

Untersuchungen zur vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza im Nationalpark Müritz (Mecklenburg-Vorpommern, Nordostdeutschland)

Heike HEKLAU, Sylvia HAIDER, Alexandra ERFMEIER und Helge BRUELHEIDE

25 Abbildung und 18 Tabellen

Abstract

HEKLAU, H., HAIDER, S., ERFMEIER, A., BRUELHEIDE, H.: Analysis of vesicular-arbuscular mycorrhiza in the National Park Müritz (Mecklenburg-Western Pomerania, Northeast Germany. - Hercynia N. F. 55 (2022): 1 – 44.

Mycorrhization rates of vesicular arbuscular mycorrhiza (VAM) of trees and shrubs (*Prunus serotina*, *Juniperus communis*) and herbaceous plants (*Deschampsia flexuosa*, *Phragmites australis* (Poaceae), *Carex* species, *Eriophorum vaginatum* Cyperaceae) and fern species were assessed on nutrient-poor soils of the glaciofluvial deposits in the south-west part of Müritz National Park in Mecklenburg-Western Pomerania, Northeast Germany. In contrast to seedlings or adults, mycorrhization rates of saplings of the invasive North American tree *P. serotina* with an age of 4 to 9 years responded strongly to light. Mycorrhization rates of *J. communis* depended both on soil pH and age of the shrubs. With increasing soil pH value, the abundance of arbuscules decreased, while the abundance of arbuscules and mycorrhization intensity increased with increasing shrubage. Mycorrhization rates of *D. flexuosa* were influenced by species diversity and herb cover. Mycorrhization rates of *P. australis* were high and independent of the sites' water levels. All studied Cyperaceae species showed VAM, with mycorrhization being independent of soil moisture but declining with soil pH. All temperate fern species developed VAM, showing mycorrhization rates that were negatively correlated with light conditions. The comparison across all species shows that the degree of mycorrhization depends on different species-specific site factors. Overall, the chemical soil factors (pH value) and light supply appear to be of greater importance than soil moisture. Although the general trend showed a consistent decrease in mycorrhization with increasing soil pH, there was no clear pattern of increased or decreased mycorrhization rate with increased or decreased quality of site conditions.

Key words: VA mycorrhiza, *Deschampsia flexuosa*, *Phragmites australis*, *Carex* spp., *Prunus serotina*, *Juniperus communis*, temperate ferns, nutrient-poor soils, Faule Ort (Müritz National Park)

1 Einleitung

Für Ökosysteme ist die Mykorrhiza als Symbiose zwischen höheren Pflanzen und bestimmten Pilzgruppen durch einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Ausbreitung, das Konkurrenzverhalten, die Koexistenz und die Vielfalt von Pflanzen auf lokaler Ebene von großer Bedeutung (TEDERSOO et al. 2020). Bei 67 % der Sporophyten von Farnpflanzen (LEHNERT et al. 2017),

bei 90 % der Gymnospermen und bei 86 % der Angiospermen (BRUNDRETT 2009) wird Mykorrhiza ausgebildet. Für den größten Teil der Angiospermen (74 %) ist die vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza (VAM) festgestellt worden, für 9 % der Angiospermen die Orchideen-Mykorrhiza, für 2 % die ektotrophe Mykorrhiza (EM) und für 1 % die ericoide Mykorrhiza (BRUNDRETT 2009). Zu den Pflanzenfamilien, deren Vertreter nach der Literaturlage keine oder unzuverlässig Mykorrhiza eingehen, gehören u. a. die Chenopodiaceae, Amaranthaceae, Brassicaceae, Juncaceae, Cyperaceae und Proteaceae. Wenn der Boden sehr nährstoffreich (wie z.B. an Ruderalstellen) oder sehr salzhaltig oder zu feucht ist, wird nicht immer oder in geringem Umfang Mykorrhiza ausgebildet. Auch bei Insektivoren oder Epiphyten mit alternativen Lebensweisen ist Mykorrhiza kaum bekannt (BRUNDRETT 2009).

Die vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza (VA-Mykorrhiza oder VAM) ist die älteste Form der Mykorrhiza und entstand bei der Besiedlung terrestrischer Lebensräume vor mehr als 400 Millionen Jahren (REMY et al. 1994). Es ist eine mutualistische Assoziation zwischen den Wurzeln von Sporen-Gefäßpflanzen oder Samenpflanzen und Pilzen, die zu den Glomeromycota (SCHÜSSLER et al. 2001) gestellt werden. Die Wirtspflanze versorgt die Pilze mit ihren Assimilaten, während die Pilze der Glomeromycota vor allem anorganische Stickstoff- und Phosphatverbindungen sowie Vitamine der Wirtspflanze zur Verfügung stellen (READ & PEREZ-MORENO 2003; SMITH & READ 2010; TESTE et al. 2020). Für die Glomeromycota ist diese Mykorrhiza obligat, denn nur in Symbiose mit einer autotrophen Pflanze ist der vollständige Entwicklungszyklus dieser Pilze möglich (SMITH & REED 2010). Die Initiierung und das Ende der VA-Mykorrhiza werden jedoch von der Wirtspflanze kontrolliert, das betrifft die Aussendung von Strigolakton als Anlockungsstoff, die Ausbildung eines Prä-Penetrationsapparates (GENRE et al. 2005; SCHAARSCHMIDT et al. 2009), durch den die Hyphen der Glomeromycota in das Wurzel-Rindenparenchym der Wirtspflanze eintreten, und das Aussondern von Jasmonaten, um die Mykorrhiza zu beenden, wenn diese z. B. ins parasitische Verhältnis umzuschwenken droht (HAUSE et al. 2007). Es wird davon ausgegangen, dass die Pilze der Glomeromycota als Gegenleistung bis zu 20 % der Assimilate von ihrer Wirtspflanze erhalten (BAGO et al. 2000). Das Kennzeichen des aktiven Stoffaustausches zwischen Wirtspflanze und Pilzen, der in den Rindenparenchymzellen der Wurzeln stattfindet, sind die Arbuskel, bäumchenförmige Strukturen, die sich durch das feine Aufzweigen von Pilzhypen ergeben. Vesikel (Bläschen) werden als Vorstufen der Chlamydosporenbildung gedeutet und sind vor allem Speicherorte für Fette (SMITH & REED 2010). Nicht alle, sondern etwa 80 % der Glomeromycota bilden sowohl Vesikel als auch Arbuskel aus, während bei 20 % dieser Pilzgruppe nur Arbuskel auftreten. Für die Pilze der Glomeromycota ist keine Sexualität bekannt, die Hyphen dieser Pilze sind septenlos und vielkernig. Die Vermehrung erfolgt über Chlamydosporen, das sind pigmentierte, relativ große Mitosporen (ca. 500 µm), die erst durch Absterben von Hyphen oder benachbarten Zellen frei werden. Für einige *Glomus*-Arten sind zentimetergroße Sporocarprien bekannt (REDECKER et al. 2007), wobei es sich um unspezifische, sehr dichte Ansammlungen von Chlamydosporen handelt.

In den gemäßigten Breiten tritt VA-Mykorrhiza besonders häufig bei krautigen Pflanzen auf, weniger bei Gehölzen. Von den temperaten Laubbäumen sind vor allem *Acer*, *Aesculus*, *Fraxinus*, *Prunus*, *Sorbus* und von den Nadelgehölzen *Juniperus* vorrangig mit Pilzen der Glomeromycota infiziert und bilden VA-Mykorrhiza aus (HARLEY & HARLEY 1987).

Experimente mit VAM-Pflanzen und ihren Pilzen zeigten, dass der Boden-pH-Wert die Besiedlung der Wirtswurzeln als auch das Wachstum und die Phosphatase-Aktivität des extraradicalen Myzels der

Glomeromycota beeinflussten (VAN AARLE et al. 2002). DAVISON et al. (2021) stellten die Temperatur und den pH-Wert als wichtigste abiotische Faktoren heraus, die die Verbreitung der AM-Pilze am besten erklären lassen. Aus Feldstudien in verschiedenen natürlichen Ökosystemen ist bekannt, dass ein positiver Zusammenhang zwischen der Diversität der Mykorrhiza-Pilze als auch der Pflanzen besteht (HIIESALU et al. 2014, TEDERSOO et al. 2016). Durch stabilisierende Mechanismen, z. B. durch die von den Pilzen vermittelte Nährstoffaufteilung unter den Wirtsarten und damit Abschwächung der interspezifischen Konkurrenz, trägt die Mykorrhiza zur Pflanzen-Koexistenz bei (WAGG et al. 2011).

Um die Bedeutung der VA-Mykorrhiza für Wirtspflanzen auf sehr nährstoffarmen Böden zu demonstrieren, wurden für dieser Studie die Ergebnisse der Untersuchungen zur VA-Mykorrhiza auf Sander-Böden im Müritz-Nationalparks im Zeitraum von 2009 bis 2021 zusammengestellt, die von Master-Studierenden des Studiengangs Biologie im Projektmodulteil Freilandökologie an der Biologischen Station Faule Ort der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg durchgeführt worden sind. Die Erhebungen wurden mit wissenschaftlicher Exaktheit im Rahmen der erwähnten studentischen Geländepraktika vorgenommen, wodurch wesentliche neue Erkenntnisse zu der Mykorrhizierung der untersuchten Arten gewonnen werden konnten. Als Untersuchungsarten wurden sowohl Gehölze als auch Kräuter aus systematisch ganz unterschiedlichen Gruppen ausgewählt. Zum einen waren es Grasartige (Poales), so *Deschampsia flexuosa* (L.) TRIN., *Phramites australis* (Cav.) Steud. (Poaceae) und verschiedene Ried- oder Sauergräser (Cyperaceae), zum anderen standen Farne (*Athyrium filix-femina* (L.) Roth, *Dryopteris carthusiana* (Vill.) H.P. Fuchs, *D. dilatata* (Hoffm.) A. Gray, *D. filix-mas* (L.) Schott, *Pteridium aquilinum* (L.) Kuhn, *Thelypteris palustris* Schott) und die Gehölze *Juniperus vulgaris* L. (Cupressaceae) und *Prunus serotina* Ehrh. (Rosaceae) im Mittelpunkt. Ziel war es einerseits, den Nachweis der VA-Mykorrhiza für bestimmte Pflanzengruppen zu erbringen, z. B. für *Carex*-Arten und *P. australis*, vor allem wenn diese auf nassen Böden oder gar im Wasser wuchsen. Andererseits wurde der Frage nachgegangen, ob die Nährstoffarmut der Böden im Untersuchungsgebiet die Ausbildung der VA-Mykorrhiza in den Wurzeln der Wirtspflanzen fördert. Für die verschiedenen Wirtsarten wurden Hypothesen getestet, die verschiedene Treiber der Mykorrhizierung betrachten, die im Folgenden erläutert werden.

1. Die Drahtschmiele (*Deschampsia flexuosa*) ist ein dominantes Süßgras sowohl in Kiefern-Forsten unterschiedlichen Alters und unterschiedlicher Artausstattung als auch an Moor- und Wegrändern im Nationalpark. Es wurde die Fragestellung verfolgt, ob und wie sich die VA-Mykorrhizierung dieses Süßgrases zwischen den untersuchten Standorten unterscheidet. Da vermutet wurde, dass mit der Zunahme der Artenzahl an den jeweiligen Wuchsorten eine verminderte Nährstoffversorgung einher geht und eine Symbiose mit Mykorrhizapilzen die Nährstoffaufnahme der Pflanzen unterstützt, wurde die Hypothese getestet, **dass die Mykorrhizierung von *D. flexuosa* an den Wuchsorten mit einer höheren Artenzahl am stärksten ist.**

2. Da bislang wenig über Mykorrhizierung von Wurzeln unter permanent nassen, und damit anaeroben Bedingungen bekannt war, wurde die VAM bei *Phragmites australis* untersucht. Es wurde angenommen, **dass die Mykorrhizierung der Art an seefernen und trockeneren Standorten wesentlich höher ist als an seenahen Standorten**, bei denen die Schilfwurzeln permanent submers sind.

3. Aufgrund des Artenreichtums an Ried- oder Sauergräsern (Cyperaceae) im Untersuchungsgebiet war es möglich, die in der Literatur weit verbreitete Annahme zu prüfen, dass VA-Mykorrhiza bei den Vertretern der Cyperaceae relativ gering vertreten sei bzw. fehlen würde (z.B. BRUNDRETT 2009). Es

wurde geprüft, ob bei den im Untersuchungsgebiet häufigen Arten der Familie Mykorrhiza ausgebildet wird. Elf verschiedene Cyperaceae (*Carex acuta* L., *C. acutiformis* Ehrh., *C. arenaria* L., *C. canescens* L., *C. elata* All., *C. hirta* L., *C. leoporina* L., *C. nigra* (L.) Reichard, *C. paniculata* L., *C. rostrata* Stokes und *Eriophorum vaginatum* L.) wurden an seenahen bzw. seefernen Standorten untersucht. Auch hier wurde davon ausgegangen, **dass die Mykorrhizierung an seefernen, trockeneren Standorten höher ist als an den deutlich feuchteren.**

4. In den Kiefernwäldern des Untersuchungsgebietes ist *Juniperus communis* eine Reliktart der ehemaligen offenen Heidelandschaft. Bei vielen der noch vorhandenen Exemplare handelt es sich um ältere Sträucher, nur vereinzelt findet sich Jungwuchs. Hier wurde angenommen, **dass die Mykorrhizierungsrate mit dem Alter der Individuen zunimmt.** Um auszuschließen, dass diese nicht auch noch mit anderen Umweltfaktoren covariiert, wurde auch der Zusammenhang mit anderen Standortfaktoren, wie dem pH-Wert geprüft.

5. Die invasive, nordamerikanische Spätblühende Traubenkirsche (*Prunus serotina*, Rosaceae) die im Müritz-Nationalpark weit verbreitet ist, bildet VA-Mykorrhiza aus. Es wurde auch bei dieser erwartet, **dass es einen Zusammenhang zwischen dem jeweiligen Alter des Gehölzes und dem Grad der Mykorrhizierung gibt.** Zudem sollte geprüft werden, ob Standortfaktoren (pH-Wert, Licht) und die umgebende Vegetation, insbesondere das Alter der Kiefern-Forstes, den Mykorrhizierungsgrad beeinflussen. Ferner sollten Messungen des Chlorophyll-Gehaltes der *Prunus*-Blätter Auskunft über den physiologischen Status der jeweiligen Individuen geben. Hier wurde geprüft, ob sich ein höherer Chlorophyll-Gehalt in den Laubblättern, der mit einer stärkeren Assimilationsrate einhergehen sollte, positiv auf den Grad der Mykorrhizierung von *P. serotina* auswirkt.

6. Temperate Farn-Arten wurden bislang noch relativ selten hinsichtlich VA-Mykorrhiza untersucht. Verschiedene Farn-Arten (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris carthusiana*, *D. dilatata*, *D. filix-mas*, *Pteridium aquilinum*, *Thelypteris palustris*) wurden deshalb im Untersuchungsgebiet auf VA-Mykorrhiza geprüft. Wie bei den zuvor genannten Arten wurde die Hypothese getestet, dass es Zusammenhänge zwischen den Standorteigenschaften (pH-Wert, Lichteinfall, Bodenfeuchtigkeit) und dem Grad der Mykorrhizierung gibt.

2 Material und Methoden

2.1 Das Untersuchungsgebiet

Alle Mykorrhiza-Untersuchungen wurden im südwestlichen Teil des Nationalparks Müritz (vgl. Abb. 1) in Mecklenburg-Vorpommern, in Nordostdeutschland jeweils im Juni im zweijährigen Abstand zwischen 2009 und 2021 durchgeführt. Im Jahr 2011 erfolgte ausnahmsweise sowohl im Juni als auch im August eine Beprobung.

Der südwestliche Teil des Nationalparks grenzt an das Ostufer der Müritz, des zweitgrößten Sees Deutschlands. Nicht nur das Müritz-Gebiet, sondern die gesamte Landschaft Norddeutschlands entstand infolge von drei großen Vereisungszyklen. Insbesondere die letzte und jüngste Kaltzeit, die Weichselkaltzeit, die vor 115 000 Jahren begann, hatte dabei prägenden Einfluss (BÖRNER 2012). Für die Weichselkaltzeit sind drei große Gletschervorstöße nachweisbar, die Brandenburger-Frankfurter Phase, der Pommersche Vorstoß und der Mecklenburger Vorstoß. Die während eines jeden Eisvorstoßes

ablaufenden Prozesse hinterließen Ablagerungen und Oberflächenformen, die als „Glaziale Serie“ (PENCK & BRÜCKNER 1909) bezeichnet werden. Auch für jeden der drei Gletschervorstöße der Weichselkaltzeit existiert eine solche „Glaziale Serie“ aus Grundmoräne, Endmoräne, Sander und Urstromtal. Erst mit der endgültigen Eisschmelze vor 14 600 Jahren setzte die nacheiszeitliche Landschafts- und Kulturentwicklung ein (BÖRNER 2012).

Der südwestliche Teil des Nationalparks ist vom Sander der Pommerschen Phase der Weichselkaltzeit geprägt und weist ein flachwelliges bis ebenes Relief auf, das durch Flugsanddünen, die sich unmittelbar nach dem Eisrückzug durch Sandakkumulation gebildet haben, und durch den Käflingsberg (100 m ü. NN) als Satzendoräne aufgelockert wird (BÖRNER 2012). Die Grundmoräne der Frankfurter Phase liegt am Rand des südwestlichen Teils des Nationalparks bei 60 m ü. NN beim Ort Boek. Neben der Müritz existieren zahlreiche kleinere Seen im Untersuchungsgebiet. Dieser Seen-Reichtum hängt mit Toteisblöcken der Kaltzeiten zusammen, die sich beim Rückzug der jeweiligen Gletscherfront vom Gletscher ablösten und in Mulden oder Becken zurückblieben und nachfolgend von späteren Sanderablagerungen überschüttet worden sind. Mit der Klimaerwärmung seit dem Spätglazial schmolz das Toteis und eine Vielzahl von größeren und kleineren Seen entstand.



Abb. 1 Karte des Nationalparks Müritz (Mecklenburg-Vorpommern). Das blaue Rechteck kennzeichnet das Untersuchungsgebiet im Südwesten des Nationalparks (s. Abb. 2).

Fig. 1 Map of Müritz National Park (Mecklenburg-Western Pomerania, Northeast Germany). The blue rectangle is indicating the area under investigation in the Southwest of National Park (s. Fig. 2)

Die Endmoränen und Grundmoränen sind vor allem durch Geschiebelehm charakterisiert, während die Sanderflächen deutlich nährstoffarmer sind. Durch Verwitterung und Bodenbildungsprozesse kam es zur Verbraunung, Podsolierung und Tonverlagerung. Podsole, Braunerden, Parabraunerden und Pseudogleye sind die typischen Böden der Eiszeitlandschaften Mecklenburgs (<https://www.lunq.mv-regierung.de>). Im Untersuchungsgebiet konnten wir besonders 2009 z. T. noch reine Sandböden mit extrem geringer Humusaufgabe auf einer ehemaligen militärischen Übungsfläche vorfinden. In den Moorgebieten stehen Niedermoorböden an und in den Mischwäldern mit stärkerer Humusaufgabe haben sich Braunerden mit einem A, B und C-Horizont ausgebildet. Die Boden-pH-Werte (in KCl) reichten von 2,4 bis 3,6 (eigene Untersuchungen).

2.2 Klima

Das Klima des Müritzgebietes ist durch unterschiedlichen maritimen Einfluss geprägt (GRUNDMANN 1999). Während der nordwestliche Teil des Gebietes mit mehr als 600 mm Jahresniederschlag unter stärker ozeanischem Einfluss steht, ist dieser Einfluss südlich und östlich der Müritz geringer. Für den Ort Waren am Nordufer der Müritz werden im langjährigen Mittel 597 mm Jahresniederschlag und für den Ort Boek im Südosten der Müritz 522 mm angegeben (GRUNDMANN 1999). Der Deutsche Wetterdienst weist für den Zeitraum von Oktober 2017 und September 2022 für den Ort Waren eine mittlere Niederschlagssumme von 562 mm, eine mittlere Juli-Temperatur von 19,1 °C und eine mittlere Januar-Temperatur von +2,5 °C aus (<https://www.wetterdienst.de/Deutschlandwetter/Waren> (Mueritz) /Klima/). Klimatische Besonderheiten ergeben sich für das Müritzgebiet aus der wärmespeichernden Wirkung der großen Wasserflächen der vielen Seen, so dass die herbstliche Abkühlung und die Erwärmung im Frühling gegenüber anderen Gebieten Mecklenburgs verzögert einsetzen (GRUNDMANN 1999).

2.3 Vegetation

Die Fläche des Nationalparks umfasst insgesamt 322 km², wobei 70 % davon mit Wald (insbesondere Kiefern-Forste, Mischwald) bedeckt sind, 14 % der Fläche werden von Seen und 8 % von Mooren eingenommen (<https://www.mueritz-nationalpark.de/wissen-verstehen/der-nationalpark/mueritz-nationalpark-zahlen-und-fakten>). Nach GRUNDMANN (1999) wurden circa 1000 einheimische und eingeführte Gefäßpflanzen für das Müritzgebiet festgestellt. Für das Untersuchungsgebiet im Südwesten des Nationalparks liegen Florenlisten von HILBIG & WERNER (1977) mit circa 500 Gefäßpflanzen sowie Artenlisten zur Fauna und Flora (GROBE & STORDEUR 2001) vor. Die Vegetation des Untersuchungsgebietes ist vor allem durch unterschiedlich (30 bis 120 Jahre) alte Kiefern-Forste (*Pinus sylvestris* L.) geprägt, die in der zweiten Baumschicht u. a. *Fagus sylvatica* L., *Betula pendula* Roth, *Sorbus aucuparia* L., *Quercus robur* L. und die nordamerikanische, invasive *Prunus serotina* Ehrh. aufweisen. Die Spätblühende Traubenkirsche (*P. serotina*) war bis zur Jahrhundertwende (19./20. Jahrhundert) für Mecklenburg noch nicht bekannt. Wahrscheinlich aus jagdlichen Gründen wurde diese nordamerikanische Art um 1910 in den Revieren Gnewitz und Neubrück in der Oberförsterei Lüttenhagen östlich von Neustrelitz gepflanzt (BORRMANN 1987) und hat sich seitdem in Mecklenburg massiv ausgebreitet.

Die Krautschicht der artenarmen Kiefernforste besteht u. a. aus *Deschampsia flexuosa* (L.) Trin., *Carex arenaria* L., *Oxalis acetosella* L., *Rumex acetosella* L., *Mycelis muralis* (L.) DUMORT., *Lonicera periclymenum* L., *Dryopteris carthusiana* (VILL.) H.P. FUCHS, *D. dilatata* (HOFFM) A. GRAY und Keimlingen von *S. aucuparia*, *Q. robur* und *B. pendula*. In artenreicheren Kiefernforsten treten weitere Arten hinzu, u. a. *Linnaea borealis* L., *Vaccinium myrtillus* L., *Vaccinium vitis-idaea* L., *Melampyrum pratense* L., *Maianthum bifolium* (L.) F.W. Schmidt, *Galium saxatile* L. und *Orthilia secunda* (L.) HOUSE.

Im Untersuchungsgebiet befindet sich das Moor bei Zartwitz, das von einem Gürtel aus *Betula pubescens* Ehrh. begrenzt ist. Die freie Wasserfläche des Moores ist von Schwingrasen aus verschiedenen *Sphagnum*-Arten umgeben, zwischen denen u. a. *Drosera rotundifolia* L., *Eriophorum vaginatum* L., *Carex rostrata* Stokes, *Carex limosa* L., *Carex canescens* L., *Vaccinium oxycoccos* L., *Calla palustris* L. wachsen. *Rhododendron tomentosum* Harmaja (Sumpfporst) und kleine Pflanzen von *Pinus sylvestris* stehen nah am Schwingrasen. Etwas ferner davon schließen sich *Molinia caerulea* (L.) Moench, *Calamagrostis canescens* (F.H. Wigg.) Roth und *Betula pubescens* Ehrh. an. Den Übergang zum Kiefernforst bildet ein Moorbirkengürtel (*B. pubescens*) mit *D. flexuosa*, *V. myrtillus*, *M. caerulea*, *D. carthusiana*, *Rubus fruticosus* agg. und Keimlingen von *B. pubescens*, *S. aucuparia*, *Frangula alnus* Mill. in der Krautschicht.

Juniperus communis L. (Wacholder) ist relativ zahlreich in den Kiefern-Forsten vertreten. Bereits in Pollenanalysen aus Profilen des Frauentogsees bei Penzlin, östlich des Müritz-Nationalparks, wurden für die junge Dryaszeit (vor 12 700 Jahren) und für das Präboreal (vor 11 600 Jahren) Wacholder-Pollen nachgewiesen (BÖRNER 2012).

In den Schilfgürteln (*P. australis*) der Seen wachsen u. a. *Thelypteris palustris* Schott, *Circuta virosa* L., *Peucedanum palustre* (L.) Moench, *Rumex hydrolapathum* Huds., *Scutellaria galericulata* L., *Lysimachia thyrsiflora* L., *L. vulgaris* L., *Solanum dulcamara* L., *Lythrum salicaria* L., *Galium palustre* L., *Carex paniculata* L., *Carex pseudocyperis* L., *Frangula alnus* Mill., *Alnus glutinosa* (L.) Gaertn., *Salix cinerea* L. und *Mentha aquatica* L. Im Müritzgebiet gibt es zudem große Vorkommen von *Cladium mariscus* (L.) Pohl, wobei es sich um die ausgedehntesten Bestände in ganz Mecklenburg-Vorpommern handelt (GRUNDMANN 1999).

2.4 Entnahme von Wurzelmaterial der Wirtspflanzen

Deschampsia flexuosa im Juni 2009, im Juni und August 2011

An fünf verschiedenen Standorten des Untersuchungsgebietes wurden Wurzelproben von *D. flexuosa* mit einem Zylinder (30 cm Länge und einem Durchmesser von 8 cm) in bereits vorhandenen bzw. in neu eingerichteten Dauerflächen entnommen: 1. Schießplatz (S05, S07, S11), einem ehemaligen Truppenübungsplatz der sowjetischen Streitkräfte, der bis 1989 genutzt worden ist und Anfang der 1990-er Jahre eine fast vegetationslose Sandfläche darstellte, die von Samen der unmittelbar umliegenden Kiefern-Forste erreicht wurde und unterschiedliche Sukzessionsstadien der Wiederbewaldung zeigte. 2. Ein artenarmer, etwa einhundertjähriger Kiefernforst in der Nähe des Priesterbäckersees (P04, P07, P10). 3. Ein artenreicherer, einhundertjähriger Kiefernforst (ML02, ML03, ML07), 4. Moorbirkengürtel bei Zartwitz (ZM01, ZM02, ZM03) und 5. Ein etwa dreißigjähriger Kiefern-Forst nahe des Ortes Boek (BW02, BW04, BW06). Im Jahr 2009 erfolgte die Probennahme in

drei Plots je Standort mit jeweils drei Wurzelproben. Bei der Wiederholung der Untersuchungen im Juni und August 2011 wurden nicht an allen Standorten von 2009, sondern nur an S05, PO4, ML07, ZM, BW2 jeweils 10 Bodenzylinder mit Wurzelproben von *D. flexuosa* entnommen. Das heißt, statt 3 Plots mit je 3 Wurzelproben je Standort wie in 2009, wurde 2011 nur 1 Plot je Standort mit 10 relativ nah liegenden Wurzelproben untersucht.

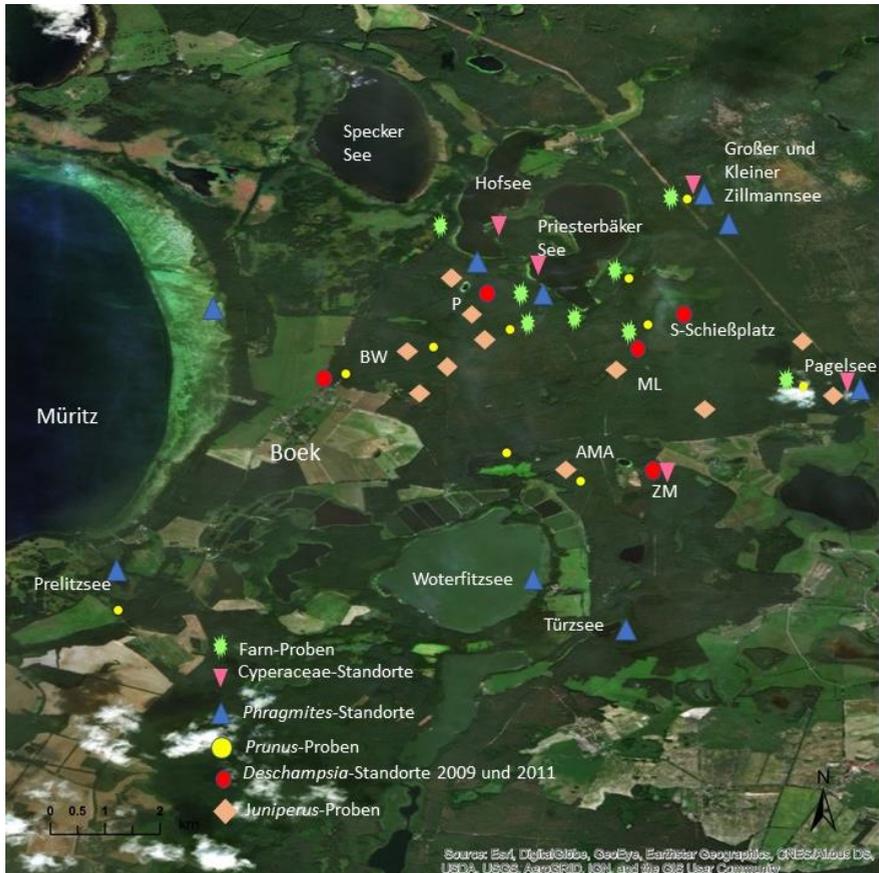


Abb. 2 Probennahme im Untersuchungsgebiet. Bei *Dechampsia*, *Phragmites* und *Cyperaceae* sind die Standorte angegeben, an denen es mehreren Plots gab, in denen Wurzelproben genommen wurden. Bei *Juniperus*, *Prunus* und den Farnen sind die Plots eingezeichnet, die beprobt wurden. AMA, Mischwald am Amalienhof; P, artenarme Kiefern-Forstes am Priesterbäcker See; ML, artenreichere Kiefern-Forstes mit *Linnaea borealis*; S, Schießplatzfläche; BW, dreißigjähriger Kiefern-Forest am Ort Boek; ZM, Moorbirkengürtel am Zartwitzer Moor.

Fig. 2 Sampling in the area under investigation. In the case of *Dechampsia*, *Phragmites* and *Cyperaceae*, the sites are indicating, where some more plots existed and root samples were taken. For *Juniperus*, *Prunus* and ferns, the plots for sampling are indicating. AMA, mixed forest at Amalienhof; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäcker See; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; S, military training ground; BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ZM, belt with downy birches around Swamp of Zartwitz.#

Phragmites australis im Juni 2013

Neun verschiedene Seen (Müritz, Hofsee, Priesterbäker See, Kleiner und Großer Zillmannsee, Prelitzsee, Woterfitzsee, Tüorzsee und Pagelsee) mit Schilfgürteln (*Phragmites australis*) wurden zur Beprobung ausgewählt. An jedem See wurden zwei Plots in einem Mindestabstand von 50 m angelegt. Die Plots bestanden jeweils aus zwei Subplots (1 m x 1 m). Der erste Subplot wurde in Seenähe (Uferkante) und der andere in 5 m Entfernung (in Seeferne) eingerichtet. Pro Subplot wurde ein Bodenprobenzylinder (30 cm Länge und 8 cm Durchmesser) mit Schilfwurzeln entnommen, so dass insgesamt 36 Wurzelproben auf VA-Mykorrhiza untersucht worden sind.

Cyperaceae im Juni 2017

An vier verschiedenen Seen (Hofsee, Priesterbäker See, Großer Zillmannsee, Pagelsee) und im Zartwitzer Moor wurden je eine Dauerfläche (5 m x 5 m) seenah (feucht) und seefern (trockener) angelegt und von den darin wachsenden Arten der Cyperaceae Feinwurzeln entnommen. An feuchten Standorten wurden *Carex elata*, *C. acutiformis*, *C. paniculata*, *C. acuta*, *C. nigra*, *C. limosa*, *C. rostrata*, *C. canescens* und *Eriophorum vaginatum* beprobt, an den trockeneren Standorten *C. hirta*, *C. leporina*, *C. acutiformis* und *C. arenaria*.

Wurzelproben von *Juniperus communis* im Juni 2015

Es wurden 11 Dauerflächen (10 m x 10 m) mit *J. communis* an insgesamt 5 Standorten (in der Nähe des Pagelsees (PAG); im einhundertjährigem, artenreicheren Kiefern-Forst (ML); im einhundertjährigen, artenarmen Kiefern-Forst (P); im dreißigjährigem Kiefern-Forst bei Boek (BW) und im Mischwald bei Amalienhof (AMA) im Untersuchungsgebiet eingerichtet, nachdem diese unter einer Vielzahl von Flächen zufällig ausgewählt worden sind. Von jeweils 2-3 männlichen Individuen des Gehölzes pro Dauerfläche wurde per Spaten Feinwurzelmaterial entnommen. Die männlichen *Juniperus*-Individuen waren häufiger als die weiblichen und konnten im Juni an den noch vorhandenen männlichen Blüten gut erkannt werden. Zudem wurde das Alter des jeweils beprobten Individuums von *J. communis* per Bohrkern und der Boden-pH-Wert in den 11 Dauerflächen bestimmt.

Prunus serotina im Juni 2019

Es wurden zehn Dauerflächen (5 m x 5 m) eingerichtet, in denen drei verschiedene Altersstadien von *P. serotina* (< 10 cm; > 10 cm- 100 cm; > 100 cm) unterschieden wurden. Zusätzlich wurde bei den älteren *Prunus*-Individuen das tatsächliche Alter per Bohrkern bzw. bei kleinen Individuen nach anatomischen Querschnitten der basalen Sprossachse bestimmt. Zudem wurde das Alter von *Pinus sylvestris* in der Baumschicht per Bohrkern ermittelt. Der pH-Wert des Bodens wurde im Labor festgestellt. Zusätzlich wurde in jeder Dauerfläche der Chlorophyllgehalt der *Prunus*-Blätter mittels Chlorophyllmeter SPAD 502 ermittelt sowie der Blattflächenindex (LAI) bestimmt, um ein Maß für die Bestandsstruktur zu erhalten.

Farnpflanzen im Juni 2021

An acht verschiedenen Standorten mit Farnpflanzen wurde jeweils eine Dauerfläche von (5 m x 5 m) eingerichtet und Feinwurzelproben der jeweiligen Art mittels Spaten entnommen. Beprobt wurden die Farne *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *D. dilatata*, *D. cathusiana*, *Pteridium aquilinum* und *Thelypteris palustris*, deren Wurzeln auf den Grad der VA-Mykorrhizierung untersucht wurden.

Außerdem wurde für jede Dauerfläche der pH-Wert ermittelt, die mittlere Bodenfeuchtigkeit und der relative Lichtgenuss mittels Licor PAR-Sensoren bestimmt. Ferner dienten Kronen-Fotos dazu, die mittels Fisheye-Objektiv genommen wurden, den Blattflächenindex (LAI) und den Anteil des Sichtbaren Himmels (Visible Sky), als Maß für den relativen Lichtgenuss mittels des Programms Hemiview zu ermitteln.

2.5 Wurzelaufbereitung und Abschätzung der VA-Mykorrhiza

Die Feinwurzeln der jeweiligen Arten wurden für wenige Tage in Wasser in Tubes im Kühlschrank bei +4 °C gelagert. Bei längerer Lagerung wurden die Feinwurzeln in 30 %-50 % Alkohol überführt.

Die Vorbereitung der Feinwurzeln für die Bestimmung der VA-Mykorrhizierung erfolgte auf folgende Weise im Labor in Halle:

Die Feinwurzeln der Süßgräser (*D. flexuosa* und *P. australis*) wurden in Tubes mit zehnprozentiger Kalilauge überführt und diese Tubes für 10 min in kochendes Wasser gebracht. Danach wurden die Feinwurzeln in Leitungswasser gründlich gespült und für 10 min bei Raumtemperatur in 2 % Essigsäure gelagert. Für die Färbung wurde 5 %-ige SHEAFFER-Tinte verwendet, die mit 2 %-iger Essigsäure verdünnt worden war (VIERHEILIG et al. 1998). Die Färbung erfolgte für 10 min, wobei die Tubes mit den Feinwurzeln in der Tinte in kochendes Wasser gebracht wurden. Zum Abschluss wurden die Wurzeln in Leitungswasser gespült und danach in Wasser bei +4 °C im Kühlschrank aufbewahrt.

Die Feinwurzeln von *J. communis* wurden vor dem Färben mit SHEAFFER-Tinte in 10 %-iger Wasserstoffperoxid-Lösung geblichen und danach in Wasser gespült und erst dann gefärbt.

Für die Cyperaceae, *P. serotina* und Farnpflanzen wurde als Färbemittel Trypanblau verwendet (CHABAUD et al. 2006). Die Feinwurzeln von den Cyperaceae wurden in Tubes mit 10 %-iger Kalilauge gebracht. Die Tubes blieben 10 min in kochendem Wasser. Anschließend wurden die Feinwurzeln in Leitungswasser kräftig gespült. Für das Ansäuern und Neutralisieren der Feinwurzeln bei Raumtemperatur für 10-20 min wurden einige Tropfen hochprozentiger Milchsäure in das Wasser gebracht. Nach dem Spülen mit Leitungswasser mussten die Feinwurzeln in Tubes mit Trypanblaulösung überführt werden, die in Lactoglycerol angesetzt worden ist (25 ml 2% Trypanblaulösung + 1000 ml Lactoglycerol). Diese Färbung sollte nur 3 min dauern, wobei die Tubes in kochendes Wasser gebracht worden sind. Nach dem Spülen der Feinwurzeln mit Wasser wurden die Feinwurzeln in Tubes mit Lactoglycerol überführt und im Kühlschrank bei +4 °C aufbewahrt.

Die Wurzeln von *P. serotina* und der Farnpflanzen mussten zusätzlich nach zwei- bis dreistündiger Mazeration in Kalilauge, geblichen werden. Das Bleichen der Wurzeln erfolgte in 10 %-iger Wasserstoffperoxid-Lösung. Die weiteren Arbeitsschritte unterschieden sich nicht von der Aufbereitung der Wurzeln der Cyperaceae.

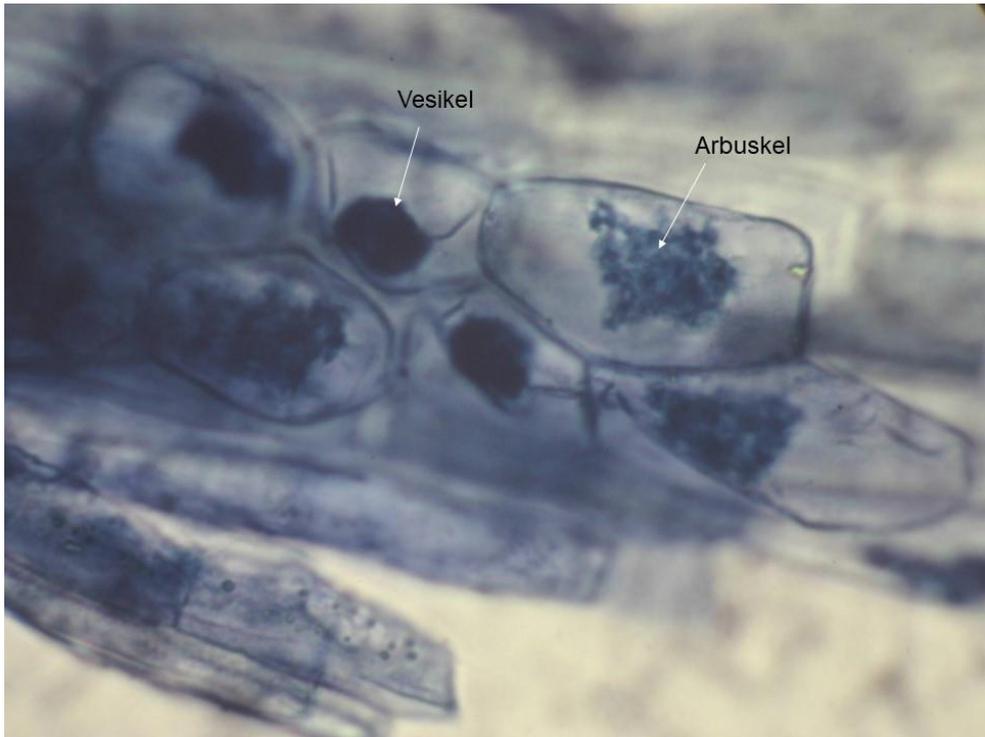


Abb. 3 VA-Mykorrhiza im Rindenparenchym der Feinwurzeln von *Prunus serotina* im Müritzer Nationalpark (Foto H. Dörfelt).

Fig.3 VA mycorrhiza in the cortex parenchyma of fine roots of *Prunus serotina* from Müritzer National Park (Foto H. Dörfelt).

Die Mykorrhizierung der Feinwurzelproben wurde nach TROUVELOT et al. (1986) abgeschätzt und durch das Programm Mycocalc berechnet. Dazu waren je Probe 30, circa 1 cm lange Feinwurzelstücke nötig, die unter dem Lichtmikroskop untersucht wurden. Die Einschätzung der Mykorrhizierung fand zuerst durch Abschätzen des Auftretens von Vesikeln und Arbuskeln (vgl. Abb. 3) nach den von TROUVELOT et al. (1986) beschriebenen Klassen von 0 bis 5 statt. Dabei wurde Klasse 0 angegeben, wenn keine Mykorrhizierung festzustellen war. Die Klasse 1 steht für eine Mykorrhizierung der Wurzelstücke von weniger als 1%, Klasse 2 für den Mykorrhizierungsgrad < 10%. Lag die Mykorrhizierung zwischen > 10 % und < 50 % wurde Klasse 3 angegeben, bei einer Mykorrhizierung von bis zu 90 % Klasse 4 und bei > 90 % Klasse 5. Zusätzlich wurde die Arbuskelhäufigkeit eingeschätzt.

Die Berechnung der Mykorrhizierung erfolgte mit Hilfe folgender Formeln (TROUVELOT et al. 1986) mit dem Programm Excel oder dem Programm Mycocalc.

$$F [\%] = \text{Mykorrhizafrequenz} (1)$$

$$F [\%] = \frac{\text{Anzahl mykorrhizierter Wurzelfragmente}}{\text{Gesamtzahl der Wurzelfragmente}} \times 100$$

M [%] = Mykorrhizaintensität (2)

Mit dieser Formel werden die Mykorrhizierungsstadien entsprechend der Klassen gewichtet.

$$M[\%] = \frac{95 n_5 + 70 n_4 + 30 n_3 + 5 n_2 + n_1}{\text{Gesamtzahl der Wurzelfragmente}} \times 100$$

n_5 bis n_1 = Anzahl (n) der Wurzelfragmente in den jeweiligen Klassen 1-5

m [%] = Mykorrhizaintensität in den mykorrhizierten Wurzelfragmenten (3)

$$m[\%] = M \times \frac{\text{Gesamtzahl der Wurzelfragment}}{\text{Anzahl mykorrhizierter Wurzelfragmente}}$$

a [%] = Arbuskelhäufigkeit in den mykorrhizierten Wurzelfragmenten (4)

$$a [\%] = \frac{100 m A_3 + 50 m A_2 + 10 m A_1}{100}$$

In Formel (4) geben $m A_3$, $m A_2$ und $m A_1$ die Prozentsätze für m an, welche für die Klassen A1, A2 und A3 ermittelt worden sind.

A [%] = Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem (5)

A [%] = $a \times (M / 100)$

2.6 Zusätzliche Untersuchungen

pH-Wert des Bodens

Der Boden-pH-Wert wurde im Labor mit einer Glaselektrode gemessen. Als Suspensionsmittel wurde sowohl H_2O demin. als auch 1 N KCl verwendet.

Chlorophyllgehalt von Laubblättern

Das Chlorophyllmeter SPAD 502 wurde im Gelände verwendet, um den relativen Chlorophyllgehalt in Pflanzenblättern zu bestimmen. Das Chlorophyllmeter misst die Extinktion von Licht im Wellenlängenbereich des Chlorophylls im Blatt. Die Index-Werte des Chlorophyllgehaltes sind dimensionslos und liegen zwischen -9.9 und 199.9.

Blattflächenindex (LAI)

Der Blattflächenindex (engl. LAI, Leaf Area Index) beschreibt das Verhältnis der einseitigen Blattfläche

zur darunter liegenden Bodenfläche. Zur Bestimmung des Blattflächenindex wurde das Gerät LAI-2200C Plant Canopy Analyzer (LiCor) verwendet. Zur Analyse wurden Messungen mit dem optischen Sensor außerhalb des Waldes vorgenommen und mit Messungen in verschiedenen Höhen unterhalb des Kronendaches in Bezug gesetzt.

Visible Sky mit „Fish-eye Objective“

Fischaugenobjektive bilden die Hemisphäre mit deutlichen aber nicht übermäßigen Verzerrungen auf der Bildebene ab. Sie werden in der Ökologie verwendet, u. a. um einen halbkugelförmigen Bereich der Pflanzenvegetation zu erfassen. Aus der Analyse dieser Bilder können relevante Strukturparameter von Baumkronen abgeleitet werden, wie der Blattflächenindex (LAI) und aus dem sichtbaren Himmelsbereich die Lichtverfügbarkeit (Visible Sky).

Relativer Lichtgenuss

Der relative Lichtgenuss ist die Lichtmenge, die die Pflanzen oder ihre Blätter an einem gegebenen Wuchsort im Verhältnis zu der unter freiem Himmel μmol Photonen pro m^2 und Sekunde erhalten. Zur Messung des relativen Lichtgenusses wurden zwei PAR-Sensoren (LiCor HD2102.2= verwendet, die diese zwei Messungen zeitgleich vorgenommen haben. Zur Berechnung des relativen Lichtgenusses wurde die gemessene Strahlungsmenge in μmol Photonen pro m^2 und Sekunde durch den Referenzwert zur entsprechenden Uhrzeit dividiert und mit 100 % multipliziert.

2.7 Statistik

Alle statistischen Analysen sowie die Erstellung von Grafiken wurden mit dem Programm R, Version 4.0.3 (R Core Team, 2020) ausgeführt. Im Speziellen wurde für die Grafiken das ggplot2-package (WICKHAM 2016) verwendet. Der Einfluss von Standortfaktoren (pH-Wert, relative Lichtgenuss, LAI, Visible Sky, mittlere Bodenfeuchtigkeit, Chlorophyllgehalt der Blätter) oder der Einfluss des Alters von Individuen und die Interaktionen dieser Faktoren (Zweifach- und Dreifach-Interaktionen) wurden mit gemischten Modellen mit Hilfe des ‘lmerTest’ package (KUZNETSOVA et al. 2017) ermittelt. In diesen Modellen war in allen Fällen die konkrete Aufnahmefläche (plot), in denen verschiedene Arten oder Individuen beprobt wurden, der zufällige Faktor. Die Antwort-Variablen (response variables) waren die Frequenz und Intensität der VA-Mykorrhiza sowie die Arbuskelhäufigkeit (alles in Prozentwerten). Bei der Signifikanz des jeweiligen Faktors wurde mittels eines Tukey post-hoc Tests (‘ghlt’-function in the multcomp-package, HOTHORN et al. 2008) auf signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Stufen dieses Faktors geprüft.

3 Ergebnisse

3.1 VA-Mykorrhiza von *Deschampsia flexuosa* (Drahtschmiele)

Die Mykorrhizierung von *D. flexuosa* unterschied sich im Juni 2009 signifikant zwischen den beprobten Standorten (vgl. Abb. 4, Tab. 1). Die Mykorrhiza-Frequenz der Drahtschmiele war im einhundertjährigen, artenreicheren Kiefern-Forst (ML) signifikant am höchsten, während die Intensität

als auch die Arbuskelhäufigkeit sowohl in ML als auch im Moorbirkengürtel (ZM) am stärksten war. Den geringsten Mykorrhizierungsgrad (Intensität und Arbuskelhäufigkeit) zeigte *D. flexuosa* sowohl auf dem Schießplatz (S) als auch im artenarmen Kiefern-Forst (P). Bei der Wiederholung dieser Beprobung 2011 konnten allerdings weder im Juni noch im August 2011 Unterschiede in der Mykorrhizierung an den verschiedenen Standorten festgestellt werden.

Tab. 1 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosain* Juni 2009 in Abhängigkeit vom Standort.

Table 1 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosain* June 2009 in dependency of site.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Standort	11.470	< 0.001	21.251	7.072e-05	10.074	9.772e-06

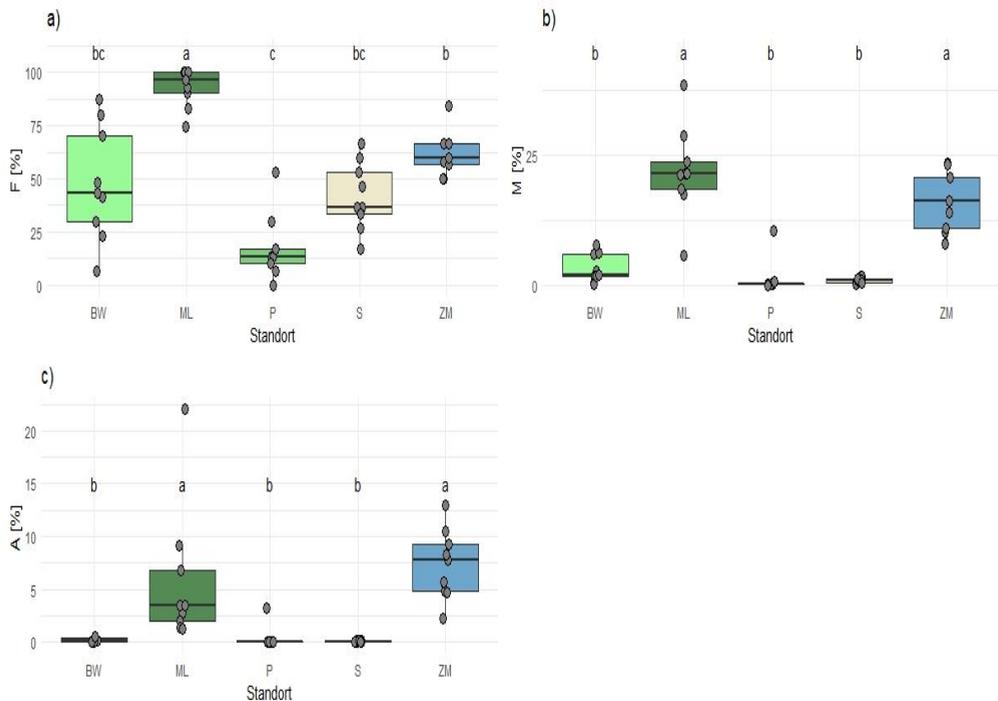


Abb. 4 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosa* im Juni 2009 in Abhängigkeit vom Standort: BW, etwa dreißigjähriger Kiefern-Forst im Boeker Wald; ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst; P, artenarmer Kiefern-Forst; S, Schießplatz; ZM, Moorbirkengürtel am Zartwitzer Moor. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 4 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosain* June 2009 in dependency of site: BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; S, military training ground; ZM, belt with downy birches around

Swamp of Zartwitz. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Für die Beprobung 2011 zu unterschiedlichen Zeitpunkten (Juni und August) zeigte sich eine gewisse Saisonalität, wenn die Interaktion von Standort und Zeit betrachtet wurde. Im August 2011 war die Arbuskelhäufigkeit von *D. flexuosa* an den Standorten mit marginaler Signifikanz ($p=0.076$) geringer als im Juni 2011 (vgl. Abb. 5, Tab. 2). Eine Ausnahme bildete der artenarme Kiefern-Forst (P), wo im Vergleich zu allen anderen Standorten die Mykorrhizafrequenz und die Arbuskelhäufigkeit bei *D. flexuosa* im August höher war als im Juni.

Tab. 2 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosa* im Juni und August 2011. Es werden die Ergebnisse der Interaktion von Standort und Zeitpunkt (Date) gezeigt. BW, Boeker Wald, ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst, P., artenarmer Kiefern-Forst, S, Schießplatz, ZM, Moorbirkengürtel am Zartwitzer Moor. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Table 2 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosa* in June and August 2011. The results of interaction between site and date are indicating. BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; S, military training ground; ZM, belt with downy birches around Swamp of Zartwitz. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Standort	0.917	0.407	0.273	0.895	1.015	0.404
Date	0.956	0.331	1.735	0.191	3.231	0.076
Standort:Date	0.661	0.621	0.236	0.917	1.178	0.326

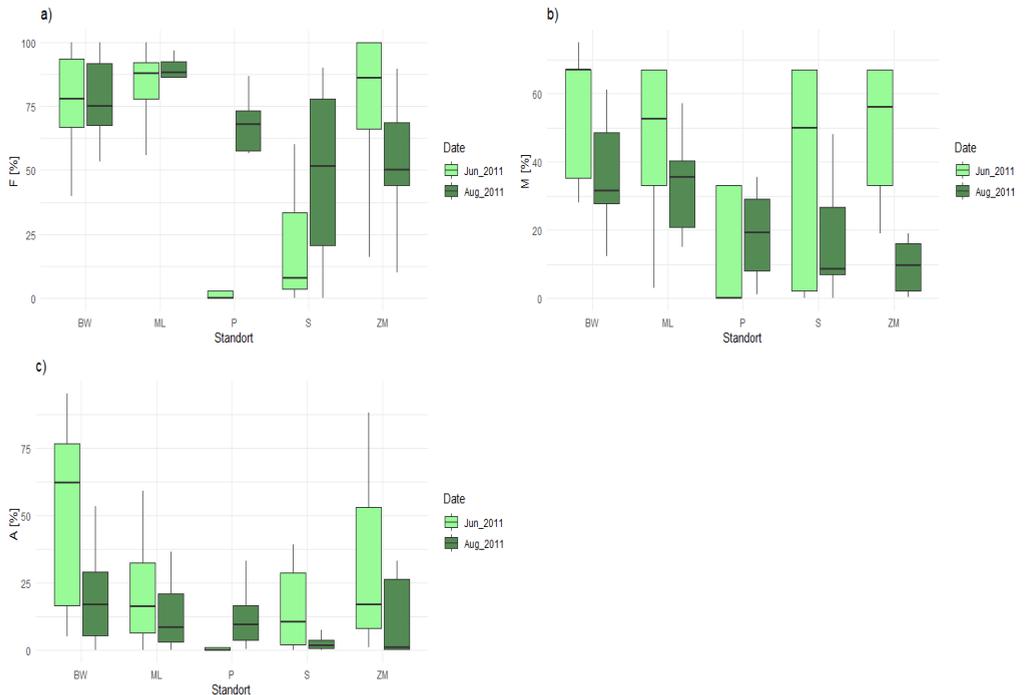


Abb. 5 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosa* im Juni und August 2011. Die Grafik demonstriert die die Ergebnisse der Interaktion von Standort und Zeitpunkt (Date). BW, Boeker Wald, ML, artenreicher, einhundertjähriger Kiefern-Forst, P., artenarmer Kiefern-Forst, S, Schießplatz, ZM, Moorbirkengürtel am Zartwitzer Moor. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 5 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosa* in June and August 2011. The figure is presenting the results of mycorrhization in depending on the interaction of site and date. BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; S, military training ground; ZM, belt with downy birches around Swamp of Zartwitz. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Zur Betrachtung der Mykorrhizierung von *D. flexuosa* in den unterschiedlichen Jahren wurden Plot und Standort random gesetzt. Die Intensität der Mykorrhizierung von *D. flexuosa* zeigte signifikante Unterschiede zwischen den Jahren 2009 und 2011 (vgl. Abb.6, Tab. 3), während sich die Frequenz der Mykorrhiza zu den verschiedenen Zeitpunkten nicht unterschied. Im Juni 2011 waren sowohl die Mykorrhizaintensität als auch die Arbuskelhäufigkeit höher als im Juni 2009 und im August 2011, so dass auch hier die Saisonalität in der Intensität der Mykorrhiza und in der Arbuskelhäufigkeit im Jahr 2011 deutlich wird.

Tab. 3 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosa* in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Beprobung: im Juni 2009, im Juni sowie August 2011.

Table 3 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosa* in depending on sampling date in June 2009, in June 2011 and August 2011.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Date	0.746	0.476	28.70	4.056e-10	14.229	9.938e-06

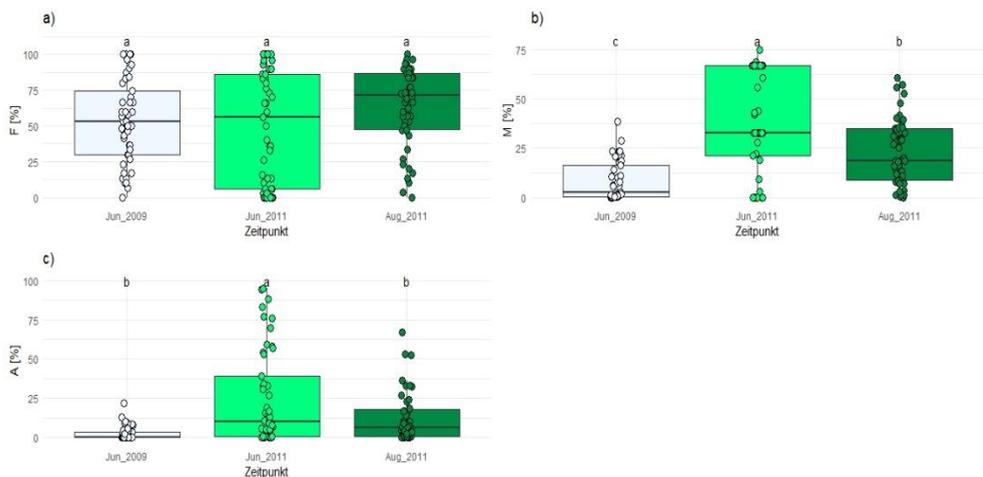


Abb. 6 Die Mykorrhizierung von *Deschampsia flexuosa* in Abhängigkeit vom Zeitpunkt der Beprobung: im Juni 2009 und im Juni sowie August 2011. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 6 Mycorrhization of *Deschampsia flexuosa* in depending on sampling date in June 2009, in June 2011 and August 2011. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

3.2 Die VA-Mykorrhiza von *Phragmites australis* (Schilf)

Sowohl für seeferne als auch seenahe Standorte konnte eindeutig eine Mykorrhizierung an den Feinwurzeln von *P. australis* an den untersuchten Seen festgestellt werden, wobei sich nur die Frequenz der Mykorrhiza mit marginaler Signifikanz zwischen diesen beiden Feuchtebedingungen (seenah/seefern) unterschied ($p = 0.093$, Tab. 4, Abb. 7) Die seefernen Pflanzen von Schilf hatten eine

nur leicht höhere Mykorrhizafrequenz als die seenah, meist im Wasser stehenden Pflanzen. Die Intensität der Mykorrhiza und die Arbuskelhäufigkeit von Schilf unterschieden sich nicht zwischen den Positionen seenah und seefern. Zwischen den See-Standorten war die Mykorrhizierung von *P. australis* generell nicht unterschiedlich und auch nicht abhängig von der Interaktion der Faktoren See-Standort und Position. Das Auftreten von Arbuskeln in den Feinwurzeln von *P. australis* war eine Seltenheit in allen Proben.

Tab. 4 Die Mykorrhizierung von *Phragmites australis* an den Positionen seenah und seefern.

Table 4 Mycorrhization of *Phragmites australis* at the position near lake and at distance of lake.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Position	3.104	0.093	0.631	0.433	1.016	0.325

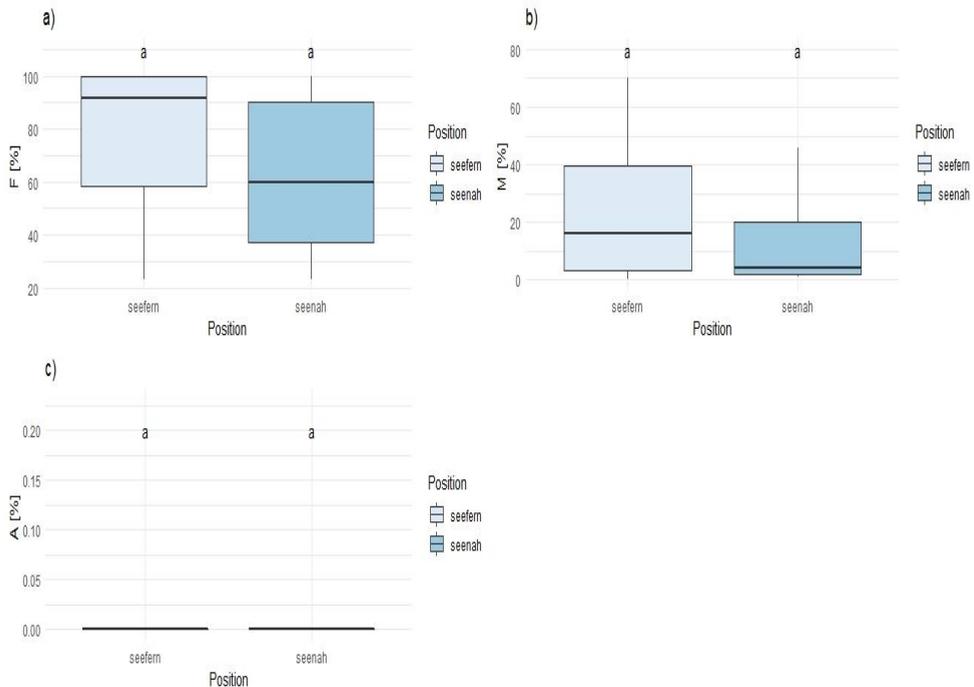


Abb. 7 Die Mykorrhizierung von *Phragmites australis* an den Positionen seenah und seefern. Arbuskeln wurden höchst selten ausgebildet, deshalb ist die Arbuskelhäufigkeit=0, a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 7 Mycorrhization of *Phragmites australis* at the position near lake and at distance of lake. Arbuscules were developed rare, that's why the arbuscular abundance=0, a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

3.3 Die VA-Mykorrhiza bei Cyperaceae (Ried- oder Sauergräser)

Alle untersuchten Sauer- und Riedgräser waren mit VAM-Pilzen infiziert, vorrangig wurden Vesikel der Glomeromycota und nur relativ selten Arbuskel beobachtet. Die Mykorrhizierung hing nicht von den verschiedenen Standorten ab, auch nicht von der jeweiligen Art und ebenso wenig von der Position (seenah/seefern). Die Standorte selbst unterschieden sich nicht signifikant in den pH-Werten (in KCl), während die Positionen der Untersuchungsarten, ob seenah oder seefern, in den pH-Werten (KCl) signifikant verschieden waren (Position: F value 12.905; P value **0.005**) (vgl. Abb. 8). Die seenahen Positionen hatten höhere pH-Werte, die von 3.24 bis 6.54 reichten.

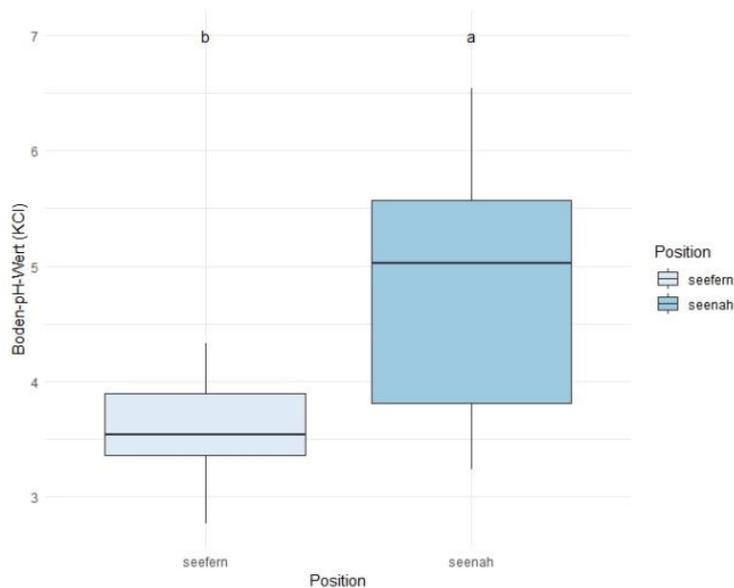


Abb. 8 Die Positionen der Cyperaceae (seefern und seenah) unterscheiden sich signifikant im pH-Wert (KCl).

Fig. 8 The positions of Cyperaceae (at distance of lake and near lake) are significant different in pH value (KCl).

Sowohl die Frequenz (F) als auch die Intensität (M) der Mykorrhizierung zeigten eine Abnahme mit steigendem pH-Wert (KCl) (Abb. 9), die für F marginal signifikant und für M signifikant war (Tab. 5). Dagegen war die Position (seenah/seefern) sowie die Interaktion von Position und pH-Wert (KCl) für die Mykorrhizierung nicht signifikant. Die Feuchtebedingungen spielten demnach eine untergeordnete Rolle im Vergleich zur Bodenreaktion (siehe oben), denn nur der pH-Wert war für die Mykorrhizaintensität signifikant (Tab. 5). Keine der Mykorrhizierungsvariablen war von der untersuchten Art abhängig (Abb. 10, Tab. 6). Auch hier ergab sich über alle Arten hinweg nur ein negativer Zusammenhang mit dem pH-Wert (KCl). Ebenso wenig konnte eine signifikante Interaktion von Art und pH-Wert (KCl) ermittelt werden (Abb. 10, Tab. 6).

Tab. 5 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae in Abhängigkeit von der Interaktion Position (seenah/seefern) und pH-Wert (KCl).

Table 5 The mycorrhization of Cyperaceae in depending on the interaction of position (near lake/at distance of lake) and pH value (KCl).

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Position	0.445	0.541	0.094	0.769	0.041	0.840
pH_KCl	3.330	0.081	5.064	0.035	1.765	0.197
pH_KCl: Position	1.229	0.289	0.165	0.691	1.355	0.256

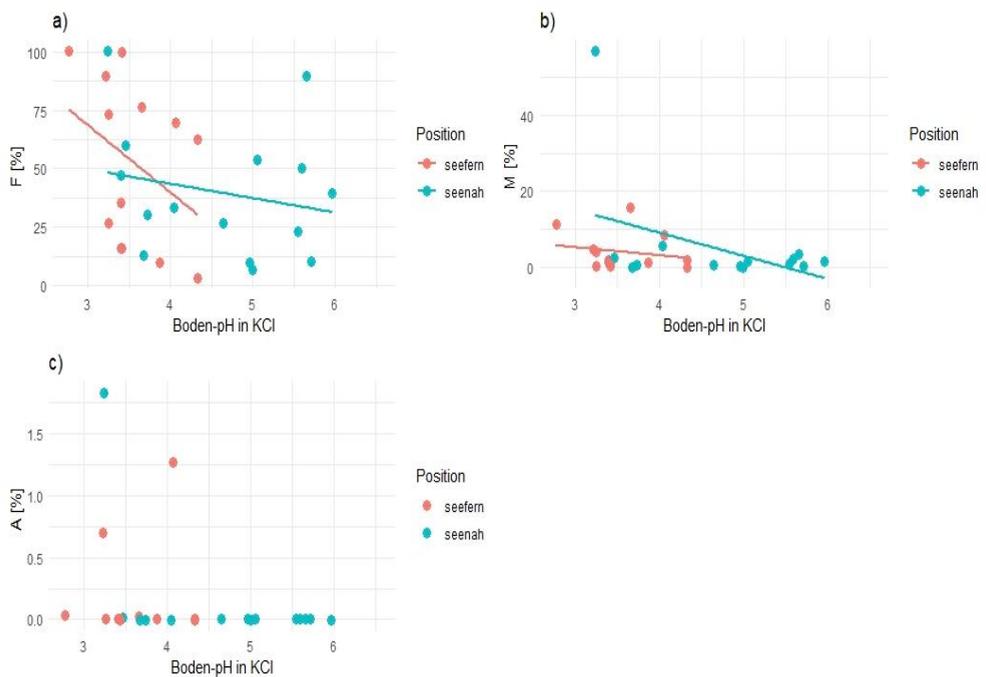


Abb. 9 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae in Abhängigkeit von der Interaktion Position (seenah/ seefern) und pH-Wert (KCl). a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 9 Mycorrhization of Cyperaceae in depending on the interaction of position (near lake/at distance of lake) and pH value (KCl), a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Tab. 6 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae in Abhängigkeit von der Interaktion der Species und pH-Wert (KCl).
 Table 6 Mycorrhization of Cyperaceae in depending on the interaction of species and pH value (KCl).

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Species	0.648	0.727	0.227	0.980	1.008	0.484
pH_KCl	2.377	0.144	5.203	0.038	3.168	0.105
Species:pH_KCl	2.383	0.110	0.080	0.970	0.024	0.995

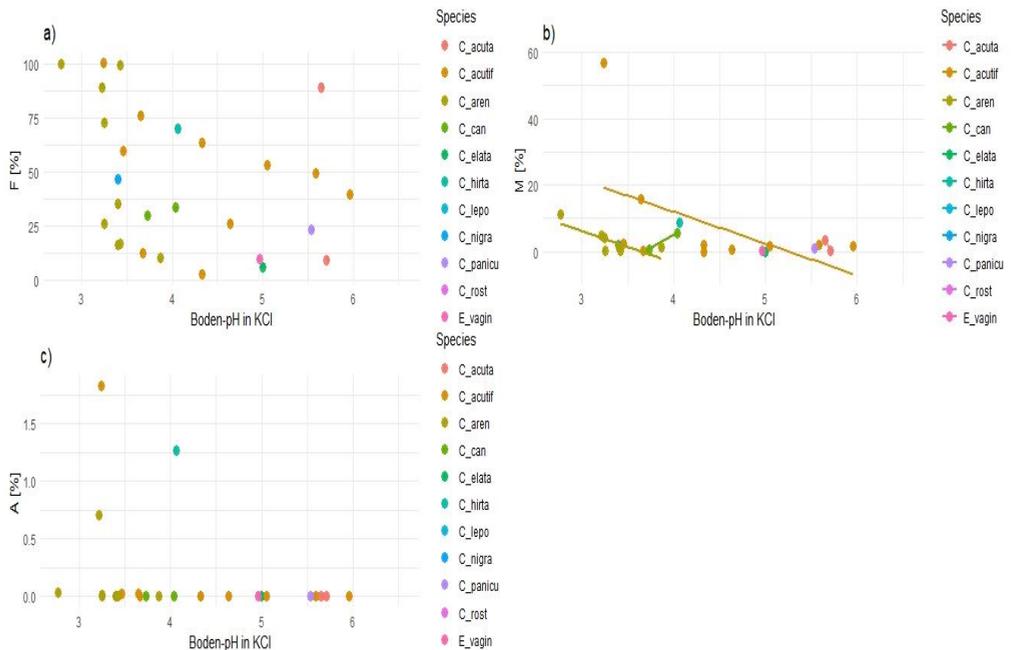


Abb. 10 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae in Abhängigkeit von der Interaktion Species und pH-Wert (KCl). a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 10 Mycorrhization of Cyperaceae in depending on the interaction of species and pH value (KCl), a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Bei gesonderter Betrachtung der Species in der Position seefern, trat eine signifikante Abhängigkeit der Arbuskelhäufigkeit von der Species auf (vgl. Abb. 11, Tab. 7). Bei *C. hirta*, *C. acutiformis* und *Carex arenaria* wurden Arbuskel gefunden, wobei *C. hirta* die höchste Arbuskelhäufigkeit ausbildete. In der Position seenah gab es diesen Zusammenhang nicht.

Tab. 7 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae an seefernen Positionen in Abhängigkeit von der Species: *Carex acutiformis*, *Carex arenaria*, *Carex hirta* und *Carex leporina*.

Table 7 Mycorrhization of Cyperaceae at distance of lake in depending on species: *Carex acutiformis*, *Carex arenaria*, *Carex hirta* and *Carex leporina*.

Species	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Species	0.329	0.806	0.726	0.559	10.65	0.021

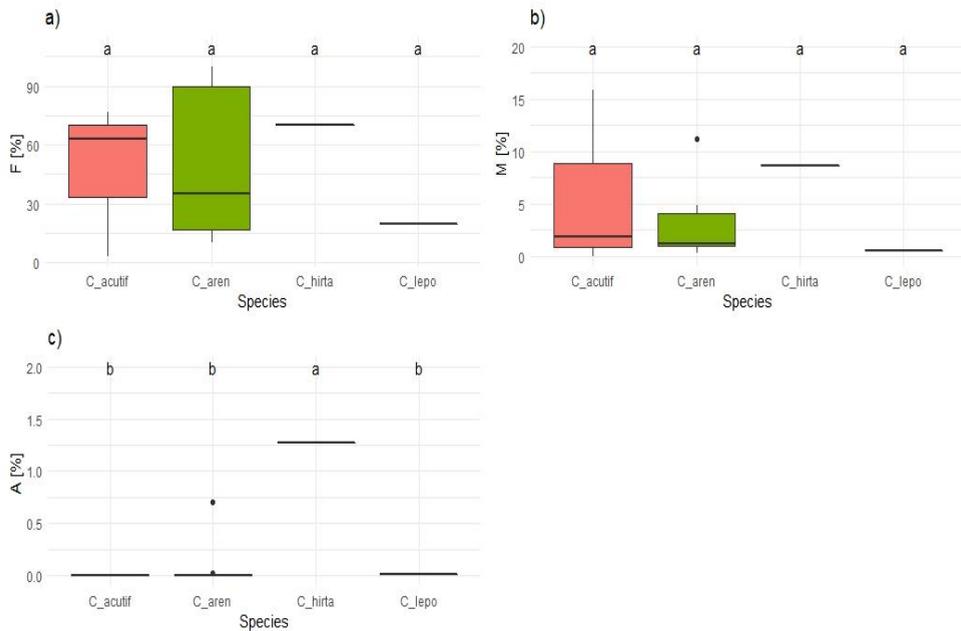


Abb. 11 Die Mykorrhizierung der Cyperaceae an seefernen Positionen in Abhängigkeit von der Species: *Carex acutiformis*, *Carex arenaria*, *Carex hirta* und *Carex leporina*. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 11 Mycorrhization of Cyperaceae at distance of lake in depending on species: *Carex acutiformis*, *Carex arenaria*, *Carex hirta* and *Carex leporina*. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundancy (A in %).

3.4 Die VA-Mykorrhiza von *Juniperus communis* (Wacholder)

Die Standorte, an denen *J. communis* untersucht wurde, unterschieden sich signifikant im Boden-pH-Wert, wobei die pH-Werte (KCl) im sauren Bereich zwischen 2 und 4 lagen (vgl. Abb. 12). Der Standort in der Nähe des Pagelsees hatte dabei den höchsten pH-Wert (3,62), während die Flächen im einhundertjährigen, artenreicheren Kiefern-Forst (ML) den niedrigsten Wert aufwiesen (2,32). Die VA-

Mykorrhiza von *Juniperus* zeigte jedoch keinen direkten Zusammenhang mit dem pH-Wert. Die Feinwurzeln von Wacholder waren an allen Standorten mit VAM-Pilzen mykorrhiziert, wobei sich die Arbuskelhäufigkeit allerdings nur marginal signifikant zwischen den Standorten unterschied ($p=0.070$, vgl. Abb. 13c, Tab. 8). Hier hatten die Wacholder in der Nähe des Pagelsees eine höhere Arbuskelhäufigkeit als die der anderen Standorte, die sich im post-hoc-Test aber nicht unterschieden. Die gemeinsame Analyse von Standort und pH-Wert zeigte, dass die Standortsunterschiede pH-bedingt waren (Tab. 11). Für die Arbuskelhäufigkeit gab es eine signifikante Interaktion von pH-Wert und Standort, die darauf hindeutet, dass auch die geringen Unterschiede der pH-Werte innerhalb der verschiedenen Standorte einen Effekt auf die Arbuskelhäufigkeit von Wacholder hatten (vgl. Abb. 14, Tab. 9).

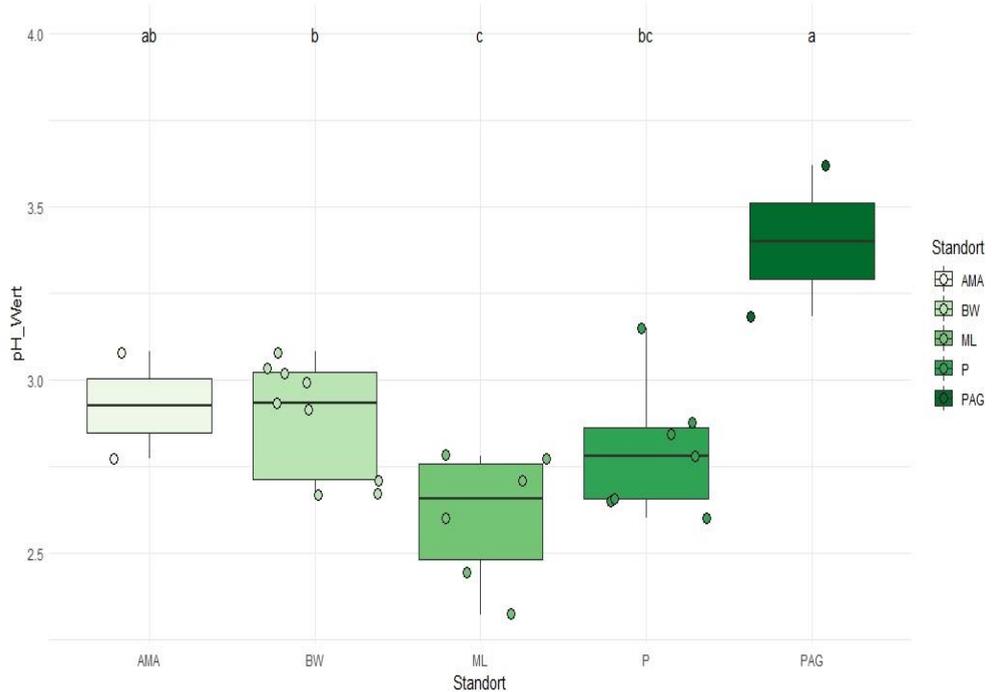


Abb. 12 Die Standorte unterscheiden sich signifikant im pH-Wert (KCl). AMA, Mischwald in der Nähe von Amalienhof, BW, Boeker Wald, ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst, P, artenarmer Kiefern-Forst, PAG, Standort in der Nähe vom Pagelsee. AMA und PAG unterschieden sich nur marginal signifikant voneinander. Standort: F value 7.116; P value < **0.001**.

Fig.12 The sites are significantly different in pH value (KCl). AMA, mixed forest at Amalienhof; BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; PAG, sites near Lake Pagelsee. AMA and PAG were only marginal different. Site: F value 7.116; P value < **0.001**.

Tab. 8 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit vom Standort.Table 8 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on site.

Standort	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Standort	1.703	0.187	0.553	0.708	2.541	0.070

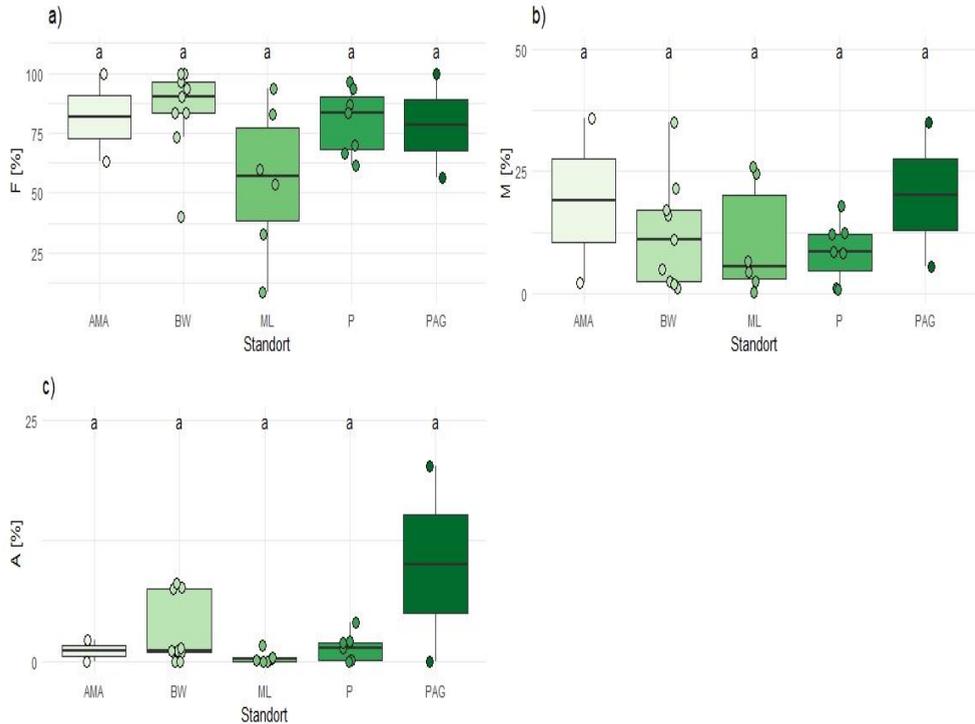


Abb. 13 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit vom Standort. AMA, Mischwald in der Nähe von Amalienhof, BW, Boeker Wald, ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst, P, artenarmer Kiefern-Forst, PAG, Standort in der Nähe vom Pagelsee. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 13 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on site. AMA, mixed forest at Amalienhof; BW, circa firthy years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; PAG, sites near Lake Pagelsee. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundancy (A in %).

Tab. 9 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit von der Interaktion von Standort und pH-Wert (KCl).

Table 9 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on interaction of site and pH value (KCl).

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Standort	1.617	0.218	0.525	0.726	3.539	0.129
pH_KCl	< 0.001	0.988	1.150	0.300	5.453	0.035
Standort:pH_KCl	0.987	0.443	2.052	0.142	7.557	0.002

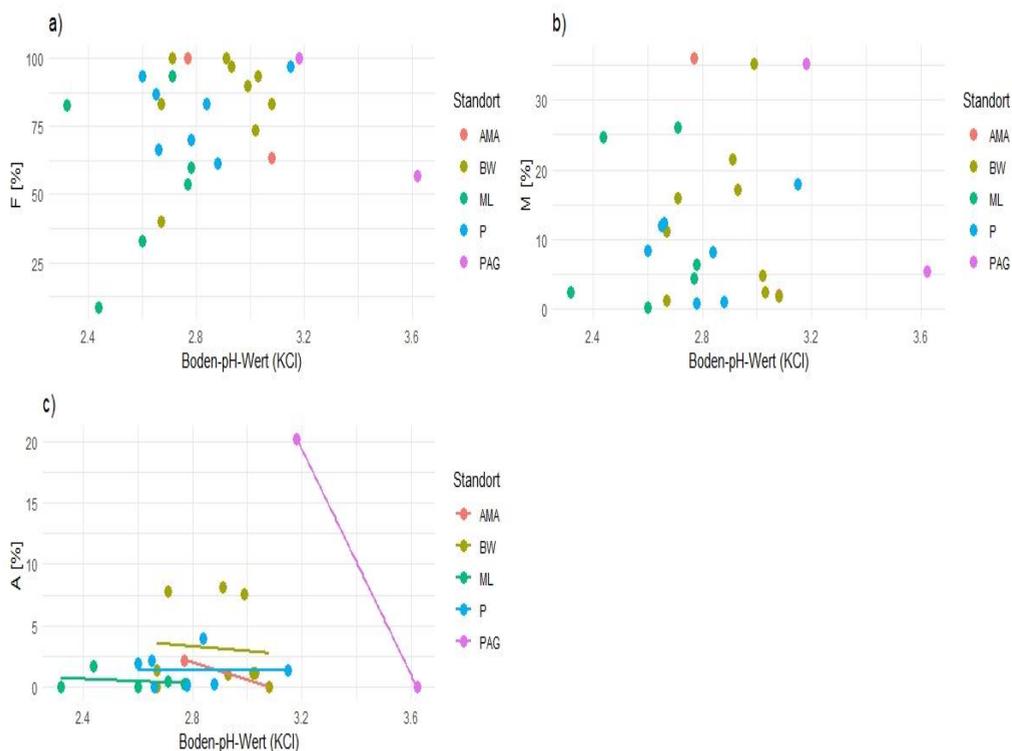


Abb. 14 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit von der Interaktion Standort und pH-Wert (KCl). AMA, Mischwald in der Nähe von Amalienhof, BW, Boeker Wald, ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst, PAG, Standort in der Nähe vom Pagelsee, a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 14 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on interaction of site and pH value (KCl). AMA, mixed forest at Amalienhof; BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; PAG, sites near Lake Pagelsee. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Auch das Alter von Wacholder beeinflusste die Mykorrhizierung. Die Altersspanne der untersuchten Wacholder lag zwischen 12 und 72 Jahren. Mit zunehmenden Alter von *Juniperus* stieg die Intensität als auch die Arbuskelhäufigkeit der VA-Mykorrhiza an (Abb. 15, Tab. 10). Dabei war die Stärke der Abhängigkeit vom Alter standortsabhängig (signifikante Interaktion von Alter und Standort, Tab. 10).

Tab. 10 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit der Interaktion von Standort und Alter.

Table 10 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on interaction of site and *Juniperus* age.

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Standort	1.609	0.220	0.641	0.658	6.448	0.041
Alter	0.454	0.510	8.363	0.012	9.988	0.007
Standort:Alter	0.848	0.517	4.460	0.0186	11.635	< 0.001

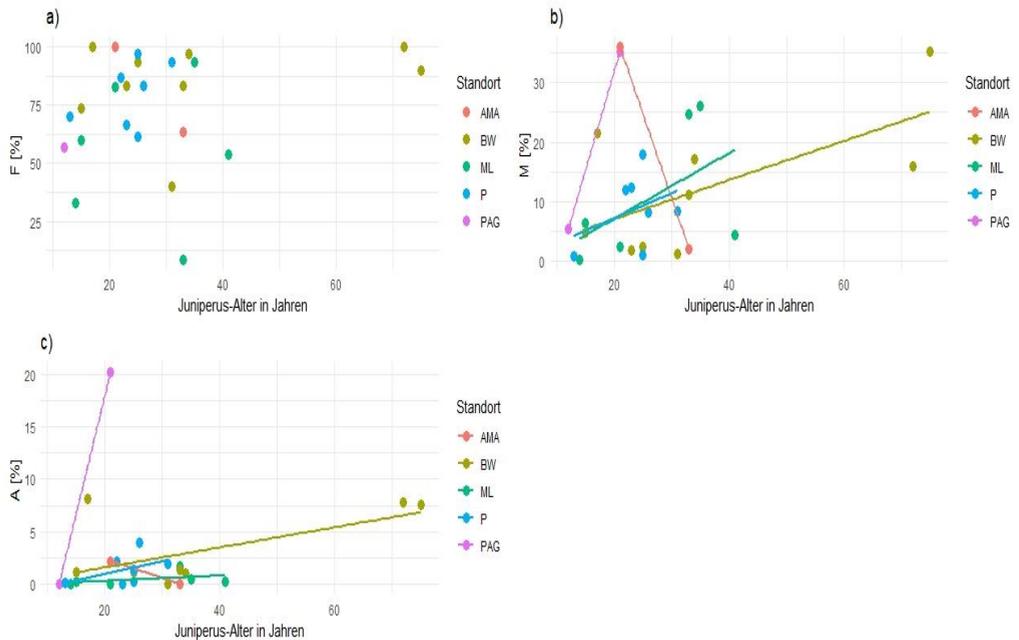


Abb. 15 Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* in Abhängigkeit der Interaktion von Standort und *Juniperus*-Alter. AMA, Mischwald in der Nähe von Amalienhof, BW, Boeker Wald, ML, artenreicher einhundertjähriger Kiefern-Forst, P, Standort in der Nähe vom Pagelsee, a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 15 Mycorrhization of *Juniperus communis* in depending on interaction of site and *Juniperus* age. AMA, mixed forest at Amalienhof; BW, circa thirty years old Pine forest near the location Boek; ML, species rich Pine forests with *Linnaea borealis*; P, Pine forests that were poor of species at Lake Pristerbäker See; PAG, sites near Lake Pagelsee. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

3.5 Die VA-Mykorrhiza von *Prunus serotina* (Spätblühende Traubenkirsche)

Die untersuchten Individuen von *P. serotina* unterschieden sich signifikant im Alter (vgl. Abb. 16), so dass die Einteilung je Dauerfläche in „Keimlinge“, juvenile und adulte *Prunus*-Pflanzen berechtigt war. Die jüngsten Pflanzen (Keimlinge) waren 1-4 (-6), die juvenilen 4-9 (-13) und die adulten 12 bis 21 Jahre alt.

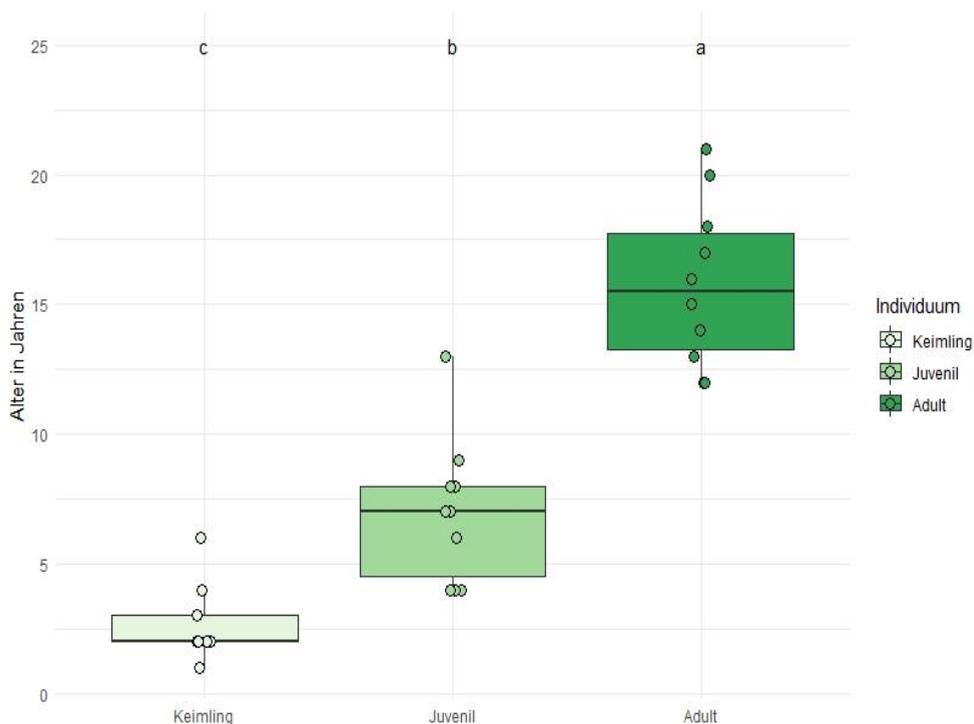


Abb. 16 Die Individuen, d. h. Entwicklungsstadien (Keimlinge, juvenil und adult) von *Prunus serotina* unterscheiden sich altersmäßig signifikant voneinander.

Fig.16 The individuals, age classes (seedlings, juveniles and adults) of *Prunus serotina* are really significantly different in age.

Eine signifikante Abhängigkeit vom Entwicklungsstadium der *Prunus*-Pflanzen (Keimling, juvenil und adult) zeigte nur die Mykorrhizafrequenz (Abb. 17a). Die adulten und die sehr jungen Pflanzen (Keimlinge) wiesen eine höhere Mykorrhizafrequenz auf als die juvenilen. Das konkrete Alter von *P. serotina* beeinflusste die Mykorrhizierung allerdings nicht. Der Blattflächenindex (LAI) zeigte keinen Einfluss auf die Mykorrhizierung, auch nicht in der Interaktion mit dem Alter. Allerdings war die Intensität der Mykorrhizierung signifikant von der Interaktion von Individuum (Entwicklungsstadium) und LAI abhängig (Tab. 18). Die juvenilen Individuen (4-9 (-13) Jahre) waren bei hohem LAI, also geringerem Lichteinfall, stärker mykorrhiziert, während Keimlinge bei niedrigem LAI eine höhere

Mykorrhizierung aufwiesen. (Abb. 18). Das bedeutet, dass die Altersgruppe der Juvenilen möglicherweise besonders empfindlich gegenüber Beschattung ist. Der Deckungsgrad von *Prunus* im Plot wirkte sich marginal signifikant auf die Mykorrhizaintensität aus ($p=0.055$). Mit zunehmender Deckung nahm auch die Mykorrhizaintensität von *Prunus* zu. In der Interaktion von Chlorophyllgehalt der Blätter und *Prunus*-Deckung konnte eine positive signifikante Abhängigkeit der Mykorrhizaintensität und der Arbuskelhäufigkeit ermittelt werden (vgl. Abb. 19, Tab. 18).

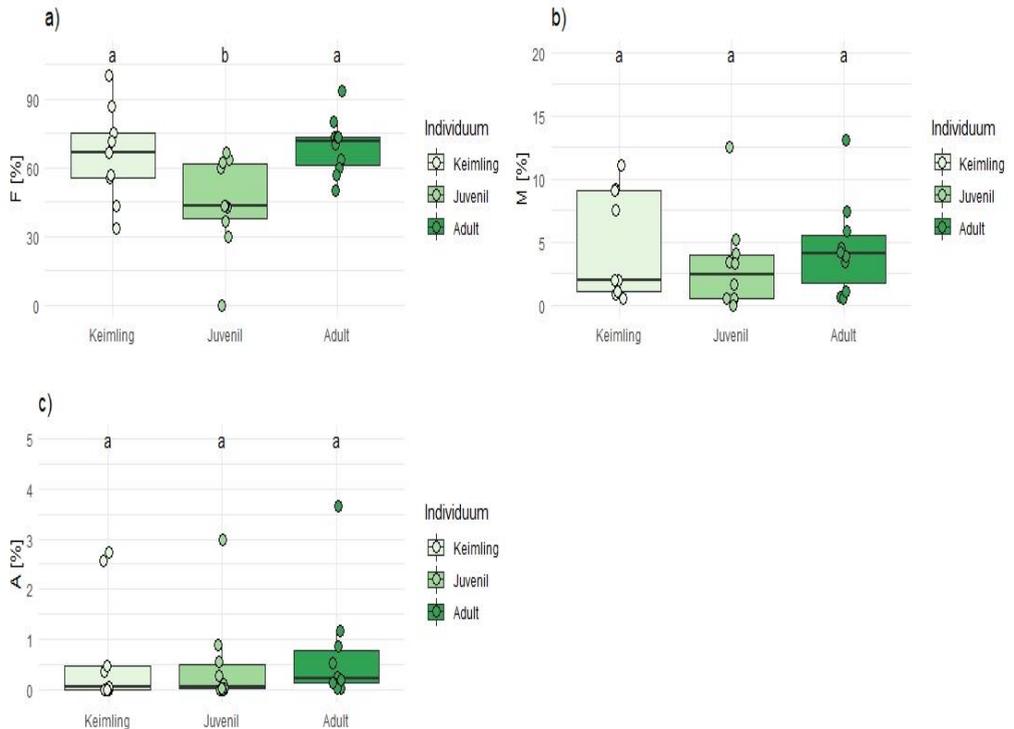


Abb. 17 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit vom Individuum bzw. Entwicklungsstadium (Keimling, juvenil, adult). a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 17 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on individuals or age classes (seedlings, juveniles and adults), a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Tab. 11 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit von der Interaktion Entwicklungsstadium (Keimling, juvenil, adult) und Blattflächenindex (LAI).

Table 11 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on interaction of age classes (seedlings, juveniles, adults) and leaf area index (LAI).

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Entwicklungsstadium	5.441	0.012	0.653	0.534	0.140	0.870
LAI	0.327	0.573	0.435	0.530	0.055	0.820
Entwicklungsstadium:LAI	1.803	0.187	4.769	0.025	0.343	0.715

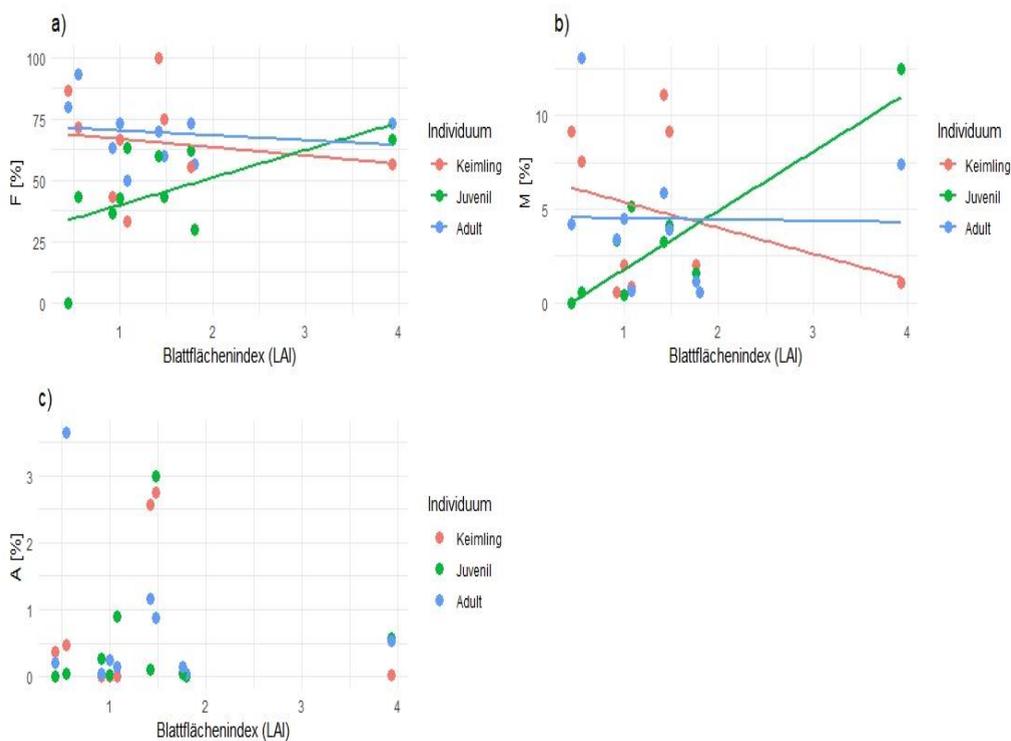


Abb.18 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit von der Interaktion Individuum (Entwicklungsstadium) (Keimling, juvenil, adult) und Blattflächenindex (LAI in m^2/m^2). a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 18 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on interaction of age classes (seedlings, juveniles, adults) and leaf area index (LAI). a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Tab. 12 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit vom Indexwert des Chlorophyllgehalts (SPAD) der *Prunus*-Blätter und von der *Prunus*-Deckung.

Table 12 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on SPAD of *Prunus* leaves and on *Prunus* cover.

Faktor (Fixed effects)	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
SPAD	1.697	0.206	1.498	0.234	6.625	0.018
Prun_Deckung	0.691	0.415	2.908	0.129	0.460	0.519
SPAD:Prun_Deckung	0.678	0.419	7.237	0.013	7.506	0.013

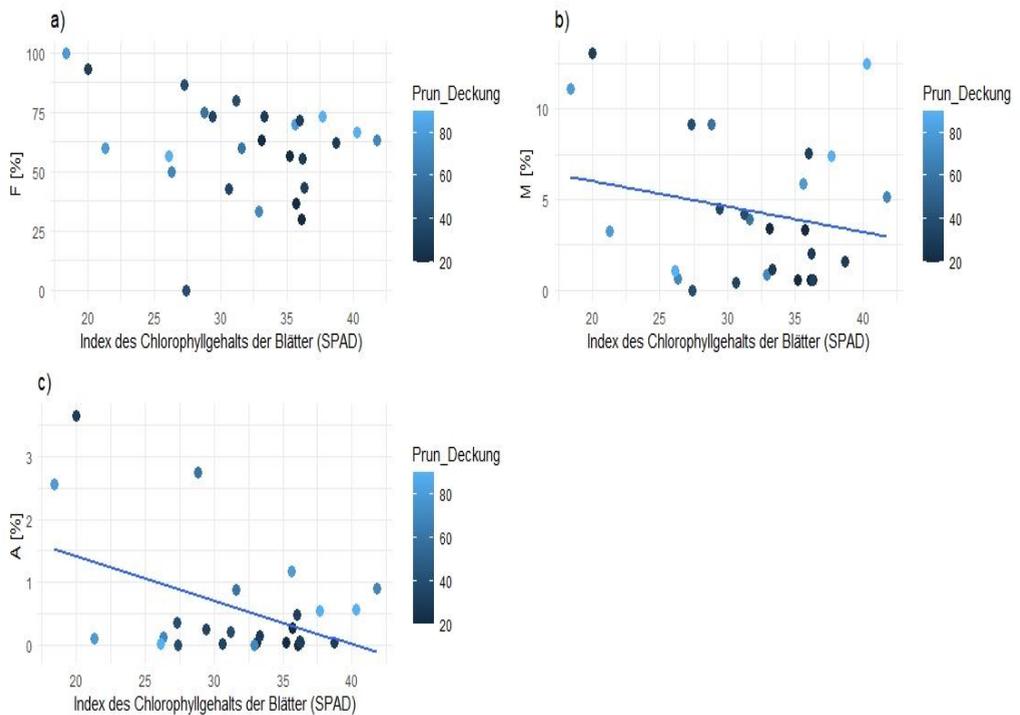


Abb. 19 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit vom Indexwert des Chlorophyllgehalts (SPAD) der *Prunus*-Blätter und der *Prunus*-Deckung in Prozent. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 19 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on interaction of SPAD (chlorophyll yield) of *Prunus* leaves and *Prunus* cover. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Tab. 13 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit vom Chlorophyllgehalt (SPAD) ihrer Blätter.
 Table 13 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on SPAD (chlorophyll yield) of *Prunus* leaves.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
SPAD	1.743	0.199	1.150	0.294	5.971	0.022

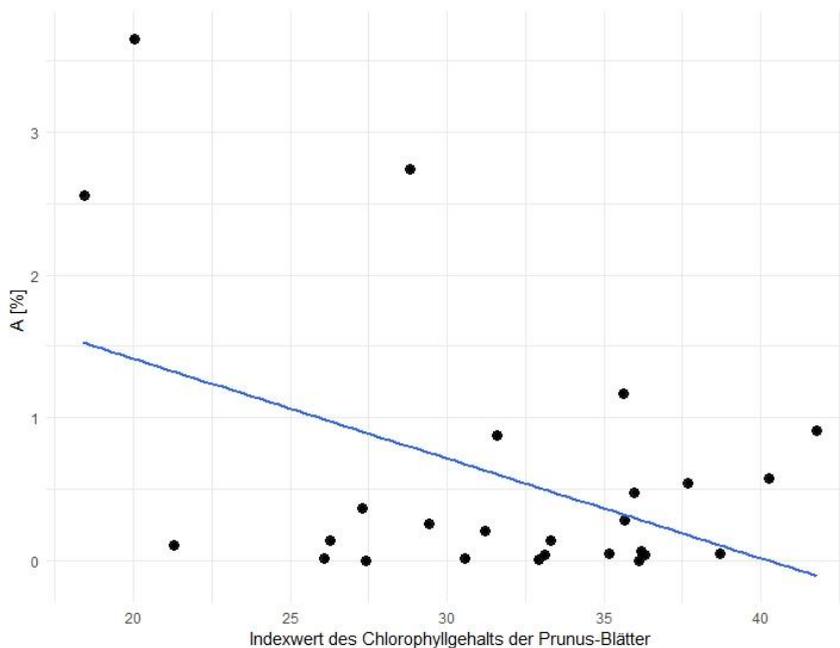


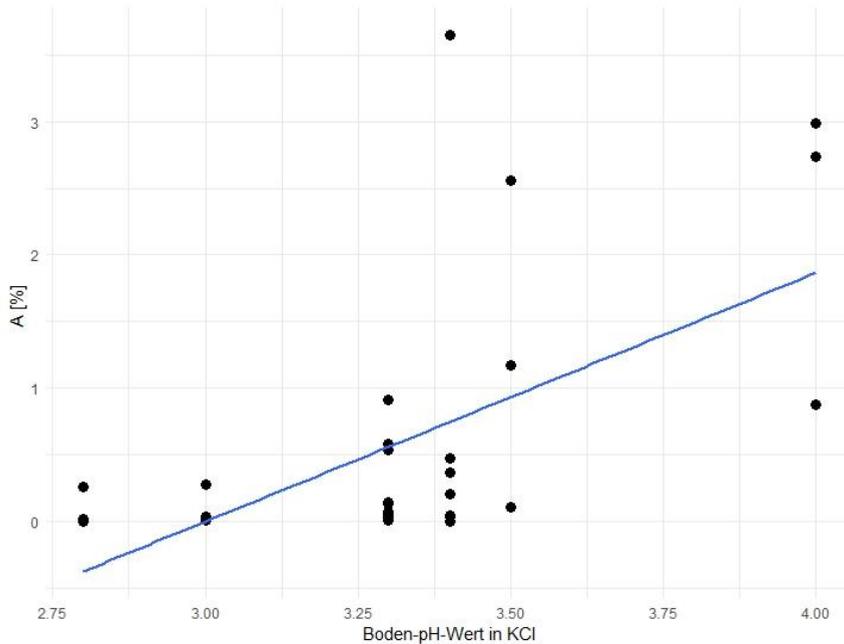
Abb. 20 Die signifikante Abhängigkeit der Arbuskelhäufigkeit von *Prunus serotina* vom Chlorophyllgehalt (SPAD) ihrer Blätter.

Fig. 20 The arbuscular abundance of *Prunus serotina* is significantly depending on SPAD (chlorophyll yield) in *Prunus* leaves.

Für die Mykorrhizierung von *Prunus* war zudem der Chlorophyllgehalt der Blätter allein von Bedeutung (vgl. Abb. 20, Tab. 13). Die Arbuskelhäufigkeit von *P. serotina*, war signifikant vom Chlorophyllgehalt der Blätter abhängig und sank mit zunehmendem Chlorophyllgehalt. Für die Arbuskelhäufigkeit konnte außerdem eine positive signifikante Abhängigkeit vom pH-Wert (KCl) ermittelt werden. Die pH-Werte (KCl) lagen zwischen 2,8 und 4 und unterschieden sich nicht signifikant zwischen den Standorten. Der statistische Test zeigte, dass mit zunehmenden pH-Wert auch die Arbuskelhäufigkeit bei *P. serotina* anstieg (Abb. 21, Tab. 14).

Tab. 14 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit vom Boden-pH-Wert (KCl).Table 14 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on soil pH value (KCl).

pH_KCl	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
pH_KCl	0.249	0.622	2.325	0.171	12.604	0.001

Abb. 21 Die Die signifikante Abhängigkeit der Arbuskelhäufigkeit von *Prunus serotina* vom Boden-pH-Wert (KCl).Fig. 21 The arbuscular abundancy of *Prunus serotina* is significantly depending on soil pH value (KCl).

Darüber hinaus spielte das Alter und die Deckung von *Pinus sylvestris* im jeweiligen Plot eine wichtige Rolle. Die Mykorrhizaintensität von *P. serotina* war marginal signifikant und die Arbuskelhäufigkeit signifikant vom Alter der umgebenden Waldkiefer (*P. sylvestris*) abhängig, wenn die Entwicklungsstadien von *Prunus* (Individuen) und Plot random gesetzt wurden. Mit steigendem Alter der Waldkiefer nahmen sowohl die Mykorrhizaintensität (marginal) als auch die Arbuskelhäufigkeit bei *P. serotina* signifikant ab (Abb. 22, Tab. 15). Alle drei Kenngrößen der Mykorrhizierung (Frequenz, Intensität und Arbuskelhäufigkeit) zeigten auch einen signifikant negativen Zusammenhang mit der Deckung der Waldkiefer (nicht graphisch dargestellt). Mit zunehmender Deckung der Baumkronen von *P. sylvestris* nahm die Mykorrhizierung von *P. serotina* durch schwindenden Lichteinfall ab. Nachdem die Abhängigkeit der Mykorrhizierung von der Interaktion von *Pinus*-Alter und Entwicklungsstadien der *Prunus*-Pflanzen getestet worden ist (Abb. 23, Tab. 16), ergab sich, dass die Mykorrhizafrequenz

von *Prunus* signifikant allein von den Entwicklungsstufen der *Prunus*-Pflanzen, die Mykorrhizaintensität nur marginal allein vom *Pinus*-Alter und die Arbuskelhäufigkeit signifikant allein vom *Pinus*-Alter in dieser Interaktion abhängig ist. Die Interaktion selbst war nicht signifikant.

Tab. 15 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit des Alters von *Pinus sylvestris* im Plot.

Table 15 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on the age of *Pinus sylvestris* in the plot.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Pin_Alter	0.382	0.542	3.656	0.067	5.6441	0.042

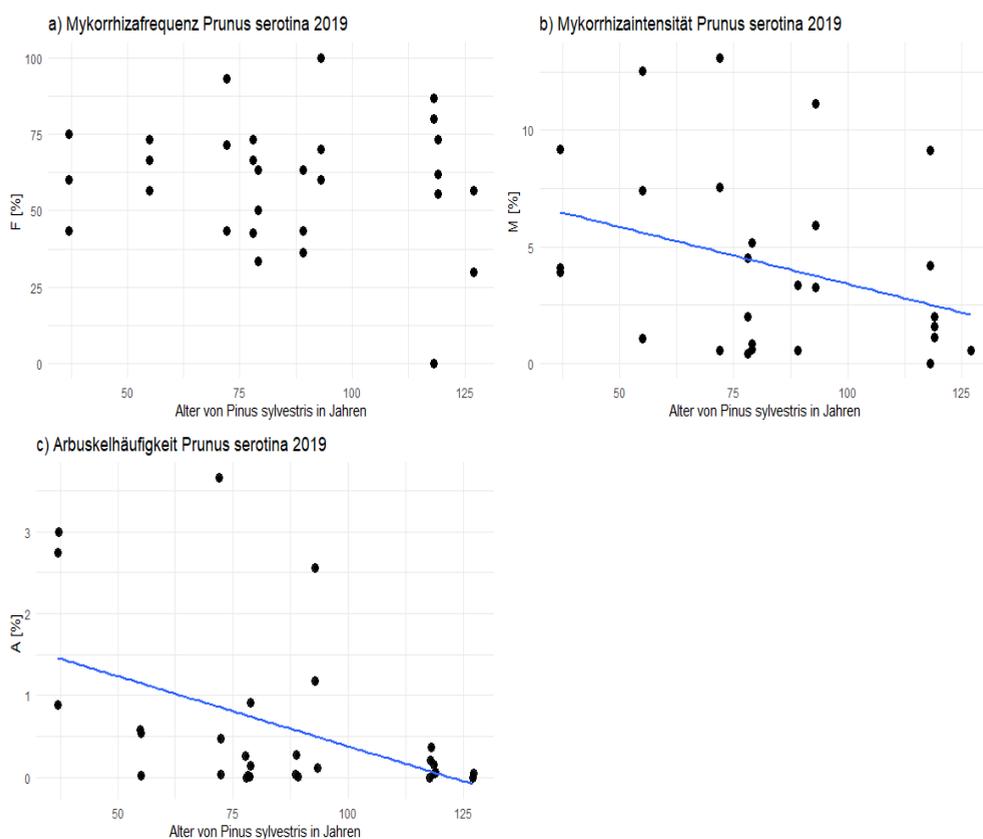


Abb. 22 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit des Alters von *Pinus sylvestris* im Plot. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 22 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on the age of *Pinus sylvestris* in the plot. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Tab. 16 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit von der Interaktion Alter von *Pinus sylvestris* im Plot und der Entwicklungsstadien der *Prunus*-Pflanzen.

Table 16 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on interaction of *Pinus* age in the plot and class ages of *Prunus* plants.

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Pin_Alter	0.460	0.504	3.394	0.078	5.523	0.044
Entwicklungsstadium	4.956	0.016	0.433	0.653	0.126	0.883
Pin_Alter:Entwicklungsstadium	0.723	0.496	0.599	0.558	0.230	0.797

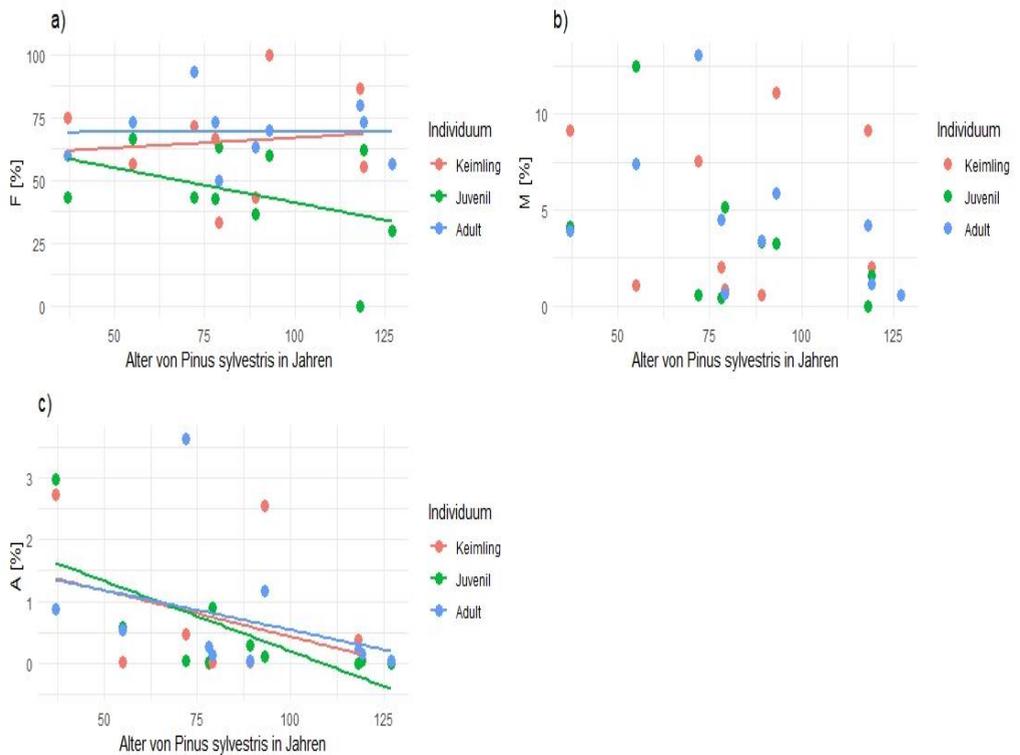


Abb. 23 Die Mykorrhizierung von *Prunus serotina* in Abhängigkeit von der Interaktion Alter von *Pinus sylvestris* im Plot und der Entwicklungsstadien der *Prunus*-Pflanzen. a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 23 Mycorrhization of *Prunus serotina* in depending on interaction of *Pinus* age in the plot and class ages of *Prunus* plants. a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

3.6 Die VA-Mykorrhiza bei Farnpflanzen

Alle untersuchten Farnpflanzen waren mit VAM-Pilzen mykorrhiziert (vgl. Abb. 25, Tab. 17). Sogar der Sumpffarn (*T. palustris*), der im Schilfgürtel des Hofsees beprobt wurde, wies VAM auf. Im Grad der Mykorrhizierung traten jedoch keine signifikanten Unterschiede zwischen den Farn-Arten auf. Allerdings war die Arbuskelhäufigkeit signifikant von der Species abhängig. *T. palustris* wies eine marginal geringere Arbuskelhäufigkeit ($p=0.052$) als *D. carthusianorum* auf.

Tab. 17 Die Mykorrhizierung von Farnpflanzen in Abhängigkeit von der Species.

Table 17 Mycorrhization of ferns in depending on species.

Species	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
	1.233	0.350	1.876	0.173	2.6866	0.041

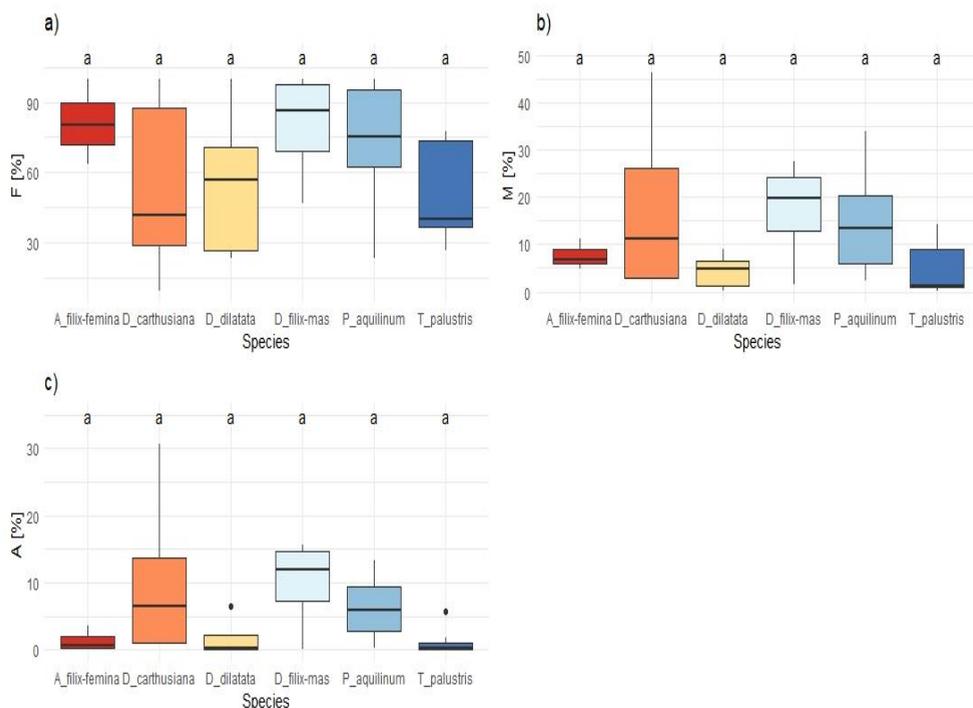


Abb. 24 Die Mykorrhizierung von Farnpflanzen in Abhängigkeit von der Species: *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquinum* und *Thelypteris palustris*.a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 24 Mycorrhization of ferns in depending on species: *Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquinum* and *Thelypteris palustris*.a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

Während die gemessene mittlere Bodenfeuchte, der Boden-pH-Wert (KCl) und der relative Lichtgenuss im Plot keinen Einfluss auf den Grad der Mykorrhizierung der Farne ausübten, wurde eine Abhängigkeit vom Blattflächenindex (LAI) und der Lichtverfügbarkeit (Visible Sky) für die Mykorrhizierung festgestellt (Tab. 18). Die Mykorrhizafrequenz und die Mykorrhizaintensität nahmen mit zunehmender Lichtverfügbarkeit ab, während beide mit zunehmendem Blattflächenindex zunahmen (keine grafische Darstellung, Tab. 18). In der Interaktion von Species und LAI zeigte nur die Arbuskelhäufigkeit eine signifikante Abhängigkeit sowohl von der Species allein als auch vom Faktoren-Paar Species und LAI (Abb. 26, Tab. 18). Für alle untersuchten Farn-Arten nahm mit zunehmender Beschattung der Bodenfläche (hoher LAI) die Arbuskelhäufigkeit zu.

Tab. 18 Die Mykorrhizierung von Farnpflanzen in Abhängigkeit 1. von der Lichtverfügbarkeit (Visible Sky) und 2. vom Blattflächenindex (LAI) sowie 3. von der Interaktion aus Species (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquilinum* und *Thelypteris palustris*) und Blattflächenindex (LAI).

Table 18 Mycorrhization of ferns in depending on 1. Visible Sky and 2. on Leaf area index (LAI) as well as 3. on interaction of species (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquilinum* and *Thelypteris palustris*) and Leaf area index (LAI).

	VAM F%		VAM M%		VAM A%	
	F value	P value	F value	P value	F value	P value
1. Visible Sky	9.120	0.005	4.801	0.036	4.115	0.052
2. LAI	8.803	0.006	4.572	0.041	1.037	0.499
3. Faktor (Fixed effects)	F value	P value	F value	P value	F value	P value
Species	0.820	0.601	1.769	0.200	4.984	0.010
LAI	0.264	0.654	0.003	0.956	0.275	0.619
LAI:Species	0.850	0.569	2.454	0.109	7.286	0.004

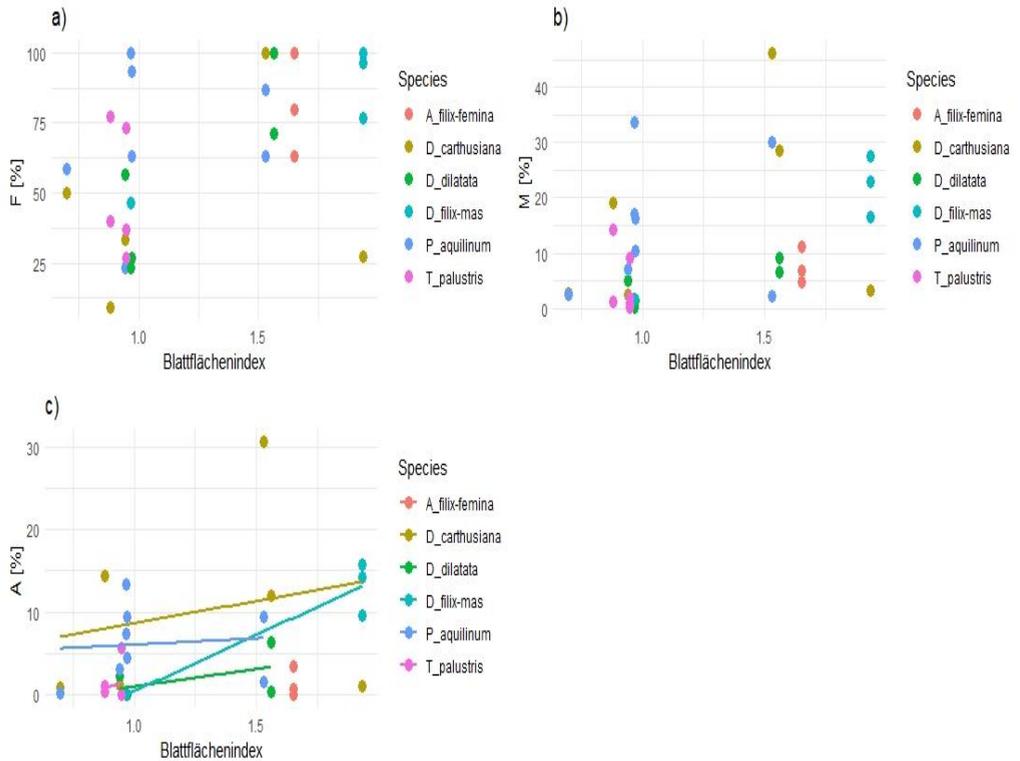


Abb. 25 Die Mykorrhizierung von Farnpflanzen in Abhängigkeit von der Interaktion aus Species (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquilinum* und *Thelypteris palustris*) und Blattflächenindex (LAI). a) Mykorrhizafrequenz (F in %), b) Mykorrhizaintensität (M in %) und c) Arbuskelhäufigkeit (A in %).

Fig. 25 Mycorrhization of ferns in depending on interaction of species (*Athyrium filix-femina*, *Dryopteris filix-mas*, *Dryopteris dilatata*, *Dryopteris cathusiana*, *Pteridium aquilinum* and *Thelypteris palustris*) and Leaf area index (LAI). a) mycorrhiza frequency (F in %), b) mycorrhiza intensity (M in %), c) arbuscular abundance (A in %).

4 Diskussion

Für alle Untersuchungsarten konnte VA-Mykorrhiza nachgewiesen werden, wenn auch nicht in jeder der untersuchten Wurzelproben Arbuskeln als sicheres Kennzeichen eines aktiven Stoffaustausches zwischen Wirtspflanze und VAM-Pilzen festgestellt werden konnten. Vesikel als fettspeichernde Strukturen der Glomeromycota wurden jedoch bei allen Species beobachtet.

Der Vergleich über alle Arten hinweg zeigt, dass der Grad der Mykorrhizierung der verschiedenen untersuchten Arten von ganz verschiedenen Standortfaktoren abhängig ist. Insgesamt erscheinen hier

die chemischen Bodenfaktoren (pH-Wert) und die Lichtversorgung von größerer Bedeutung als die Bodenfeuchte zu sein. Auf die Bedeutung des pH-Werts für das Wachstum und die Verbreitung der VA-Pilze wiesen VAN AARLE et al. (2002) und DAVISON et al. (2021) hin. Ein zu niedriger Boden-pH-Wert behinderte das Myzel-Wachstum und die Bildung der Chlamydosporen (VAN AARLE et al. 2002). Saure Böden sind für ihre fungistatischen Effekte, z. B. auf die Sporen von *Glomus mosseae* bekannt (STQUEIRA et al. 1984). Die pH-Werte für ein optimales Wachstum der VA-Pilze scheinen in einem relativ engen Bereich zu liegen (Davison et al. 2021), nämlich von schwach sauer bis neutral. Sicherlich gibt es unter den VA-Pilzen auch Spezialisten, die unter stark sauren Bedingungen lebenstüchtig sind, was die Mykorrhizierung von *D. flexuosa* zeigte.

Wenn auch eine generelle Abnahme der Mykorrhizierung mit steigenden Boden-pH-Werten gefunden wurde, ergab sich kein eindeutiges Muster hinsichtlich einer erhöhten oder verringerten Mykorrhizierungsrate bei einer erhöhten oder verringerten Qualität der jeweiligen Standortsbedingungen.

Bei der Drahtschmiele (*D. flexuosa*) waren zumindest im Juni 2009 die Frequenz, Intensität und die Arbuskelhäufigkeit der VA-Mykorrhiza vom Standort abhängig, so dass die Hypothese 1 bestätigt werden kann. Die untersuchten Standorte unterschieden sich in der Artausstattung und in der Boden-Deckung der Arten. Auf der sehr artenarmen, z. T. noch offenen Schießplatzfläche im Jahr 2009, wo *D. flexuosa* auffällig kleine Horste statt Rasen bildete, fiel die Mykorrhizierung signifikant geringer aus, ebenso in den artenarmen Kiefern-Forsten (P), die von der Drahtschmiele beherrscht werden. Im Vergleich zu anderen Stüßgräsern ist die Mykorrhizierung bei *D. flexuosa* allgemein relativ gering, was vermutlich an den von dieser Art besiedelten sehr sauren Böden liegen kann (GORANSSON et al. 2008). Im Vergleich zu *Deschampsia cespitosa*, *Elymus caninus* und *Poa nemoralis* zeigte *D. flexuosa* die geringste Mykorrhizierung (GORANSSON et al. 2008). Die Autoren konnten in ihrer Studie eine deutliche pH-Wert-Abhängigkeit der VA-Mykorrhiza bei den genannten Gräsern zeigen, zudem eine negative Reaktion auf die Aluminium-Konzentration im Boden (GORANSSON et al. 2008). Da von den von uns beprobten Standorten keine Bodenuntersuchungen vorliegen, können wir diesen Befund allerdings nicht bestätigen.

Die Wiederholung der Untersuchungen von 2009 im Juni 2011 und August 2011 wiesen auf eine beträchtliche inter- und intraannuelle Saisonalität hin. Dies deckt sich mit Befunden anderer Studien. So zeigten HALDER et al. (2015) für tropische Kräuterarten in Bangladesch eine saisonale Variation mit höheren AM-Kolonisierungsraten in der Regenzeit als in der Trockenzeit. Ähnlich beschrieben FAKHECH et al. (2019) und MEDDAD-HAMZA et al. (2017) saisonale Unterschiede in der Mykorrhizierungsrate für AM-Sträucher und -Bäume zwischen feuchten Wintern und trockenen Sommern im Mittelmeerraum. Über die Saisonabhängigkeit der Mykorrhizierungsraten bei Grasarten der gemäßigten Klimazonen ist jedoch nicht viel bekannt. Auffällig bei unseren Ergebnissen war, dass die saisonalen Unterschiede nicht an allen Standorten gleich waren, was darauf hindeutet, dass die Witterungsbedingungen nicht alleiniger treibender Faktor sein können. Dass die Drahtschmiele im August die Tendenz einer geringeren Arbuskelhäufigkeit als in Juni 2011 zeigte, könnte verschiedene Gründe haben. Möglichweise wurden die Assimilate im Spätsommer für die Fruchtbildung und für die Nährstoff-Speicherung in den Rhizomen benötigt, so dass weniger Kohlenhydrate für die Symbiosepartner zur Verfügung standen und sich der Mykorrhizierungsgrad verringerte. Ein ähnliches Muster beschrieben BOHRER et al. (2004) für Feuchtgebietsarten (*Typha latifolia*, *Carex* spp., *Acorus calamus* und *Sparganium eurycarpum*), bei denen die stärkste Mykorrhizierung im Frühling auftrat und

diese zum Spätsommer abnahm. Nach BOHRER et al. (2004) gibt es also, unabhängig von auftretenden Unterschieden der Bodenfeuchtigkeit, Stadien im Lebenszyklus der krautigen Pflanzen mit erhöhtem Nährstoffbedarf, in denen die Mykorrhizierung mit VAM-Pilzen ansteigt, z.B. in der Phase von schnellem Wachstum im Frühjahr. Bei der Untersuchung zur Saisonalität der Mykorrhizierung von *D. flexuosa* in den Forsten (BW und ML) kann auch der negative Einfluss von EM-Pilzen der umgebenden Kiefern auf die AM-Pilze nicht ausgeschlossen werden (vgl. BECKLIN et al. 2011).

Für *Phragmites australis* muss die Hypothese 2, wonach die Mykorrhizierung an den seefernen, trockeneren Standorten höher ist als an den feuchteren, seenahen, abgelehnt werden. In unserer Studie zeigten sich keine Unterschiede in der Mykorrhizierung von *P. australis*. Eine Erklärung könnte die effektive Sauerstoffversorgung der Schilfwurzeln durch Aerenchyme sein, die die Sauerstoffversorgung möglicherweise nicht nur der unterirdischen Organe des Schilfs gewährleisten, sondern auch der Mykorrhiza-Partner. Ebenso stellten BOHRER et al. (2004) in Feuchtbiotopen fest, dass die VA-Mykorrhiza der untersuchten Arten an 2 von 4 Standorten nicht mit der Bodenfeuchtigkeit korreliert war. In der Arbeit von WANG et al. (2018) konnte VA-Mykorrhizierung für *P. australis* auch in urbanen Feuchtgebieten festgestellt werden, wobei diese nicht mit der Bodenfeuchtigkeit, sondern negativ mit dem Ammoniumgehalt und gelösten Phosphaten und positiv mit dem Nitrit- und Nitrat-Gehalt sowie mit dem organischen Kohlenstoffgehalt im Boden korreliert war. Alle diese Befunde deuten darauf hin, dass Bodenfeuchte für die Mykorrhizierung dieser Art, im Rahmen des angewandten Untersuchungsdesigns, eine geringere Bedeutung hat als chemische Bodenfaktoren.

Bei den untersuchten Cyperaceae konnten für drei der elf Untersuchungsorte Arbuskeln als sicheres Zeichen der VA-Mykorrhiza festgestellt werden: *Carex hirta*, *C. acutiformis* und *C. arenaria*. Auch für die anderen acht Arten ist eine VA-Mykorrhizierung als hoch-wahrscheinlich anzunehmen. In der Artenliste mit dem jeweiligen Mykorrhizotyp, die von HARLEY & HARLEY (1987) für Großbritannien zusammengestellt worden ist und europaweit als Referenz genutzt wird, sind allerdings z.B. *Carex hirta* und *C. acutiformis* als nicht-mykorrhiziert verzeichnet. Diese Einschätzung muss nach unseren Ergebnissen revidiert werden.

Die Hypothese 3, wonach die Mykorrhizierung der Cyperaceae von der Position (seenah/seefern) abhängig ist, konnte nicht bestätigt werden. Der Bodenwassergehalt hatte demnach eine untergeordnete Bedeutung für die VA-Mykorrhiza. Hier zeichnete sich das gleiche Muster ab, dass auch für *P. australis* gefunden wurde. Für die von uns untersuchten Arten der Cyperaceae können wir uns der Schlussfolgerung von Bohrer et al. (2004) anschließen, dass die VA-Mykorrhiza insgesamt einen weiten Toleranzbereich hinsichtlich der Bodenfeuchtigkeit und auch bei überstauten Standorten hat. Da sich aber die Positionen auch im Boden-pH-Wert unterschieden, trug die Seenähe bzw. Seeferne zur Abnahme der Mykorrhizaintensität mit zunehmendem pH-Wert bei.

Nach THOMAS et al. (2007) ist für *J. communis* sowohl ektotrophe als auch vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza bekannt, wobei der letztere Typ wesentlich häufiger auftritt. Generell gibt es nur wenige Studien zur VA-Mykorrhiza von *Juniperus* und dementsprechend ist die Literaturlage sehr limitiert. Für alle untersuchten *Juniperus*-Individuen konnte im Untersuchungsgebiet VA-Mykorrhiza nachgewiesen werden, wobei eine signifikante Abhängigkeit der Mykorrhizaintensität und der Arbuskelhäufigkeit vom Alter festgestellt wurde, so dass die Hypothese 4 bestätigt werden konnte. LIANG et al. (2017), die ausschließlich molekular die Vielfalt von Glomeromycota bei *J. virginiana* von unterschiedlichem Alter (1-65 Jahre) untersuchten, stellten eine Abnahme der Pilz-Diversität der Glomeromycota mit zunehmendem Alter fest, gaben jedoch keinerlei Hinweise auf die Auswirkungen dieser auf den Grad

der VA-Mykorrhizierung. Als bedingt einflussreicher Standortfaktor zumindest für die Arbuskelhäufigkeit erwies sich in den vorliegenden Untersuchungen der pH-Wert. Die beobachtete Abnahme der Arbuskelhäufigkeit mit steigendem pH-Wert deckt sich mit den Befunden für die untersuchten Cyperaceae und deutet auf eine größere Bedeutung der Symbiose unter ungünstigeren Bodenbedingungen hin.

Die VA-Mykorrhiza von *P. serotina* zeigte in der vorliegenden Studie eine klare Abhängigkeit von der Entwicklungsstufe der Individuen, die bei Keimlingen und adulten Individuen höher als bei juvenilen Pflanzen war, so dass die Hypothese 5 ebenfalls bestätigt werden kann. Direkte Studien zu VA-Mykorrhiza von *P. serotina* sind relativ rar. Bei Untersuchungen von Sämlingen unterschiedlichen Alters von *P. sibirica* unter verschiedenen Beschattungsstufen stellten Bi et al. (2021) eine Abhängigkeit der Mykorrhizierung vom Alter und leichter Beschattung fest. Die fünfjährigen Sämlinge von *P. sibirica* waren signifikant stärker mykorrhiziert als die ein- und dreijährigen Sämlinge. In der hier vorliegenden Studie zu *P. serotina* 2019 wurde die Belichtung über den Blattflächenindex (LAI) eingeschätzt. Es konnte gezeigt werden (Interaktion von LAI und Entwicklungsstadium), dass die juvenile Altersgruppe von *P. serotina* (4-9 (-13) Jahre) sehr empfindlich auf Beschattung reagierte und demnach mehr auf die Mykorrhiza angewiesen zu sein scheint als die Keimlinge und die adulten Pflanzen. Bei Messungen des Chlorophyll-Gehalts der *Prunus*-Blätter, um den physiologischen Zustand der Pflanzen zu kennzeichnen, zeigte sich, dass die Arbuskelhäufigkeit von *P. serotina* negativ auf den zunehmenden Chlorophyllgehalt der Blätter reagierte, wobei auch die *Prunus*-Deckung abnahm. Bei geringer *Prunus*-Deckung, d.h. im Idealfall bei besseren Lichtverhältnissen, hat der Chlorophyllgehalt der Blätter Bedeutung, denn je höher der Chlorophyllgehalt, desto stärker wird die Lichtreaktion der Photosynthese unterstützt, was möglicherweise auch zu mehr Assimilaten führt, so dass die VA-Mykorrhiza nur unter optimalen Bedingungen für die Pflanze verringert werden kann. Bi et al. (2021) fanden bei *P. sibirica*, dass die Photosyntheserate bei mykorrhizierten Sämlingen unter leichter Beschattung am höchsten war, da die mykorrhizierten Sämlinge die VAM-Pilze mit Assimilaten versorgen müssen, weil sie unter Beschattung (bei eingeschränkter Lichtversorgung) auf die VA-Mykorrhiza angewiesen waren.

Dass Farnpflanzen mykorrhiziert sind, ist mit der Evolution der höheren Pflanzen eng verknüpft. REMY et al. (1994) fanden VA-Mykorrhiza bereits in der fossilen Pflanze *Aglaophyton major* aus dem frühen Devon, die noch keine echten Gefäße aufwies und deshalb zwischen Moosen und Sporen-Gefäßpflanzen eingeordnet wurde. Bei dieser Pflanze in Feuchtbiotopen unterstützte die VAM vor mehr als 400 Millionen Jahren die erste Besiedlung terrestrischer Lebensräume. Alle im Jahre 2021 untersuchten Farnpflanzen waren mykorrhiziert, wobei die Unterschiede zwischen den Arten nur gering waren. Bemerkenswert ist auch das Auftreten von VAM bei *T. palustris* im Schilfgürtel, was die schon oben diskutierte Unabhängigkeit der Mykorrhizierung von den Feuchteverhältnissen des Standorts untermauert. Der Grad der Mykorrhizierung zeigte nur für die Arbuskelhäufigkeit eine Abhängigkeit von den Standortfaktoren, und dies auch nur in der Interaktion von Species und Blattflächenindex (LAI), so dass die Hypothese 6 nur bedingt angenommen werden kann. Von den Standortfaktoren hatten weder die mittlere Bodenfeuchte, der Boden-pH-Wert, noch der relative Lichtgenuss einen Einfluss auf die Mykorrhizierung. Für die Farnpflanzen im Untersuchungsgebiet ist also die Lichtverfügbarkeit (Visible Sky) für den Grad der VA-Mykorrhizierung von größerer Bedeutung als andere Standortfaktoren.

5 Zusammenfassung

HEKLAU, H., HAIDER, S., ERFMEIER, A., BRUELHEIDE, H.: Untersuchungen zur vesikulär-arbuskulären Mykorrhiza im Nationalpark Müritz (Mecklenburg-Vorpommern, Nordostdeutschland). - *Hercynia N. F. 55 (2022): 1 – 44.*

Auf nährstoffarmen Sander-Böden im südwestlichen Nationalpark Müritz in Mecklenburg-Vorpommern wurden sowohl Gehölze (*Prunus serotina*, *Juniperus communis*) als auch Grasartige (Poales) (*Deschampsia flexuosa*, *Phragmites australis* (Poaceae), *Carex* species und *Eriophorum vaginatum* Cyperaceae) sowie Echte Farne auf vesikulär-arbuskuläre Mykorrhiza (VAM) untersucht. Für die invasive, nordamerikanische *P. serotina* zeigte sich, dass die Mykorrhizierung vor allem im juvenilen Alterstadium (4-9 (-13) Jahre) sehr empfindlich auf die Verminderung des Lichteinfalls reagierte. Die Mykorrhizierung von *Juniperus communis* wurde sowohl durch den pH-Wert des Bodens als auch vom Alter der Gehölze beeinflusst. Mit zunehmendem Alter nahm die Arbuskelhäufigkeit als auch die Intensität der VA-Mykorrhiza von *Juniperus* zu. Bei *Deschampsia flexuosa* war die VA-Mykorrhiza insbesondere von der interspezifischen Konkurrenz an den jeweiligen Standorten abhängig, die sich durch die Arten-Diversität und ihrer Bodendeckung im Plot unterschieden. Die Mykorrhizierung von *Phragmites australis* war hoch und unabhängig vom Wasserfaktor. Auch alle untersuchten Cyperaceae zeigten VA-Mykorrhiza, die nicht durch die Bodenfeuchtigkeit, sondern vom pH-Wert beeinflusst wurde. Die VA-Mykorrhiza der untersuchten Farnpflanzen war insbesondere positiv mit abnehmendem Lichteinfall korreliert, um die Existenz in ihren Nischen zu unterstützen. Der Vergleich über alle Untersuchungsarten zeigt, dass der Grad der Mykorrhizierung von unterschiedlichen artspezifischen Standortfaktoren abhängt, das möglicherweise auch dadurch bedingt ist, da über die Jahre von 2009 bis 2021 nicht alle Faktoren für alle Untersuchungsarten gleichermaßen untersucht wurden. Obwohl eine generelle Abnahme der Mykorrhizierung mit steigendem pH-Wert gefunden worden ist, gab es jedoch keine deutlichen und ähnlichen Muster von steigender oder abnehmenden Mykorrhizierung mit bestimmten Standortsbedingungen für alle Untersuchungsarten, was mit der begrenzten Datenlage unserer Studien zusammenhängen könnte.

Diese Untersuchungen bestätigten, dass die VA-Mykorrhiza in der Biologie der jeweiligen Arten besonders dann assistierende Bedeutung hat, wenn die eigene Nährstoffversorgung durch Veränderungen der ökologischen Nische eingeschränkt wird. In zukünftigen Untersuchungen zur VAM muss die Probenzahl erhöht werden, sollte zum einen ihr Jahresverlauf und zum anderen ein möglichst durchgängiges, umfangreiches Set an Standortfaktoren untersucht werden, um die Bedeutung der VA-Mykorrhiza noch besser verstehen zu können.

6 Danksagung

Unser großer Dank gilt den Verantwortlichen im Müritz-Nationalpark, stellvertretend soll Herr Schwabe genannt werden, der diese Arbeiten ermöglicht und der uns (einschließlich der teilnehmenden Studierenden) regelmäßig über die Aufgaben und Ziele des Nationalparks informiert hat. Wir danken für die Genehmigung zur Durchführung unserer pflanzenökologischen Untersuchungen in den jeweiligen Jahren im Müritz-Nationalpark.

Für die Studien zur VA-Mykorrhiza, das betrifft die Vegetationsaufnahmen, Entnahme von

Wurzelproben der Untersuchungsarten, Abschätzung der Mykorrhizierung und Messungen von Standortsfaktoren, möchten wir uns insbesondere bei den Studierenden bedanken, die in den jeweiligen Jahren sehr einsatzbereit und motiviert am Freilandökologie-Praktikum im Müritz-Nationalpark teilgenommen und in den jeweiligen Jahren das Mykorrhiza-Thema bearbeitet haben: Angelika Häckert, Maria Schachtschabel (2009), Hannes Becher, Iris Gase, Theresa Fichtner (2011), Diana Köhler, Florian Walter, Kathleen Soyeaux, Steffen Bien (2013), Marion Fink, Robert Klessner, Juliane Stolz (2015), Anja Hähnel, Nele Senftleben, Michael Köhler (2017), Georg F. Steinert, Eike Rohde (2019), Felicitas Wolf, Maria Beresovski und Daya Södje (2021).

7 Literatur

- BAGO, B., PFEFFER, P. E., SHACHAR-HILL, Y. (2000): Carbon Metabolism and Transport in Arbuscular Mycorrhizas. - *Plant Physi.* 124: 949 – 958. <https://doi.org/10.1104/pp.124.3.949>
- BECKLIN, K. M., PALLO, M. L., GALEN, C. (2012): Willows indirectly reduce arbuscular mycorrhizal fungal colonization in understory communities. - *J. Ecol.* 100: 343 – 351. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2011.01903.x>
- BI, Y., XIE, L., WANG, Z., WANG, K., LIU, W., XIE, W. (2021): Arbuscular mycorrhizal symbiosis facilitates apricot seedling (*Prunus sibirica* L.) growth and photosynthesis in northwest China. - *Int. J. Coal. Sci. Technol.* 8: 473 – 482. <https://doi.org/10.1007/s40789-021-00408-6>
- BÖRNER, A. (2012): *Mecklenburgische Eiszeitlandschaft*. - Edition Goldschneck im Verlag Quelle & Meyer, Wiebelsheim.
- BOHRER, K. E., FRIESE, C. F., AMON, J. P. (2004): Seasonal dynamics of arbuscular mycorrhizal fungi in differing wetland habitats. - *Mycorrhiza* 14: 329 – 337.
- BORRMANN, K. (1987): Einbürgerung, Ausbreitung und Vorkommen der Späten Traubenkirsche (*Padus serotina* BORKH.) in der Oberförsterei Lüttenhagen (Kreis Neustrelitz). - *Bot. Rundbrief f. den Bezirk Neubrandenburg* 19: 13 – 18.
- BRUNDRETT, M.C. (2009): Mycorrhizal associations and other means of nutrition of vascular plants: understanding the global diversity of host plants by resolving conflicting information and developing reliable means of diagnosis. - *Plant Soil* 320: 37 – 77. <https://doi.org/10.1007/s11104-008-9877-9>
- CHABAUD, M., HARRISON, M., de CARVALHO-NIEBEL, F. et al. (2006): Inoculation and growth with mycorrhizal fungi. - In: MATHESIUS, U., JOURNET, E.P., SUMNER, L.W. (eds). *The Medicago truncatula handbook*. Pp 612. 1 – 15. <https://www.noble.org/medicago-handbook>.
- DAVISON, J., MOORA, M., SEMCHENKO, M., ADENAN, S. B., AHMED, T., AKHMETZHANOVA, A. A., ALATALO, J. M., AL-QURAIISHY, S., ANDRIYANOVA, E., ANSLAN, S., BAHRAM, M., BATBAATAR, A., BROWN, C., BUENO, C. G., CAHILL, J., CANTERO, J. J., CASPER, B. B., CHEROSOV, M., CHIDEH, S., COELHO, A. P., COGHILL, M., DECOCQ, G., DUDOV, S., FABIANO, E.C., FEDOSOV, V. E., FRASER, L., GLASSMAN, S. I., HELM, A., HENRY, H. A. L., HÉRAULT, B., HIIESALU, I., HIIESALU, I., HOZZEIN, W. N., KOHOUT, P., KÖLJALG, U., KOOREM, K., LAANISTO, L., MANDER, Ü., MUCINA, L., MUNYAMPUNDU, J.-P., NEUENKAMP, L., NIINEMETS, Ü., NYAMUKONDIWA, C., OJA, J., ONIPCHENKO, V., PÄRTEL, M., PHOSRI, C., PÖLME, S., PÜSSA, K., RONK, A., SAIITA, A., SEMBOLI, O., SEPP, S.-K., SEREGIN, A., SUDHEER, S., PEÑA-VEGAS, C. P., PAZ, C., VAHTER, T., VASAR, M., VERAART, A. J., TEDERSOO, L., ZOBEL, M., ÖPIK, M. (2021): Temperature and pH define the realised niche space of arbuscular mycorrhizal fungi. - *New Phytol.* 231: 763 – 776. <https://doi.org/10.1111/nph.17240>
- FAKHECH, A., OUAHMANE, L., HAFIDI, M. (2019): Seasonality of mycorrhizal attributes, soil phosphorus and nitrogen of *Juniperus phoenicea* and *Retama monosperma* Boiss. in an Atlantic sand dunes forest. - *J. Sustainable For.* 38: 1 – 17. <https://doi.org/10.1080/10549811.2018.1490653>
- GENRE, A., CHABAUD, M., TIMMERS, T., BONFANTE, P., BARKER, D.G. (2005): Arbuscular mycorrhizal fungi elicit a novel intracellular apparatus in *Medicago truncatula* root epidermal cells before infection. - *Plant Cell.* 17:

- 3489–3499. <https://doi.org/10.1105/tpc.105.035410>
- GROBE, W.-R., STORDEUR, R. (2001): Arbeitsblätter zum Geländepraktikum Faule Ort. - Druckerei der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg. Halle.
- GRUNDMANN, L. (Hrsg.) (1999): Das Müritzgebiet. Ergebnisse der landeskundlichen Bestandsaufnahme im Raum Waren, Klink, Federow und Rechlin. Erarb. unter d. Leitung v. Hans Dieter Knapp, Ulrich Voigtländer, Luise Grundmann. - Verlag Hermann Böhlaus Nachfolger, Weimar.
- HALDER, M., AKHTER, S., ISLAM, S., KARIM, R. (2015): Seasonal variation of arbuscular mycorrhiza fungi colonization with some medicinal plant species of Chittagong BCSIR forest. *Plant Sci. Today*. 2: 87 – 92. <http://dx.doi.org/10.14719/pst.2015.2.3.121>
- HARLEY, J. L., HARLEY, E. L. (1987): A Check-List of Mycorrhiza in the British Flora. *New Phytol.* 105: 1 – 102.
- HAUSE, B., MROSK, C., ISAYENKOV, S., STRACK, D. (2007): Jasmonates in arbuscular mycorrhizal interactions. - *Phytochemistry, Mol Basics of Mycorrhizal Symbiosis*. 68: 101 – 110. <https://doi.org/10.1016/j.phytochem.2006.09.025>
- HIIESALU, I., PÄRTEL, M., DAVISON, J., GERHOLD, P., METSIS, M., MOORA, M., ÖPIK, M., VASAR, M., ZOBEL, M., WILSON, S.D. (2014): Species richness of arbuscular mycorrhizal fungi: associations with grassland plant richness and biomass. - *New Phytol.* 203: 233 – 244. <https://doi.org/10.1111/nph.12765>
- HILBIG, W., WERNER, K. (1977): Zur Flora des Südtails des Naturschutzgebietes „Ostufer der Müritz“ (Mecklenburgische Seenplatte). *Wiss. Z. Uni. Halle. Mathem.-Naturwiss. Reihe* 26: 121 – 146
- HOTHORN, T., BRETZ, F., WESTFALL, P. (2008): Simultaneous inference in general parametric models. *Biometrical J.* 50: 246 – 263.
- KUZNETSOVA, A., BROCKHOFF, P. B., CHRISTENSEN, R. H. B. (2017): lmerTest Package: Tests in linear mixed effects models. 82: 1 – 26. <https://doi.org/10.18637/jss.v082.i13>.
- LEHNERT, M., KRUG, M., KESSLER, M. (2017): A review of symbiotic fungal endophytes in lycophytes and ferns - a global phylogenetic and ecological perspective. - *Symbiosis* 71: 77 – 89. <https://doi.org/10.1007/s13199-016-0436-5>
- LIANG, Z. B., LEE, D. J., DWEIKAT, I. M., WEDIN, D. A., YUEN, G. Y., DRUJBER, R. A. (2017): Molecular Diversity of Arbuscular Mycorrhizae in Roots of *Juniperus virginiana* Invasive to Grasslands. - *Soil Sci. Soc. Am. J.* 81: 526 – 536. <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.05.0133>
- MEDDAD-HAMZA, A., HAMZA, N., NEFFAR, S., BEDDIAR, A., GIANINAZZI, S., CHENCHOUNI, H. (2017): Spatiotemporal variation of arbuscular mycorrhizal fungal colonization in olive (*Olea europaea* L.) roots across a broad mesic-xeric climatic gradient in North Africa. - *Sci. Total Environ.* 583: 176 – 189. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.01.049>
- PENCK, A., BRÜCKNER, E. (1909): Die Alpen im Eiszeitalter. - Tauchnitz, Leipzig.
- R Core Team (2020): R: A language and environment for statistical computing. - R Foundation for Statistical Computing. - Vienna, Austria. URL. <https://www.R-project.org/>.
- REDECKER, D., RAAB, P., OEHL, F., CAMACHO, F., COURTECUISSÉ, R. (2007): A novel clade of sporocarp-forming species of glomeromycotan fungi in the Diversisporales lineage. - *Mycol. Progress.* 6: 35 – 44. <https://doi.org/10.1007/s11557-007-0524-2>
- REMY, W., TAYLOR, T. N., HASS, H., KERP, H. (1994): Four hundred-million-year-old vesicular arbuscular mycorrhizae. - *Proc. Nat. Acad. Sci.* 91: 11841 – 11843. <https://doi.org/10.1073/pnas.91.25.11841>
- SCHAARSCHMIDT, S., HAUSE, B., STRACK, D. (2009): Wege zur Endomykorrhiza. Einladung ans Buffet. - *Biol unserer Zeit*. 39: 102 – 113. <https://doi.org/10.1002/biuz.200610385>
- SCHÜBLER, A., SCHWARZOTT, D., WALKER, C. (2001): A new fungal phylum, the Glomeromycota: phylogeny and evolution. Dedicated to Manfred KLUGE (Techn. Univ. Darmstadt) on the occasion of his retirement. - *Mycol Research*. 105: 1413 – 1421. <https://doi.org/10.1017/S0953756201005196>
- SIQUEIRA J. O., HUBBELL, D. H., MAHMUD, A. W. (1984): Effect of liming on spore germination, germ tube growth and root colonization by vesicular-arbuscular mycorrhizal fungi. - *Plant Soil*. 76: 115 – 124.
- SMITH, S.E., READ, D.J. (2010): *Mycorrhizal symbiosis* (3rd ed. Repr.). - Elsevier Academic Press, Amsterdam. Online-Ressource.
- TEDERSOO, L., BAHRAM, M., CAJTHAML, T., PÖLME, S., HIIESALU, I., ANSLAN, S., HAREND, H., BUEGGER, F.,

- PRITSCH, K., KORICHEVA, J., ABARENKOV, K. (2016): Tree diversity and species identity effects on soil fungi, protists and animals are context dependent. - *ISME J.* 10: 346 – 362. <https://doi.org/10.1038/ismej.2015.116>
- TEDERSOO, L., BAHRAM, M., ZOBEL, M. (2020): How mycorrhizal associations drive plant population and community biology. - *Science* 367: eaba1223. <https://doi.org/10.1126/science.aba1223>
- TESTE, F.P., JONES, M. D., DICKIE, I.A. (2020) Dual-mycorrhizal plants: their ecology and relevance. - *New Phytol.* 225: 1835– 1851. <https://doi.org/10.1111/nph.16190>
- THOMAS, P.A., EL-BARGHATHI, M., POLWART, A. (2007): Biological Flora of the British Isles: *Juniperus communis* L. - *J. Ecol.* 95: 1404 – 1440. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2745.2007.01308.x>
- TROUVELOT, A., KOUGH, J., GIANINAZZI-PEARSON, V. (1986): Mesure du taux de mycorrhization VA d'un système radiculaire. Recherche de méthodes d'estimation ayant une signification fonctionnelle. - In: Gianinazzi-Pearson, V., Gianinazzi, S. (eds) *Physiological and genetical aspects of mycorrhizae*. - INRA, Paris, pp 217 – 221.
- VAN AARLE, I. M., OLSSON, P. A., SÖDERSTRÖM, B. (2002): Arbuscular mycorrhizal fungi respond to the substrate pH of their extraradical mycelium by altered growth and root colonization. - *New Phytol.* 155: 173 – 182. <https://doi.org/10.1046/j.1469-8137.2002.00439.x>
- VIERHEILIG, H., COUGHLAN, A. P., WYSS, U., PICHÉ, Y. (1998): Ink and Vinegar, a Simple Staining Technique for Arbuscular-Mycorrhizal Fungi. - *Appl Environ. Microbiol.* 64: 5004 – 5007. <https://doi.org/10.1128/AEM.64.12.5004-5007.1998>.
- WAGG, C., JANSA, J., STADLER, M., SCHMID, B., VAN DER HEIJDEN, M. G. A. (2011): Mycorrhizal fungal identity and diversity relaxes plant–plant competition. - *Ecol.* 92: 1303 – 1313. <https://doi.org/10.1890/10-1915.1>
- WANG, S., DAI, D., SONG, S., DIAO, X., MA, L. (2018): Arbuscular mycorrhizal (AM) status in urban wetland plants and its impact factors. - *Aquat Bot.* 150:33 – 45. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2018.07.002>
- WICKHAM, H. (2016): *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. - Springer, New York.

Manuskript angenommen: 1. Dezember 2022

Anschrift der Autoren:

Dr. Heike Heklau

Institut für Biologie, Bereich Botanischer Garten der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Am Kirchtor 1, Geobotanik, 06108 Halle (Saale)

E-Mail: heike.heklau@botanik.uni-halle.de

Dr. Sylvia Haider

Institut für Biologie, Bereich Botanischer Garten der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Am Kirchtor 1, Geobotanik, 06108 Halle (Saale) und Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv), Halle-Jena-Leipzig, Puschstr. 4, 04103 Leipzig

E-Mail: sylvia.haider@botanik.uni-halle.de

Prof. Dr. Alexandra Erfmeier

Institut für Ökosystemforschung, Geobotanik, Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Olshausenstraße 75, 24118 Kiel

E-Mail: aerfmeier@ecology.uni-kiel.de

Prof. Dr. Helge Bruelheide

Institut für Biologie, Bereich Botanischer Garten der Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg, Am Kirchtor 1, Geobotanik, 06108 Halle (Saale) und Deutsches Zentrum für Integrative Biodiversitätsforschung (iDiv), Halle-Jena-Leipzig, Puschstr. 4, 04103 Leipzig

E-Mail: helge.bruehlheide@botanik.uni-halle.de