

Two water worlds: Mykorrhiza und ökohydrologische Separation

Namid Krüger, Matthias Beyer & Falko Feldmann

Vor kurzem wurden Paradigmen des Wassertransports und der Wasserspeicherung in Frage gestellt, durch eine Hypothese, die als *two water worlds* bekannt wurde. Bei der Infiltration von Wasser in Böden wurde bisher angenommen, dass ‚altes‘, im Boden befindliches Wasser bei Niederschlägen durch dieses neue Wasser ersetzt und nach unten verschoben wird. Die *two water worlds*-Hypothese stellt dies in Frage und besagt, dass es in Böden zwei Komponenten des Wassers gibt: Eine infiltrierende, die an der Bodenwasserbewegung teilnimmt, zur Grundwasserneubildung beiträgt und in Interaktion mit Flüssen steht, und eine zweite, fest gebundene Komponente, die kaum im Austausch mit dem mobilen Wasser steht. Genau letztere Komponente sei aber essenziell für Pflanzen - besonders während Trockenphasen. Wenn die Pflanzen aber gebundenes Wasser benötigen - welche Rolle spielen die Feinporen des Bodens, aus denen das Wasser kaum pflanzenverfügbar ist? Ganz praktische Fragen drängen sich auf: Berechnen wir falsch? Bearbeiten wir den Boden suboptimal? Vernachlässigen wir womöglich natürliche Anpassungsstrategien der Pflanzen, sich das knappe Gut Wasser und damit darin gelöste Nährstoffe verfügbar zu machen?

Schauen wir, was immer mehr Landwirte für richtig halten: In Landwirtschaft und Gartenbau setzt sich die konservierende Bodenbearbeitung mit nichtwendenden Geräten durch. Die ersten Pioniere setzen sogar auf Direktsaat mit erweiterten Fruchtfolgen und intensivem Zwischenfruchtanbau.

Eines ist sicher: wir fördern damit gleichzeitig die Rückkehr der Mykorrhiza-Technologie in die pflanzenbauliche Praxis. Die Art der Bodenbearbeitung ist von entscheidender Bedeutung für die Nutzbarkeit der vor 135 Jahren entdeckten Pilz-Pflanze-Symbiose (*Abb. 1*). Für die erfolgreiche Nutzung der Symbiose ist ein möglichst ungestörtes Geflecht aus Pilzfäden, so genannten Myzelien, im Boden erforderlich. Die Mykorrhiza-Technologie setzt auf gegenseitig nützliche Lebensgemeinschaften zwischen vielen unserer Kulturpflanzen und mikroskopisch kleinen Pilzen, welche die Wurzeln besiedeln. Glücklicherweise sind Mykorrhizapilze nicht spezifisch, d.h. sie können mehr als nur einen bestimmten Wirt besiedeln. Das führt in der Natur und im Agrarökosystem dazu, dass weit verbreitete Myzelien Pflanzen der gleichen Art, aber auch unterschiedlicher Arten verbinden. Die als Unkräuter verrufenen Wildpflanzen auf den Feldern können den Nutzpflanzen sogar helfen,

indem über die Symbiosen Nährstoffe in die Kulturpflanze umgeleitet werden! Der Großteil unserer Feldfrüchte ist zur Bildung der Lebensgemeinschaft der arbuskulären Mykorrhiza fähig, darunter Getreide, Leguminosen, Kartoffeln, Spargel und Zwiebeln. Die Pilze kommen in den meisten Böden natürlich vor und werden bereits als Biostimulanzien auf dem Markt angeboten. Die Pilz-Pflanze-Symbiose ist möglicherweise eine Anpassungsstrategie der Pflanze für die Verbesserung der Verfügbarkeit von Wasser aus der ersten Wasserwelt - dem fest gebundenen Bodenwasser.

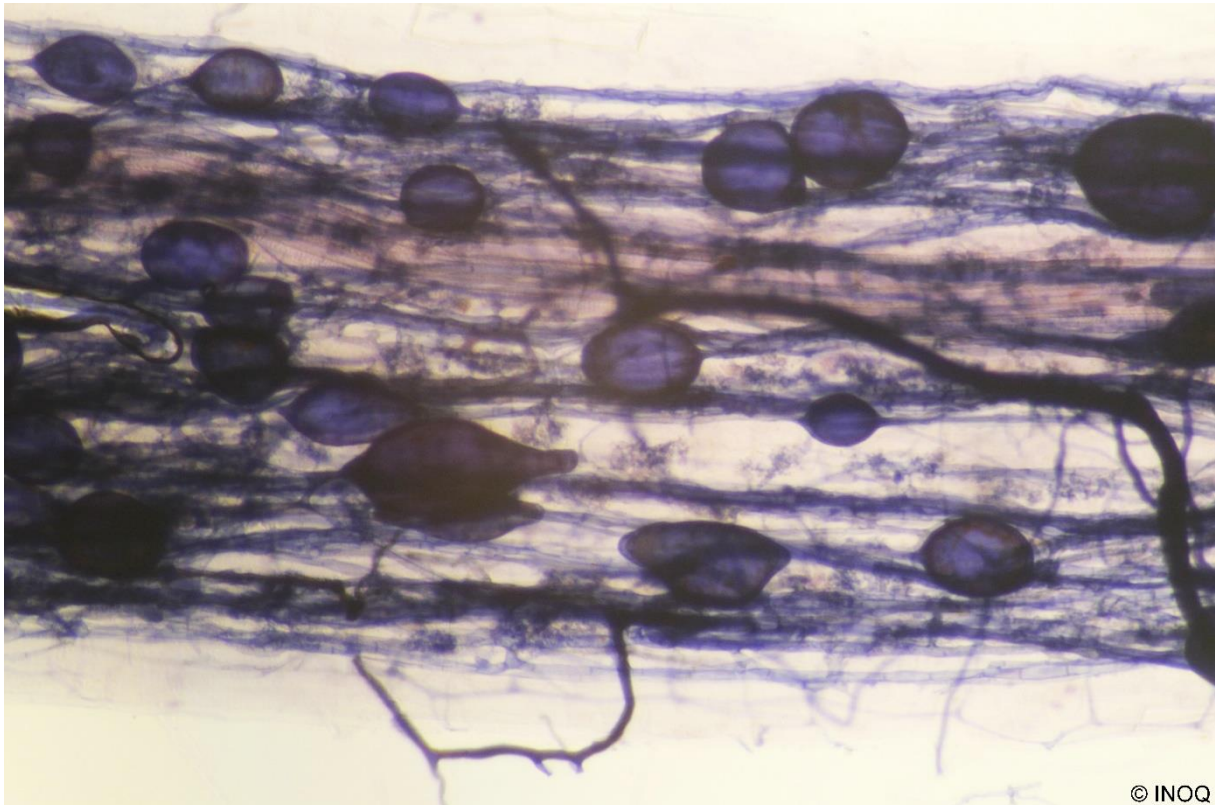


Abb. 1: Hyphen und Vesikel von arbuskulären Mykorrhizen in einer Pflanzenwurzel.

Pflanzen brauchen einen kontinuierlichen Wasserfluss, um vitale Prozesse wie Nährstoffaufnahme und Photosynthese zu betreiben, und einen gewissen Wassergehalt im Zellgewebe für ihr Wachstum und ihr Überleben. Die arbuskulären Mykorrhizen können die Stresstoleranz gegenüber abiotischen Umweltfaktoren erhöhen und für ein besseres Wachstum von Wirtspflanzen sorgen. Heute weiß man, dass Mykorrhizapilze zahlreiche Bodenbakterien im Gepäck haben, welche die positiven Effekte der Symbiose noch verstärken und die Pflanzengesundheit fördern. Die enormen Myzeliennetzwerke im Boden verschaffen der Pflanze nicht nur die Möglichkeit, mehr Nährstoffe zu erschließen, sondern auch an Wasser heranzukommen, an das die Wurzel ohne die Pilze nicht heranreichen könnte. Mykorrhizen können die Trockenheitsresistenz der Kulturpflanzen erhöhen, indem sie

die pflanzliche Wasseraufnahme bei einer gut funktionierenden Symbiose um mehr als 30 % steigern. Die bessere Wasseraufnahme der Pflanzen wird durch die vergrößernde Oberfläche des Pilzmyzels hervorgerufen, welches bis zu 40 m g⁻¹ Boden lang sein kann und Ressourcen in bis zu 25 cm Entfernung zur Wurzel erschließen kann. Wurzelsysteme haben im Vergleich eine Länge von weniger als 0,1 m g⁻¹. Die meisten Kulturpflanzen können Wasser und Nährstoffe nur aus den engen Grobporen und den Mittelporen aufnehmen und Ressourcen in den Feinporen (< 0,2 µm) nicht selbst erschließen. Nur durch langsame Diffusionsprozesse gelangen Nährstoffe aus den Feinporen in die Bodenlösung und zu den Wurzeln. Die Pilz-Hyphen könnten dieses Wasser aus den Feinporen extrahieren, die ansonsten für die Pflanzenwurzeln nicht zu erschließen wären.

Der aktuelle und zukünftige globale Klimawandel wird die Landwirtschaft vor große Herausforderungen stellen. Aufgrund des zunehmenden Wassermangels richten wir unsere Forschung auf die beschriebenen Pilzmyzelien aus. Um Trockenstress besser begegnen zu können, sind genaue Kenntnisse über die Wasserquellen von Pflanzen und deren Zugänglichkeit notwendig.

In einem Experiment verfolgten wir einen ökohydrologischen Ansatz und betrachteten exemplarisch Prozesse zwischen mykorrhizierten Spitzwegerich-Pflanzen und schluffigem, feinstrukturiertem Boden (Ut3) sowie der Atmosphäre unter kontrollierten Bedingungen. Wir haben insbesondere untersucht, wie genau und wann welche Wasserquellen für Pflanzen verfügbar werden. Um die Wassertransportwege innerhalb des Pflanzen-Boden-Atmosphäre-Kontinuums verfolgen zu können, wurde an schweren ²H-Wasserstoffisotopen angereichertes Wasser in die Feinporen des Bodens eingebracht. Deuterium (²H) ist ein natürlicher Bestandteil des Wassers und hat keinerlei negativen Umwelteffekte. Ein Wassermolekül mit dem Wasserstoffisotop ²H hat eine unterschiedliche Masse verglichen mit dem ‚normalen‘ Wassermolekül (dieses enthält ¹H). Diese gering verschiedenen physikalischen Eigenschaften wirken sich auf Wassertransportprozesse wie Evaporation und Transpiration aus und lassen sich nutzen, um Einblicke in den Wasserkreislauf zu gewinnen. Durch verschiedene Anreicherungsverhältnisse lassen sich auch einzigartige Rückschlüsse über Transportwege im biologischen Wasserkreislauf erzielen.

Unsere Ergebnisse bestätigen die Hypothese, dass eine Mykorrhizierung zu einer Verringerung an schweren ²H-Isotopen bei der Wasseraufnahme aus dem Boden und zu einer Veränderung des Wassertransportweges durch die Pflanzenwurzeln führen

kann. Im Blattwasser der trockenen, mykorrhizierten Pflanzen waren die $\delta^2\text{H}$ -Werte um 5,3 ‰ geringer als bei den trockenen, nicht mykorrhizierten Pflanzen. Eine Fraktionierung bei der Wasseraufnahme der Pflanzen durch eine Fokussierung des Wassertransports durch Aquaporine über den transzellulären Transportweg könnte die Ergebnisse erklären. Arbuskuläre Mykorrhizen könnten also den Wassertransport der Pflanzen regulieren und Anpassungen an Stresssituationen vornehmen. Die Rolle der Feinporen in unserem Experiment bedarf weiterer Klärung: entgegen der *two water worlds*-Hypothese wurde das Wasser aus den Feinporen rasch ausgetauscht. Die Ergebnisse zeigen hingegen eindeutig, dass Transpiration und Evaporation zu Anreicherungen an schweren ^{18}O - und ^2H -Isotopen im zurückbleibenden Wasser führen. Dadurch erscheint die Verwendung der Isotopensignatur als Trockenheitsindikator als eine interessante Anwendungsmöglichkeit. Nach diesen ersten Studien haben wir eine Methode zur Hand, mit der wir systematische Untersuchungen zum aufgezeigten Sachverhalt durchführen können. Nun wird es darum gehen, unterschiedlich große Mykorrhizanetzwerke zu studieren, tief- und flachwurzelnde Kulturpflanzen in den Fokus zu rücken und so Rückschlüsse für Anbausysteme zu ziehen.

Unsere Ergebnisse werden durch die neue EU-Verordnung 2019/1009, welche die Einordnung von Mykorrhizapilzen als sogenannte Biostimulanzien regelt, auf fruchtbaren Boden fallen. Firmen beginnen, sich dafür zu interessieren, inwieweit Produkte produziert und nutzbringend eingesetzt werden können, um beispielsweise den Aufbau natürlicher Lebensgemeinschaften in Ackerböden zu fördern, die derzeit degeneriert sind. Auch die Bildung von Aggregatstrukturen im Boden weckt Aufmerksamkeit für die Pilze. So verflechten arbuskuläre Mykorrhizen Bodenpartikel zu Makroaggregaten und befördern durch ihre Interaktion mit Bakterien auch die Bildung von Mikroaggregaten. In dieser Studie führte bereits kurze Trockenheit zu großen Veränderungen der bodenhydraulischen Eigenschaften und zu einer Einschränkung der Blattfunktionen. Diese nachteiligen Entwicklungen könnten durch arbuskuläre Mykorrhizen verringert bzw. verlangsamt werden. Für den Anbau von Feldfrüchten ist eine Bodenstruktur mit porösen, wasserstabilen Aggregaten mit einer Größe von 1 bis 10 mm am besten geeignet, da diese Struktur für eine gute Durchlüftung und Wasserspeicherfähigkeit sorgt. So können Mykorrhizapilze mikrobielle Beispielorganismen für den Umgang mit Biostimulanzien im integrierten Pflanzenschutz werden, bei welchem chemisch-synthetische Pflanzenschutzmittel für

die Gesunderhaltung von Kulturpflanzen kaum oder gar nicht einsetzen werden müssen.