

Arbuskuläre Mykorrhizapilze als Bioindikatoren in Schweizer Landwirtschaftsböden

Fritz Oehl¹, Jan Jansa², Kurt Ineichen³, Paul Mäder⁴ und Marcel van der Heijden¹

¹Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, 8046 Zürich

²ETH Zürich, Institut für Agrarwissenschaften, 8315 Lindau

³Zürich-Basel Plant Science Center (PSC), Botanisches Institut der Universität Basel, 4056 Basel

⁴Forschungsinstitut für biologischen Landbau (FiBL), 5070 Frick

Auskünfte: Fritz Oehl, E-Mail: fritz.oehl@art.admin.ch, Tel. +41 44 377 73 21



Abb. 1 | Arbuskuläre Mykorrhiza-Symbiose führt oft zu besserer Nährstoffaufnahme, erhöhtem Wachstum und früherem Blühen der Pflanzen. Links: Rotklee ohne AM-Pilze in Wurzeln und Wurzelbereich, rechts: Boden geimpft mit AM-Pilzen zur zeitgleichen Aussaat. (Foto: ART)

Einleitung

Bereits im 19. Jahrhundert wurden die positiven Wirkungen der sogenannten Arbuskulären Mykorrhizapilze (AM-Pilze) auf das Pflanzenwachstum erkannt. Heute betrachtet man sie als die am weitesten verbreitete Symbiose: Über 80 Prozent der Landpflanzen können eine Symbiose mit diesen Pilzen eingehen. Bisher sind weltweit etwa 230 AM-Pilzarten bekannt.

Die meisten Acker- und Wiesenpflanzen sind mit einer Vielzahl von AM-Pilzen vergesellschaftet. AM-Pilze gehören zu den *Glomeromycota* (Knäuel- oder Arbuskelpilze), benannt nach der in dieser Pilzabteilung erst entdeckten und häufigsten Gattung *Glomus*. Eine andere bekannte Gruppe von Mykorrhizapilzen sind die Ektomykorrhizapilze (z. B. Steinpilze, *Basidiomycota*), die zum Beispiel mit mitteleuropäischen Waldbäumen in sehr artspezifischer Symbiose leben.

Die AM-Pilze haben vielfältige Funktionen in Ökosystemen. Zum einen spielen sie bei der Nährstoffaufnahme und -weitergabe an die Pflanzen eine zentrale Rolle, was vor allem für Phosphor (P) (Jansa *et al.* 2005, Tchabi *et al.* 2010), aber für weitere Nährelemente (z. B. N, K, Zn) gilt. Unter N-Mangel quantifizierten Mäder *et al.* (2000) den durch AM-Hyphen aufgenommenen Anteil auf bis zu 40 Prozent. Bei Phosphor-Mangel können Pflanzen bis zu 90 Prozent des P über AM-Pilze aufnehmen. Vor allem Kleearten profitieren von den AM-Pilzen, da Klee einen hohen P-Bedarf hat (Abb. 1). Weiterhin kann vor allem der Befall von Pflanzen durch Wurzelpathogene und -schädlinge vermindert werden. Mykorrhizierte Pflanzen haben oft eine bessere Wasserversorgung (vor allem während und nach kurzen Trockenperioden, z. B. Neumann und George 2004). Durch Lebendverbauung fördern sie die Strukturbildung der Böden, was in der Regel zu einem höheren Erosionsschutz, besserer Wasserinfiltration und -speicherung und höheren Pflanzenaufaufraten führt (z. B. Rillig und Mummey 2006; Schmid *et al.* 2008). Durch das engmaschige Pilzfadengeflecht können Nährstoffe auch vor Auswaschung geschützt werden (van der Heijden 2010). Die Vielfalt dieser Pilze kann einen wichtigen Beitrag zur Biodiversität und Produktivität von Wiesengesellschaften leisten (van der Heijden *et al.* 1998).

Die ökologisch und agronomisch bedeutsamen Funktionen vieler AM-Pilze in Böden sind noch wenig erforscht. Es wird erwartet, dass diese Pilze je nach Symbiose-Partner, Ökosystem und Standort ein recht unterschiedliches Leistungspotenzial haben. Dieser Artikel hat deshalb zum Ziel, die erst in den letzten zwölf Jahren durchgeführten AM-Pilz-Biodiversitätsstudien zusammen zu fassen und zu prüfen, ob diese Pilze allenfalls als Bioindikatoren in Agrarökosystemen geeignet sind. Bioindikatoren, auch *Indikator-* oder *Zeigerarten* genannt, sind Lebewesen, die auf Einflüsse des Menschen mit der Veränderung der Lebensfunktionen oder ihres Vorkommens/Fehlens reagieren (z. B. Zeigerpflanzen, oder gewisse Flechtenarten, die als Indikatoren für Luftverunreinigungen benutzt werden). AM-Pilze scheinen besonders geeignet als Bio-, Boden- und Landnutzungsindikatoren zu sein, da diese Pilzgruppe überschaubar klein ist, häufige und seltene Arten enthält und in allen von Pflanzen besiedelten Ökosystemen wichtige Funktionen übernimmt.

Material und Methoden

Zwischen 1999 und 2011 wurde in der Schweiz eine Reihe von Studien zur Erfassung der AM-Pilz-Biodiversität in landwirtschaftlichen Böden durchgeführt. Alle

Zusammenfassung

Die meisten Nutz- und Wildpflanzen bilden eine Symbiose mit einer speziellen Gruppe von Bodenpilzen, den arbuskulären Mykorrhizapilzen (AM-Pilze). AM-Pilze übernehmen in allen von Pflanzen besiedelten Ökosystemen wichtige Funktionen. Sie bilden ein engmaschiges Pilzfadengeflecht im Boden und geben lebensnotwendige Nährstoffe aus dem Boden an die Pflanzen weiter und schützen diese gegen Stress und Trockenheit. Sie reduzieren Nährstoffverluste aus dem Boden und können durch Lebendverbauung Erosion vermindern und somit die Stabilität von Ökosystemen erhöhen. AM-Pilze scheinen als Bioindikatoren besonders geeignet zu sein, da diese Pilzgruppe mit bisher bekannten 230 Arten überschaubar klein ist und sowohl häufige als auch seltene Arten enthält. In der Schweiz sind bisher mehr als 100 AM-Pilze nachgewiesen worden. Viele dieser Pilze reagieren stark auf die Landnutzungsintensität, die Bewirtschaftungsform und/oder die Bodenbeschaffenheit (z. B. *Glomus sinuosum* und *Acaulospora paulinae*). Diese spezialisierten AM-Pilzarten sind deshalb sehr gut geeignet als Bioindikatoren. Andere Arten kommen in fast allen Böden vor und können als Generalisten bezeichnet werden (z. B. *Gl. fasciculatum* und *Archaeospora trappei*). Unsere Studien zeigen, dass sich eine Vielzahl von AM-Pilzen als Bioindikatoren in landwirtschaftlich genutzten Böden eignen.

drei Grossregionen der Schweiz wurden einbezogen: Alpen, Mittelland und Jura. Die erste Studie befasste sich mit den Auswirkungen der Bodenbearbeitung in Ackerböden auf die Pilzgemeinschaften in einer Parabraunerde auf Moräne am Standort Tänikon, Thurgau, der Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART (Jansa *et al.* 2002, 2003). Eine zweite Studie zielte auf die Auswirkungen von biologischem und konventionellem Anbau auf die Pilz-Gemeinschaften in einer Parabraunerde auf Löss im DOK-Versuch in Therwil, Baselland (Oehl *et al.* 2004). Gleichzeitig wurden in der Umgebung des DOK-Versuchs extensiv genutzte Wiesen und intensiv genutzte Maisäcker ohne Fruchtfolge in die Studie mit einbezogen, um bei gleichen Böden einen möglichst grossen Gradienten in der Landnutzungsintensität abzudecken (Oehl *et al.* 2003, 2009). Zusätzlich wurde die ver-

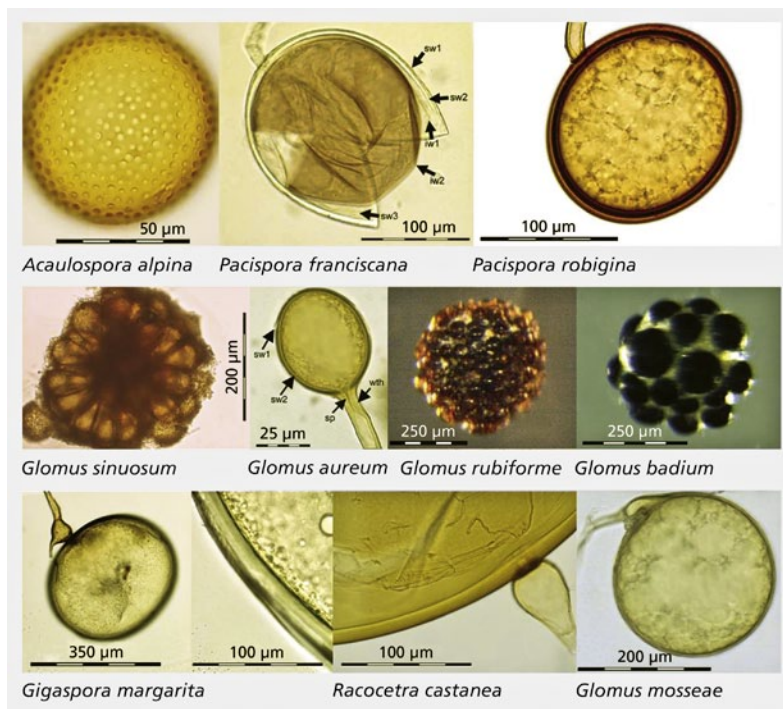


Abb. 2 | Sporen einiger ausgewählter Arbuskulärer Mykorrhizapilze: *Ac. alpina* ist weit verbreitet auf den hochmontanen bis hochalpinen Rasen bei pH < 7,0. *Pa. robigina* ist ein typischer Vertreter der nivalen Kalkschuttfuren, während *Pa. franciscana* bei pH > 6,5 gelegentlich auch in tieferen Lagen bis in den submontanen Bereich gefunden werden kann. *Gl. sinuosum* ist in Böden mit pH > 6,5 vom Talgebiet bis in die mittlere montane Höhenstufe zu finden, während die Verbreitung von *Gl. rubiforme* bis in die hochalpine Stufe reicht. Beide genannten Arten sind auch aus warmen Klimaten bekannt. *Gl. badium* hat in Mitteleuropa ein ähnliches Verbreitungsmuster wie *Gl. sinuosum*, ist aber auch sehr häufig in Äckern mit Minimalbodenbearbeitung zu finden und scheint beschränkt auf kühlere Klimazonen. *Gl. aureum* ist einer der am weitesten verbreiteten Pilze im europäischen Grasland unterhalb der Waldgrenze. In Äckern wird dieser Pilz erst bei einseitiger Nutzung und häufiger Bodenbearbeitung zurückgedrängt. *Gl. mosseae* ist ein typischer Vertreter von Ackerstandorten mit pH > 6,0, gilt aber als einer der Generalisten, da er auch in Wiesen zu finden ist und weltweite Verbreitung hat. Allerdings scheint er in der al-

pinen Stufe vollständig zu fehlen. *Gi. margarita* ist ein Vertreter wärmerer Klimate. Bei uns ist diese Art aber auch heimisch, und zwar vorzugsweise auf sauren Böden, in Glatthaferwiesen und nachhaltigen Ackerbausystemen mit fast ständiger Bodenbedeckung. *Ra. castanea* reagiert empfindlich auf intensive Bodenbearbeitung. (Fotos: ART).

Die vertikale Verteilung der AM-Pilze in diesen Böden untersucht (Oehl *et al.* 2005b), sowie die Studie auf mehrere Bodentypen und Höhenstufen ausgeweitet (Oehl *et al.* 2010a), um den Einfluss des Bodens auf die Pilz-Gemeinschaften besser einschätzen zu können. Die Resultate der einzelnen Studien werden im Folgenden zusammengefasst.

Den Studien liegen zumeist morphologische Bestimmungen der Sporenpopulationen zugrunde (z. B. Oehl *et al.* 2003, 2010a), oder es wurden molekularbiologische Analysen direkt an der aus den Pflanzenwurzeln extrahierten DNA der AM-Pilze vorgenommen (Jansa *et al.* 2003). Bisher unbekannte Pilze wurden mit Hilfe von kombinierten Analysen möglichst umfassend charakterisiert (z. B. Jansa *et al.* 2002, Oehl *et al.* 2005a, 2006, 2010, 2011).

Resultate und Diskussion

Verbreitung der AM-Pilze in der Schweiz

Insgesamt wurden mehr als 100 der weltweit etwa 230 publizierten AM-Pilze in Schweizer Landwirtschaftsböden gefunden. Davon gelten mehrere Arten weiterhin als unbekannt, während mehr als zehn neue Arten in den letzten zehn Jahren beschrieben wurden (z. B. Oehl und Sieverding 2004, Gamper *et al.* 2009, Oehl *et al.* 2005a, 2006, 2010b, 2011). Für viele der Arten wurden

Daten der biogeographischen Verbreitung in der Schweiz gesammelt. Sporen einiger ausgewählter AM-Pilzarten sind in Abbildung 2 gezeigt.

Intensive Landnutzung mindert die AM-Pilz-Diversität

Mehrere Studien haben gezeigt, dass die Landnutzungsintensität und das Anbausystem einen grossen Einfluss auf die AM-Pilz-Diversität und die AM-Pilz-Gemeinschaften haben (z. B. Abb. 3, Oehl *et al.* 2003). Während in Graslandböden eine hohe Artenvielfalt nachgewiesen werden kann, enthalten intensiv genutzte Ackerböden oft deutlich weniger Arten. Am Standort Tänikon hatten Minimalbodenbearbeitungssysteme und besonders pfluglose Systeme eine andere AM-Pilz-Gemeinschaft als Systeme mit jährlichem Pflugeinsatz (Jansa *et al.* 2002, 2003). Vor allem *Gigaspora*-, *Scutellospora*-, *Racocetra*- und *Cetraspora*-Arten scheinen unter häufiger Bodenbearbeitung zu leiden, weil diese Arten zerschnittene Pilzfäden nur sehr beschränkt wieder zu verknüpfen vermögen (de la Providencia *et al.* 2005). Unter reduzierter Bodenbearbeitung auf einer Kalkrendzina in Baselland wurde hingegen eine ähnlich hohe Artenzahl und ein ebenso hohes Mykorrhizierungspotential gefunden wie in angrenzenden Naturwiesen (Oehl *et al.* 2010a).

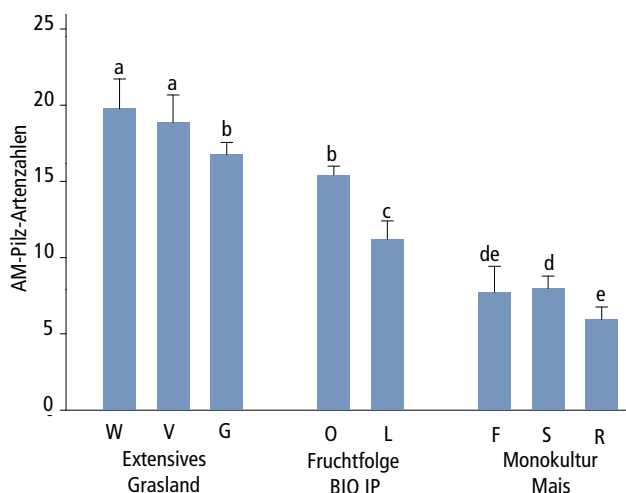


Abb. 3 | Artenreichtum von AM-Pilzen an neun Standorten im Raum Basel. Die AM-Pilz-Artenzahlen nahm in der Reihenfolge extensiv bewirtschaftete Naturwiesen (W, V, G), Bio-Suisse (Bio-land; organisch-biologisches Verfahren des DOK-Versuchs in Therwil, BL; 7-jährige Fruchfolge; O), IP-Suisse (7-jährige Fruchfolge; L) und Mais-Monokulturen (Standorte F, S, R) deutlich ab (Oehl et al. 2003). Mittelwerte und Standardabweichungen von vier Feldwiederholungen pro Standort sind gezeigt, sowie die statistischen Unterschiede zwischen den Verfahren nach Varianzanalyse und Fisher's-LSD-Test ($P < 0,05$) durch verschiedene Buchstaben über den Säulen.

Bioackerbau fördert AM-Pilzvielfalt

Bei gleicher siebenjähriger Fruchtfolge wurde unter biologischer Bewirtschaftung im DOK-Langzeitversuch in Therwil (BL) eine etwas höhere Artenvielfalt gefunden als im konventionellen Anbau nach IP-Richtlinien (Oehl et al. 2004). Die Unterschiede in den AM-Pilzgemeinschaften konnten vor allem auf die geringere Düngung in den biologischen Verfahren zurückgeführt werden, können aber auch mit dem höheren Unkrautbesatz und der höheren Unkrautvielfalt in den Bio-Parzellen zusammenhängen (Tab. 1). Dabei reagierten Nicht-*Glomus*-Arten deutlich empfindlicher auf die Bewirtschaftung als die *Glomus*-Arten (Tab. 1, Abb. 4). Interessanterweise haben alle biologischen und auch die IP-Verfahren nur etwas geringere Diversitätszahlen als die umliegenden Naturwiesen (Oehl et al. 2003, 2004). In der Schweizer wie in einer niederländischen Studie waren sich die AM-Pilzgemeinschaften der Wiesen und des biologischen Anbaus deutlich ähnlicher als die der Wiesen und konventionell bewirtschafteten Äcker (Oehl et al. 2003, Verbruggen et al. 2010; Abb. 5). Eine hohe AM-Pilzvielfalt mit vielen im Frühjahr, im Herbst und ganzjährig aktiven AM-Pilzen (Oehl et al. 2009), interpretieren wir als einen erhöhten biologischen Puffer und eine höhere biologi-

Tab. 1 | Lineare Regressionen zwischen ausgewählten Bodenparametern und den Sporendichten im DOK-Versuch (Therwil, BL) gefundener AM-Pilzarten (Oehl et al. 2004). * zeigt signifikante Zusammenhänge zwischen dem jeweiligen Bodenparameter und den Sporendichten des jeweiligen Pilzes; den Daten liegen Ergebnisse aus fünf Anbauverfahren und vier Feldwiederholungen pro Verfahren zugrunde).

AMF species	pH (H ₂ O)	Humus-Gehalt	Verfügbare P-Gehalt	Verfügbare K-Gehalt	Anzahl Unkrautarten
Glomus species					
<i>Glomus diaphanum</i>	-0,26	-0,48*	0,51*	0,42	0,26
<i>G. caledonium</i>	-0,36	-0,21	0,56*	0,63*	-0,36
<i>G. etunicatum</i>	0,19	0,09	-0,33	-0,36	0,34
<i>G. fasciculatum</i>	0,06	0,09	-0,16	-0,14	0,19
<i>G. mosseae</i>	0,28	0,08	-0,05	-0,1	0,06
<i>Glomus sp. isolate BR9</i>	0,1	0,26	-0,14	-0,09	0,2
<i>G. geosporum</i>	0	0,08	-0,09	0,16	-0,4
<i>G. albidum</i> & <i>P. occultum</i>	0,29	-0,19	-0,27	0,46	-0,25
<i>G. constrictum</i>	0,37	0,31	0,08	0,03	-0,03
<i>G. invermaium</i>	0,19	-0,03	-0,2	-0,3	-0,37
Nicht Glomus species					
<i>Pacispora dominikii</i>	0,62*	0,21	-0,51*	-0,2	0,61*
<i>Scutellospora calospora</i>	0,1	0,24	-0,48*	-0,55*	0,32
<i>Cetranspora pellucida</i>	-0,27	-0,28	-0,48*	-0,58*	0,48*
<i>Acaulospora paulinae</i>	0,09	-0,14	-0,62*	-0,67*	0,4
<i>A. thomii</i>	0,13	-0,24	-0,49*	-0,55*	0,43
<i>A. laevis</i>	0,04	-0,15	-0,53*	-0,57*	0,38
<i>A. longula</i>	0,23	0,26	-0,70*	-0,58*	0,56*
<i>A. scrobiculata</i>	0,21	-0,42	-0,66*	-0,57*	0,39

sche Bodenfruchtbarkeit in diesen Anbausystemen. Dies ist ganz im Sinne der ureigenen Ziele des ökologischen Landbaus, mit Hilfe eines belebteren Bodens die Nachhaltigkeit zu verbessern.

Bodenbeschaffenheit beeinflusst das AM-Pilzarten-Spektrum

Die Studien aus der Region Basel haben gezeigt, dass unterschiedliche Böden einer Landschaft zwar jeweils eine hohe AM-Pilzvielfalt besitzen können, dass sich aber AM-Pilzgemeinschaften in verschiedenen Böden deutlich voneinander unterscheiden (Oehl *et al.* 2010a). In sauren Wiesenböden gibt es in der Regel eine deutlich höhere Gattungsdiversität als in kalkreichen (Oehl *et al.* 2003, 2005b, 2010a; Sýkorová *et al.* 2007a). Auffällig war vor allem die Absenz bzw. äusserst schwache Präsenz der *Acaulospora*, *Scutellospora*, *Gigaspora* und *Cetraspora*-Arten in kalkreichen Böden, in denen neben vielen *Glomus*-Arten zum Beispiel auch *Pacispora dominikii* deutlich präsenter war. Von den 61 in der Region gefundenen AM-Pilzen wurden nur etwa ein Viertel (14 Arten) als «Generalisten» eingestuft. Sie waren in allen Böden in mehr oder weniger gleichen Sporendichten nachgewiesen worden. Die Mehrzahl der Arten (32) waren aber eher «Spezialisten», die als Charakterarten für bestimmte

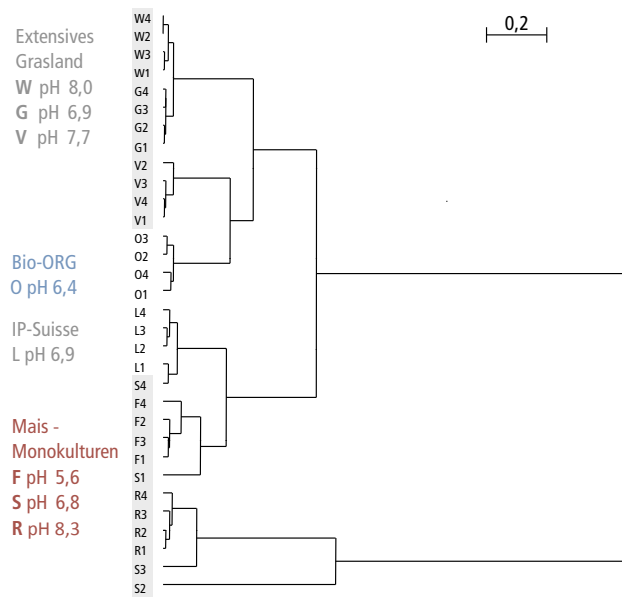


Abb. 5 | Eine hierarchische Cluster-Analyse für die Ähnlichkeiten von AM-Pilzgemeinschaften landwirtschaftlich genutzter Lössböden in der Region Basel ergab eine deutliche Gruppierung nach Nutzungsintensität. Die neun Standorte sind in Abbildung 3 erklärt. An jedem der Standorte wurden vier Teilparzellen (1–4) beprobt und untersucht (Oehl *et al.* 2003).

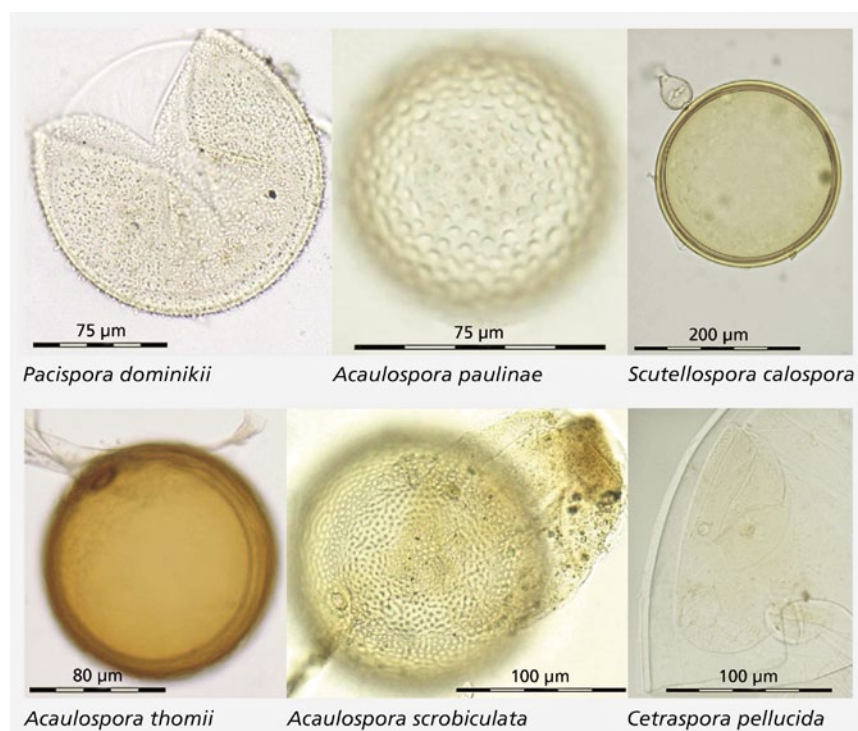


Abb. 4 | Beispiele für AM-Pilzarten (hier präsentiert mit ihren Dauersporen), die besonders empfindlich auf häufigen Pflugeinsatz (*Scutellospora calospora*, *Cetraspora pellucida* und *Acaulospora paulinae*; Jansa *et al.* 2002) oder auf ackerbauliche Nutzung mit höherer Düngung im Vergleich zu den organisch-biologisch und biologisch-dynamisch bewirtschafteten Verfahren des DOK-Versuchs reagierten (alle dargestellten Arten; Oehl *et al.* 2004). (Fotos: Fritz Oehl, ART).

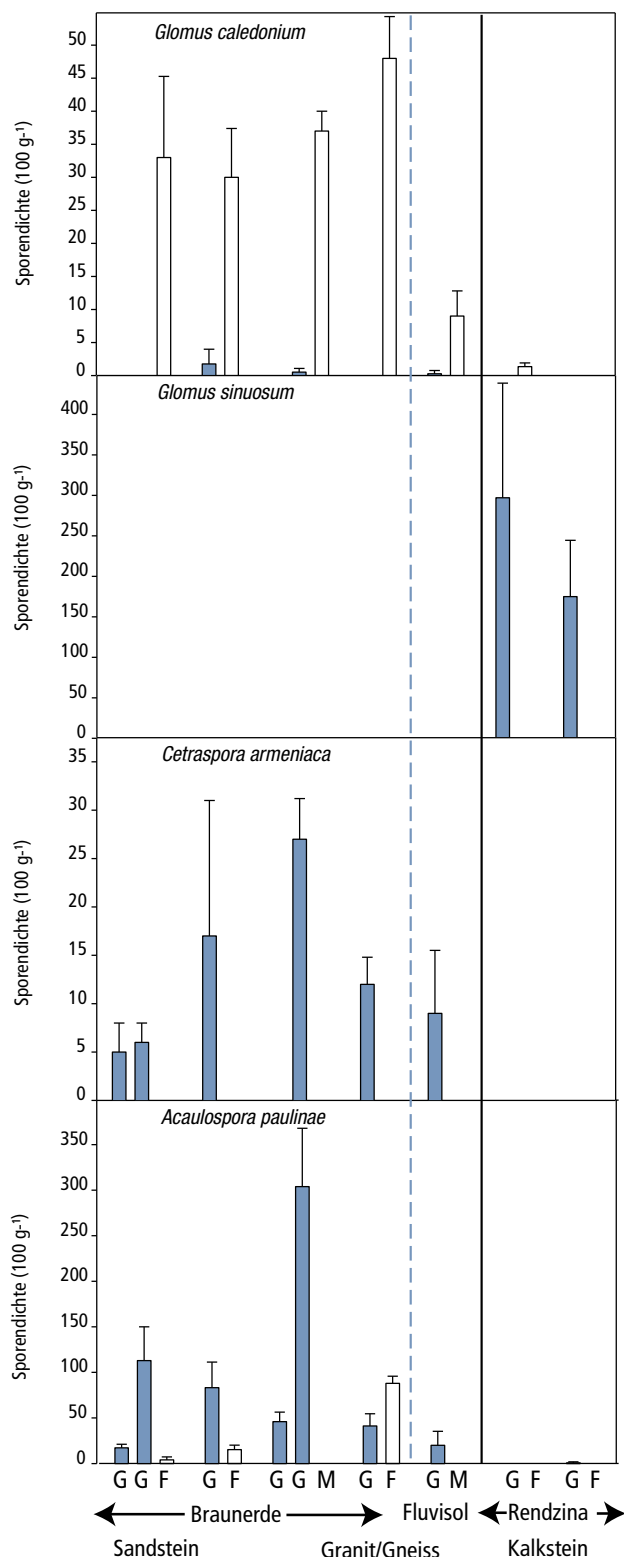


Abb. 6 | Spezialisten: *Glomus caledonium*, *Gl. sinuosum*, *Cetraspora armeniaca* und *Acaulospora paulinae* mit Potenzial als Bio-, Boden- und/oder Landnutzungsindikatoren. Je nach Landnutzungssystem (permanentes Grasland G, Äcker mit weiten Fruchtfolgen F, und Mais-Monokulturen M) und Boden wurden sie zahlreich, selten oder überhaupt nicht nachgewiesen (aus Oehl et al. 2010a). Sporendichten sind als Mittelwerte mit Standardfehler von vier Feldwiederholungen pro Standort dargestellt.

Nutzungsintensitäten und/oder Bodenformen bezeichnet werden können (Oehl et al. 2010a). Je neun Arten wurden boden- oder bewirtschaftungsspezifisch eingestuft, und bei weiteren 14 Arten wurde eine Wechselwirkung zwischen Boden und der Landbewirtschaftung festgestellt. Beispiele für «Spezialisten» sind in der Abbildung 6 gezeigt. Während *Gl. caledonium* fast ausschließlich in sauren Äckern zu finden ist und sogar eher positiv auf eine höhere P-Düngung zu reagieren scheint (Tab. 1), wurde *Gl. sinuosum* nur in Wiesen mit höherem Boden-pH gefunden (Abb. 6). *Cetraspora armeniaca* ist dagegen charakteristisch für saure Wiesen. *Acaulospora paulinae* schliesslich kommt ebenfalls nur in sauren Böden vor, wird zum Teil in Ackerböden mit weiten Fruchtfolgen und reduzierter Düngung gefördert, fehlt aber gänzlich in vergleichbaren Böden, die unter intensiv geführten Mais-Monokulturen ohne ganzjährige Bodenbedeckung bewirtschaftet wurden.

Auch die Höhenlage prägt die AM-Pilzgemeinschaften

Eine über fünf Regionen der Schweizer Alpen angelegte Studie zeigte, dass sich die AM-Pilzgemeinschaften auch mit der Höhenstufe ändern. Während *Pacispora*-Arten vor allem auf den alpinen und nivalen Kalkschuttfuren zu finden sind (Oehl und Sieverding 2004), wurden *Ambispora*-Arten vor allem in hochmontanen Rasen nachgewiesen (Spain et al. 2006). Auch das Auftreten von *Acaulospora* und *Diversispora*-Arten nimmt relativ mit der Höhe zu (Oehl et al. 2006, Sýkorová et al. 2007b).

AM-Pilze als geeignete Boden- und Bioindikatoren

Eine wichtige Erkenntnis unserer Studien ist, dass landwirtschaftlich genutzte Böden durch ihre AM-Pilzgemeinschaften charakterisiert werden können. Durch die Präsenz oder Absenz von Charakterarten können die AM-Pilzgemeinschaften als Boden- und Bioindikatoren genutzt werden (Oehl et al. 2010a). Das gilt für Ökosysteme der gemässigten und kälteren (z. B. Palenzuela et al. 2010), aber auch für wärmere Klimazonen (z. B. Tchabi et al. 2008, 2009; Goto et al. 2011). Wir nehmen an, dass Ackerstandorte mit intensiver und einseitiger Nutzung, und ganz besonders gemüsebaulich genutzte Flächen mit mehreren Kulturen pro Jahr defizitär hinsichtlich AM-Pilzvielfalt und Mykorrhizabildung sind. An solchen Standorten können ökologische AM-Pilzgruppen verloren gehen, wie wir es in Mais und auch Rebschulen beobachtet haben (z. B. Oehl et al. 2003, 2005b, 2009). Um standortstypische Arten wieder zurückzuführen, sind Massnahmen wie Reduktion der Bodenbearbeitungsintensität, Umstellung zum ökologischen Landbau und Anbausysteme mit limitiertem Düngereinsatz und vielfältiger Fruchtfolge angezeigt.

Schlussfolgerungen

Mit etwa 230 AM-Pilzarten weltweit und mehr als 100 in der Schweiz sind die AM-Pilze eine überschaubare Gruppe von Bodenpilzen. Viele dieser Pilze sind weltweit verbreitet, andere sind ökosystem- und bodenspezifisch oder reagieren stark auf die Art der Landnutzung und die Bewirtschaftungsintensität. Die spezifischen Pilze eignen sich als Indikatoren für die Bodenbeschaffenheit

oder die Bewirtschaftungsintensität. Durch gezielte Massnahmen könnte man standortstypische bzw. besonders effektive Pilze besonders fördern. Biologisch und integriert ausgerichteter Landbau mit weiter Fruchtfolge und schonender Bodenbearbeitung fördert die Vielfalt der AM-Pilze. Allerdings braucht es mehr Detailkenntnisse, um das ökologische Leistungspotential dieser Pilze zum Beispiel für die Pflanzenernährung und die Bodenstrukturbildung besser auszuschöpfen. ■

Literatur

- De la Providencia I.E., de Souza F.A., Fernández F., Delmas N.S. & Declerck S., 2005. Arbuscular mycorrhizal fungi reveal distinct patterns of anastomosis and hyphal healing mechanisms between different phylogenetic groups. *New Phytologist* **165**, 261–271.
- Gamper H. A., Walker C. & Schüßler A., 2009. *Diversispora celata* sp. nov.: molecular ecology and phylotaxonomy of an inconspicuous arbuscular mycorrhizal fungus. *New Phytologist* **182**, 495–506.
- Goto B.T., Silva G.A., Maia L.C., Souza R.G., Coyne D., Tchabi A., Lawouin L., Hountondji F. & Oehl F., 2011. *Racocetra tropicana*, a new species in the Glomeromycetes from tropical areas. *Nova Hedwigia* **92**, 69–82.
- Jansa J., Mozafar A., Anken T., Ruh R., Sanders I.R. & Frossard E., 2002. Diversity and structure of AMF communities as affected by tillage in a temperate soil. *Mycorrhiza* **12**, 225–234.
- Jansa J., Mozafar A., Kuhn G., Anken T., Ruh R., Sanders I.R. & Frossard E., 2003. Soil tillage affects the community structures of mycorrhizal fungi in maize roots. *Ecological Applications* **13**, 1164–1176.
- Jansa J., Mozafar A. & Frossard E., 2005. Phosphorus acquisition strategies within arbuscular mycorrhizal fungal community of a single field site. *Plant and Soil* **276**, 163–176.
- Mäder P., Vierheilig H., Streitwolf-Engel R., Boller T., Frey B., Christie P. & Wiemken A., 2000. Transport of 15-N from a soil compartment separated by a polytetrafluoroethylene membrane to plant roots via the hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi. *New Phytologist* **146**, 155–161.
- Neumann E. & George E., 2004. Colonisation with the arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus mosseae* (Nicol. & Gerd.) enhanced phosphorus uptake from dry soil in *Sorghum bicolor* (L.). *Plant and Soil* **261**, 245–255.
- Oehl F. & Sieverding E., 2004. *Pacispora*, a new vesicular-arbuscular mycorrhizal fungal genus in the Glomeromycetes. *J. Applied Botany and Food Quality* **78**, 72–82.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Boller T. & Wiemken A., 2003. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Applied and Environmental Microbiology* **69**, 2816–2824.
- Oehl F., Sieverding E., Mäder P., Dubois D., Ineichen K., Boller T. & Wiemken A., 2004. Impact of long-term conventional and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Oecologia* **138**, 574–583.
- Oehl F., Redecker D. & Sieverding E., 2005a. *Glomus badium*, a new sporocarpic arbuscular mycorrhizal fungal species from European grasslands of higher soil pH. *J. Applied Botany and Food Quality* **79**, 38–43.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E.-A., Boller T. & Wiemken A., 2005b. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist* **165**, 273–283.
- Oehl F., Sýkorová Z., Redecker D., Wiemken A. & Sieverding E., 2006. *Acaulospora alpina*, a new arbuscular mycorrhizal fungal species characteristic for high mountainous and alpine regions of the Swiss Alps. *Mycologia* **98**, 286–294.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Mäder P., Wiemken A. & Boller T., 2009. Distinct sporulation dynamics of arbuscular mycorrhizal fungal communities from different agroecosystems in long-term microcosms. *Agriculture, Ecosystems and Environment* **134**, 257–268.
- Oehl F., Laczko E., Bogenrieder A., Stahr K., Bösch R., van der Heijden M.G.A. & Sieverding E., 2010a. Soil type and land use intensity determine the composition of arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Soil Biology & Biochemistry* **42**, 724–738.
- Oehl F., Jansa J., de Souza F.A. & Silva G.A., 2010b. *Cetraspora helvetica*, a new ornamented species in the Glomeromycetes from Swiss agricultural fields. *Mycotaxon* **114**, 71–84.
- Oehl F., Sýkorová Z., Błaszczowski J., Sánchez-Castro I., Coyne D., Tchabi A., Lawouin L., Hountondji F.C.C. & Silva G.A., 2011. *Acaulospora sieverdingii*, an ecologically diverse new fungus in the Glomeromycota, described from lowland temperate Europe and tropical West Africa. *J. Applied Botany and Food Quality* **84**, 47–53.
- Palenzuela J., Barea J.M., Ferrol N., Azcón-Aguilar C. & Oehl F., 2010. *Entrophospora nevadensis*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from Sierra Nevada National Park (southeastern Spain). *Mycologia* **102**, 624–632.
- Rillig M.C. & Mummey D.L., 2006. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytologist* **171**, 41–53.
- Spain J.L., Sieverding E. & Oehl F., 2006. *Appendicispora*, a new genus in the arbuscular mycorrhizal-forming Glomeromycetes, with a discussion of the genus *Archaeospora*. *Mycotaxon* **97**, 163–182.
- Sýkorová Z., Ineichen K., Wiemken A. & Redecker D., 2007a. The cultivation bias: different communities of arbuscular mycorrhizal fungi detected in roots from the field, from bait cultures transplanted to the field, and a greenhouse trap experiment. *Mycorrhiza* **18**, 1–14.
- Sýkorová Z., Wiemken A. & Redecker D., 2007b. Co-occurring *Gentiana verna* and *Gentiana acaulis* and their neighboring plants in two Swiss upper montane meadows harbor distinct arbuscular mycorrhizal fungal communities. *Applied and Environmental Microbiology* **73**, 5426–5434.
- Schmid T., Meyer J. & Oehl F., 2008. Integration of mycorrhizal inoculum in high alpine revegetation. In: *Mycorrhiza Works*. (Eds Feldmann F., Kapulnik Y., Baar J). Proceedings of the International Symposium «Mycorrhiza for Plant Vitality» and the Joint Meeting of Working Groups 1–4 of COST Action 870. Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, Braunschweig, Germany. 278–288.
- Tchabi A., Coyne D., Hountondji F., Lawouin L., Wiemken A. & Oehl F., 2008. Arbuscular mycorrhizal fungal communities in sub-Saharan savan-

Riassunto

Funghi micorrizici arbuscolari quali indicatori biologici nei terreni agricoli svizzeri

La maggior parte delle piante coltivate e selvatiche cresce in simbiosi con un gruppo speciale di funghi, i funghi micorrizici arbuscolari (funghi MA). I funghi MA svolgono funzioni importanti in tutti gli ecosistemi popolati da vegetali. Per mezzo delle ife miceliali si estendono nel terreno e trasferiscono alle piante i nutrienti vitali ivi presenti, proteggendole da stress e siccità. Riducono le perdite di sostanze nutritive dal terreno e possono limitare l'erosione attraverso l'inverdimento, accrescendo la stabilità degli ecosistemi. I funghi MA sembrano particolarmente adatti anche come bioindicatori dato che questo gruppo di funghi, che conta attualmente 230 specie, è relativamente piccolo e contiene specie sia comuni che rare. In Svizzera ne sono state finora rilevate oltre 100 specie. Molti di questi funghi reagiscono in maniera considerevole all'intensità della lavorazione del terreno, alla forma di coltivazione e/o alle proprietà del suolo (p.es. *Glomus sinuosum* e *Acaulospora paulinae*). Queste specie di funghi MA specializzate sono quindi molto adatte per essere impiegate come indicatori biologici. Altre specie sono presenti in quasi tutti i terreni e possono essere indicate come specie generiche (p.es. *Gl. fasciculatum* e *Archaeospora trappei*). Dai nostri studi è emerso che una moltitudine di funghi MA si addicono a essere utilizzate quali indicatori biologici nei terreni usufruiti a scopo agricolo.

Summary

Arbuscular mycorrhizal fungi as bio-indicators in Swiss agricultural soils

The majority of agricultural crops as well as wild plants form a symbiotic relationship with a special group of soil fungi, the arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi). AM fungi perform important functions in all ecological systems colonised by plants. They form a dense network of fungal hyphal mycelia in the soil and transmit vital nutrients from the soil to the plants and protect them against stress and drought. AM fungi have the ability to reduce nutrient loss from the soil and they can, through biological stabilisation of the soil structure, reduce erosion and thus contribute to ecosystem stability. AM fungi would appear to be particularly suitable as bioindicators because this group of fungi is small enough to be manageable and includes both common and rare species. To date more than 100 AM fungi have been identified in Switzerland. Many of these fungi respond specifically to land use intensity, cultivation practices and/or soil type (e.g. *Glomus sinuosum* and *Acaulospora paulinae*). These specialised AM fungi are therefore highly suitable as bioindicators. Other species occur in almost every kind of soil and may be described as generalists (e.g. *Gl. fasciculatum* and *Archaeospora trappei*). Our studies show that a large number of AM fungi are suitable as bioindicators in agricultural soils.

Key words: arbuscular mycorrhizal fungi, biodiversity, bioindicators, sustainable agriculture, organic farming, conservation tillage.

nas of Benin, West Africa, as affected by agricultural land use intensity and ecological zone. *Mycorrhiza* **18**, 181–195.

- Tchabi A., Hountondji F., Lawouin L., Coyne D. & Oehl F., 2009. *Racocetra beninensis* from sub-Saharan savannas: a new species in the Glomeromycetes with ornamented spores. *Mycotaxon* **110**, 199–209.
- Tchabi A., Coyne D., Hountondji F., Lawouin L., Wiemken A. & Oehl F., 2010. Efficacy of indigenous arbuscular mycorrhizal fungi for promoting white yam (*Dioscorea rotundata*) growth in West Africa. *Applied Soil Ecology* **45**, 92–100.
- van der Heijden M.G.A., 2010. *Mycorrhizal fungi reduce nutrient loss*. *Ecology* **91**, 1163–1171.
- van der Heijden M.G.A., Klironomos J.N., Ursic M., Moutoglou P., Streitwolf-Engel R., Boller T., Wiemken A. & Sanders F.R., 1998. Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* **396**, 69–72.
- Verbruggen E., Rölling W.F.M., Gamper H.A., Kowalchuk G.A., Verhoeff H.A. & van der Heijden M.G.A., 2010. Positive effects of organic farming on below-ground mutualists: large-scale comparison of mycorrhizal fungal communities in agricultural soils. *New Phytologist* **186**, 968–979.