

Facharbeit

Mykorrhiza – Symbiosen zwischen Pflanze und Pilz



Anton Weise

Seminarfach Biologie

Herr Dr. Stahl

Abgabedatum 05.05.2017

Abiturjahrgang 2018

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	1
2. Theoretischer Hintergrund von Symbiosen.....	2
2.1. Arten der Symbiose.....	2
2.2. Symbiose bei Pflanzen	2
3. Mykorrhiza in der Theorie	3
3.1. Endomykorrhiza	4
3.2. Ektomykorrhiza.....	4
4. Versuchsaufbau und Durchführung.....	5
5. Auswertung der Ergebnisse.....	7
6. Ergebnisdiskussion	8
6.1. Mögliche Fehler der Datenerhebung.....	8
6.2. Verbesserungsmöglichkeiten	9
6.3. Ausblick	10
7. Quellenverzeichnis	11
7.1 Literaturquellen	11
7.2 Internetquellen.....	11
7.3 Bildquellen	12
8. Anhang	12

1. Einleitung

Im Allgemeinen bezeichnet man alle Verbände zwischen zwei oder mehreren verschiedenen Arten als Symbiose. Nicht unter den Begriff der Symbiose fallen Beziehungen zwischen gleichartigen Individuen. Organismen in einer Symbiose können von dieser profitieren, nicht beeinflusst, oder aber durch sie geschädigt werden; die Verbindung kann dauerhaft sein oder aber nur temporär. Symbiotische Verbände sind sehr häufig, die Bandbreite reicht von Bakterien und Pilzen, welche mit den Wurzeln von pflanzlichen Organismen enge Bindungen eingehen, bis zum *Riftiapachyptila*, einem Bartwurm welcher in der Tiefsee mit Bakterien zusammenlebt (vgl. Paracer 2000).

Ein Großteil der Flora des Planeten Erde befindet sich in einem symbiotischen System, denn der größte Teil der pflanzlichen Biomasse ist auf die Bestäubung durch ein anderes Lebewesen angewiesen, um sich fortzupflanzen.¹ Pflanzen sind eine ungemein komplexe Lebensform, noch komplexer werden sie, wenn man die Symbiosen betrachtet, die sie mit verschiedensten Pilzen eingehen. Diese für viele Pflanzen obligatorische Symbiose wird allgemein als Mykorrhiza (altgr. Μύκης *mýkēs* ‚Pilz‘ und ρίζα *rhiza* ‚Wurzel‘) bezeichnet.²

In der Theorie soll eine Pflanze durch die Symbiose in vielerlei Hinsicht gestärkt werden. Zunächst werden diese Vorteile theoretisch erarbeitet. Dieser Facharbeit liegt die Frage zugrunde, inwiefern sich günstige Einflüsse durch Mykorrhiza auf Pflanzen tatsächlich experimentell beobachten und nachweisen lassen. Dafür wurden 22 Chili-Pflanzen verwendet, von denen 11 mit Mykorrhiza aufwuchsen und 11 ohne.

¹Vgl. „Wikipedia: Symbiose“
URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Symbiose>
(abgerufen am 05.09.16)

²Vgl. „Wikipedia: Mykorrhiza“
URL: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Mykorrhiza>
(abgerufen am 22.09.16)

2. Theoretischer Hintergrund von Symbiosen

Die Definition einer Symbiose erfolgt nach mehreren Faktoren und gestaltet sich stets unterschiedlich aus. So ist eine Symbiose zwischen Tieren etwas Anderes als diese zwischen Pflanzen.

2.1. Arten der Symbiose

Die verschiedenen Wechselbeziehungen lassen sich grob nach drei Kriterien einteilen:

- Ausmaß, Intensität und Abhängigkeit.
- Räumliche und körperliche Beziehung der Beteiligten.
- Art des erzielten Nutzens.

Daraus ergeben sich verschiedene Formen von Symbiosen:

Allianz: Bei einer Allianz ziehen zwar beide Arten einen Vorteil aus der gelegentlichen Kooperation, sie können jedoch auch ohne den Partner überleben und sind in keinem Lebensbereich auf die Symbiose angewiesen.

Mutualismus oder fakultative Symbiose: Wenn es sich um eine nicht lebenswichtige Zusammenarbeit handelt die aber regelmäßig stattfindet, dann spricht man von Mutualismus. Beide Partner bleiben körperlich getrennt – eine sogenannte Ektosymbiose.

Eusymbiose oder obligate Symbiose: Bei dieser Form der Kooperation sind die Symbionten ohne die Partnerschaft schlicht nicht mehr lebensfähig. Ohne die konstante, wechselseitige Beziehung könnten sie nicht existieren. Räumlich lebt einer der Symbionten im anderen, das nennt man Endosymbiose (vgl. Paracer 2000).

2.2. Symbiose bei Pflanzen

Eine verbreitete Art der Symbiose bei pflanzlichen Lebewesen ist diese mit stickstofffixierenden Bakterien. Da nur wenige Pflanzen den in der Luft vorhandenen Stickstoff umsetzen können, bilden sie mit diesen Bakterien eine symbiontische Beziehung aus. Die Pflanzen liefern den Bakterien Energie- und Kohlenstoffquellen, während sie im Gegenzug von den Bakterien mit Stickstoff

beliefert werden. Laut Schneider (2007, S. 574) sind diese Wechselbeziehungen spezifisch und eine Pflanzenart wird nur von einem bestimmten Bakterienstamm befallen. Eine ausführlich beobachtete Symbiose dieser Art entsteht zwischen Leguminosen (Sojabohne, Klee, Erbsen, usw.) und bestimmten Bakterienstämmen (u.a. Rhizobium und Bradyrhizobium), hier werden sogenannte Wurzelknöllchen gebildet. Wenn die Bakterien sich nicht in einer Wechselbeziehung befinden, nutzen sie andere Stickstoffquellen, nachdem sie jedoch in die Wirtspflanze eingedrungen sind, verändert sich die Zellform der Bakterien zu einem rundlichen Bakteroid und die Knöllchen an den Wurzeln entstehen. Erst dann bilden sie das Enzym Nitrogenase, welches die Stickstofffixierung ermöglicht.

Mithilfe der Nitrogenase setzen die Bacteroide den Stickstoff der Luft in Ammoniak um und geben dieses an die Pflanzenzellen weiter, welche daraus Glutamin und Glutaminsäure synthetisieren. Die Knöllchenbakterien werden von der Pflanze mit Nährstoffen aus der Photosynthese beliefert, darunter Succinat, Malat und andere organische Säuren. Die Bakterien können daraus Energie in Form von ATP gewinnen (vgl. Schneider 2007, S. 574).

Eine sehr wichtige Symbiose der Pflanzen ist die mit unterschiedlichsten Pilzarten. Im nächsten Abschnitt sollen die verschiedenen Arten und der Nutzen dieser Symbiosen erörtert werden.

3. Mykorrhiza in der Theorie

Die eigenständige Gruppe der Pilze hat sich im Laufe der Evolution an verschiedenste Organismen angepasst, entweder als Parasit oder aber als Symbiont in einer mutualistischen Symbiose. Eine Symbiose mit den Wurzeln von Pflanzen definiert man als Mykorrhiza. Weiterhin wird zwischen Endomykorrhiza und Ektomykorrhiza unterschieden, je nachdem, ob der Pilz in die Zellen der Wirtspflanze eindringt oder sich im Gewebe zwischen den Zellen festsetzt (vgl. Kothe 2007, S. 75).

Laut Kothe (2007) ist die Symbioseform Endomykorrhiza die Ältere und wird auf ca. 450 bis 480 Millionen Jahre geschätzt. Weiterhin behauptet sie, dass sämtliche Mykorrhizen das Wachstum der Wirtspflanze verbessern, indem sie eine bessere

Versorgung mit Wasser und Mineralien sichern. Von allen Landpflanzen seien 90% befähigt, mit den geeigneten Pilzstämmen Mykorrhiza auszubilden.

3.1. Endomykorrhiza

Krautige Pflanzen bilden größtenteils Endomykorrhiza-Symbiosen mit der Pilzgruppe der *Glomeromycota*, welche 130 Arten zusammenfasst. Entscheidend für diese Gruppe ist, dass die Pilze auf einen Wirt angewiesen sind um zu überleben, somit handelt es sich um eine Eusymbiose. Damit eine Symbiose entsteht, muss eine Spore von einer der Pilzarten keimen. Daraufhin bildet sich ein relativ kleines und verzweigtes Mycel³, welches sich ohne geeignete Pflanzenwurzel nicht weiterentwickelt. Ohne passenden Wirt zieht es sich wieder in die Spore zurück und legt eine Ruhephase ein. Trifft das Mycel auf eine geeignete Pflanzenwurzel, dringt es in diese ein und beginnt nun interzellulär zu wachsen, dabei bildet es verzweigte Strukturen, welche als Arbuskel (siehe Anhang-Nr. 1) bezeichnet werden. An der Oberfläche der Arbuskel findet der Austausch zwischen den Symbionten statt. Der Pilz liefert über ein weit ausgebildetes Bodenmycel rund um die Wirtspflanze Wasser, Stickstoff, Phosphor sowie verschiedenste Mineralstoffe, im Gegenzug erhält er von der Pflanze die Photosyntheseprodukte. So werden die Wachstumsbedingungen für die Pflanze verbessert und sie kann Stress und Krankheiten besser überstehen (Vgl. Kothe 2007, S.76).

3.2. Ektomykorrhiza

Im Gegensatz zu Endomykorrhiza können die Pilze, die nicht in die Zellen der Wirtspflanze wachsen, auch ohne die Symbiose überleben (Mutualismus). Diese „Ektomykorrhiza“ genannte Wechselbeziehung⁴ findet sich vor allem bei den *Basidiomyceten* (z.B. Pfifferlinge) und den *Ascomyceten* (z.B. Trüffel, Morchel). In fast allen Wäldern bilden die Bäume Mykorrhiza. Jeder Baum kann mit mehreren Pilzen gleichzeitig Mykorrhiza bilden und die Pilze verbinden durch riesige Mycel-Netzwerke mehrere Bäume miteinander. Ektomykorrhiza stabilisiert das Ökosystem Wald – wird der Pilz geschädigt kommt es zu massenhaftem Baumsterben.

³ Gesamtheit aller Hyphen (vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyphe>, abgerufen am 08.11.16)

⁴ Vgl. „Ektomykorrhiza“

URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/ektomykorrhiza/20613>
(abgerufen am 14.04.17)

Die Pilze sind wie bei der Endomykorrhiza-Symbiose auf bestimmte Baumarten spezialisiert, während die Bäume mit verschiedensten Pilzen Mykorrhiza bilden. Wenn die Hyphen⁵ eines Pilzes auf die Wurzel eines möglichen Wirts treffen, bilden sie zunächst eine Art Mantel um die Kurzwurzeln des Baumes. Die Hyphen wachsen nun zwischen den Zellen der Rinde (niemals in tiefer gelegene Zellschichten) dabei verzweigen sie sich stark, bis sämtlicher Raum zwischen den Zellen ausgefüllt ist (Hartig'sches Netz). Mithilfe dieser Struktur kann jetzt wieder der Nährstoffaustausch stattfinden.

Die Pilze übernehmen außerdem die Rolle der Wurzelhaare, da diese nicht mehr gebildet werden sobald der Baum infiziert wurde. Das stellt einen Vorteil für den Wirt da, denn das Bodenmycel des Pilzes behält die Fähigkeit zur Nährstoffaufnahme lange bei, während ein Wurzelhaar nur wenige Tage lebt. Zudem kann das feinere Mycel den Boden besser nutzen als vergleichsweise dicke Wurzelhaare. Die Symbiose verbessert die Wachstumsbedingungen für den Wirt – unter großem Stress (z.B. Schadstoffbelastung) kann sie auch lebenswichtig sein. Ein Baum, der Ektomykorrhiza gebildet hat, ist resistenter gegen parasitische Mikroben. Der Pilz dagegen könnte sich ohne die Symbiose nicht vermehren, da Ektomykorrhiza ohne einen Wirt keine Sporen bilden könnten (vgl. Kothe 2007, S. 77).

4. Versuchsaufbau und Durchführung

Um die Effekte von Mykorrhiza nachzuweisen, wurden kleine, schnell wachsende Chili-Pflanzen (*Capsicum annuum*) ausgewählt⁶. Diese können mit mehreren Pilzstämmen Endomykorrhiza ausbilden⁷, außerdem lässt sich hier auch der Aspekt der Fruchtbildung betrachten. Von Pepperworldhotshop.de wurden 20 Chili Samen der Sorte „Chinese 5 Color“ zur Verfügung gestellt. Ein Präparat mit Endomykorrhiza-Sporen, fixiert auf Blähton, erhielt ich dankenswerterweise von Mykorrhiza-shop.de. Im Versuchsansatz wurden dann 11 von 22 Pflanzen mit den Sporen eingepflanzt. Alle Pflanzen wuchsen zusammen unter einem 35 Watt

⁵ Fadenförmige Zellen von Pilzen (vgl. <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyphe>, abgerufen am 08.11.16)

⁶ Vgl. „Chinese 5 Color Chilisaamen“

URL: <https://www.pepperworldhotshop.de/chinese-5-color-saat-c-annuum/>
(abgerufen am 17.04.17)

⁷ Vgl. „Liste von kompatiblen Pflanzen“

URL: <http://www.mykorrhiza-shop.de/liste.php>
(abgerufen am 17.04.17)

Pflanzenlicht in der geeigneten Wellenlänge ⁸ auf und wurden stets rotiert sowie bei Bedarf gegossen. Die Zeitschaltung der Pflanzenlampe wurde so eingestellt, dass 12 Stunden Licht sowie 12 Stunden Dunkelheit erzielt wurden. Sowohl Temperatur (25°C) als auch Luftfeuchte (55%) wurden konstant gehalten.

Zunächst mussten alle Pflanzen keimen und etwas wachsen, um in die späteren Behälter (gebräuchliche Blumentöpfe, etwa 0.5 L) umgetopft zu werden. Nach drei Wochen wurden sämtliche Pflanzen in die selbe herkömmliche Blumenerde umgetopft, vorher wuchsen sie in Anzuchterde auf. Beim Umtopfen wurde nun in 11 Töpfen die Erde mit sporenpräparierten Blähtonkugeln vermischt (ca. ein Esslöffel pro 500 mL Topf). Hier wurde darauf geachtet, große Unterschiede in den Phänotypen der präparierten und nicht-präparierten Pflanzen zu vermeiden um das Experiment nicht von Anfang an zu verfälschen. Zudem wurde eine weitere Woche gewartet um Mykorrhiza-Entstehung zu ermöglichen sowie die Pflanzen an die neue Umgebung zu gewöhnen. Sämtliche Pflanzen erhielten eine Nummer, Pflanzen mit „M“ vor der Nummer wuchsen mit Pilzsporen auf während Pflanzen mit „O“ ohne Pilzsporen aufwuchsen.

Über einen Zeitraum von etwa zwei Monaten (07.02.17 – 17.03.17) wurden dann wöchentlich Daten zum Wachstum erhoben und dokumentiert, zunächst die Größe des Stammes sowie die Anzahl der Sprossachsen und später (ab dem 10.03) die Anzahl der Blüten sowie der Durchmesser des Stammes. Der Wechsel zwischen den betrachteten Faktoren ist damit begründet, dass nach ca. einem Monat kaum noch Höhenwachstum zu beobachten war, denn so gut wie alle Pflanzen waren in der Blütephase angelangt und verlangsamten dieses.

Weiterhin wurden zwei Pflanzen, eine mit und eine ohne Pilzsporen (M8 und O15), mit sehr ähnlichem Phänotyp ausgewählt und detaillierter gemessen, nämlich jede Woche zweimal. Zudem wurden diese Pflanzen jede Woche fotografisch dokumentiert.

Neben diesen Daten wurde am 04. April 2017 eine Bodenanalyse durchgeführt, um festzustellen ob sich hier Unterschiede zwischen den M- und den O-Pflanzen

⁸ Vgl. „Chilis unter Kunstlicht“,
URL: <http://pepperworld.com/chili-zucht-tipps-chilis-unter-kunstlicht-ziehen>
(abgerufen am 01.05.17)

darstellen würden. Es wurde mit einem Bodenanalyse-Kit getestet auf den pH-Wert, Nitrat-, Nitrit- und Ammoniumgehalt.

5. Auswertung der Ergebnisse

Alle händisch erhobenen Daten wurden in Excel-Tabellen übertragen, dabei wurde getrennt zwischen M- und O-Pflanzen. Weiterhin wurde an jedem Datum der jeweilige Durchschnitt errechnet. Aus diesen Tabellen konnten nun grafische Darstellungen der Daten erzeugt werden. Neben Diagrammen die sämtliche Daten anzeigen (z.B. Anhang-Nr. 2), wurden für bessere Darstellung die Durchschnitte von präparierten und nicht-präparierten Pflanzen zusätzlich gegenübergestellt. Ein Beispiel dafür ist Anhang-Nr. 4.

Betrachtet man die Vergleichs-Diagramme (Anhang-Nr. 4, 7, 10 & 13) fällt auf, dass die Pflanzen mit Mykorrhiza-Pilzen in jeder Hinsicht besser wuchsen. Sie wurden größer, verzweigter, dicker und blühten früher als die Pflanzen ohne. All das liegt mit hoher Wahrscheinlichkeit an der Symbiose mit den Pilzen. Diese bilden wie in Abschnitt 3.1 beschrieben Arbuskel in der Pflanze sowie Bodenmycel in der Erde und versorgten die Pflanze so besser mit Nährstoffen. Auch wenn die Pflanze dafür Photosynthese-Produkte an die Pilze abgibt, scheint sie dennoch einen großen Vorteil aus der Partnerschaft zu ziehen (vgl. Abschnitt 3.1 Endomykorrhiza, S. 4). Die Pflanzen ohne Mykorrhiza wuchsen äußerlich unter exakt gleichen Bedingungen auf, aber ihnen fehlte der Vorteil der Symbiose und sie blieben im Vergleich hinter Mykorrhiza-Pflanzen zurück.

Während sich die durchschnittliche Größen- und Sprossachsen-Entwicklung von beiden Ansätzen anfangs nur geringfügig unterschied, prägten sich die Unterschiede im Laufe des Experiments immer weiter aus (siehe Anhang-Nr. 4 & 7). Das liegt wahrscheinlich daran, dass die Arbuskel- und Bodenmycel-Entwicklung mit der Zeit weiter voranschritt. Dadurch konnte der Pilz die Pflanzen immer besser mit Wasser und Nährstoffen versorgen und so die Wachstumsbedingungen fortlaufend verbessern (siehe Ende Abschnitt 3.1 Endomykorrhiza, S. 4).

Vergleicht man Anhang-Nr. 2 & 3 sowie Anhang-Nr. 8 & 9 ist es auffällig, dass sich das Größenwachstum sowie die Stammdicke bei Pflanzen mit Mykorrhiza sehr

viel einheitlicher gestaltete als ohne Pilze. Eine mögliche Erklärung ist, dass die präparierten Pflanzen weniger anfällig für Schwankungen der Umweltfaktoren wie z.B. Wasserversorgung waren und die Nährstoffe der Erde stetig nutzen konnten, da etwaige Verzögerungen der Wurzelentwicklung durch die Bodenmycel des Pilzes ausgeglichen wurden.

Weitere, nicht aus den Daten ersichtliche aber dennoch dokumentierte, Unterschiede wurden bei dem Wasserbedarf festgestellt. Wenn einer Pflanze zu wenig Wasser zur Verfügung steht, lässt sie die Blätter hängen. Pflanzen mit Mykorrhiza erweckten rein optisch den Eindruck, weniger Wasser zu benötigen, da die Pilze im Boden die Stresstoleranz gegenüber Trockenheit erhöhten⁹.

Bei der Bodenanalyse wurden hingegen keine Unterschiede festgestellt. Sowohl der pH-Wert mit 5,5 (siehe Anhang-Nr. 20 & 21) als auch Nitrat-, Nitrit- und Ammonium-Werte waren exakt gleich (Nitrat 2,3 mg/kg, Ammonium und Nitrit 0). Hier ist es möglich, dass sich Unterschiede in der Bodenbeschaffenheit erst nach längerer Zeit einstellen. Im Vergleich zur unberührten Blumenerde (pH-Wert 4) war der pH-Wert allerdings bei beiden Ansätzen um 1,5 gestiegen (siehe Anhang-Nr. 22). Diese Veränderung hängt mit hoher Wahrscheinlichkeit mit dem verwendeten Gießwasser zusammen, welches einen pH-Wert von 7 hatte (siehe Anhang-Nr. 23). Durch stetiges Gießen wurde der pH-Wert der Erde also nach und nach erhöht.

6. Ergebnisdiskussion

Da es sich um einen vergleichsweise kleinen Versuch handelt, sind Fehler umso gravierender. Im Folgenden sollen mögliche Fehlerquellen erschlossen und Verbesserungsmöglichkeiten diskutiert werden.

6.1. Mögliche Fehler der Datenerhebung

Einer der möglichen Fehler die das Experiment verfälscht haben könnten ist die Wassergabe. Ich habe mich entschieden, die Pflanzen nach Bedarf zu gießen um realistischere Bedingungen zu schaffen. Den Bedarf habe ich nach Trockenheit der Oberfläche und Gewicht des Topfes abgeschätzt, damit wurde also subjektiv über

⁹ Welche Auswirkungen hat Mykorrhiza? (vgl. <http://www.mykorrhiza-shop.de/infos.php>, abgerufen am 17.04.17)

mehr oder weniger Wasser entschieden, wodurch es möglich ist, dass manche Pflanzen einen Wachstumsvor- oder auch -nachteil erhielten. Ein automatisiertes Gießsystem könnte hier Abhilfe schaffen.

Weiterhin hatten nicht alle Pflanzen genau das gleiche Pflanzgefäß. 22 gleichartige, hochwertige Töpfe zu kaufen ließ das Budget nicht zu, weshalb ich diese von verschiedenen Gärtnereien erhielt. Das Wachstumsgefäß kann zu Teilen Einfluss auf die Verdunstung und den Wasserabfluss haben und so ebenfalls Wachstumsbedingungen geringfügig verändern. Jedoch kann man eine gewisse Diversität der Pflanzgefäße auch als einen realistischen Faktor betrachten. Dann würde dieser Unterschied eine Übertragung auf tatsächliche Anwendungen im Gartenbau eher zulassen.

Weiterhin wurde Saatgut verwendet, damit unterliegt das Wachstum und der Phänotyp der Pflanzen durch verschiedenes Erbgut zu einem gewissen Grad dem Zufall. Auch wenn versucht wurde, diese Unterschiede möglichst auszugleichen (siehe S.6 Z.9ff) könnte theoretisch der unwahrscheinliche Fall vorliegen, dass sämtliche Ergebnisse lediglich Produkt der genetischen Unterschiede im Saatgut sind.

Grundsätzlich sind 22 Versuchspflanzen jedoch nicht genug, um eine allgemeine und repräsentative Aussage über die Wirksamkeit von Mykorrhiza zu treffen. Trotzdem konnten im kleinen Rahmen definitiv Unterschiede zwischen präparierten und nicht-präparierten Pflanzen dokumentiert und festgestellt werden. Damit ist mindestens ein Ansatz für einen großangelegten Versuch geschaffen.

6.2. Verbesserungsmöglichkeiten

Sollte man einen solchen großangelegten Versuch durchführen, ist eine Zeitspanne von mindestens einem Jahr bei einjährigen Pflanzen sinnvoll. Zudem sollten perfekte Bedingungen herrschen, neben gleichartigen Pflanzgefäßen und Computergesteuertem Gießverhalten machen auch Windsimulation und regelmäßiges Umtopfen durchaus Sinn. Nur wenn wirklich realistische Bedingungen geschaffen werden kann man die Ergebnisse auch definitiv auf die reale Welt übertragen. Je nach Klima könnte man den Versuch natürlich auch in der freien Natur durchführen. Bei dem Faktor der Pflanzen sollten nicht nur Chili-Pflanzen verwendet werden, sondern bestenfalls verschiedene Arten in

verschiedenen Ansätzen. Hier wären Zahlen von 300 Pflanzen pro Ansatz durchaus sinnvoll.

Es wäre sinnvoll, genetisch gleichartige Pflanzen zu verwenden. Im Umfang einer Facharbeit hätte dies den Rahmen gesprengt, aber eine Möglichkeit dazu ist das Nehmen von Stecklingen. Dafür wird eine große Mutterpflanze gezüchtet, von welcher dann zur selben Zeit gleichgroße Triebe abgeschnitten und eingepflanzt werden. So wird sowohl für das gleiche genetische Material als auch für das gleiche genetische Alter bei allen Pflanzen gesorgt.

6.3. Ausblick

Im klein angelegten Versuch konnten durchaus Vorteile für Pflanzen bei Anwendung von Mykorrhiza dokumentiert werden. Das mag für viele Menschen ausreichen, um die Anwendung im heimischen Garten zu rechtfertigen – Mykorrhiza ist kein nutzloses Wundermittel, sondern scheint durchaus bessere Ergebnisse zu bringen.

Dennoch gibt es noch viele Aspekte zu erforschen: Inwiefern verändert Mykorrhiza verschiedene Pflanzenarten auf interzellulärer Ebene? Macht es einen Unterschied, zu welchem Zeitpunkt die Sporen dazugegeben werden? Wie sehr unterscheiden sich die Vorteile bei Symbiosen zwischen unterschiedlichen Pflanzen und Pilzen?

Symbiosen sind ein sehr großes Themengebiet, und alleine der kleine Anteil Mykorrhiza enthält genügend Fragen mit denen ich mich noch Jahre auseinandersetzen könnte, beispielsweise im Rahmen von Jugend Forscht.

7. Quellenverzeichnis

7.1 Literaturquellen

Kothe, E. (2007): Pilze. In: Fuchs, G. (Hrsg.), Allgemeine Mikrobiologie 8. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

Paracer, S. & Ahmadjian, V. (2000). Symbiosis: An Introduction to Biological Associations, Second Edition. Oxford: Oxford University Press.

Schneider, E. (2007): Mikroorganismen als Symbionten und Antagonisten. In: Fuchs, G. (Hrsg.), Allgemeine Mikrobiologie 8. Auflage. Stuttgart, New York: Georg Thieme Verlag.

7.2 Internetquellen

Biologie-Schule: Parasitismus.

URL: <http://www.biologie-schule.de/parasitismus.php>

(abgerufen am 05.09.16)

Chinese 5 Color Chilisamen

URL: <https://www.pepperworldhotshop.de/chinese-5-color-saat-c-annuum/>

(abgerufen am 17.04.17)

Liste von kompatiblen Pflanzen

URL: <http://www.mykorrhiza-shop.de/liste.php>

(abgerufen am 17.04.17)

Uni Hamburg: Anwendung arbuskulärer Mykorrhizapilze im Pflanzenbau;

URL: <http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d33/33b.htm>

(abgerufen am 03.09.16)

Spektrum: Ektomykorrhiza

URL: <http://www.spektrum.de/lexikon/biologie/ektomykorrhiza/20613>

(abgerufen am 14.04.17)

Wikipedia: Hyphe

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Hyphe>

(abgerufen am 08.11.16)

Wikipedia: Mykorrhiza.

URL: <https://de.m.wikipedia.org/wiki/Mykorrhiza>

(abgerufen am 05.09.16)

Wikipedia: Symbiose.

URL: <https://de.wikipedia.org/wiki/Symbiose>

(abgerufen am 05.09.16)

7.3 Bildquellen

Titelbild:

Anton Weise

Fotografie vom 17.03.2017, gezeigt sind Teile des Versuchaufbaus

8. Anhang

Anhang-Nr. 1

Arbuskel, Bäumchen-Struktur:



Quelle:

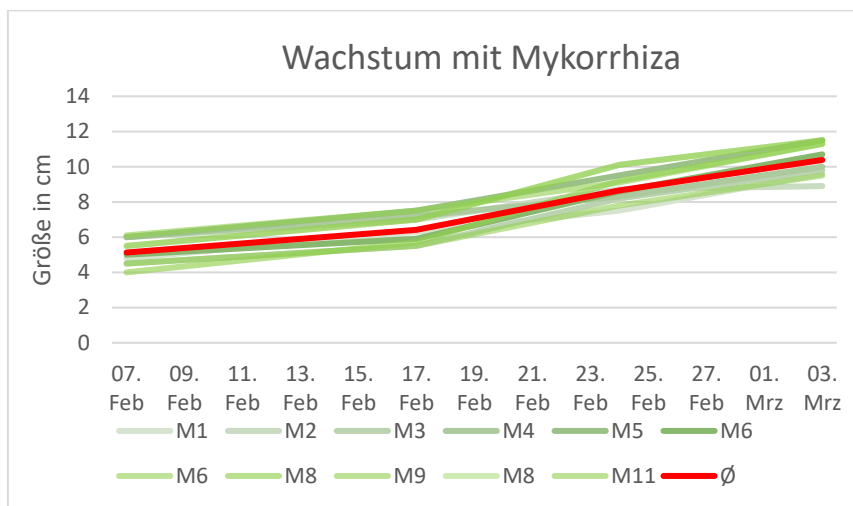
Sengenbusch, P.: Mykorrhiza. In: Uni Hamburg, Botanik Online.

URL: <http://www1.biologie.uni-hamburg.de/b-online/d33/33b.htm>

(abgerufen am 15.09.16)

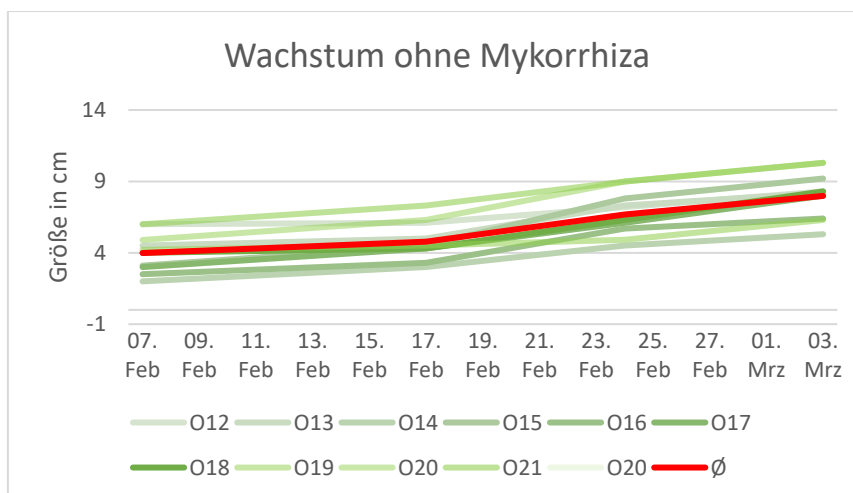
Anhang-Nr. 2

Diagramm Stammgröße bei Pflanzen mit Mykorrhiza



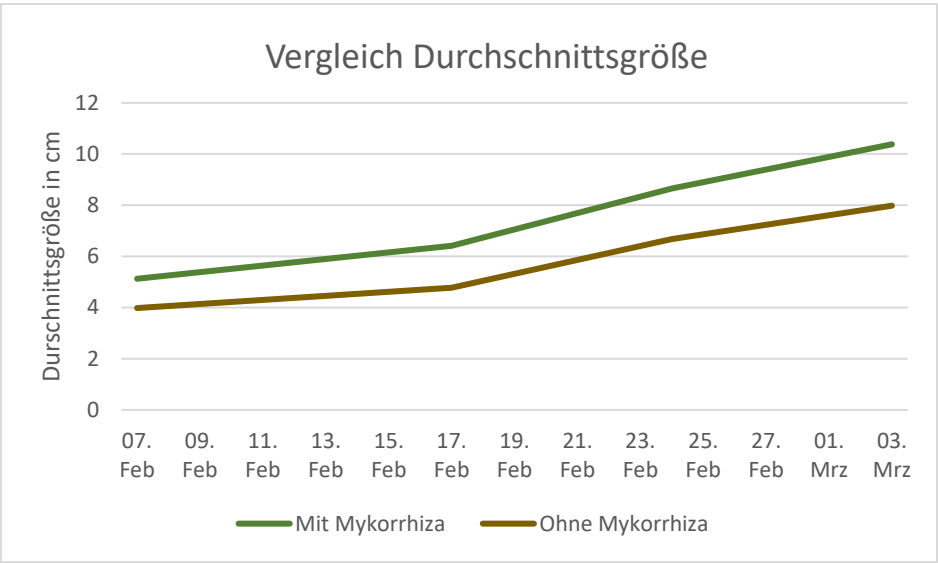
Anhang-Nr. 3

Diagramm Stammgröße bei Pflanzen ohne Mykorrhiza



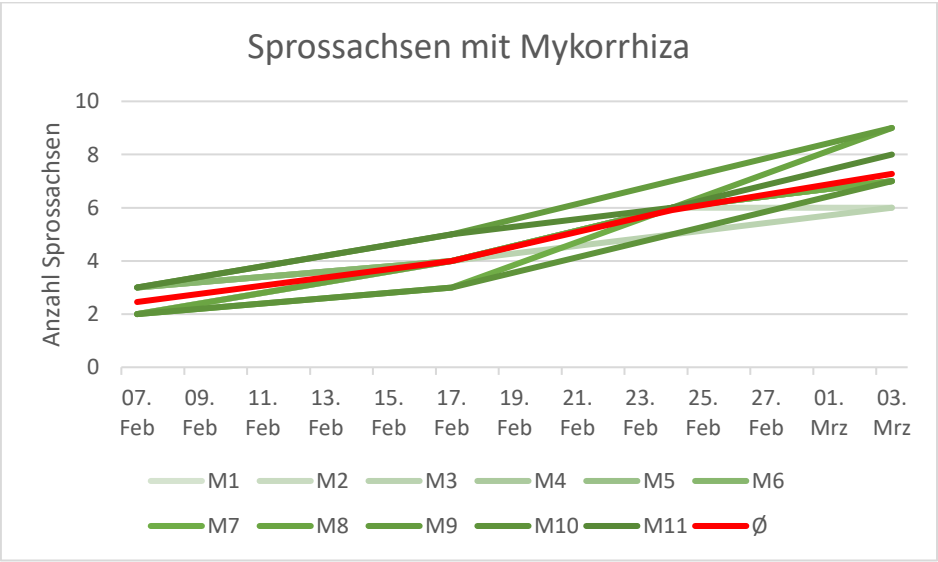
Anhang-Nr. 4

Diagramm Stammgrößen-Durchschnitt im Vergleich



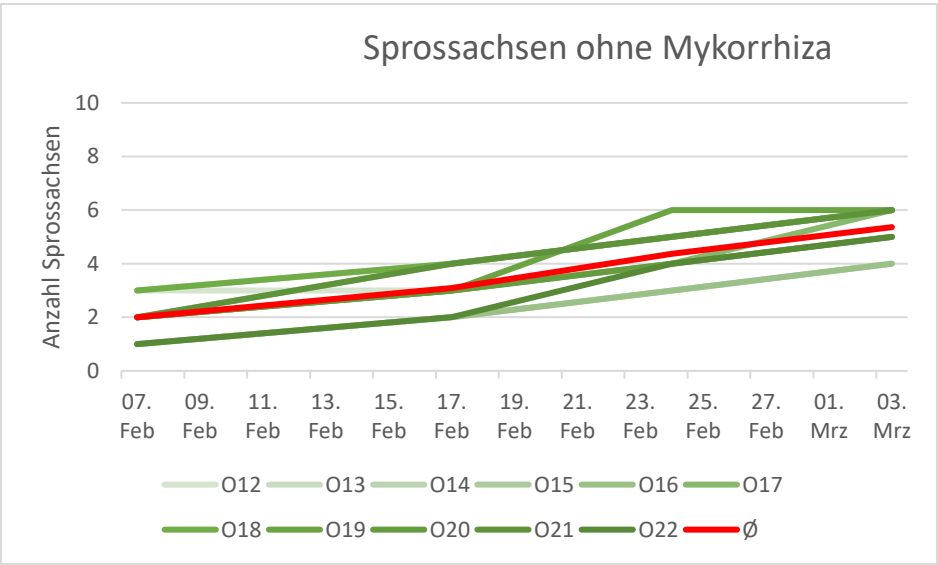
Anhang-Nr. 5

Diagramm Sprossachsen bei Pflanzen mit Mykorrhiza



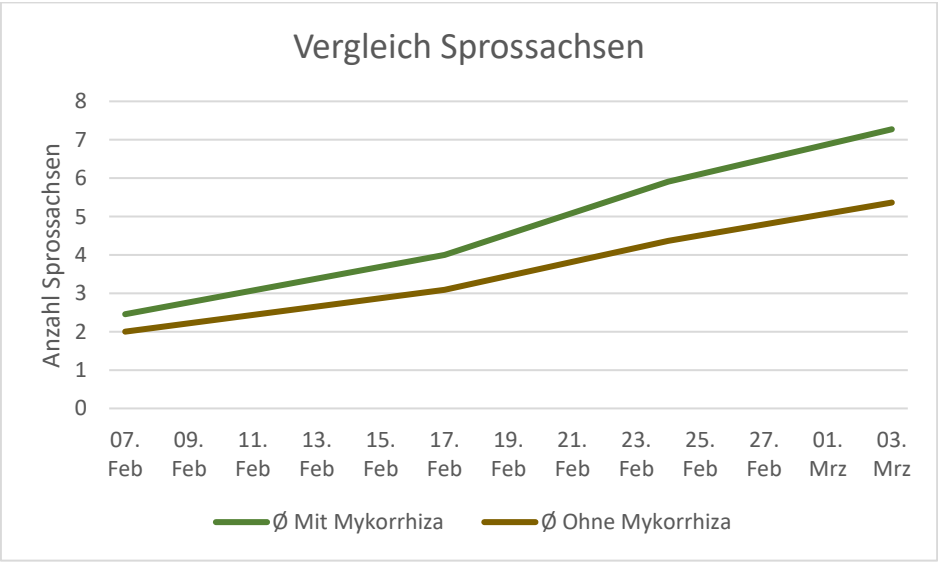
Anhang-Nr. 6

Diagramm Sprossachsen bei Pflanzen ohne Mykorrhiza



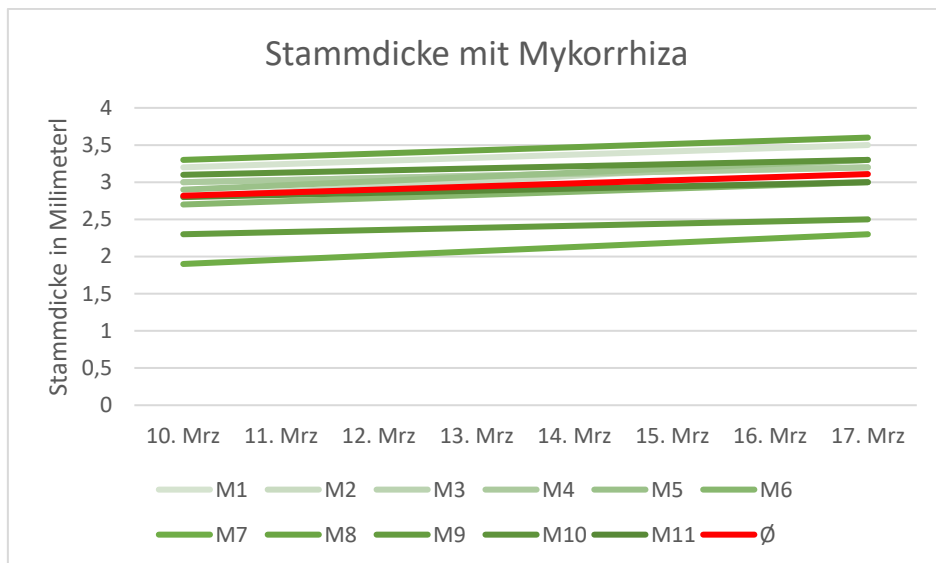
Anhang-Nr. 7

Diagramm Sprossachsenanzahl-Durchschnitt im Vergleich



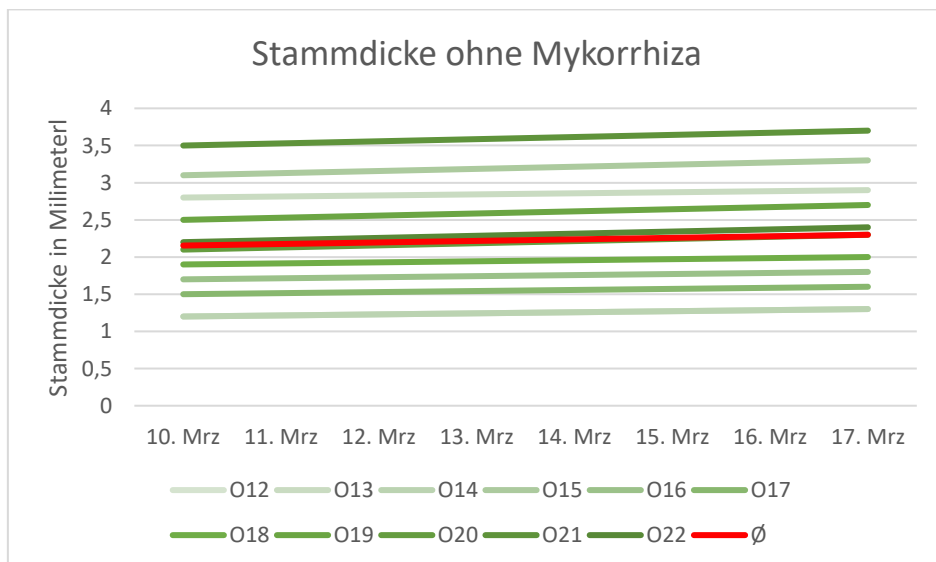
Anhang-Nr. 8

Diagramm Stammdicke bei Pflanzen mit Mykorrhiza



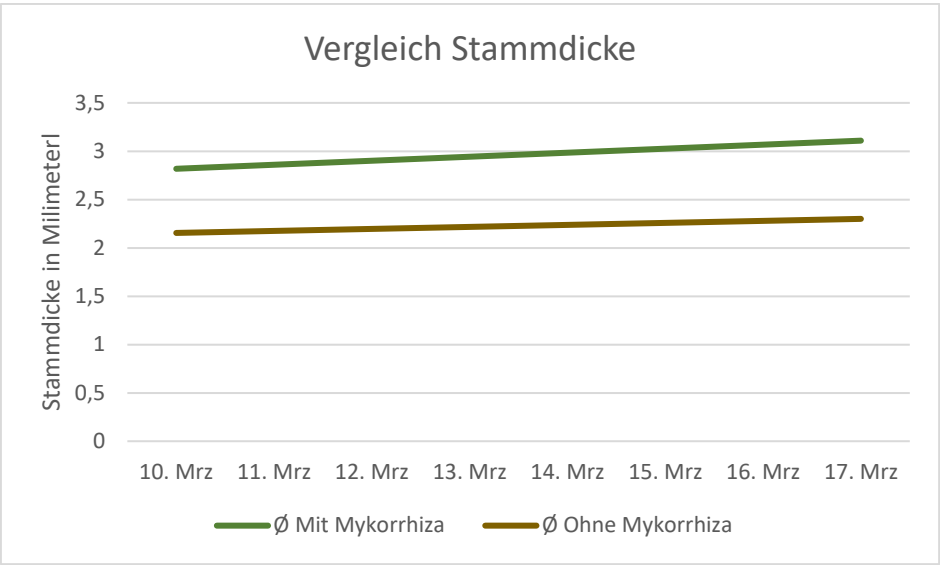
Anhang-Nr. 9

Diagramm Stammdicke bei Pflanzen ohne Mykorrhiza



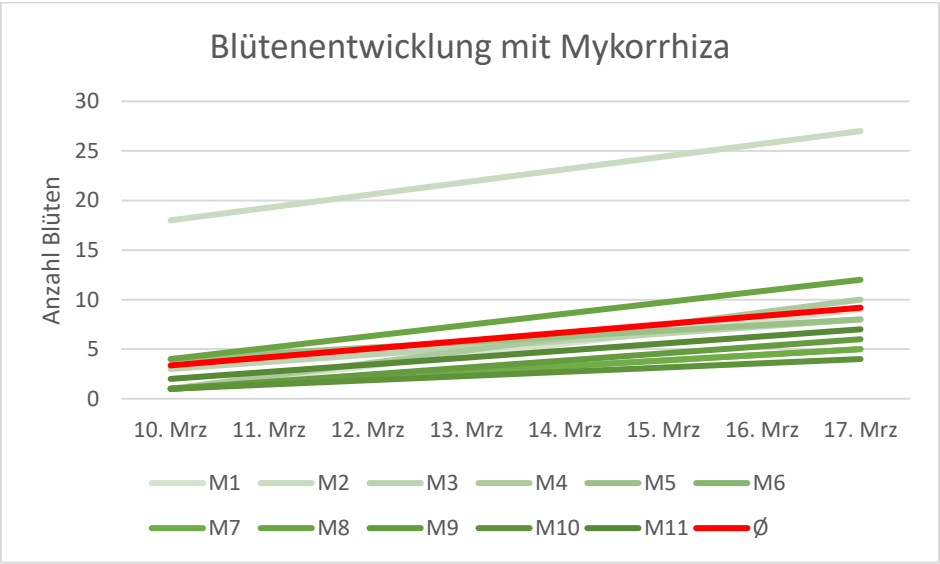
Anhang-Nr. 10

Diagramm Stammdicke-Durchschnitt im Vergleich



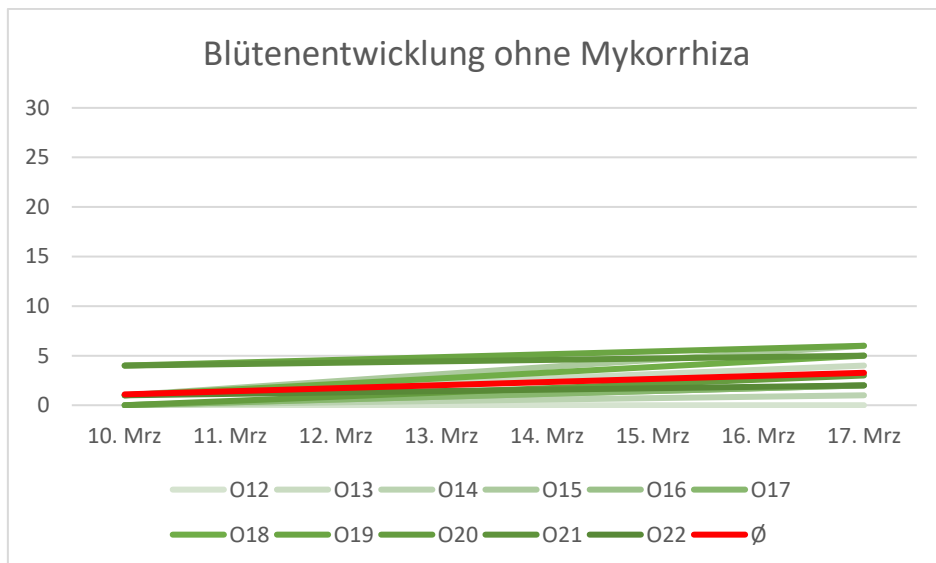
Anhang-Nr. 11

Diagramm Blütenanzahl bei Pflanzen mit Mykorrhiza



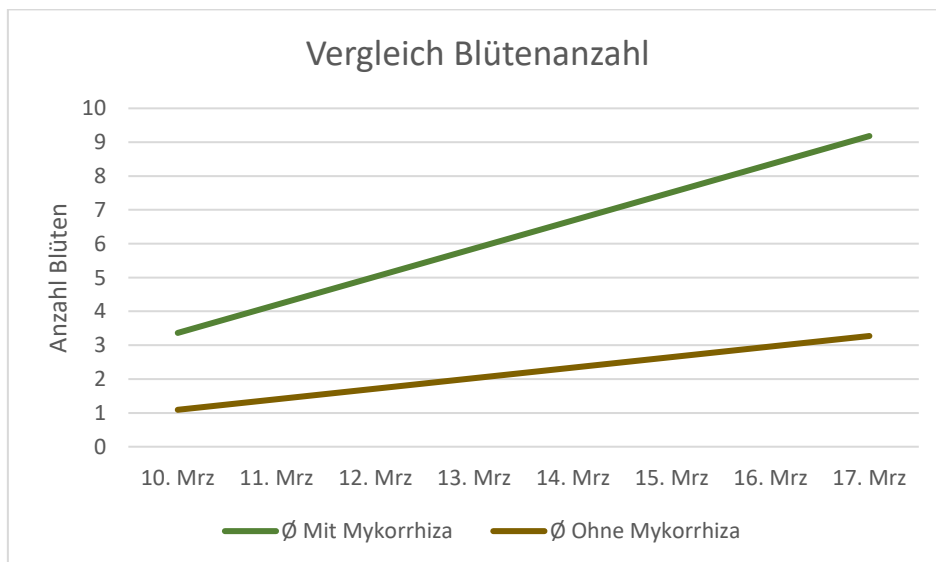
Anhang-Nr. 12

Diagramm Blütenanzahl bei Pflanzen ohne Mykorrhiza



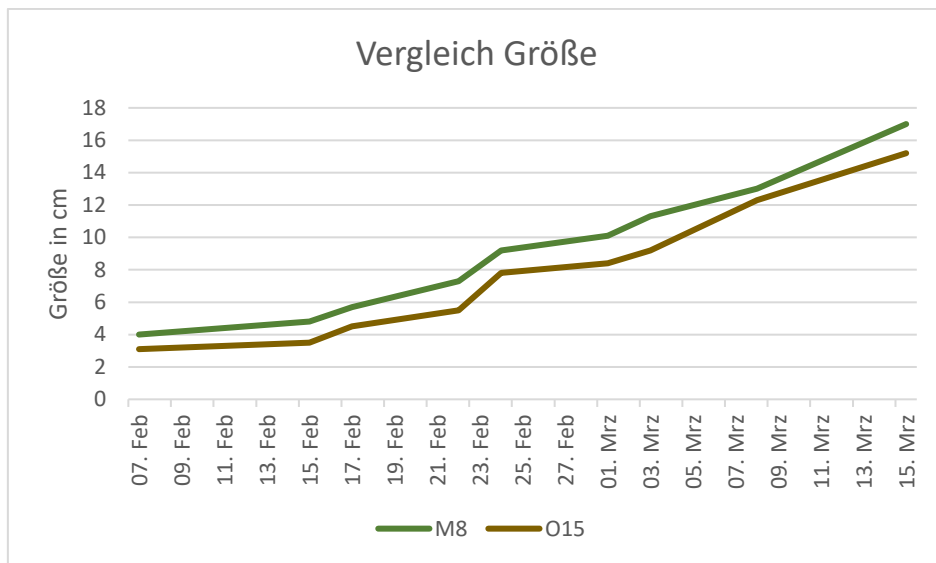
Anhang-Nr. 13

Diagramm Blütenanzahl-Durchschnitt im Vergleich



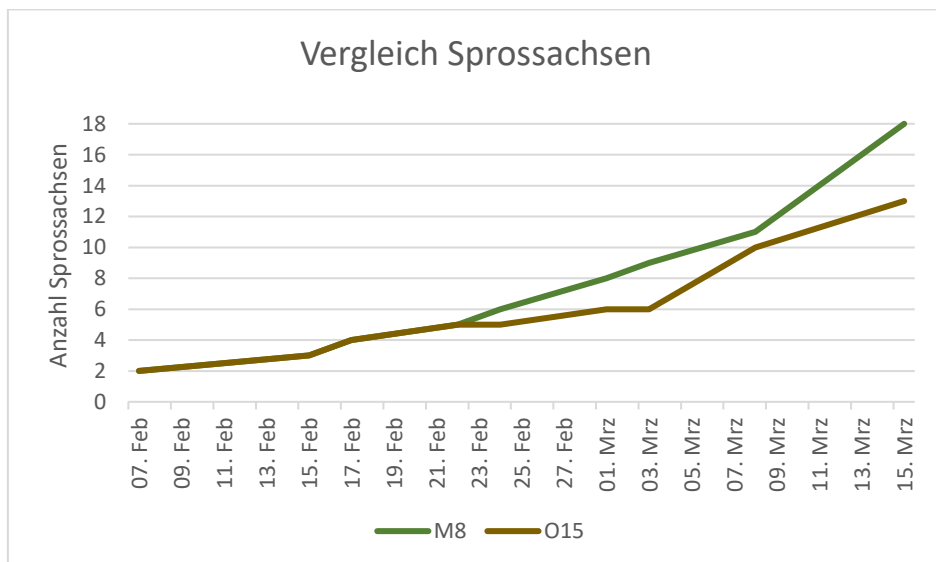
Anhang-Nr. 14

Diagramm Vergleich Stammgrößen zwischen Pflanzen M8 und O15



Anhang-Nr. 15

Diagramm Vergleich Sprossachsen zwischen Pflanzen M8 und O15



Anhang-Nr. 16

Fotografie vom 07.02.2017, Vergleich O15¹⁰ und M8.



Anhang-Nr. 17

Fotografie vom 01.03.2017, Vergleich O15 und M8



¹⁰ Anmerkung: Die O-Pflanze auf den Bildern trägt noch die Nummer 16, dabei handelt es sich um einen Nummerierungs-Fehler der im Nachhinein behoben wurde.

Anhang-Nr. 18

Fotografie vom 15.03.2017, Vergleich O15 und M8



Anhang-Nr. 19

Fotografie vom 05.04.2017, sichtbares Bodenmycel des Pilzes um die Wurzeln von M9 (watteartiges, weißes Geflecht um die Pflanzenwurzeln)



Anhang-Nr. 20

Fotografie vom 04.04.2017, pH-Wert Messergebnis bei M-Pflanze



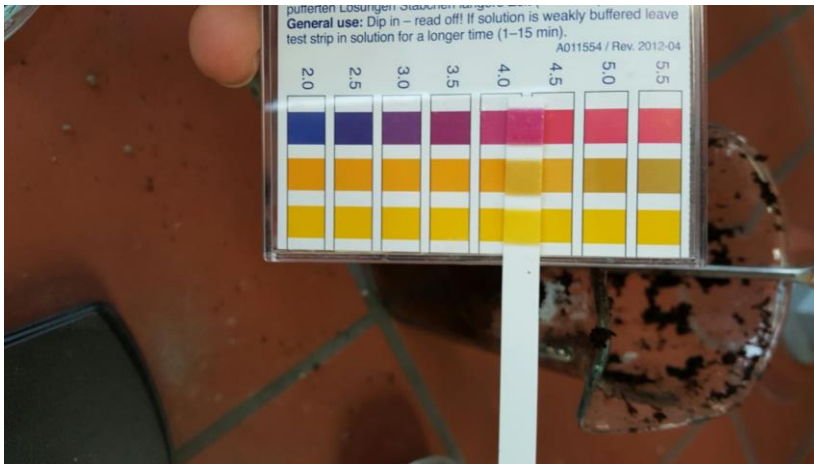
Anhang-Nr. 21

Fotografie vom 04.04.2017, pH-Wert Messergebnis bei O-Pflanze



Anhang-Nr. 22

Fotografie vom 04.04.2017, pH-Wert Messergebnis der normalen Blumenerde



Anhang-Nr. 23

Fotografie vom 04.04.2017, pH-Wert Messergebnis des Gießwassers



Anhang-Nr. 24

Fotografie vom 06.03.2017, Teile des Versuchaufbaus



Erklärung über die eigenständige Erstellung der Arbeit

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Arbeit selbstständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Hilfsmittel verwendet habe.

Bad Salzdetfurth, den 05.05.2017

Anton Weise