

# Wundersames Wurzelwerk

Wurzeln sind viel mehr als blosse Pflanzenstützen. Um möglichst viele Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen zu können, formen sie ihr eigenes kleines Ökosystem, in dem sie mit Bakterien, Pilzen oder Fadenwürmern zusammenspannen. Eine kleine Einführung in die wunderbare Welt der Rhizosphäre.

Text: Simon Koechlin, Illustrationen: Helene Uhl

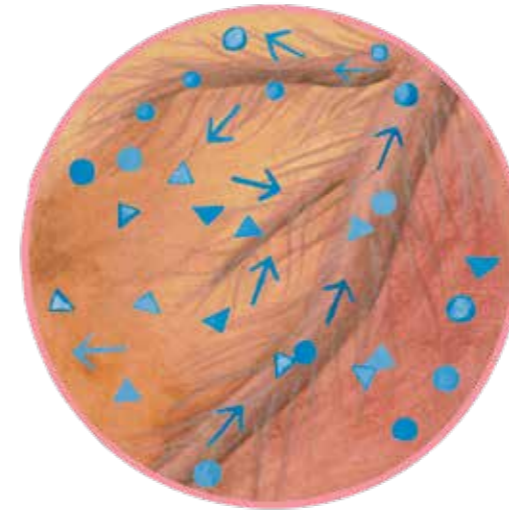
Im Boden, versteckt vor den Augen der Gärtnerin und des Gärtners, existiert eine Wunderwelt: die Rhizosphäre. Manche Expertinnen und Experten bezeichnen diesen Raum an und um die Pflanzenwurzeln gar als eines der komplexesten Ökosysteme der Welt. Hier interagiert die Pflanze mit Heerscharen von anderen Lebewesen – Bakterien, Pilzen, Fadenwürmern, Springschwänzen oder Insektenraupen.

Dreh- und Angelpunkt dieser unterirdischen Welt ist die Wurzel. Auf der Suche nach Nährstoffen und Wasser strecken Pflanzenwürzelchen ihre Spitzen aus. Myriaden von Bakterien und Pilzen scharen sich um sie und profitieren von dem, was die Pflanzenwurzel freisetzt: Zuckerstoffe, totes Material und Gleitmittel, dank denen sie besser durch das Erdwerk wächst. Man schätzt, dass es in einem Gramm Rhizosphären-Boden bis zu einer Billion lebende Zellen gibt – die meisten davon sind einzellige Organismen. Im Wurzelraum einer einzigen Pflanze leben Tausende bis Zehntausende Bakterienarten und Hunderte bis Tausende Pilzarten.

Was genau diese winzigen Organismen dort tun, ist bis heute ungenügend erforscht. Es gibt Mikroben, die miteinander um Nährstoffe konkurrieren und einander bekämpfen. Und es gibt solche, die Allianzen eingehen mit ihresgleichen – oder mit den Pflanzen. Geprägt und gesteuert werden die Abläufe durch die Wurzelausscheidungen der Pflanzen. Mit ihnen beeinflusst die Pflanze die Bodenmikroben: Sie lockt beispielsweise nützliche Mikroorganismen an, die ihr dabei helfen, die Nährstoffe im Boden verfügbar zu machen. Bakterien, Pilze und Pflanzen tauschen in komplexen Schicksalsgemeinschaften Nährstoffe miteinander aus.

Pflanzen gestalten also das Bodenökosystem so, dass es ihren eigenen Bedürfnissen dient – und dienen gleichzeitig der Bodengesundheit: Ihre abgestorbenen Wurzeln und die ausgeschiedenen Stoffe tragen zur organischen Substanz bei, was die Bodenstruktur und die Bodenfruchtbarkeit verbessert.

Die Infografik auf den folgenden Seiten gibt einen Überblick über die Vorgänge, die in der Rhizosphäre ablaufen.



## Mineralstoff- und Wasseraufnahme Trickreiche Prozesse

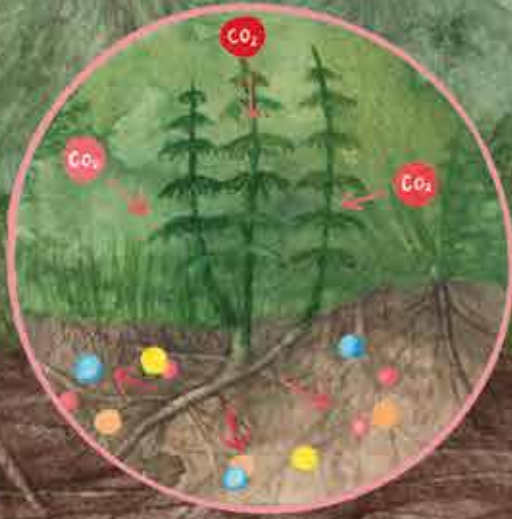
Die Hauptfunktionen der Wurzel sind die Befestigung der Pflanze im Boden sowie die Aufnahme von Wasser und den darin gelösten Mineralstoffen. Die Stoffaufnahme übernehmen die Wurzelhaare und die feinen Seitenwurzeln. Ältere Wurzeln sind verkorkt, sie dienen dem Transport in die oberirdischen Pflanzenteile. Die Mineralstoff-Aufnahme erfolgt durch verschiedene Prozesse: Manche Nähr-Ionen befinden sich, etwa als Nitrat oder Phosphat, teilweise bereits in gelöstem Zustand im Boden – sie kann die Pflanze sofort absorbieren. Andere Ionen sind locker an Ton- oder Humusteilchen gebunden; um sie davon abzulösen, sondert die Wurzel ganz bestimmte Moleküle ab, die einen Ionentausch fördern. Phosphor und Eisen, zwei der wichtigsten Nährstoffe, welche eine Pflanze aus dem Boden aufnehmen muss, sind oft noch stärker gebunden – sie erfordern größeres Geschütz: Pflanzen scheiden Zitronensäure, Apfelsäure und andere Substanzen ab, die den pH-Wert in der Rhizosphäre senken. Dadurch lösen sich diese Nährstoffe aus Mineralen und werden entweder direkt verfügbar oder gehen neue Verbindungen ein, welche die Wurzel aufnehmen kann. Insgesamt können Pflanzen auf sich alleine gestellt nur in begrenztem Mass Nährstoffe aus dem Boden aufnehmen – deshalb haben sie sich im Lauf der Evolution Hilfe von unzähligen Bodenlebewesen geholt.

## Wurzelwachstum Wurzel-Architektur

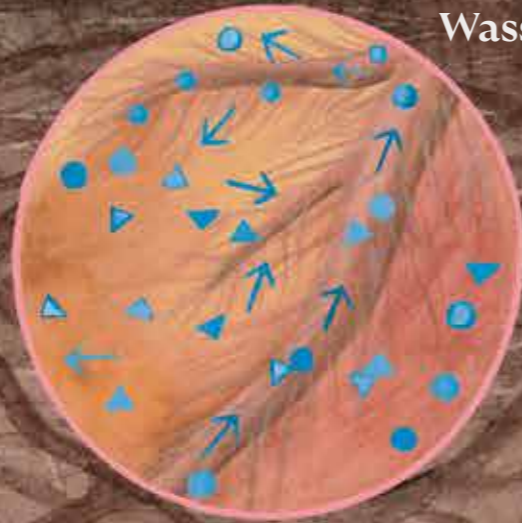
Die Rhizosphäre einer Pflanze hängt davon ab, wie ihr Wurzelsystem aufgebaut ist. Manche Pflanzen gelten als Flachwurzler. Sie sind darauf spezialisiert, Nährstoffe aus den oberen Bodenschichten aufzunehmen. Tiefwurzler hingegen erreichen mit kräftigen Pfahlwurzeln auch tiefe Bodenschichten. Allerdings sind die meisten Pflanzen sehr anpassungsfähig und richten die Architektur ihres Wurzelsystems darauf aus, wo sich die Nährstoffe befinden, die sie benötigen. Pflanzen können wahrnehmen, in welche Richtung die Gravitationskraft wirkt – so wachsen ihre Wurzeln in den Boden hinein. Die Wurzelspitzen nehmen Hindernisse wahr und passen ihre Wachstumsrichtung an, um sie zu umgehen. Wie genau Pflanzen «spüren», wo im Boden sich Nährstoffe befinden und in welche Richtung sie ihr Wurzelwachstum steuern müssen, ist nicht vollständig geklärt. Forschende haben aber herausgefunden, dass Nährstoffe hormonelle Signale auslösen können, die zu einer Zunahme der Wurzeldichte und -länge führen. Und Pflanzen können sogar unterscheiden, ob eine benachbarte Wurzel zu ihr selbst oder zu einer anderen Pflanze gehört. Beim Wachstum üben die Wurzelspitzen einen enormen Druck von mehr als sieben Kilogramm pro Quadratzentimeter aus, um sich durch den Boden zu drücken. Zudem hilft ihnen eine Gleitschicht aus abgestorbenen Zellen und Schleim, den sie an den Wurzelspitzen freisetzen.







Nährstoff-Cocktail



Mineralstoff- und Wasseraufnahme



Knöllchenbakterien



Rhizobakterien

# Rhizosphäre



Mykorrhiza



Wurzelwachstum



Nematoden



### Rhizodeposition

## Nährstoff-Cocktail

Pflanzen geben Unmengen von Stoffen in ihren Wurzelbereich ab. Man schätzt, dass eine Pflanze 20 bis 40 Prozent des Kohlenstoffs, den sie durch Photosynthese überirdisch bindet, über die Wurzeln wieder freigibt. Diese sogenannte Rhizodeposition ist unheimlich vielfältig – wie viele und was für Stoffe Wurzeln freigeben, hängt unter anderem von der Pflanzenart, ihrem Zustand und von den Bodenverhältnissen ab. Ein Mechanismus ist das kontinuierliche Absterben von Wurzelzellen, was den Boden düngt. Daneben sondern Wurzelzellen komplexe Stoffe ab wie einen zähflüssigen Schleim, der als Schmiermittel beim Wurzelwachstum dient und Schutz vor Austrocknung bietet. Andere freigesetzte Verbindungen sind einfacher aufgebaut: Es handelt sich um organische Säuren, Aminosäuren, Proteine oder Zucker. Dieser ganze Cocktail, die sogenannten Exsudate, lockt nützliche Mikroorganismen an und formt so die Zusammensetzung der mikrobiellen Gemeinschaft, die sich in der Rhizosphäre ansiedelt – und die wichtig ist für allfällige Symbiosen zwischen Pflanzen, Mikroorganismen und Pilzen. Es gibt sogar flüchtige, also gasförmige organische Verbindungen, die aus den Wurzeln ins Erdreich diffundieren und als Botenstoffe gegenüber anderen Pflanzen, Tieren oder Mikroben dienen.



### Mykorrhiza

## Pilz-Geflecht

Der wahrscheinlich bekannteste Vorgang im Wurzelraum ist die sogenannte Mykorrhiza. Diese symbiotische Beziehung zu Pilzen gehen die meisten Landpflanzen ein – auch wichtige Kulturpflanzen wie Mais, Weizen oder Kartoffeln. Mykorrhizapilze bilden im Boden ausgedehnte Geflechte aus Pilzfäden, über die sie die Wirtspflanzen mit Nährstoffen versorgen, insbesondere Phosphor. Im Gegenzug erhalten die Pilze Zuckerstoffe und Fettsäuren, welche die Pflanze dank der Photosynthese aufgebaut hat. Es gibt verschiedene Formen der Mykorrhiza. Bei Bäumen legt der Pilz meist einen dichten Mantel aus Fäden um die feinen Wurzelenden, dringt aber nicht in die Wurzelzellen ein. Bei anderen Pflanzen besiedelt der Pilz die Wurzelzellen und bildet dort in der häufigsten Form, der Arbuskulären Mykorrhiza, baumartige Strukturen. Mykorrhizapilze verbessern nicht nur die Nährstoffaufnahme der Pflanze, sondern auch ihre Krankheitsresistenz, indem sie ihr Immunsystem anregen. Zudem machen sie den Boden durchlässiger, reduzieren Treibhausgasemissionen und erhöhen die Trockentoleranz der Pflanze. Sie leisten also einen wichtigen Beitrag zur Bodengesundheit, zur Pflanzenernährung und zur Produktivität.



### Knöllchenbakterien

## Stickstoff-Händler

Ohne Stickstoff kommen Pflanzen nicht aus. Er ist ein zentrales Element für die Blattbildung und für die Photosynthese. In der Luft gibt es zwar mehr als genug Stickstoff, aber die meisten Pflanzen können ihn nur aus dem Boden aufnehmen. Stickstoffverbindungen im Boden hingegen sind eher rar, weshalb viele Pflanzen mit stickstoffhaltiger Düngung, zum Beispiel mittels Gülle oder Kunstdünger, zu einem besseren Wachstum angeregt werden können. Eine Pflanzenfamilie hat allerdings einen Weg gefunden, um ihren Stickstoffbedarf anderweitig zu decken: die Hülsenfrüchtler, zu denen Bohnen, Erbsen, Klee oder Linsen gehören. Diese Pflanzen gehen in ihrem Wurzelbereich eine Symbiose mit ganz bestimmten Bakterien ein: Die sogenannten Rhizobien oder Knöllchenbakterien heften sich aufgrund von chemischen Signalen der Pflanze an deren Wurzelhaare und dringen in sie ein. Das regt die Wurzeln dazu an, eine Art Knöllchen auszubilden – einen geschützten Raum, in dem die Bakterien fortan ihre Arbeit verrichten. Knöllchenbakterien sind in der Lage, Luft-Stickstoff zu Ammoniak und anderen Stickstoffverbindungen zu verarbeiten, die für die Pflanze verwertbar sind. Im Gegenzug erhalten die Bakterien von der Pflanze Zuckerstoffe für ihren Stoffwechsel. Hülsenfrüchtler werden deshalb oft als Zwischenkulturen angebaut und als Gründünger in den Boden eingearbeitet.



### Pflanzenwachstumsfördernde Rhizobakterien

## Heimliche Helfer

Neben den Knöllchenbakterien gibt es im Wurzelraum diverse andere Bakterien, die das Wachstum einer Pflanze verbessern. Diese sogenannten pflanzenwachstumsfördernden Bakterien wirken auf unterschiedlichste Weise: Manche lösen Mineralstoffe wie Phosphor im Boden auf, sodass die Pflanzenwurzel diese aufnehmen kann. Andere scheiden winzige Moleküle aus, die Eisen-Ionen binden und in die Pflanzenzellen transportieren können. Wieder andere produzieren Phytohormone, die das Pflanzenwachstum steuern. Neben solchen direkten Effekten bieten manche Rhizobakterien der Pflanze auch indirekte Unterstützung: Sie setzen beispielsweise Antibiotika frei, die Bakterien abtöten, welche die Pflanzenwurzeln schädigen. Oder sie verdrängen schädliche Mikroorganismen alleine durch ihre Anwesenheit aus dem Wurzelbereich. Angelockt und ernährt werden die Rhizobakterien durch die Stoffe, welche die Pflanzenwurzeln ausscheiden. An bestimmten Wurzelstellen können sich ganze Biofilme bilden, die aus mehreren Schichten von Bakterien bestehen – und manche der pflanzenfördernden Mechanismen kommen erst in Gang, wenn eine solche kritische Dichte der Mikroben erreicht ist.





### Interaktionen mit Nematoden Wurm-Paradies

Im Wurzelraum tummeln sich nicht nur Bakterien und andere Mikroorganismen, sondern auch winzige Tiere wie Fadenwürmer, auch Nematoden genannt. Auch ihre Interaktionen mit den Pflanzenwurzeln sind vielfältig und komplex. Manche Fadenwürmer ernähren sich von Pflanzenwurzeln und schaffen damit auch Eintrittspforten für andere Erreger. Zum Teil tragen sie sogar Mikroben auf sich – sie dienen also als Überträger. Der weitaus grösste Teil der Fadenwürmer lebt aber frei im Boden. Manche dieser Arten ernähren sich von Mikroorganismen; sie helfen beispielsweise mit, pflanzenschädigende Bakterien in Schach zu halten. Manche Nematoden sind zudem Insektenparasiten. Sie infizieren Insekten und Insektenlarven, die sich von Pflanzenwurzeln ernähren. Auch hier übernimmt die Pflanzenwurzel aber oft die Rolle der Dirigentin: Sie begegnet der Gefahr, die ihr durch schädigende Fadenwürmer droht, mit Absonderungen – diese stimulieren beispielsweise Mikroorganismen, die das Pflanzenwachstum fördern und Abwehrstoffe gegen Fadenwürmer bilden. Solche Gegenmassnahmen können laut Studien\* sogar bewirken, dass eine Pflanze bei mässigem Befall von Fadenwürmern besser wächst als ohne Fadenwurmbefall.

### Interview

## «Der Ertrag stieg um bis zu 40 Prozent»

**Vier von fünf Pflanzenarten profitieren von einer Gemeinschaft mit Mykorrhizapilzen im Wurzelraum. Die Rhizosphären-Expertin Stefanie Lutz erklärt, weshalb Gärtnerinnen und Gärtner diese Symbiose nicht zerstören sollten – und was von im Handel angebotenen Mykorrhiza-Impfstoffen zu halten ist.**

Interview: Simon Koechlin

### Stefanie Lutz, welche Gartenpflanzen leben in einer Symbiose mit Mykorrhizapilzen?

Ungefähr 80 Prozent aller Landpflanzen gehen Mykorrhiza-Symbiosen ein, darunter viele Kräuter, Gemüse, Beeren, Obstbäume, aber auch Zierpflanzen. Und die meisten der wichtigen Ackerkulturen: Weizen, Gerste, Roggen, Mais, Kartoffeln, Sonnenblumen, Karotte, Zwiebel, Kürbis. Keine Mykorrhiza bilden Kreuzblütler, also etwa Kohlarten, Raps oder Senf, und Fuchsschwanzgewächse wie Spinat oder Zuckerrübe.

### Was können Gärtnerinnen und Gärtner tun, um diese Symbiosen zu fördern?

Empfehlenswert ist eine schonende Bodenbearbeitung, um das Geflecht der Pilzfäden nicht

zu zerstören und den Nährstofftransport zur Wirtspflanze zu gewährleisten. Zudem sollte man eine Überdüngung, insbesondere mit Mineraldünger, vermeiden. Sind zu viele Nährstoffe wie Phosphor im Boden, sind die Pflanzen nicht mehr auf die Mykorrhizapilze angewiesen.

### Weshalb ist das schlecht?

Die Mykorrhizapilze verkümmern und verschwinden. Dann geht langfristig nichts mehr ohne Dünger. Das kostet Geld und Energie – und die Nährstoffe werden ausgewaschen und reichern sich in Gewässern an. Deshalb sollte man mässig düngen. Der Anbau von Zwischenfrüchten oder Winterbegrünungen hilft, dass Mykorrhizapilze stets Wirtswurzeln für ihre Vermehrung zur Verfügung haben.

### Sie haben kürzlich in einer Studie\*\* gezeigt, dass das Einbringen von Mykorrhizapilzen den landwirtschaftlichen Ertrag erhöhen kann.

Wir verglichen Flächen, auf denen wir Maispflanzen mit einem Mykorrhizapilz beimpften, mit solchen, auf denen wir ein Trägersubstrat ohne Pilz zugaben. Dank der Impfung stieg der Ertrag auf einem Viertel der Felder um bis zu 40 Prozent.

### Wovon hängt der Erfolg ab?

Je geringer die Bodengesundheit, desto mehr Nutzen bringt die Impfung. Wir haben herausgefunden, dass eine Impfung vor allem dann sinnvoll ist, wenn ein Boden wenig organischen Kohlenstoff und viele Krankheitserreger aufweist – oder wenn die natürlichen Mykorrhiza-Gemeinschaften reduziert sind. Auf sehr gesunden Böden hingegen fanden wir kaum Vorteile für eine Impfung.

### Es gibt im Handel verschiedene Produkte, die eine Stärkung von Pflanzen mittels Mykorrhizapilzen oder Mikroorganismen versprechen. Was ist davon zu halten?

Man sollte vorsichtig sein: Viele dieser Produkte enthalten keine lebensfähigen Sporen und führen nicht zu einer verstärkten Wurzelbesiedlung – das haben wir in einer grossen Studie\*\*\* nachgewiesen. Im Moment arbeiten wir daran, unsere aus Schweizer Böden isolierten Mykorrhizapilze praxistauglich zu machen, damit sie grossflächig, effizient und bezahlbar angewendet werden können. Der Pilz aus der Mais-Studie wird bald auf den Markt kommen.

### Zu den Studien

\*Gen Li, Ting Liu, Joann K. Whalen, Zhong Wei: «Nematodes: an overlooked tiny engineer of plant health», Trends in Plant Science, Volume 29, Issue 1, 2024.

\*\*S. Lutz, N. Bodenhausen, J. Hess, et al.: «Soil microbiome indicators can predict crop growth response to large-scale inoculation with arbuscular mycorrhizal fungi.» Nat Microbiol 8, 2277–2289 (2023).

\*\*\*M. J. Salomon, R. Demarmels, S. J. Watts-Williams, M. J. McLaughlin, A. Kafle, C. Ketelsen, A. Soupir, H. Bücking, T. R. Cavagnaro, M. G. A. van der Heijden: «Global evaluation of commercial arbuscular mycorrhizal inoculants under greenhouse and field conditions», Applied Soil Ecology, Volume 169, 2022, 104225, ISSN 0929-1395



**Über die Person:** Stefanie Lutz ist Teamleiterin für Rhizosphären-Ökologie in der Gruppe Pflanzen-Boden-Interaktionen am Forschungsinstitut Agroscope und Wissenschaftliche Mitarbeiterin am Institut für Pflanzen- und Mikrobiologie der Universität Zürich.