeichnet: den Einsatz von Chemikalien (wie Pestizide, Herbizide und chemische Düngemittel) und die Verbesserung von Kulturpflanzen durch gezielte Züchtung und genetische Manipulationen. Die durch chemische Düngung erzielten Vorteile sind jedoch mit hohen Belastungen für die Umwelt verbunden. In den letzten Jahren gab es immer lautere Forde-

rungen nach einer Reduzierung von chemischen Produkten in der Landwirtschaft. Die Entwicklung von nachhaltigen Agrar- und Ernährungssystemen sowohl für die Umwelt als auch für die menschliche Gesundheit spielt eine immer größere Rolle. Die Verwendung von Einsatzstoffen auf mikrobieller Basis und die Förderung der mikrobiellen Gemeinschaften als natürliche Methode mit geringen Umweltauswirkungen ist ein vielversprechender Ansatz zur Erreichung dieses Ziels¹.

¹<https://ohioline.osu.edu/factsheet/SAG-16>

Mikroorganismen im Boden sind die zahlreichsten Organismen der Erde: In einem Teelöffel Boden befinden sich mehr Mikroben als Menschen weltweit. Auf einer Fläche von einem Quadratmeter bis zu einer Tiefe von 15 cm können je nach Art des Ökosystems bis zu 500 g Bakterien, 500 g Aktinomyzeten und 1,5 kg Pilze vorkommen. Einige von ihnen sind für die Zersetzung organischer Stoffe und die Wiederverwertung von Nährstoffen unerlässlich, während andere mit Pflanzenwurzeln in Beziehung treten und wichtige Nährstoffe liefern^[2]. Dieses Potenzial wurde erkannt und führte zu ihrer gewerblichen Nutzung. Die intensive Landwirtschaft verringert die Dichte und Aktivität der Bodenmikroben. Die Anwendung von Wirkstoffen auf mikrobieller Basis kann möglicherweise zur Er-

holung der mikrobiellen Populationen beitragen^[3]. Der Einsatz mikrobieller Wirkstoffe hat eine lange Geschichte und begann bereits mit der großflächigen Beimpfung von Leguminosen mit Rhizobien zur Stickstofffixierung im frühen 20. Jahrhundert. In jüngster Zeit wurden *Bacillus*-, *Pseudomonas*-, *Glo-mus*-, *Azotobacter*-, *Trichoderma*- und andere Stämme aufgrund ihrer Fähigkeit, die Pflanzenproduktion zu steigern, vermarktet und dafür ausgiebig untersucht und beschrieben^[1,4]. In den letzten zehn Jahren ist der globale Markt für mikrobielle Biostimulanzien kontinuierlich gewachsen. Im Jahr 2019 wurde er auf eine Milliarde US Dollar geschätzt. Es wird erwartet, dass von 2020 bis 2027 eine durchschnittliche jährliche Wachstumsrate von 12,8 % erreicht wird².

Was sind mikrobielle Biostimulanzien?

Mikrobielle Impfstoffe, auch bekannt als «Bodenimpfstoffe» oder «Bioimpfstoffe», sind landwirtschaftliche Wirkstoffe mit nützlichen rhizosphärischen oder endophytischen Mikroben, welche das Pflanzenwachstum fördern. Je nach ihrer Funktion gibt es verschiedene Arten von mikrobiellen Impfstoffen. In diesem Merkblatt werden ausschließlich die mikrobiellen Biostimulanzien vorgestellt.

Arten von mikrobiellen Biostimulanzien und Wirkungsweisen

Stickstoff-Fixierer

Einige Bakterienstämme und Algen sind in der Lage atmosphärischen Stickstoff (N) in pflanzenverfügbare Formen wie Ammoniak und Nitrat zu binden. Dieser Prozess wird als biologische Stickstofffixierung (BNF) bezeichnet^[5].

Der Vorgang ermöglicht die Nutzung einiger Mikroorganismen als mikrobielle Biostimulanzien, die als Ersatz für mineralischen N-Dünger dienen können. Dies könnte dazu beitragen, die N-Reserven im Boden auf natürliche Weise zu erhalten^[6]. N-Fixierer lassen sich in drei Gruppen einteilen: freilebende und assoziative Bakterien wie *Azobacter* und *Azospirillum* und symbiotische Bakterien wie *Rhizobium*, *Frankia* und *Azolla*. In (sub-)tropischen, aber weniger in gemäßigten Klimazonen tragen die nicht-symbiotischen N-Fixierer zur N-Aufnahme der Pflanzen bei.

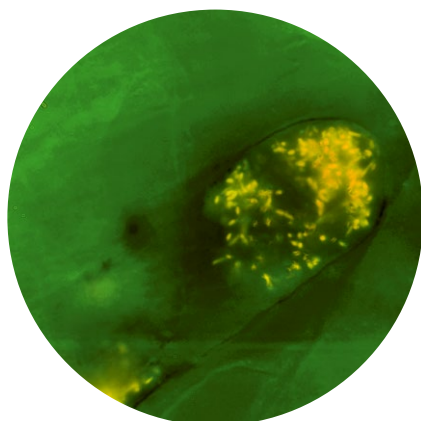
Azotobacter: Sie sind freilebende und assoziative N-fixierende Bakterien. Neben der BNF bieten *Azotobacter*-Stämme weitere positive Effekte zur Stimulierung des Wachstums und verbesserten Nährstoffaufnahme der Pflanzen. Das führt zu mehr Wachstum, Ertrag und Qualität bei der Ernte^[7,8].

²<https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/biofertilizers-industry>

Kurz erklärt

Mikrobielle Biostimulanzien sind Produkte, die lebende oder inaktive Zellen von wirksamen Bakterien, Pilzen oder Algen einzeln oder in Kombination enthalten. Die enthaltenen Mikroben sind in der Lage, die Rhizosphäre oder das Innere der Pflanzen zu besiedeln. Sie fördern das Wachstum der Pflanzen, indem sie die Aufnahme von Primärnährstoffen verbessern. Mikrobielle Biostimulanzien können auf Böden, Saatgut und Pflanzenoberflächen ausgebracht werden.

Kosakonia pseudosacchari, ein assoziativer Stickstoff-Fixierer, kolonisiert Tabakwurzeln.



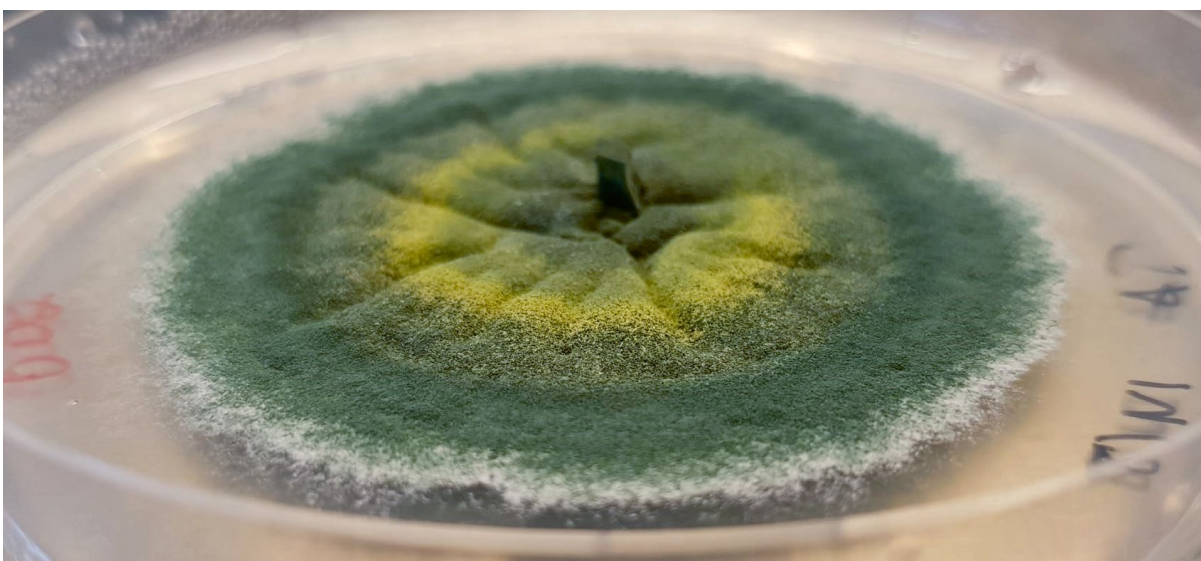
Azospirillum: Unter den assoziativen N-fixierenden Bakterien wurden *Azospirillum* sehr früh entdeckt und mit am besten charakterisiert. Die pflanzenwachstumsfördernde Wirkung von *Azospirillum* wird auf verschiedene Mechanismen zurückgeführt, darunter Krankheitsresistenz und Trockentoleranz, insbesondere aber auf die BNF^[9].

Rhizobien: Es handelt sich um symbiotische, N-fixierende Bakterien, die an den dazugehörigen Leguminosen für die Bildung von Knöllchen verantwortlich sind (siehe Bild rechts). Diese Art von Symbiose trägt zu einem bedeutenden N-Anteil in der Biosphäre bei^[10]. Die Wechselwirkung ist interessant, wenn man bedenkt, dass Hülsenfrüchte zu den wichtigsten Kultur- und Futterpflanzen der Welt gehören.

Andere N-Fixierer: *Frankia* ist für seine Fähigkeit, N-fixierende Wurzelknöllchensymbiosen mit bestimmten Wirtspflanzen zu bilden, gut beschrieben^[11]. *Azolla* wird üblicherweise als Moskitofarn, Wasserlinsenfarn, Feenmoos oder Wasserfarn bezeichnet und ist ein kleiner, frei schwimmender, gewässerbesiedelnder Farn^[12]. *Azollahaltige* mikrobielle Biostimulanzien erhöhen den N-Gehalt zum Beispiel von Reisböden erheblich. *Cyanobakterien* können sowohl freilebend als auch als Symbionten mit Flechten, Farnen und Cycadeen vorkommen. Ihr Anteil an der gesamten BNF ist hoch, aber sie sind nur unter N-armen Bedingungen in der Lage, atmosphärischen N zu binden^[13].



Sojabohnenwurzeln mit Knöllchen



Trichoderma asperelum auf einer Agarplatte

Phosphorlösende Mikroorganismen

Phosphor (P) ist ein wesentlicher Makronährstoff im Boden, der für das Wachstum und die Entwicklung von Pflanzen notwendig ist. Er ist an verschiedenen grundlegenden biologischen Funktionen beteiligt, aber seine Verfügbarkeit ist begrenzt. Daher sind P-Dünger nach den N-Düngern die weltweit am häufigsten eingesetzten Agrochemikalien^[14].

In Böden wird der Aufschluss und die Mobilisierung von P hauptsächlich durch P-lösende Bakterien (PSB) und in geringerem Maße durch P-lösende Pilze (PSF) gewährleistet^[15]. Man geht davon aus, dass 20–25 % des P-Bedarfs der Pflanzen durch Bakterien und Pilze gedeckt werden. Gut untersuchte Bakterien in Böden sind *Pseudomonas putida* und *Bacillus megaterium*. Die bekanntesten Pilzgattungen sind *Aspergillus*, *Penicillium* und *Trichoderma*. Einige *Aktinomyzeten* sind ebenfalls für ihre P-lösende Aktivität bekannt und gewinnen aufgrund ihrer Fähigkeit, in extremen Umgebungen zu überleben, zunehmend an Popularität^[16].

Kalium- und Zinklösende Mikroorganismen

Kalium (K) ist ebenfalls ein wichtiger Makronährstoff für die Pflanzenentwicklung. Von Natur aus enthalten Böden große Mengen an K, aber nur 1 bis 2 % davon sind für die Pflanzenaufnahme verfügbar^[17]. Bakterien, Pilze und Aktinomyzeten können mit Hilfe verschiedener chemischer Reaktionen K im Boden lösen^[16,18]. *Bacillus licheniformis*, *Pseudomonas azotoformans* und *Enterobacter hormoechei* gehören zu den wirksamsten K-lösenden Mikroorganismen, wie Anwendungsstudien an Reis und Gurken gezeigt haben^[19,20,21].

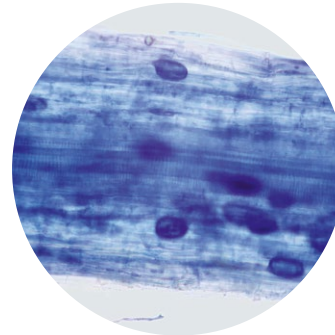
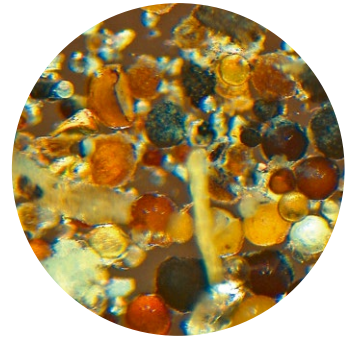
Zink (Zn) kann durch verschiedene mikrobielle Arten wie *Bacillus subtilis*, *Thiobacillus thiooxidans* und *Saccharomyces sp.* gelöst werden^[22]. Diese Mikroorganismen können als mikrobielle Biostimulanzien eingesetzt werden, um die Verfügbarkeit von Zn für Pflanzen zu erhöhen.

Arbuskuläre Mykorrhizapilze

Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF) sind Symbionten, die zum Stamm der Glomeromycota gehören. Sie gehen Verbindung mit den Wurzeln von mehr als 80 % aller Landpflanzen ein, einschließlich der meisten landwirtschaftlichen Nutzpflanzen^[23].

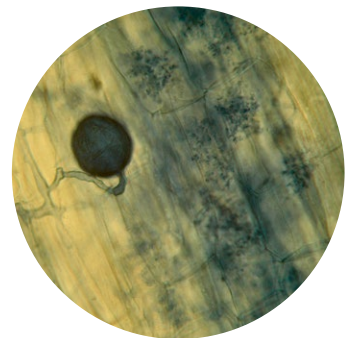
Die Pilze stellen ein grundlegendes Bindeglied zwischen Pflanzen und mineralischen Nährstoffen im Boden dar. Sie erhöhen nachweislich die Aufnahme der Pflanze insbesondere von P und Zn, tragen aber auch zur Aufnahme von N, K, Magnesium, Kalzium und Schwefel bei^[24,25]. Darüber hinaus bringen AMF den Pflanzen weitere Vorteile, so

Sporen verschiedener AMF-Arten, die aus einem landwirtschaftlichen Boden extrahiert wurden.



AMF besiedelt die Wurzeln von Sorghum.

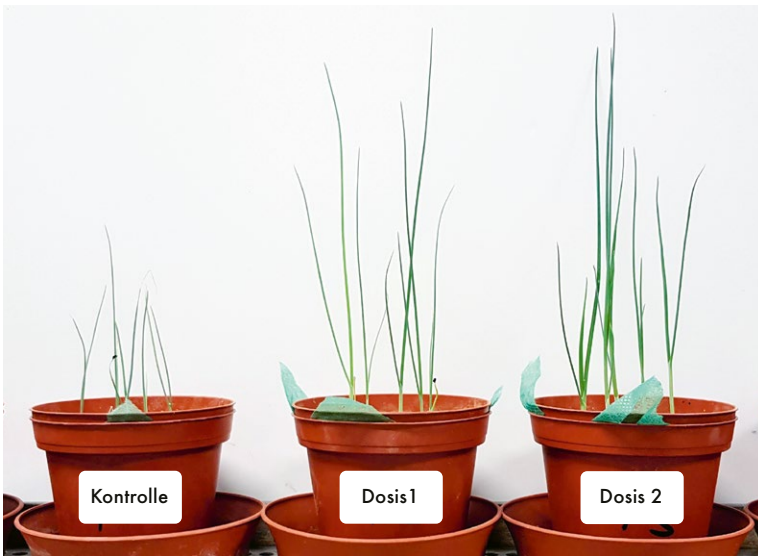
AMF die Maiswurzeln mit Hyphen, Arbuskeln und Vesikeln besiedeln.



verbessern sie zum Beispiel die Trockenheits- und Salztoleranz sowie die Krankheitsresistenz^[24]. Daher gibt es in den letzten Jahren ein zunehmendes Interesse an ihrer Verwendung als mikrobielle Biostimulanzien in der Landwirtschaft, im Gartenbau sowie bei der Aufforstung und der Urbarmachung von Wüsten^[25].

Andere Mykorrhizen

Unter Mykorrhiza versteht man im Allgemeinen die symbiotische Verbindung zwischen einem Pilz und einer Pflanzenwurzel. Viele Baumarten in den Wäldern der Welt sind auf *Ektomykorrhiza* (ECM) angewiesen. Die Pilze, die ECM-Assoziationen bilden, gehören taxonomisch zu den *Basidiomyceten* und zu einem geringeren Anteil zu den *Ascomyceten*^[26]. Diese Pilze verbessern die Nährstoffaufnahme der Bäume durch die Mobilisierung von Nährstoffen aus organischen Verbindungen. Gleichzeitig tragen sie auch zur Kohlenstoffversorgung der Böden bei und sind somit für den Kohlenstoffkreislauf in



Lauch, der in Abwesenheit (Kontrolle) und in Anwesenheit von niedrigen (Dosis 1) und hohen (Dosis 2) Dosierungen eines mikrobiellen Konsortiums in einem phosphorarmen Boden wächst.

Waldökosystemen verantwortlich^[26]. Die *Ericoid-Mykorrhiza* ist eine Verbindung zwischen Pflanzen der Ordnung *Ericales* und Bodenpilzen^[27], während die *Orchideen-Mykorrhiza* zwischen Pflanzen der Familie der *Orchidaceae* und Bodenpilzen^[28] gebildet wird. Letztere ist während der Keimung entscheidend für die Versorgung des Keimlings mit Kohlenstoff^[29].

Mikrobielle Konsortien

Kombinationen von mikrobiellen Stämmen wie Rhizobakterien mit Pilzen, sogenannte mikrobielle Konsortien, sind ein vielversprechender Ansatz zur Entwicklung mikrobieller Biostimulanzien für eine nachhaltige Landwirtschaft^[30]. Aufgrund ihrer sich ergänzenden Eigenschaften sind sie potentiell multifunktional. Außerdem wird angenommen, dass Produkte, die Konsortien enthalten, in unterschiedlichen Umgebungen besser überleben könnten als Produkte mit nur einem Stamm. Dieser Effekt ist darauf zurückzuführen, dass sich die Mikroben durch Kommunikation und Differenzierung gegenseitig anregen^[31]. Es wurde beobachtet, dass sie das Pflanzenwachstum und die Leistung unter abiotischem Stress (extreme Temperatur, pH-Wert, Salzgehalt, Trockenheit, Schwermetall- und Pestizidbelastung) wirksam verbessern^[30,32]. Bekannte Produkte in dieser Kategorie sind effektive Mikroorganismen (EM) mit grossem Marktanteil. Einige Studien haben jedoch gezeigt, dass die beobachteten Wirkungen von EM nicht auf die lebenden Mikroorganismen selbst zurückzuführen sind. Vielmehr fördern die Nährstoffe in dem Substrat, das die Mikroorganismen enthält, das Pflanzenwachstum^[33,34,35].

Anwendungsbereiche

Verwendung im Gartenbau

Mikrobielle Biostimulanzien werden im Gartenbau aus folgenden Gründen häufig eingesetzt^[36,37,38]:

- die Erzeugung von hochwertigen und ertragreichen Kulturen
- der Einsatz von Wachstumssubstraten frei von geeigneten Mikroorganismen
- die kontrollierbaren Umweltbedingungen (im Gegensatz zum offenen Feld)
- die vereinfachte Ausbringungsmöglichkeit durch Bewässerung^[36]
- die starke Spezialisierung der Kulturen und die Anwendung intensiver Anbaumethoden im Gartenbau, die zu einem Verlust der Bodenfruchtbarkeit führen.

In diesem Zusammenhang können mikrobielle Biostimulanzien zum Pflanzenwachstum beitragen und zu einer Zunahme mikrobieller Gemeinschaften im Boden führen^[36]. Mikrobielle Biostimulanzien werden allein oder in Kombination mit anderen Düngemitteln üblicherweise in verschiedenen Bereichen des Gartenbaus eingesetzt, z.B. im Gemüseanbau, in der Blumenzucht, in der Baumzucht und im Hobbygartenbau^[37,38].

Die Anwendung von *Azotobacterhaltigen* mikrobiellen Biostimulanzien allein oder in Kombination mit *Glomus*-Stämmen bei Äpfeln und Bananen erhöhte das Pflanzenwachstum und die Fruchtqualität^[38,39]. In Zusammenarbeit mit Partnern zeigte das FiBL die wachstumsfördernde Wirkung von einheimischen und kommerziellen AMF bei Dattelpalmen und Naranjilla, wenn sie unter Gewächshausbedingungen beimpft wurden^[40,41,42].



Mit dem Produkt HiStick beimpfte (links) und nicht beimpfte (rechts) Lupinen.

In der Blumenzucht steigerte die kombinierte Anwendung mikrobieller Biostimulanzen mit natürlichen oder chemischen Mitteln die Produktivität und Qualität der Pflanzen^[43]. Die kombinierte Anwendung von Hofdünger und P-lösenden Bakterien verbesserte den Ertrag und den Nährstoffgehalt von Ringelblumen erheblich^[44], die Beimpfung mit *Azotobacter* steigerte das Wachstum von Tulpen^[45].

Verwendung im Ackerbau

Der Einsatz mikrobieller Biostimulanzen ist nicht auf den Gartenbau beschränkt und gewinnt auch im Ackerbau zunehmend an Bedeutung. Die Ausbringung von Rhizobien haben im Leguminosenanbau bereits eine lange Tradition. Aufgrund der Wirtsspezifität von Rhizobien sind kultur- und umweltspezifische Beimpfungen von großer Bedeutung für den Anbau nicht heimischer Leguminosen wie Soja oder in Böden mit einer geringen Population wirksamer Rhizobien^[46]. Das Bild oben zeigt den erfolgreichen Einsatz von Rhizobienprodukten in einem Feldversuch mit Lupinen, den das FiBL in Zusammenarbeit mit Partnern durchgeführt hat. Weitere FiBL-Versuche zeigten, dass die Wahl wirksamer, auf dem Markt erhältlicher Einsatzstoffe eine Voraussetzung für stabile Erträge und Proteingehalte im Biosoja-Anbau ist^[47]. Auch in anderen Ackerkulturen gewinnen mikrobielle Biostimulanzen an Bedeutung. Der Einsatz von *Azospirillum* in Kombination mit anderen mikrobiellen Stämmen zeigte positive Ergebnisse in verschiedenen Kulturen: mit *Pseudomonas* wurde der Kornertrag von

Mais und Baumwolle erhöht^[48], mit *Azotobacter* der Ertrag von Perlhirse, Sorghum und Reis^[49] und mit *Arthrobacter* und einem P-lösenden Bakterienstamm der Kornertrag von Gerste^[50]. Untersuchungen im Rahmen eines Verbundprojekts des FiBL mit Partnern in der Schweiz und in Indien ergaben, dass die Beimpfung mit AMF und Rhizobakterien:

- dazu beitragen, den Mineraldüngerbedarf von Taubenerbsen und Fingerhirse um 50 % zu senken, wobei der gleiche Ertrag wie bei einer vollständigen Mineraldüngung erzielt wird^[51]
- den Ernteertrag, die Mineralstoffversorgung und die Effizienz der P-Nutzung steigern und gleichzeitig die Bodenqualität verbessern^[52]
- an Standorten mit geringer Bodenfruchtbarkeit wirksamer ist, wenn sie in Form von Konsortien aus Mykorrhiza- und Rhizobakterienstämmen angewendet wird.

Verwendung für die Renaturierung

Ein weiterer Bereich, der in hohem Maße von der Anwendung mikrobieller Biostimulanzen, insbesondere von AMF, profitiert, ist die Renaturierung von Ökosystemen^[53]. Menschliche Aktivitäten wie Kahlschlag und Bergbau, aber auch natürliche Faktoren wie Brände oder geomorphologische Prozesse können die Stabilität natürlicher Ökosysteme beeinträchtigen. Die Folge kann eine Verschlechterung der Bodenfruchtbarkeit sein und die spontane Erholung der Vegetation stark einschränken. Der erfolgreiche Einsatz von AMF wurde in mehreren Studien nachgewiesen, beispielsweise bei der Wie-

derbegrünung von Böden im Mittelmeerraum, die von Wüstenbildung betroffen sind^[54] sowie bei der Wiederherstellung von Böden, die durch den Bergbau beeinträchtigt waren^[55].

Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien

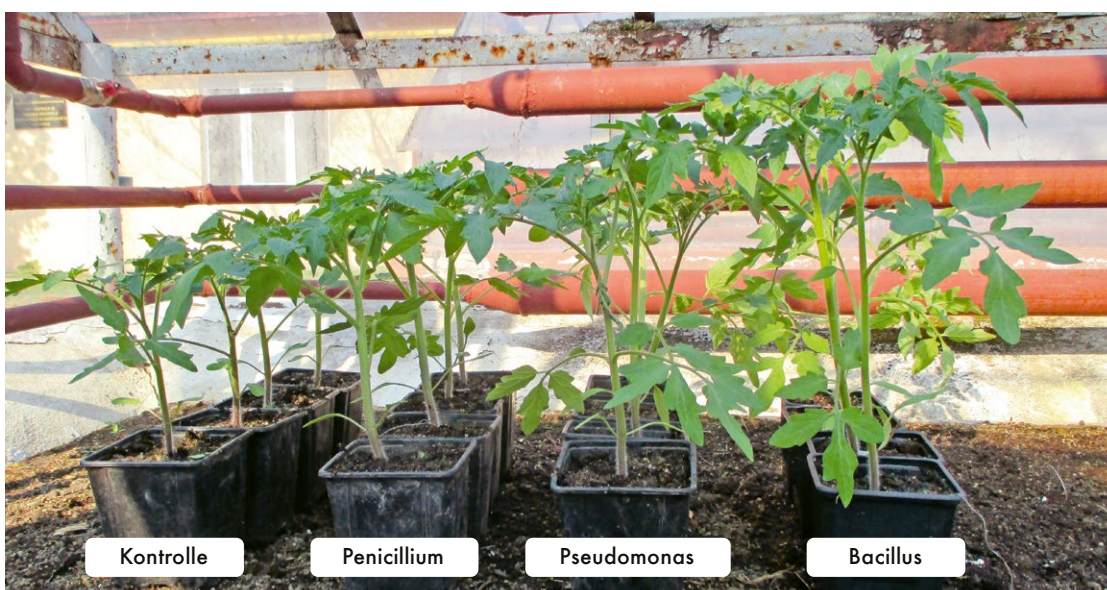
Forschende auf der ganzen Welt haben die Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien an vielen verschiedenen Nutzpflanzen in den unterschiedlichen Ökosystemen eingehend untersucht. Das Ergebnis ist eine große Zahl von Veröffentlichungen, in denen die Vorteile verschiedener mikrobieller Biostimulanzien wie AMF, P-lösender Mikroorganismen und N-Fixierern zusammengefasst sind.

Trotzdem bleibt bei der Anwendung in der Praxis durch die Landwirtinnen und Landwirte die erwartete Wirkung oft aus. Die Gründe für die ausbleibenden positiven Resultate sind vielfältig und liegen meist an einer nicht kompatiblen Kombination von Umweltfaktoren, insbesondere der Bodenbedingungen, der Art der mikrobiellen Biostimulanzien und der Kultursorte^[56]. Deshalb können bisher kaum konkrete Empfehlungen für den Einsatz bestimmter Produkte gegeben werden. Einige wenige Ausnahmen betreffen den Einsatz von Brady- oder Rhizobienprodukten für den Anbau von nicht-regionalen Leguminosen.

Eine aktuelle globale Analyse offenbarte jedoch einige allgemeine Aussagen zur Vorhersage der Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien^[56]. Die Studie hat gezeigt, dass die Wirksamkeit stark von den örtlichen Bodenbedingungen, den klimatischen Bedingungen und der Art der Nutzpflanze abhängt und dass die Bedingungen, unter denen die beste Leistung erzielt werden, je nach Art der verwendeten mikrobiellen Biostimulanzien unterschiedlich sind^[56]:

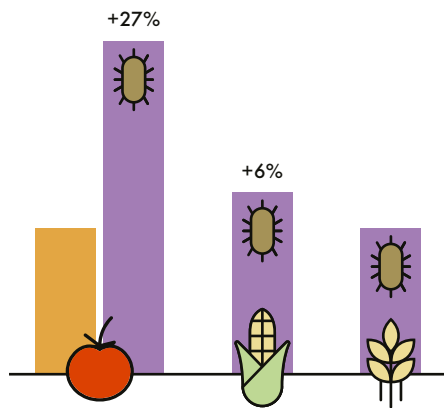
- AMF funktionieren am besten bei niedrigem organischem Kohlenstoffgehalt und bei einem niedrigem Gehalt an pflanzenverfügbarem P im Boden (10–25 kg P/ha).
- P-lösende Mikroorganismen sind vor allem bei niedrigen organischen Kohlenstoffgehalten, aber etwas höheren pflanzenverfügbaren P-Gehalten im Boden (25–35 kg P/ha) wirksam.
- N-Fixierer wirken am besten bei steigenden organischen Kohlenstoffgehalten und einem pflanzenverfügbaren P-Gehalt von mehr als 45 kg P pro ha im Boden.

Neben den Bodenbedingungen wirkt sich auch die Art der Nutzpflanze auf die Effektivität mikrobieller Biostimulanzien aus. Leguminosen und Gemüse reagieren besser auf die Behandlung mit mikrobiellen Biostimulanzien als Wurzelgemüse und Getreide, was auf ihren höheren Nährstoffbedarf zurückzuführen sein könnte.



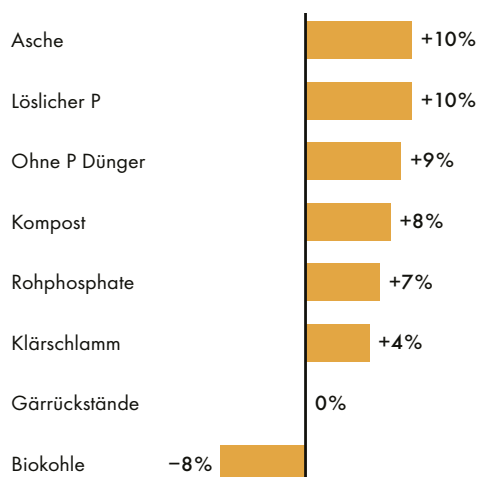
Das unterschiedliche Wachstum von Tomaten durch Zugabe von mikrobiellen Biostimulanzien, die *Penicillium*, *Pseudomonas* oder *Bacillus* enthalten, oder ohne Zusatz (Kontrolle).

Abbildung 1: Wirkung mikrobieller Biostimulanzien auf verschiedene Nutzpflanzen



Tomaten, die im Gewächshaus und/oder im Freiland angebaut wurden, reagierten mit einer Wachstumssteigerung von bis zu 27% am besten auf die Behandlung, gefolgt von Mais mit 6% und Weizen ohne Wachstumssteigerung.

Abbildung 2: Wirkung mikrobieller Biostimulanzien in Abhängigkeit von Phosphor-Dünger



* Mikrobielle Biostimulanzien in Kombination mit organischen Düngemitteln wie Tiermist, Fleisch-, Feder- und Knochenmehl steigerten das Pflanzenwachstum am besten, gefolgt von der Kombination mit Asche, löslichem Phosphor, Kompost und Rohphosphat.

³<https://www.biofactor.info/index.html>

Ein weiterer Einflussfaktor für die Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien ist das Klima. Generell sind die Mittel in trockenen Regionen wirksamer, gefolgt von tropischen und kontinentalen Klimazonen. Der Hauptgrund dafür ist eine geringere Bodenfruchtbarkeit mit einem niedrigen Gehalt an organischer Substanz, N und P, die typischerweise in trockenen Regionen zu beobachten ist. **Geringe Bodenfruchtbarkeit bedeutet auch eine geringere Dichte und Aktivität der heimischen Bodenmikroben, wodurch die Anwendung mikrobieller Mittel wirksamer wird.** Darüber hinaus sind Pflanzen, die in trockenen Klimazonen wachsen mehr Stressfaktoren wie Hitze, Trockenheit und Salzgehalt ausgesetzt. Mikroben können eine Reihe von Molekülen wie Pflanzenhormone, Enzyme und sekundäre Pflanzenstoffe produzieren, die dazu beitragen, den Stress für Pflanzen zu verringern und so ihre Erträge zu stabilisieren.

Wirksamkeit in gemäßigten Klimazonen

In Zusammenarbeit mit zwanzig europäischen Partnern beendete das FiBL kürzlich das FP7-Projekt BIOFECTOR³. Ziel des Projektes war es, den Mineraldüngereinsatz in der europäischen Landwirtschaft durch den Einsatz von auf dem Markt erhältlichen und neu entwickelten mikrobiellen Biostimulanzien zu reduzieren. In rund 150 Versuchen mit mehr als 1100 Versuchsvarianten wurde untersucht, welche mikrobiellen Biostimulanzien am besten geeignet sind, um den Anbau von Mais, Weizen und Tomaten zu verbessern, und was die entscheidenden Faktoren für einen erfolgreichen Einsatz der Mittel sind.

Das Projekt beinhaltete auch eine vergleichende Studie, in der alle Topf- und Feldversuche analysiert wurden. Sie ergab, dass Kultur- und Anbausystem sowie Düngemitteltyp die wichtigsten Kriterien für die Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien sind. Die Studie hat gezeigt, dass Tomaten, die in Gewächshaus- oder Freilandkulturen mit vorhergehender Gewächshausanzucht angebaut wurden, mit Wachstumssteigerungen von bis zu 27% am besten auf die Behandlung mit mikrobiellen Biostimulanzien reagierten, gefolgt von Mais mit 6%. Beim Weizen konnte keine Wachstumssteigerung nachgewiesen werden (Abbildung 1).

Die Studie ergab ferner, dass mikrobielle Biostimulanzien das Pflanzenwachstum insbesondere bei niedrigem Gehalt an organischer Substanz und P im Boden steigerten, was die zuvor dargestellten Erkenntnisse bestätigt. Darüber hinaus zeigte sich, dass auch die Art des P-Düngers die Wirksamkeit

der eingesetzten mikrobiellen Biostimulanzien beeinflusst (Abbildung 2). Mikrobielle Biostimulanzien in Kombination mit Hofdünger zeigten die beste Wirksamkeit, gefolgt von der Kombination mit Asche, löslichem P, Kompost und Rohphosphat. Am FiBL wurden fünf Topfversuche mit Böden von zwei Standorten und sechs Feldversuche an zwei Standorten mit Mais als Testkultur durchgeführt.

Unter Schweizer Biobedingungen konnte durch keine der getesteten mikrobiellen Biostimulanzien das Wachstum von Mais signifikant gesteigert werden. Insbesondere im Freiland wurden keine eindeutigen Ergebnisse beobachtet. Alle Versuche wurden auf biologisch bewirtschafteten Böden mit hohem Anteil an organischer Substanz durchgeführt, was die Ursache für die fehlende Wachstumsreaktion sein könnte.



Verschiedene Rezepturen mikrobieller Biostimulanzien: flüssige, gefriergetrocknete Pulver und Rezepturen auf Trägerbasis.

Rezepturen für mikrobielle Biostimulanzien

Die ersten grundlegenden Schritte zur Entwicklung eines neuen mikrobiellen Mittels sind die Laborisierung und das Screening von wachstumsfördernden Merkmalen^[1]. Daran schließen sich In-vitro-, Gewächshaus- und Feldversuche an einer Reihe von Nutzpflanzenkulturen an, um die mikrobielle Wirksamkeit und Dauerhaftigkeit im Boden zu bewerten^[57]. Diese Schritte sind notwendig, weil selbst im Labor erzielte interessante Ergebnisse nicht immer zu einer Förderung des Pflanzenwachstums unter Feldbedingungen führen.

Schließlich müssen die Mikroben vermehrt und eine Produktrezeptur entwickelt werden, die verschiedene Anforderungen gerecht wird: eine hohe Konzentration an vitalen mikrobiellen Zellen und eine Haltbarkeit von mindestens sechs Monaten. Hierfür ist die Wahl einer geeigneten Ausbringungsform von großer Bedeutung. Entscheidend ist der Erhalt der Vitalität der Mikroben von der Herstellung bis zur Anwendung der Mittel^[1].

Feste Rezepturen

Die in festen (oder trägerbasierten) Rezepturen verwendeten Trägerstoffe können aus organischen, anorganischen oder kostengünstigen synthetischen Materialien bestehen und sind leicht zu verarbeiten und zu sterilisieren. Sie bieten den Bodenmikroben im Boden kurzfristig ein schützende Nische, sowohl durch physischen Schutz als auch durch die Bereitstellung spezifischer Nährstoffe^[58,59].

Tabelle 1: Vor- und Nachteile der verschiedenen Rezepturen mikrobieller Biostimulanzien

		Vorteile	Nachteile
Feste mikrobielle Biostimulanzien	Trägerbasierte mikrobielle Biostimulanzien	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Kosten • Einfache Produktion • Geringere Investitionen 	<ul style="list-style-type: none"> • Geringe Lagerfähigkeit • Temperaturempfindlichkeit • Anfälligkeit für Verschmutzung • Niedrige Zellzahlen
	Gefriergetrocknete Pulver	<ul style="list-style-type: none"> • Längere Haltbarkeitsdauer • Hohe Zellzahlen • Sterile Produkte 	<ul style="list-style-type: none"> • Sehr hohe Kosten • Höhere Investitionen für die Produktionseinheit
Flüssige mikrobielle Biostimulanzien		<ul style="list-style-type: none"> • Längere Haltbarkeitsdauer • Temperaturtoleranz • Hohe Zellzahlen • Hohe Wirksamkeit • Sterile Produkte 	<ul style="list-style-type: none"> • Hohe Kosten • Höhere Investitionen für die Produktionseinheit

Tabelle 2: Probleme im Zusammenhang mit der Herstellung und Verwendung mikrobieller Biostimulanzien und mögliche Lösungen

Problem	Lösung
Einführung von invasiven Mikroben ^[64]	Auswahl geeigneter und konkurrenzfähiger Stämme für bestimmte Klimaregionen, Kulturpflanzen und Böden ^[22]
Ineffiziente Produkte ^[22]	
Produkte von geringer Qualität (Mangel an lebensfähigen Zellen) ^[64]	Umfangreiche Qualitätssicherung und Forschung durch die Hersteller
Mutationen von mikrobiellen Zellen während der Vermehrung in Fermentern ^[22]	
Hohe Investitionskosten ^[65]	Forschung auf dem Gebiet der alternativen Wachstumsmedien wie industrielle Nebenprodukte ^[66]
Unzureichendes Verständnis der Bedeutung von Mikroben für Prozesse im Boden	Sensibilisierung der Landwirtinnen und Landwirte über die Vorteile mikrobieller Biostimulanzien durch verstärkte Kommunikation über Fachzeitschriften

Es gibt zwei Arten von festen Rezepturen: Torf und auf Granulat basierende Formulierungen. Torf ist ein inhomogenes und komplexes Material, welches einen unregelmässigen Einfluss auf das Wachstum und Überleben von Mikrobenzellen während der Vermehrung hat^[60]. Bei der Sterilisation von Torf können toxische Verbindungen freigesetzt werden, welche Wachstum und Überlebensfähigkeit der Mikroorganismen reduzieren und so die mikrobielle Effizienz weiter einschränken^[58,61].

Rezepturen mit Granulaten bestehen aus Torfmull, Calcit, Vermiculit oder Siliziumdioxid. Die Granulatkörner werden mit den gewünschten Mikrobenstämmen beschichtet oder imprägniert^[1]. Die Ausbringungsverfahren für feste mikrobielle Biostimulanzien sind einfach und gut kontrollierbar. Das Granulat kann in der Nähe der Samen platziert werden, um die Interaktion der Mikroben mit der Rhizosphäre zu gewährleisten^[58]. Allerdings gibt es einige allgemeine Nachteile bei der Verwendung von Granulaten. So verursacht ihr großes Volumen hohe Kosten für Transport und Lagerung. Die Konzentrationen der Mikroben nehmen in festen Rezepturen schnell ab, aufgrund des Fehlens von Nährstoffen oder Stoffen, welche die

mikrobiellen Zellen schützen. Folglich muss die Ausbringungsrate erhöht werden, um die gewünschten Ergebnisse zu erzielen^[1].

Eine besondere und stabilere Art fester Rezepturen sind gefriergetrocknete Pulver. Sie werden durch die direkte Gefrier Trocknung der Mikroben zusammen mit Substanz wie reiner Glukose oder Milchpulver, die den Schutz der Mikrobenzellen vor Gefrierschäden gewähren, produziert^[62].

Flüssige Rezepturen

Neben den mikrobiellen Zellen können flüssige Rezepturen auch Nährstoffe, spezielle Zellschutzmittel oder chemische Substanzen, welche die Bildung von Sporen oder Zysten fördern, enthalten. Diese Zusatzstoffe erhöhen die Haltbarkeit der Produkte und die Stresstoleranz der Mikroben^[63].

Die Verwendung von Flüssigrezepturen ist ein Lösungsansatz für viele Probleme, die mit festen Rezepturen verbunden sind. Sie haben eine längere Haltbarkeit von bis zu zwei Jahren im Vergleich zu sechs Monaten bei festen Rezepturen und sie sind toleranter gegenüber hohen Temperaturen von bis zu 55 °C (Tabelle 1). Flüssigrezepturen weisen auch höhere Populationsdichten von bis zu 10⁹ koloniebildenden Einheiten (KBE) pro ml⁻¹ auf, statt nur 10⁸ KBE pro g⁻¹ wie bei festen Rezepturen. Außerdem lassen sie sich leichter über Bewässerungssysteme ausbringen.

Risiken und Beschränkungen bei mikrobiellen Biostimulanzien

In den vorangegangenen Abschnitten wurden die Grenzen in der Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien beschrieben, die von Umweltfaktoren und Konkurrenz mit anderen Bodenmikroorganismen beeinflusst wird. Daneben können eine unsachgemäße Handhabung, Transport und Lagerung zu einem geringeren Erfolg nach dem Einsatz mikrobieller Biostimulanzien führen. Weitere Probleme im Zusammenhang mit der Herstellung und Verwendung mikrobieller Biostimulanzien und mögliche Lösungen dazu sind in Tabelle 2 zusammengefasst.



Kleegras in der Fruchtfolge

Alternativen: Förderung der einheimischen Bodenmikroben

Eine langfristig wirksame Alternative zum Einsatz mikrobieller Biostimulanzien ist die Vermehrung der einheimischen mikrobiellen Bodenpopulation, um die Bodenbildung zu verbessern und damit das Pflanzenwachstum und deren Leistungsfähigkeit zu fördern. Untersuchungen am FiBL haben gezeigt, dass eine Reihe von Bewirtschaftungsmethoden, wie sie im Biolandbau üblich sind, die natürlichen Mikroorganismen im Boden fördern. Dazu gehört die Fruchtfolge, die reduzierte Bodenbearbeitung, die Integration von Leguminosen und Zwischenfrüchten in die Fruchtfolge und der Einsatz von organischen Düngern wie Kompost. Einige dieser Praktiken lassen sich leicht in bestehende Anbausysteme integrieren, um die Grösse und Aktivität

der mikrobiellen Gemeinschaften zu erhöhen^[66]. Mehrere am FiBL durchgeführte Studien haben die positiven Auswirkungen von Kompost auf die Bodengesundheit und die Bodenfruchtbarkeit aufgezeigt, die unter anderem auf die im Kompost lebenden Mikroorganismen zurückzuführen sind^[67,68]. Bei anderen populären Praktiken wie die Verwendung von Komposttees gibt es bisher nur wenige wissenschaftliche Belege für einen Effekt auf Pflanzen und Böden. In einer in Deutschland durchgeführten Studie wurde festgestellt, dass Komposttee die Widerstandsfähigkeit von Mais gegen Trockenheit erhöht^[69]. Es sind jedoch noch weitere Studien erforderlich, um die positive Wirkung zu bestätigen.

Anwendungen im ökologischen Landbau

Mikroorganismen werden traditionell im ökologischen Landbau eingesetzt, gegen ihre Verwendung gibt es keine Vorbehalte. Im europäischen ökologischen Landbau ist die Verwendung von Mikroorganismen durch Art. 3(4) der Verordnung (EG) Nr. 889/2008 zugelassen, aber nicht ausdrücklich in Anhang I der Verordnung erwähnt. Zum Zeitpunkt der Erstellung dieses Artikels ist eine neue Verordnung in Vorbereitung, aber die Autorinnen und Autoren erwarten keine Änderungen in Bezug auf den Einsatz mikrobieller Biostimulanzien. Die Verwendung ist unter Einhaltung der folgenden Kriterien möglich:

- Mikroben dürfen nicht gentechnisch verändert sein.
- Die Produkte müssen den Vorschriften zur biologischen Sicherheit entsprechen, das heißt die Anwendung der Mikroorganismen muss den Produktempfehlungen entsprechen und sie müssen für Mensch, Umwelt, Pflanzen und Tiere unschädlich sein.
- Besondere Vorsicht ist bei Stämmen geboten, die aus Übersee eingeführt werden. Um diese Anforderungen zu erfüllen, muss die Identität (Art und Stamm) der Mikroorganismen im Produkt bekannt sein.

Biolandwirtinnen und Biolandwirte müssen die genannten Kriterien prüfen, bevor sie mikrobielle Biostimulanzien einsetzen. Im Zweifelsfall sollten sie sich an ihre Zertifizierungsstelle wenden. In Ländern, in denen es eine nationale Liste für zugelassene Einsatzstoffe gibt, enthält diese eine Anleitung für zulässige mikrobielle Biostimulanzien.

In der EU fördert die «Gemeinsame Agrarpolitik» die Verwendung mikrobieller Biostimulanzien zusammen mit dem ökologischen Landbau. Die EU stuft den Einsatz mikrobieller Biostimulanzien als nachhaltige landwirtschaftliche Praktik ein und

stellt insgesamt bis zu 30 % ihres Landwirtschaftsbudgets als Förderzahlungen für solche nachhaltigen Praktiken bereit (Stand 2022). Aufgrund der günstigen gesetzlichen Rahmenbedingungen wie beispielsweise in Nordamerika und Europa, ist zu erwarten, dass der Markt für mikrobielle Biostimulanzien in den kommenden Jahren weiter expandieren wird. In jedem Fall muss die Auswahl der Produkte mit den europäischen und nationalen Rechtsvorschriften für den ökologischen Landbau sowie mit den Vorschriften für Düngemittel und für die biologische Sicherheit in Einklang stehen.

Wie sieht die Zukunft aus?

In mehreren Studien wurde das Potenzial mikrobieller Biostimulanzien zur Steigerung von Ertrag und Qualität verschiedener Kulturpflanzen erfolgreich nachgewiesen. Allerdings machen die Marktpreise für Nutzpflanzen mit einem geringen Ertragswert den Einsatz mikrobieller Biostimulanzien in der Regel unrentabel.

Da die Wirksamkeit mikrobieller Biostimulanzien sowohl von Pflanzen- als auch von Umweltfaktoren abhängig ist, sollten die Produkte sorgfältig ausgewählt und entsprechend der Herstellerangaben angewendet werden. Mikrobielle Biostimulanzien sind ein wertvolles Werkzeug für eine nachhaltige Landwirtschaft in trockenen Regionen, in denen die Nutzpflanzenproduktion durch abiotischen Stress und geringe Bodenfruchtbarkeit beeinträchtigt ist. In Anbetracht der Tatsache, dass die trockenen Regionen der Welt in Zukunft voraussichtlich zunehmen werden, könnten mikrobielle Biostimulanzien an Bedeutung gewinnen. Darüber hinaus können mikrobielle Biostimulanzien den Einsatz chemischer Düngemittel (teilweise) ersetzen und so die mit der Bodenverschmutzung und der menschlichen Gesundheit verbundenen Risiken verringern. Es ist immer empfehlenswert ein Produkt vor einer breiten Anwendung auf einer kleinen Fläche zu testen, um die wirksamsten Mittel zu identifizieren und wirtschaftliche Verluste zu vermeiden.

Das «Rhizosphären-Engineering» gewinnt in der Landwirtschaft zunehmend an Bedeutung, da die Branche beginnt, die Bedeutung der Mikroben



Die Ausbringung von Kompost hat einen positiven Effekt auf die einheimischen Bodenmikroorganismen.

für widerstandsfähige landwirtschaftliche Systeme zu erkennen. Bei diesem Ansatz werden die Zugabe effizienter mikrobieller Mittel und der Einsatz ausgewählter Anbaupraktiken und Pflanzensorten kombiniert, um die funktionellen und nützlichen Mikroorganismen in der Rhizosphäre wirksam zu stimulieren und so die Bodenfruchtbarkeit zu erhöhen^[32,14]. Derzeit und in den kommenden Jahren konzentriert sich die Forschung auf diese Aspekte und weitere Ergebnisse mit dem Ziel, die wirksamsten Anbaumethoden zu identifizieren.

Referenzen

- [1] R. Backer et al. «Plant Growth-Promoting Rhizobacteria: Context, Mechanisms of Action, and Roadmap to Commercialization of Bio-stimulants for Sustainable Agriculture». *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1473, 2018, doi: doi.org/10.3389/fpls.2018.01473.
- [2] G. J. Desbrosses und J. Stougaard. «Root Nodulation: A Paradigm for How Plant-Microbe Symbiosis Influences Host Developmental Pathways». *Cell Host Microbe*, vol. 10, no. 4, pp. 348–358, 2011, doi: 10.1016/j.chom.2011.09.005.
- [3] E. T. Alori und O. O. Babalola. «Microbial Inoculants for Improving Crop Quality and Human Health in Africa». *Front. Microbiol.*, vol. 9, p. 2213, 2018, doi: 10.3389/fmicb.2018.02213.
- [4] D. Trabelsi und R. Mhamdi. «Microbial Inoculants and Their Impact on Soil Microbial Communities: A Review». *Biomed Res. Int.*, vol. 2013, p. 863240, 2013, doi: 10.1155/2013/863240.
- [5] Peoples M.B., Herridge D.F. und Ladha J.K. «Biological nitrogen fixation: an efficient source of nitrogen for sustainable agricultural production?» *Plant Soil* 174: 3–28,1995.
- [6] M. B. Peoples und E. T. Craswell. «Biological nitrogen fixation: Investments, expectations and actual contributions to agriculture». *Plant Soil*, vol. 141, no. 1, pp. 13–39, 1992, doi: 10.1007/BF00011308.
- [7] A. D. Inawali, R. B. Ojha und S. Marahatta. «Role of Azotobacter in soil fertility and sustainability – A Review». *Adv. Plants Agric. Res.*, vol. 2, no. 6, pp. 1–5, 2015.
- [8] S. Viscardi et al. «Assessment of plant growth promoting activities and abiotic stress tolerance of Azotobacter chroococcum strains for a potential use in sustainable agriculture». *J. soil Sci. plant Nutr.*, vol. 16, no. 3, pp. 848–863, 2016.
- [9] A. Van Dommelen und J. Vanderleyden. «Chapter 12 - Associative Nitrogen Fixation». H. Bothe, S. J. Ferguson, and W. E. B. T.-B. of the N. C. Newton, Eds. Amsterdam: Elsevier, 2007, pp. 179–192.
- [10] P. Poole, V. Ramachandran und J. Terpolilli. «Rhizobia: from saprophytes to endosymbionts». *Nat. Rev. Microbiol.*, vol. 16, no. 5, pp. 291–303, 2018, doi: 10.1038/nrmicro.2017.171.
- [11] E. E. Chaia, L. G. Wall und K. Huss-Danell. «Life in soil by the actinorhizal root nodule endophyte Frankia. A review». *Symbiosis*, vol. 51, no. 3, pp. 201–226, 2010.
- [12] D. C. Roy, M. C. Pakhira und S. Bera. «A review on biology, cultivation and utilization of Azolla». *Adv. Life Sci.*, vol. 5, no. 1, pp. 11–15, 2016.
- [13] B. D. Kaushik. «Developments in cyanobacterial biofertilizer». In *Proceedings of the Indian National Science Academy*, 2014, vol. 80, no. 2, pp. 379–388, doi: 10.16943/ptinsa/2014/v80i2/55115.
- [14] Smil V. «Phosphorous in the environment: natural Flows and Human Interferences». *Annu Rev Energy Env.* 2000;25(1):53–88.
- [15] Khan MS, Zaidi A, Wani PA, et al.. «Role of phosphate solubilizing microorganisms in sustainable agriculture». In *Sustainable Agriculture*. Edited by: Lictfouse E. springer; 2009:552. DOI: 10.1007/978-90-481-2666-8_34
- [16] S. M. Kumar, G. C. Reddy, M. Phogat und S. Korav. «Role of bio-fertilizers towards sustainable agricultural development: a review». *J. Pharmacogn. Phytochem.*, vol. 7, no. 6, pp. 1915–1921, 2018.
- [17] Zörb C., Senbayram M., Peiter E., 2014. «Potassium in agriculture – status and perspectives». *J. Plant Physiol.* 171, 656–669
- [18] Sattar, A., Naveed, M., Ali, M., Zahir, Z. A., Nadeem, S. M., Yaseen, M., ... Meena, H. N. (2018). «Perspectives of potassium solubilizing microbes in sustainable food production system: A review». *Applied Soil Ecology*. doi:10.1016/j.apsoil.2018.09.012
- [19] V. S. Meena et al.. «Potassium solubilizing rhizobacteria (KSR): Isolation, identification, and K-release dynamics from waste mica». *Ecol. Eng.*, vol. 81, pp. 340–347, 2015, doi: 10.1016/j.ecoleng.2015.04.065.
- [20] M. Saha, B. R. Maurya, V. S. Meena, I. Bahadur, and A. Kumar. «Identification and characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from Indo-Gangetic Plains of India». *Biocatal. Agric. Biotechnol.*, vol. 7, pp. 202–209, 2016, doi: 10.1016/j.bcab.2016.06.007.
- [21] K. Prajapati und H. A. Modi. «Growth promoting effect of potassium solubilizing Enterobacter hormaechei (KSB-8) on cucumber (Cucumis sativus) under hydroponic conditions». *Int. J. Adv. Res. Biol. Sci.*, vol. 3, no. 5, pp. 168–173, 2016.
- [22] S. Sheraz Mahdi et al.. «Bio-fertilizers in Organic Agriculture». *J. Phytol.*, vol. 2, no. 10, Dec. 2010.
- [23] Parniske, M. «Arbuscular mycorrhiza: the mother of plant root endosymbioses». *Nat. Rev. Microbiol.* 6, 763–775, 2008.doi: 10.1038/nrmicro.1987
- [24] A. Berruti, E. Lumini, R. Balestrini, and V. Bianciotto. «Arbuscular Mycorrhizal Fungi as Natural Biofertilizers: Let's Benefit from Past Successes». *Frontiers in Microbiology*, vol. 6, p. 1559, 2016, doi: 10.3389/fmicb.2015.01559.
- [25] N. S. Bolan. «A critical review on the role of mycorrhizal fungi in the uptake of phosphorus by plants». *Plant Soil*, vol. 134, no. 2, pp. 189–207, 1991, doi: 10.1007/BF00012037.
- [26] I. C. Anderson und J. W. G. Cairney. «Ectomycorrhizal fungi: exploring the mycelial frontier». *FEMS Microbiol. Rev.*, vol. 31, no. 4, pp. 388–406, Jul. 2007, doi: 10.1111/j.1574-6976.2007.00073.x.
- [27] S. Perotto, M. Giralanda, and E. Martino. «Ericoid mycorrhizal fungi: some new perspectives on old acquaintances». *Plant Soil*, vol. 244, no. 1, pp. 41–53, 2002, doi: 10.1023/A:1020289401610.
- [28] K. Sathiyadash, T. Muthukumar, E. Uma, and R. R. Pandey. «Mycorrhizal association and morphology in orchids». *J. Plant Interact.*, vol. 7, no. 3, pp. 238–247, Sep. 2012, doi: 10.1080/17429145.2012.699105.
- [29] M. K. McCormick, D. Lee Taylor, K. Juhaszova, R. K. Burnett JR, D. F. Whigham, and J. P. O'Neill. «Limitations on orchid recruitment: not a simple picture». *Mol. Ecol.*, vol. 21, no. 6, pp. 1511–1523, Mar. 2012, doi: 10.1111/j.1365-294X.2012.05468.x.
- [30] S. L. Woo und O. Pepe. «Microbial Consortia: Promising Probiotics as Plant Biostimulants for Sustainable Agriculture». *Frontiers in Plant Science*, vol. 9, p. 1801, 2018.
- [31] K. Brenner, L. You, and F. H. Arnold. «Engineering microbial consortia: a new frontier in synthetic biology». *Trends Biotechnol.*, vol. 26, no. 9, pp. 483–489, Sep. 2008, doi: 10.1016/j.tibtech.2008.05.004.
- [32] K. Bradáčová, A. S. Florea, A. Bar-Tal, D. Minz, U. Yermiyahu, R. Shawahna, K. Dietel. «Microbial consortia versus single-strain inoculants: an advantage in PGPM-assisted tomato production?» *Agronomy*, 9(2), 105, 2019.
- [33] M. Schenck zu Schweinsberg-Mickan, and T.Müller. «Impact of effective microorganisms and other biofertilizers on soil microbial characteristics, organic-matter decomposition, and plant growth.» *Z. Pflanzenernähr. Bodenk.*, 172: 704-712, 2009, doi:10.1002/jpln.200800021
- [34] J. Mayer, S. Scheid, F. Widmer, A. Fließbach, H-R. Oberholzer «How effective are 'Effective microorganisms® (EM)'?». Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology*, 46 (2): 230–239, 2010, https://doi.org/10.1016/j.apsoil.2010.08.007.
- [35] A. F.C. Golec, P. González Pérez und L Chinmay «Effective microorganisms: myth or reality?». *Revista Peruana de Biología* 14.2 315–319,2007.
- [36] G. Colla und Y. Rouphael. «Preface». in *Biostimolanti per un'agricoltura sostenibile. Cosa sono, come agiscono e modalità di utilizzo*, 2019.
- [37] I. Ortas. «Field trials on mycorrhizal inoculation in the eastern mediterranean horticultural region». In *Mycorrhiza works: Proceedings of the International Symposium Mycorrhiza for Plant Vitality and the Joint Meeting for Working Groups 1–4 of COST Action 870*, Hannover, Deutschland, 3-5 Oktober, 2007, 2008, pp. 56–77.
- [38] D. V Pathak, M. Kumar und K. Rani. «Biofertilizer Application in Horticultural Crops». In *BT – Microorganisms for Green Revolution: Volume 1: Microbes for Sustainable Crop Production*, D. G. Panpatte, Y. K. Jhala, R. V Vyas, and H. N. Shelat, Eds. Singapore: Springer Singapore, 2017, pp. 215–227.
- [39] S. D. Sharma, P. Kumar, S. K. Bhardwaj und S. K. Yadav. «Screening and selecting novel AM fungi and Azotobacter strain for inoculating apple under soil solarization and chemical disinfection with mulch practices for sustainable nursery management». *Sci. Hortic. (Amsterdam)*, vol. 130, no. 1, pp. 164–174, 2011, doi: 10.1016/j.scienta.2011.06.032.

- [40] S. Symanczik, M. Gisler, C. Thonar, K. Schlaeppli, M. Van der Heijden, A. Kahmen, P. Mäder. «Application of Mycorrhiza and Soil from a Permaculture System Improved Phosphorus Acquisition in Naranjilla». *Frontiers in Plant Science*, 8(1263), 2017, doi:10.3389/fpls.2017.01263
- [41] S. El Kinany, E. Achbani, M. Faggroud, L. Ouahmane, R. El Hilali, A. Haggoud und R. Bouamri. «Effect of organic fertilizer and commercial arbuscular mycorrhizal fungi on the growth of micropropagated date palm cv. Feggouss». *Journal of the Saudi Society of Agricultural Sciences*, 18(4), 411–417, 2019.
- [42] M. Anli, S. Symanczik, A. El Abbassi, M. Ait-El-Mokhtar, A. Boutasknit, R. Ben-Laouane, A. Meddich, A.. «Use of arbuscular mycorrhizal fungus *Rhizoglyphus irregularis* and compost to improve growth and physiological responses of Phoenix dactylifera 'Boufgouss'». *Plant Biosystems – An International Journal Dealing with all Aspects of Plant Biology*, 2020, 1–9. doi:10.1080/11263504.2020.1779848
- [43] M. A. Wani, I. T. Nazki, A. Din, S. Iqbal, S. A. Wani und F. U. Khan. «Floriculture sustainability initiative: The dawn of new era». In *Sustainable Agriculture Reviews 27*, Springer, 2018, pp. 91–127.
- [44] K. Mukesh, S. K. Sharma, S. Sultan, D. S. Dahiya, S. Mohammed, und V. P. Singh. «Effect of farm yard manure and different biofertilizers on yield and nutrients content of marigold cv. Pusa Narangi». *Haryana J. Hortic. Sci.*, vol. 35, no. 3/4, pp. 256–257, 2006.
- [45] F. U. Khan, M. A. A. Siddique, F. A. Khan und I. T. Nazki. «Effect of biofertilizers on growth, flower quality and bulb yield in tulip (*Tulipa gesneriana*)». *Indian J. Agric. Sci.*, vol. 79, no. 4, pp. 248–251, 2009.
- [46] I. Weissenhorn und C. R. Külling. «Real case applications of commercial mycorrhiza products in the Netherlands: 'Prove us that mycorrhiza works and we will use it'». In *Mycorrhiza works: Proceedings of the International Symposium Mycorrhiza for Plant Vitality and the Joint Meeting for Working Groups 1–4 of COST Action 870*, Hannover, Deutschland, 3-5 Oktober, 2007/08, p. 17.
- [47] S. Zimmer, M. Messmer, T. Haase, H.-P., Piepho, A. Mindermann, H. Schulz, J. Heß. «Effects of soybean variety and Bradyrhizobium strains on yield, protein content and biological nitrogen fixation under cool growing conditions in Germany.» *European Journal of Agronomy*, 72, 38-46, 2016.
- [48] K. Mohammadi und Y. Sohrabi. «Bacterial biofertilizers for sustainable crop production: a review». *Asian Res. Publ. Netw.*, vol. 7, no. 5, pp. 307–316, 2012.
- [49] S. P. Wani. «Inoculation with associative nitrogen-fixing bacteria: Role in cereal grain production improvement». *Indian J. Microbiol.*, vol. 30, no. 4, pp. 363–393, 1990.
- [50] A. A. Belimov, A. P. Kojemiakov und C. nV Chuvarliyeva. «Interaction between barley and mixed cultures of nitrogen fixing and phosphate-solubilizing bacteria». *Plant Soil*, vol. 173, no. 1, pp. 29–37, 1995.
- [51] N. Mathimaran, J. Sekar, T.M.Nanjundegowda, P. V. Ramalingam, Y. Perisamy, K.Raju, K., . . . S. Ayappa. «Intercropping transplanted pigeon pea with finger millet: Arbuscular mycorrhizal fungi and plant growth promoting rhizobacteria boost yield while reducing fertilizer input». *Frontiers in Sustainable Food Systems*, 4, 88, 2020.
- [52] P. Mäder, F. Kaiser, A. Adholeya, R.Singh, H.S. Uppal, A. K. Sharma, . . . P. M. Fried. «Inoculation of root microorganisms for sustainable wheat-rice and wheat-black gram rotations in India.» *Soil Biology and Biochemistry*, 43(3), 609-619, 2011, doi:http://dx.doi.org/10.1016/j.soilbio.2010.11.031
- [53] K. Turnau und K. Haselwandter. «Arbuscular mycorrhizal fungi, an essential component of soil microflora in ecosystem restoration.» *Mycorrhizal technology in agriculture* (pp. 137–149): Springer, 2002.
- [54] P. Jeffries, A., Craven-Griffiths, J.M., Barea, Y. Levy und J.C. Dodd. «Application of arbuscular mycorrhizal fungi in the revegetation of desertified Mediterranean ecosystems.» *Mycorrhizal technology in agriculture* (pp. 151–174): Springer, 2002
- [55] F. Wang. «Occurrence of arbuscular mycorrhizal fungi in mining-impacted sites and their contribution to ecological restoration: Mechanisms and applications.» *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*, 47(20), 1901–1957, 2017.
- [56] L. Schütz et al.. «Improving Crop Yield and Nutrient Use Efficiency via Biofertilization – A Global Meta-analysis». *Frontiers in Plant Science*, vol. 8. p. 2204, 2018, doi: doi.org/10.3389/fpls.2017.02204.
- [57] I. Romano, V. Ventrino und O. Pepe. «Effectiveness of Plant Beneficial Microbes: Overview of the Methodological Approaches for the Assessment of Root Colonization and Persistence». *Frontiers in Plant Science*, vol. 11. p. 6, 2020, doi: 10.3389/fpls.2020.00006.
- [58] Y. Bashan, L. E. de-Bashan, S. R. Prabhu und J.-P. Hernandez. «Advances in plant growth-promoting bacterial inoculant technology: formulations and practical perspectives (1998–2013)». *Plant Soil*, vol. 378, no. 1, pp. 1–33, 2014, doi: 10.1007/s11104-013-1956-x.
- [59] N. K. Arora, E. Khare und D. K. Maheshwari. «Plant Growth Promoting Rhizobacteria: Constraints in Bioformulation, Commercialization, and Future Strategies». In *Plant Growth and Health Promoting Bacteria*, D. K. Maheshwari, Ed. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2010, pp. 97–116.
- [60] E. Malusá, L. Sas-Paszt und J. Ciesielska. «Technologies for Beneficial Microorganisms Inocula Used as Biofertilizers». *Sci. World J.*, vol. 2012, p. 491206, 2012, doi: 10.1100/2012/491206.
- [61] T. Mahanty et al.. «Biofertilizers: a potential approach for sustainable agriculture developments». *Environ. Sci. Pollut. Res.*, vol. 24, pp. 3315–3335, 2017, doi: 10.1007/s11356-016-8104-0.
- [62] C. A. Morgan, N. Herman, P. A. White und G. Vesey. «Preservation of micro-organisms by drying: A review». *J. Microbiol. Methods*, vol. 66, no. 2, pp. 183–193, 2006, doi: 10.1016/j.mimet.2006.02.017.
- [63] Hegde, S.V. «Liquid bio-fertilizers in Indian agriculture». *Biofertilizer newsletter*, pp.17-22, 2008.
- [64] L. Corkidi et al.. «Assessing the infectivity of commercial mycorrhizal inoculants in plant nursery conditions». *J. Environ. Hortic.*, vol. 22, no. 3, pp. 149–154, Sep. 2004, doi: 10.24266/0738-2898-22.3.149.
- [65] L. Xu und G. Danny. «Developing biostimulants from agro-food and industrial by-products.» *Front. Plant Sci.*, vol. 9, p. 1567, 2018, doi: 10.3389/fpls.2018.01567.
- [66] M. Lori, S. Symanczik, P. Mäder, G. De Deyn, and A. Gatterger. «Organic farming enhances soil microbial abundance and activity – A meta-analysis and meta-regression». *PLoS One*, vol. 12, no. 7, p. e0180442, Jul. 2017.
- [67] J.G. Fuchs. «Composting process management and compost benefits for soil fertility and plants.» *Acta Horticulturae*. 1164., 195–202, 2017.
- [68] T. Oberhaensli, V. Hofer, L. Tamm, J.G Fuchs, M. Koller, J. Herforth-Rahmé, M. Maurhofer, B. Thuerig. «Aeromonas media in compost amendments contributes to suppression of *Pythium ultimum* in cress.» *Acta Horticulturae*. 1164., 353-360, 2017.
- [69] N. Moradtalab, F. Freytag, S. Wanke, G. Neumann. *Proceedings of the 18th International Plant Nutrition Colloquium 2017*, Kopenhagen, Dänemark. 175–176, 2017.

Impressum

Herausgeber: Forschungsinstitut für biologischen Landbau FiBL
Ackerstrasse 113, Postfach 219, CH-5070 Frick
Tel. 062 865 72 72, Fax -73, info.suisse@fibl.org, www.fibl.org

Autor*innen: Sarah Symanczik (FiBL), Paul Mäder (FiBL), Ida Romano (FiBL, University Neapel Federico II)

Mitarbeit: Bernhard Speiser (FiBL), Günther Neumann (Universität Hohenheim)

Redaktion Englisch: Lauren Dietemann (FiBL)

Redaktion Deutsch: Simona Moosmann (FiBL)

Layout: Brigitta Maurer (FiBL)

Fotos: Sarah Symanczik (FiBL) S.3(3), 4(1,2), 5(1,2) Monika Messmer (FiBL) S.3 (1,2), Jacques Fuchs (FiBL) S.12, Günter Neumann (Universität Hohenheim) S.9, Christine Arnken (FiBL) S.7, Andreas Basler (FiBL) S.5., Ida Romano (FiBL, Universität Neapel Federico II) S.2, Dominika Kundel (FiBL) S.11

FiBL Artikel Nr. 1417 DOI: 10.5281/zenodo.6598586

Das Merkblatt kann von shop.fibl.org kostenlos abgerufen werden.

© FiBL, 2022