Mykorrhiza – Vorteile der Symbiose bei Trockenheit und Nährstoffmangel

Mycorrhiza – advantages of symbiosis under conditions of drought and nutrient deficiency

von Jürgen Kutscheidt

Zusammenfassung

Die Erhöhung der Effizienz bei der Aufnahme von Wasser und Nährstoffen ist ein wesentlicher Vorteil von natürlicherweise oder durch Beimpfung mykorrhizierten Wurzeln. Der Beitrag beschreibt die physiologischen und biochemischen Prozesse sowie Belege für erfolgreiche Einsätze in der Land- und Forstwirtschaft. Die mit Impfstoffen der Mykomax GmbH erzielten Ergebnisse bei Aufforstungen und Pflanzungen von Stadt- und Straßenbäumen, in Baumsubstraten bei Pflanzgrubenbauweise sowie zur Vitalisierung alter Einzelbäume geben deutliche Hinweise auf eine hohe Wirksamkeit auch für diese Einsatzzwecke. Die wichtigsten Anforderungskriterien (der FLL) an Mykorrhiza-Impfstoffe werden aufgeführt und Grenzen der Anwendung benannt. Abschließend wird ein kurzer Ausblick auf die zukünftige Bedeutung von Mykorrhiza-Anwendungen gegeben.

Summary

Naturally or artficially mycorrhized roots increase the efficiency of water uptake and nutrients. The article describes the physiological and biochemical aspects and gives examples of successful employment in forestry and agriculture. The results of inoculation trials using products by the Mykomax GmbH show destinct benefits in individual older trees, planting of new trees and tree substrates for planting pits. The most important requirements for mycorrhizae inoculations oft the FLL are presented and the limitations of their use are given. The future prospects for artificial application of mycorrhizae are also briefly discussed.

1 Einleitung

In Zeiten des Klimawandels sind wir immer stärker auf die Leistungen der Bäume (CO_2-Fixierung, Schattenwirkung, Verringerung der Windgeschwindigkeit, Filterwirkung gegenüber Schadstoffen…) angewiesen. Dies gilt für eine globale Betrachtung und gleichermaßen im kommunalen wie im privaten Bereich. Nur vitale Bäume können den Anforderungen gerecht werden. In Jahren mit Hitzerekorden und langen Dürren (2003, 2018 und 2019) und in den Folgejahren kommt es zu vielfältigen Schädigungen, die die Leistungen herabsetzen oder sogar zum Absterben von Bäumen führen.

Schon für das Ordovizium, vor ca. 450 Millionen Jahren, können Sporen von Landpflanzen und Pilzen als Fossilien nachgewiesen werden. Vermutlich hat in diesem Zeitalter erst eine Symbiose zwischen Lebermoosen und Knäuelpilzen die Besiedlung der Landflächen ermöglicht (Ducket et al. 2006). Nach evolutionären Weiterentwicklungen der Pflanzen und der Pilze ist es dann erstmalig in der Jura, vor ca. 200 Millionen Jahren, zu Baum-/Pilz-Symbiosen bei Kiefergewächsen

und frühen Blütenpflanzen gekommen. Die Pilzpartner (= Mykobionten) gehörten zu den Schlauch-*(Ascomycota)* und Ständerpilzen *(Basidiomycota)*. Sie stammen genetisch von saprophytischen Pilzen ab (nicht von parasitischen!) (Kohler et al. 2015). Seither stabilisieren sich diese Lebensgemeinschaften sehr erfolgreich in zumeist umfangreichen Netzwerken und sorgen für ein Überleben der Arten (Kottke 2016). Die Verbesserung der Wasser- und Nährstoffaufnahme für die beteiligten Gehölze spielt hierbei eine zentrale Rolle.

2 Wässerung und Düngung im Forst und in der Baumpflege

Baumbestände zu erhalten oder neu zu begründen wird schwieriger. Im Forst müssen Jung- und Altbäume in der Regel mit dem auskommen, was der Standort hergibt. Düngergaben oder Wässerungen sind (fast) ausgeschlossen. Im kommunalen Bereich, in Grünanlagen oder auch an Straßen wäre eine Versorgung mit Wasser und Nährstoffen theoretisch dauerhaft möglich. In der Praxis beschränkt sich dieses aber auf die Fertigstellungs- und Entwicklungspflege (insgesamt drei Jahre) – danach muss/soll das Gehölz eigenständig funktionieren. Eine Startdüngung im Pflanzloch und angepasste Nährstoffgaben bei ersten Anzeichen einer nicht ausreichenden Versorgung sind Stand der Technik (FLL 2015). Auch die Wässerung ist in diesem Regelwerk ähnlich geregelt, nach dem durchdringenden Anwässern bei der Pflanzung „… ist in der Vegetationsperiode (April bis September) bei anhaltender Trockenheit (ab 10 Tage ohne Niederschlag), bei erhöhten Temperaturen und bei ersten Anzeichen von erschlaffenden Blättern zu wässern.“ Es sind für die ersten drei Jahre pro Jahr 8 bis 16 Bewässerungsgänge mit 75 bis 100 l Wasser je Durchgang (für Hochstämme bis 25 cm STU) vorzusehen.

Danach endet die Entwicklungspflege und der Baumeigentümer sollte dann mindestens für weitere zwei Jahre die Wässerung sicherstellen. Die Empfehlungen für Baumpflanzungen sehen nämlich einen Zeitraum von fünf Standjahren für die regelmäßige Wässerung vor. Da diese Leistung aber nur selten vergeben wird und die Kommunen selbst kaum in der Lage sind, die Wassergaben durchzuführen, kommt es in dieser Zeit – aber auch noch danach – zu Trockenschäden und Ausfällen. Wasserspenden durch Anlieger oder auch Feuerwehreinsätze sind in diesem Zusammenhang leider häufig nur ein Tropfen auf den heißen Stein, sollten aber keinesfalls unterbleiben, weil hiermit in der Bevölkerung ein entsprechendes Bewusstsein für den Baum geschaffen wird.

3 Die Wasserversorgung der Pflanze durch Mykorrhiza (basierend auf Kottke 2016 mit Ergänzungen)

Dass die Wasserversorgung von Pflanzen nur über die Wurzelhaare und die Rhizodermiszellen der Feinwurzeln erfolgt (Braun 1982) stimmt nicht einmal für 10 % der Landpflanzen. Über 90 % (Smith & Read 2008) leben in Pilz-Wurzel-Symbiosen, in denen die Pilzpartner diese Leistung zum größten Teil übernehmen. Durch hormonelle Unterdrückung wird bei Ektomykorrhiza-Pilzen die Ausbildung von Wurzelhaaren sogar aktiv verhindert (Ditengou et al. 2003), so lassen sich z. B. an Buchen oder Eichen an Waldstandorten kaum einmal Wurzelhaare finden (Abbildung 1 und 2).

Feinstwurzeln (< 0,5 mm Durchmesser) können in größere Bodenhohlräume eindringen – wenn diese vorhanden sind – und dort mit Wurzelhaaren (Ø ca. 0,01 mm) aus Grobporen (Ø 0,05–0,01 mm) Wasser aufnehmen. Pilzhyphen, die fadenartigen Zellen der Pilze, sind hingegen meistens nur 0,002–0,003 mm dick und können daher auch einen Teil der Mittelporen (Ø 0,01–0,0002) erschließen. Rund 30 % mehr Wasser aus dem Nahbereich der Wurzeln wird so verfügbar – allein diese Zusatzversorgung kann schon über eine Schädigung oder sogar das endgültige Verwelken entscheiden.

Noch deutlich größer wird der positive Effekt durch das „extraradikale Myzel“, dies sind Pilzhyphen außerhalb der Wurzel, die sich von den Mykorrhizen ausgehend im umgebenden Boden verbreiten (Abbildung 3). Dieses Pilzgeflecht vergrößert die äußere, aufnahmefähige Oberfläche der Wurzeln erheblich und vervielfacht die Aufnahmefähigkeit für Wasser und Nährstoffe. Für Endomykorrhiza-Pilze sind 12 cm (Lie et al. 1991) und sogar bis zu über 25 cm Abstand zur Wurzel nachgewiesen (Smith et al. 2009). Weigt et al. 2012 unter-

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5

Abbildung 1: Intensiv mykorrhizierte Eichenwurzeln

Abbildung 2: Intensiv mykorrhizierte Buchenwurzeln

Abbildung 3: Mykorrhiza mit extraradikalem Myzel und Rhizomorphen (*Pinirhiza discolor* an *Pinus sylvestris*) (Agerer 1987–2012)

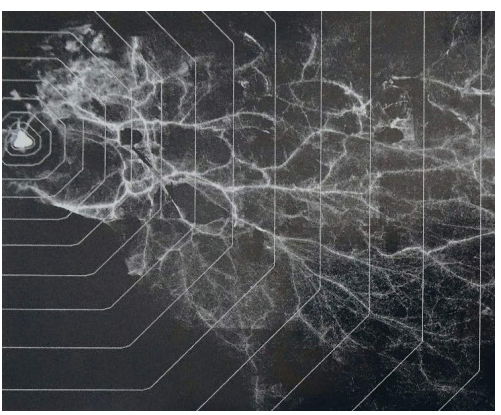


Abbildung 4: Ausbreitung von Mykorrhizapilz-Hyphen und Rhizomorphen auf einem flach ausgeschütteten Substrat (Foto: Agerer)

scheiden für Ektomykorrhiza bildende Pilzarten Ausbreitungstypen, die verschieden weite Distanzen (bis zu 10 cm) überbrücken. Bündeln sich die feinen, fadenartigen Hyphen zu Hyphenverbänden (Rhizomorphen) können diese oft mehrere Dezimeter oder sogar Meter in den Boden hineinreichen (Agerer 2005). In weitreichenden Rhizomorphen (Abbildung 4) können dann Hyphen aus dem zentralen Bereich ihren Durchmesser erheblich vergrößern und Querwände ganz oder teilweise auflösen, so dass sie in Form und Funktion Pflanzenwurzeln ähneln. In solchen Transport-Rhizomorphen ist die Fließgeschwindigkeit für Wasser und Nährstoffe deutlich erhöht (Agerer 2009). Auch Pilzarten ohne weitreichende Hyphen können Trockenstress mindern, dies gelingt z. B. *Cenococcum geophilum*, der im Hyphenmantel in gelatinösen Zellen Wasser speichern kann (Di Pietro et al. 2007). Durch die Symbiosepilze wird die Wurzel zudem angeregt, vermehrt Wurzelspitzen auszubilden. Dies führt dann zu weiteren Besiedlungen auch durch Mykobionten anderer Arten.

In intakten Waldökosystemen ist der Mykorrhizabesatz an den Feinwurzeln häufig sehr umfangreich. Dort können z. B. an einer Eiche 20 oder 30 verschiedene Pilzarten als Symbionten nachgewiesen werden. Eine einzige

Pappel kann sogar gleichzeitig mit Hunderten von Pilzarten eine Symbiose eingehen (Bahram et al. 2011). Diese Vielfalt zusammen mit den umfangreichen Vernetzungen ermöglicht wahrscheinlich, dass sich kooperative Systeme langfristig neben parasitären Systemen durchsetzen können (Sigmund 1995). In diesen Netzwerken können Sämlinge schon mit einbezogen und mit adulten Bäumen verbunden werden (Agerer 2009).

Neben der Verbesserung der Wasseraufnahme und der Wasserspeicherung gibt es noch eine Reihe weiterer morphophysiologischer und biochemischer Effekte, die den Trockenstress von mykorrhizierten Pflanzen mildern. So können die Stomata durch hormonelle und nährstoffbedingte Effekte gesteuert werden (Guehl & Garbaye 1990) und die durch Trockenstress bedingte Produktion von Radikalen (wie H_2O_2) in der Pflanze kann durch antioxidative Enzyme von Mykorrhiza-Pilzen deutlich verringert werden. So bleiben erhebliche Schäden an Zellen aus oder deren Tod wird verhindert (Alvares et al. 2009). Bei Jungpflanzen wurde unter Mykorrhiza-Einfluss auch beobachtet, dass die Wurzelneubildung verstärkt wurde und die Wurzeln in deutlich tiefere Bodenschichten vordrangen (Padilla & Pugnaire 2007). Bei forstlicher Pflanzware, die sehr häufig wurzelnackt geliefert und gelagert wird, kann durch eine Mykorrhizierung der Feinwurzeln ein Verdunstungsschutz bewirkt werden, so dass das Austrocknen effektiv verringert wird und Vertrocknungsschäden deutlich länger ausbleiben (Willenborg 2019).

4 Die Nährstoffaufnahme der Pflanze durch Mykorrhiza (basierend auf Kottke 2016 mit Ergänzungen)

Allein schon die durch eine Mykorrhizierung wesentlich verbesserte Wasseraufnahme sorgt dafür, dass der Pflanze alle im Wasser gelösten Nährstoffe in deutlich erhöhtem Umfang zur Verfügung stehen. Aber auch eine aktive Aufnahme an den wachsenden Hyphenspitzen erhöht die Mineralaufnahme der Pflanzen ganz wesentlich. Für eine gute Nährstoff- und Wasserversorgung müssen die Pflanzen aber ihrerseits den Pilzpartnern eine ausreichende Versorgung mit Kohlenhydraten gewährleisten. Hierzu werden oft 20 % (oder sogar 30–40 %) der Assimilate aus der Photosynthese abgegeben (Graham 2000; Leake et al. 2004).

4.1 Stickstoff

Stickstoffverbindungen gelangen an natürlichen Standorten fast ausschließlich durch Organismen in den Boden. Hierbei spielen Bakterien, die den Luftstickstoff binden können, und Bodenorganismen, die die organischen Reste aufschließen, eine wesentliche Rolle. Nur die so freigesetzten Aminosäuren, Ammonium und Nitrat können aus der Bodenlösung direkt von Pflanzenwurzeln aufgenommen werden.

In der Bodenlösung stehen aber nur geringe Anteile des Stickstoffs direkt zur Verfügung, der weitaus größere Anteil ist organisch gebunden, häufig in phenolhaltigen Proteinen, die für Pflanzenwurzeln nicht aufschließbar sind (Kleber et al. 2015). Bei den höheren Pilzen unter den Mykobionten werden Enzyme (Proteasen und Peroxidasen) ausgeschieden, um Stickstoff aus organischen Verbindungen, vor allem aus Humusbestandteilen zu gewinnen (Shah et al. 2015). Große Anteile des gewonnenen Stickstoffs werden im Myzel der Mykorrhiza-Pilze gebunden und verhindern hiermit die Stickstoffauswaschung aus dem Boden – Ektomykorrhizen gelten als die größten Stickstoffspeicher unter den Bodenorganismen (Högberg et al. 2010). Mykorrhiza-Pilze tragen somit erheblich zur Stickstoffversorgung und -sicherung der Pflanzen bei und auch zur Sicherung desselben im Boden. Insbesondere unter Wasserdefizit erhält dies eine große Bedeutung für das Pflanzenwachstum (Posta & Nguyen 2019). Leberecht (2014) stellte die enorme Bedeutung der Mykorrhiza-Zusammensetzung an Jungbuchen für die Versorgung mit Stickstoff fest und befürchtet wegen umweltbedingter Veränderungen zukünftig große Probleme für deren Stickstoffversorgung. Dies könnte zu einer erheblichen Reduzierung der Kalkbuchenwälder bis zum Ende des Jahrhunderts führen.

4.2 Phosphat

Die häufigste Ursache von Wuchsstörungen bei Pflanzen ist Phosphatmangel. Nur Orthophosphat ist von den Pflanzen direkt aus der wässerigen Bodenlösung aufnehmbar, es hat jedoch einen sehr großen Anteil an deren Gesamtmenge. Bei pH-Werten über 5,6 funktioniert die Dissoziation aber nicht mehr und es liegen dann nur noch geringe Mengen an pflanzen-

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5

verfügbarem gelöstem Phosphat vor. Als mineralische Bestandteile in Gesteinen (Apatit und Phosphorit) und organische gebunden als Phytate, Nukleinsäuren oder als Phospholipide in humushaltigen Böden kann Phosphat über die Abgabe von Protonen, organischen Säuren oder saurer Phosphatasen durch Pflanzenwurzeln und Pilzhyphen freigesetzt werden. Mykorrhiza-Pilze tragen durchschnittlich etwa 70–80 % zur gesamten Phosphatzufuhr bei (Plassard & Dell 2010). Von den Pilzhyphen selbst werden bei Phosphatmangel verstärkt saure Phosphatasen abgegeben und zusätzlich kann auch die Wurzel stimuliert werden, diese verstärkt zu produzieren. Die Aufnahme erfolgt dann aktiv über membrangebundene Transportproteine (Plassard & Dell 2010), die schon bei sehr geringen Phosphatkonzentrationen in der Bodenlösung funktionieren und besonders bei schlechter Versorgung der Pflanzen aktiviert werden. Durch die Bildung und Speicherung von langkettigen Polyphosphaten in den Hyphen kann die P-Konzentration 1.000-fach über dem Bodenwert liegen (Kottke 2016).

In den Kontakt- und Austauschbereichen zwischen Pilz und Pflanze – den bei der Endomykorrhiza in die Wurzelzellen reichenden sogenannten Arbuskeln (bäumchenartig verzweigte Hyphen, Abbildung 5) und bei der Ektomykorrhiza den zwischen den Zellen liegenden Hyphen des sogenannten Hartigschen Netzes – werden dann die Polyphosphate mithilfe von Phosphatasen wieder abgebaut und an die Pflanze abgegeben. Durch Belohnung/Anreiz kann eine wechselseitige Förderung erfolgen. Wird aber von der Pflanze wenig Zucker im Austausch bereitgestellt, bleibt mehr Phosphat in den Polyphosphaten gebunden und ist dann nicht verfügbar.

Bei einer Beimpfung geschwächter Pflanzen mit leistungsfähigen Mykorrhiza-Pilzstämmen kann häufig beobachtet werden, dass eine nachhaltige Kräftigung der Pflanze eintritt (Fröhlich 2005; Becker et al. 2017).

4.3 Verbesserung der Mineralversorgung, Schutz vor toxischen Metallen

Durch die Abgabe von Protonen und organischen Säuren durch Wurzeln und Pilze werden zusätzlich zu N und P Mineralien aus Gestein freigesetzt, was deutlich zur Versorgung mit Ca, Mg, K und Fe beiträgt. Zusätzlich kann durch Abgabe von eisenbindenden niedermolekularen Verbindungen und Oligopeptiden (Siderophore) sonst nicht pflanzenverfügbares Fe^{+++} (dreiwertiges Eisen, ein Eisenoxid) aufgenommen werden (Winkelmann 2007).

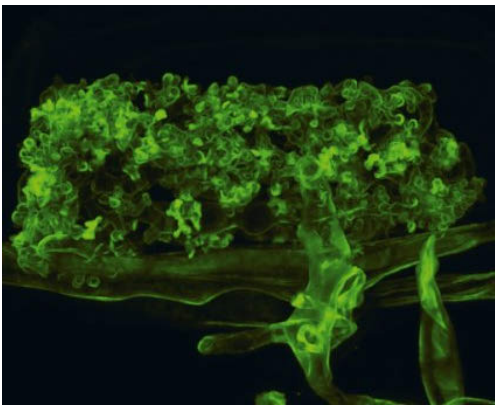


Abbildung 5: Fluoreszenzmikroskopische Aufnahme von einem Arbuskel (Foto: Erik Limpens)

Mit der Steigerung der Phosphataufnahme und der Bildung von Polyphosphaten, die dann chemisch als (Poly-)Anionen wirken, können metallische Kationen wie K, Ca, Mn, Mg, Zn, Fe, Cu, Cd, Cs, Al gebunden werden. Hierdurch kann die Versorgung mit mineralischen Nährelementen verbessert werden und auch ein Schutz vor dem für Pflanzen toxisch wirkenden Al^{+++} (dreiwertiges Aluminium) kann durch die irreversible Bindung an Polyphosphate erfolgen. Hierdurch wird die Vergiftungsgefahr in Böden mit stark sauren pH-Werten (unter pH 4,2) erheblich verringert.

Ein schädlicher Überfluss an Calcium an Problemstandorten kann als Calciumoxalat an den Oberflächen der Hyphen ausgefällt und damit fixiert werden. Andere toxische Metalle (z. B. Cadmium) werden in großen Mengen an den Hyphenwänden gebunden und können dann von Pflanzen in deutlich höheren Dosen geduldet werden (Gonzalez-Guerrero 2009). Auch etwa 40 % der Bodenradioaktivität wird über diesen Weg in Pilzhyphen gespeichert. Noch heute – mehr als 30 Jahre nach Tschernobyl – können an einigen Standorten in Bayern z. B. Maronenröhrlinge *(Xerocomus badius)* bis zu einige Tausend Becquerel

Abbildung 6: Zwölf Wochen nach der Beimpfung sind – unter ansonsten vergleichbaren Bedingungen – schon deutliche Wachstumsunterschiede erkennbar.

Cäsium-137 pro Kilogramm enthalten. In Extremfällen kann schon mit einer Mahlzeit mehr Cäsium-137 aufgenommen werden als sonst aus anderen landwirtschaftlichen Lebensmitteln im ganzen Jahr (br.de 2019).

5 Erfolgreicher Einsatz von Mykorrhiza-Pilzen

Mehrere Tausend Fachartikel belegen die positiven Wirkungen von Mykorrhiza in der Land- und Forstwirtschaft (Lelley 1997; Feldmann 1998). Insbesondere an trockenen (Augé 2001) oder nährstoffarmen Standorten konnten nach Inokulation geeigneter Pilzstämme positive Ergebnisse erziel werden.

Die nachfolgenden Untersuchungen sind bis 1994 mit Mykorrhiza-Impfstoffen der Versuchsanstalt für Pilzanbau (Krefeld), bis 1998 mit Pilzstämmen der Gesellschaft für Angewandte Mykologie und Umweltstudien mbH (GAMU, Krefeld) und danach mit Impfstoffen der Mykomax GmbH (Wuppertal) durchgeführt worden. Diese Firmen sind teilweise auseinander hervorgegangen und haben in Bezug auf die Mykorrhiza-Impfstoffe sowohl Kulturen als auch Verfahren übernommen und weiterentwickelt. Seit 2004 werden die Impfstoffe über die GEFA-Fabritz GmbH (Krefeld) und BOTT Begrünungssysteme GmbH (Bühl) vertrieben.

5.1 Ergebnisse bei Aufforstungen

Versuche an der Versuchsanstalt für Pilzanbau mit Fichten- *(Picea abies,* Abbildung 6) und Buchen-Jungpflanzen *(Fagus sylvatica)* zeigten bei der Aufforstung von Waldschadensflächen Zuwachssteigerun-

Abbildung 7 und 8: Douglasien ohne und mit Mykorrhiza-Beimpfung (Fotos: Kirscht)

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5

gen über 200 % in den mit speziellen Pilzstämmen behandelten Varianten gegenüber den Kontrollen, denen ausschließlich die natürliche Pilzflora ihres Standortes zur Verfügung stand. Zudem konnten die Ausfallraten durch Trockenschäden und auch jene durch Hallimaschbefall signifikant verringert werden (Kutscheidt 1992; Lelley & Schmitz 1994).

Von der Universität Göttingen (Kirscht 2011) wurden zur Pflanzung an Extremstandorten drei verschiedene Mykorrhiza-Impfstoffe an Spitz-Ahorn (*Acer platanoides*), Douglasie (*Pseudotsuga menziesii*) und Rot-Eiche (*Quercus rubra*) eingebracht. Für die Impfstoffe konnte nachgewiesen werden, dass sich schon nach einigen Wochen die entsprechenden Pilze an den Feinwurzeln wiederfanden. Auf den devastierten und toxischen Böden der Versuchsflächen (Uran-Tagebaue und Kohle-Abraumhalden) stieg die Überlebensrate der Jungpflanzen deutlich und das Wachstum sowie die Vitalität der mykorrhizierten Versuchspflanzen waren erheblich verbessert (Abbildung 7 und 8). Die Nährelementgehalte waren in Blatt- und Nadelproben der beimpften Varianten erhöht, potenziell phytotoxische Metalle in diesen verringert. Auch konnten deutlich geringere Schwefelgehalte bei diesen Pflanzen festgestellt werden, die vom toxischen Bereich in den Normalbereich absanken. Die Autorin (Kirscht 2011) schreibt in ihrer Dissertation zusammenfassend: „Die Beimpfung von Bäumen mit Mykorrhiza-Pilzen bei der Pflanzung führte zu guten Mykorrhizierungsgraden. Insgesamt war ein deutlich positiver Effekt auf die Ernährungs- und Belastungssituation, Vitalität und Wachstum zu verzeichnen. Bei den betreffenden Baumarten wurden die Spitzenwerte stets mit Mykorrhiza-Impfung gemessen.“

Abbildung 9: Mykorrhizierungsversuch in Mailand, es zeigten sich bereits innerhalb der ersten Vegetationsperiode deutliche Unterschiede (links beimpft, rechts Kontrolle) (Foto: Fini).

Abbildung 10: Deutliche Unterschiede in der Blattgröße und dem Chlorophyllgehalt der Zürgelbaum-Blätter (Foto: Fini)

5.2 Ergebnisse an Stadt- und Straßenbäumen

In **Hannover** wurden Ende der 1990er Jahre Stiel-Eichen (*Quercus robur*) mit sehr starken Vitalitätsmängeln nach einer vorhergehenden Wurzel-und Mykorrhiza-Untersuchung mit Eichen-Mykorrhiza beimpft. Die 35-jährigen Eichen – insgesamt standen über 90 Bäume in diesem Straßenzug – erhielten zusätzlich eine Bodenbelüftung und sauren Eichen-Rindenkompost. Bei einem stark basischen Ausgangs-pH-Wert von 8,3 konnten an Proben, die an sieben dieser Eichen entnommen worden waren, durchschnittlich nur noch weniger als 10 % mykorrhizierte Feinwurzeln festgestellt werden. Viele der nicht mykorrhizierten Feinwurzeln waren abgestorben oder wiesen Nekrosen auf (Kutscheidt 2001). Die Bonitur der Belaubung zeigte schon nach einer Vegetationsperiode sichtbare Unterschiede und nach zwei Jahren ein auffallend positives Bild – normale Blattgrößen, reguläre Trieblängen, dunkelgrüne Blattfarbe, Verdoppelung der Belaubungsdichte. 2003 wurde bei Wurzeluntersuchungen

Abbildung 11: Untersuchung von Mykorrhiza-Beimpfung in Berlin-Neukölln, hier an Feld-Ahorn (*Acer campestre)* (Foto: Zander)

eine Mykorrhiza-Rate von 83 % an den beimpften Eichen und 36 % an den Kontrollen festgestellt (Fröhlich 2005).

In **Mailand und Florenz** wurden verschiedene Baumarten in Straßen und Parkanlagen mit Impfstoffen beimpft (Ferrini & Fini 2011a). Die behandelten Zürgel-Bäume (*Celtis australis*) zeigten schon nach einigen Wochen erhebliche Zuwächse und deutlich verbesserte Chlorophyllgehalte in den Blättern (Abbildung 9 und 10). Im zweiten, dritten und vierten Jahr waren die Trieblängen um 55, 98 und 80 % höher als bei den Kontrollen. Bei Eschen im Mittelstreifen einer stark befahrenen Straße in Florenz, die nach zwei Jahren Standzeit beimpft wurden, zeigten sich signifikant positive Ergebnisse „erst“ zwei Jahre nach der Beimpfung.

Im Rahmen von Gehölzpflanzungen des bundesweiten Kooperationsnetzwerkes „Klimawandel und Gehölzsortiment der Zukunft“ sind von der Humboldt-Universität zu Berlin die Effekte einer gezielten Mykorrhiza-Beimpfung bei der Pflanzung mit untersucht worden. Hierzu wurden im Frühjahr 2014 insgesamt 36 Bäume an einem extremen Stressstandort in **Berlin-Neukölln** gepflanzt (Abbildung 11). In den ersten Vegetationsperioden konnten keine grundlegenden Unterschiede zu den Kontrollen festgestellt werden. 2017 jedoch nahm der Stammzuwachs der behandelten Bäume um rund 90 % gegenüber den unbehandelten Exemplaren zu. Fellkötter et al. (2018) schreiben: „Eine positive Wirkung einer Mykorrhiza-Impfung auf die Stammzuwachsleistung der Gehölze konnte somit bestätigt werden.“

5.3 Beobachtungen an einzelnen Altbäumen

Beimpfungen an verschiedenen Altbäumen sind wissenschaftlich begleitet und dokumentiert worden. Da hier aber zumeist keine Kontrollen vorhanden waren

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5

(oder nur Vergleichsmöglichkeiten mit Bäumen aus dem nahen Umfeld zur Verfügung standen), sollen diese Beimpfungen nur als Anwendungsbeispiele genannt werden:

Schon 1993 wurde die ca. 650 Jahre alte Bären-Eiche (*Quercus robur*) in **Niederholzklau** (Siegerland) mit sterilen Impfstoffen und durch die Übertragung von Mykorrhiza von gut mykorrhizierten Jungpflanzen behandelt. Über die „Genesung" der Eiche wurde in der AFZ-Der Wald 1999 und 2017 berichtet (Becker et al. 1999, 2017). Der ehemals absterbende Baum zeigt bis heute deutliche Verbesserungen in der Krone und an den Feinwurzeln.

An den 450–500-jährigen Altan-Eichen (*Quercus petraea*) in **Wiesbaden** sind an vier Exemplaren 1994, 1997 und 2000 Feinwurzelproben entnommen worden. Nach der ersten Probenentnahme fand eine Beimpfung mit zwei Pilzstämmen des Kahlen Kremplings (*Paxillus involutus,* Stämme AY127 und W50) statt. Hier nahm die Anzahl der Feinwurzelspitzen je Meter Feinwurzelsystem um mehr als 12 % und die Mykorrhizafrequenz (der Anteil der mykorrhizierten Feinwurzeln an deren Gesamtanzahl) um mehr als 65 % zu. Die Anzahl der optisch unterscheidbaren Mykorrhizen stieg von drei auf sechs. Entsprechend dieser Ergebnisse konnte auch oberirdisch eine deutliche Vergrößerung der Jahrringbreiten von etwa 1 bis maximal 2 mm auf 4 mm gemessen werden (Fröhlich 2005).

In **Ferndorf im Siegerland** wurde die Kaiserlinde 2004 beimpft. Innerhalb von zwei Vegetationsperioden zeigte sich eine deutlich dichtere Krone (Becker & Sorg 2007).

In einer historischen Parkanlage in **Mailand** sind an mit Mykorrhiza beimpften alten Linden (*Tilia* x *europaea*) bereits nach einer Vegetationsperiode deutliche Steigerungen des Dickenwachstums nachgewiesen worden (+ 318 %). Nach der zweiten Vegetationsperiode waren an den Linden und auch an behandelten Rosskastanien (*Aesculus hippocastanum*) die Sprosszuwächse deutlich höher als vor der Aufwertung der Standorte durch Mykorrhiza. Zusammenfassend sprechen Ferrini & Fini (2011b) von einer insgesamt positiven Reaktion auf die Beimpfung.

5.4 Mykorrhiza-Anwendungen in Baumsubstraten

Im Rahmen der Bearbeitung der Erstausgabe der FLL-Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2 (FLL 2004) ist die Funktionsfähigkeit von Mykorrhiza-Impfstoffen in verschiedenen Baumsubstraten bei der MykoMax GmbH überprüft worden (Wantoch & Busch 2003). Es zeigten sich gute Beimpfungserfolge auch bei pH-Werten von 7,5–8,0 (Abbildung 12).

Seit mehr als 15 Jahren werden Pflanzungen bei der BOTT Begrünungssysteme GmbH in Rotgrand-Pflanzsubstrat erfolgreich bei der Pflanzung und zur Baumsanierung angewendet (Bott 2018). Auch die Vulkatec Riebesahm GmbH empfiehlt die Mykorrhiza-Beimpfung bei der Anwendung von Vulkatree-Substraten für Eichen oder wenn die Pflege und Versorgung nicht ordnungsgemäß erfolgen kann (König 2019).

Ganz wichtig ist, dass bei der Pflanzung in Baumsubstrate (z. B. in Pflanzgruben) der Impfstoff nahe an den Ballen appliziert wird. Eine Einmischung in das gesamte Substrat ist wenig zielführend, da die entfernteren Bereiche der Pflanzgrube erst nach mehreren Vegetationsperioden von Wurzeln erreicht werden. In diesem Zeitraum dürfte zum einen die Haltbarkeit der Impfstoffe deutlich überschritten worden sein, zum anderen ist eine ausreichende Dichte der infektiösen Bestandteile für einen Impferfolg maßgeblich. Diese wird in der Regel nur von Impfstoffen, nicht aber von beimpften Substraten und insbesondere auch nicht von Düngern mit Mykorrhiza-Bestandteilen erreicht.

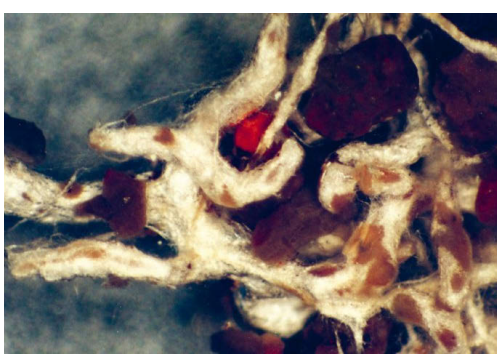


Abbildung 12: Schnelle Ausbreitung von Mykorrhizen in Baumsubstraten

6 Qualitätskriterien für Impfstoffe

Die Anforderungen an Mykorrhiza-Impfstoffe sind erstmalig in der Erstausgabe der FLL-Empfehlung für Baumpflanzungen Teil 2 (2004) veröffentlicht worden. Danach sind diese 2005 auch in den Teil 1 der Empfehlungen (FLL 2005) übernommen und dann in den jeweiligen Neuauflagen (FLL 2010, 2015) überarbeitet worden.

Neben der „Dichte" und der Lagerfähigkeit des Impfstoffes wird die Freiheit von Wurzelschädlingen geregelt. Zudem muss das Inokulum (der Impfstoff) der Symbiosefähigkeit der Gehölze entsprechen. Dies gilt nicht nur zwischen Ekto- und Endomykorrhiza, sondern es muss auch die konkrete Pilz-Gehölz-Symbiosefähigkeit gesichert sein. Auch dürfen nur Pilzstämme heimischer Arten verwendet werden.

Für Endomykorrhiza-Impfstoffe ist zudem eine Überprüfung der Leistungsfähigkeit der Arbuskeln an den Zielpflanzen vorgeschrieben. Wenn diese Kriterien erfüllt werden, darf von der Funktionstüchtigkeit des Impfstoffes ausgegangen werden (Kutscheidt 2004).

7 Grenzen der Anwendung

Ganz sicher sind Mykorrhiza-Impfstoffe keine Wundermittel. Es gibt Grenzen, die auch mit einer leistungsfähigen Mykorrhiza nicht überschritten werden können. Daher sollte bei Bäumen mit so starken Vitalitätsverlusten, dass nicht mit einer Re-Vitalisierung gerechnet werden kann, z. B. Buchen *(Fagus silvatica)* mit weniger als 20 % Restbelaubung, auch keine Mykorrhiza-Beimpfung mehr durchgeführt werden. Stiel- und Trauben-Eichen *(Quercus robur* und *Q. petrea)* mit einer ähnlicher Vitalität sind dagegen noch Erfolg versprechend.

Ganz sicher verlängert eine gute Mykorrhizierung die Überlebensrate von Bäumen bei anhaltender Trockenheit – aber auch für die Pilzhyphen sind die Wasservorräte des Bodens endlich. Auch zu starke Bodenverdichtungen, sogenannte Bodenschadverdichtungen, können dazu führen, dass keine Wachstumsverbesserungen nach einer Mykorrhiza-Behandlung nachgewiesen werden können (Ferrini & Fini 2011b). Bei Trockenheit kann dann eine Kombination von Mykorrhiza-Impfstoffen mit Bodenhilfsstoffen (z. B. Superabsorber) oder bei extremer Verdichtung eine Bodenlockerung bei der Pflanzung oder der Vitalisierung sehr erfolgreich sein.

8 Ausblick

Bezüglich der Anwendung von Mykorrhiza-Impfstoffen an Stadt- und Straßenbäumen gibt es zwar im Vergleich zu land- und forstwirtschaftlichen Anwendungen erst relativ wenige Ergebnisse, diese wurden und werden aber zur weiteren Optimierung genutzt. So konnten im Verlauf der letzten 30 Jahre mehrfach leistungsfähigere Pilzarten und -stämme für verschiedene Baumarten selektiert werden und es ist vor kurzem gelungen, Ekto- und Endomykorrhiza-Impfstoffe für hohe pH-Werte (> 8) bereitzustellen (Kutscheidt 2019).

Ein weiterer Erfolg versprechender Schritt wäre zudem die Beimpfung bereits in der Baumschule. Auf diesem Weg würden die „Etablierungszeiten" bis zur vollen Leistungsentfaltung der Symbiose zwischen Baum und Pilz deutlich verkürzt werden können.

Im Rahmen des Klimawandels werden wir immer mehr auf die Leistungen der Pflanzen und insbesondere der Gehölze angewiesen sein. Deren Resilienz (Fähigkeit, schwierige Lebenssituationen ohne anhaltende Beeinträchtigung zu überstehen) zu erhalten oder besser noch zu steigern, wird – so haben es die letzten Sommer gezeigt – eine Kernanforderung an unseren Arbeitsbereich werden. Hierzu sollte auf das enorme Potenzial der Mykorrhiza-Pilze nicht verzichtet werden, denn, was seit 450 Millionen Jahren in der Natur erfolgreich ist, sollte man auf keinen Fall unterschätzen.

Literatur

Agerer, R. (Hrsg.), 1987–2012: Colour Atlas of Ectomycorrhizae. Einhorn-Verlag + Druck GmbH, Schwäbisch Gmünd.

Agerer, R., 2005: Baumgattungen und ihre Mykorrhizapartner. In: Fröhlich, H. J. (Hrsg.), 2005: Vitalisierung von Bäumen. Monumente Publikationen der Deutschen Stiftung Denkmalschutz, Bonn, 50–64.

Agerer, R., 2009: Bedeutung der Ektomykorrhiza für Waldökosysteme. In: Rundgespräche der Kommission für Ökologie. Bd. 37, Ökolo-

Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5

gische Rolle von Pilzen, Verlag Dr. Friedrich Pfeil, München, 111–121.

Alvarez, M.; Huygens, D.; Fernandez, C.; Gacitúa, Y.; Olivares, E.; Saavedra, I.; Alberdi, M.; Valenzuela, E., 2009: Effect of ectomycorrhizal colonization and drought on reactive oxygen species metabolism of *Nothofagus dombeyi* roots, Tree Physiology, Volume 29, Issue 8.8.2009, 1.047–1.057, https://doi.org/10.1093/treephys/tpp038.

Augé, R. M., 2001: Water relations, drought and vesiculararbuscular mycorrhizal symbiosis. Mycorrhiza 11, 3–42.

Bahram, M.; Polme, S.; Koljalg, U.; Tedersoo, L., 2011: A single European aspen (*Populus tremula*) tree individual may potentially harbour dozens of Cenococcum geophilum ITS genotypes and hundreds of species of ectomycorrhizal fungi. FEMS Microbiol Ecol 75, 313–320.

Becker, A.; Irle, A.; Lelley, J., 1999: Vitalisierungsversuch an einer alten erkrankten Eiche. AFZ-Der Wald 5, 259–262.

Becker, A.; Irle, A.; Lelley, J., 2017: Entwicklung einer Stieleiche nach Sanierung in 1993. AFZ-Der Wald 12, 40–42.

Becker, A.; Sorg, M.; 2007: Kaiserlinde erhielt Windeln. Festschrift 100 Jahre Kindelbergturm, 66–70.

Bott Begrünungssysteme GmbH, 2018: Produktkatalog. Stand 2018

BR.de, 2019: https://www.br.de/nachrichten/wissen/pilze-in-bayern-sind-noch-immer-radioaktiv-belastet,R1w6mbV.

Braun, H. J., 1982: Lehrbuch der Forstbotanik. Gustav Fischer Verlag, Stuttgart/New York.

Di Pietro, M.; Churin J.-L.; Garbaye J., 2007. Differential ability of ectomycorrhizas to survive drying. Mycorrhiza 17, 547–555.

Ditengou, F. A.; Raudaskoski, M.; Lapeyrie, F., 2003: Hypophorine, an indole-3-acetic acid antagonist delivered by the ectomycorrhizal fungus *Pisolithus tinctorius*, induces reorganisation of actin and the microtubule cytoskeleton in *Eucalyptus globulus* ssp *bicostata* root hairs. Planta 218, 217–225.

Duckett, J. G.; Carafa, A.; Ligrone, R. , 2006: A highly differentiated Glomerocotan association with the mucilage-secreting, primitive Antipodean liverwort Treubia (Treubiacaeae), Clues to the origins of mycorrhizas. Am J Bot 93, 797–813.

Feldmann, F., 1998: Arbuskuläre Mykorrhiza im Gartenbau. Thalacker Medien, Braunschweig.

Fellkötter, G.; Schreiner, M.; Zander, M.; Ulrichs, C., 2018: Erste Ergebnisse zur Eignung neuer Baumarten an stark belasteten Straßenstandorten in Berlin-Neukölln. Pro Baum, (2) 2018, 7–12.

Ferrini, F.; Fini, A., 2011a: Results of a long-term project using controlled mycorrhization with specific fungal strains on different urban trees. Proceedings of the Urban Trees Research Conference 13.–14.04.2011, Birmingham, 39–50.

Ferrini, F.; Fini, A., 2011b: Effect of mycorrhizal inoculation on growth parameters and physiology of urban trees. Veitshöchheimer Berichte aus der Landespflege, Heft 152, 97–106.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V., Hrsg.), 2004: Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen; Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterungen, Bauweisen und Substrate, 62 S.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V., Hrsg.), 2005: Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege, 1–51.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V., Hrsg.), 2010: Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 2: Standortvorbereitung für Neupflanzungen, Pflanzgruben und Wurzelraumerweiterungen, Bauweisen und Substrate. 62 S.

FLL (Forschungsgesellschaft Landschaftsentwicklung, Landschaftsbau e.V., Hrsg.), 2015: Empfehlungen für Baumpflanzungen Teil 1: Planung, Pflanzarbeiten, Pflege. 64 S.

Fröhlich, H. J., 2005: Auswertung der Behandlungsergebnisse. In: Fröhlich, H. J. (Hrsg.) 2005: Vitalisierung von Bäumen. Monumente Publikationen der Deutschen Stiftung Denkmalschutz, Bonn, 81–88.

González-Guerrero, M.; Benabdellah, K.; Ferrol, N.; Azcón-Aguilar, C., 2009: Mechanisms Underlying Heavy Metal Tolerance in Arbuscular Mycorrhizas. In: Azcón-Aguilar, C. et al. (Hrsg.), 2009: Mycorrhizas-Functional Processes and Ecological Impact. Springer-Verlag, Berlin Heidelber, 107–122.

Graham, J. H. , 2000: Assessing costs of arbuscular mycorrhizal symbiosis in agroecosystems. In: Podila, G. K.; Douds Jr., D. D., (Hrsg.): Current Advances in Mycorrhizae Research, The American Phytopahthological Society Press, St. Paul, 127–140.

Guehl, J. M.; Garbaye, J., 1990: The effect of ectomycorrhizal status on carbon dioxide assimilation capacity, water-use efficiency and response to transplanting in seedlings of *Pseudotsuga menziesii* (Mirb.) Franco. Ann. Sci. For., 21, 551–563.

Högberg, M. N. et al., 2010: Quantification of effects of season and nitrogensupply on tree below-ground carbon transfer to ectomycorrhizal fungi and other soil organisms in a boreal pine forest. New Phytol. 187, 485– 493.

Kirscht, M., 2011: Rekultivierung von Tagebaufolgeflächen mit verschiedenen Bodenhilfsstoffen und Baumarten. Dissertation, Georg-August-Universität, Fakultät für Forstwissenschaften und Waldökologie, Göttingen, 430 S.

Kleber, M.; Eusterhues, K.; Keiluweit, M.; Mikutta, C.; Mikutta, R.; Nico, P. S., 2015: Mineral-organic associations:formation, properties, and relevance in soil environments. Advances in Agronomy, 130, 140 S.

König, P., 2019: mündliche Mitteilung, November 2019.

Kottke, I. (Hrsg.), 2016: Mykorrhiza – Pilz-Wurzel-Symbiosen. Von Netzwerken zum Nährstoffaustausch. Eine Einführung. Wikibooks. https://de.wikibooks.org/wiki/Mykorrhiza.

Kutscheidt, J., 1992: Schutzwirkung von Mykorrhizapilzen gegenüber Hallimaschbefall. AFZ-Der Wald 8, 381–385.

Kutscheidt, J., 2001: Vitalisierung von Altbäumen. Deutscher Gartenbau 36, 29–30.

Kutscheidt, J., 2004: Mykorrhiza-Impfstoffe: Auf die Qualität kommt es an. Baumzeitung, 4, 31–33.

Kutscheidt, J., 2019: Neue Mykorrhiza-Impfstoffe für hohe pH-Werte selektiert. Baumzeitung, 5, 52–53.

Lang, C., 2008: Diversität der Ektomykorrhizen in verschiedenen artenreichen Laubbaumbeständen im Nationalpark Hainich (Thüringen). Göttinger Forstwissenschaften, Band 1, Universitätsverlag Göttingen, 104 S.

Larsson, E.; Nilsson, R. H.; Kristiansson, E.; Ryberg, M.; Larsson, K.-H., 2005: Approaching the taxonomic affiliation of unidentified sequences in public databases – an example from the mycorrhizal fungi. BMC Bioinformatics 6, 178. https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=459872.

Leake, J.; Johnson, D.; Muckle, G.; Boddy, L.; Read, D., 2004: Networks of power and influence: the role of mycorrhizal mycelium in controlling plant communities and agroecosystems. Can. J. Bot. 82 (8), 1.016–1.045.

Lelley, J.; Schmitz, D., 1994: Die Mykorrhiza – Lebensgemeinschaft zwischen Pflanzen und Pilzen. Selbstverlag. Krefeld, 1–62.

Lelley, J. I., 1997: Einsatz von Mykorrhizapilzen in der Land- und Forstwirtschaft. Ökologie & Landbau 101, 33–38.

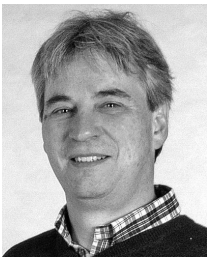
Padilla, F. M.; Pugnaire, F. I., 2007: Rooting depth and soil moisture control Mediterranean woody seedling survival during drought. Funct Ecol 21, 489–495.

Plassard, C.; Dell, B., 2010: Phosphorus nutrition in mycorrhizal trees. Tree Physiol 30, 1.129–1.139.
Posta, K.; Nguyen, H. D., 2019: Benefits of Arbuscular Mykorrhizal Fungi Application to Crop Production under Water Scarcity. Online first. https://www.intechopen.com/online-first/benefits-of-arbuscular-mycorrhizal-fungi-application-to-crop-production-under-water-scarcity.
Shah, F. et al., 2015: Ektomycorrhizal fungi decompose soil organic matter using oxidative mechanisms adapted from saprophytic ancestors. New Phytol. 209, 1.705–1.719.
Sigmund, K., 1995: Spielpläne. Zufall, Chaos und die Strategien der Evolution. Hoffmann und Campe, Hamburg.
Smith, S. E.; Read, D. J., 2010: Mycorrhizal Symbiosis, 3. Aufl., Academic Press, San Diego, 803 S.
Smith, S. E.; Facelli, E.; Pope, S.; Smithet, F. A., 2009: Plant performance in stressful environments: interpreting new and established knowledge of the roles of arbuscular mycorrhizas. Plant and Soil 326, 3–20.
Wantoch, R.; Busch, E., 2003: pers. Mitteilung, Oktober 2003.
Weltecke, K., 2020: Die Bedeutung zunehmender Trockenheitsperioden auf das Bewässerungsmanagement von Bäumen. In: Dujesiefken, D. (Hrsg.): Jahrbuch der Baumpflege 2020. Haymarket Media, Braunschweig, 195–212.
Willenborg, T., 2020: pers. Mitteilung, Januar 2020.
Winkelmann, G., 2007: Ecology of siderophores with special reference to the fungi. BioMetals 20, 379–392.

Autor

Dr. Jürgen Kutscheidt ist Leiter des Sachverständigenbüros „Der gesunde Baum!?“, Tönisvorst. Zudem ist er seit 1985 an der Forschung und Anwendung von Mykorrhiza-Impfstoffen beteiligt.

Sachverständigenbüro
Dr. Jürgen Kutscheidt
Hochstraße 16
47918 Tönisvorst
Tel. (02151) 820 7650
Kutscheidt@arcor.de



Jahrbuch der Baumpflege 2020, 24. Jg., S. 213–224, ISBN 978–3–87815–270–5