



## **Precision AMF**

Bedarfsgerechte, teilflächenspezifische Anwendung mykorrhizierter Bodenhilfsstoffe zur Erhöhung der Ertragsstabilität im Feld anhand hochauflösender Bodenkartierungstechnologien

ABSCHLUSSBERICHT

PROJEKTLAUFZEIT: 5.02.2019 – 15.08.2022

FÖRDERKENNZEICHEN: EIP-2018-21

KOORDINATOR: INSTITUT FÜR PFLANZENKULTUR

[www.pflanzenkultur.de](http://www.pflanzenkultur.de)

# Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis .....</b>	<b>2</b>
<b>1 Kurzdarstellung (in Alltagssprache).....</b>	<b>5</b>
1.1 Ausgangssituation und Bedarf.....	5
1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung (Titel des Projektes max 150 Zeichen).....	5
1.3 Mitglieder der OG .....	5
1.4 Projektgebiet .....	5
1.5 Projektlaufzeit und Dauer .....	6
1.6 Budget (Gesamtvolumen und Fördervolumen).....	6
1.7 Ablauf des Verfahrens .....	7
1.8 Zusammenfassung der (erwarteten) Ergebnisse (in Deutsch und Englisch max 200 Wörter, 1200 Zeichen).....	8
<b>2 Eingehende Darstellung .....</b>	<b>9</b>
2.1 Verwendung der Zuwendung .....	9
2.1.1 <i>Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich durchgeführten und abgeschlossenen Teilschritte jeweils für ein OG-Mitglied und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit einer OG .....</i>	<i>9</i>
2.1.2 <i>Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen .....</i>	<i>13</i>
2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn .....	14
2.2.1 <i>Ausgangssituation + Aufgabenstellung .....</i>	<i>14</i>
2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf.....	15

2.3.1	<i>Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet (ggf. Beispiele wie die Zusammenarbeit sowohl organisatorisch als auch praktisch erfolgt ist)?</i>	15
2.3.2	<i>Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG</i>	15
2.3.3	<i>Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projektes vorgesehen?</i>	15
2.4	<i>Ergebnisse des Innovationsprojektes</i>	16
2.4.1	<i>Versuche 2019</i>	16
2.4.1.1	<i>V873 Kartoffel Topfversuch</i>	16
2.4.2	<i>Versuche 2020</i>	17
2.4.2.1	<i>V915 Körnermais Cordts</i>	17
2.4.2.2	<i>V916 Kartoffeln Trumann</i>	20
2.4.3	<i>Versuche 2021</i>	22
2.4.3.1	<i>V948 Kartoffeln Trumann</i>	22
2.4.3.2	<i>V949 Körnermais Cordts</i>	24
2.4.3.3	<i>V951 Kartoffel Topfversuch</i>	28
2.4.4	<i>Ergebnisse des IGZ</i>	31
2.4.4.1	<i>Kurzdarstellung der Ziele</i>	31
2.4.4.2	<i>Beschreibung der Ergebnisse</i>	32
2.4.4.3	<i>Schlussfolgerungen mit Bezug zur Zielstellung</i>	56
2.4.5	<i>Zielerreichung über die gesamte Projektlaufzeit</i>	58
2.4.5.1	<i>Körnermais</i>	58

2.4.5.2	Kartoffeln .....	59
2.4.6	<i>Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP Themen</i> .....	61
2.4.7	<i>Nebenergebnisse</i> .....	61
2.4.8	<i>Arbeiten, die zu keiner Lösung/zu keinem Ergebnis geführt haben</i> ..	61
2.4.9	<i>Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern</i> .....	62
2.5	Nutzen der Ergebnisse für die Praxis: Sind verwertbare/nutzbare Empfehlungen, Produkte, Verfahren oder Technologien entstanden .....	62
2.6	(Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse .....	64
2.7	Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit: Gibt es weitergehende (wissenschaftliche) Fragestellungen aus den Projektergebnissen, die zukünftig zu bearbeiten sind? .....	65
2.8	Kommunikations- und Disseminationskonzept: Darstellung in welcher Weise die Ergebnisse kommuniziert oder verbreitet wurden, ggf. mit Verweis auf Veröffentlichungen und Angaben von Quellen. Grundsätzliche Schlussfolgerungen (ggf. Fazit zur Eignung von EIPFörderung zur Generierung von Innovation und Schließung von Lücken zwischen Praxis und Wissenschaft) und eventuelle Vorschläge zur Weiterentwicklung von EIP Agri .....	67

# 1 Kurzdarstellung (in Alltagssprache)

## 1.1 Ausgangssituation und Bedarf

Ressourcenverknappung und neue Düngerichtlinien im Sinne einer nachhaltigen Landwirtschaft erfordern die Entwicklung neuer Verfahrensweisen im landwirtschaftlichen Nährstoffmanagement. Das System Boden als Grundlage des Pflanzenwachstums wird von den Landwirten wieder verstärkt in den Blick genommen. Die Bedeutung von Bodenleben und Erhaltung der Bodengesundheit steht dadurch zunehmend im Fokus der Praktiker.

## 1.2 Projektziel und konkrete Aufgabenstellung (Titel des Projektes max 150 Zeichen)

Bedarfsgerechte, teilflächenspezifische Anwendung mykorrhizierter Bodenhilfsstoffe zur Erhöhung der Ertragsstabilität im Feld anhand hochauflösender Bodenkartierungstechnologien (Precision-AMF)

## 1.3 Mitglieder der OG

Institut für Pflanzenkultur GmbH & Co. KG., Solkau Nr. 2, 29465 Schnega Dr.  
Carolin Schneider, schneider@pflanzenkultur.de

Leibniz-Institut für Gemüse und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V., Theodor-Echtermeyer-Weg 1, 14979 Großbeeren Mi-  
chael Bitterlich, bitterlich@igzev.de

Biolandhof Cordts, Molden Nr. 1, 29465 Schnega Mi-  
chael Cordts

Hof Trumann, Groß Gaddau Nr. 6; 29496 Waddeweitz  
Bernd Trumann

Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung e. V., Hauptstraße 6, 15366 Neuenhagen Dr. Jana  
Epperlein

## 1.4 Projektgebiet

29465 Schnega (Firmensitz Institut für Pflanzenkultur GmbH & Co. KG und des Landwirts M. Cordts)

29496 Waddeweitz

## **1.5 Projektlaufzeit und Dauer**

01.02.2019 – 15.8.2022

## **1.6 Budget (Gesamtvolumen und Fördervolumen)**

450.267,57€



## **1.8 Zusammenfassung der (erwarteten) Ergebnisse (in Deutsch und Englisch max 200 Wörter, 1200 Zeichen)**

Es wurde erwartet, dass durch die teilflächenspezifische Ausbringung von Arbuskulären Mykorrhizapilzen (AMF) die Erträge vor allem in den Bodenzonen mit geringer elektrischer Leitfähigkeit erhöht werden und dadurch ein gleichmäßigerer Ertrag über die gesamte Fläche zu erzielen ist. Durch den teilflächenspezifischen Einsatz der AMF soll der Einsatz generell wirtschaftlicher werden, da nur die Bodenzonen behandelt werden, in denen die AMF den größten Nutzen bringen. Voraussetzung dafür sind hochauflösende Bodentexturkarten und eine Ausbringungstechnik, die anhand dieser Karten die Applikation vornimmt. Als Kulturen wurden Körnermais sowie Kartoffeln ausgewählt, da bekannt ist, dass beide Kulturen eine intensive Symbiose mit Mykorrhiza eingehen. Zusätzlich wurden drei Bewirtschaftungsszenarien gewählt: konventionell, biologisch nach Bioland-Richtlinien sowie die Umstellungssituation von konventionell auf biologische Bewirtschaftung. Ziel dabei war es, heraus zu finden, ob eine bestimmte Bewirtschaftungsform fördernd oder hemmend wirkt.

It was expected that the site-specific application of AMF would increase yield, especially in soil zones with low electrical conductivity, and that a more even yield could be achieved over the entire area. The site-specific use of the AMF should generally make it more economical to use, since only those soil zones are treated in which the AMF bring the greatest benefit. The prerequisites for this are high-resolution soil texture maps and an application technique that uses these maps to carry out the application. Corn and potatoes were selected as crops, as it is known that both cultures form an intensive symbiosis with mycorrhiza. In addition, three management scenarios were selected: conventional, organic according to Bioland guidelines and the conversion situation from conventional to organic management. The aim was to find out whether a certain form of cultivation has a promoting or inhibiting effect.



## 2 Eingehende Darstellung

### 2.1 Verwendung der Zuwendung

#### 2.1.1 Gegenüberstellung der Planung im Geschäftsplan und der tatsächlich durchgeführten und abgeschlossenen Teilschritte jeweils für ein OG-Mitglied und die Aufgaben im Rahmen der laufenden Zusammenarbeit einer OG

	Planung im Geschäftsplan	
<b>OG-Mitglied IFP</b>	<p>AP3: Isolierung natürlicher Mykorrhiza aus heterogenen Teilflächen analog der Ergebnisse der Bodenuntersuchung mit Geophilus (AP6a) durch Fangpflanzenkulturen in Töpfen.</p> <p>Vermehrung der Mykorrhiza an verschiedenen Produktionspflanzen und Trägermaterialien.</p> <p>Identifizierung der Pilzarten über molekularbiologische Methoden und Untersuchung der Wirksamkeit verschiedener Induktoren (z.B. Glukose) in Topfversuchen im Gewächshaus.</p> <p>AP4: In Gewächshausversuchen werden die in AP3 ausgewählten Pilzstämme hinsichtlich ihrer Eignung bezogen auf die durch Geophilus in AP6a festgestellten Bodenunterschiede getestet. Dafür wird Feldboden in den Topfversuchen verwendet und spezifische Mykorrhizapilzpräparate produziert. Der Einfluss verschiedener Trägermaterialien und Formulierung wird untersucht.</p> <p>AP5: Wurzeluntersuchungen und Bonitierung der Versuchsergebnisse im Feld. Optimierung der Mykorrhizapräparate und Induktoren entsprechend der Ergebnisse. Die Optimierung der Applikationstechnik erfordert eine passgenaue Formulierung (Trägermaterial, Kapseln).</p>	Keine Abweichungen

<p><b>OG-Mitglied IGZ</b></p>	<p>AP6a: Die von den Landwirten identifizierten (AP1) und teils durch heterogenes Ertragsaufkommen charakterisierten Schläge werden kartiert und beprobt. Es werden Bodenproben entnommen und zur Kalibrierung im Labor die Textur, die Nährstoffverfügbarkeit und die organische Substanz analysiert. Nachfolgend werden während der Kultur Pflanzenproben genommen, deren Wachstum und Nährstoffaufnahme bilanziert und dies in Beziehung zu den räumlich variablen Bodenbedingungen gesetzt. Dies erfolgt unter Zuhilfenahme von geostatistischen und bildgebenden Kartierungsverfahren.</p> <p>AP6b: In enger Zusammenarbeit mit den Landwirten werden Teilflächen identifiziert, auf denen das Ertragsaufkommen aus Erfahrung unterschiedlich ist. Es wird Boden von Teilflächen genommen, die durch unterschiedliches Ertragsaufkommen gekennzeichnet sind und verwendet, um in vergleichenden Topfversuchen die Effizienz unterschiedlicher Mykorrhizapräparate (natürliche Mykorrhiza aus Zielpflanzenart versus Generalist) auf verschiedenen Böden getestet. Dies erfolgt an den Kulturen (Kartoffeln und Körnermais), die im Folgejahr auf den Feldern angebaut werden. In diesen Topfversuchen wird die Wachstumsantwort und Nährstoffaufnahme der Pflanzen auf die Mykorrhizagabe überprüft, und mit molekularbiologischen Methoden die Funktionalität der Symbiose (Mykorrhizaspezifische Expression der Nährstofftransporter in Pflanzen), sowie der Anwacherfolg des Mykorrhizapräparats nachgewiesen. Dafür wird RNA und DNA aus den Pflanzenwurzeln extrahiert. Zum Nachweis des Anwacherfolgs werden Präparat-spezifische Primer entwickelt, die den molekularen Nachweis der Mykorrhizapräparate in den Pflanzen ermöglicht und Wurzeln werden eingefärbt, um visuell die Wurzelbesiedelung durch Mykorrhiza zu quantifizieren. Mit quantitativer PCR wird die RNA-Akkumulation der mykorrhizaspezifischen Phosphattransportergene in den Wurzeln bestimmt.</p> <p>AP7: Durch die Topfversuche (AP6a) und die Erfassung der räumlichen Bodenheterogenität (AP6b) im Feld ist nun bekannt, welches Mykorrhizapräparat auf welchen Böden effektiv zu Pflanzenwachstum beiträgt, welches die beschreibenden Variablen der Bodenbedingungen sind und wo sie sich im Feld befinden. Anhand dessen können nun sinnvolle Feldversuche durchgeführt werden, die unter gleichen klimatischen Bedingungen (gleicher Schlag), aber durch unterschiedliche Bodeneigenschaften gekennzeichnet sind. Es werden Pflanzenbestände auf Teilflächen mit kontrastreichen</p>	<p>Texturkartierung der Kartoffelflächen konnte nicht durchgeführt werden, siehe Kap. 2.4.9</p>
-----------------------------------	---	---

	<p>bodenbürtigen Bedingungen inokuliert oder nicht und hinsichtlich Wachstum und Nährstoffaufnahme analysiert, sowie der Anwacherfolg und Effizienz der Mykorrhizapräparate qualitativ und quantitativ nachgewiesen (siehe AP6a). Es kann eine Kosten-Nutzenbilanz der Applikation von Mykorrhizapräparaten vorgenommen werden.</p> <p>AP8: Es wurde in AP6 und AP7 ein Verfahren etabliert, das Teilflächen und Bodenbedingungen identifiziert, auf denen die Applikation von Mykorrhiza am effektivsten zur Ertragsstabilität beitragen kann. Ist dies bekannt, wird im dritten Teil eine bedarfsgerechte Teilflächenapplikation vorgenommen und das Ertragsaufkommen sowie eine Gesamt-Kosten-Nutzenbilanz erstellt werden und zwar auf anderen, bisher nicht untersuchten Teilflächen. Dies überprüft das entwickelte Konzept und sichert dessen Vorhersagekraft. Im Zuge dessen, erfolgt der Nachweis der Mykorrhizierung, sowie die Effizienz der Nährstoffaufnahme und Wachstum analog zu AP6a.</p>	
<b>OG-Mitglied Cordts</b>	<p>AP1: Auswahl und Bereitstellung der Versuchsfelder zur Bodenuntersuchung durch Geophilus: Biolandhof Cordts/Molden (kontrolliert biologischer Anbau)</p> <p>AP2: Abstimmung und Einrichten der Maschinen zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Induktoren und Inokulum zur Versuchsanlage, Pflege der Versuchsfelder, Versuchsernte mit Erntebonitur.</p>	Keine Abweichungen
<b>OG-Mitglied Trumann</b>	<p>AP1: Auswahl und Bereitstellung der Versuchsfelder zur Bodenuntersuchung durch Geophilus: Hof Trumann/Gaddau (konventioneller Anbau)</p> <p>AP2: Abstimmung und Einrichten der Maschinen zur teilflächenspezifischen Ausbringung von Induktoren und Inokulum zur Versuchsanlage</p>	Keine Abweichungen
<b>OG-Mitglied GKB</b>	<p>AP9: Öffentlichkeitsarbeit: Für Precision-AMF wird die GKB die Ergebnisse bei Kartoffeln und Körnermais gemeinsam mit den OG Partnern (für Kartoffel Beratung Versuchsstation Dethlingen) aufarbeiten und bewerten, einen gemeinsamen</p>	Ohne Versuchsstation Dethlingen

	Fachartikel (deutsch) zusammenstellen und über das Netzwerk der GKB und ihre social media Kanäle verbreiten sowie am Projektende eine Informationsveranstaltung für interessierte Landwirte (Feldtag) organisieren. Alle Aktivitäten laufen schwerpunktmäßig für die Mitglieder, aber darüber hinaus auch für die interessierte Öffentlichkeit.	
<b>Laufende Zusammen- arbeit</b>	Koordination OG, Verwaltung, Abrechnung, Koordination Berichte, Expertise in Geschäftsführung	Keine Abweichungen

## 2.1.2 Darstellung der wichtigsten finanziellen Positionen

<b>Ausgaben Institut für Pflanzenkultur GmbH &amp; Co. KG</b>	
Personalausgaben	160.548,00
Reisekosten	108,11
Material und Bedarfsmittel	26.637,85
<b>Summe</b>	<b>187.293,96</b>
<b>Ausgaben Leibnitz-Institut für Gemüse- und Zierpflanzenbau Großbeeren/Erfurt e.V.</b>	
Personalausgaben	137.758,59
Reisekosten	620,56
Material und Bedarfsmittel	16.353,89
<b>Summe</b>	<b>154.733,04</b>
<b>Ausgaben Michael Cordts</b>	
Aufwandentschädigungen und Nutzungskosten bei Unternehmen der Urproduktion	24.000,00
<b>Summe</b>	<b>24.000,00</b>
<b>Ausgaben Bernd Trumann</b>	
Aufwandentschädigungen und Nutzungskosten bei Unternehmen der Urproduktion	11.993,00
<b>Summe</b>	<b>11.993,00</b>
<b>Ausgaben GKB</b>	
	10.200,00
<b>Summe</b>	10.200,00
<b>Ausgaben für die Zusammenarbeit</b>	
	<b>51.050,00</b>
15 % Verwaltungspauschale	7.657,50
<b>Summe</b>	<b>58.707,50</b>
<b>Gesamtsumme</b>	<b>446.927,50</b>

\* Auszahlungen 1. bis 6. inklusive Antrag Schlußzahlung

## 2.2 Detaillierte Erläuterung der Situation zu Projektbeginn

### 2.2.1 Ausgangssituation + Aufgabenstellung

Ausgangspunkt ist das Interesse (und die Notwendigkeit) der landwirtschaftlichen Praxis, pflanzenstärkende Mykorrhizapilze gezielt dort einzubringen, wo es die Bodenstruktur besonders erfordert. Das Projekt basiert zusätzlich auf einem Unternehmen der Vermarktung/Verarbeitung, welches die Projektkoordination übernommen hat. Alle genannten Unternehmen beteiligen sich als OG-Mitglied. Das Ziel ist, mittels GPS gesteuerter Sensorik (Bodenstrukturanalyse) ein Verfahren zu entwickeln, dass die teilflächendifferenzierte Ausbringung ermöglicht. Neue nach Bodentyp angepasste Mykorrhiza-Formulierungen werden entwickelt. In schwierigen Feldabschnitten wird dadurch gezielt und ökologisch nachhaltig Bodenleben, Pflanzengesundheit und Nährstoffaufnahme verbessert und damit Ertragsstabilität gesichert.

Im Rahmen des Projekts Precision-AMF geht es um **einen interaktiven Innovationsansatz: Stärkung der Innovationskraft durch das Kombinieren von Wissen (Einbindung von Wissenschaft und Landwirtschaft) einhergehend mit einer realitätsnahen Erarbeitung von Lösungsvorschlägen für die betriebliche Optimierung von Pflanzengesundheit und -düngung.** Durch die Einbindung weitere Akteure (OG-Mitglied Gesellschaft für konservierende Bodenbearbeitung) werden auch weitergehende gesellschaftliche Trends und Fragestellungen wie Wissensmanagement, Informationsvermittlung und Digitalisierung berücksichtigt.

## **2.3 Ergebnisse der OG in Bezug auf**

**2.3.1 Wie wurde die Zusammenarbeit im Einzelnen gestaltet (ggf. Beispiele wie die Zusammenarbeit sowohl organisatorisch als auch praktisch erfolgt ist)?**

**2.3.2 Was war der besondere Mehrwert bei der Durchführung des Projekts als OG**

**2.3.3 Ist eine weitere Zusammenarbeit der Mitglieder der OG nach Abschluss des geförderten Projektes vorgesehen?**

Es erfolgten im Projekt insgesamt vier Projekttreffen der OG, im Wechsel beim IFP oder beim IGZ, die letzten beiden coronabedingt online. Die Treffen wurden allen OG-Mitgliedern rechtzeitig angekündigt, es erfolgte eine Einladung mit Tagesordnung sowie nach dem Treffen ein Protokoll mit offenen Punkten, verantwortlichen Personen und Terminen. Auf jedem Treffen wurde der Stand aller Arbeitspakete jedes OG-Mitglieds in Vorträgen vorgestellt sowie bei Bedarf offene Fragen im Detail abgestimmt.

Die Kommunikation für die Zusammenarbeit der OG lief stets sachlich, offen und ohne Konflikte. Dazu mag auch die Erfahrung des IFP als Projektkoordinator beigetragen haben sowie die Tatsache, daß teilweise zwischen den OG-Mitgliedern bereits vor Projektbeginn gute Beziehungen bestanden (IFP-IGZ, IFP-Cordts, Cordts-Trumann).

Ein besonderer Mehrwert dieser Projektkonstellation ist sicherlich die enge Zusammenarbeit mit den landwirtschaftlichen Betrieben. Idealerweise erfolgt so eine direkte Kommunikation zwischen dem Koordinator, den Wissenschaftlern und den landwirtschaftlichen Betriebsleitern. Dies bringt für alle Beteiligten Vorteile, da Fehlentwicklungen vermieden werden, bzw. Lösungen passgenau auf die Bedürfnisse der Praxis zugeschnitten werden können. Dies erscheint auch im Rückblick ideal. Einzig ist manchmal die Möglichkeit der Landwirte, einen ganzen Tag z.B. für ein Projekttreffen einzusetzen, zu bestimmten Arbeitsspitzenzeiten begrenzt. Dem wurde durch gute und flexible Terminabsprachen entgegengewirkt, bzw. wann immer möglich die Treffen in die räumliche Nähe der beiden landwirtschaftlichen OG-Mitglieder gelegt.

Eine weitere Zusammenarbeit ist geplant und bereits begonnen, vier der fünf OG-Mitglieder (IFP, Cordts, Trumann, GKB; IGZ passte rein thematisch nicht) arbeiten im neuen EIP Agri-Projekt BioSeed seit 12.02.2020 zusammen. IFP und Micha Bitterlich erarbeiten zudem gerade eine Projektidee im Bereich Wasser- und Nährstoffnutzungseffizienz.

## **2.4 Ergebnisse des Innovationsprojektes**

### **2.4.1 Versuche 2019**

#### ***2.4.1.1 V873 Kartoffel Topfversuch***

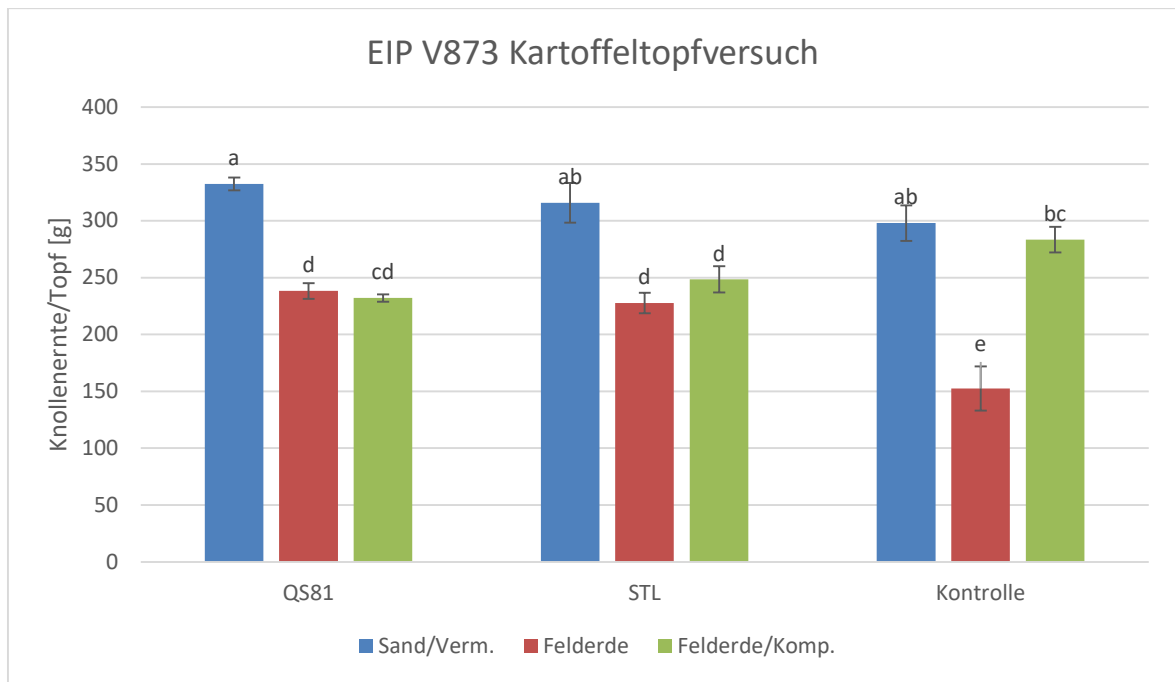
##### **Material und Methoden**

Ziel des Topfversuches war es, die Fähigkeit von zwei ausgewählten Mykorrhizastämmen zu testen, Kartoffelpflanzen unter verschiedenen Bedingungen zu mykorrhizieren. Der Versuch dient vor allem dazu, die Vitalität des an Kartoffeln im Feld neu isolierten natürlichen Stamms *Rhizophagus irregularis* STL im Vergleich zum in der Anwendung bewährten Stamm *Rhizophagus irregularis* QS81 zu untersuchen. Versuchspflanze ist die Kartoffelsorte Wega. Wega ist z. Zt. eine bedeutende Sorte im Anbau von Speisekartoffeln und ist deshalb als Versuchssorte für die Feldversuche in den kommenden Jahren eingeplant.

Nach statistischer Auswertung lassen sich folgende Schlussfolgerungen bezogen auf eine Mykorrhizawirkung ziehen:

1. Positive Ertragswirkung in Felderde, beide Mykorrhizastämme erhöhen den Knolenertrag/Pflanze signifikant.
2. Kein signifikanter Ertragsunterschied zwischen beiden getesteten Mykorrhizastämmen





**Abbildung 1: Knollenertrag im Topfversuch mit zwei Pilzstämmen.**

## 2.4.2 Versuche 2020

### 2.4.2.1 V915 Körnermais Cordts

#### Material und Methoden

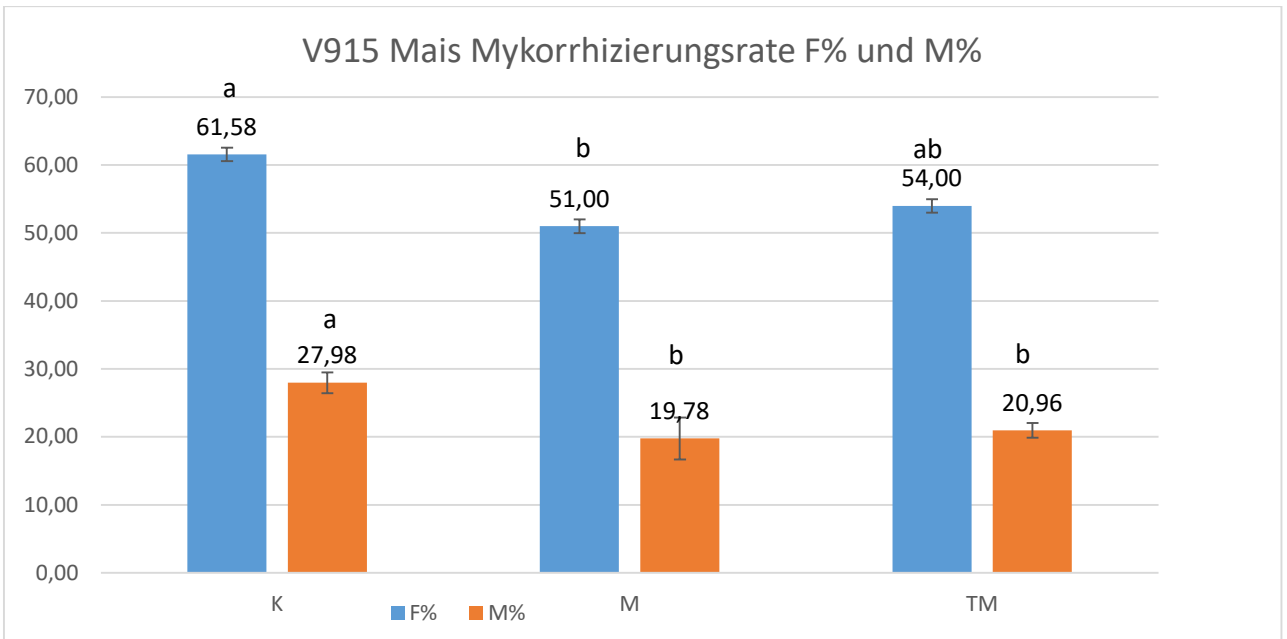
Die Vorfrucht auf dem Versuchsfeld war „Landsberger Gemenge“. Nach dem letzten Schnitt wurde die Fläche gepflügt und anschließend sofort der Mais gesät. Insgesamt vergingen zwischen letztem Schnitt und Aussaat weniger als eine Woche. Die Aussaat erfolgte am 11.05.2020 mit einer Amazone ED 6000-2 (50 cm Reihenabstand) und Mikrogranulatstreuer. Die Aussaatstärke erfolgte standortüblich mit 90.000 Körner/ha. Die Sorte Amavit Öko ist in der frühen Reifegruppe für die Silo- und Körnermaisnutzung mit S/K 210 eingestuft. Die organische Düngung erfolgte über Champost, Kompost und Fruchtwasser. Die gesamte zugeführte Nährstoffmenge beträgt 28 kg N/ha, 15,2 kg P/ha 43 kg K/ha und 15 kg Mg/ha. In der Vegetationszeit wurden drei Zusatzwassergaben von insgesamt 80 mm gegeben.

Das verwendete Inokulum umfasste 218.252.427 MU/kg, was 625 MU/Saatkorn oder 56.221.825 MU/ha entspricht. Ausgebracht wurde das Inokulum mit 17,4 kg/ha Blähton als Trägermaterial.

Abbildung 2 zeigt das Versuchslayout in Streifen mit 4 Wiederholungen. Abbildung 3 zeigt, wie gut die Wurzel in den drei Versuchsvarianten mit Mykorrhiza besiedelt wurden. Es zeigt sich, dass die Kontrolle die intensivste und häufigste Mykorrhizierung aufwies. Das spricht für eine starke native Mykorrhizapopulation im Boden.

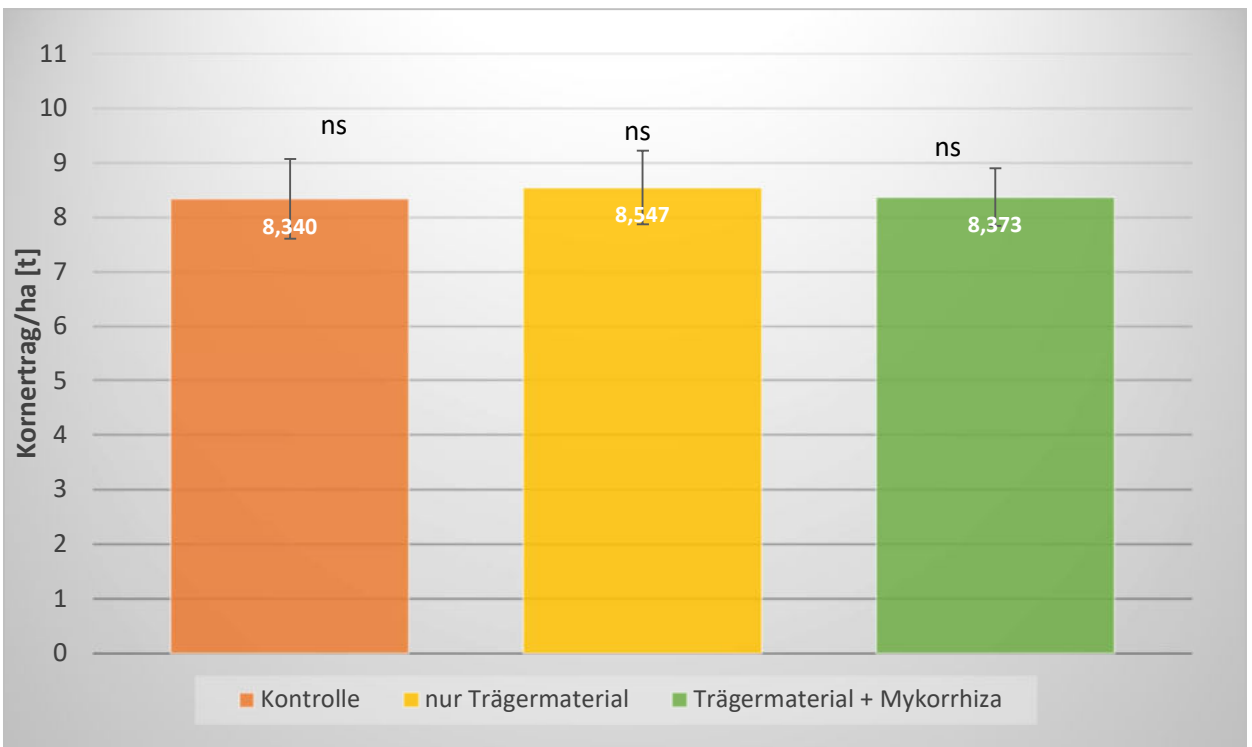


**Abbildung 2: Versuchslayout V915, Rot=TM+AMF (M), grün=Kontrolle (K), blau= nur Trägermaterial (TM)**



**Abbildung 3: Mykorrhizierung (K=Kontrolle, M=Mykorrhiza, TM=nur Trägermaterial).**

Abbildung 4 zeigt die Ertragsergebnisse aus dem Versuchsjahr 2020. Die Erträge liegen zwischen 8,34 t/ha und 8,54 t/ha. In der statistischen Auswertung zeigten sich keine signifikanten Unterschiede durch die Behandlung.

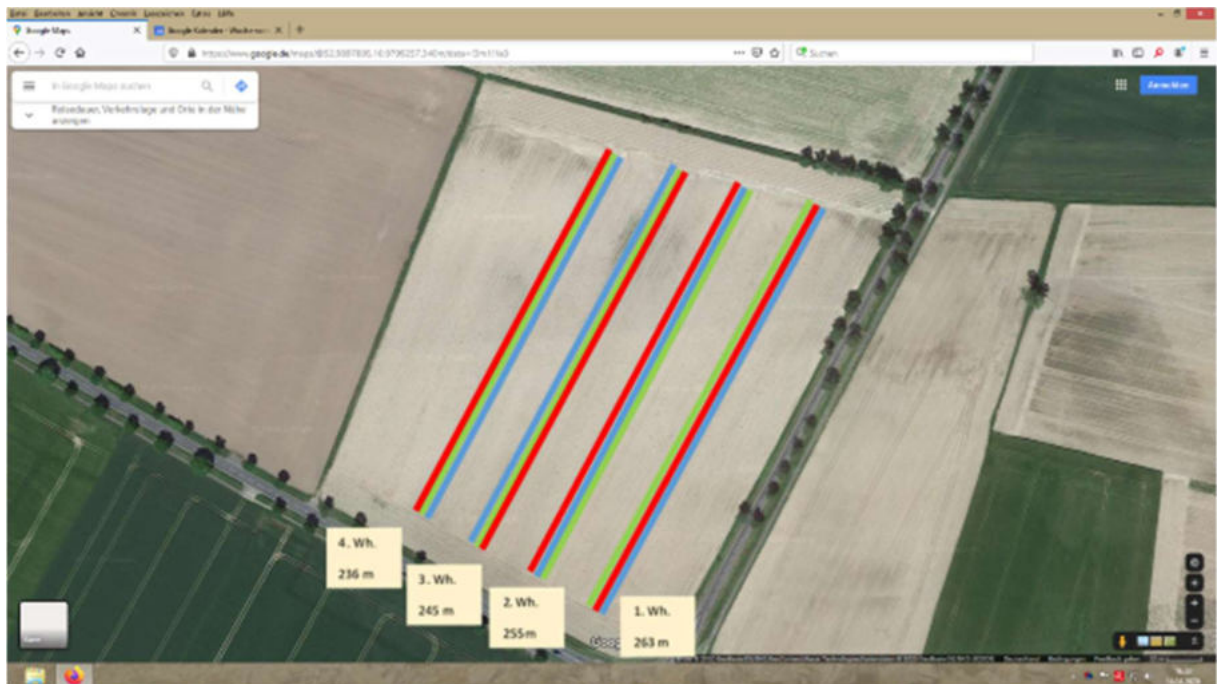


**Abbildung 4: Erträge des Körnermaisversuches**

## 2.4.2.2 V916 Kartoffeln Trumann

### Material und Methoden

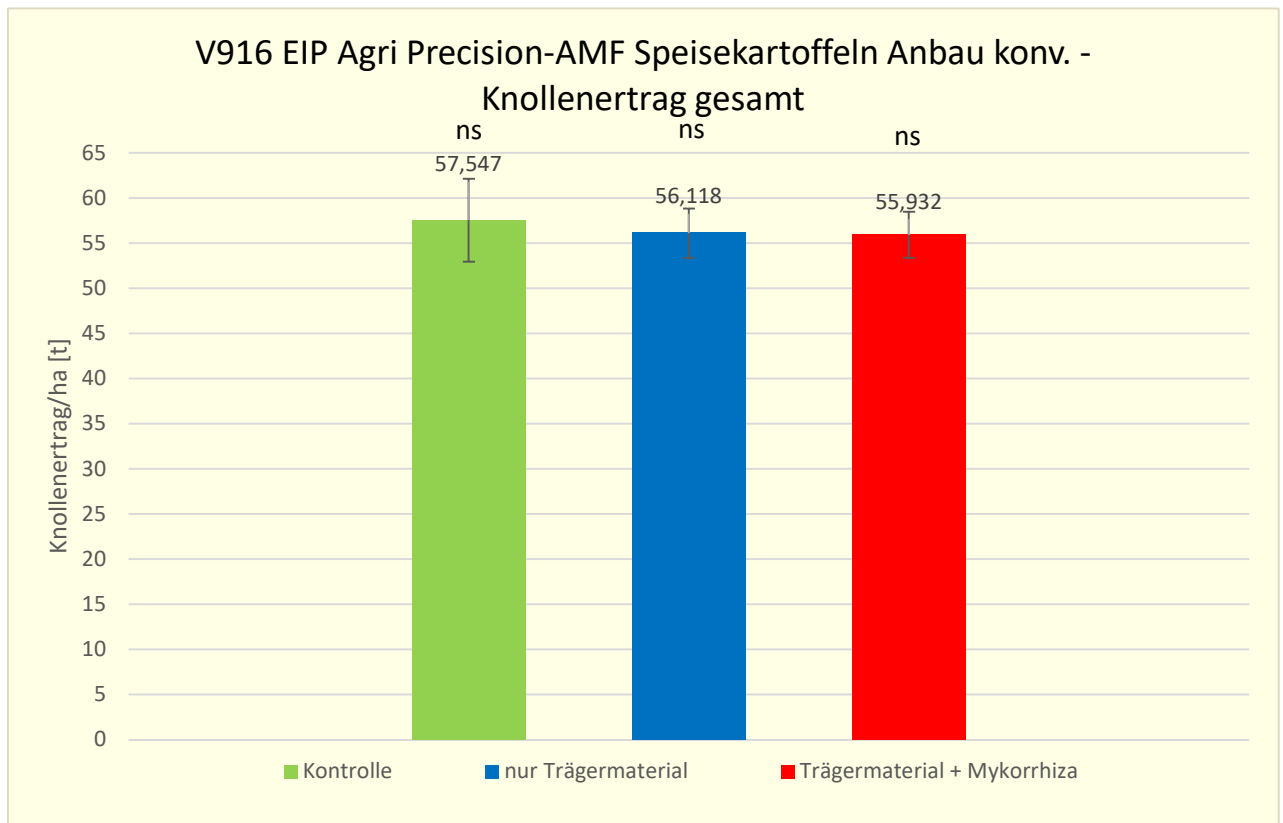
Der Versuch V916 wurde auf einem Feld von Bernd Trumann unter konventionellen Bedingungen durchgeführt. Die Kartoffelpflanzung fand am 24.4.20 statt. Gepflanzt wurden 45.000 Knollen/ha der Sorte Wega in 90 cm Reihenabstand, d.h. ein theoretischer Legeabstand von 34 cm. Die mineralische Düngung erfolgte durch 1,4 dt/ha 40er Kornkali (40 %  $K_2O$ ; Kaliumchlorid) und 480 kg/ha Alzon S flüssig (=369l/ha, 25 % Gesamt-N; 6 % wasserlöslicher Schwefel). Die damit ausgebrachten 120 kg N/ha setzen sich aus 53 kg Urea (doppelt stabilisiert), 43 kg Ammonium und 24 kg Nitrat zusammen.



**Abbildung 5: Versuchslayout mit 4 Wiederholungen. Rot=Trägermaterial+AMF, Grün=Kontrolle, blau=Nur Trägermaterial.**

Die Qualität des Inokulum ist wie in Kapitel 2.4.2.1, jedoch in einer höheren Konzentration von 62.507.495 MU/ha bzw. 1389 MU/Knolle. Die Blähtonaufwandmenge ist in diesem Versuch 19,7 kg/ha. Die Dosierung erfolgte über einen Mikrogranulatstreuer mit zwei Abgängen. In jeder der zwei Pflanzfurchen wurde das Material direkt an die Knollen gelegt und anschließend von der Maschine mit Erde bedeckt.

Zur Behandlung von *Phytophthora infestans* wurden die fungiziden Wirkstoffe Propanocarb, Fluopicolid (Präparat Infinito), Mandipropamid & Difenoconazole (Präparat Revus Top), Metalaxyl M und Mancozeb (Präparat Ridomil Gold MZ) im Rahmen der guten fachlichen Praxis eingesetzt (Unterstrichene lt. Literatur kompatibel mit Mykorrhiza, *kursiv nicht getestet*).



**Abbildung 6: V916 Knollenertrag gesamt.**

Die Ertragsergebnisse in Abbildung 6 zeigen keine signifikanten Unterschiede im Ertrag in t/ha; ebenso hatte die Mykorrhizabehandlung bzw. das reine Trägermaterial keinen signifikanten Einfluss auf die Sortierung der Knollen (im Zwischenbericht gezeigt). Das Ergebnis ist nach den Ergebnissen der Wurzelanalysen nachvollziehbar, da in keiner Variante Mykorrhiza nachgewiesen werden konnte (im Zwischenbericht gezeigt). Aufgrund der nicht vorhandenen Mykorrhizierung in den Versuchspartellen wurde Feldboden entnommen, um in einem Gefäßversuch den Grund für die geringe Mykorrhizierung herauszufinden (siehe Kap. 2.4.3.3).

## 2.4.3 Versuche 2021

### 2.4.3.1 V948 Kartoffeln Trumann



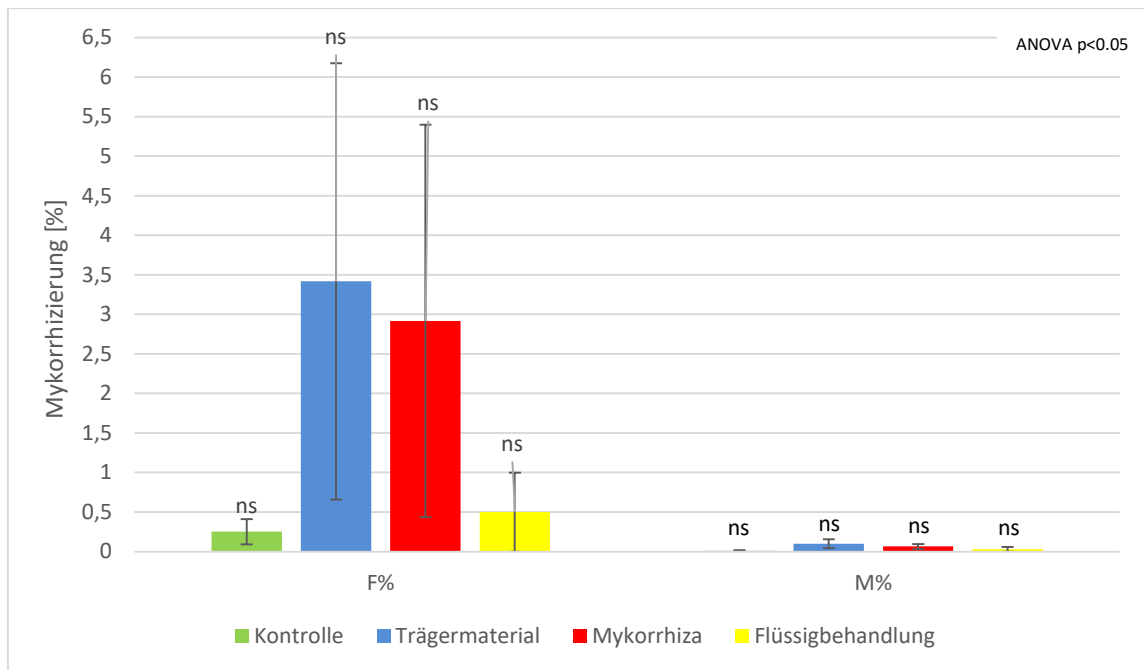
**Abbildung 7: Versuchslayout V948 Kartoffeln. K:Kontrolle (grün), TM: Trägermaterial (blau), M: Mykorrhiza (rot), gelb: Flüssige Anwendung auf Knolle, orange: neu entwickelte Pellets.**

#### Material und Methoden

Die Aussaat der Versuches fand am 28.04.21 statt. Die Pflanzgutmenge, Sorte, Düngung und Pflanzenschutz ist identisch zum Versuch V916 in Kapitel 2.4.2.2.

Das ausgebrachte Inokulum in der Bodenbehandlungsvariante (rot) wurde mit 1.804 MU/Knolle dosiert, in der Flüssigbehandlung als Suspension in Wasser mit 1.818 MU/Knolle.

Problematisch gestaltete sich die Ausbringung des Trägermaterials Blähton. Es war nicht ausreichend rieselfähig. So konnte der eingesetzte mechanische Mikrogranulatstreuer den Blähton nicht gut dosieren und es bildeten sich Brücken über der Dosierwalze. Die Variante mit den Pellets konnte nicht angelegt werden, da die Pellets zu groß für das Dosierorgan des Mikrogranulatstreuers waren.

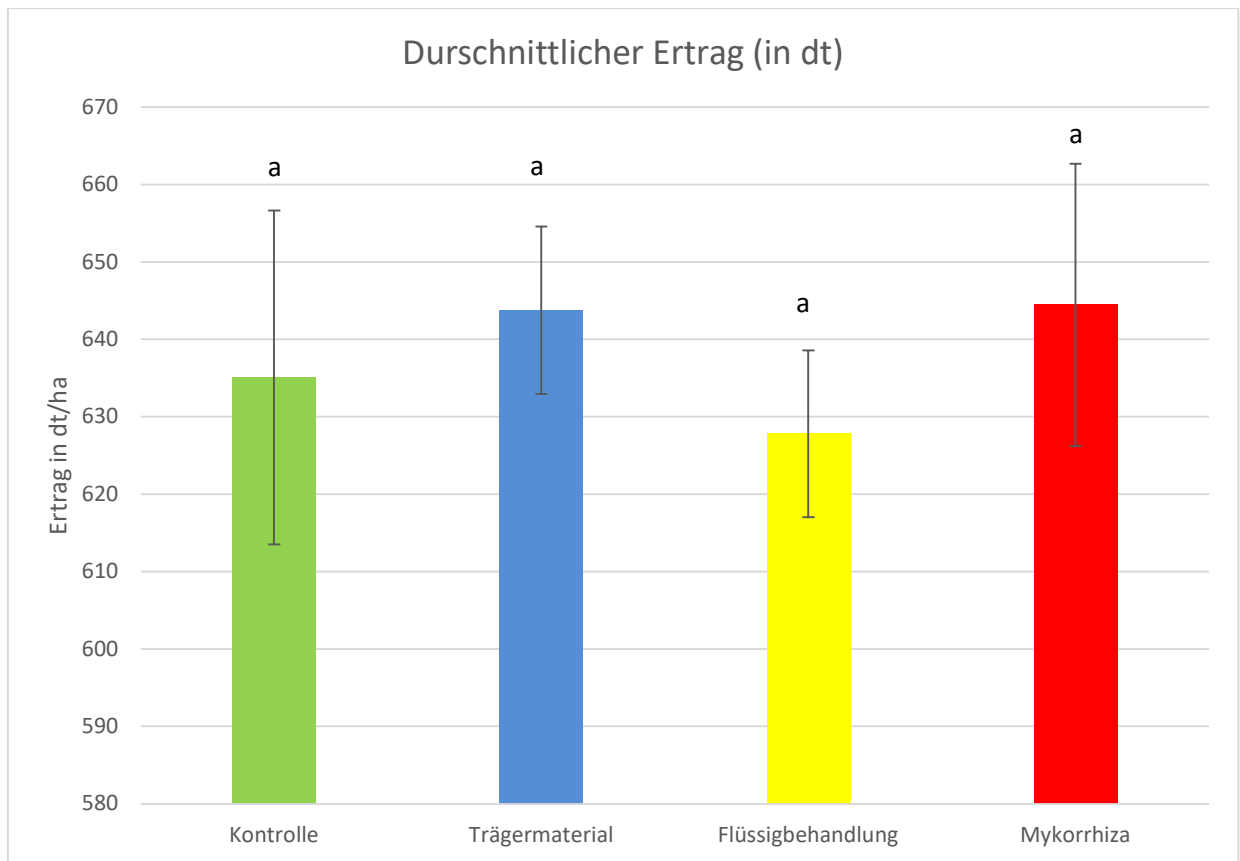


**Abbildung 8: V948 Mykorrhizierung von Kartoffelpflanzen mit den verschiedenen Behandlungen.**

Abbildung 8 zeigt die Ergebnisse der Wurzelanalysen. Die beiden Varianten mit Trägermaterial und Mykorrhiza haben ein leicht erhöhtes Niveau der Wurzelbesiedelung, jedoch viel zu gering um einen Effekt zu erwarten. Ebenso hat die Flüssigbehandlung keine Auswirkung auf den Besiedelungsgrad. Es gibt zwischen der Kontrolle und den anderen Testgliedern keine signifikanten Unterschiede.

Abbildung 9 zeigt die Ertragsergebnisse der einzelnen Versuchspartellen in dt/ha. Es gibt keine signifikanten Unterschiede im Ertrag zwischen den Versuchsgliedern. Auffällig ist, dass die vierte Wiederholung einen deutlich höheren Ertrag hat, als die anderen (Bodeneffekte). Nach dem zu geringen Besiedelungsgrad der Wurzeln ist das Ergebnis nicht überraschend. Die Versuchsglieder wiesen keine Unterschiede in den Größensortierungen auf (im Zwischenbericht gezeigt).





**Abbildung 9: V948 Knollenertrag in dt/ha nach verschiedenen Mykorrhiza-Behandlungen.**

#### **2.4.3.2 V949 Körnermais Cordts**

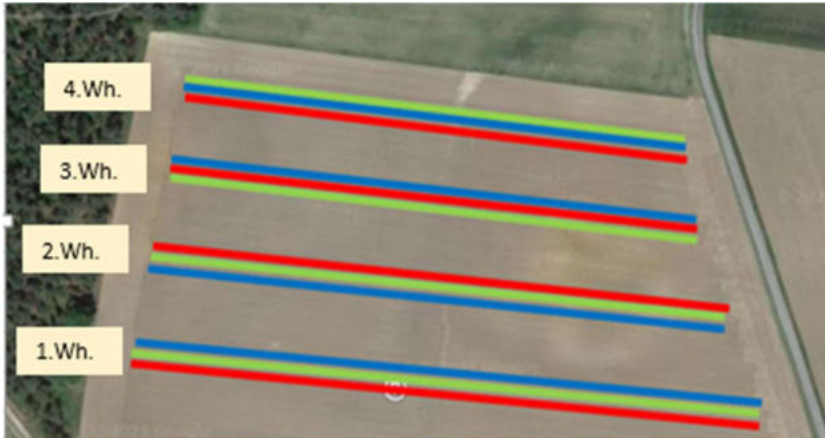
##### **Material und Methoden**

Der Versuch V949 fand unter den Richtlinien des Bioland-Verbandes statt. Die Maissorte ‚Kwinns Öko‘ wurde mit 90.000 Körner/ha am 10.05.21 ausgesät. Die Düngung erfolgte wie im Kapitel 2.4.2.1 beschrieben. Das Versuchslayout ist in drei Streifen mit je 4 Wiederholungen eingeteilt (siehe Abbildung 10).

Das eingesetzte Inokulum wurde mit 1.058 MU/Saatkorn angewendet. Für die Dosierung wurden 15 kg/ha Blähton als Trägermaterial eingesetzt. Die verwendete Amazone Einzelkornsämaschine ist mit einem pneumatischen Mikrogranulatstreuer

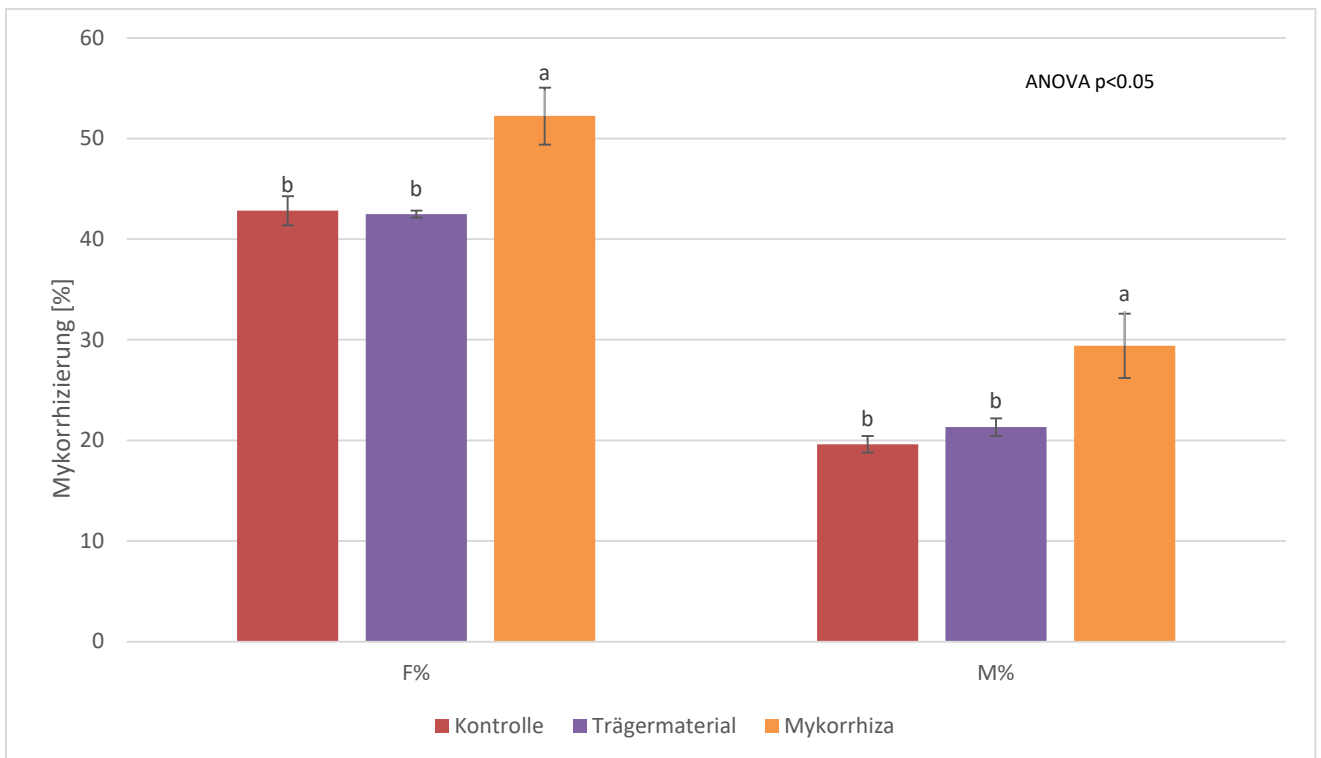


ausgestattet. Nach sehr zögerlicher Entwicklung im Frühjahr durch geringe Nachttemperaturen erfolgte eine Bonitur der aufgelaufenen Pflanzen. Von ausgesäten 9 Körnern/m<sup>2</sup> sind 7,4 Körner/m<sup>2</sup> aufgelaufen.

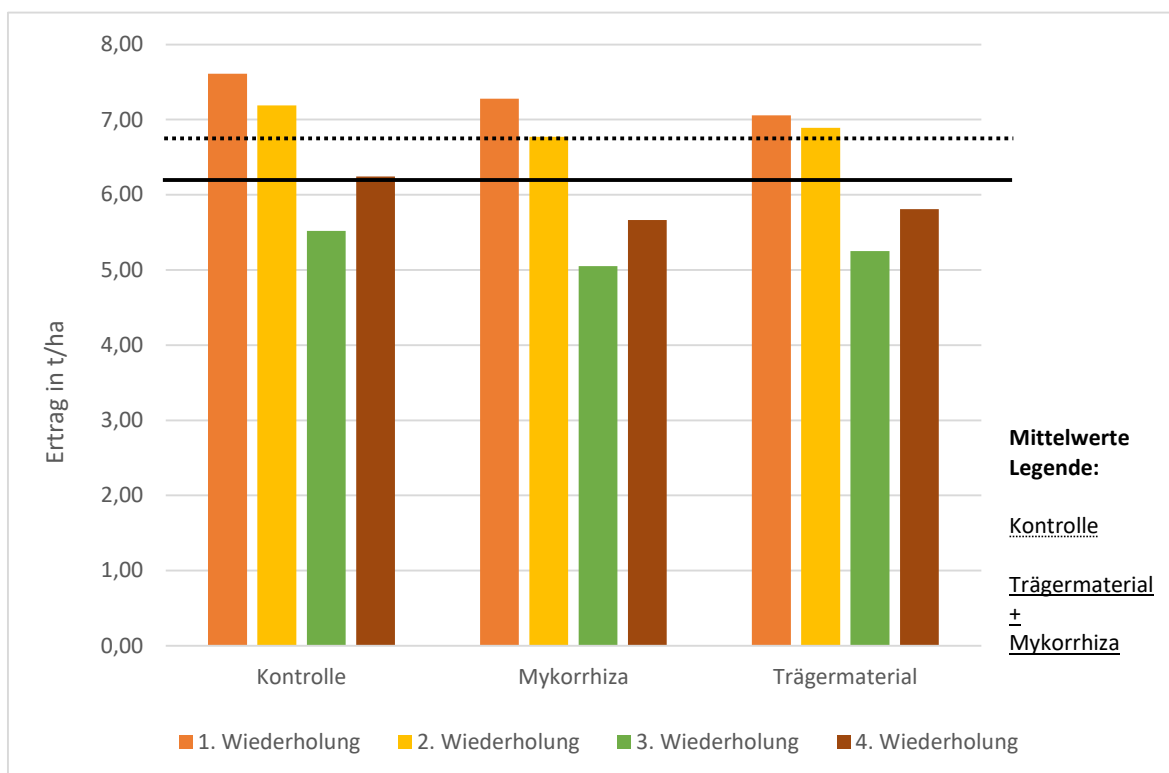


**Abbildung 10: Versuchslayout. AMF+Trägermaterial=rot, Trägermaterial=grün, Kontrolle=grün.**

Abbildung 11 zeigt die Ergebnisse der Wurzelbesiedelung. Auffällig ist die hohe Mykorrhizierung in der Kontrolle. Die Variante mit Mykorrhizabehandlung hat dennoch eine signifikant höhere Wurzelbesiedelung.



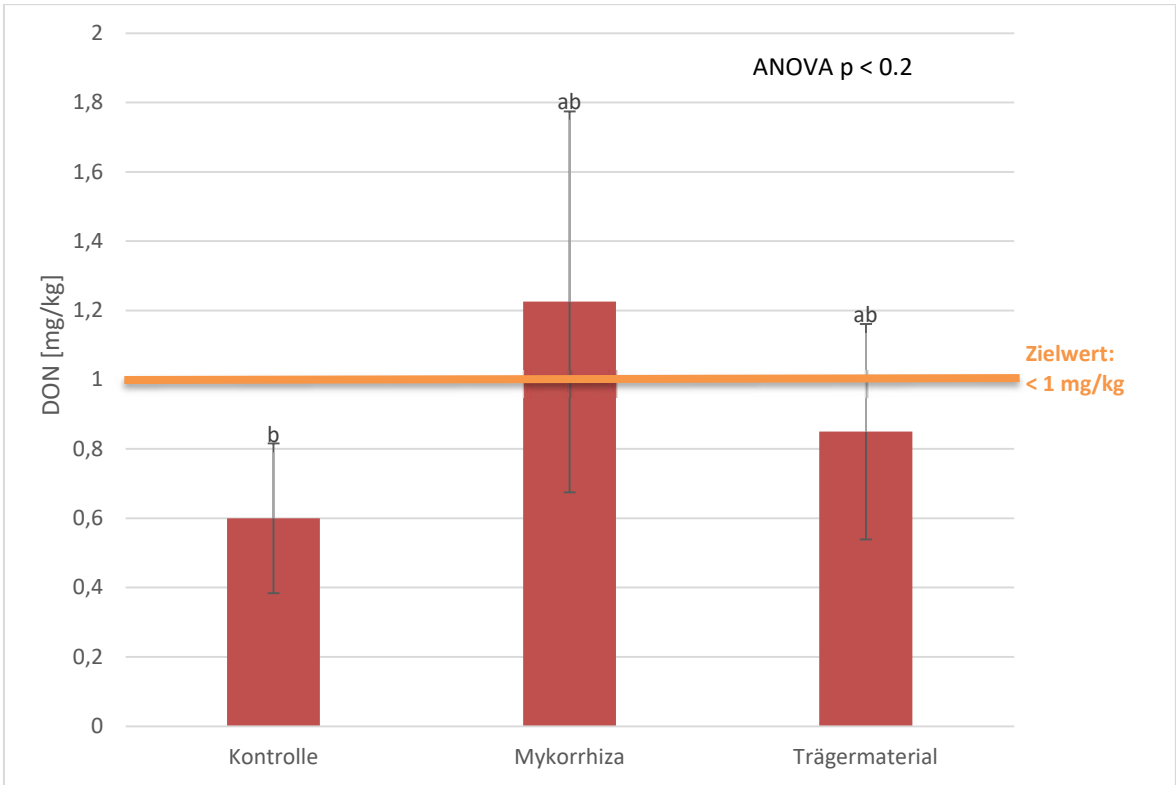
**Abbildung 11: Ergebnisse der Wurzelanalyse nach verschiedenen Mykorrhiza-Behandlungen.**



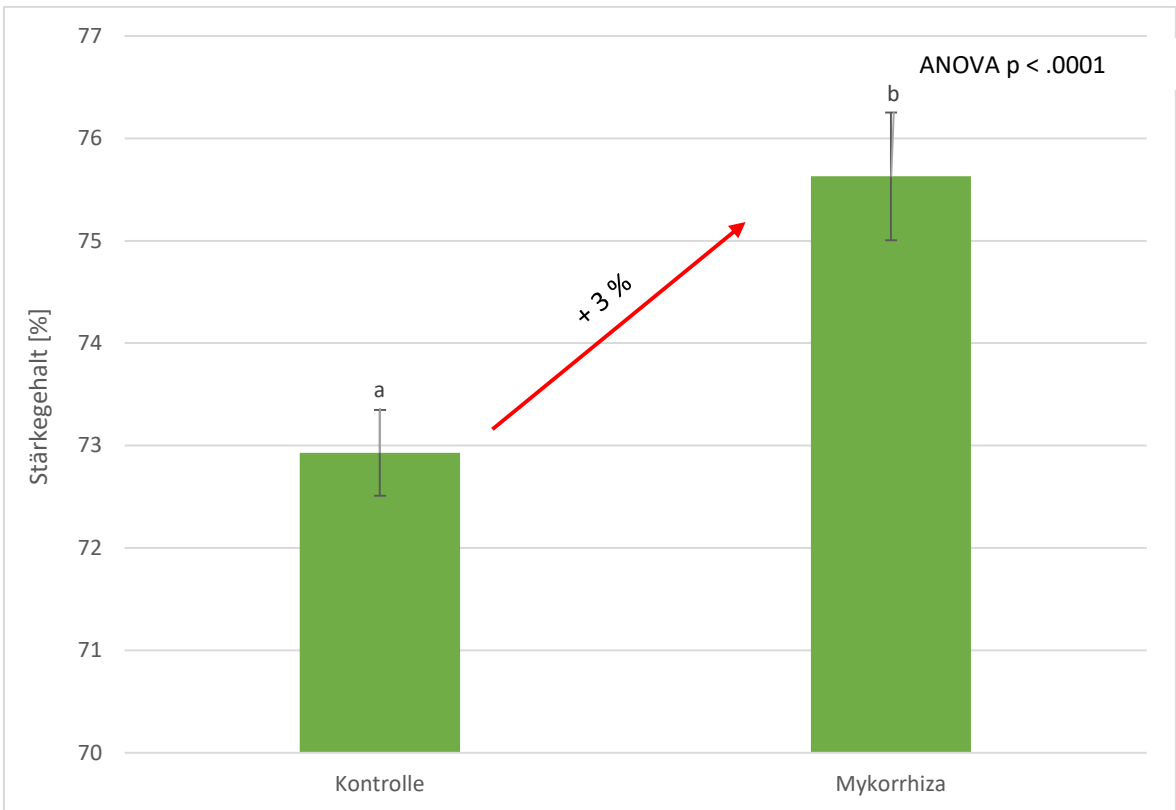
**Abbildung 12: Ertragsergebnisse mit den drei Versuchsgliedern und vier Wiederholungen.**

Die Ergebnisse zeigen keine signifikanten Ertragsunterschiede. In Verbindung mit der hohen Besiedelung der Kontrollparzelle ist die Vermutung, dass die native Mykorrhiza einen starken Effekt hat, den die eingebrachte Mykorrhiza nicht überbieten kann.

Abbildung 13 zeigt die Mykotoxingehalte in mg/kg. Auffällig ist, dass die Varianten mit der ausgebrachten Mykorrhiza einen signifikant höheren DON-Gehalt haben als die Kontrollvariante bzw. die Variante mit nur Trägermaterial. Im Gegenzug enthielten die Proben aus den Parzellen mit Mykorrhiza signifikant mehr Stärke (75,6 %) als die Parzellen ohne (72,9 %), siehe Abbildung 14.



**Abbildung 13: DON - Gehalte der Versuchsglieder.**



**Abbildung 14: Stärkegehalt der Versuchsglieder.**

### **2.4.3.3 V951 Kartoffel Topfversuch**

#### **Material und Methoden**

Ein Gewächshausversuch wurde am 15.05.2021 aufgebaut. Dazu wurden Gefäße mit 2 Litern Fassungsvermögen mit Felderde vom Feld von Hof Trumann gefüllt. Die Felderde wurde nicht sterilisiert. Die Bodenanalyse ergab die pflanzenverfügbaren Mengen der Nährstoffe auf: P: 41 ppm, K:99 ppm, Mg: 32 ppm, Gesamt-N: 0,08%, Corg: 0,78 %; C/N:-Verhältnis: 10, Humusgehalt 1,3 %, pH-Wert 5,1%. Das Inokulum enthielt 259.000.000 MU/kg und wurde als Pellet auf Tonbasis verwendet. Für die Düngung der Gefäße wurde die Hoagland-Lösung in den folgenden Varianten eingesetzt.

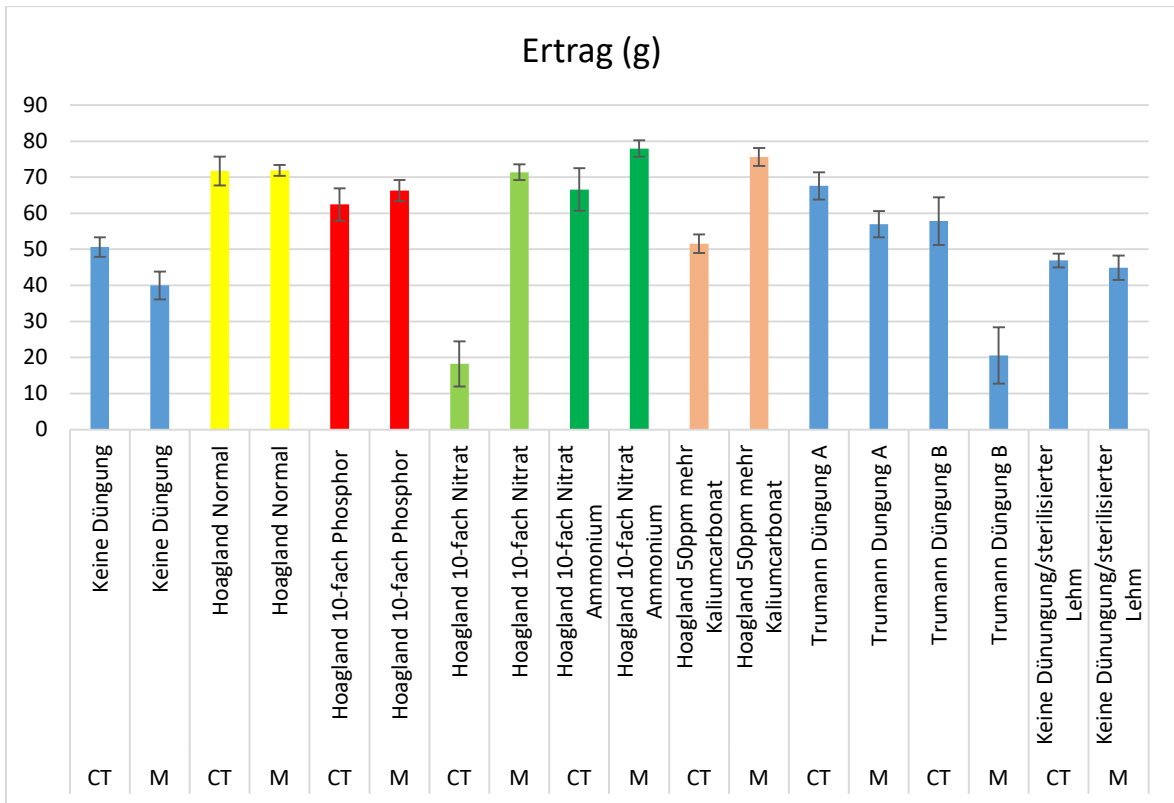
Nach 62 Tagen (19.07.2021) werden die Pflanzen geerntet und mehrere phänotypische Pflanzen- und Pilzparameter bewertet: Kartoffelertrag (Frischgewicht) und Parameter der Mykorrhiza. Die Mykorrhiza-Wachstumsreaktion (MGR) wird für den Kartoffelertrag gemäß der folgenden Formel berechnet:  $[100 * ((M - NM) / M)]$ , ausgedrückt als Prozentsatz.

1. NM + Hoagland standard, 160 ml pro Gefäß und Woche
2. Pellet + Hoagland standard, 160 ml pro Gefäß und Woche
3. NM + Hoagland mit 10-fach mehr Phosphat (als  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), 160 ml pro Gefäß und Woche
4. Pellet + Hoagland mit 10-fach mehr Phosphat (als  $\text{KH}_2\text{PO}_4$ ), 160 ml pro Gefäß und Woche
5. NM + Hoagland mit 10-fach mehr Ammonium-Nitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -), 160 ml pro Gefäß und Woche
6. PelletM; + Hoagland mit 10-fach mehr Ammonium-Nitrat ( $\text{NH}_4\text{NO}_3$ -), 160 ml pro Gefäß und Woche
7. NM + Hoagland mit 10-fach mehr Nitrat (als  $\text{Ca}(\text{NO}_3)$ -), 160 ml pro Gefäß und Woche
8. Pellet + Hoagland mit 10-fach mehr Nitrat (als  $\text{Ca}(\text{NO}_3)$ -), 160 ml pro Gefäß und Woche

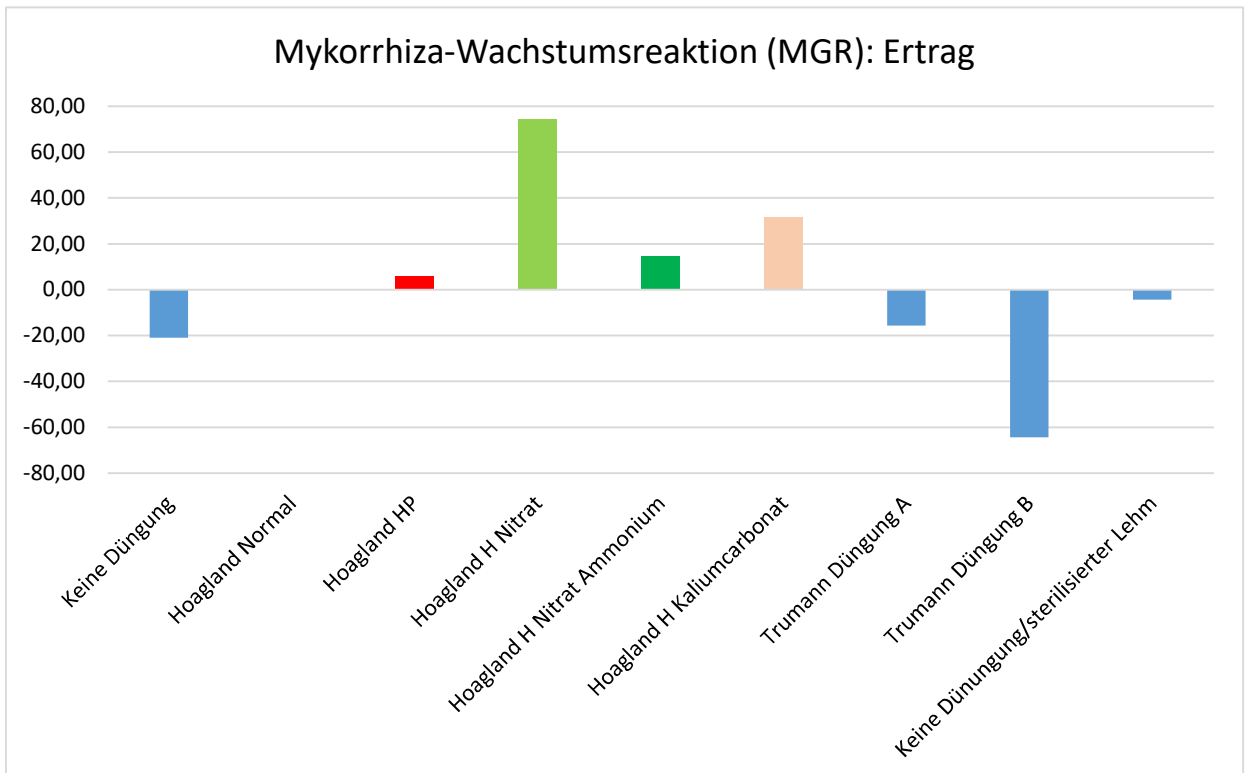
9. NM + Hoagland mit 50 ppm mehr Kalium (als  $\text{KHCO}_3$ ) 160 ml pro Gefäß und Woche
10. Pellet + Hoagland mit 50 ppm mehr Kalium (als  $\text{KHCO}_3$ ) 160 ml pro Gefäß und Woche

Die Ergebnisse zeigen, dass das Vorhandensein von Mykorrhiza in Abhängigkeit von der Nährstoffversorgung unterschiedliche Wirkung auf den Ertrag haben kann. In den Varianten *keine Düngung* und *Trumann Düngung mit KAS* bzw. *Alzon flüssig* ist eine Depression des Ertrages bei Zusatz von Mykorrhiza zu sehen – jeweils um etwa 10 g bzw. bei der letzten Variante sogar um etwa 35 g. Bei den Varianten *Hoagland Normal*, *Hoagland 10-fach mehr Phosphor* und *keine Düngung + sterilisierter Ton* blieben die Erträge auf einem etwa gleichbleibenden Niveau von 71 g bzw. 65 g sowie 45 g. Steigende Erträge durch das Einbringen von Mykorrhiza konnte in folgenden Varianten festgestellt werden: *Hoagland 10-fach mehr Nitrat*, *Hoagland 10-fach mehr Ammonium* und *Hoagland 50 ppm mehr Kalium*. Hierbei stiegen die Erträge um etwa 50 g bzw. 10 g sowie 25 g. Bei diesen Varianten konnten die höchsten Erträge des Versuchs festgestellt werden. Diese lagen im Mittel bei 75 g in den Varianten mit Mykorrhiza. Alle Hoagland-Varianten zeigen im Vergleich die höheren Erträge. Ein Ausreißer stellt hierbei die Variante *Hoagland 10-fach mehr Nitrat ohne Mykorrhiza* dar. Diese Variante zeigt mit *Trumann Düngung Alzon flüssig* (Trumann A) mit Mykorrhiza die niedrigsten Erträge mit etwa 19 g dar.

Die Mykorrhiza-Wachstumsreaktion (MGR) war dagegen bei der Variante *Hoagland 10-fach mehr Nitrat* mit einem Wert von etwa 70 % am höchsten (siehe Abbildung 16). Negative Werte zeigen die Varianten *keine Düngung*, *Trumann Düngung (B)* mit KAS bzw. *Alzon flüssig (A)* sowie *keine Düngung + sterilisierter Ton*.



**Abbildung 15: Topfversuch zur optimalen Düngung von Kartoffelpflanzen mit Förderung der Entwicklung von Mykorrhiza im Wurzelsystem. Kartoffelerträge in g**



**Abbildung 16: Mycorrhizal growth response(MGR), Kontrolle = 100 %**

## **2.4.4 Ergebnisse des IGZ**

### **2.4.4.1 Kurzdarstellung der Ziele**

Arbuskuläre Mykorrhizapilze (AMF) sind natürliche ‚Mitglieder‘ des Mikrobioms von Pflanzen und gesunden Böden. Die Grundlagenforschung der letzten Jahre zeigte, dass AMF essentiell für die Pflanzennährstoffaufnahme (Stickstoff und Phosphor) unter Nährstoffmangelbedingungen sind und wichtige Agenzien zur Bildung von gesunder Bodenstruktur, sowie für den Eintrag von organischem Kohlenstoff in Böden darstellen. Durch eine Reihe bekannter Mechanismen fördern AMF so die Ressourcennutzungseffizienz von Pflanzen. Vor dem Hintergrund verschärfter Düngeregulierungen, durch konventionelle Landwirtschaft getriebene Umweltbelastungen, sowie dem Klimawandel rückten AMF als Biostimulanzien zunehmend in den Fokus von Anwendern in der Landwirtschaft, um ähnlich wie stickstofffixierende Bakterien im Leguminosenanbau, die erforderliche ökologische Intensivierung der landwirtschaftlichen Praxis zu ermöglichen. Hier schloss das Projekt ‚Precision-AMF‘ an.

Übergeordnetes Ziel des Projektes war es, Verfahren zu entwickeln, die räumliche Heterogenität des Ertragsaufkommens in Feldkulturen von Kartoffeln und Mais durch den Einsatz von AMF zu reduzieren, und so das Ertragsaufkommen im Feld zu stabilisieren. Die zugrundeliegende Idee dabei ist, dass die Applizierung von AMF vor allem dort pflanzenbaulich und wirtschaftlich sinnvoll ist, wo Kulturen schlechter wachsen und/oder Böden natürlich oder maßnahmenbedingt von AMF verarmt sind. Um dies zu realisieren, muss bekannt sein: (i) ob Kulturpflanzen und Boden kompatibel mit den eingesetzten AMF sind, (ii) wenn ja, ob sie in der Kultur nachweisbar sind und von der natürlichen Mikroflora abgrenzbar sind und, (iii) ob der zusätzliche Einsatz von AMF zu einer räumlich abhängigen Ertragsstabilisierung führt.

Für die Umsetzung dieser Ziele, hatte das IGZ zur Aufgabe:

- (I) Einen Nachweis zur Etablierung der eingesetzten AMF im Feld zu entwickeln**
- (II) Die räumliche Heterogenität im Feld (Bodentextur und Nährstoffgehalte) zu erfassen**
- (III) Und anhand von (II) den Nutzen der eingesetzten AMF für die Ertragsstabilität der Kulturen im Feld zu bilanzieren.**

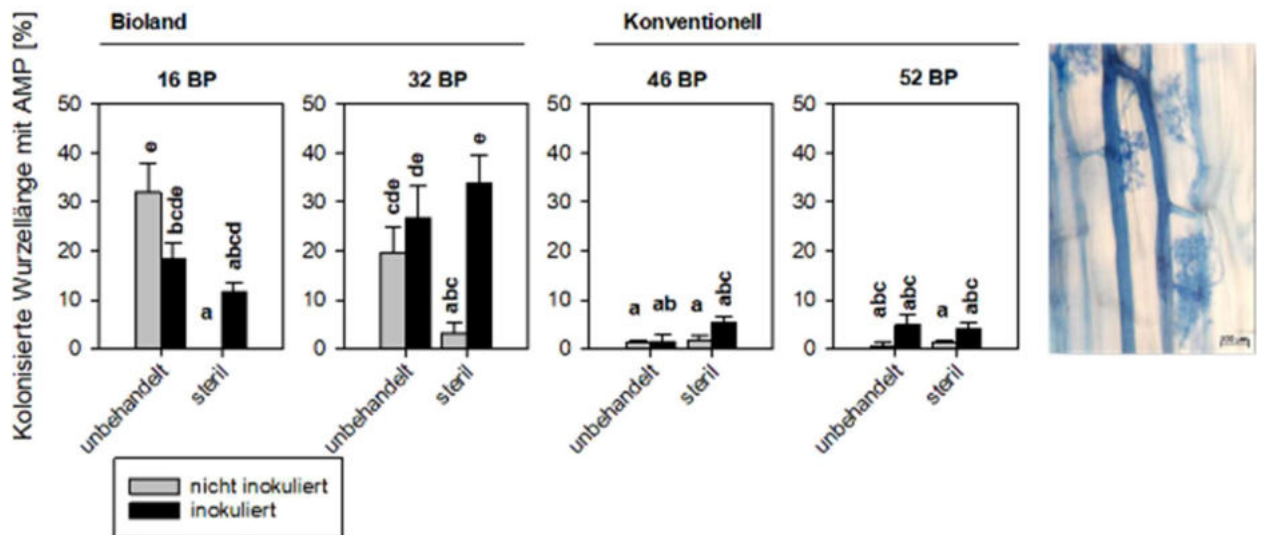
Im Rahmen der verschiedenen Arbeitspakete wurden diese Ziele bearbeitet und im Folgenden die erzielten Ergebnisse zusammenfassend dargestellt.

#### **2.4.4.2 Beschreibung der Ergebnisse**

**(I) Nachweis der eingesetzten AMF im Feld** Zunächst wurden Topfversuche unter kontrollierten Bedingungen durchgeführt, um ein molekulares Verfahren zu entwickeln, das ermöglicht die eingesetzten Mykorrhizapilze von den natürlich im Boden vorkommenden AMF abzugrenzen. Dies ist nötig, um die potentielle Wirkung der entwickelten AMF-Präparate auch im Feld nachzuweisen. Gleichzeitig wurde die Kompatibilität der AMF-Präparate mit den Feldeböden und den Kulturen überprüft.

Im Projekt wurden zwei verschiedene Kulturen untersucht, der Körnermaisbau nach Bioland-Richtlinien, sowie der Kartoffelanbau unter konventioneller landwirtschaftlicher Praxis. In den Topfversuchen wurde zunächst Wissen aus der Grundlagenforschung genutzt, um die Kompatibilität der AMF-Präparate mit den unterschiedlich bewirtschafteten Böden zu überprüfen. Es ist bekannt, dass Mais generell eine hohe Kompatibilität zu AMF aufweist und in der Praxis, sowie unter kontrollierten Bedingungen eine gute und zuverlässige Mykorrhizasymbiose ausbildet. Deshalb wurde ein Kreuzversuch durchgeführt, in dem Mais auf den Böden kultiviert wurde, auf denen später im Projekt die konventionelle Kartoffelkultur, sowie die Bioland-Maiskultur angelegt wurden. So wurde es möglich, zu untersuchen ob die Versuchsböden möglicherweise inhibierend oder fördernd für die Mykorrhizasymbiose wirken. Hierfür wurden mit Hilfe der Landwirte von 2 Standorten je Kultur Böden entnommen, die sich in ihrer Qualität (Bodenpunkte) unterschieden und im Topf mit Mais kultiviert. Nach 8 Wochen Topfkultur wurden die Pflanzen und Wurzelproben geerntet. Die Wurzelproben wurden mit einem Farbstoff inkubiert, der Chitin, also die Zellwandbestandteile der AMF einfärbt, und die Wurzelstücke nach ihrer Frequenz der Pilzkolonisierung quantifiziert (Abbildung 17 rechts).



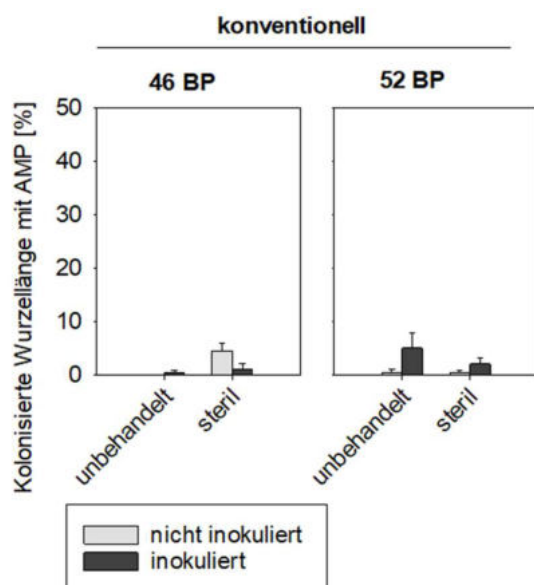


**Abbildung 17: Die Frequenz der mit arbuskulären Mykorrhizapilzen (AMF) besiedelten Wurzelstücken von 8 Wochen alten Maispflanzen.**

Für die Abbildung 17 wurde von zwei unterschiedlichen Standorten je Bewirtschaftungsform Boden von Feldarealen mit unterschiedlichen Bodenpunkten (BP) entnommen und als Ausgangssubstrat für die Topfkultur verwendet. Je Boden wurden eine unbehandelte und eine zuvor sterilisierte (80°C, 24 h) Behandlung betrachtet, letzteres um natürliche Mykorrhizen abzutöten. Die Hälfte der Töpfe wurde mit einem autoklavierten Mykorrhizapräparat (nicht inokuliert) behandelt, die andere Hälfte wurde mit dem unbehandelten Mykorrhizapräparat inokuliert (inokuliert). Eine dreifaktorielle Varianzanalyse zeigte, dass der Faktor Boden ( $P < 0,001$ ), die Hitzebehandlung ( $P = 0,002$ ), die Inokulierung ( $P < 0,001$ ), sowie die dreifache Interaktion ( $P = 0,011$ ) signifikanten Einfluss auf die Wurzelbesiedlung hatten. In Folge wurde der Post-hoc Tukey Test durchgeführt, um die Mittelwerte der einzelnen Behandlungen zu vergleichen. Gleiche Buchstaben zeigen nicht signifikante Unterschiede zwischen den Mittelwerten der Behandlungen ( $n = 3-6$ ,  $\pm$ Standardfehler). Rechts stellt eine exemplarische Lichtmikroskopie die AMF (blau) in einer Wurzel dar. Jedes von je 50 Wurzelstücken (1 cm Länge) pro Probe mit diesen Strukturen wurde als kolonisiert bewertet.

Die Untersuchungen der Wurzelkolonisierung durch AMF mit Standardmethoden zeigten, dass die nach Bioland-Richtlinien bewirtschafteten Böden eine deutlich er-

höhte natürliche Mykorrhizasymbiose gewährleisten, als die Böden aus konventioneller Bewirtschaftung (Abbildung 17, unbehandelt x nicht inokuliert). Weiterhin führte auf den konventionell bewirtschafteten Böden auch eine zusätzliche Inokulierung mit AMF (inokuliert) nicht zu einer Erhöhung der Wurzelkolonisierung, die sich auch nicht von sterilen Böden aus der Bioland-Bewirtschaftung statistisch abgrenzen ließen. Generell erlaubten die konventionell bewirtschafteten Böden nur pflanzenphysiologisch vermutlich irrelevante und marginale Wurzelkolonisierungsraten. Innerhalb der Bioland-Böden zeigte sich, dass die Wurzelkolonisierung auf sterilisierten Böden durch die zusätzliche Inokulierung erhöhen ließ. Dies weist die Kompatibilität der Böden mit dem angewendeten AMF-Präparat nach. Der Bioland-Boden mit 32 Bodenpunkten zeigte generell die höchste Wurzelkolonisierung. Der Boden mit 32 Bodenpunkten hatte eine feinere Textur (höherer Schluff- und Tonanteil) als der Boden mit 16 Bodenpunkten. Auf den Einfluss der Bodentextur auf die Mykorrhizierung wird später näher eingegangen.



**Abbildung 18: Frequenz der mit arbuskulären Mykorrhizapilzen (AMF) besiedelten Wurzelstücken von 8 Wochen alten Kartoffelpflanzen, die entweder auf Böden kultiviert wurden, die mit unterschiedlichen Bodenpunkten (BP) entnommen und als Ausgangssubstrat für die Topfkultur verwendet.**

In einem zweiten Topfversuch wurde überprüft, ob die Mykorrhiza-inhibierende Wirkung der konventionell bewirtschafteten Böden auf für die Kartoffelkultur gilt. Hierfür wurde ein Topfversuch mit Kartoffeln analog zum ersten Versuch mit Mais auf den konventionell-origären Böden durchgeführt (Abbildung 18). Je Boden wurden eine unbehandelte und eine zuvor sterilisierte (80°C, 24h) Behandlung betrachtet, letzteres um natürliche Mykorrhizen abzutöten. Die Hälfte der Töpfe wurde mit einem autoklavierten Mykorrhizapräparat (nicht inokuliert) behandelt, die andere Hälfte

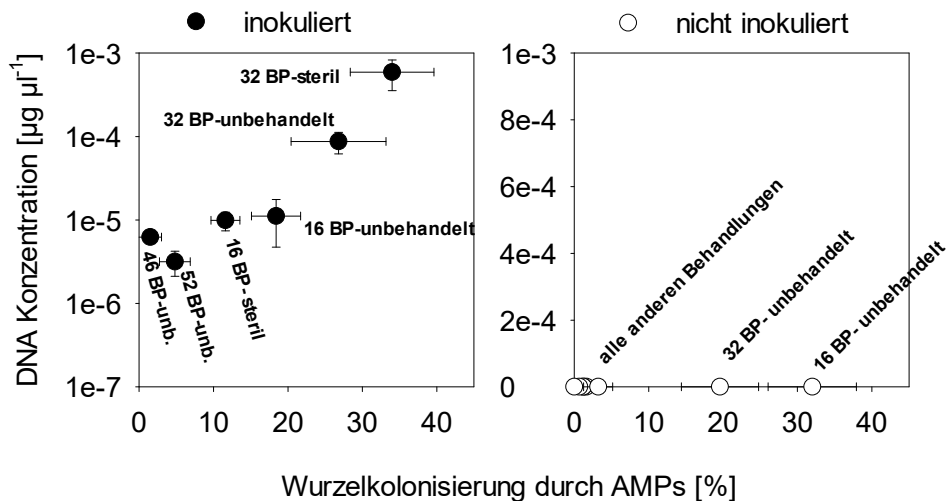
wurde mit dem unbehandelten Mykorrhizapräparat inokuliert (inokuliert). Eine dreifaktorielle Varianzanalyse zeigte, dass keine signifikanten Einflüsse auf die Wurzelbesiedlung vorlagen (n=4-5, ±Standardfehler).

Es bestätigte sich, dass auch die Kartoffelkultur auf den konventionell bewirtschafteten Böden keine nennenswerte Wurzelkolonisierung durch AMF erlaubte, weder durch das Inokulum, noch durch natürlich vorkommende AMF.

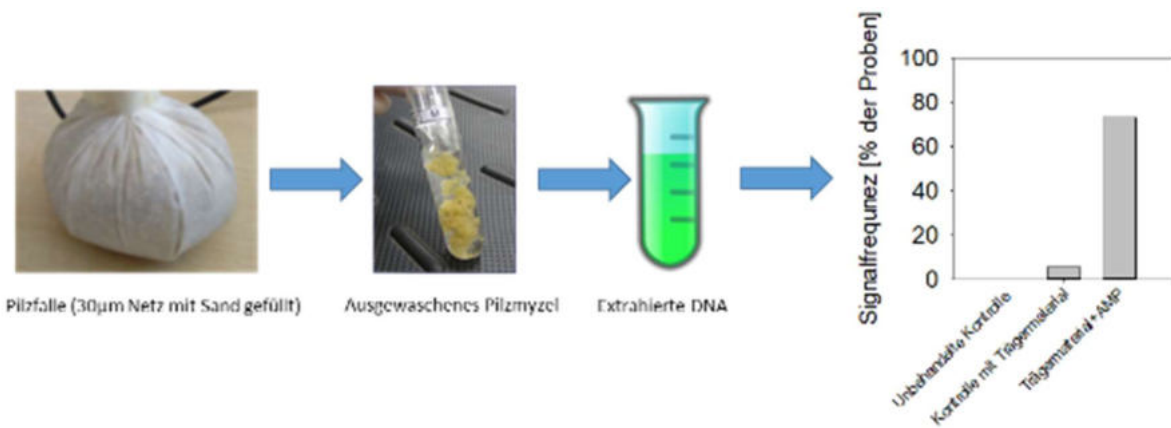
In beiden Topfversuchen wurden Kontrollvarianten auf zuvor hitzebehandelten Böden mitgeführt, die zum Ziel hatten einen molekularen Nachweis für die applizierten Mykorrhizapilze zu entwickeln. Beide Topfversuche zeigten, dass die Sterilisierung effektiv die natürlichen Mykorrhizen abtötete. Für den molekularen Nachweis der inokulierten AMF mittels quantitativer PCR wurde zunächst eine Sequenzierung der im Inokulum enthaltenen Pilzstämme durch externe Partner durchgeführt und ‚Primer‘ entwickelt, die spezifisch an die cDNA der im Inokulum enthaltenen AMF Stämme binden. Es wurde die TaqMan Methode angewendet, die zusätzlich zur Inokulum-Spezifität eine quantitative Analyse der inokulierten AMF durch Lichtsignale während der Amplifizierung in der PCR erlaubt. Hierfür wurden aus den Wurzeln des Topfversuchs DNA extrahiert, aufgereinigt und mit folgendem Primerset analysiert:

<b>Primer 2.1</b>	sense	TGTCTCCTGACCCTCTTAG	52.4°C	<b>255 Basenpaare</b>
<b>Pimer 2.2</b>	antisense	CCATATCCAAAGCTGGAAC	51.1°C	
<b>TaqMan 2.3</b>	sense	CGTACCTATGCCGCTAC	66.0°C	

Die Gegenüberstellung der molekularen Quantifizierung und der unter dem Lichtmikroskop bestimmten Wurzelkolonisierung durch AMF weist zum einen klar die Spezifität der entwickelten Methode für die AMF im Inokulum nach und zum anderen, dass die molekulare Quantifizierung mit der Wurzelkolonisierung skaliert (Abbildung 19)



**Abbildung 19: Die DNA Konzentration der Inokulum-spezifischen arbuskulären Mykorrhizapilze (AMF) in Wurzeln von Mais, die auf verschiedenen Böden kultiviert wurden.**



**Abbildung 20: Die mit Sand gefüllten Pilzfallen.**

In den unbehandelten Böden, in denen höhere Wurzelkolonisierungsraten visuell beobachtet wurden, konnte keine Amplifizierung der pilzlichen DNA beobachtet werden (Abbildung 19). Konsistenter Weise wurde ein positiver Zusammenhang zwischen Wurzelkolonisierungsrate und Amplifizierter DNA in den inokulierten Varianten beobachtet (Abbildung 19 Abbildung 20).

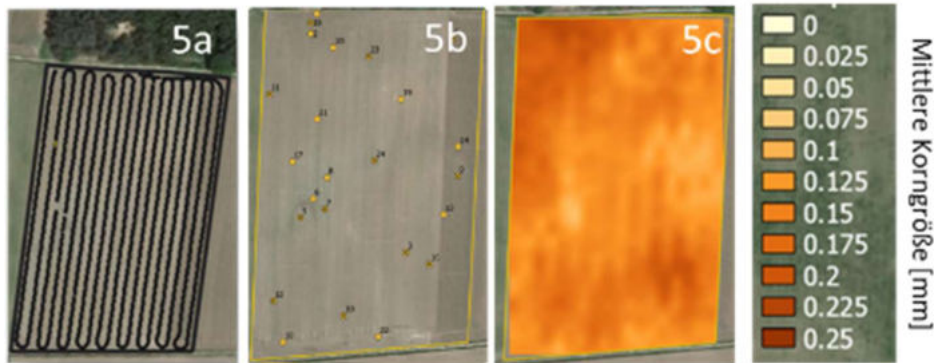
Die mit Sand gefüllten Pilzfallen, umschlossen mit einem Wurzelausschlussnetz (Abbildung 20), wurden in 15 cm Tiefe im Feldboden innerhalb der Pflanzreihen im Abstand 50 m eingegraben und verblieben dort bis einige Tage vor der Ernte der Kultur. Aus den Pilzfallen wurde das eingewachsene Myzel ausgewaschen und gefriergetrocknet. Die extrahierte DNA wurde mittels quantitativer PCR hinsichtlich der

Anwesenheit der inokulierten AMF analysiert. In den Arealen, die mit AMF behandelt wurden gelang ein zuverlässiger Nachweis der inokulierten AMF. Die Signalfrequenz (rechts) zeigt den prozentualen Anteil der untersuchten Einzelproben aus dem Feldversuch des Jahres 2020, für die ein Nachweis der inokulierten AMF gelang

Schlussfolgernd kann die entwickelte Methode zuverlässig inokulierte AMF von natürlich in den Böden vorkommenden Pilzen abgrenzen und ist somit geeignet, in den Feldkulturen angewendet zu werden. Dies wurde in den Feldkulturen im Jahr 2020 und 2021 durchgeführt. Hierfür wurde eine Methode angewendet, um pilzliche Hyphen möglichst frei von anderer organischer Substanz aus dem Feldboden zu gewinnen (Abbildung 20). Es wurden Kompartimente im Boden vergraben, die mit Sand gefüllt wurden, umschlossen von einem Nylonnetz mit 30 µm Öffnungsweite. Diese Netze schließen Wurzeleinwuchs aus und erlauben Pilzeinwuchs, der Sand frei von anderer organischer Substanz erlaubt eine saubere Auswaschung eingewachsener Pilze. Da AMF als biotrophe Organismen zum Hyphenwachstum Kohlenstoff der Pflanze direkt aus der Wurzel beziehen müssen, bedeutet ein Nachweis der inokulierten AMF in den Kompartimenten, dass sich eine funktionelle Symbiose gebildet haben muss.

Im Feldversuch wurden drei Behandlungen in einer randomisierten Streifenanlage mit vier biologischen Replikaten und bis zu 14 Unterproben je Replik angelegt. Eine unbehandelte Kontrolle, eine Kontroll-Inokulierung mit dem reinen Trägermaterial des Inokulums, sowie die vollständige Behandlung mit dem Mykorrhizapräparat wurden angelegt und hinsichtlich des Anwacherfolges der inokulierten AMF untersucht. Im Jahr 2020 konnte eine erfolgreiche Etablierung der applizierten AMF mit dieser Methode nachgewiesen werden. Am Ende der Kultur zeigte sich, dass in 73% der 56 Unterproben auf dem inokulierten Areal die AMF des Inokulums in den Pilzfallen nachgewiesen werden konnten (Abbildung 20 rechts). In 3 von 54 Fällen konnte auch ein positiver Befund für Proben aus Arealen, die mit dem reinen Trägermaterial inokuliert wurden, beobachtet werden. Generell zeigte sich ein konsistentes Bild mit positivem Nachweis der inokulierten AMF auf den Feldarealen, die tatsächlich mit AMF inokuliert wurden. Im Jahr 2021 wurde dies wiederholt, hier jedoch konnte kein erfolgreicher Nachweis der inokulierten AMF in den Pilzfallen

gezeigt werden (nicht gezeigt). Die Ursachen dafür, bedürfen weiterer Forschung. Zusammenfassend kann geschlussfolgert werden, dass ein funktionales System entwickelt wurde, dass den Anwacherfolg applizierter AMF im Feld nachweisen kann.

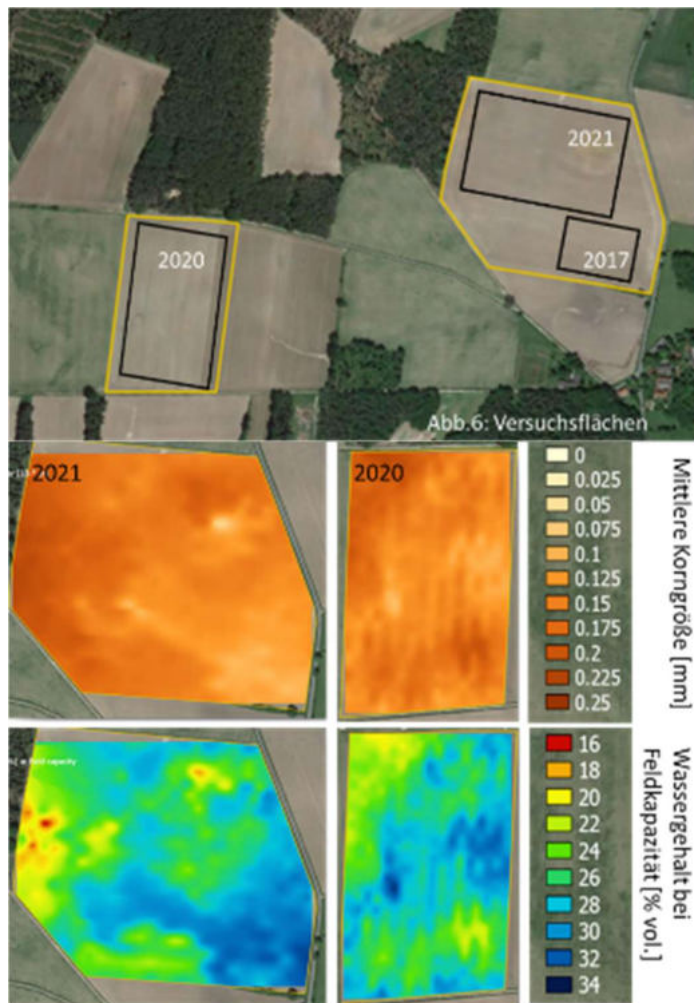


**Abbildung 21: Mittlere Korngröße**

**(II) Erfassung der räumlich heterogenen Bodenbedingungen im Feld** Um eine räumliche Ertragsstabilisierung durch den Einsatz von AMF in der Feldkultur nachweisen zu können, muss die räumliche Heterogenität der Bodenbedingungen bekannt sein. Die Hypothese war, dass eingesetzte AMF besonders in Arealen helfen, in denen Pflanzen weniger gut wachsen, weil sie Mangelbedingungen vorfinden und durch zusätzliche Applizierung von AMF ihre Ressourcennutzungseffizienz an diesen Mangelstandorten steigern können. Da Wasser-, sowie Nährstoffhaushalt von gleich behandelten Böden maßgeblich durch deren Textur (Sand-, Schluff- und Tongehalt) bestimmt wird, wurde die Korngrößenzusammensetzung des Bodens auf den Feldarealen von Interesse mit Hilfe des *Geophilus electricus* Systems hoch aufgelöst kartiert. *Geophilus electricus* basiert auf einem Multi-Sensor System, dass gleichzeitig den elektrischen Widerstand des Bodens bis 150 cm Tiefe und die natürliche Gammaaktivität durch Abfahren des Feldschlages (Abbildung 21a) misst und GPS-basiert Messdaten mit dem Ort verknüpft. Da der elektrische Widerstand maßgeblich von der Bodenfeuchte, der Lagerungsdichte und der Korngröße abhängt, aber die natürliche Gammaaktivität nur durch die in der Tonfraktion enthaltenen Elemente Thorium, Uran und Kalium bestimmt wird, kann aus beiden Messvariablen mit Hilfe eines statistischen Modells die Textur des Bodens zuverlässig kartiert werden. Da vor allem die Gammaaktivität vom Ausgangsgestein abhängig und daher regional unterschiedlich ist, wurden Bodenproben an 24 Referenzpunkten je



Schlag genommen (Abbildung 21b) und hinsichtlich ihrer Korngrößenfraktion im Labor analysiert, um das statistische Modell zur Erstellung der Texturkarten als kontinuierliche Variable (Abbildung 21c) zu kalibrieren. Es wurden an diesen Bodenproben

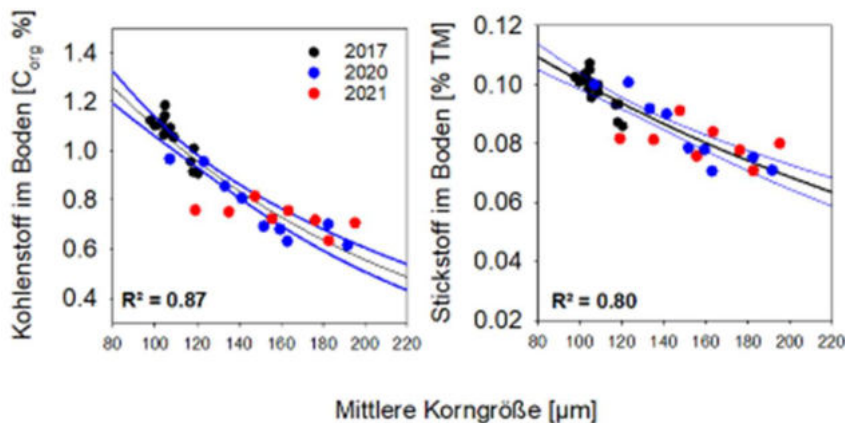


**Abbildung 22: Die räumliche Verteilung der mittleren Korngröße (oben) und der Wassergehalte bei Feldkapazität (-6kPa, unten) für die Versuchsschläge im Jahr 2020 und 2021 für die Maiskultur nach Bioland.**

zusätzlich Wasserretentionsmessungen durchgeführt, um räumlich hoch aufgelöste Feldkapazitätskarten zu erstellen. Abbildung 22 zeigt die Versuchsfelder des nach Bioland-Richtlinien arbeitenden Partnerbetriebs für die Maiskultur, die innerhalb derselben Fruchtfolge im Projekt im Jahr 2020 und 2021 beprobt wurden, sowie eine Referenz-Beprobung aus dem Jahr 2017. Für die gelb umrandeten Areale wurden die Bodentextur und Feldkapazitätskarten erstellt (Abbildung 22). Die kartierten Schläge zeigen deutlich den Zusammenhang zwischen feinerer Bodenkörnung und der Wasserhaltefähigkeit des Bodens, sowie die Heterogenität der Bodenbedingungen innerhalb der einzelnen

Schläge. Die räumliche Heterogenität im Versuchsfeld zu kennen ist für das Projekt von entscheidender Bedeutung, da die Applizierung der AMF in den Arbeitsablauf der Aussaat integriert werden sollte. Dies ermöglicht eine Streifenanlage des Versuchs in Arbeitsrichtung, die jedoch nur eine Randomisierung der biologischen Replikate quer zur Arbeitsrichtung erlaubt. Durch die Kartierung kann aber im Nachgang sinnvoll eingeschätzt werden, inwieweit die Randomisierung in eine Richtung eine repräsentative Probenverteilung über alle Varianten gewährleistete.

Die Vorhersagekraft der Texturkartierung für Bodennährstoffgehalte wurde überprüft, in dem während der laufenden Pflanzenversuche bei Vollreife der Pflanzen, Bodenproben an den Pflanzenstandorten entnommen und hinsichtlich ihrer Nährstoffgehalte untersucht wurden. Dies geschah direkt in der Versuchsanlage, also an anderen Standorten als die Referenz-Beprobung für die Bodentextur, und dient so zur Validierung der Kartierung.



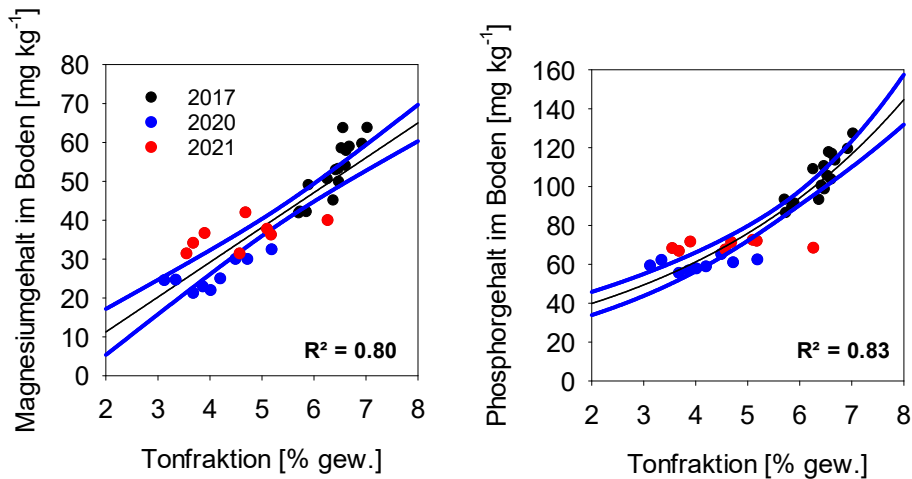
**Abbildung 23: Die Beziehung zwischen der mittleren Korngröße und dem organischen Kohlenstoff (links), sowie dem Gesamtstickstoffgehalt.**

Die Abbildung 23 zeigt die Beziehung zwischen der mittleren Korngröße und dem organischen Kohlenstoff (links), sowie dem Gesamtstickstoffgehalt der Böden (rechts) auf nach Bi-

oland-Richtlinien bewirtschafteten Schlägen mit Körnermais. Jeder Datenpunkt repräsentiert einen Mittelwert von mehreren Unterproben, die nach der Korngröße am Standort gruppiert wurden. Die Korngrößenbreite für einen Mittelwert betrug ca. 10 µm. Die Daten für die Versuche aus 2020, 2021 und die eines Referenzdatensatzes aus 2017 wurden korreliert (schwarze Linie: Regression, blaue Linien: 95% Konfidenzintervalle). Eine Korrelationsanalyse zeigt, dass die Texturkarten exzellenten Aufschluss über die Bodennährstoffgehalte, sowie die organische Substanz im Boden geben können, die über Jahre hinweg für Schläge in der gleichen Fruchtfolge gelten kann. Abbildung 23 verdeutlicht dies. Es gibt einen klaren positiven Zusammenhang zwischen feinerer Textur und dem organischen Kohlenstoff, sowie dem Gesamtstickstoffgehalt des Bodens, der zur Probenahme als hauptsächlich organischer Stickstoff interpretiert werden darf. Für pflanzenverfügbare Bodenmagnesium- und Bodenphosphorgehalte gilt eine ähnlich gute Vorhersagekraft der Korngröße (Abbildung 24). Die höheren Gehalte an Nährstoffen in feiner texturierten Böden liegen einer höheren Tonfraktion zugrunde (wie in Abbildung 24 dargestellt), da die Tonfraktion eine hohe innere und geladene Oberfläche besitzt, an die Nährstoffe vermehrt binden.

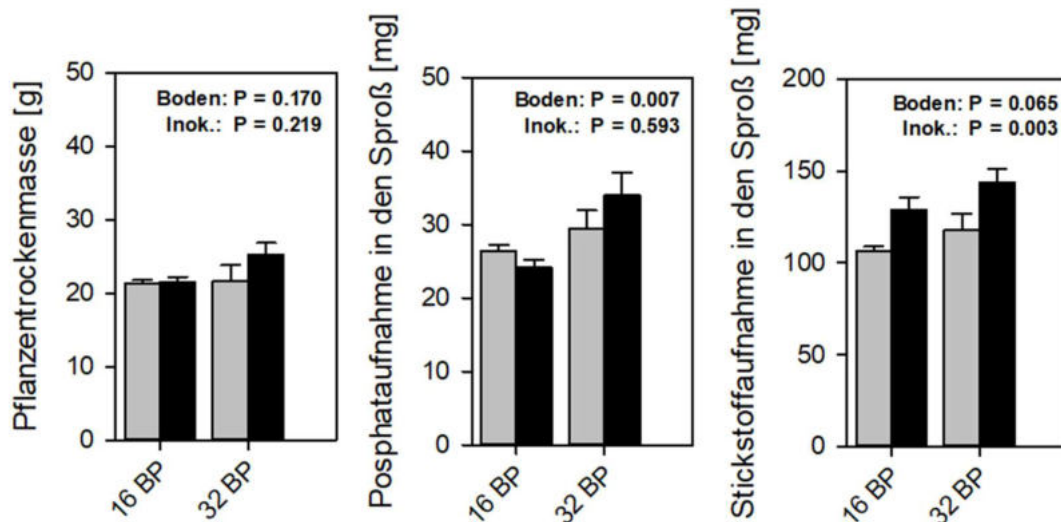


Es konnte somit gezeigt werden, dass die Kartierung der Bodentextur valide Aufschluss über die Nährstoffversorgung und Wasserhaltefähigkeit der Feldböden gibt und sinnvoll als Kovariate am Standort für Inokulierungsversuche im Feld herangezogen werden kann.



**Abbildung 24: Die Beziehung zwischen der Bodentonfraktion und dem Magnesiumgehalt (links), sowie dem Phosphorgehalt der Böden (rechts).**

**(III) Bilanzierung des Nutzens applizierter AMF für Pflanzennährstoffaufnahme und räumliche Ertragsstabilität im Feld** Die vorgestellten Technologien unter (I) und (II) wurden im Folgenden genutzt, um die Wirkung applizierter AMF im Feld auf das Pflanzenwachstum zu untersuchen. Zunächst aber wurde in den in (I) beschriebenen Topfversuchen untersucht, ob die AMF-Präparate zur Nährstoffnutzungseffizienz der Pflanzen beitragen.



**Abbildung 25: Die Pflanzentrockenmasse (links), die Phosphataufnahme (Mitte) und die Stickstoffaufnahme (rechts) 8 Wochen alter Maispflanzen.**

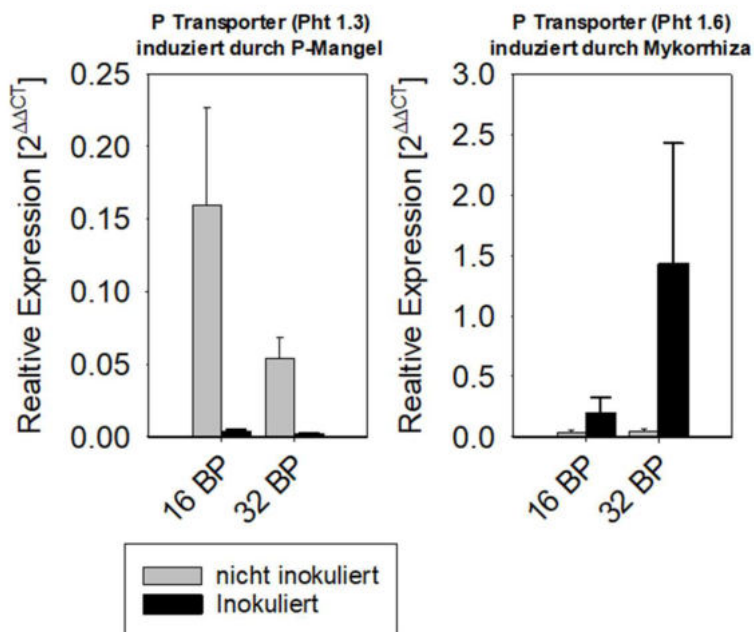
Wenn Mais auf unbehandelten Böden vom Feldversuchsstandort im Topf angezogen wurde, zeigte sich zwar dass die Maispflanzen durch Inokulierung mit zusätzlichen AMF nicht besser wuchsen, aber die Nährstoffaufnahme in den Spross verbessert werden konnte (Abbildung 24). Die Stickstoffkonzentration in der Biomasse zeigte sich nach Inokulierung mit AMF erhöht. Ein näherer Blick auf die Phosphor- und Stickstoffgehalte zeigt, dass das N/P Verhältnis in der Pflanzenbiomasse 15 unterschreitet, was als Indikativ für eine relative Stickstofflimitierung der Pflanzen interpretiert werden kann. Es ist daher zu vermuten, dass die zusätzliche Inokulierung mit AMF-Präparaten die Stickstofflimitierung der Pflanzen wirksam abmildern kann. Die relative Stickstofflimitierung der Pflanzen ist konsistent mit den beobachteten Bodenstickstoff- und Phosphorgehalten in den Feldböden, die auch für die Topfversuche verwendet wurden (siehe Abbildung 23 und Abbildung 24). Ein vergleichsweise hoher Phosphorgehalt in Böden, die unter Bioland-Richtlinien bewirtschaftet wurden, ist ein häufiges Phänomen, da es schwierig ist phosphorarme aber stickstoffreiche Dünger in organischer Form immer so anzuwenden, um den Pflanzenbedarf beider Nährstoffe gleichgewichtig zu bedienen.

Es ist zusätzlich möglich anhand molekularer Marker die Funktionalität der Mykorrhizasymbiose zu überprüfen. Da bekannt ist, dass das Pflanzengenom für Gene kodiert, die spezifisch zur Ausprägung kommen, wenn AMF die Wurzelzellen kolonisieren, kann mit einer quantitativen PCR überprüft werden, ob die Wurzel-Pilz-

Beziehung funktional für den partnerübergreifenden Nährstoffaustausch ausgebildet wurde. Für Mais ist die Gensequenz bekannt, die für Phosphortransporter kodiert, die nur exprimiert werden, wenn AMF die Wurzelzellen besiedeln und den Phosphoraustausch zwischen Pilz und Pflanze gewährleisten. Die Expression dieser Gene muss nicht im direkten Zusammenhang mit einer verbesserten Pflanzenphosphoraufnahme stehen, da der Aufnahmeweg von Phosphor über AMF auch den über die Wurzel ersetzen kann. Die Expression der AMF-spezifischen Phosphattransporter indiziert aber eine funktionale Symbiose. Mit dieser molekularbiologischen Studie wurde nun überprüft, ob die Applizierung der AMF-Präparate die Austauschfunktionalität der Wurzel-Pilz-Beziehung beeinflusste.

Der Phosphattransporter Pht1.6 von Mais exprimiert spezifisch für Mykorrhiza. Deswegen RNA Akkumulation in Maiswurzeln wurde relativ zu einem geeigneten Referenzgen mittels quantitativer PCR bestimmt. Als Vergleich wurde der Phosphattransporter Pht1.3 in gleicher Weise untersucht, für den bekannt ist, dass seine Expression durch Phosphatmangel induziert wird. Es konnte beobachtet werden, dass die Applizierung von lebenden AMF in natürliche Feldböden die Expression der phosphatmangelinduzierten Phosphattransporter vergleichsweise reduzierte und gleichzeitig die Expression der AMF-spezifischen Phosphattransporter in Maiswurzeln erhöhte (Abbildung 26). Dies legt nahe dass, obgleich ähnlicher Wurzelkolonisierungsraten in unbehandelten Böden (Abbildung 26 unbehandelte Behandlungen), eine Inokulierung mit dem lebenden Mykorrhiza-Präparat zu einer Steigerung der Nährstoffaustauschkapazität über den Mykorrhiza-Weg hervorgerufen werden kann. Die Inokulierung bewirkte eine vitalere Nährstoffaustauschprägung über den Mykorrhiza-Weg, als es die natürlich vorkommende AMF-Symbiose tat. Dass dies nicht zu einer erhöhten Phosphoraufnahme der Pflanzen führte (siehe Abbildung 25) mag darin begründet liegen, dass alle Pflanzen ihren Nährstoffbedarf aus

dem phosphorreichen Feldboden in gleicherweise decken konnten, unabhängig vom Aufnahmeweg.



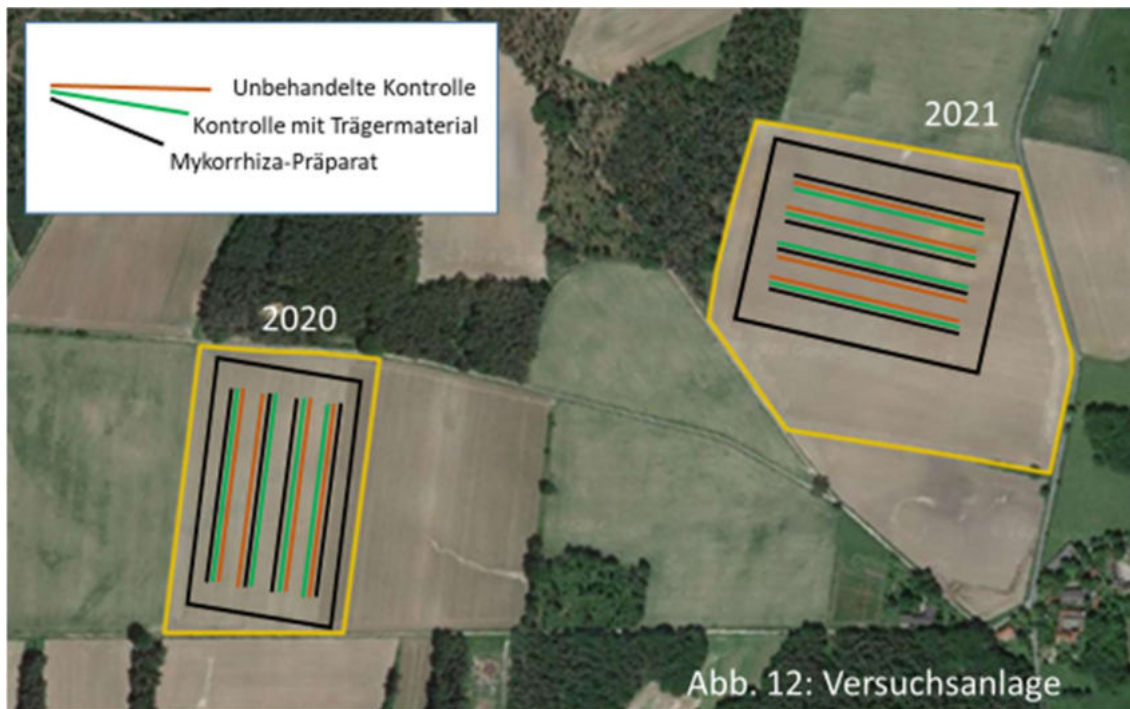
**Abbildung 26: Die relative Expression von phosphormangelinduzierten (rechts) und Mykorrhiza-induzierten Phosphattransportern (links) in den Wurzeln 8 Wochen alter Maispflanzen.**

Der Befund erklärt aber womöglich die erhöhte Stickstoffaufnahme der inokulierten Maispflanzen durch eine funktional aktivere Symbiose in den stickstofflimitierenden Böden. Letzteres bleibt aber spekulativ, da der Aufnahmeweg von Stickstoff über den Mykorrhiza-Weg auf molekularer Ebene nicht in gleicherweise aufgeklärt ist, wie Der für Phosphor und daher die Technologien zur analogen Überprüfung fehlen.

Für den Kartoffelversuch im Topf auf den Feldböden, entnommen von zwei unterschiedlichen Arealen die sich in den Bodenpunkten unterscheiden, wurde ein analoger Versuch durchgeführt. Eine zweifaktorielle Varianzanalyse zeigte, dass weder der Boden ( $P = 0.187$ ), noch die Inokulierung ( $P = 0.497$ ) signifikant das Kartoffelwachstum beeinflussten. Auch bestand keine signifikante Interaktion zwischen den Faktoren Boden und Inokulierung ( $P = 0.064$ ). Dass die Inokulierung keinen Einfluss auf das Kartoffelwachstum hatte ist konsistent mit dem Befund zur Wurzelkolonisierung (Abbildung 19), die in beiden Inokulierungsvarianten keine physiologisch relevante Wurzel-Pilz Beziehung erlaubten. Auch die unterschiedlichen Böden mit 46

und 52 Bodenpunkten waren für das Pflanzenwachstum statistisch nicht entscheidend, auch wenn die Kartoffeln zum Wachstum tendenziell den vermutlich leichteren Boden mit 46 Bodenpunkten (4.6 g Trockenmasse je Pflanze  $\pm$  0.792 Standardfehler) gegenüber dem Boden mit 52 Bodenpunkten (3.1 g Trockenmasse  $\pm$  0.769 Standardfehler) bevorzugten. Da diese Befunde keine erfolgversprechenden Ergebnisse für die Zielerreichung des Projektes darstellten, wurde von weiterführenden Analysen abgesehen.

Auf Basis der Topfversuche und der entwickelten Technologien wurden im Jahr 2020 und im Folgejahr 2021 Feldversuche angelegt, die die Wirksamkeit applizierter AMF in den Feldkulturen untersuchten. Auf je einem Schlag pro Jahr und Kultur wurde eine randomisierte Streifenanlage mit 3 verschiedenen Behandlungen und je 4 Wiederholungen angelegt (Abbildung 27, exemplarisch für den Maisstandort). Es wurden eine unbehandelte Kontrolle, eine Kontrollinokulierung mit dem reinen Trägermaterial (Blähton), sowie eine Inokulierung mit AMF-Präparat angelegt. Die Inokulierung fand mit der Aussaat für Mais bzw. mit der Pflanzung der Kartoffel in einem Arbeitsgang statt. Innerhalb der einzelnen Behandlungen wurden in gleichen Abständen über die gesamte Streifenlänge mehrere Unterproben für die biologischen Replikate genommen und vor der letzten mechanischen Bodenbearbeitung Pilzfallen in 15 cm Tiefe in den Oberboden der Maisversuche eingebracht, die dort bis zur Ernte ca. 3 Monate verblieben.



**Abbildung 27: Versuchsstreifen Maisstandorte 2020 und 2021**

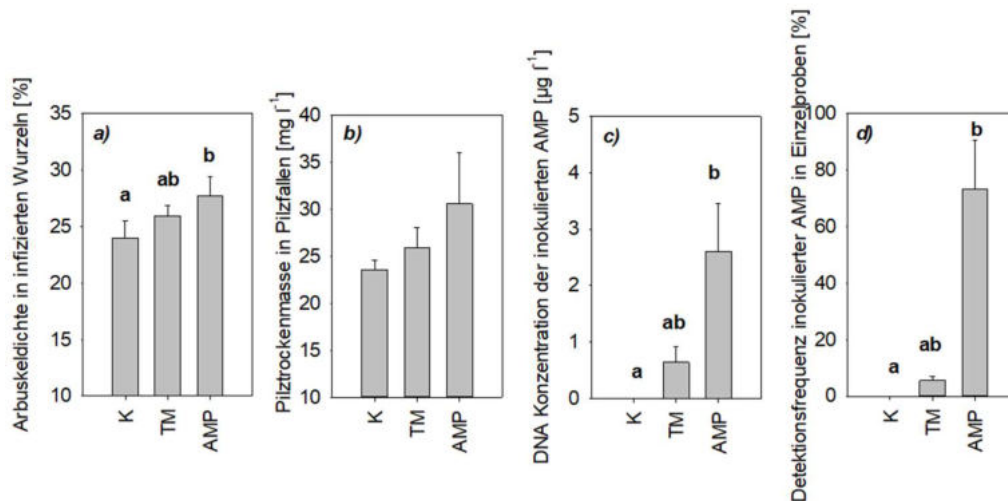
Es konnte zunächst durch statistische Analysen festgestellt werden, dass nicht in jedem Falle in der Maiskultur die Randomisierung der Streifen zu einer gleichgewichtigen Verteilung der Bodentextur und Nährstoffgehalte über alle Behandlungen führte. Dies wurde von uns in einer Streifenanlage erwartet, weshalb die Kartierung der Bodenbedingungen benötigt wurde. Aufgrund dessen wurde die Bodentextur an den Beprobungskoordinaten als Kovariate in der Varianzanalyse mitgeführt (Tabelle 1). Der Faktor Inokulierung enthielt die unbehandelte Kontrolle, die Kontrollvariante mit Trägermaterial, sowie die Behandlung mit dem Mykorrhiza-Präparat (N = 4). Jede Wiederholung stellt einen Mittelwert aus 12-14 Unterproben dar. Die mittlere Korngröße je Wiederholung wurde als Kovariate verwendet. Die P-Werte, die das Signifikanzniveau von 0.05 unterschritten, sind hervorgehoben.

**Tabelle 1: Die statischen Signifikanzen (P-Werte) einer einfaktoriellen Kovarianzanalyse für pflanzenbauliche Variablen und Mykorrhizierung in der Maiskultur nach Bioland-Richtlinien im Jahr 2020.**

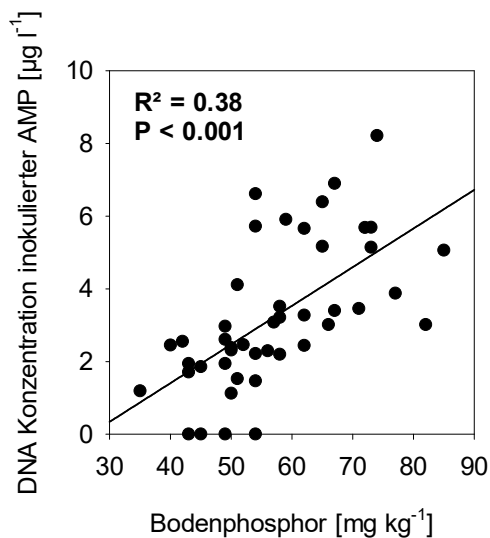
Variable	Inokulierung (I)	Mittlere (MK)	Korngröße	Interaktion (I x MK)
<b>Pflanze</b>				
Kolbentrockengewicht [g je Pflanze]	0.794	<b>0.019</b>		0.768
Stammtrockengewicht [g je Pflanze]	0.598	<b>0.020</b>		0.548
Blattrockengewicht [g je Pflanze]	0.395	0.102		0.416
Blattphosphatgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.301	<b>0.030</b>		0.291
Blattstickstoffgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.338	0.404		0.310
Blattkohlenstoffgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.707	<b>0.035</b>		0.734
Phosphoraufnahme in den Spross [g je Pflanze]	0.146	0.937		0.149
Stickstoffaufnahme in den Spross [g je Pflanze]	0.539	<b>0.023</b>		0.493
Ertrag [t je ha]	0.815	<b>0.006</b>		0.824
<b>Mykorrhiza</b>				
Infektionsfrequenz der Wurzeln [%]	0.816	0.447		0.869
Mykorrhizaintensität im Wurzelsystem [%]	0.321	0.124		0.338
Intensität in infizierten Wurzelstücken [%]	0.266	0.120		0.273
Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem [%]	0.110	<b>0.018</b>		0.114
Arbuskeldichte in infizierten Wurzelstücken [%]	<b>0.018</b>	<b>0.042</b>		<b>0.018</b>
Hyphenbiomasse in Pilzfallen [mg Trockenmasse l <sup>-1</sup> ]	0.497	0.934		0.511

Die Studie im Jahr 2020 zeigte, dass die Inokulierung mit Mykorrhiza-Präparaten keinen signifikanten Einfluss auf die pflanzenbaulich relevanten Größen hatte, letztere aber oft im Zusammenhang mit den örtlichen Bodenbedingungen (Korngröße) standen (Tabelle 1). Gleiches galt die Arbuskeldichte, also den Austauschorganen der AMF, die sie klar von anderen bodenbürtigen Pilzen in den Wurzeln abgrenzen. Interessanterweise führte eine Inokulierung mit dem AMF-Präparat zu einer signifikanten Erhöhung der Arbuskelhäufigkeit in den Wurzelstücken, in denen AMF detektiert wurden. Dies weist auf eine stärker ausgebildete Wurzel-Pilz-Beziehung in Gegenwart der inokulierten AMF hin. Auch die Arbuskeldichte, stand im Zusammenhang mit der Bodentextur. Eine Gegenüberstellung der Haupteffekte der Inokulierung legt nahe, dass eine erhöhte Arbuskeldichte in infizierten Wurzeln mit der geernteten pilzlichen Biomasse in den Pilzfallen und der darin detektierten Menge an Pilzen aus dem AMF-Präparat in Zusammenhang steht (Abbildung 28). Abbildung 28a veranschaulicht, dass die Ausbringung des Trägermaterials bereits eine gewisse Wirkung auf die Arbuskeldichte in Wurzeln zeigte. Womöglich stellt der Blähton ein Refugium für natürlich vorkommende AMF dar, der sich z.B. unter Trockenheit womöglich günstig auf die Überlebenschancen der AMF auswirkt. Die Applizierung von AMF mit dem Trägermaterial zeigte eine additive Wirkung auf die Ausbildung der Arbuskel und bewirkte statistisch signifikant höhere Arbuskeldichten als in den unbehandelten Kontrollen. Die Pilztrockenmasse, die aus den Pilzfallen geerntet werden konnte zeigt einen ähnlichen Trend, wie die Ausbildung der Arbuskeln in Wurzeln (Abbildung 28). Da diese Biomasse sämtlich bodenbürtige Pilze enthalten kann, wurde die molekulare Quantifizierung der inokulierten AMF als Methode (siehe (I)) auf die Pilzbiomasse angewendet (Abbildung 28c, d). Die inokulierten AMF-Präparate konnten vor allem in Pilzfallen von Arealen nachgewiesen werden, auf denen sie auch appliziert wurden, quantitativ (Abbildung 28c) wie qualitativ (Abbildung 28d). Einige wenige Nachweise der applizierten AMF in Arealen die nur mit Trägermaterial inokuliert wurden, sind womöglich auf Verunreinigungen des Trägermaterials zurückzuführen oder darauf, dass die Maschinerie mit der Saatgut und Inokulum gleichzeitig ausgebracht wurden, nach Wechsel der Inokula nicht vollständig rein von applizierten AMF waren.





**Abbildung 28:** Die Arbuskeldichte in infizierten Wurzelstücken (a), die Pilztrockenmasse in Pilzfallen (b), die DNA Konzentration inokulierter AMF in der Pilztrockenmasse aus den Pilzfallen (c), sowie die Detektionsfrequenz inokulierter AMF in den Unterproben der Pilzbiomasse aus den Pilzfallen (d) für die unbehandelten Kontrollen (K), die Kontrollinokulierung mit reinem Tragematerial (TM) und die Behandlung mit AMF in der Feldkultur für Mais.



**Abbildung 29:** Die Abhängigkeit der DNA Konzentration applizierter AMF in pilzlicher Trockemasse vom Bodenphosphorgehalt aller positiven Unterproben am Standort in der Maiskultur 2020. Die lineare Regression war signifikant.

Ein näherer Blick auf die Rohdaten zeigt, dass ein positiver Zusammenhang zwischen der Konzentration inokulierter AMF in der Pilztrockenmasse aus den Pilzfallen und dem Bodenphosphorgehalt am Standort bestand (Abbildung 29). Das relative Vorkommen inokulierter AMF stieg mit dem Bodenphosphorgehalt der Böden. Dies ist ein vielversprechender Befund für zukünftige Anwendung der Mykorrhizen, da in der Regel eine Abnahme der Mykorrhizierung mit steigender Phosphorversorgung der Böden beobachtet wird.

Die Befunde aus diesem Feldversuch mit Mais sind in hervorragender Übereinstimmung mit den Beobachtungen im Topfversuch (Abbildung 20) und stellen einen wichtigen Fortschritt dar. Sie zeigen, dass applizierte Mykorrhiza-Präparate erfolgreich im Feldanbau etablieren können und gemeinsam mit einer stärker ausgebildeten Wurzelsymbiose auftreten.

Die gewünschten positiven Effekte der inokulierten AMF auf die Nährstoffaufnahme der Pflanzen konnten im Feldversuch 2020 mit Mais nicht in gleicher Weise wie im Topfversuch nachgewiesen werden. Aufgrund dessen war es nicht wie geplant möglich, im Folgejahr eine teilflächenspezifische Applizierung von AMF auf einem anderen Schlag vorzunehmen, da keine Hinweise auf eine pflanzenbaulich relevante Wirkung der applizierten AMF gefunden wurden. Deshalb wurde der Inokulierungsversuch 2021 auf einem durch noch heterogenere Bodenbedingungen (Abbildung 27 gekennzeichneten Schlag wiederholt, um mehr Informationen zu sammeln.

Im Jahr 2021 konnte weder der Zusammenhang zwischen der Textur und der pflanzenbaulichen Variablen, noch eine erfolgreiche Etablierung applizierter AMF bestätigt werden (Tabelle 2). Dies kann verschiedenen Ursachen haben und bedarf weitere Forschung. Einerseits ist möglich, dass die Witterungsbedingungen an den Standort sich im Jahr 2020 und 2021 stark unterschieden, das Jahr 2020 war deutlich trockener und wärmer als 2021. Im Landkreis Lüchow-Danneberg, wo die Versuche stattfanden gab der DWD für 2020 eine mittlere Jahrestemperatur von 12,7 °C und eine Niederschlagssumme von 335 l/m<sup>2</sup> an, für 2021 9,7 °C und 467 l/m<sup>2</sup> respektive. Diese Bedingungen führten auch zu vergleichsweise besserem Pflanzenwachstum in 2021 (Abbildung 30) unter denen die Variabilität der Bodenkörnung geringere Bedeutung für Wasser- und Nährstofflimitierung der Pflanzen hatte. Eine

andere Ursache für den ausbleibenden Zusammenhang zwischen pflanzenbaulichen Variablen und der Bodentextur in 2021 könnte der verringerte Stichprobenumfang in 2021 sein. Wildschäden in der Versuchsfläche reduzierten die Möglichkeiten der sinnvollen Beprobung von Pflanzen und das Wiederauffinden von vorher eingebrachten Pilzfallen, was zu einer Reduzierung des Stichprobenumfangs und zu einer höheren Variabilität im Datensatz führte. Warum kein Nachweis, der applizierten AMF in 2021 gelang kann ebenfalls verschiedene Ursachen haben und bedarf ebenfalls weiterer Forschung. Ungünstige Witterungsbedingungen zur Ausbringung könnten zu einer schlechteren Etablierung im Feld geführt haben. Die pflanzenbaulich günstigeren Bedingungen in 2021 könnten für applizierte AMF auch einen geringeren Konkurrenzvorteil gegenüber natürlich vorkommenden und angepassten AMF bewirkt haben und die Etablierung der AMF zwar stattfand sich aber unter der Nachweisgrenze der angewandten Methodik bewegte. Es kann im Projekt nicht abschließend geklärt werden, ob applizierte AMF in 2021 nicht anwuchsen oder ob deren Etablierung unter der Nachweisgrenze lag.

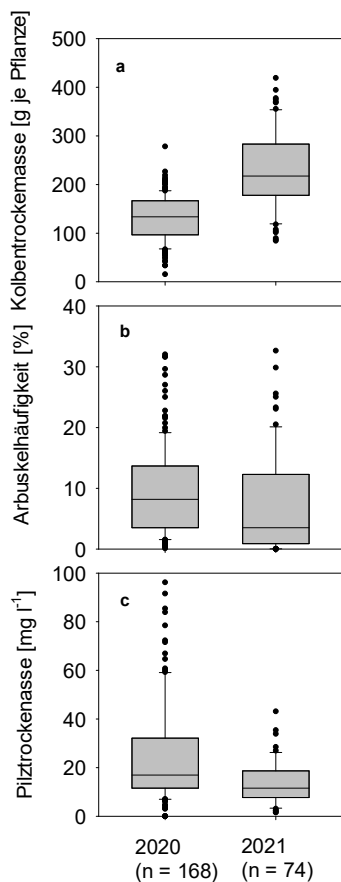
**Tabelle 2: Die statischen Signifikanzen (P-Werte) einer einfaktoriellen Kovarianzanalyse für pflanzenbauliche Variablen und Mykorrhizierung in der Maiskultur nach Bioland-Richtlinien im Jahr 2021.**

Variable	Inokulierung (I)	Mittlere (MK)	Korngröße	Interaktion (I x MK)
<b>Pflanze</b>				
Kolbentrockengewicht [g je Pflanze]	0.293	0.705		0.292
Stammtrockengewicht [g je Pflanze]	0.577	0.579		0.596
Blattrockengewicht [g je Pflanze]	0.772	0.804		0.777
Blattphosphatgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.829	0.077		0.846
Blattstickstoffgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.575	0.361		0.610
Blattkohlenstoffgehalt [mg g <sup>-1</sup> Trockenmasse]	0.329	0.055		0.391
Phosphoraufnahme in den Spross [g je Pflanze]	0.868	0.438		0.877

---

Stickstoffaufnahme in den Spross [g je Pflanze]	0.467	0.347	0.484
Rohprotein im Korn [%]	0.247	0.605	0.262
Stärke im Korn [%]	0.418	0.610	0.680
Beständige Stärke im Korn [%]	0.467	0.724	0.731
Lysin im Korn [%]	0.919	0.816	0.916
Methionin und Cystin [%]	0.820	0.680	0.807
<b>Mykorrhiza</b>			
Infektionsfrequenz der Wurzeln [%]	0.407	0.889	0.403
Mykorrhizaintensität im Wurzelsystem [%]	0.574	0.949	0.593
Intensität in infizierten Wurzelstücken [%]	0.422	0.567	0.420
Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem [%]	0.370	0.905	0.380
Arbuskeldichte in infizierten Wurzelstücken [%]	0.435	0.965	0.448
Hyphenbiomasse in Pilzfallen [mg Trocken- masse l <sup>-1</sup> ]	0.446	0.810	0.505

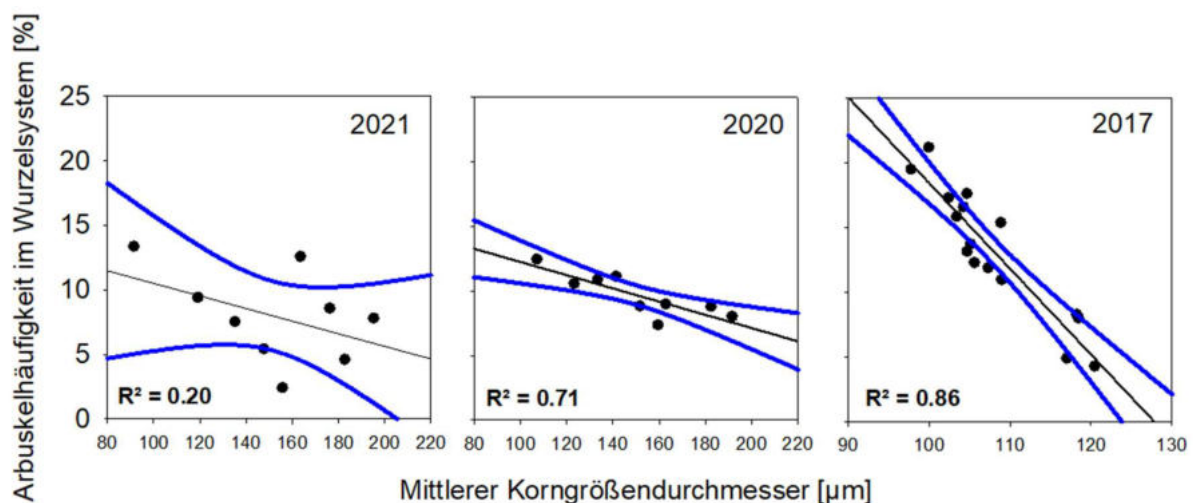
---



**Abbildung 30: Die Kolbentrockenmasse je Pflanze (a), die Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem (b) und die Pilztrockenmasse in dem vergrabenen Pilzfallen aller Unterproben der Jahre 2020 und 2021 im Feldversuch mit Mais.**

Ein näherer Blick auf die Rohdaten zeigt die Unterschiede zwischen den Jahren. Im trockeneren Jahr 2020 konnte eine deutlich verringerte Kolbentrockenmasse je Pflanze beobachtet werden, als im feuchteren Jahr 2021 (Abbildung 30a). Jedoch konnte unter den limitierenden Wachstumsbedingungen im Jahr 2020 eine stärkere Mykorrhizaausbildung in den Wurzeln (Abbildung 30b) und eine höhere Pilztrockenmasse in den Pilzfallen (Abbildung 30c) beobachtet werden. Diese Befunde entsprechen dem, wie Mykorrhizasymbiosen heutzutage verstanden werden. Unter Mangelbedingungen investieren Pflanzen vermehrt Kohlenstoff in die Mykorrhiza, um dem Ressourcenmangel durch Ausbildung der Wurzelsymbiose zu begegnen. Es ist aber auch ein schlagspezifischer Effekt nicht auszuschließen, da die beprobten Schläge sich in ihrer mittleren Korngröße unterschieden (median 2020: 148  $\mu\text{m}$ , median 2021: 160  $\mu\text{m}$ ). Es ist also auch möglich, dass (Mykorrhiza)-Pilze feiner texturierte Böden bevorzugen, in denen Nährstoffe vermehrt an die Tonfraktion binden und bei gleicher Niederschlagsbilanz feuchter bleiben, weil sie mehr Wasser halten.

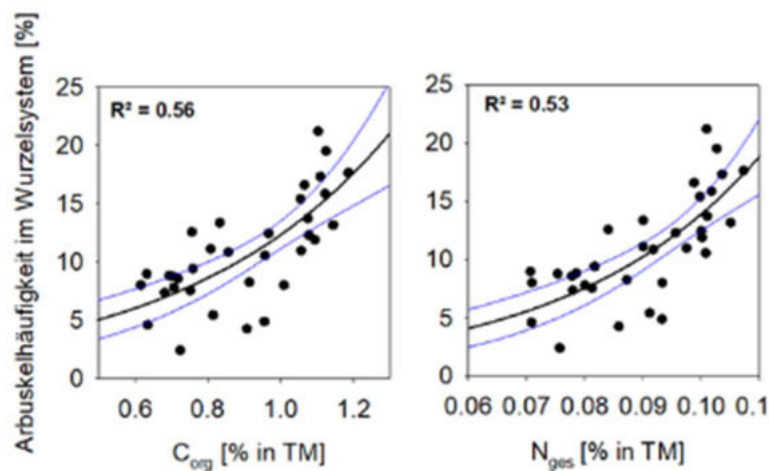
Um dies zu genauer zu verstehen wurde für jedes Untersuchungsjahr die ‚Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem‘ mit der Textur am genauen Standort korreliert (Abbildung 31). Da für diese Variable keine signifikanten Effekte der Inokulierung auf die Mykorrhiza beobachtet wurde, wurden die Daten zusammen betrachtet und Mittelwerte für gleiche Texturen mittels eines Histogramms gebildet. Es ergab sich eine Texturbreite von ca. 10  $\mu\text{m}$  für jeden Einzelmittelwert. In der Tat bestätigen die Analysen, dass eine erhöhte Mykorrhizabesiedlung der Wurzeln von Mais im Jahresvergleich auch innerhalb der Feldareale mit räumlich heterogener Textur auftreten (Abbildung 31). Es tritt in beiden Untersuchungsjahren, sowie in einem Referenzdatensatz von 2017 eine Abnahme der Arbuskelhäufigkeit mit der Korngröße auf. Zwar unterscheiden sich die Antwortstärke (Anstieg der Regression) mit den Untersuchungsjahren und Flächen, der Trend ist jedoch der gleiche. Maispflanzen innerhalb der gleichen Fruchtfolge, auf unterschiedlichen Schlägen mit jahresabhängigen Schwankungen in den klimatischen Bedingungen scheinen Mykorrhizasymbiosen stärker auf feiner texturierten Böden einzugehen als auf gröber texturierten Böden. Die Standorte waren generell durch leichte, sandige, bis sandig-schwach lehmige Böden gekennzeichnet. Ein Anstieg der Tonfraktion begünstigte Mykorrhizasymbiosen.



**Abbildung 31: Die Die Beziehung zwischen der mittleren Korngröße und der Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem auf nach Bioland-Richtlinien.**

Um weiteren Aufschluss über die für die Symbioseausbildung der Pflanzen begünstigenden Bedingungen zu gewinnen wurde eine Korrelationsanalyse mit den Nährstoffgehalten am Standort durchgeführt. Diese Analysen zeigen, dass Standorte

vergleichsweise reich an organischer Bodensubstanz und (organischem) Stickstoff die Mykorrhizasymbiose in Mais begünstigen (Abbildung 32). Es wurde auch untersucht ob die Pflanzennährstoffgehalte die Mykorrhizabildung in der Wurzel beeinflussten, da bekannt ist, dass Pflanzen die Wurzelbesiedlung bei ausreichender Nährstoffversorgung in artifiziellen Systemen unterdrücken können. Dies bestätigte sich nicht. Die Phosphor- und Stickstoffgehalte in der Pflanzentrockenmasse erklärten nur marginal die Varianz der Arbuskelhäufigkeit in den Wurzeln (P:  $R^2 = 0.07$ , N:  $R^2 = 0.02$ ) über Jahre hinweg. Dies spricht dafür, dass die Bodenbedingungen unter Feldbedingungen entscheidend für die Ausbildung der MYkorrhizasymbiose in Mais waren (Abbildung 31, Abbildung 32).



**Abbildung 32: Der Zusammenhang zwischen dem Kohlenstoffgehalt ( $C_{org}$ ) und dem Stickstoffgehalt ( $N_{ges}$ ) Böden und der Arbuskelhäufigkeit im Wurzelsystem (schwarze Linie, Regression, blaue Linien, 95% Konfidenzintervalle).**

Analog zu den Maisversuchen wurden in randomisierter Streifenanlage auf zwei unterschiedlichen Standorten in den Jahren 2020 und 2021 Kartoffelversuche unter konventioneller Bewirtschaftung angelegt. In Übereinstimmung mit den Topfversuchen konnte weder eine nennenswerte Kolonisierung der Wurzeln mit Mykorrhizapilzen nachgewiesen werden (siehe Bericht Institut für Pflanzenkultur), noch konnte eine Wirkung von Mykorrhizen auf die Nährstoffaufnahme der Kartoffeln nachgewiesen werden. Es wurde je Streifen im Versuch zehn Sprossproben hinsichtlich der Pflanzenstickstoff- und Phosphorgehalte im Jahr 2020 dennoch untersucht. Zwar zeigte sich hier auch, ähnlich wie im Maisversuch 2020, eine räumliche Abhängigkeit der Phosphor- und Stickstoffversorgung der Kartoffeln (Block Faktor

für Phosphor:  $P = 0.034$ , Block Faktor für Stickstoff:  $P = 0.006$ ), die Inokulierungseffekte, wenn sie auftraten, bedürfen aber keiner weiteren Analyse, da keine physiologisch relevante Mykorrhizasymbiose beobachtet werden konnte. Letzteres ist konsistent mit den Topfversuchen mit der Kartoffel. Da hier nicht die Grundvoraussetzungen vorlagen, um die Projektziele zu erreichen, wurde von weiteren Analysen abgesehen und die Maisversuche im Verlauf wie oben dargestellt vertieft analysiert und beschrieben.

Als weitere Aufgabe bestand, eine Kosten-Nutzenrechnung für die eingesetzten AMF-Präparate für die Feldversuche zu erstellen. Da in keinem Falle eine Ertragssteigerung, noch eine Steigerung innerer Qualitätsparameter der Kulturen durch den Einsatz der AMF-Präparate statistisch nachgewiesen werden konnte, erhöhen sich die Kulturkosten schlicht um die Anwendungskosten der AMF-Präparate. Dies bedarf keiner genaueren Kostenkalkulation, da der zusätzliche Einsatz von AMF-Präparaten keinen wirtschaftlichen Erfolg für Anbauer generierte. Es wird im Verlauf aber auf in der Projektlaufzeit schwerer quantifizierbare Ökosystemleistungen durch AMF-Präparate hingewiesen.

#### **2.4.4.3 Schlussfolgerungen mit Bezug zur Zielstellung**

Ziel des Projektes war es, mit Hilfe des Einsatzes von Mykorrhizapräparaten im Feld die Ertragsstabilität von Körnermais und Kartoffel in der Fläche zu erhöhen, da dies die Möglichkeit bietet gleichzeitig einen ökonomischen Nutzen für Anbauer zu generieren und die Ressourcennutzungseffizienz der Kulturen in der Fläche durch teilflächenspezifische Applizierung der Präparate zu steigern. Hierfür war zum einen die Beweisführung nötig, dass applizierte Präparate funktionale Symbiosen mit den Kulturen eingehen, zum anderen musste die räumliche Heterogenität der Bodenbedingungen bekannt sein, um zu verstehen wo applizierte Mykorrhizapräparate womöglich am effektivsten wirken können.

Es konnte erfolgreich eine molekularbiologisch basierte Methodik entwickelt werden, die zum Nachweis des Anwachsens der applizierten Mykorrhizapräparate im Feld dienen kann. Die Methode grenzt erfolgreich gegen natürlich vorkommende Mykorrhizapilze ab und kann auf einfach zu konstruierende Pilzfallen im Boden, aus



denen Pilzbiomasse gewonnen werden kann, angewendet werden. Ebenfalls erfolgreich konnte die Aussagekraft einer räumlich hoch aufgelösten Kartierung der Bodentextur für die Ertragsbildung, Pflanzennährstoffaufnahme und Mykorrhizasymbiose gezeigt werden. In Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung im Feld war die Nährstoffversorgung der Böden zum Ende der Kultur über Jahre und Flächen gut bestimmbar und offenbarte eine Abhängigkeit der Mykorrhizasymbiose von der flächigen Verteilung der mittleren Korngröße und der Nährstoffgehalte der Böden.

Die Etablierung der Mykorrhizasymbiose durch die eingesetzten Präparate war nur teilweise erfolgreich und schien sowohl von den Umweltbedingungen der Untersuchungsjahre als auch von der Kulturführung abzuhängen. Im Jahr, wo Boden- und Witterungsbedingungen in Wechselwirkung zu vergleichsweise geringen Erträgen führten, konnte eine verstärkte Mykorrhizabildung und eine erfolgreiche Etablierung der eingesetzten Präparate im Feld für die Maiskultur nach Bioland-Richtlinien beobachtet werden. Sowohl der Einfluss der Textur als auch die erfolgreiche Etablierung der eingesetzten Mykorrhizapräparate schwanden im Folgejahr unter günstigeren Wachstumsbedingungen. Die Untersuchungen an der konventionell bewirtschafteten Kartoffelkultur zeigten, dass die Böden zum einen verarmt an (Mykorrhiza-) Bodenleben sind und zum anderen eine erfolgreiche Etablierung eingesetzter Präparate nicht erlauben. Dies konnte direkt auf den Boden und dessen Eigenschaften zurückgeführt werden. Es zeigt sich, dass der erfolgreiche Einsatz von Mykorrhizapräparaten im Feld, ähnlich wie das Pflanzenwachstum stark abhängig von den Standortbedingungen abhängig ist und ein sinnvoller Einsatz weiterer Forschung bedarf, aber möglich erscheint.

Da nur im Topf ein positiver Beitrag der Mykorrhizapräparate zur Nährstoffaufnahme der Maiskulturen in Abhängigkeit von der Bodenart gezeigt werden konnte, aber nicht im Feld, wurde es nicht möglich zu untersuchen, ob eine teilflächenspezifische Applizierung der Mykorrhizapräparate zu einem gesteigerten ökonomischen Nutzen für den Anbauer führen kann. Wir können daher den jetzigen Einsatz produzierter Mykorrhizapräparate weder uneingeschränkt empfehlen noch deren Wirksamkeit für die angestrebte ökologische Intensivierung der Landwirtschaft verneinen. Denn

eines zeigen die Untersuchungen in unserem Falle klar, Kulturführungen mit reduziertem Pflanzenschutz und organischer Düngung schützen die Anwesenheit nützlicher Bodenmikroben zu denen AMF gehören und konventionelle Bewirtschaftung der Böden führt zu einer Verarmung dieser nützlichen Mikroben. Auch wenn die Ökosystemleistungen der AMF im Rahmen dieses Projektes nicht eingeschätzt werden können, muss berücksichtigt werden, dass AMF natürliche Bestandteile der Pflanzen- und Bodenmikroflora sind, wichtig für die Ressourcennutzungseffizienz der Pflanzen sein können, nachweislich wichtige Komponenten der Bodenstrukturbildung darstellen und direkte Einträger von organischer Substanz in den Boden sind, da sie als biotrophe Organismen direkt Kohlenstoff der Pflanze im Boden leiten und nicht in Konkurrenz um die Kohlenstoffreserve im Boden mit Zersettern gehen.

## **2.4.5 Zielerreichung über die gesamte Projektlaufzeit**

### **2.4.5.1 Körnermais**

Das Ausbringen von Mykorrhiza mit dem Saatgut zeigte eine signifikant höhere Häufigkeit der Mykorrhizierung im Wurzelsystem (F%) im Vergleich zur Kontrolle sowie der Variante 'Trägermaterial'. Die Behandlung von Mais hatte also einen positiven Einfluss auf die Mykorrhizierung. Der Wert lag bei dieser Variante bei 52,3 %, was eine gute Mykorrhizierung bestätigt.

Die Intensität der Mykorrhizierung ist bei der entsprechenden Variante ebenfalls signifikant höher als bei den anderen Varianten. Die oben genannte These kann damit als bestätigt betrachtet werden.

In Versuch 949 (Kapitel 2.4.3.2) unter den Richtlinien des Bioland-Verbandes konnten insgesamt auch in den unbehandelten Kontrollen höhere Mykorrhizierungswerte als in V948 festgestellt werden. Dies zeigt wiederum, dass sich Mykorrhiza in Böden, die unter kontrolliert-biologischen Anbaubedingungen bewirtschaftet werden, besser etablieren kann als auf konventionell bewirtschafteten.

Die Erträge aus dem Versuch schwankten, wie oben erwähnt, in den Wiederholungen sehr stark. Die ersten Wiederholungen aus jeder Variante wiesen die höchsten

Erträge auf, gefolgt von den zweiten und den vierten Wiederholungen. Die dritten Wiederholungen brachten in jeder Variante die geringsten Erträge. Dieses Phänomen muss auf die vorherrschenden Bodenbedingungen zurückgeführt werden. Dass die Bodenbeschaffenheiten in diesen Bereichen variieren, konnte durch den bewirtschaftenden Landwirt Michael Cordts bestätigt werden. Insgesamt wies jedoch die Kontrolle im Durchschnitt mit 6,64 t/ha den höchsten Ertrag auf. Für den Standort ist der erzielte Ertrag relativ gering, was auf die kalten Frühjahrstemperaturen und das damit einhergehende späte Auflaufen der Saat begründet werden kann.

Der geringe Proteingehalt der Proben kann auf den im biologischen Anbau limitierenden Faktor Stickstoff zurückgeführt werden. Unter anderem wurde dies in einer Studie von Kassow *et al.* (Analyse von Grundfutterqualitäten ökologischer und konventioneller Milchviehbetriebe im Rahmen des Projektes „Klimawirkungen und Nachhaltigkeit von Landbausystemen“, 2011) herausgestellt. Zwischen den einzelnen Varianten konnten keine signifikanten Unterschiede herausgestellt werden.

Der DON-Wert wies in der Kontrolle die niedrigsten Werte auf. Hierfür gibt es keine Erklärungsansätze, die sich durch die Literatur decken lassen. Im Erntejahr 2020 lagen die DON-Gehalte in Körnermais auf einer steigenden Kurve (Mechtler *et al.*; Monitoringprogramm für Mykotoxine in Körnermais 2020; 2021). Allerdings gab es 2020 auch mehr Niederschlag in den Sommermonaten, der die Toxinbildung fördert.

Die Energiewerte bzw. das nutzbare Rohprotein des Maises, nXP, erreicht in allen Varianten nur knapp den von der LUFA vorgegebenen Zielwert von mindestens 150 g/kg. Dies kann wie oben beschrieben wiederum auf den Anbau unter biologischen Bedingungen und der damit geringen Stickstoffverfügbarkeit zurückgeführt werden.

#### **2.4.5.2 Kartoffeln**

Die Häufigkeit der Mykorrhizierung im Wurzelsystem (F%) aller Varianten lag unter 4 %. Werte unter 10 % sind als sehr gering mykorrhiziert zu bewerten. Zwar weist die Kontrolle die geringste Mykorrhizierung auf, jedoch erreichte die Flüssigbehandlung der Knollen einen nur minimal gesteigerten Wert. Die Variante 'Trägermaterial'

bewirkte die häufigste Mykorrhizierung. Hier wurde jedoch keine Mykorrhiza hinzugegeben. Ein Grund der gesteigerten Mykorrhizierung könnte sein, dass sich die natürliche Mykorrhiza durch den Blähton besser im Boden etablieren konnte. Die Ergebnisse zeigen erneut, dass eine Mykorrhizabehandlung der Kartoffeln beim Legen unter diesem Management keine Steigerung der Häufigkeit der Mykorrhizierung im Vergleich zu unbehandelten Knollen ergeben hat.

Die Intensität der Mykorrhizierung im Wurzelsystem (M%) war bei allen Varianten sehr gering, was den Ergebnissen vorangegangener Versuche in Kartoffeln bei konventionell wirtschaftenden Betrieben entspricht.

Die Erträge der Varianten zeigen im Mittelwert keine großen Differenzen. In der Kontrolle und der Mykorrhiza-Variante konnten die letzten Wiederholungen als positive Ausreißer festgestellt werden. Dies kann auf die vorherrschenden Bodenbeschaffenheiten zurückgeführt werden. Insgesamt zeigen die behandelten Varianten eine größere Homogenität als die Kontrolle.

Die Knollensortierung zeigt eine für die Sorte normale Verteilung. Wega ist eine Sorte mit relativ großen Knollen, sodass die Anteile der Übergrößen von im Durchschnitt 33 % gerechtfertigt sind. Zwischen den Varianten konnten keine großen Unterschiede festgestellt werden.

Im vorherigen Jahr des Versuches wurde anstatt KAS das Düngemittel Alzon flüssig eingesetzt. Um einen Effekt des verwendeten Stickstoffdüngers zu untersuchen, wurde in diesem Versuchsjahr das Düngemittel gewechselt. Das Ergebnis zeigt keinen Unterschied durch die beiden Düngemittel.

Der Topfversuch zeigt zunächst, dass bis auf die zwei Ausreißer jegliche Art von Düngung den Ertrag steigert. Außerdem brachten die Hoagland-Varianten die höchsten Erträge. Das kann zum großen Teil darauf zurückgeführt werden, dass die Düngevarianten wöchentlich aufgebracht wurden. Andere Düngemittel wurden zu Beginn des Versuches in die Töpfe eingebracht und stellen damit die landwirtschaftliche Praxis dar. Bei einem Einbringen der Nährstoffe in einem wöchentlichen Rhythmus kann die Pflanze natürlich optimal und zeitnah mit Nährstoffen versorgt werden, ohne dass chemische Prozesse im Boden längerfristig stattfinden.

Außerdem zeigte der Topfversuch, dass Mykorrhiza am stärksten unter regelmäßiger Düngung mit Hoagland 10-fach mehr Nitrat gewachsen ist. Eine Erklärung könnte sein, dass die Kartoffelpflanzen dieses direkt pflanzenverfügbare Nitrat in einer optimalen Menge aufnehmen und die Pflanzenentwicklung dadurch problemlos ablaufen konnte.

#### **2.4.6 Beitrag des Ergebnisses zu förderpolitischen EIP Themen**

Das Ziel von EIP Agri ist, einen Beitrag für eine wettbewerbsfähige, nachhaltig wirtschaftende und tierartgerechte Land- und Ernährungswirtschaft durch die Verbesserung der Zusammenarbeit zwischen landwirtschaftl. Betrieben, Wissenschaft und Beratung sowie Unternehmen des Agrar- und Ernährungssektors zu leisten. Das Projekt Precision-AMF hatte zum Ziel, wettbewerbsfähige Ackerbauwirtschaftssysteme zu entwickeln, um effizientes und ressourcenschonendes Nährstoffmanagement zu unterstützen. Die automatisierte und gezielte Applikation von Mykorrhiza im Feld erwies sich als funktional, um die Nährstoffaufnahme in und das Wachstum der (Mais-) Pflanzen unter gleichen Nährstoffverfügbarkeiten/Düngungen zu stärken. Aus Nachhaltigkeitsaspekten ist dies wünschenswert, da mit dieser Methode Nährstoffe verstärkt in der pflanzlichen Biomasse gebunden werden, und dadurch weniger in die Atmosphäre entweichen oder ins Grundwasser oder Oberflächengewässer ausgewaschen werden. Aus wirtschaftlicher Sicht sind höhere Nährstoffgehalte in den Kulturpflanzen und verbessertes Wachstum die Voraussetzung für Landwirte, um die durch die Mykorrhiza-Applikationen zusätzlich entstehenden Kosten kompensieren zu können. Sogenannte Ökosystemdienstleistungen der Mykorrhiza sind ohne Frage gegeben, aber schwer in monetären Nutzen umzurechnen.

#### **2.4.7 Nebenergebnisse**

keine

#### **2.4.8 Arbeiten, die zu keiner Lösung/zu keinem Ergebnis geführt haben**

Entgegen der vieljährigen Erfahrungen des Institutes für Pflanzenkultur in Topfversuchen konnte keine Mykorrhizierung der Kartoffel im Feldversuch nachgewiesen

werden. In zahlreichen Versuchen im Gewächshaus, die unabhängig vom EIP-Projekt sind, konnte Mykorrhiza an Kartoffeln nachgewiesen werden. Die Aufklärung des Faktors, der im Feldboden die Entwicklung der Mykorrhiza (auch der natürlichen) verhindert, ist noch nicht abgeschlossen, möglich sind Fungizide oder ungünstige Nährstoffkombinationen.

Die zugrundeliegenden Ursachen für die Inhibierung der Mykorrhizabildung in der Kartoffelkultur auf konventionell bewirtschafteten Böden konnten innerhalb dieses Projektes nicht aufgeklärt werden. Die Texturkartierung der Flächen für die Kartoffelkultur konnte zusätzlich nicht durchgeführt werden. Das Zusammenspiel von Witterungsbedingungen und pandemiebedingten Einschränkungen der Reisetätigkeit im Jahr 2020 erlaubte die Kartierung der Areale für die Kartoffelkultur nicht. Da die Flächen für die Kartoffelkultur durch lehmigere Bodenbedingungen gekennzeichnet waren als die Areale für Mais, war eine zeitnahe Kartierung zeitlich zwar möglich, aber die Befahrbarkeit mit dem Geophilus-Messsystem nicht gewährleistet. Wir zeigen in diesem Projekt zwar, dass die Texturkartierungen über Jahre hinweg Vorhersagekraft für den Nährstoffhaushalt der Böden besitzt, sahen aber trotzdem von einer nachträglichen Kartierung ab, da wiederholte Versuche unsererseits und anderer Projektbeteiligten zeigten, dass die wichtige Grundlage, und zwar die Mykorrhizierung der Pflanzen auf Böden dieser Areale keine vielversprechenden Ergebnisse hervorbrachten. In Folge dessen wurden die Ressourcen des Projektes, die nicht für die geplanten Analysen der Kartoffelkultur aufgewendet wurden, eingesetzt, um den Stichprobenumfang und die Analysen für die Maiskultur zu intensivieren und damit die Aussagekraft dieser Studien zu erhöhen.

#### **2.4.9 Mögliche weitere Verwendung von Investitionsgütern**

keine

#### **2.5 Nutzen der Ergebnisse für die Praxis: Sind verwertbare/nutzbare Empfehlungen, Produkte, Verfahren oder Technologien entstanden**

Ziel des Projektes war es, mit Hilfe des Einsatzes von Mykorrhizapräparaten im Feld die Ertragsstabilität von Körnermais und Kartoffel in der Fläche zu erhöhen, da dies die Möglichkeit bietet gleichzeitig einen ökonomischen Nutzen für Anbauer zu ge-

nerieren und die Ressourcennutzungseffizienz der Kulturen in der Fläche durch teilflächenspezifische Applizierung der Präparate zu steigern. Hierfür war zum einen die Beweisführung nötig, dass applizierte Präparate funktionale Symbiosen mit den Kulturen eingehen, zum anderen musste die räumliche Heterogenität der Bodenbedingungen bekannt sein, um zu verstehen wo applizierte Mykorrhizapräparate wo möglich am effektivsten wirken können.

Es konnte erfolgreich eine molekularbiologisch basierte Methodik entwickelt werden, die zum Nachweis des Anwachsens der applizierten Mykorrhizapräparate im Feld dienen kann. Die Methode grenzt das eingesetzte Inokulum erfolgreich gegen natürlich vorkommende Mykorrhizapilze ab und kann auf einfach zu konstruierende Pilzfallen im Boden, aus denen Pilzbiomasse gewonnen werden kann, angewendet werden. Ebenfalls erfolgreich konnte die Aussagekraft einer räumlich hoch aufgelösten Kartierung der Bodentextur für die Ertragsbildung, Pflanzennährstoffaufnahme und Mykorrhizasymbiose gezeigt werden. In Abhängigkeit von der Korngrößenverteilung im Feld war die Nährstoffversorgung der Böden zum Ende der Kultur über Jahre und Flächen gut bestimmbar und offenbarte eine Abhängigkeit der Mykorrhizasymbiose von der flächigen Verteilung der mittleren Korngröße und der Nährstoffgehalte der Böden.

Die Etablierung der Mykorrhizasymbiose durch die eingesetzten Präparate war nur teilweise erfolgreich und schien sowohl von den Umweltbedingungen der Untersuchungsjahre als auch von der Kulturführung abzuhängen. Im Jahr, wo Boden- und Witterungsbedingungen in Wechselwirkung zu vergleichsweise geringen Erträgen führten, konnte eine verstärkte Mykorrhizabildung und eine erfolgreiche Etablierung der eingesetzten Präparate im Feld für die Maiskultur nach Bioland-Richtlinien beobachtet werden. Sowohl der Einfluss der Textur als auch die erfolgreiche Etablierung der eingesetzten Mykorrhizapräparate schwanden im Folgejahr unter günstigeren Wachstumsbedingungen. Die Untersuchungen an der konventionell bewirtschafteten Kartoffelkultur zeigten, dass die Böden zum einen verarmt an (Mykorrhiza-) Bodenleben sind und zum anderen eine erfolgreiche Etablierung eingesetzter Präparate nicht erlauben. Dies konnte direkt auf den Boden und dessen Eigenschaften zurückgeführt werden. Es zeigt sich, dass der erfolgreiche Einsatz von Mykorrhizapräparaten im Feld, ähnlich wie das Pflanzenwachstum stark abhängig von

den Standortbedingungen abhängig ist und ein sinnvoller Einsatz weiterer Forschung bedarf, aber möglich erscheint.

Da nur im Topf ein positiver Beitrag der Mykorrhizapräparate zur Nährstoffaufnahme der Maiskulturen in Abhängigkeit von der Bodenart gezeigt werden konnte, aber nicht im Feld, wurde es nicht möglich zu untersuchen, ob eine teilflächenspezifische Applizierung der Mykorrhizapräparate zu einem gesteigerten ökonomischen Nutzen für den Anbauer führen kann. Eines zeigen die Untersuchungen in unserem Falle klar, Kulturführungen mit reduziertem Pflanzenschutz und organischer Düngung schützen die Anwesenheit nützlicher Bodenmikroben zu denen AMF gehören und konventionelle Bewirtschaftung der Böden führt zu einer Verarmung dieser nützlichen Mikroben. Auch wenn die Ökosystemleistungen der AMF im Rahmen dieses Projektes nicht eingeschätzt wurden, muss berücksichtigt werden, dass AMF natürliche Bestandteile der Pflanzen- und Bodenmikroflora sind, wichtig für die Ressourcennutzungseffizienz der Pflanzen sein können, nachweislich wichtige Komponenten der Bodenstrukturbildung darstellen und direkte Einträger von organischer Substanz in den Boden sind, da sie als biotrophe Organismen direkt Kohlenstoff der Pflanze im Boden leiten und nicht in Konkurrenz um die Kohlenstoffreserve im Boden mit Zersetzern gehen. Aus den Ergebnissen lassen sich vor allem Empfehlungen für den Körnermaisbau ableiten: Besonders gut funktionieren Dosiersysteme, die das Trägermaterial mit dem Inokulum direkt in die Saatzfurche bringen.

Im Kartoffelversuch V948 zeigte sich, dass der verwendete Mikrogranulatstreuer nicht in der Lage war, das Trägermaterial korrekt zu dosieren. Ob dieses am Trägermaterial oder an der Maschine selber lag, kann im Nachhinein nicht mehr mit ausreichender Sicherheit beantwortet werden.

## **2.6 (Geplante) Verwertung und Nutzung der Ergebnisse**

Für die Praxis wichtige Befunde dieses Projektes sind, dass konventionell bewirtschaftete Böden an Mykorrhizen verarmen können, während integriert bewirtschaftete Böden Mykorrhizen konservieren. Im Zuge der Erkenntnis, dass gesunde Böden wichtige Ökosystemleistungen bereitstellen können, ist dies auch für die Praxis



von Bedeutung, weil es ein Qualitätsmerkmal für die Produktion pflanzlicher Erzeugnisse darstellen könnte.

Das entwickelte Verfahren zum Etablierungserfolg der Mykorrhiza-Präparate stellt eine Technologie für Produzenten (und Anwender) der Mykorrhiza-Präparate bereit, dass zur Qualitätskontrolle der Produkte eingesetzt werden kann. Die Einschränkung hierbei ist, dass dieses Nachweisverfahren spezifisch für das Produkt entwickelt werden muss.

Die gewonnenen Erkenntnisse sind vor allem aus agroökologischer Sicht von hoher Relevanz. Für die Verwertung der Ergebnisse seitens des IGZ ist eine Publikation in einer einschlägigen wissenschaftlichen internationalen Fachzeitschrift mit dem Arbeitstitel:

„The spatial texture dependency of mycorrhizal development in organic maize cultures“ geplant.

## **2.7 Wirtschaftliche und wissenschaftliche Anschlussfähigkeit: Gibt es weitergehende (wissenschaftliche) Fragestellungen aus den Projektergebnissen, die zukünftig zu bearbeiten sind?**

Eine Reihe wissenschaftlicher Fragestellungen leiten sich aus den im Projekt gewonnenen Ergebnissen ab. Zunächst wäre es wichtig zu verstehen, was ursächlich für die schwache Ausbildung der Mykorrhizasymbiose auf konventionell bewirtschafteten Böden ist. Eine Reihe von Faktoren gilt es hier zu untersuchen. Ist der erhöhte Eintrag von mineralischen Düngern, der vermehrte Einsatz von Pflanzenschutzmitteln, eine intensivere mechanische Bodenbearbeitung die Pilzgeflechte zerstört oder der höhere Anteil von Schwarzbrachen in denen Wirte der Mykorrhiza abwesend sind ursächlich, oder ein Zusammenspiel aller Faktoren? Ist dies verstanden, können Anpassungen der Kulturmaßnahmen getestet werden, die ermöglichen, nicht nur die Pflanzenkultur, sondern auch die Mykorrhizen im Feld zu schützen.

Weiterhin geben die Ergebnisse Hinweise darauf, dass Mykorrhizen fein texturierte Böden bevorzugen. Hierfür wäre zu beantworten, ob Mykorrhizen, wie viele Pilze, auf höhere Wassergehalte in fein texturierten Böden angewiesen sind oder ob die

höhere Nährstoffbindung in Böden mit höherem Tonanteil zu einer relativen Nährstofflimitierung bei gleicher Düngung führen, was die Kulturpflanzen dazu ‚motiviert‘ die Mykorrhizen vermehrt als Nährstofflieferanten zu ‚nutzen‘. Erst wenn dies verstanden wird, kann auch die Ökosystemleistung der Mykorrhiza sinnvoll eingeschätzt und bilanziert werden. Es schließen sich die Fragen an, ob und wann Mykorrhiza zur Nährstoffnutzungseffizienz der Pflanzen im Feldanbau direkt beiträgt, ob eine Ausbringung applizierter Nährstoffe vermehrt in die Pflanzenbiomasse fließt und nicht auswäscht und ob die Bildung der Bodenstruktur und die Speicherung der organischen Bodensubstanz gefördert werden, wenn Mykorrhizapilze anwesend sind.

Im Projekt wurde auch der Nutzen einer hochaufgelösten räumlichen Kartierung der Bodentextur für das ressourcenschonende landwirtschaftliche Nährstoffmanagement der Zukunft aufgezeigt. Da die Bodentextur variabel im Raum, aber sehr konstant in der Zeit ist, könnte zukünftig die bedarfsgerechte und teilflächenspezifische Ausbringung von Nährstoffen anhand der Bodentexturkartierung zum einen den Einsatz von Düngern reduzieren (ökonomischer Nutzen), zum anderen die Ökobilanz der Landwirtschaft durch verringerte Nährstoffverluste in ungewünschte Senken verbessern (ökologischer Nutzen). Voraussetzung hierfür ist der Einsatz von ‚Precision-Farming‘ Technologien zur GPS-gestützten Düngung und die Verfügbarkeit dieser Technologien für Landwirte.

In den Körnermaisversuchen wurde festgestellt, dass die Mykotoxingehalte DON in der Mykorrhiza-Variante deutlich höher waren als in den Kontrollgruppen. Es müssen weitere Feldversuche angestellt werden, um den Grund für diese problematische Erhöhung feststellen zu können oder um herauszufinden, ob es nur ein Jahreseffekt war. Weiterhin sollte der Einsatz der Mykorrhizapräparate im Kartoffelanbau weiter ausgebaut werden, auch auf konventionellen Böden.

## **2.8 Kommunikations- und Disseminationskonzept: Darstellung in welcher Weise die Ergebnisse kommuniziert oder verbreitet wurden, ggf. mit Verweis auf Veröffentlichungen und Angaben von Quellen. Grundsätzliche Schlussfolgerungen (ggf. Fazit zur Eignung von EIP-Förderung zur Generierung von Innovation und Schließung von Lücken zwischen Praxis und Wissenschaft) und eventuelle Vorschläge zur Weiterentwicklung von EIP Agri**

Das Projektvorhaben wurde im Rahmen des vom Innovationszentrum Niedersachsen GmbH organisierten Treffens ‚Our Sacred Soil‘ des EIP Netzwerk Agrar und Innovation auf dem Versuchsbetrieb der Universität Wageningen (Noorderdiep 211, 7876 CL Valthermond) in den Niederlanden unter dem Titel:

‚Using digital soil texture mapping for subarea-specific field application of Mycorrhizas‘

in einer 15 minütigen Präsentation am 3.12.2019 vorgestellt.

Weiterhin wurden die Projektergebnisse im Rahmen des Wissenschaftlichen Kolloquiums am IGZ am 26.1.2021 mit dem Titel:

‚Project Precision-AMF: A case of doing science within a production setting‘

in einer 30 minütigen Präsentation vorgestellt, zu dem externe und interne Wissenschaftler\*innen und Mitarbeiter\*innen eingeladen waren.

Weitere Aktivitäten zur Verbreitung der Ergebnisse laufen schwerpunktmäßig im Netzwerk der GKB (900 Mitglieder), aber darüber hinaus auch für die interessierte Öffentlichkeit.

Für Precision-AMF hat OG-Mitglied GKB die Ergebnisse bei Kartoffeln und Körnermais gemeinsam mit den OG-Partnern aufgearbeitet und für die Veröffentlichung in einem gemeinsamen Fachartikel (deutsch) zusammengestellt.

### 1.1 Social-Media-Kanäle

- Posts im Facebook Kanal der GKB in Verknüpfung mit Instagram

### 1.2 Homepage der GKB

- Pflege Projektseite innerhalb der GKB Homepage

- Aktualisierungen der Homepage mit aktuellen Verknüpfungen zu den Projektpartnern
- Veröffentlichung von Ergebnissen auf der Projektseite
- Veröffentlichung von Terminen und Artikeln über die Projektseite

### 1.3 Mailings GKB Netzwerk

- Informationen zu Projektterminen, Webinaren über das GKB Netzwerk und Werbung
- Vermittlung von Interessenten

### 1.4 Feldtag

- Vorbereitung und Unterstützung Feldtag am 22.06.2022 in Solkau
- Bewerbung und Mailing zum Feldtag innerhalb des Netzwerkes der GKB
- Bewerbung auf den social media Kanälen der GKB
- Registrierung und Anmeldung der Teilnehmer

EIP-Eignung und Verbesserungspotenzial: Das EIP-Programm bietet das Potential, wissenschaftliche Grundlagenforschung in Kontakt mit den Anwendern zu bringen in exzellenter Weise, vor allem durch die Bildung der operativen Gruppen deren Mitglieder verschiedene Hintergründe haben, von der Urproduktion bis zur Wissenschaft. Hierdurch lernen alle Parteien dazu, die Ansprüche an die valide Erkenntnisgewinnung in wissenschaftlichen Versuchen durch die Praxisbetriebe werden gestärkt, sowie die Wahrnehmung der Wissenschaften für die praktischen Probleme, die in der Landwirtschaft Realität sind. Dies ist unserer Einschätzung nach ein wirksames Format, für den beiderseitigen Wissenstransfer zwischen Praxis und Forschung.

Eine wirksame Verbesserung für den Erfolg und die Innovationskraft der EIP-Projekte, die zum Ziel haben, wie hier biologische Agenzien zur ökologischen Intensivierung der landwirtschaftlichen Praxis zu stärken, wären längere Projektlaufzeiten

mit angemessener Finanzierung (Stichwort Deckelung) sinnvoll. Auch unser Projekt zeigt, dass ökologische sowie ökonomische Nutzen solcher Projekte und Produkte stark von den Umweltbedingungen abhängen, da biologisch-basierte Produkte, ähnlich wie Pflanzen, auf Umweltfaktoren reagieren, die derzeit nicht vorhersagbar sind. Valide Bilanzierungen von Nutzen und Anpassung solcher Produkte unter Praxisbedingungen im Feld sind daher nur über längere Anbauperioden möglich und nötig. Zurzeit bieten die Projektlaufzeiten über ca. drei Jahre eher die Möglichkeit z.B. eine Technologie für eine bestimmte Kulturmaßnahme zu verbessern, als Ökosystemleistungen biologisch basierter Pflanzenhilfsstoffe zu bilanzieren.