



MIKROORGANISMEN IM BODEN SIND WIE MEDIZIN FÜR DIE NATUR

Lena Neuenkamp¹ Nadia I. Maaroufi^{1,2}

¹Institut für Pflanzenwissenschaften, Universität Bern, Bern, Schweiz

²Lehrstuhl für Forstwirtschaft und Pflanzenpathologie, BioCenter, Schwedische Universität für Agrarwissenschaften (SLU), Uppsala, Schweden,

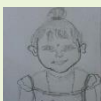
YOUNG REVIEWERS:



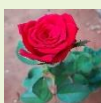
JOVENA
AGE: 9



KAVIN
AGE: 9



TANISHKAA
AGE: 8



THUVISHA
AGE: 13



VETRIVEL
AGE: 12



YUTHIGA
AGE: 8

Pflanzen und Tiere haben wie wir Menschen eine Art von Natur, ein sogenanntes Ökosystem, in der sie am liebsten leben. Wird das Ökosystem zu sehr verändert, verschwinden einige Arten - wie Menschen, die das Leben in der Wüste meiden, weil es dort zu heiß und zu trocken ist. Viele Ökosysteme werden vom Menschen verändert, manchmal so stark, dass kaum noch Pflanzen oder Tiere dort leben können. Menschen müssen dann helfen, das Ökosystem wiederherzustellen, und sie beginnen oft damit, Bäume oder andere Pflanzen zu pflanzen. Biologen haben nach einem Weg gesucht, um Ökosystemen zu helfen, sich zu erholen, so wie Ärzte nach einer guten Medizin suchen, um eine Erkältung zu heilen. Sie fanden heraus, dass Mykorrhiza, winzige Pilze, die im Boden und in den Wurzeln von Pflanzen leben, die Erholung von Ökosystemen beschleunigen können, indem Pflanzen schneller und stärker wieder wachsen. Wir zeigen, wie wir Mykorrhizapilze zur

MYKORRHIZAPILZ

Eine Gruppe von Pilzen, die im Boden und in den Wurzeln von Pflanzen leben. Mykorrhizapilze helfen den Pflanzen bei der Aufnahme von Nährstoffen und bei der Widerstandsfähigkeit gegen Trockenheit oder Krankheitserreger als Gegenleistung für die Zucker, die die Pflanzen mit Hilfe des Sonnenlichts in ihren Blättern produzieren. Daher werden sie im Text als Pilz-Nützlige bezeichnet. Pflanzen und Pilze profitieren voneinander, und ihre Freundschaft wird von Biologen als Symbiose und Mykorrhiza bezeichnet, im Gegensatz zu pathogenen Pilzen, die Pflanzen schädigen können.

ÖKOSYSTEM

Ein Lebensraum, der von verschiedenen Organismen besiedelt ist, die zusammenleben und miteinander in Wechselwirkung stehen.

Wiederherstellung von Ökosystemen einsetzen können und wann **Mykorrhizapilze** besonders nützlich sind.

GESCHÄDIGTE ÖKOSYSTEME - BRAUCHEN SIE HILFE?

Natürliche **Ökosysteme** - wie Wälder, Wiesen oder Sümpfe - erfüllen viele Funktionen, wie z.B. Lebensraum für einheimische Pflanzen, Tiere und Mikroorganismen im Boden. Darüber hinaus wird in Ökosystemen Wasser gefiltert und zurückgehalten, Kohlenstoff aus der Atmosphäre gebunden oder eine gesunde Bodenschicht erhalten, in der Pflanzen wachsen und Nahrung für uns Menschen (z. B. Obst oder Gemüse) produzieren können. Ökosysteme erfüllen diese Funktionen, wenn sie gesund und intakt sind, aber manchmal werden Ökosysteme gestört und funktionieren nicht mehr richtig - wie Menschen, die krank werden. Solche Störungen umfassen Brände, Überschwemmungen oder umgestürzte Bäume nach Stürmen. Glücklicherweise können sich gesunde Ökosysteme in der Regel leicht von solchen Störungen erholen. Nur wenn diese Störungen häufig und über einen längeren Zeitraum auftreten oder wenn sie sehr intensiv sind, können sich die Ökosysteme nur schwer erholen und können sich verändern, z.B. kann ein Wald nach einem sehr starken Sturm, der alle Bäume umgeweht hat, zu einer Wiese werden. Oder als ein weiteres Beispiel können die Pflanzen nach einer langen Dürreperiode, wenn das Wasser zum Überleben der Pflanzen fehlt, Schwierigkeiten haben, zurückzukommen, selbst wenn das Wasser nicht mehr fehlt. Wenn sich Ökosysteme nach Störungen verändert haben, weniger komplex sind und weniger Arten in ihnen leben, sprechen wir von degradierten Ökosystemen. Der Mensch nutzt Ökosysteme, um Raum für Städte zu schaffen, um auf Äckern Nahrung zu produzieren oder um in ihnen Steine, Sand oder Metall abzubauen, um Häuser zu bauen oder um Werkzeuge wie Handys herzustellen. Oftmals stört der Mensch dadurch die Ökosysteme über lange Zeiträume so stark, dass sie in eine Situation geraten, aus der sie sich nicht mehr selbst erholen können. Um die Wiederherstellung von Ökosystemen nach Störungen zu unterstützen, stellen Ökologen geschädigte Ökosysteme wieder her und helfen dem Ökosystem, wieder gesund zu werden und zu funktionieren.

WIEDERHERSTELLUNG VON ÖKOSYSTEMEN ODER WIE MAN EINEM GESCHÄDIGTEN ÖKOSYSTEM HILFT

Wenn Ökologen Ökosysteme wiederherstellen, pflanzen sie Bäume, um die Regeneration von Wäldern zu unterstützen, nachdem Bäume für die Holzproduktion gefällt wurden, oder sie säen Samen, um die Regeneration von Grasland zu unterstützen, nachdem das Grünland als Ackerland genutzt wurde. Manchmal wachsen die Pflanzen jedoch nicht gut, oder das Ökosystem sieht nach der Wiederherstellung anders aus als vor der Störung. Warum funktioniert die Wiederherstellung manchmal nicht gut? In den letzten Jahren haben Ökologen erkannt, dass für eine erfolgreiche Wiederherstellung von Ökosystemen sowohl die Pflanzen und Tiere an der Oberfläche als auch die Organismen im Boden berücksichtigt werden müssen.

KLEINLEBEWESEN IM BODEN: WER SIND SIE UND WARUM SIND SIE SO WICHTIG?

Weil Pflanzen sich nicht bewegen können, sind sie darauf angewiesen, mit ihren Wurzeln nach Nährstoffen und Wasser im Boden zu suchen. Der Boden ist auch Teil des Ökosystems und Lebensraum für verschiedene Kleinlebewesen wie Mikroorganismen, die mit den Pflanzenwurzeln interagieren, um Wasser und Nährstoffe aufzunehmen [1]. Ein Teelöffel Boden wird von mehr Organismen bewohnt als es Menschen auf der Erde gibt (d.h. mehr als 6 Billionen) [2] (Abb. 1a). All diese kleinen Kreaturen interagieren miteinander und unterstützen das Funktionieren des Ökosystems. Daher könnten sie helfen Ökosysteme wieder herzustellen. Die häufigsten **Bodenmikroorganismen** sind Bakterien und Pilze. Einige von ihnen, die Zersetzer, fressen die abgestorbenen Pflanzen und helfen bei der Zersetzung, bis die abgestorbenen Pflanzen wieder zu Erde werden [3]. Einige sind Krankheitserreger, z.B. pathogene Pilze, die Pflanzenwurzeln angreifen und Pflanzen krank machen können. Andere Bodenorganismen, die Symbionten, arbeiten mit den Pflanzen zusammen und tauschen Nährstoffe aus. Eine Gruppe von symbiotischen Bodenorganismen sind die Mykorrhizapilze, und Forscher haben herausgefunden, dass diese Pilze bei der Wiederherstellung von Ökosystemen helfen könnten [4, 5] (Abbildung 1b)

BODEN-MIKROORGANISMEN

Kleine Organismen wie Bakterien und Pilze, die im Boden leben.
 Bodenzpilze: Gruppe von im Boden lebenden Organismen, die für Pflanzen nützlich sein können, z. B. Mykorrhizapilze, oder schädlich, z. B. Pilzerreger. Beispiele für Bodenzpilze sind Pilze,

Abbildung 1

Die Kleinlebewesen im Boden

(A) Mikroskopische Aufnahmen von Bakterien, Pilzen, Milben, Fadenwürmern und Springschwänzen. Nematoden sind kleine Fadenwürmer, Milben sehen ein bisschen aus wie Minispinnen und Springschwänze sind kleine Insekten, die manchmal springen können. Fotocredits: Mehdi Maaroufi, Nadia I. Maaroufi und Arne Fjellberg.
 (B) Bilder von verschiedenen Arten von Mykorrhizapilzen und ihren Wirtspflanzen. (a) Eine Orchidee und Hyphen eines orchideenartigen Mykorrhizapilzes im Inneren der Pflanzenwurzel; (b) Ein Kraut und Hyphen eines arbuskulären Mykorrhizapilzes im Inneren der Pflanzenwurzel; (c) Eine Heidepflanze und Hyphen eines ericoiden Mykorrhizapilzes im Inneren der Pflanzenwurzel; und (d) Eine Kiefer und Hyphen eines Ectomycorrhizapilzes auf der Oberfläche der Pflanzenwurzel. Fotocredits: Lena Neuenkamp, Petr Kohout, Jane Oja, Javi Puy

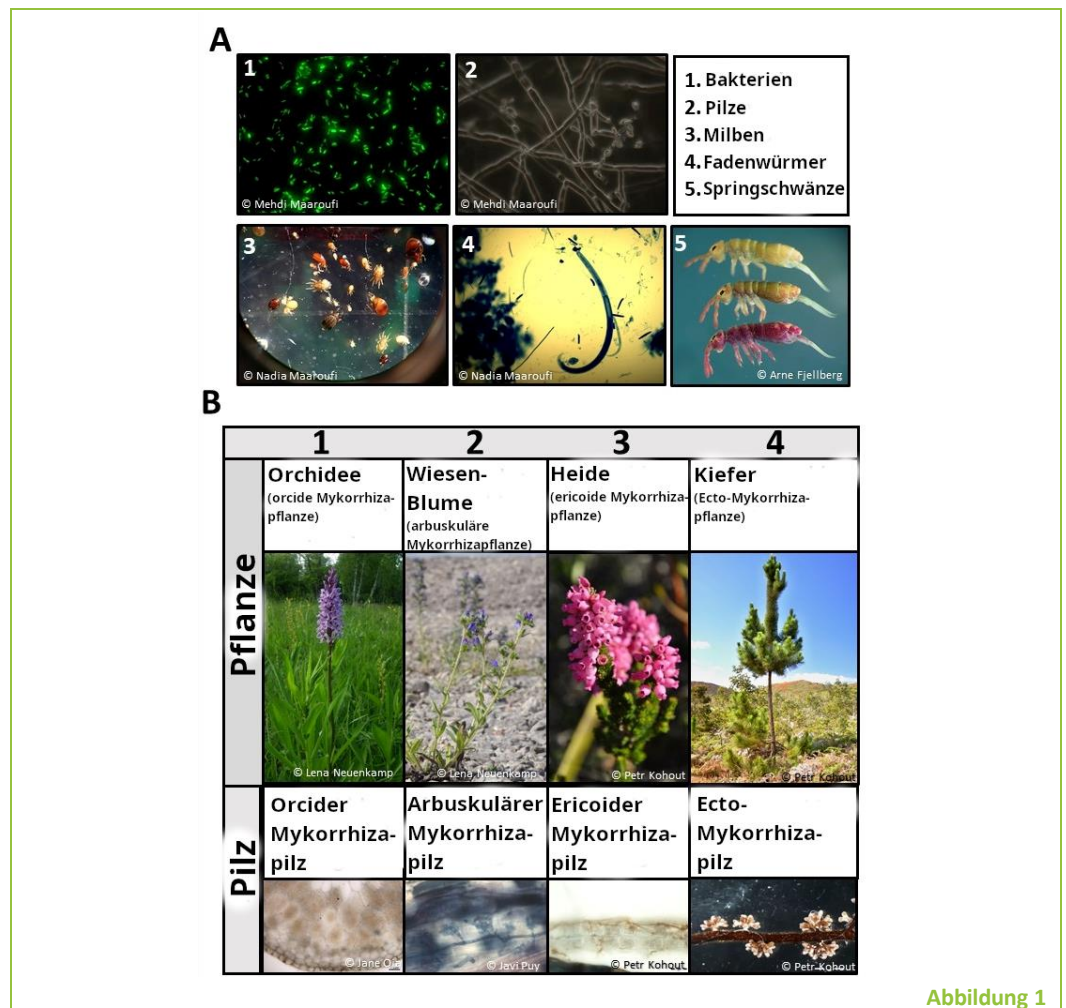


Abbildung 1

MYKORRHIZAPILZE SIND DIE HELDEN DER REGENERATION UND WIE EINE MEDIZIN FÜR PFLANZEN: WER SIND SIE UND WARUM SIND SIE SO MÄCHTIG?

Mykorrhizapilze können Pflanzenwurzeln helfen, mehr Nährstoffe und Wasser aus dem Boden aufzunehmen und dadurch besser zu wachsen. Nennen wir sie von nun an Pilz-Nützlingle. Außerdem können diese Pilz-Nützlingle die Pflanzen vor Krankheitserregern schützen! Im Gegenzug für die Unterstützung durch die Pilz-Nützlingle geben die Pflanzen einen Teil ihres Kohlenstoffs ab - einen Nährstoff, den sie mit Hilfe des Sonnenlichts bei der Photosynthese produzieren. So ist die Partnerschaft zwischen Pflanzen und Pilzen eine Win-Win-Situation für beide Partner und wird als Symbiose bezeichnet. Inspiriert von diesen Effekten haben Ökologen die Wirkung von Pilz-Nützlingle bei der Wiederherstellung von Ökosystemen getestet (Abbildung 2). Eine Zusammenfassung aller Studien, in denen die Wirkung von **Pilzinokulation** (d.h. Zugabe von Helferbakterien zum Boden) bei der Wiederherstellung von Ökosystemen getestet wurde, zeigte, dass Baumsetzlinge und Gras besser wuchsen, wenn dem Boden Helferbakterien zugesetzt wurden [4]. Außerdem wurde in der Zusammenfassung gezeigt, dass Wiesen, die durch Zugabe von Pilz-Nützlingle wiederhergestellt wurden, reicher an Pflanzenarten waren.

PILZINOKULATION

Beimpfung des Bodens durch Zugabe von Bodenorganismen (z.B. Mykorrhizapilze oder Bakterien) zum Boden für ein wissenschaftliches Experiment oder landwirtschaftlich zur Verbesserung des Pflanzenwachstums.

Abbildung 2

Mykorrhizapilze - Kleinstlebewesen als Medizin für die Wiederherstellung von Ökosystemen.

Beispiele für Ergebnisse von Projekten zur Wiederherstellung von Ökosystemen mit Hilfe von Mykorrhizapilzen: (a) Wiederherstellung von Heideflächen in den Niederlanden mit dem Ziel der Wiederherstellung von Heideflächen auf einem ehemaligen Ackerland mit Hilfe von Heidepflanzen und ericoiden Mykorrhizapilzen; (b) Wiederherstellung eines Steinbruchs in Estland mit dem Ziel der Beschleunigung der Wiederbegrünung eines stillgelegten Steinbruchs mit Hilfe von Wiesensaatgut, Heu und arbuskulären Mykorrhizapilzen. Fotocredits: Jasper Wubs, Tanel Vahter

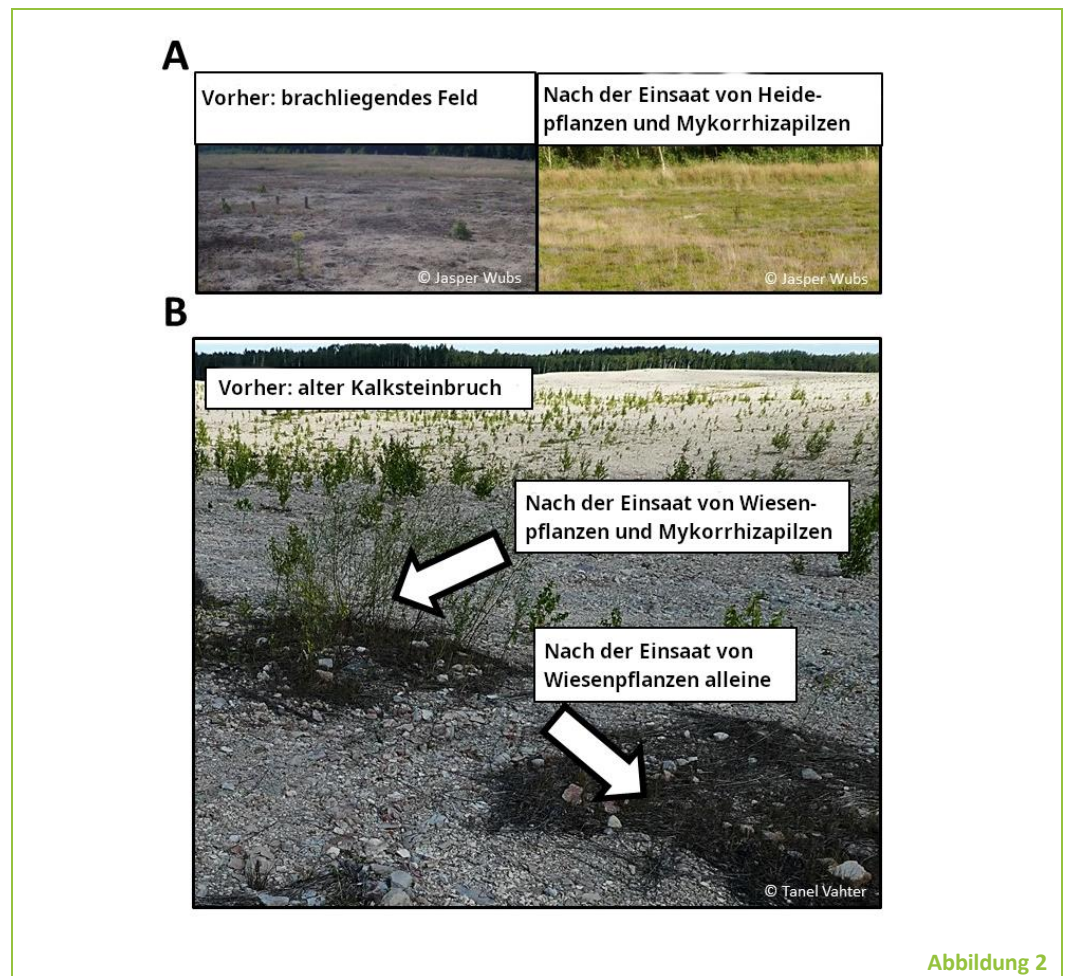


Abbildung 2

PILZ-NÜTZLINGE SIND TOLL - SIND SIE DIE LÖSUNG FÜR ALLE PROBLEME? - NUN, DAS KOMMT DARAUF AN...

Es gibt verschiedene Arten von Pilz-Nützlich-Pflanzen-Partnerschaften. Je nachdem, welche Pilzarten in einem bestimmten Ökosystem am häufigsten vorkommen, gehen Pflanzen und Pilz-Nützlichlinge verschiedene Arten von Symbiosen ein (Abbildung 1b). Darüber hinaus unterscheiden sich Pflanzen und Pilz-Nützlichlinge darin, wann und wie viel sie einander brauchen und wie fair sie Ressourcen und Nutzen miteinander austauschen. Die Wiederherstellung von Ökosystemen, in denen die Pflanzen stark auf Pilz-Nützlichlinge angewiesen sind, kann daher mehr auf die Mycorrhiza angewiesen sein als Ökosysteme, in denen die Pflanzen unabhängiger von Nützlichlingen sind [5]. Bei einer genaueren Betrachtung aller Renaturierungsexperimente mit Pilz-Nützlichlingen stellten die Forscher fest, dass der Nutzen der Zugabe von Nutzpilzen von Studie zu Studie variierte [4]. Somit sind Pilz-Nützlichlinge eine gute Medizin für Pflanzen, aber wann sie am wirksamsten sind, hängt von den Pflanzen und dem Ökosystem ab. Die Forscher [4] kamen zu dem Schluss, dass die Zugabe von Pilz-Nützlichlingen unter den folgenden Bedingungen am wirksamsten ist:

- für sehr hungrige Pflanzen, die Bakterien in ihren Wurzeln beherbergen, wodurch die Pflanzen mehr Nährstoffe aufnehmen können aber auch hungrig für zwei werden - sich selbst und die Bakterien (z.B. Erbsen- oder Bohnenpflanzen)
- für Pflanzen, die Schwierigkeiten haben, Nährstoffe zu finden, weil ihre Wurzeln zu groß sind, um die kleinen Poren im Boden zu erreichen, in denen viele Nährstoffe gespeichert sind (z.B. einige Gräser)
- für Pflanzen, die auf stark gestörten oder nährstoffarmen Böden wachsen (Böden mit einer doppelten Herausforderung für die Pflanzen: 1) die Störung hat die Vegetationsdecke und mit ihr alle Bodenorganismen entfernt und 2) die Böden sind nährstoffarm).

WILLST DU DEINEN TOPFPFLANZEN HELFEN? ES IST GAR NICHT SO SCHWER, EIN EIGENES INOKULUM ZU MACHEN:

Die meisten Pflanzen - auch deine Topfpflanze - bilden eine Symbiose mit nur einer Art von Pilz-Nützlichling, dem arbuskulären Mykorrhizapilz (AM), - etwa 80% aller Pflanzen. Kannst du dir das vorstellen? Daher erklären wir dir, wie du dein eigenes AM-Pilz Inokulum herstellen kannst (Abbildung 3). Ein Inokulum kannst du dir als einen Impfstoff für den Boden vorstellen. Vielen Gärtnern geht es ähnlich! Der AM Pilz kann aus Sporen, Hyphenfragmenten in Pflanzenwurzeln und Hyphenfragmenten im Boden wachsen. Natürliche Inokula enthalten daher in der Regel Pflanzenwurzeln einer AM-Symbiose bildenden Pflanze und die **Rhizosphäre** - den Boden in der Nähe der Wurzeln. Man braucht: eine Schaufel, einen Eimer (10l) zum Mischen der Erde, 3-5l Sand, Samen von zwei Köderpflanzenarten z.B. Gras und Klee, 4-6 Blumentöpfe.

RHIZOSPHÄRE:

Der Boden in der Nähe der Pflanzenwurzeln, also die Pflanze-Boden-Grenzfläche. Der erste Teil des Wortes "rhizo" stammt vom griechischen Wort "rhiza" und bedeutet Wurzel.

Die Schritte:

- 1) **Auswahl der Wirtspflanze:** Wähle eine oder zwei Köderpflanzen aus deinem Garten, die eine AM-Symbiose bilden (vielleicht ein Gras und einen Klee) und grabe sie zusammen mit einer guten Portion Erde um die Wurzeln aus.
- 2) **Ausgangsinokulum:** Von beiden Pflanzen Blätter und Stängel entfernen, die Wurzeln zerkleinern und mit der Erde gut vermischen. Dies ist das Ausgangsinokulum, das wir vermehren wollen, um nicht zu viele Gartenpflanzen für die Herstellung des Inokulums ausgraben zu müssen.
- 3) **Vermehrung des Inokulums:** Das Ausgangsinokulum wird mit Sand (im Verhältnis 1:1 oder 1:2) vermischt und in die Blumentöpfe gefüllt. Gras- und Kleesamen in die Töpfe geben, gießen und zwei bis vier Monate wachsen lassen. Die gesäten Arten werden als Köderpflanzen bezeichnet, da sie den AM-Pilz anziehen. Wenn die Köderpflanzen anfangen zu wachsen, wird der AM-Pilz die Wurzeln besiedeln und die Pilzpopulation wird wachsen. Je länger sie wachsen, desto mehr Pilze sind im Boden.
- 4) **Ernte des Inokulums:** Nach zwei bis vier Monaten alle Blätter von den Köderpflanzen entfernen, die Wurzeln in kleine Stücke schneiden und mit dem Boden vermischen. Das Inokulum ist gebrauchsfertig und kann direkt in die Töpfe gegeben oder mit Wasser vermischt werden.

Abbildung 3

Mykorrhiza-Inokulum zum Selbermachen.

Illustration der wichtigsten Schritte bei der Herstellung eines eigenen Mykorrhiza-Inokulums. Schritte basierend auf der hier gegebenen Anleitung (auf Englisch):

<https://orgprints.org/35308/1/symanczik-et-al-2018-Mycorrhizal-fungi-as-natural-biofertilizer-technical-note.pdf>

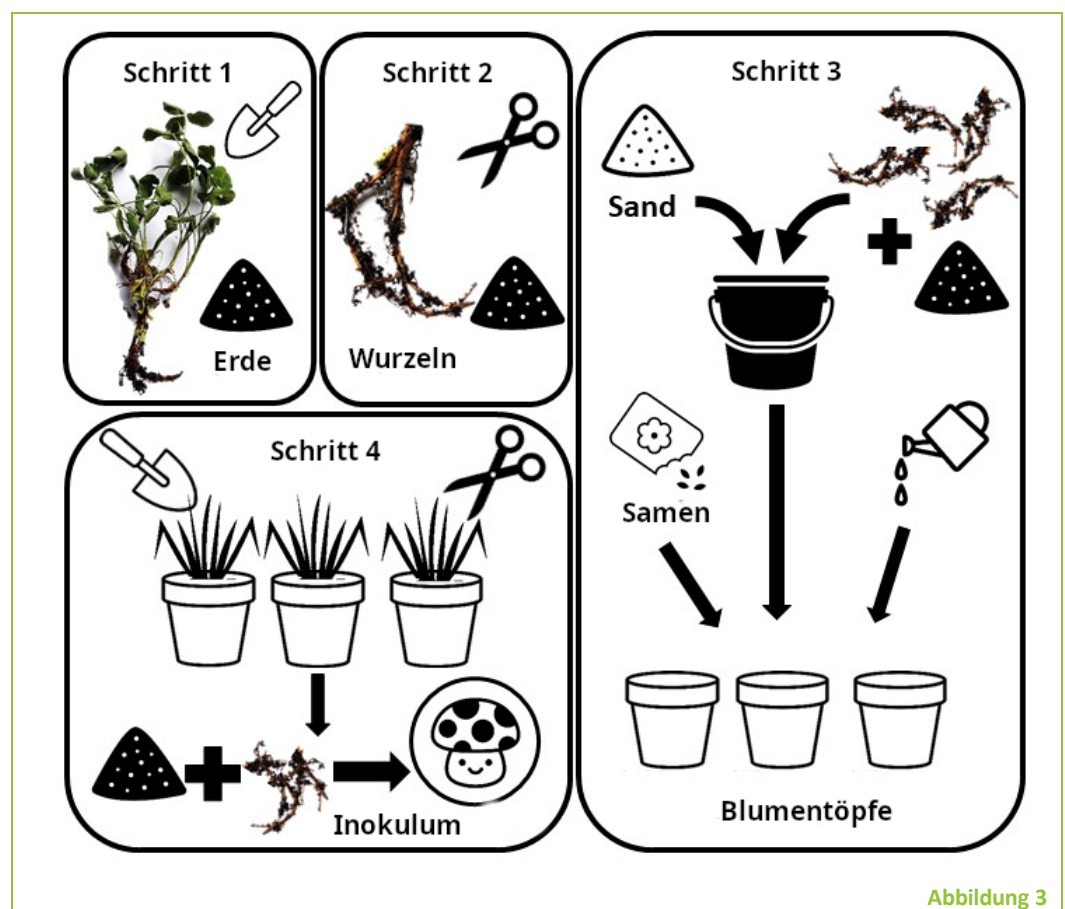


Abbildung 3

BEITRÄGE DER AUTOREN

LN und NM hatten die ursprüngliche Idee. LN und NM verfassten die erste Version des Artikels, arbeiteten an der verbesserten Version und stimmten der Publikation seiner finalen Version zu.

GRUNDLAGENARTIKEL

Neuenkamp L, Prober SM, Price JN, Zobel M, Standish RJ. 2019. Benefits of mycorrhizal inoculation to ecological restoration depend on plant functional type, restoration context and time. *Fungal Ecology* 40: 140-149. doi.org/10.1016/j.funeco.2018.05.004

Neuenkamp L, Moora M, Öpik M, Davison J., Gerz M, Männistö M, Jairus T, Vasar M, Zobel M. 2018. The role of mycorrhizal type and status in modulating the relationship between plant and arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytologist* 220: 1236-1247. doi.org/10.1111/nph.14995

DANKSAGUNGEN

Die Autorin LN wurde durch das DFG-Schwerpunktprogramm 1374 'Infrastruktur-Biodiversitäts-Exploratorien' und NM durch ein Forschungsstipendium des Schwedischen Forschungsrates (FORMAS 2018-00748) gefördert.

QUELLENVERZEICHNIS

1. Maaroufi, N. I., and De Long, J. R. 2020. Global change impacts on forest soils: linkage between soil biota and carbon-nitrogen-phosphorus stoichiometry. *Front. For. Glob. Change* 3:16. doi: 10.3389/fgc.2020.00016
2. Available online at: <http://www.soil-net.com/> (accessed November 06, 2020).
3. Maaroufi, N. I., Nordin, A., Palmqvist, K., Hasselquist, N. J., Forsmark, B., Rosentstock, N. P., et al. 2019. Anthropogenic nitrogen enrichment enhances soil carbon accumulation by impacting saprotrophs rather than ectomycorrhizal fungal activity. *Glob. Change Biol.* 25:2900–14. doi: 10.1111/gcb.14722
4. Neuenkamp, L., Prober, S. M., Price, J. N., Zobel, M., and Standish, R. J. 2019. Benefits of mycorrhizal inoculation to ecological restoration depend on plant functional type, restoration context and time. *Fungal Ecol.* 40:140–9. doi: 10.1016/j.funeco.2018.05.004
5. Neuenkamp, L., Moora, M., Öpik, M., Davison, J., Gerz, M., Männistö, M., et al. 2018. The role of mycorrhizal type and status in modulating the relationship between plant and arbuscular mycorrhizal fungal communities. *New Phytol.* 220:1236–47. doi: 10.1111/nph.14995

CONFLICT OF INTERESTS: The authors declare that the research was conducted in the absence of any commercial or financial relationships that could be construed as a potential conflict of interest.

COPYRIGHT © 2020 Neuenkamp and Maaroufi. This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License (CC BY). The use, distribution or reproduction in other forums is permitted, provided the original author(s) and the copyright owner(s) are credited and that the original publication in this journal is cited, in accordance with accepted academic practice. No use, distribution or reproduction is permitted which does not comply with these terms.

YOUNG REVIEWERS

JOVENA, AGE: 9

I like reading a lot. I usually read magical books like Harry Potter books. They are my favorite series to read. I also like to read mystery books. I love animals. I like playing Roblox. I enjoy playing with my friends. I like skate boarding and roller-skating. My dream is to 1 day be a pro skateboarder. Hasta Luego Baby!

KAVIN, AGE: 9

Science is important and interesting.

TANISHKAA, AGE: 8

I have been interested in learning science since my childhood. I would like to explore every part of science. My favorite part of science is learning about the human body. I like science very much because it is very very interesting. I want science to be a part of my whole life.

THUVISHA, AGE: 13

I like Science because it is something new and makes us discover a lot of things that are related to our daily life. It is always interesting. We need science in our world.

VETRIVEL, AGE: 12

I like to make paper airplanes and do simple experiments. I like to learn about scientists. I like to do many experiments and am exploring more and more ideas.

YUTHIGA, AGE: 8

I am interested in painting and playing chess. I won third prize and got trophy at district level chess tournament. My favorite subjects are English, Science, and Mathematics. I spend my holidays exploring new things.



AUTORINNEN



LENA NEUENKAMP

Ich bin eine Pflanzenökologin, die mit dem Studium des Bodens begann, weil ich auf diese Weise Pflanzen besser verstehen konnte. Nun, und dann wurde ich fasziniert von den Mykorrhizapilzen und wie sie mit den Pflanzenwurzeln interagieren. Ich bin wissenschaftlicher Mitarbeiter an der Universität Bern in der Schweiz. Mich interessiert es zu verstehen wie menschliche Eingriffe in die Umwelt und der Klimawandel Pflanzen- und Bodengemeinschaften beeinflussen, sowie die Interaktionen zwischen ihnen. Schließlich, würde ich diese Erkenntnisse nutzen um Vorhersagen treffen zu können wie gut ein Ökosystem funktionieren kann auch unter Beeinträchtigung durch menschliche Eingriffe und den Klimawandel.

*lena.neuenkamp@ips.unibe.ch*lena.neuenkamp@ips.unibe.ch



NADIA I. MAAROUFI

Ich bin Bodenökologin und interessiere mich für die Kleinlebewesen im Boden. Ich arbeite an der Universität Bern in der Schweiz und an der Schwedischen Universität für Agrarwissenschaften, Uppsala in Schweden. Mich interessiert es besonders zu verstehen wie Bodenlebewesen durch menschliche und natürliche Eingriffe beeinflusst werden und wie diese Eingriffe das Funktionieren von Wäldern und Grünland verändert.

TRANSLATOR

LENA NEUENKAMP

FUNDING (TRANSLATION)

The team Translating Soil Biodiversity acknowledges support of the German Centre for integrative Biodiversity Research (iDiv) Halle-Jena-Leipzig funded by the German Research Foundation (DFG FZT 118, 202548816).