

Arbuskuläre Mykorrhizapilze als Bioindikatoren in Landwirtschaftsböden

Fritz Oehl¹, Hans-Rudolf Oberholzer¹, Marcel G. A. van der Heijden¹, Endre Laczko², Jan Jansa³ und Simon Egli⁴

¹Agroscope, Institut für Nachhaltigkeitswissenschaften INH, 8046 Zürich, Schweiz

²Universität Zürich, Functional Genomics Center, 8057 Zürich, Schweiz

³Academy of Sciences of the Czech Republic, 14220 Prag 4 – Krc, Tschechische Republik

⁴Eidgenössische Forschungsanstalt für Wald, Schnee und Landschaft WSL, 8903 Birmensdorf, Schweiz

Auskünfte: Fritz Oehl, E-Mail: fritz.oehl@agroscope.admin.ch



Abb. 1 | Landwirtschaftsböden in der Schweiz beherbergen eine Vielzahl von arbuskulären Mykorrhizapilzen, die bei der Ackernutzung mit regelmässiger Bodenbearbeitung in ihrer Abundanz und Vielfalt stark dezimiert werden können: Acker- und Grasland in Niederösch (BE). (Foto: Fritz Oehl, Agroscope)

Einleitung

Diversitätsstudien von arbuskulären Mykorrhizapilzen (AM-Pilze, Knäuelpilze, Glomeromycota) gibt es, mit Ausnahme früher Pionierarbeiten, weltweit erst seit etwa 25 Jahren. Zu jener Zeit war nur etwa ein Drittel der heute weltweit knapp 300 beschriebenen AM-Pilzarten bekannt. In der Schweiz wurden solche Studien erst im letzten Jahrzehnt begonnen, obwohl die positiven Auswirkungen dieser Pilze auf das Wachstum und die Gesundheit der Pflanzen sowie die Bodenstruktur schon seit Ende des 19. Jahrhunderts bekannt sind.

Bisher in der Schweiz durchgeführte Einzelstudien untersuchten den generellen Einfluss von Nutzungs- und

Anbausystemen auf die Vielfalt der AM-Pilze in Landwirtschaftsböden (z. B. Oehl *et al.* 2005; Maurer *et al.* 2014; Köhl *et al.* 2014; Njeru *et al.* 2015; Säle *et al.* 2015). In all diesen Studien zeigte sich, dass gewisse Arten in allen untersuchten Flächen vorkommen. Bei anderen wurde vermutet, dass sie, je nach Nutzung und Bodenbeschaffenheit, ein bestimmtes Verbreitungsmuster haben könnten. Eine breit angelegte Diversitätsstudie über die landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz (Abb. 1) war bisher jedoch noch nie durchgeführt worden. Eine solche Untersuchung könnte die bisherigen, eher punktuell erlangten Erkenntnisse bestätigen und die Aussagekraft von deutlich mehr Indikator-Arten für bestimmte Nutzungen, verschiedene Bodenparameter sowie weitere Umweltfaktoren verstärken (Oehl *et al.* 2011a).

Im Rahmen einer Studie zur Referenzwert-Erarbeitung des Mykorrhiza-Infektionspotenzials als bodenbiologischen Parameter im Vollzug des Bodenschutzes in der Schweiz wurden aus Bodenproben von 154 ausgewählten Kantonalen und Nationalen Bodenbeobachtungsstandorten (KABO, NABO) auch die AM-Pilze bestimmt. Der vorliegende Artikel zeigt die Ergebnisse dieser Diversitätsuntersuchungen. Weitere Resultate der Gesamtstudie wurden bereits an anderer Stelle publiziert (Jansa *et al.* 2009, 2014). Mit dieser Studie liegen weitere Grundlagen für einen zukünftigen Einsatz von AM-Pilzgemeinschaften für eine nachhaltige Landwirtschaft und einen erfolgreichen Bodenschutz vor.

Material und Methoden

Untersuchungsstandorte

Von den insgesamt 697 Standorten der NABO und verschiedener KABO wurden 92 Grasland- und 62 Ackerstandorte als repräsentativ für die Schweiz ausgewählt (Jansa *et al.* 2014). Die untersuchten Graslandstandorte befinden sich in Höhenlagen zwischen 270 und 2240 m ü. M., die Ackerstandorte zwischen 324 und 750 m ü. M.

Von Februar bis Juli wurde an jedem Standort jeweils bei Frühlingsbeginn auf einer Fläche von etwa 100 m² eine Bodenprobe entnommen (0–10 cm bei Grasland- und 0–20 cm bei Ackerstandorten; etwa 300 g feldfrische Erde aus 20 Einstichen). Die Bodenproben wurden auf 2 mm gesiebt und bis zur Isolierung und morphologischen Bestimmung der AM-Pilzsporen luftgetrocknet gelagert. Angaben zur geographischen Lage der Flächen sowie ausgewählte Ergebnisse chemischer, physikalischer und bodenmikrobiologischer Analysen aus denselben Proben sind in Abbildung 2 und Tabelle 1 zusammengefasst.

Bestimmung der AM-Pilze

Die Sporen der AM-Pilze wurden aus 25 g luftgetrocknetem Boden mit Hilfe einer kombinierten Methode aus Nasssiebung und anschließender Dichte-Gradient-Zentrifugations-Technik isoliert (Oehl *et al.* 2005) und anschliessend unter dem Lichtmikroskop bei 400-facher Vergrößerung bestimmt und gezählt. Als Bestimmungshandbuch dienten Błazzkowski (2012) und die Klassifikation nach Oehl *et al.* (2011b) unter Berücksichtigung der laufenden Weiterentwicklung der Glomeromycota-Systematik (www.agroscope.ch/saf).

Statistik

Die Sporenzahlen wurden für jede Art und jeden Standort als Anzahl Sporen pro 100 g luftgetrockenen Boden dargestellt. Lineare Regressionen wurden zwischen den Höhenlagen (m ü. M.) beziehungsweise den pH-Werten >

Zusammenfassung

Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AM-Pilze) sind Bodenpilze und bilden eine leistungsfähige Symbiose mit den meisten Nutz- und Wildpflanzen. Sie fördern das Pflanzenwachstum und die Bodenstruktur. Einzelstudien aus der Schweiz liessen vermuten, dass sich gewisse Arten als Bioindikatoren für verschiedene Böden sowie Landnutzungstypen eignen. In einer breit angelegten Studie wurden über die ganze Schweiz verteilt die AM-Pilze (Sporengemeinschaften) von 154 Grasland- und Ackerstandorten untersucht. 106 der knapp 300 weltweit bekannten Arten konnten identifiziert werden. Während viele Arten in fast allen untersuchten Flächen auftraten, zeigten andere typische Verbreitungsmuster. Neben bekannten Arten wie *Septoglomus constrictum* (Zeigerart für Grasland und Äcker mit geringer Bodenbearbeitung) und *Funneliformis caledonius* (Zeigerart für regelmässig gepflügte, saure Ackerflächen) wurden unter anderem *Glomus macrocarpum* als Zeigerart für Grasland, *Acaulospora alpina* für Lagen über 1400 m ü. M. sowie *Gigaspora margarita* und *Cetraspora helvetica* für tiefere Lagen bis 1100 m erkannt. Welche besonderen Ökosystemleistungen diese Arten erbringen, wird Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

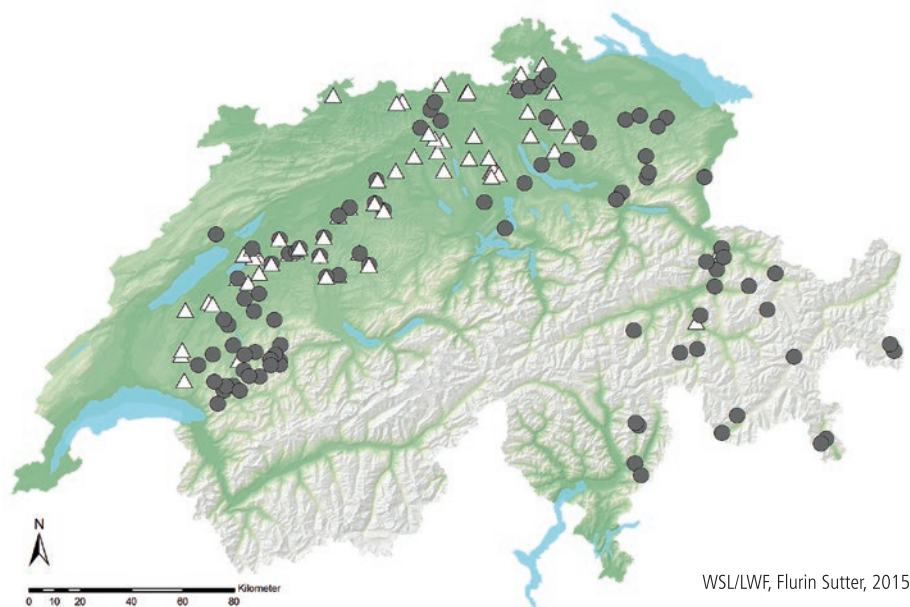


Abb. 2 | Verteilung der ausgewählten 92 Grasland- und 62 Ackerstandorte in der Schweiz (graue Punkte: Grasland, weisse Dreiecke: Acker).

Tab. 1 | Höhenlage sowie ausgewählte chemische, physikalische und mikrobiologische Bodenparameter der 92 Grasland- und 62 Ackerstandorte

	Minimum		Median		Maximum	
	Grasland	Acker	Grasland	Acker	Grasland	Acker
Höhenlage (m ü. M.)	270	324	722	517	2240	750
Tongehalt (%)	10,6	8,2	24,9	19,2	55,1	50,1
Schluffgehalt (%)	11,3	11,4	28,3	29,7	50,7	70,5
Sandgehalt (%)	4,3	6,5	33,3	41,5	69,3	71,4
pH-Wert (H ₂ O)	4,7	5,8	6,3	6,6	7,3	7,7
Kalkgehalt (mg/kg)	0,0	0,0	1,0	1,0	330,0	370,0
Basensättigung (%)	2,9	26,2	55,4	64,1	93,4	100,0
Organischer Kohlenstoff (g C _{org} / kg)	17,5	7,9	53,5	21,6	215,7	92,9
Gesamt-Stickstoff (g N / kg)	1,7	0,8	5,2	2,0	15,9	10,7
Gesamt-Phosphor (mg P / kg)	401,0	468,6	1108	809,4	3340	2261
Verfügbares Phosphor (mg P / kg)	3,2	13,0	37,8	52,4	371,0	252,4
Verfügbares Kalium (mg K / kg)	49,7	56,4	150,5	167,5	716,6	560,1
Verfügbares Cadmium (mg Cd / kg)	0,04	0,04	0,19	0,12	0,98	0,70
Bodenatmung (mg CO ₂ -Kohlenstoff / kg / h)	0,71	0,27	1,60	0,61	5,37	1,92
Mikrobielle Biomasse bestimmt mit der substratinduzierten Respiration (SIR; mg C / kg)	508,1	165,5	1303	563,7	5880	2160

und dem Artenreichtum der AM-Pilze an den Standorten berechnet. Mit einer multivariaten Redundanzanalyse (RDA) konnten die Zusammenhänge zwischen Sporenzahlen und ökologischen Begleitgrößen gerechnet und bildlich dargestellt werden (Säle *et al.* 2015). Dafür wurde das Funktionspaket «vegan» der Statistik-Programmsammlung R verwendet (www.R-project.org).

Resultate und Diskussion

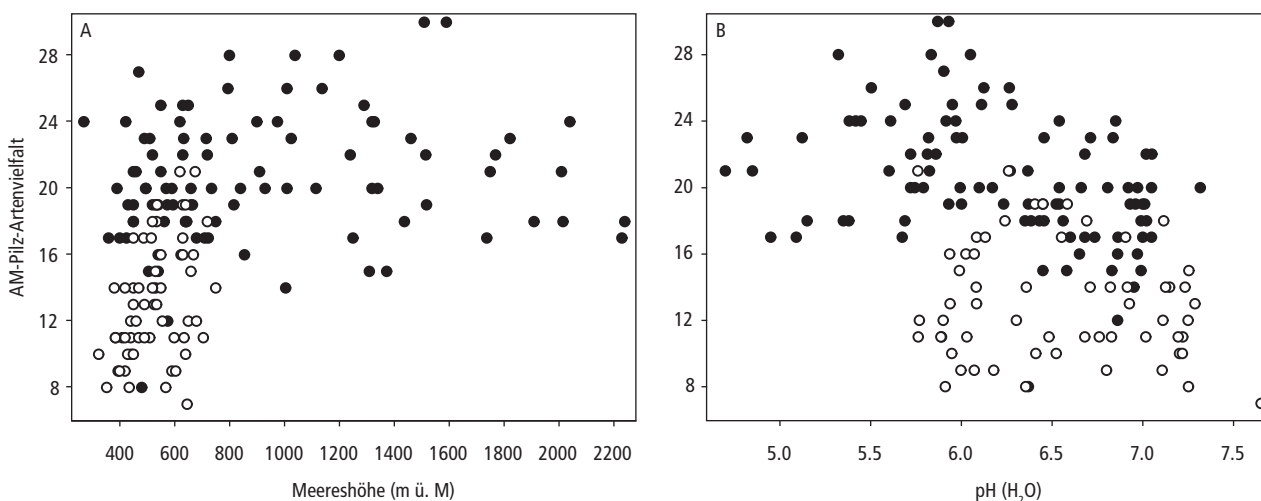
Artenreichtum der AM-Pilze in der Studie

In der vorliegenden Studie konnten insgesamt 106 AM-Pilzarten unterschieden werden (Tab. 2). Dies sind zwei Arten mehr als bisher in der Schweiz gefunden worden

waren (Oehl *et al.* 2010a). Diese hohe Zahl kann einerseits an der Vielzahl der untersuchten Standorte, andererseits aber vor allem am taxonomischen Fortschritt der letzten Jahre liegen, in denen auch in der Schweiz mehrere neue Arten beschrieben wurden (z. B. *Dominikia compressa* und *Do. bernensis*; Oehl *et al.* 2014, 2015). Generell bestätigen die folgenden Ergebnisse punktuelle Beobachtungen aus früheren Einzelstudien und liefern neue Details über die Verbreitung der AM-Pilze in landwirtschaftlich genutzten Böden der Schweiz.

Unterschiede der AM-Pilze im Gras- und Ackerland

Der Artenreichtum der AM-Pilze war im Grasland generell höher (14–32 Arten pro Standort) als im Ackerland


Abb. 3 | Artenreichtum von arbuskulären Mykorrhizapilzen an 92 Grasland- (schwarze Punkte) und 62 Ackerstandorten (weisse Punkte) in der Schweiz in Abhängigkeit der Höhenlage (A) und des pH-Wertes (B).

(8–22 Arten; Abb. 3). Das entspricht im Wesentlichen den Ergebnissen aus vorangegangenen Einzelstudien (z. B. Oehl *et al.* 2005, 2010a), die zeigten, dass vor allem durch die periodische Bodenbearbeitung im Ackerland eine Reihe von AM-Pilzen dezimiert oder ganz verdrängt werden. Im Einzelfall können allerdings extensiver geführte Ackerstandorte unter Bio-Anbau, bei Pflugverzicht oder bei reduzierter Bodenbearbeitung eine ähnliche Artenvielfalt aufweisen wie Wiesen oder Weiden (Oehl *et al.* 2009; Säle *et al.* 2015).

Im Grasland veränderte sich der Artenreichtum mit der Höhenlage nicht ($r^2 = 0,01$; $p = 0,27$), in den Äckern dagegen nahm er mit zunehmender Höhe leicht zu (bei relativ niedrigem Bestimmtheitsmass $r^2 = 0,11$; $p = 0,009$). Diese Zunahme könnte im Sinne eines besseren Erosionsschutzes mit der bodenschonenderen Bearbeitung steilerer Flächen oder auch mit einfacheren Fruchtfolgen in höheren Lagen zusammenhängen. Mit steigendem pH-Wert des Bodens nahm der Artenreichtum im Grasland leicht ab ($r^2 = 0,14$; $p = 0,00024$), nicht jedoch in den Äckern ($r^2 = 0,02$; $p = 0,33$). Dies wiederum dürfte am allgemein deutlich geringeren Spektrum des pH-Wertes der Äcker (5,8 bis 7,7) gegenüber dem Grasland liegen (4,8 bis 7,3; Tab. 1).

AM-Pilze als Bioindikatoren

Von den 106 identifizierten AM-Pilzen konnte knapp ein Viertel der Arten, zum Beispiel *Rhizoglyphus irregulare* und *Claroideoglyphus claroideum* (Abb. 4), in der Mehrzahl der Grasland- und Ackerstandorte nachgewiesen werden. Andererseits fanden sich fast 50 % der Arten nur an einzelnen Standorten. Sowohl sehr häufig vorkommende als auch sehr seltene Arten eignen sich nicht als Bioindikatoren, dagegen sind solche mit einem über die Schweiz gesehen charakteristischen Verbreitungsmuster gute Bioindikatoren, zum Beispiel *Glomus macrocarpum* für Wiesen, *Funneliformis caledonius* für Äcker, *Fu. caledonius* und *Acaulospora alpina* für saure pH-Werte oder *Ac. alpina* für Standorte in Höhenlagen ab 1400 m beziehungsweise *Gigaspora margarita* und *Cetranspora helvetica* für tiefere Lagen bis 1100 m (Abb. 4 und Abb. 5). Diese Ergebnisse für die genannten Arten stehen im Einklang mit mindestens einer Einzelbeobachtung aus früheren Kleinstudien (Oehl *et al.* 2006, 2010a, 2012; Maurer *et al.* 2014; Wetzels *et al.* 2014). Auch *Septoglyphus constrictum* und *Gl. badium* sind Indikatoren für Graslandstandorte sowie Äcker mit reduzierter Bodenbearbeitung (Oehl *et al.* 2010a; Maurer *et al.* 2014; Säle *et al.* 2015). Für diese beiden Arten ist dies mit Hilfe der multivariaten Analyse von Abbildung 6 eindeutig sichtbar. Beide Pilzarten bevorzugen gleichzeitig auch pH-Werte > 6,0 (Oehl *et al.* 2005).

Die multivariaten Analysen bestätigen, dass sich viele AM-Pilzarten bezüglich ihres Vorkommens indifferent verhalten. Sie gruppieren sich im Zentrum der Abbildung und lassen sich nicht einzelnen Vektoren oder Vektorgruppen beziehungsweise diesen zugrunde liegenden ökologischen Begleitparametern zuordnen (Abb. 6). Andere Arten jedoch wie *Se. constrictum*, *Gl. badium*

Tab. 2 | Liste der an den 92 Grasland- und 62 Ackerstandorten identifizierten 106 AM-Pilzarten

Archaeosporales

Ambisporaceae:

Ambispora appendicula, *Am. fennica*, *Am. gerdemannii*, *Am. nicolsonii*, *Am. reticulata*, *Am. sp.* CH1, *Am. sp.* CH2, *Am. sp.* CH4, *Am. sp.* AR5

Archaeosporaceae:

Archaeospora myriocarpa, *Ar. trappei*, *Ar. sp.* CH1, *Palaeospora spainii*

Diversisporales

Acaulosporaceae:

Acaulospora alpina, *Ac. capsicula*, *Ac. cavernata*, *Ac. elegans*, *Ac. gedanensis*, *Ac. laevis*, *Ac. longula*, *Ac. mellea*, *Ac. morrowiae*, *Ac. paulinae*, *Ac. punctata*, *Ac. pustulata*, *Ac. scrobiculata*, *Ac. sieverdingii*, *Ac. thomii*, *Ac. tortuosa*, *Ac. sp.* AR6, *Ac. sp.* CH1, *Ac. sp.* CH2, *Ac. sp.* GE1

Diversisporaceae:

Corymbiglosum tortuosum, *Diversispora celata*, *Di. epigaea*, *Di. przelewiczensis*, *Tricispora nevadensis*, *Tr. sp.* CH1, *Tr. sp.* CH2

Pacisporaceae:

Pacispora coralloidea, *Pa. dominikii*, *Pa. franciscana*, *Pa. sp.* CH1

Sacculosporaceae:

Sacculospora sp. CH1

Gigasporales

Gigasporaceae:

Gigaspora decipiens, *Gi. margarita*, *Gi. sp.* CH1

Racocetraceae:

Cetranspora armeniaca, *Ce. helvetica*, *Ce. pellucida*, *Ce. sp.* CH1, *Racocetra castanea*, *Ra. fulgida*, *Ra. sp.* CH1, *Ra. sp.* CH2

Scutellosporaceae:

Scutellospora arenicola, *Sc. calospora*, *Sc. dipurpurens*

Glomerales

Entrophosporaceae:

Claroideoglyphus claroideum, *Cl. etunicatum*, *Cl. lamellosum*, *Cl. luteum*, *Cl. sp.* CH1, *Entrophospora infrequens*, *En. sp.* AR1

Glomeraceae:

Dominikia aurea, *Do. bernensis*, *Do. compressa*, *Do. sp.* BR11, *Funneliformis caledonius*, *Fu. coronatus*, *Fu. fragilistratus*, *Fu. geosporus*, *Fu. mosseae*, *Glomus badium*, *Gl. diaphanum*, *Gl. heterosporum*, *Gl. macrocarpum*, *Gl. microcarpum*, *Gl. mortonii*, *Gl. sp.* CH1, *Gl. sp.* CH2, *Gl. sp.* CH3, *Gl. sp.* CH4, *Gl. sp.* CH5, *Rhizoglyphus aggregatum*, *Rh. clarum*, *Rh. fasciculatum*, *Rh. intraradices*, *Rh. irregulare*, *Rh. invermaium*, *Rh. microaggregatum*, *Sclerocystis pachycaulis*, *Sc. rubiformis*, *Sc. sinuosa*, *Septoglyphus altomontanum*, *Se. constrictum*, *Se. sp.* GE1, *Simiglosum hoi*

Paraglomerales

Paraglomeraceae:

Paraglosum laccatum, *Pg. occultum*, *Pg. sp.* AG1, *Pg. sp.* BE10, *Pg. sp.* BR1, *Pg. sp.* VS1

Die Abkürzungen für nicht sicher bestimmbare oder noch unbeschriebene Pilzarten heissen hinsichtlich ihrer Fundorte. CH = Gesamt-Schweiz, AR = Alpenregion, BR = Basel-Region, BE = Bern, GE = Region Genfer See, AG, = Aargau, VS = Wallis.

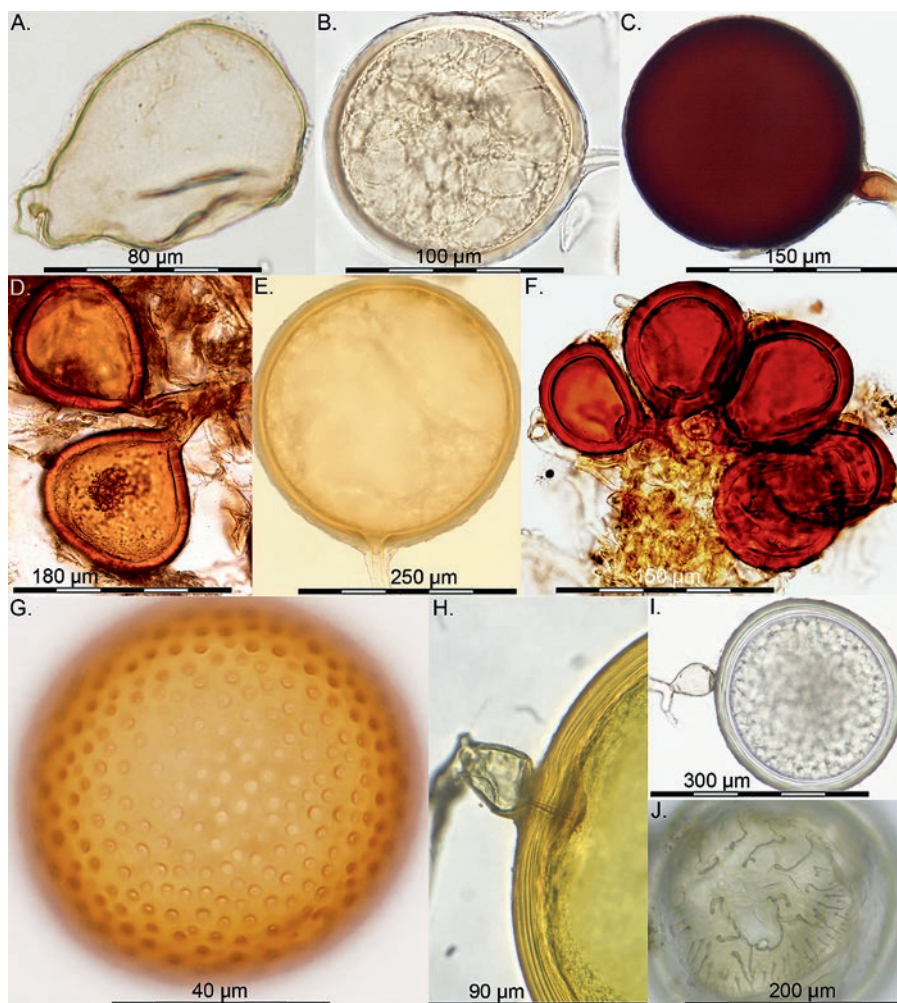


Abb. 4 | Illustration von neun AM-Pilzarten mit sehr häufigem (A und B) oder sehr stark selektivem Vorkommen (C bis J). A: *Rhizoglozum irregulare* (überall). B: *Claroideoglozum claroideum* (überall). C: *Septoglozum constrictum* (häufig im Grasland). D: *Glomus badium* (häufig im Grasland). E: *Glomus macrocarpum* (fast ausschliesslich im Grasland). F: *Funneliformis caledonius* (fast ausschliesslich im Ackerland). G: *Acaulospora alpina* (1400–2280 m ü. M.). H: *Gigaspora margarita* (270–1100 m ü. M.). I–J: *Cetraspora helvetica* (270–650 m ü. M.). (Fotos: Fritz Oehl, Agroscope)

und *Do. aurea*, lassen sich eindeutig denjenigen Vektoren zuordnen, die mit dem Humusgehalt der Böden in Verbindung stehen (C_{org} , N_{tot} sowie die mikrobiellen Parameter Substrat-induzierte Respiration [SIR] und Bodenatmung). Die Abundanz von *Fu. mosseae* und *Fu. geosporus* dagegen scheint eher mit den ökologischen Begleitparametern pH-Wert und Kalkgehalt zusammenzuhängen. *Funneliformis caledonius* und *Gl. diaphanum* gruppieren sich nahe den Landnutzungsparametern (Landnutzungsintensität und -typ) und der Phosphor-Verfügbarkeit, während *Gl. macrocarpum* invers zu den beiden letztgenannten AM-Pilzarten und Parametern steht. Für einige der hier genannten Arten sind die multivariat erhaltenen Ergebnisse starke Bestätigungen von früheren Einzelbeobachtungen (Oehl *et al.* 2005, 2006, 2010a, 2011a; Maurer *et al.* 2014; Säle *et al.*

2015). Überraschenderweise zeigten aber auch gewisse Arten, die bisher eher als Ubiquisten («überall vorkommend») bezeichnet wurden, auffällige Begrenzungen in ihrer Verbreitung. So wurde zum Beispiel *Fu. mosseae* nicht über 1600 und *Gi. margarita* nicht über 1100 m ü. M. gefunden. Für andere Arten wie *Sclerocystis rubiformis*, *Ac. paulinae* und *Ac. cavernata*, die sich mit dem Vektor der Höhenlage und gegensätzlich zu den Landnutzungsparametern und zum pH-Wert gruppieren, sind solche biogeographischen Einschätzungen komplett neu. Die vorliegende Untersuchung lässt erstmals eine derart grosse Anzahl von AM-Pilzarten erkennen, die als Bioindikatoren geeignet sind. Dies hängt sicher mit der grossen Anzahl der Untersuchungsstandorte, der detaillierten Artenbestimmung sowie der Vielzahl der berücksichtigten ökologischen Begleitparameter zusammen.

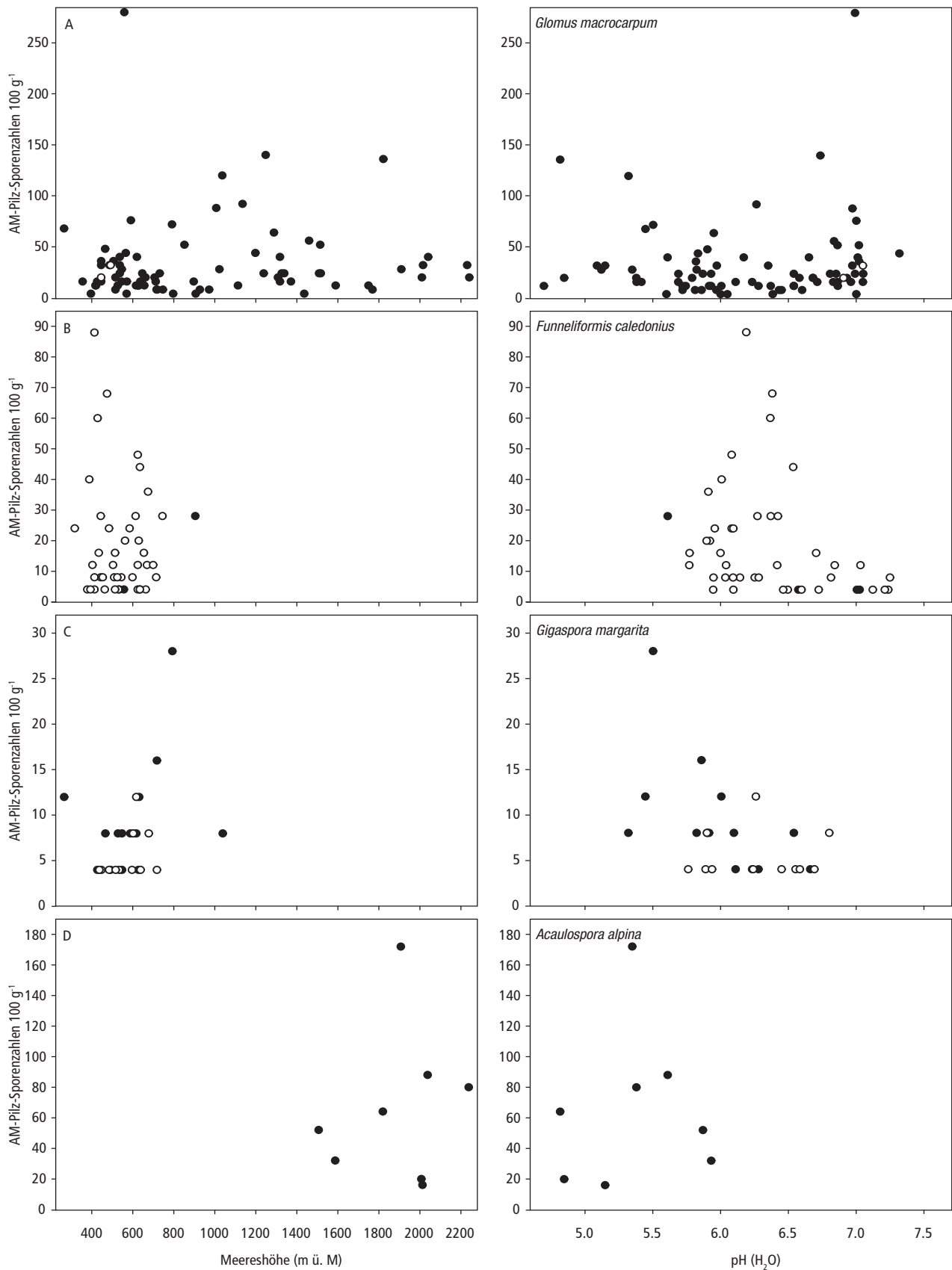


Abb. 5 | Vier Beispiele für AM-Pilzarten, die ein deutliches Verbreitungsmuster in Abhängigkeit von Landnutzungstyp (Gras- oder Ackerland), Höhenlage bzw. pH-Wert erkennen lassen. A: *Glomus macrocarpum* kommt eigentlich nur im Grasland vor (schwarze Punkte). B: *Funneliformis caledonius* findet sich eigentlich nur im Ackerland (weisse Punkte). C: *Gigaspora margarita* kommt nur in Höhenlagen bis 1100 m ü. M. vor. D: *Acaulospora alpina* findet sich nur in Höhenlagen über 1400 m ü. M.

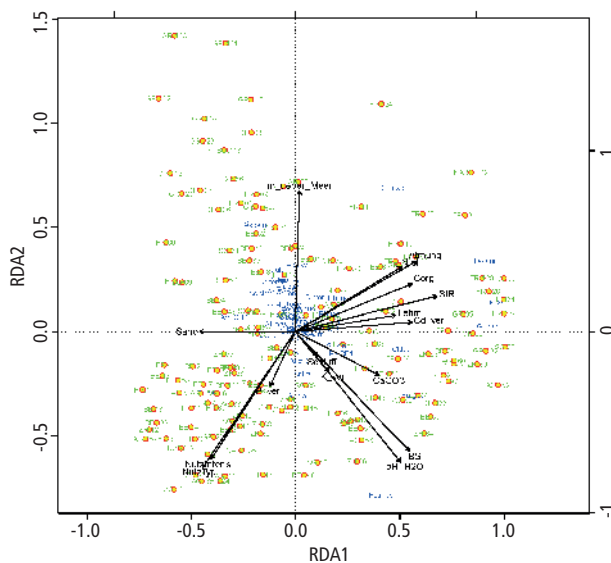


Abb. 6 | Redundanzanalyse der Sporendichte der 106 identifizierten AM-Pilzarten von 92 Grasland- und 62 Ackerstandorten in der Schweiz unter Berücksichtigung der ökologischen Begleitparameter. Namen der Pilzarten s. Tab. 2. Abkürzungen der Begleitparameter (im Uhrzeigersinn): N_{tot} = Gesamt-Stickstoffgehalt im Boden, Atmung = Bodenatmung, C_{org} = organischer Kohlenstoffgehalt, SIR = mikrobielle Biomasse nach der SIR-Methode, Cd_{ver} = verfügbares Cadmium, $CaCO_3$ = Kalkgehalt, BS = Basensättigung, pH_{H_2O} = pH (Wasser), K_{ver} = verfügbares K, P_{ver} = verfügbares P, Nutzintens = Landnutzungsintensität, NutzTyp = Landnutzungstyp, m ue.N.N. = Meereshöhe (m ü. M.).

Schlussfolgerungen

Die arbuskuläre Mykorrhiza gilt als die am weitesten verbreitete Symbiose zwischen Pflanzen und Mikroorganismen. Lange Zeit wurde sie als recht unspezifisch eingeschätzt mit wenigen, aber weltweit verbreiteten AM-Pilzen als Symbiosepartnern. Die AM-Symbiose mag wohl gegenüber der Wirtspflanze weitgehend unspezifisch sein, gegenüber den Standortfaktoren, der Landnutzungsart und -intensität sowie der Höhenlage ist sie es aber nicht. Die vorliegende breit angelegte Studie zeigt vielmehr, dass relativ viele der mittlerweile weltweit fast 300 bekannten AM-Pilzarten in der Schweiz ein sehr charakteristisches Verbreitungsmuster haben und sich deshalb als Bioindikatoren für spezifische Parameter eignen. Welche funktionelle Rolle diese und andere Arten in den jeweiligen Systemen spielen, ist allerdings noch weitgehend unbekannt. In Zukunft könnte die Landwirtschaft aber im Sinne eines erfolgreichen Bodenschutzes von den spezifischen Ökosystemleistungen – Erosionsschutz, Wasser- und Nährstoffeffizienz, Pflanzengesundheit – gezielt eingesetzter AM-Pilzgemeinschaften profitieren. In Folgestudien müsste also aufgedeckt werden, welche besonderen Leistungen von den einzelnen Arten in den verschiedenen Ökosystemen erbracht werden. ■

Literatur

- Błaszkowski J., 2012. Glomeromycota. W. Szafer Institute of Botany, Polish Academy of Sciences, Kraków. 303 S.
- Jansa J., Oberholzer H.-R. & Egli S., 2009. Environmental determinants of the arbuscular mycorrhizal infectivity of Swiss agricultural soils. *European Journal of Soil Biology* 45, 400–408.
- Jansa J., Erb A., Oberholzer H.-R., Šmilauer P. & Egli S., 2014. Soil and geography are more important determinants of indigenous arbuscular mycorrhizal communities than management practices in Swiss agricultural soils. *Molecular Ecology* 23, 2118–2135.
- Köhl L., Oehl F. & van der Heijden M.G.A., 2014. Using tillage practices to regulate plant growth responses by altering the soil microbial community. *Ecological Applications* 24, 1842–1853.
- Maurer C., Rüdy M., Chervet A., Sturmy W., Flisch R. & Oehl F., 2014. Diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in field crops using no-till and conventional tillage practices. *Agrarforschung Schweiz* 5, 398–405.
- Njeru E.M., Avio L., Bocci G., Sbrana C., Turrini A., Bärberi P., Giovannetti M. & Oehl F., 2015. Contrasting effects of cover crops on 'hot spot' arbuscular mycorrhizal fungal communities in organic tomato. *Biology and Fertility of Soils* 51, 151–166.
- Oehl F., Palenzuela J., Sánchez-Castro I., Kuss P., Sieverding E., Silva G.A., 2012. *Acaulospora nivalis*, a new fungus in the Glomeromycetes, characteristic for high alpine and nival altitudes of the Swiss Alps. *Nova Hedwigia* 95, 105–122.
- Oehl F., Sieverding E., Ineichen K., Ris E.A., Boller T. & Wiemken A., 2005. Community structure of arbuscular mycorrhizal fungi at different soil depths in extensively and intensively managed agroecosystems. *New Phytologist* 165, 273–283.
- 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. & 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., van der Heijden M.G.A., Jansa J. & Ineichen K., 2010b. Bodenbiodiversität: Artenvielfalt von nützlichen Mykorrhiza-Pilzen in schweizerischen Landwirtschaftsböden. In: Bieri A. (Hrsg.). Vielfältige Biodiversitäts-Forschung. Forschungsanstalt Agroscope Reckenholz-Tänikon ART, Zürich-Reckenholz, *ART-Schriftreihe* 14, 47–57.
- Oehl F., Jansa J., Ineichen K., Mäder P. & van der Heijden M.G.A., 2011a. Arbuskuläre Mykorrhizapilze als Bioindikatoren in Schweizer Landwirtschaftsböden. *Agrarforschung Schweiz* 2, 304–311.
- Oehl F., Sieverding E., Palenzuela J., Ineichen K. & Silva G.A., 2011b. Advances in Glomeromycota taxonomy and classification. *IMA Fungus* 2, 191–199.
- Oehl F., Palenzuela J., Sánchez-Castro I., Kuss P., Sieverding E. & Silva G.A., 2012. *Acaulospora nivalis*, a new fungus in the Glomeromycetes, characteristic for high alpine and nival altitudes of the Swiss Alps. *Nova Hedwigia* 95, 105–122.
- Oehl F., Sánchez-Castro I., Palenzuela J., Silva G.A. & Sieverding E., 2014. *Glomus compressum*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from different agro-ecosystems in Central Europe. *Nova Hedwigia* 99, 429–439.
- Oehl F., Sánchez-Castro I., Sousa N.M.F., Silva G.A. & Palenzuela J., 2015. *Dominikia bernensis*, a new arbuscular mycorrhizal fungus from a Swiss no-till farming site, and *D. aurea*, *D. compressa*, and *D. indica*, three new combinations in *Dominikia*. *Nova Hedwigia* 101, 65–76.
- Säle V., Aguilera P., Laczko E., Mäder P., Berner A., Zihlmann U., van der Heijden M.G.A. & Oehl F., 2015. Impact of conservation tillage and organic farming on the diversity of arbuscular mycorrhizal fungi. *Soil Biology & Biochemistry* 84, 38–52.
- Wetzell K., Silva G.A., Matczinski U., Oehl F. & Fester T., 2014. Superior differentiation of arbuscular mycorrhizal fungal communities from till and no-till plots by morphological spore identification when compared to T-RFLP. *Soil Biology & Biochemistry*, 72, 88–96.

Riassunto**I funghi micorrizici arbuscolari come bioindicatori nei terreni agricoli**

I Funghi micorrizici arbuscolari (funghi MA) sono funghi del terreno che creano una simbiosi efficiente con la maggioranza delle piante da reddito e selvatiche. Sono positive per la crescita delle piante e per la struttura del suolo. Da alcuni singoli studi condotti in Svizzera si è potuto desumere che certe specie sono bioindicatori adatti a differenti terreni e tipi di utilizzo degli stessi. In un ampio studio sono stati esaminati i funghi MA (comunità delle spore) di 154 superfici inerbate e coltivate distribuite in tutta la Svizzera. È stato possibile identificare 106 delle appena 300 specie note al mondo. Mentre alcune specie erano presenti in quasi tutte le superfici esaminate, altre mostravano modelli di diffusione peculiari. Oltre alle specie note, quali *Septogloium constrictum* (specie indicatrice per prati e campi con scarsa lavorazione del suolo) e *Funneliformis caledonius* (specie indicatrice per superfici coltivate acide regolarmente arate), sono state individuate, tra le altre, la *Glomus macrocarpum* quale specie indicatrice per prati, l'*Acaulospora alpina* per siti oltre i 1400 m s.l.m. nonché la *Gigaspora margarita* e la *Cetraspora helvetica* per siti ad altitudini inferiori, fino ai 1100 m. Scoprire quali sono i particolari benefici ecosistemici portati da tali specie sarà oggetto di successivi studi.

Summary**Arbuscular mycorrhizal fungi as bioindicators in agricultural soils**

Arbuscular mycorrhizal fungi (AM fungi) are soil fungi that establish an effective symbiosis with most crops and wild plants, promoting plant growth and improving soil structure. Individual studies from Switzerland have led us to assume that certain species are suitable as bioindicators for various soils and land-use types. In a broad-based study, the AM fungi (spore communities) of 154 different grassland and cultivated sites scattered throughout Switzerland were investigated. A total of 106 of the just-under 300 species known worldwide were identified. Whilst many species occurred in almost all of the areas investigated, others exhibited typical patterns of distribution. In addition to known species such as *Septogloium constrictum* (an indicator species for grassland and reduced-tillage arable land) and *Funneliformis caledonius* (an indicator species for regularly ploughed, acidic arable land), other species (a) *Glomus macrocarpum*, (b) *Acaulospora alpina* and (c) *Gigaspora margarita* and *Cetraspora helvetica* were identified as indicator species for grassland, for sites higher than 1400 m.a.s.l., and for low-altitude sites up to 1100m, respectively. The special ecosystem services provided by these species will be the subject of further investigations.

Key words: altitude, arbuscular mycorrhizal fungi, biodiversity, bioindicators, pH, soils, spores, sustainable agriculture.

Dank

Wir danken dem Bundesamt für Umwelt BAFU sowie den Kantonen St. Gallen und Solothurn für die finanzielle Unterstützung des Projekts, den Bodenschutzfachstellen der Kantone Aargau, Bern, Freiburg, Graubünden, St. Gallen und Zürich sowie der Nationalen Bodenbeobachtung NABO für ihre Mithilfe bei der Probenahme und der Bereitstellung von Daten.