

GLOBAL 2000

WIR
KÄMPFEN
FÜR DAS
SCHÖNE.



ALTERNATIVEN IN DER DRAHTWURM- BEKÄMPFUNG BEI KARTOFFELN

EIP AGRI Projekt - Endbericht
Jänner 2020

Mit Unterstützung von Bund, Ländern und Europäischer Union

 Bundesministerium
Landwirtschaft, Regionen
und Tourismus


LE 14-20
Entwicklung für den Ländlichen Raum

Europäischer
Landwirtschaftsfonds für
die Entwicklung des
ländlichen Raums:
Hier investiert Europa in
die ländlichen Gebiete.



Projektdaten

Titel:	Alternativen in der Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln
Programm:	EIP-AGRI, 1. Ausschreibung, 2015
Fördernummer:	16.1.1-S2-09/15 und 16.2.1-S2-09/15
Förderwerber:	ARGE Drahtwurm
Projektleitung:	DI Claudia Meixner
Kontaktdaten:	GLOBAL 2000 Umweltforschungsinstitut Neustiftgasse 36, 1070 Wien claudia.meixner@global2000.at , +43 1 8125730-49
Für den Inhalt des Berichts verantwortlich:	<u>GLOBAL 2000:</u> DI Claudia Meixner Dr. Peter Schweiger DI Anna Pollak
Projektpartner:	<u>ARGE Drahtwurm:</u> Interessensgemeinschaft Erdäpfelbau, Erzeugergemeinschaft Bauernerdäpfel Verkaufs GmbH, Erdäpfelhof Rauchberger, Giner Kartoffel & Gemüse GmbH, Sauwalderdäpfel Eduard Paminger KG, Bauernhof Paul, DI Johannes Mayer, Paul Votzi <u>AGES:</u> Mag. Katharina Wechselberger <u>MELES GmbH:</u> Dr. Patrick Hann, Mag. Birgit Putz <u>Agroscope:</u> Dr. Giselher Grabenweger, DI Lara Reinbacher <u>Universität Innsbruck:</u> Dr. Michael Traugott, Msc. Christiane Zeisler <u>Landwirtsch. Fachschule Hollabrunn:</u> DI Harald Summerer, Franz Ecker
Projektwebsite:	www.global2000.at/arge-drahtwurm
Schlagwörter:	Agriotes, Kartoffel, Metarhizium, Lockpflanzen
Fördersumme:	493.257,29 €
Projektlaufzeit:	1. März 2016 bis 31. Jänner 2020

Vorwort

Der Drahtwurm ist ein komplexer Organismus und seine Bekämpfung für Landwirte eine schwierige und wichtige Aufgabe. Nachdem ein hochwirksamer aber eben auch sehr giftiger Wirkstoff zur Bekämpfung des Drahtwurms seit 2016 nicht mehr für den Kartoffelbau zur Verfügung steht, war die Forschung gefragt: Alternativen zur Bekämpfung eines sehr gefährlichen Schädling mit möglichst geringen negativen Umweltauswirkungen sollten gefunden werden.

Global 2000 setzt seit Jahren auf eine Kombination aus Bewusstseinsbildung und der Suche nach praktikablen und nachhaltigen Lösungen für Probleme in der Landwirtschaft und im Gartenbau. Ein Team aus ExpertInnen beschäftigt sich seit mittlerweile 16 Jahren gemeinsam mit ProduzentInnen erfolgreich mit der Reduktion oder dem Ersatz chemisch synthetischer Pflanzenschutzmittel.

Einige dieser Landwirte leisteten maßgebliche Beiträge zu dem wissenschaftlichen Projekt, das Global 2000 gemeinsam mit dem Ingenieurbüro Meles, der AGES, dem schweizerischen Forschungsinstitut Agroscope und der Universität Innsbruck im März 2016 startete. Eine praktikable und ökologisch nachhaltige Bekämpfung des Drahtwurms ist für die Landwirtschaft und die Umwelt gleichermaßen wichtig. Aufgrund von Klimawandel und dramatischen Biodiversitätsverlust muss alles in unserer Macht stehende getan werden, um eine sichere Lebensmittelversorgung ohne umweltschädliche Nebenwirkungen zu gewährleisten.

Vieles ist uns in dem nun abgeschlossenen Projekt gelungen, doch es sind auch einige Fragen offen geblieben, die in weiteren Projekten beantwortet werden müssen, um die Versorgung mit heimischen Kartoffeln auch weiterhin sicherzustellen. Der Weg, komplexe Fragen des Pflanzenschutzes, mit Hilfe der Wissenschaft und alternativer Methoden zu beantworten, ist jedenfalls der einzig richtige. Wir danken allen, die ihn in diesem Projekt mit uns gegangen sind.

Danksagung

Diese Personen haben das Projekt durch ihre Arbeit oder durch ihren fachlichen Input unterstützt, sie haben die Sicht der Praxis in das Projekt eingebracht oder ihre Flächen für Versuche zur Verfügung gestellt und damit wesentlich zum Gelingen dieses Projekts beigetragen. Dafür bedanken wir uns ganz herzlich!

Andreas Bauer	Josef Fiedler
Anita Kamptner	Julia Votzi
Birgit Putz	Karl Paul
Christiane Zeisler	Katharina Wechselberger
Edmund Rauchberger jun.	Lara Reinbacher
Edmund Rauchberger sen.	Leopold Brandstetter
Eduard Paminger	Liane Bauer
Franz Bauer	Martin Paminger
Franz Ecker	Michael Traugott
Giselher Grabenweger	Patrick Hann
Harald Summerer	Paul Votzi
Johann Wagner	Romed Giner
Johannes Mayer	Thomas Mattes

Weiters bedanken wir uns bei den Praktikantinnen und den Freiwilligen, Emmanuelle Poujaud, Katrin Schlöglmann, Victoria Wieser, Verena Aschauer, Elisabeth Prokschi, Teresa Gfäller, Christina Buchinger, Klaudia Kainz, Diana Fritz und Kerstin Krückl, die uns mit großem Einsatz am Feld oder bei den Bonituren unterstützten.

Die Projektpartnerschaft wurde ermöglicht durch eine Förderung der Europäischen Innovationspartnerschaft Landwirtschaft (EIP Agri), die aus EU-, nationalen und Länder-Mitteln finanziert wird. Wir bedanken uns bei Gerhard Pretterhofer und Michael Wolf und den Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern der Bewilligenden Stelle und der Netzwerkstelle Zukunftsraum Land für die Unterstützung bei der Abwicklung des Projekts.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung.....	1
1. Einleitung.....	5
1.1 Problemstellung.....	5
1.2 Stand des Wissens und Wissenslücken zu Projektbeginn.....	6
1.3 Projektziel.....	8
1.4 Endbericht.....	9
2 Material und Methoden.....	10
2.1 Drahtwurmorkommen.....	10
2.1.1 Köderfallen, Bodenproben.....	10
2.1.2 Bestimmung von Drahtwürmern.....	12
2.1.3 Ausweichverhalten von Drahtwürmern.....	13
2.2 Laborversuche mit <i>Metarhizium brunneum</i>	15
2.2.1 Virulenztests durch Tauchen in Sporensuspension.....	15
2.2.2 Virulenztests auf natürlichen Böden.....	16
2.2.3 Pilzgerste Qualitätsbestimmung.....	17
2.2.4 Bestimmung Sporendichten im Boden.....	18
2.3 Exaktversuche auf Praxisstandorten.....	19
2.3.1 <i>Metarhizium brunneum</i>	19
2.3.2 Versuche mit Bodenfräse.....	35
2.3.3 Statistik/Auswertung.....	40
3. Ergebnisse.....	42
3.1 Drahtwurmorkommen.....	42
3.1.1 Verbreitung in Österreich und kleinräumige Verteilung an Standorten.....	42
3.1.2 Saisonaler Verlauf der Drahtwurmaktivität auf Ackerstandorten (Weinviertel)	43
3.1.3 Saisonaler Verlauf der Drahtwurmdichten im Grünland (Tirol).....	45
3.1.4 Ausweichverhalten von Drahtwürmern.....	46
3.2 Laborversuche mit <i>Metarhizium brunneum</i>	48

3.2.1 Virulenz-Tests durch Tauchen in Sporensuspension.....	48
3.2.2 Virulenz-Tests auf natürlichen Böden.....	49
3.2.3 Pilzgerste Qualitätsbestimmung.....	51
3.3 Freilandversuche.....	52
3.3.1 Exaktversuche mit Metarhizium.....	52
3.3.2 Versuche mit Bodenfräse.....	67
4 Diskussion.....	71
4.1 Drahtwurm vorkommen.....	71
4.2 Metarhizium brunneum.....	74
5 Schlussfolgerungen und Ausblick.....	80
7 Literatur.....	83

Zusammenfassung

Projektaktivitäten und Ergebnisse

Drahtwürmer, die im Boden lebenden Larven von Schnellkäfern, verursachen in Österreich allein in Kartoffeln Schäden von mehreren Millionen Euro pro Jahr. Ziel dieses Projekts war es, effektive und praxistaugliche Alternativen zum Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln zu entwickeln und zu erproben. Dies vor dem Hintergrund, dass in der konventionellen Kartoffelproduktion derzeit zugelassene Insektizide bei hohem Befallsdruck an ihre Wirkungsgrenzen stoßen und auch im Biokartoffelbau effektive Bekämpfungsoptionen fehlen.

Zum Erreichen des Projektziels wurden Freilanduntersuchungen in mehreren Produktionsgebieten unter gängigen Produktionsbedingungen und in enger Zusammenarbeit mit Praktikern durchgeführt. Zusätzlich dazu wurden Grundlagenkenntnisse zur Verbreitung und saisonalen Aktivität ökonomisch relevanter Drahtwurmartens erarbeitet. Diese wurden durch Versuche zur art-spezifischen Virulenz verschiedener Stämme des insektenpathogenen Pilzes *Metarhizium brunneum* unter kontrollierten Bedingungen ergänzt.

Die im Zuge der Antragstellung erwarteten Ergebnisse wurden erarbeitet:

- Die auf Kartoffelflächen im Wein-, Wald- und Innviertel sowie dem Tiroler Ober- und Unterland vorkommenden Drahtwurmartens wurden quantifiziert und anhand morphologischer Merkmale sowie mithilfe von DNA-Analysen bestimmt;
- Die Virulenz verschiedener Stämme des entomopathogenen Pilzes *Metarhizium brunneum* gegen die in Österreich ökonomisch relevanten Drahtwurmartens wurde identifiziert;
- Die Wirkung von hoch-virulenten Pilzstämmen und einer Spezialfräse zur Reduktion von Drahtwurmschäden in Kartoffelbeständen wurde in mehrortigen Versuchen quantifiziert;
- Der ergänzende Einfluss einer Anlockung von Drahtwürmern durch Einsaat attraktiver Pflanzen sowohl in Zwischenfrüchten vor Kartoffeln als auch in Kartoffelbeständen auf die Wirksamkeit einer direkten Bekämpfungsmaßnahme wurde bewertet.

Evaluierung der Projektziele

Die Arbeiten innerhalb des Projekts lassen sich thematisch drei Bereichen zuordnen, zu denen bei der Antragstellung jeweils angestrebte Ziele ausformuliert worden waren.

1. Charakterisierung der Drahtwurmvorkommen auf möglichen Versuchsstandorten

Manche Drahtwurmarten haben ihren Verbreitungsschwerpunkt in klimatisch wärmeren und trockeneren Regionen (z.B. *Agriotes ustulatus* im Weinviertel, Marchfeld), andere kommen hauptsächlich in Regionen mit kühlerem und feuchterem Klima vor (z.B. *Agriotes obscurus* vom Waldviertel westwärts). Auf Ackerstandorten war ein markanter saisonaler Wechsel zwischen Aktivitätsphasen, während denen Drahtwürmer der Art *A. ustulatus* sich in der obersten Bodenschicht aufhalten und Phasen, während denen sie aufgrund ungünstiger Umweltbedingungen in tiefere Bodenschichten abtauchen, festzustellen. Dieser Jahresverlauf variierte abhängig von Standortbedingungen wie Kulturart und Witterung. Auf einem umgebrochenen Grünlandstandort konnten keine vergleichbaren Schwankungen im Auftreten der Drahtwürmer (*A. sputator* und *A. obscurus*) in der obersten Bodenschicht beobachtet werden.

2. Erprobung der Wirksamkeit von entomopathogenen Pilzstämmen zur Bekämpfung von Drahtwurmlarven

Für alle in Österreich verbreitet vorkommenden Arten der Gattung *Agriotes* wurden unter kontrollierten Bedingungen hochwirksame *Metarhizium brunneum*-Stämme identifiziert. Verschiedene Pilzstämmen wiesen art-spezifische Unterschiede in ihrer Virulenz gegen Drahtwürmer auf. In Klimakammerversuchen wurde auch in natürlichen Böden eine hohe Virulenz von *M. brunneum* gezeigt. Allerdings wurde ein Einfluss des Bodens auf das Ausmaß der Pilzwirkung festgestellt, dessen Ursachen noch nicht bekannt sind.

3. Untersuchung der Wirksamkeit von Bekämpfungsmaßnahmen

In insgesamt sieben mit mehrfacher Wiederholung jeder Behandlungsvariante angelegten Exaktversuchen in Nieder-, Oberösterreich und Tirol wurde die Wirksamkeit einer Ausbringung von zwei *Metarhizium brunneum* Stämmen bzw. einer Fräsbehandlung zur Reduktion von Drahtwurmschäden an Kartoffelknollen untersucht. Wurde Pilzpräparat 1 gemeinsam mit Lockpflanzen in einem Kartoffelbestand eingesetzt, konnte in einem der Versuche eine Schadensreduktion bei den Kartoffeln um durchschnittlich 33% festgestellt werden. Im zweiten Versuchsjahr mit Pilzpräparat 1 und in anderen Versuchen mit Pilzpräparat 2, die bis auf eine Ausnahme einen sehr hohen Drahtwurmbefall aufwiesen,

konnte weder durch einen insektenpathogenen Pilz noch durch Fräsbehandlung eine praxisrelevante Reduktion der angefressenen Knollen erzielt werden.

Die bei der Antragstellung für die drei Themenbereiche angestrebten Ziele wurden somit erreicht. Da aber mit keinem der im Projekt getesteten Bekämpfungs-Ansätze sowohl in der Zwischenfrucht vor Kartoffeln als auch in Kartoffeln eine praxisrelevante Reduktion der Drahtwurmschäden erzielt wurde, konnte das übergeordnete Ziel dieses Projekts, nämlich die Entwicklung und Erprobung effektiver, praxistauglicher Alternativen zum Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln nur teilweise erreicht werden.

Forschungsbedarf

Auf Basis der umfangreichen im Projekt durchgeführten Aktivitäten und intensiven Diskussionen mit allen Partnern aus Praxis und Forschung wurden einige Bereiche identifiziert, in denen zum Erreichen einer effektiven Drahtwurmbekämpfung weiterer Forschungsbedarf besteht:

- a. Prognosemodelle zur Vorhersage von Drahtwurm-Aktivitätsphasen können wichtige Entscheidungsgrundlagen für Strategien zur Minimierung von Drahtwurmschäden sein. Für genauere Vorhersagen braucht es neben mehr Daten zum Einfluss des Bodenklimas auf die Aktivitätsphasen von Drahtwürmern auch ein noch besseres Verständnis dafür, welche weiteren Umweltfaktoren das extrem plastische Auftreten der Drahtwürmer bestimmen.
- b. Die Wirksamkeit einer Drahtwurmbekämpfung mit dem insektenpathogenen Pilz *Metarhizium brunneum* hängt sowohl von Standort- und Witterungsbedingungen ab als auch von Aspekten der Durchführung wie z.B. dem Zeitpunkt der Pilz-Ausbringung oder einer Kombination mit Anlockpflanzen („Attract&Kill“). Eine praxisrelevante Reduktion von Drahtwurmschäden mithilfe von *M. brunneum* erscheint nur nach Klärung dieser Zusammenhänge erfolgversprechend.
- c. Ein weiterer Aspekt, der über den Bekämpfungserfolg von *Metarhizium*-Präparaten entscheidet, ist die Qualität der Pilzpräparate. In der Produktion gilt es große Sporenmengen und eine hohe Keimfähigkeit der Pilzsporen zu erzielen sowie Verunreinigungen zu vermeiden. Hier geht es demnach darum, den Herstellungsprozess zu optimieren und außerdem die Qualitätssicherung zu verbessern.

d. Ergebnisse zum saisonalen Verlauf der Drahtwurmaktivität deuten auf einen reduzierenden Einfluss einer Bodenbearbeitung im Sommer auf die Aktivität vor allem der jungen Larven hin. Für einen möglichst praxistauglichen und auch ökologisch nachhaltigen Einsatz von Bodenbearbeitung zur direkten Drahtwurmbekämpfung sind weitere Erkenntnisse zu geeigneten Zeitfenstern erforderlich und dazu, wie dies ohne Reduktion des Bodenumusgehalts bewerkstelligt werden kann.

e. Neben Boden, Landschaftsstruktur und Klima, beeinflusst die Bewirtschaftungsgeschichte einer landwirtschaftlichen Fläche maßgeblich die darin auftretende Drahtwurmdichte und somit das Risiko von Drahtwurmschäden. Immer wieder berichten Landwirte über geringere Drahtwurmschäden bei bestimmten Bewirtschaftungsvarianten. Dieser wertvolle Erfahrungsschatz lässt sich allerdings meist nicht nutzen, da keine vergleichbaren Aufzeichnungen vorhanden sind. Die im betrieblichen Alltag ständig dokumentierten schlagspezifischen Bewirtschaftungsdaten könnten gemeinsam mit relevanten Begleitdaten in einer Datenbank gesammelt und mit standardisierten Daten zu Drahtwurmschäden verknüpft werden, um nach entsprechender Analyse mit modernen statistischen Methoden wertvolle Informationen zur Entwicklung und laufenden Optimierung drahtwurmreduzierender Bewirtschaftungsmaßnahmen zu erhalten.

Schlussfolgernd legen die Erkenntnisse aus diesem Projekt nahe, dass eine effektive Drahtwurmbekämpfung einen mehrjährigen Ansatz erfordert. Dabei sollten Drahtwurmpopulationen auf den Anbauflächen mit einer Kombination verschiedener Maßnahmen stetig reduziert werden. Die Herausforderung bei der Umsetzung einer solchen mehrjährigen Strategie wird es sein, die einzelnen Bekämpfungsmaßnahmen in die betriebliche Praxis einzubauen.

1. Einleitung

1.1 Problemstellung

Drahtwürmer sind die im Boden lebenden Larven von Schnellkäfern. Sie können enorme wirtschaftliche Schäden an Kartoffeln und vielen anderen Kulturen wie Mais, Karotten, Zwiebel oder Spargel verursachen. Bei Kartoffeln bohren sich Drahtwürmer in die Knollen, hinterlassen typische Fraßlöcher und vermindern dadurch den Anteil der vermarktbarer Knollen. Laut Landwirtschaftskammer Niederösterreich verursachen Drahtwürmer einen Ernteverlust von im Durchschnitt 30.000 Tonnen pro Jahr (Kamptner 2017). 2018 waren die Verluste mit über 100.000 Tonnen noch deutlich dramatischer. Insgesamt belaufen sich die durch Drahtwürmer an Kartoffeln verursachten Schäden in Österreich auf mehrere Millionen Euro pro Jahr.

Drahtwürmer stellen sowohl in der konventionellen als auch in der biologischen Landwirtschaft ein großes Problem dar. Bisher wurden Drahtwürmer hauptsächlich durch den Einsatz von Insektiziden bekämpft. Früher gegen Drahtwürmer häufig eingesetzte Pestizide wie beispielsweise Carbofuran, Lindan oder Aldicarb sind den deutlich verschärften Zulassungskriterien zum Opfer gefallen und nicht mehr verfügbar. Auch das relativ gut wirksame Goldor Bait (Wirkstoff Fipronil) wurde vom Zulassungsinhaber vom Markt genommen. In den Jahren 2006 bis 2019 waren in Österreich Pflanzenschutzmittel gegen Drahtwürmer in Kartoffeln nur auf Basis zeitlich beschränkter Notfallzulassungen verfügbar. Erst seit 2019 sind mit Belem 0.8 MG (Wirkstoff Cypermethrin) und Force Evo (Wirkstoff Tefluthrin) wieder zwei Produkte für die konventionelle Landwirtschaft regulär zugelassen. Bei starkem Befallsdruck kommen diese aber schnell an ihre Wirkungsgrenzen. Im Biolandbau sind aktuell keine Pflanzenschutzmittel gegen Drahtwürmer zugelassen.

Da zu erwarten ist, dass Drahtwürmer durch den Klimawandel auch in Zukunft stark schädigend auftreten werden, besteht die dringende Notwendigkeit, alternative Bekämpfungsmaßnahmen auszuarbeiten. Zu diesem Zweck wurde das vorliegende Projekt „Alternative Methoden in der Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln“ mit Unterstützung von Bund, Ländern und der Europäischen Union durchgeführt. Im Rahmen des Projekts sollten Grundlagen zum Vorkommen und Auftreten von Drahtwürmern sowie deren Ökologie auch mit einem Fokus auf Antagonisten erarbeitet werden. Aufbauend auf den gewonnenen Erkenntnissen war es ein definiertes Ziel des Projekts, die Effektivität und Praxistauglichkeit von zwei Alternativen zum Einsatz von

chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der direkten Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln zu untersuchen und zu bewerten. Im Fokus standen der Einsatz von insektenpathogenen Pilzen bzw. die Bekämpfung mit einer Spezialfräse nach gezielter Anlockung der Drahtwürmer. Dadurch sollte mit dem Projekt ein ökologisch wertvoller Lösungsbeitrag zu einem aktuell ungelösten Problem in der Kartoffelproduktion geleistet werden.

1.2 Stand des Wissens und Wissenslücken zu Projektbeginn

Die Bekämpfung von Drahtwürmern stellt für betroffene Betriebe eine große Herausforderung dar. Dafür verantwortlich sind mehrere Faktoren wie z.B. die unterirdische, zwischen verschiedenen Bodentiefen wechselnde Lebensweise der Drahtwürmer, vorhandene Lücken im Wissen über deren Ökologie sowie das gleichzeitige Vorkommen mehrerer Drahtwurmartens auf einer Fläche. So können verschiedene Drahtwurmartens ähnliche Schäden hervorrufen, obwohl sich diese Arten in ihrer Biologie wesentlich unterscheiden. Für eine effektive Bekämpfung von Drahtwürmern müssen die vorkommenden Arten und deren Lebenszyklus bekannt sein um z.B. sicherzustellen, dass direkte Bekämpfungsmaßnahmen zu Zeitpunkten durchgeführt werden, zu denen sie eine effektive Wirkung erzielen. Auch gilt es zu vermeiden, dass nur eine Art getroffen wird, während die anderen verschont bleiben (Barsics et al. 2013).

Von der landwirtschaftlich besonders bedeutsamen Gattung *Agriotes* ist für Österreich das Vorkommen von 14 Arten beschrieben (Cate 2007 zitiert in Staudacher et al. 2013). In der Studie von Staudacher et al. (2013), die in den Jahren 2007-2009 auf landwirtschaftlich genutzten Flächen durchgeführt wurde, wurden Individuen der Arten *Agriotes obscurus*, *A. sputator*, *A. brevis* und *A. ustulatus* häufig identifiziert. Seltener waren *A. lineatus* und *A. proximus* vertreten, und von *A. litigiosus* wurde auf den insgesamt 85 untersuchten Flächen nur ein Individuum gefunden. Deutliche Unterschiede fanden sich in der geographischen Verteilung der Arten: so wiesen *A. ustulatus* und *A. brevis* einen Verbreitungsschwerpunkt in klimatisch wärmeren und trockeneren Regionen auf, während *A. obscurus*, *A. lineatus* und *A. proximus* hauptsächlich in Regionen mit kühlerem und feuchterem Klima vorkamen. *A. sputator* wurde in allen Regionen gefunden. Aufbauend auf diesen Informationen sollten im Rahmen des vorliegenden Projekts vertiefende Kenntnisse über das artspezifische Vorkommen der verschiedenen wirtschaftlich relevanten Drahtwurm-Arten in Österreich gewonnen werden, mit einer Schwerpunktsetzung auf Kartoffelproduktionsgebiete und da auf Schlägen mit Kartoffeln in der Fruchtfolge. Weiters sollten die Untersuchungen zeigen, inwieweit Informationen

aus anderen Ländern (Burghause & Schmitt 2011; Čačija et al. 2018) eine klimawandelbedingte Arealausweitung von eher wärmeliebenden Arten auch für Österreich bestätigen.

Die Entwicklung der Drahtwürmer im Boden dauert mehrere Jahre, während der bis zu 15 Larvenstadien durchlaufen werden. Deshalb befinden sich im Boden meist Drahtwürmer verschiedenen Alters, die unterschiedliche Aktivitätsphasen und Nahrungsvorlieben haben (Traugott et al. 2014). Für die in Österreich vorkommenden Arten mit ökonomischer Bedeutung als Schädlinge an Ackerkulturen sind hauptsächlich zwei Aktivitätsphasen beschrieben worden, während der sie in der obersten Bodenschicht an unterirdischen Pflanzenorganen fressen: eine im späten Frühjahr/Frühsummer und eine im Spätsommer/Herbst. Untersuchungen in Deutschland (Jung et al. 2014) haben gezeigt, dass Aktivitätsphasen von Drahtwürmern durch den jahreszeitlichen Verlauf von Bodenfeuchte und Bodentemperatur maßgeblich beeinflusst werden. Bei ungünstigen Bedingungen und Gefahr ziehen sich Drahtwürmer in bis zu 70 cm Tiefe zurück. Dort können sie problemlos mehrere Monate ohne Nahrung überdauern.

Die oben erwähnten Ergebnisse von Jung et al. (2014) haben die Möglichkeit aufgezeigt, Aktivitätsphasen von Drahtwürmern in der obersten Bodenschicht mit einiger Sicherheit anhand bodenmeteorologischer Daten zu prognostizieren. Dies würde eine große Erleichterung bei der Planung und Durchführung von direkten Bekämpfungsmaßnahmen bedeuten bzw. für Landwirte eine Entscheidungshilfe bei der terminlichen Festlegung einer Kartoffelernte darstellen. Für das österreichische Kartoffelhauptanbaugebiet mit einer von der deutschen Studie abweichenden Artenzusammensetzung konnte in vorangegangenen Untersuchungen kein vergleichbar enger Zusammenhang zwischen Bodenklima und Aktivitätsphasen festgestellt werden (Hann et al. 2013). Diese Informationslücke zu schließen war das Ziel des internationalen Projektes ElatPro (ERA-NET, C-IPM). In diesem Projekt erhoben Partner aus 6 europäischen Ländern Aktivitätsdaten von Drahtwürmern an Praxisstandorten um die Einflussfaktoren auf das Wanderverhalten verschiedener Drahtwurmartens zu untersuchen. Im Rahmen dieses Projekts wurden zu ElatPro Synergien hergestellt, indem an einem ostösterreichischen Standort die Drahtwurmaktivität kontinuierlich bestimmt, sowie begleitend die Bodenart und der Verlauf von Bodentemperatur und -feuchte mithilfe von Dataloggern aufgezeichnet wurden.

Für die direkte Bekämpfung von Drahtwürmern stellt der Einsatz von insektenpathogenen Pilzen eine vielversprechende Methode des biologischen Pflanzenschutzes dar (Ansari et

al. 2009). Eine erste wichtige Grundvoraussetzung für den Erfolg dieser Methode ist die Virulenz der eingesetzten Pilze gegen die vorkommenden Schadorganismen. So konnten in Labor- und Glashausversuchen einer schweizerischen Studie mit einem von einem Drahtwurm isolierten Stamm des Pilzes *Metarhizium brunneum* (ART 2825) vielversprechende Ergebnisse gegen manche Drahtwürmer erzielt werden (Eckard et al. 2014). Ähnliche Untersuchungen mit Drahtwurmarten, die einen Verbreitungsschwerpunkt im ostösterreichischen Kartoffelhauptanbaugebiet aufweisen, waren noch ausständig. Eine fundierte Bewertung der Effektivität einer Bekämpfung mit einem unter Laborbedingungen hoch virulenten *M. brunneum*-Stamm unter gängigen österreichischen Produktionsbedingungen, sowie diverser Aspekte der Praxistauglichkeit einer solchen Bekämpfungsmaßnahme, fehlten ebenfalls. In kanadischen Freilandstudien mit *M. brunneum* wurde ein im Vergleich zu einem chemisch-synthetischen Insektizid ähnlich hoher bis höherer Bekämpfungserfolg gegen Drahtwürmer erzielt (Reddy et al. 2014). Etliche Bodenschädlinge können auch mechanisch mithilfe von Bodenbearbeitungsmaßnahmen wie Fräsen und Eggen bekämpft werden. Engerlinge von Blatthornkäferarten und von ihnen verursachte Schäden konnten durch solche Maßnahmen stark reduziert werden (Keller & Zimmermann 2005). Eine erfolgreiche mechanische Bekämpfung von den im Vergleich zu Engerlingen viel robusteren Drahtwürmern wurde in deutschen Feldversuchen erzielt (Hof-Kautz 2013). Dabei kam eine Spezialfräse mit besonders hoher Schlagkraft sowie dicht sitzenden und speziell gehärteten Messern zum Einsatz. Da diese Fräse eine Arbeitsbreite von ca. 15 cm aufweist und aus rein arbeitstechnischen Gründen ein Acker damit nicht ganzflächig bearbeitet werden kann, setzt diese Methode ein konzentriertes, streifenförmiges Auftreten der Drahtwürmer voraus. Bisherige Untersuchungen zeigten allerdings, dass Drahtwürmer eine flächig sehr heterogene und nicht voraussagbare Verteilung aufweisen. Das Wissen, dass Drahtwürmer durch CO₂ angelockt werden, was ihrer primären Orientierung zu Wurzeln hin dient (Traugott et al. 2014), kann genutzt werden, um sie in bestimmten Bereichen zu konzentrieren. Dazu können für Drahtwürmer attraktive Pflanzen verwendet werden. Die Praxistauglichkeit einer Anlockung in Kombination mit einer direkten Bekämpfungsmaßnahme, durch Fräsen oder Ausbringen von insektenpathogenen Pilzen, zur Reduktion von Drahtwurmschäden sowie diverse Aspekte ihrer praktischen Umsetzung in Kartoffelbeständen waren zu Projektbeginn größtenteils noch unbekannt.

1.3 Projektziel

Ausgehend vom vor Projektbeginn bestehenden Wissensstand war die Entwicklung und Erprobung effektiver, praxistauglicher Alternativen zum Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der Drahtwurmbekämpfung bei Kartoffeln das übergeordnete Ziel des vorliegenden Projekts. Da eine effektive Bekämpfung ohne Insektizide eine genaue Kenntnis der Ökologie der vorkommenden, ökonomisch relevanten Drahtwurmart voraussetzt, bildeten Arbeiten zur Verbreitung, dem zeitlichen Auftreten und der räumlichen Verteilung von Drahtwürmern einen wesentlichen Schwerpunkt (A) im Projekt. Ein zweiter Schwerpunkt (B) waren Arbeiten zum Einsatz von insektenpathogenen Pilzen. Die dafür notwendigen Grundlagenkenntnisse zur art-spezifischen Virulenz verschiedener Pilzstämme gegen die in Österreich vorkommenden Drahtwurmart, auch beeinflusst von Umweltfaktoren, sollten im Rahmen des Projekts erarbeitet werden. Einen dritten Schwerpunkt (C) umfassten die unter Praxisbedingungen durchgeführten Untersuchungen zur Bewertung der Wirksamkeit von direkten Bekämpfungsmaßnahmen gegen Drahtwürmer. Innerhalb dieser drei Schwerpunktbereiche waren wiederum eigene Teilziele definiert worden.

Alle Arbeiten bauten einerseits auf vor Projektbeginn bereits vorhandenen Informationen auf, andererseits flossen neue, sowohl im Rahmen dieses Projekts als auch außerhalb davon generierte Informationen, in die Planung der Tätigkeiten ein. Zur Sicherstellung, dass die Arbeiten auf dem aktuellsten Wissensstand durchgeführt wurden, mussten einige Änderungen gegenüber der ursprünglichen Planung vorgenommen werden, die an den Auftraggeber zur Genehmigung gemeldet wurden.

1.4 Endbericht

In dem vorliegenden Endbericht sind alle Aktivitäten zusammengefasst und die Ergebnisse sowie die dazu verwendeten Methoden dargestellt und diskutiert. Weiters umfasst der Endbericht Schlussfolgerungen, die im Rahmen intensiver Diskussion der erzielten Ergebnisse mit allen am Projekt Beteiligten abgeleitet wurden, sowie einen Ausblick auf vom Konsortium als zukünftig noch notwendig erachtete Forschungsarbeiten. Eine ausführliche Beschreibung der gesamten Projektaktivitäten liegt in Form fortlaufend gestalteter Zwischenberichte sowie dem abschließenden Aktivitäts-Endbericht vor, die auch auf der Internetseite von GLOBAL 2000 zur Einsichtnahme heruntergeladen werden können.

2 Material und Methoden

2.1 Drahtwurmorkommen

2.1.1 Köderfallen, Bodenproben

Für die Charakterisierung der Drahtwurmorkommen wurden Informationen Diese Informationslücke zu schließen war das Ziel des internationalen Projektes ElatPro (ERA-NET, C-IPM). In diesem Projekt erhoben Partner aus 6 europäischen Ländern Aktivitätsdaten von Drahtwürmern an Praxisstandorten um die Einflussfaktoren auf das Wanderverhalten verschiedener Drahtwurmart zu untersuchen. , sollte im Rahmen dieses Projekts wurden zu ElatPro Synergien hergestellt, indem an einem ostösterreichischen Standort die Drahtwurmaktivität kontinuierlich bestimmt, sowie begleitend die Bodenart und der Verlauf von Bodentemperatur und -feuchte mithilfe von Dataloggern aufgezeichnet wurden.n von vielen Landwirten aus Niederösterreich, Oberösterreich und Tirol eingeholt. Die eingegangenen Meldungen über Flächen mit hohem Drahtwurmorkommen wurden von GLOBAL 2000 und Meles (NÖ und OÖ) bzw. der Universität Innsbruck (UIBK; Tirol) gesichtet, und nach einer Bewertung wurden Flächen für das Screening ausgewählt. Dieses Screening diente einerseits zur Bestimmung der geografischen Verbreitung der verschiedenen Drahtwurmart in den österreichischen Kartoffelanbaugebieten, andererseits der Identifikation von für Bekämpfungsversuche geeigneten Freilandstandorten. Auf den ausgewählten Flächen wurden zu geeigneten Zeitpunkten Köderfallen in rasterförmiger Anordnung vergraben, um das Auftreten und die Verteilung von Drahtwürmern zu bestimmen.

Die mit Weizen- und Maiskörnern befüllten Köderfallen wurden bis zu einer Bodentiefe von 15 cm eingegraben. Nach ca. zwei Wochen im Freiland waren die Weizen- und Maiskörner gekeimt und hatten mit dem abgegebenen Kohlendioxid in der Nähe befindliche Drahtwürmer in die Köderfallen gelockt (Abbildung 1).

Zu diesem Zeitpunkt wurden die Köderfallen geborgen und nach Drahtwürmern durchsucht. Die Drahtwurmzahl pro Falle spiegelt die Dichte an aktiv nach Nahrung suchenden Drahtwürmern in der Umgebung der Falle in der Fangperiode wider. Dabei muss berücksichtigt werden, dass die Lockwirkung der Falle von verschiedenen Faktoren wie Bodenart, Witterung und dem Vorhandensein anderer CO₂-Quellen, wie zB. Pflanzenwurzeln, beeinflusst wird. Die gefundenen Drahtwürmer wurden entweder in Alkohol konserviert, eingefroren oder lebend für eine nachfolgende Bestimmung aufbewahrt.

Lebende Drahtwürmer wurden für nachfolgende Laborversuche im Rahmen des Projekts an die jeweiligen Projektpartner geliefert.



Abbildung 1: Köderfalle mit eintretenden Drahtwürmern in einer Fläche mit starkem Befall

Köderfallen wurden auch dazu verwendet, um den saisonalen Verlauf der Drahtwurmaktivität an einem ausgewählten Standort (Goggendorf im Weinviertel) aufzuzeichnen. Im Frühjahr 2016 wurde ein Transekt angelegt, entlang dessen 10 Köderfallen in einem Abstand von je 6 m eingegraben wurden. Diese Fallen wurden im Zeitraum April bis November in einem Intervall von 1-2 Wochen ausgetauscht. An 3 Terminen wurden zusätzlich Bodenproben zur Drahtwurmdichtebestimmung gezogen. Parallel dazu wurden die Bodentemperatur und Bodenfeuchte mit Dataloggern kontinuierlich aufgezeichnet. Zusätzlich zur Bestimmung der Aktivität von Drahtwürmern anhand von Köderfallen wurden im Boden auftretende absolute Dichten an Drahtwürmern mithilfe von Bodenproben bestimmt. Dafür wurden Stahlzylinder mit definiertem Durchmesser und Höhe in den Boden eingeschlagen und die Anzahl der Drahtwürmer im so entnommenen Bodenvolumen erhoben. Der Boden wurde entweder händisch nach Drahtwürmern durchsucht oder die Drahtwürmer wurden mithilfe von Kempson-Extraktoren aus dem Boden in Auffanggefäße getrieben (Abbildung 2).



*Abbildung 2: Kempson-Extraktor im Bodenlabor der UIBK.
Mittels Hitze werden die Bodentiere aus den Proben getrieben
und fallen in die in Kühlflüssigkeit stehenden Auffanggefäße.*

2.1.2 Bestimmung von Drahtwürmern

Die Drahtwürmer (Abbildung 3) wurden morphologisch bestimmt (Klausnitzer 1994), ihre Körperlängen und die Kopfkapselbreiten vermessen. Zur Absicherung der morphologischen Bestimmung wurden einige Drahtwürmer an der Universität Innsbruck mittels molekularbiologischer Methoden untersucht. Zu diesem Zweck wurden mittels einer auf Chelex basierenden Extraktionsmethode DNA-Extrakte von allen zu analysierenden Drahtwürmern hergestellt. Mit allgemeinen Barcoding-Primern wurde in der PCR ein Abschnitt des COI-Gens, das für die Artbestimmung geeignet ist, amplifiziert, im Anschluss sequenziert und aufgrund der Unterschiede zu den Sequenzen anderer *Agriotes*-Arten identifiziert (Staudacher et al. 2011).



Abbildung 3: Merkmale bestimmter Drahtwurmarten, morphologische Bestimmung. © Meles GmbH

2.1.3 Ausweichverhalten von Drahtwürmern

Für die Bestimmung des Einflusses verschiedener biotischer Faktoren auf den Aufenthaltsort von Drahtwürmern in der Bodensäule wurde bei der AGES ein Säulenversuch unter kontrollierten Umweltbedingungen durchgeführt. Für den Versuch wurden aus PVC-Rohren mit einem Durchmesser von 5 cm Segmente von 5 cm Höhe geschnitten, die zu einer Höhe von insgesamt 25 cm (5 Segmente) zusammengefügt wurden. Die Säulen wurden mit Erde befüllt. Der Versuch wurde mit 5 Varianten durchgeführt, mit jeweils unterschiedlicher Zusammensetzung der Segmente (Abbildung 4):

Variante 1: Erdäpfel und Weizen („Lockstreifen“)

Variante 2: Erdäpfel ohne Weizen

Variante 3: *Metarhizium brunneum* und Weizen

Variante 4: *Metarhizium brunneum* ohne Weizen

Variante 5: Unbehandelte Variante/ Kontrolle

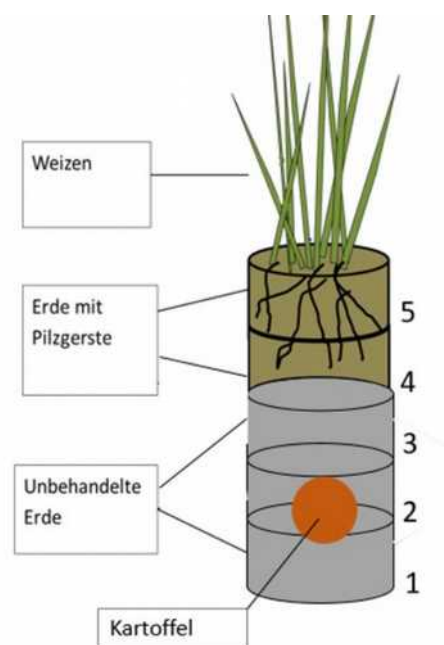


Abbildung 4: Versuchsdesign
Säulenversuch, Untersuchung des
Ausweichverhaltens von
Drahtwürmern. © AGES

Fünf Drahtwürmer (*Agriotes ustulatus*) je Säule wurden zu Versuchsbeginn ins oberste Säulensegment eingesetzt. Jede Variante wurde in 8 Wiederholungen (8 Säulen) angebaut. Der Versuch wurde 1 Woche nach Versuchsbeginn beendet und ausgewertet. Dabei wurde der Aufenthaltsort der Larven in der Bodensäule bestimmt, indem die Segmente einzeln nach Drahtwürmern durchsucht wurden. Zusätzlich wurde auch der Feuchtegehalt der Erde pro Segment ermittelt. In einem Vorversuch konnte eine gleichbleibende Temperatur und Feuchte in allen Segmenten bestätigt werden.

2.2 Laborversuche mit *Metarhizium brunneum*

2.2.1 Virulenztests durch Tauchen in Sporensuspension

2.2.1.1 Pilzstämme und Drahtwurmarten

In mehreren Versuchen wurde die Virulenz von drei *Metarhizium brunneum*-Stämmen gegen insgesamt fünf in Österreich vorkommende Drahtwurmarten untersucht. Zwei Pilzstämme waren ursprünglich von Drahtwürmern isoliert worden (Stamm A=ART2825 von *Agriotes obscurus* in der Schweiz; Stamm C von *Agriotes* spp. in Deutschland), ein Stamm (Stamm B=Bipesco5/F52) von einem Apfelwickler (*Cydia pomonella*) in Österreich. Einzelsporen-Isolate dieser Pilze wurden auf einem selektiven Medium vermehrt: Sabouraud 2 %, Glukose Agar (SDA) mit Antibiotika (Cycloheximid: 0.05 g/l, Streptomycinsulfat: 0.6 g/l, Tetracyclin: 0.05 g/l) und dem Fungizid Dodine (50 mg/l; Strasser et al. 1996).

Die Drahtwürmer für die Virulenz-Tests stammten einerseits aus Freilandaufsammlungen (*A. ustulatus* und *A. brevis*), andererseits aus bei Agroscope etablierten Laborzuchten (*A. obscurus*, *A. sputator* und *A. lineatus*; Kölliker et al. 2009). Als Vergleich, und zum Testen der Wirkung von *Metarhizium brunneum* auf Nicht-Zielorganismen, wurde die Drahtwurmart *Hemicrepidius niger* in einem der Versuche inkludiert.

A. ustulatus Drahtwürmer wurden von GLOBAL 2000 auf einem Salatfeld in Wien 22 eingesammelt, für den Transport vorbereitet und für Virulenztests zu Agroscope geschickt. Die Aufsammlung einer für eine aussagekräftige Virulenzbestimmung ausreichenden Anzahl von *A. brevis* Drahtwürmern gestaltete sich schwieriger. Individuen dieser Art wurden einerseits von Landwirten und Meles auf verschiedenen Flächen mit Hilfe von Köderfallen gesammelt, ein anderer Teil waren am Erntetag aus den Lagerkisten gefallene Individuen, die von Landwirten und GLOBAL 2000 aufgesammelt wurden. Viele dieser Larven waren allerdings deutlich weniger vital als Köderfallenfänge, sodass sich mit *A. brevis* nur ein Versuchsdurchgang ausging.

Alle im Freiland aufgesammelten Drahtwürmer wurden vor einer Verwendung in Virulenzversuchen für 2 Wochen in Quarantäne gehalten, um eine Verfälschung der Ergebnisse durch natürliche Pilzinfektionen auszuschließen. Alle Drahtwürmer wurden vor Versuchsbeginn in Boxen auf Topfsubstrat bei 10 °C gehalten.

2.2.1.2 Virulenztests

Für die Versuche wurden Konidien der Pilze mit einer 0,03 (v/v) %igen Tween®80-Lösung von den Agar-Platten gewaschen. Die Konzentration der Konidien in den Suspensionen wurde auf jeweils 10^7 (2 Versuche) bzw. 10^8 (1 Versuch) Konidien/ml eingestellt. Drahtwürmer wurden für jeweils 5 Sekunden in die Konidien-Suspensionen getaucht und nachfolgend einzeln in kleinen, mit etwa 30 g Torf gefüllten Dosen (Volumen 90cm^3) gehalten - mit einem Karottenstück als Nahrungsquelle. Jedes Verfahren wurde 5 (2 Versuche) bzw. 6 mal (1 Versuch) mit 5 Larven wiederholt. Der gesamte Test wurde dreimal wiederholt. Die Dosen wurden im Klimaschrank bei konstanten $21\text{ }^\circ\text{C}$ und 70 % relativer Luftfeuchtigkeit gelagert. Die Larven wurden wöchentlich auf Verpilzung untersucht und gezählt. Tote Larven wurden bis zum Feststellen einer deutlichen Verpilzung aufbewahrt. Der Versuch endete nach 8 Wochen.

2.2.2 Virulenztests auf natürlichen Böden

In einem Mesokosmen-Versuch wurde der Einfluss des Bodens auf die Virulenz eines *Metarhizium brunneum*-Stamms gegen Drahtwürmer untersucht. Dieser Versuch erfolgte mit *A. ustulatus* und *A. obscurus* auf vier verschiedenen Bodenarten. Drahtwürmer wurden aus dem Freiland gesammelt und vor dem Versuch für mehrere Wochen auf gedämpftem Substrat gehalten. Drei der Böden wurden von Versuchsstandorten im Freiland genommen (Marchfeld, Weinviertel, Innviertel), und einer von einer Versuchsfläche der AGES in Wien. Die Böden wurden gesiebt und auf chemische und physikalische Parameter untersucht (Tabelle 1).

Standort	Bodenart	Humus [%]	Sand [%]	Schluff [%]	Ton [%]	TOC [%]	Phosphor [mg/kg]	Kalium [mg/kg]	pH-Wert	Gravimetrischer Wassergehalt [%]
Wagner	Lehm	3,8	31	47,8	21,1	2,23	93	178	7,84	0,32
Fiedler	Schluffiger Lehm	3	12,9	61,6	25,5	1,73	346	422	7,71	0,30
Paminger	Lehmiger Sand	5,1	41,4	43,9	14,7	2,95	45	243	5,89	0,60
AGES	Sandiger Lehm	4,3	27,6	48,1	24,3	2,52	71	340	7,67	0,35

Tabelle 1: Mesokosmenversuch, AGES. Ergebnis der Untersuchung physikalischer Parameter der Versuchsböden.

Zur Durchführung des Versuches wurde *M. brunneum* (Stamm Bipesco/F52) auf PDA-Platten vermehrt. Zwei Tage vor Versuchsbeginn erfolgte die Bestimmung der Keimrate (siehe Punkt 223). Für die Inokulation der Böden wurde eine Sporensuspension bekannter

Konzentration hergestellt. Unter Berücksichtigung der Keimrate wurde schließlich die Aufwandmenge zur Inokulation der Böden berechnet. Bei Versuchsbeginn waren in jeder Bodenvariante pro Gramm Erde 71.000 keimfähige Sporen von *M. brunneum* F 52 enthalten. Zusätzlich dazu enthielten die Böden unterschiedliche Mengen an natürlich vorkommenden *Metarhizium*-Pilzen (Tabelle 2).

Standort	Bodenart	<i>M. brunneum</i> [CFU/g Erde]
Wagner	Lehm	25.250
Fiedler	Schluffiger Lehm	250
Paminger	Lehmiger Sand	69.000
AGES	Sandiger Lehm	27.750

Tabelle 2: Mesokosmenversuch, AGES. Ergebnis der Untersuchung des natürlichen Metarhizium-Vorkommens der Versuchsböden.

Die Virulenztests erfolgten in mit beimpfter Erde befüllten Keimtöpfen, die in einer Klimakammer bei 23 °C, 70 % relativer Luftfeuchte und mit 16 h Beleuchtung standen. Die Töpfe wurden zwei Monate lang wöchentlich mit frischen Karottenstücken versehen bzw. nach toten Larven untersucht. Die toten Drahtwürmer wurden dem Versuch entnommen, in mit feuchtem Filterpapier ausgelegte Petrischalen überführt und bei 25 °C weiter inkubiert. Anhand von Hyphenwachstum und Sporulation wurde festgestellt, ob tatsächlich eine Infektion mit *M. brunneum* die Todesursache war (Abbildung 5).



Abbildung 5: Topfversuch, Untersuchung der Virulenz verschiedener Bodenvarianten auf die Virulenz von Metarhizium brunneum auf Drahtwurmlarven, infizierte Larve. © AGES

2.2.3 Pilzgerste Qualitätsbestimmung

Für die Qualitätsbestimmung wurde an der AGES die Sporenkonzentration pro Gramm Pilzgerste (*M. brunneum* auf sterilen Gerstenkörnern) erhoben sowie die Keimfähigkeit der Sporen bestimmt. Untersucht wurden verschiedene Chargen des in den Freilandversuchen im Weinviertel und Marchfeld eingesetzten *Metarhizium*-Präparats GranmetP® (Stamm Bipesco/F52). Jeweils 1 g Pilzgerste wurde in mit Parafilm verschlossenen Petrischalen zwei Tage lang feucht und bei 25 °C inkubiert. Danach wurde die Pilzgerste mit einem definierten Volumen einer 0,05 %igen Tween20-Lösung gespült und nach Filtration (durch 10 µm) die Sporendichte in der Suspension in der Thoma-Kammer ausgezählt. Für die Bestimmung der Keimfähigkeit wurde die Suspension auf Wasser-Agar getropft und 20 Stunden lang bei 25°C im Dunkeln inkubiert. Anschließend wurde der prozentuelle Anteil der Sporen, die einen Keimschlauch ausgebildet hatten erhoben.

2.2.4 Bestimmung Sporendichten im Boden

Um das natürliche Vorkommen von *Metarhizium*-Pilzen in Böden sowie die Entwicklung der in den Versuchspartellen ausgebrachten Pilze zu erheben, wurden zu verschiedenen Zeitpunkten im Vegetations- bzw. Versuchsverlauf Bodenproben entnommen. Dazu wurden mehrere Bohrkern pro Fläche bzw. Parzelle zufällig verteilt mit einem Bodenprobennehmer entnommen, in Plastiksäcke gefüllt und in Kühlboxen überführt. Die Proben wurden an die AGES bzw. Agroscope geliefert und danach bei 7 °C gelagert. Die Analyse der vorab gesiebten Bodenproben erfolgte jeweils innerhalb weniger Tage nach der Übernahme.

Die Analyse der Bodenproben auf ihre Sporendichte erfolgte auf Selektivmedium nach Strasser et al. (1996). Von jeder Bodenprobe wurden drei Wiederholungen zu je 20 g (Frischgewicht) entnommen und nach Aufbereitung in Petrischalen bei 25 °C unter Dunkelheit inkubiert. Etwa fünf Tage bis eine Woche nach der Beimpfung der Platten, wurden diese regelmäßig kontrolliert bis durch Bildung von Sporen eine eindeutige Identifikation der Pilze möglich war. Abschließend wurde die Anzahl der *Metarhizium*-Kolonien pro Platte ermittelt und daraus die CFU (koloniebildende Einheiten) von *Metarhizium spp.* pro Gramm Erde berechnet.

2.3 Exaktversuche auf Praxisstandorten

2.3.1 *Metarhizium brunneum*

Insgesamt wurden im Verlauf des Projekts fünf Versuche mit ausschließlichem Fokus auf eine direkte Drahtwurmbekämpfung mit *Metarhizium brunneum* durchgeführt, davon zwei in Tirol mit dem Stamm ART2825 und drei in Niederösterreich mit dem Stamm Bipesco5/F52, die in diesem Kapitel beschrieben werden.

Zusätzlich dazu wurde ein Versuch im Weinviertel durchgeführt, in dem die Wirkung von *M.brunneum* mit der einer speziellen Bodenfräse verglichen wurde - dieser Versuch ist im direkt folgenden Kapitel zur Wirkung der Bodenfräse genauer beschrieben.

In diesen Versuchen wurde die Wirkung von *Metarhizium brunneum* auf Drahtwurmpopulationen und -schäden unter Freilandbedingungen erhoben. Verschiedene Applikationsmethoden und -zeitpunkte wurden getestet. Dazu wurde *M. brunneum* in verschiedenen Zwischenfrüchten vor Kartoffeln und in Kartoffeln ausgebracht. Auch wurde die Möglichkeit einer Reduktion der Aufwandmenge von *Metarhizium*-Präparaten durch eine Kombination mit verschiedenen Einsaatpflanzenmischungen zur Anlockung von Drahtwürmern untersucht.

2.3.1.1 Weinviertel 2016/17

Dieser Versuch (Abbildung 6) wurde auf dem Betrieb von Josef Fiedler in Goggendorf durchgeführt. Die Anlage erfolgte am 25. August 2016 durch die LFS Hollabrunn und GLOBAL 2000. Nach der Saatbettvorbereitung wurden Parzellen mit einer Größe von 8 mal 3 Metern (= vier Kartoffelreihen) für folgende 4 Varianten in 8 Wiederholungen abgesteckt:

D1: Metarhizium flächig in der Zwischenfrucht vor Kartoffel



D2: Metarhizium flächig in der Kartoffel mit Weizen zur Anlockung



D3: Kombination aus D1 und D2



D4: Zwischenfrucht und Kartoffel unbehandelt

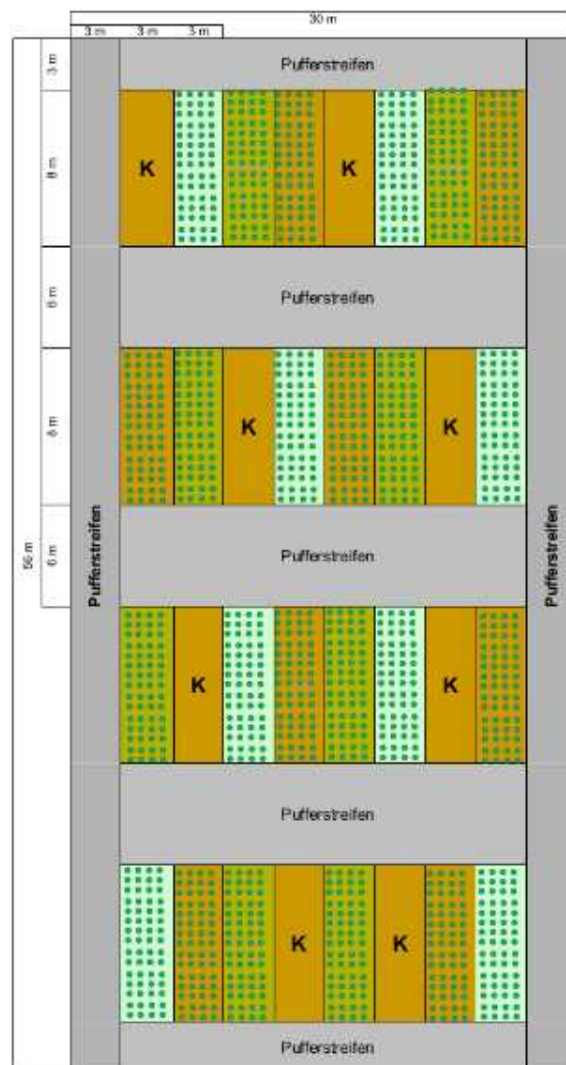


Abbildung 6: Metarhizium-Versuch Weinviertel 2016/2017, Versuchsplan.



Abbildung 7: Ausbringung der Pilzgerste in der Zwischenfrucht, Standort Goggendorf, (Weinviertel), 25. August 2016

Im nächsten Arbeitsschritt wurde Pilzgerste (250 kg/ha und damit $9,3 \cdot 10^{13}$ Sporen/ha) auf den Parzellen der Varianten D1 und D3 ausgebracht (Abbildung 7). Dann wurde auf allen Parzellen und den Pufferstreifen eine Begrünungsmischung ausgebracht (Futtererbse (75 kg/ha), Buchweizen (20 kg/ha) und Phacelia (5 kg/ha)).

Am 3. April 2017 wurden Kartoffeln der Sorte Ditta durch die LFS Hollabrunn gelegt. Die Pilzgerste wurde in zwei Schritten in den Boden eingebracht. Zunächst wurden 150 kg/ha Pilzgerste mit einem Granulatstreuer vor dem Legen eingearbeitet. Während dem Kartoffellegen wurden 50 kg/ha Pilzgerste in die Saatsfurche abgelegt, insgesamt waren das $1,8 \cdot 10^{13}$ Sporen/ha. Zusätzlich wurden mit dem Begrünungsstreuer der LFS Hollabrunn 50 kg/ha Weizen auf den Damm gestreut (Abbildung 8). Dieser sollte Drahtwürmer anlocken und zur möglichst frühen Infektion führen, noch bevor die Kartoffel eine anlockende Wirkung entwickelt.

Am 13. September 2017 wurden von GLOBAL 2000 und MELES mit einem Stahlrohr (15,8 cm Innendurchmesser) Bodenproben zur Erhebung der Drahtwurmdichte vor der Ernte entnommen, je Parzelle an 3 Punkten in einem Abstand von ca. 2 m vom Parzellenrand: im ersten und dritten von vier Dämmen in einer Tiefe von 0-10 cm, im zweiten Damm in einer Tiefe von 0-10 und 10-20 cm. Für die Erhebung der Drahtwurm-aktivität wurde in einer Entfernung von 2 m vom Parzellenrand je eine Köderfalle im zweiten und dritten Damm vergraben und zwei Wochen später geborgen.



Abbildung 8: Ausbringung der Pilzgerste in die Saatfurche und gleichzeitige Begrünung der Kartoffeldämme, Goggendorf, 3. April 2017

Am 27. September 2017 wurden die Erdäpfel der mittleren zwei Dämme von der LFS Hollabrunn mit Unterstützung durch GLOBAL 2000 mit einem Parzellenroder geerntet (Abbildung 9), in Jutesäcke gefüllt und zur LFS Hollabrunn gebracht. Dort wurden die vermarktungsfähigen Knollen mit einer Sortiermaschine aussortiert und von diesen je 100 Knollen pro Parzelle entnommen, in Säcke gefüllt und bis zur Bonitur in einer Holzkiste kühl und trocken gelagert. Für die Bonitur wurden die Knollen gewaschen.

Um Fehler bei der Unterscheidung der Drahtwurmschäden von *Rhizoctonia Drycore* und anderen Knollenschäden zu vermeiden, gab es eine Einschulung für die Kartoffelbonitur durch die Kartoffelbauberaterin der Landwirtschaftskammer Niederösterreich. Drycore ist ein Symptom der Pilzerkrankung *Rhizoctonia solani*, das leicht mit Drahtwurmlöchern verwechselt werden kann und oft zusammen mit Drahtwurmschäden auftritt. Das Boniturschema wurde in Abstimmung mit allen Projektpartnern, die Erfahrung mit Kartoffelbonituren haben, festgelegt. Bei Knollen mit bis zu 5 Drahtwurmlöchern wurde für jede Knolle die genaue Anzahl an Löchern ermittelt. Da der Befall sehr stark war, wurden alle Knollen, die mehr als 5 Drahtwurmlöcher hatten, der Kategorie „>5 Löcher“ zugeordnet. Das selbe Boniturschema wurde auf Drycore Löcher angewandt (EPPO 2005).



Abbildung 9: Ernte der Knollen mit dem Parzellenroder, Goggendorf, 27. September 2017

2.3.1.2 Marchfeld2017/18

Dieser Versuch wurde am 9. August 2017 von der LFS Hollabrunn und GLOBAL 2000 am Betrieb von Johann Wagner in Obersiebenbrunn angelegt. Es wurden Parzellen mit einer Größe von 11 mal 3 Metern für 5 Varianten in 7 Wiederholungen abgesteckt. Die Varianten waren:

Metarhizium flächig in der Zwischenfrucht vor Kartoffel

Metarhizium flächig in der Kartoffel

Metarhizium in Anlockstreifen (Aussaart im August) vor Kartoffel

Anlockstreifen und Kartoffel unbehandelt

Zwischenfrucht und Kartoffel unbehandelt

Zuerst wurde in den Parzellen der Variante *Metarhizium* in der Zwischenfrucht Pilzgerste mit einer Aufwandmenge von 250 kg/ha flächig mit dem APV Twin Zwischenfruchtstreuer ausgebracht und dann mit der Kreiselegge in den Boden eingearbeitet. In der Variante mit *Metarhizium* in Anlockstreifen wurde Winterweizen in vier Streifen (Abstand 75 cm zwischen den Reihen, vom Parzellenrand 45 cm) mit einer Saatstärke von 400 kg/ha ausgesät (Abbildung 10). Im Anschluss wurde in die Weizenstreifen Pilzgerste (250 kg/ha) mit der Sämaschine ausgebracht. Zum Schluss wurde die Begrünung in den Varianten mit Zwischenfrucht in der gleichen Zusammensetzung wie beim ersten Versuch (75 kg/ha Futtererbse 20 kg/ha Buchweizen, 5 kg/ha Phacelia) gesät.



Abbildung 10: Versuchsanlage in Obersiebenbrunn (Marchfeld), 9. August 2017. Befüllen der Sämaschine vor Aussaat der Weizenstreifen.

Aufgrund von mangelnder Qualität der Pilzgerste – das zeigte die Erhebung der Sporenzahlen je g Pilzgerste im Labor - sowie schlechtem Auflaufen der Begrünung infolge Trockenheit, wurde der Versuch am 25. September 2017 von der LFS Hollabrunn ein zweites Mal angelegt. Zunächst wurde die Zwischenbegrünung angebaut und anschließend die Weizenstreifen in einer Saatstärke von 525 kg/ha gesät. Bei dieser zweiten Versuchsanlage wurde die Pilzgerste mit einer Aufwandmenge von insgesamt 416 kg/ha zuerst flächig über die gesamte Versuchsparzelle verteilt und dann in die Weizenstreifen ausgebracht. Dadurch wurde eine für eine effektive Wirkung als ausreichend erachtete Mindestsporendichte von $8,7 \cdot 10^{12}$ Sporen/ha erreicht.

Am 17. April 2018 wurden die Kartoffeln der Sorte Agria gelegt. Zunächst wurde mit der Sämaschine Pilzgerste GranmetP (*M. brunneum*-Stamm F52) mit einer Aufwandmenge von 400 kg/ha in den Parzellen der Variante „*Metarhizium* in Kartoffel“ ausgebracht und anschließend mit der Kreiselegge eingearbeitet. Danach wurden auf der Versuchsfläche die Kartoffeln gelegt und in den Parzellen der Variante „*Metarhizium* in Kartoffel“ auch noch 50 kg/ha Pilzgerste mit dem APV Twin in die Saatfurche abgelegt. Bei dieser Charge war aufgrund von Verunreinigungen keine Auszählung der Sporenmenge je Gramm Pilzgerste möglich war.

Am 12. September wurden zwei Köderfallen pro Parzelle zur Bestimmung der Drahtwurmmaktivität in den Boden eingebracht und vier Bodenproben pro Parzelle zur absoluten Drahtwurmdichtebestimmung (3x in 0-10 cm und 1x in 0-20 cm Bodentiefe) aus den Kartoffeldämmen entnommen. Am 3. und 4. Oktober 2018 erfolgte mit Unterstützung von Schülern der LFS Obersiebenbrunn die Ernte mit einem Parzellenroder. Alle Knollen der mittleren zwei Reihen einer Parzelle wurden entnommen, in Säcke gefüllt und bis zur Bonitur kühl und dunkel gelagert. Vor der Bonitur wurden die Knollen gewaschen. Für die Bonitur wurden 100 Knollen pro Parzelle verwendet.

2.3.1.3 Imst 2017/18

Anfang 2017 wurde eine Grünlandfläche in Imst ausgewählt, um mittels regelmäßiger Entnahme von Bodenproben die Eignung des Standorts für den geplanten Versuch mit Pilzgerste (*M. brunneum* Stamm ART2825) und Lockpflanzen zu evaluieren. Am 10. April 2017 startete die UIBK mit den Erhebungen zum Drahtwurm vorkommen auf der Versuchsfläche. 14-tägig wurden 20 Bodenproben mittels Bodenstecher (Ø 20 cm) in 0-10 und 10-20 cm Tiefe entnommen. Datalogger in 15 und 30 cm Tiefe dokumentierten halbstündlich Bodentemperatur und relative Feuchtigkeit. Auch im Versuchsjahr 2018 wurden zur Überwachung der Drahtwurmdichten beginnend mit dem 4. April 2018 14-tägig 20 Bodenproben (zwei Transekte – einer in der Versuchsfläche und einer im angrenzenden Grünland – jeweils 5 Probepunkte mit je zwei Bodenproben) entnommen und die vorhandenen Drahtwürmer analog zum Vorjahr mit Hilfe eines Kempson-Extraktors aus der Bodenprobe extrahiert.

Am 23. August 2017 wurde der Versuch in Tirol am Forschungsbauernhof des Landes Tirol und des Forschungszentrums für Berglandwirtschaft der UIBK in Imst von Mitarbeitern der UIBK und Agroscope mit Unterstützung von Dr. Christian Partl vom landwirtschaftlichen Versuchswesen des Landes Tirol angelegt (Abbildung 11). Es wurden Parzellen mit einer Größe von 6 x 2,55 Metern mit 6 Varianten in 6 Wiederholungen für folgende Varianten abgesteckt:

- a) Pilzgerste in der Vorfrucht (Dauergrünland - 2017)
- b) Pilzgerste in der Hauptfrucht (Kartoffel - 2018)
- c) Pilzgerste in der Vorfrucht + Lockpflanzen
- d) Pilzgerste in der Hauptfrucht + Lockpflanzen
- e) keine Pilzgerste + Lockpflanzen
- f) keine Pilzgerste (=Kontrolle)

Vor der Bearbeitung wurden durch MitarbeiterInnen von Agroscope in allen Parzellen Bodenproben zur Erhebung der am Versuchsstandort natürlich vorkommenden *Metarhizum*-Dichte im Boden entnommen. Dann wurde in den Varianten a und c Pilzgerste in Schlitzsaat (Entfernung der Schlitze an der Durchsämmaschine 7,5 cm) mit einer Aufwandmenge von 264 kg/ha ($5.9 \cdot 10^{13}$ Konidiosporen/ha) ausgebracht. Im Oktober 2017 und am 16. April 2018 wurden abermals Bodenproben genommen, um die

Entwicklung der ausgebrachten *Metarhizium*-Sporen in den behandelten Parzellen zu überprüfen.



Abbildung 11: Versuchsanlage in Imst: Ausbringung von Pilzgerste in Dauergrünland, Kontrolle der Sämaschine, 23. August 2017

Am 18. April 2018 wurde der Umbruch der Grünlandfläche in Imst vorgenommen. Die Ausbringung der Pilzgerste in den Versuchsvarianten b und d, sowie das Kartoffellegen fanden eine Woche später, am 25. April 2018 statt. Hierbei wurde in den entsprechenden Varianten die Pilzgerste flächig mit einer Aufwandmenge von $5 \cdot 10^{13}$ Konidiosporen/ha ausgestreut und mittels Eggen 6 cm tief in den Boden eingearbeitet. Anschließend wurden Kartoffeln der Sorte Anuschka auf der gesamten Versuchsfläche angebaut, wofür ca. 250 kg Saatkartoffeln benötigt wurden.

Um die Pilzkonzentration im Boden nach der Hauptfruchtbehandlung zu erheben wurden am 14. Juni 2018, also sieben Wochen nach Ausbringung der Pilzgerste, wieder Bodenproben entnommen. Am gleichen Tag wurden in den Dammböschungen der Varianten c und d Lockpflanzen eingesät, um deren Wirkung auf die Verteilung der Drahtwürmer zu untersuchen und eine mögliche Ablockwirkung von den Kartoffeln zu erzielen. Hierzu wurde die Böschung samt Dammfuß mit einem Spaten breit eingeritzt. In dem so entstandenen Spalt wurden pro Parzelle 154,8 g der Saadmischung gleichmäßig ausgestreut und im Anschluss von Hand wieder verschlossen. Die ausgebrachte Pflanzenmischung wurde so zusammengestellt, dass möglichst vom Zeitpunkt der Ausbringung bis zur Reife der Kartoffeln ein wechselndes attraktives Angebot für die Drahtwürmer vorhanden ist. Komponenten dieser Mischung waren Weizen (3 g/m^2), Blaue

Lupine (*Lupinus angustifolius*, 4 g/m²), Echter Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*, 3 g/m²), Rotklee (*Trifolium pratense*, 3 g/m²), Weißklee (*Trifolium repens*, 3 g/m²) sowie Feuerbohne (*Phaseolus coccineus*, 27 g/m²).

Die Ernte der Knollen für die Schadensbonitur fand am 9. August 2018 statt. Hierbei wurde pro Versuchsvariante und Wiederholung ein Meter der jeweils mittleren Kartoffelreihe händisch geerntet, gewogen und bis zur Bonitur im Bodenlabor der UIBK an einem geeigneten (kühlen, dunklen) Ort gelagert. Für jede der 36 Versuchspartzellen wurde der Schaden an allen in der Boniturmasse enthaltenen Knollen (874 Kartoffel gesamt) ermittelt. Neben der Anzahl der Drahtwurmlöcher wurden auch andere Parameter aufgenommen. So wurde jede Knolle einzeln zunächst gesäubert, dann gewogen und neben Drahtwurmlöchern auch auf Drycore-Löcher, Schorf und sonstige Fraßstellen (etwa durch Engerlinge, *Agrypnus*-Larven, Schnecken oder Mäuse) untersucht.

Um zu überprüfen, wo sich die Drahtwürmer während der Wachstumsperiode aufhalten und wo sie fressen wurden an sieben Terminen jeweils vier Bodenproben pro Parzelle (zwei im Bereich der Kartoffeln, zwei im Bereich der Lockpflanzen) entnommen und auf das Vorhandensein von *Agriotes*-Larven durchsucht. Zusätzlich zur molekularen Artbestimmung (beschrieben in Abschnitt 2.1.2) wurde an allen intakten im Versuchsverlauf gesammelten Drahtwürmern eine molekulare Nahrungsanalyse durchgeführt. Dafür wurde jedes Individuum im Feld in ein 1,5 ml Reaktionsgefäß überführt und sofort gekühlt, um die weitere Verdauung zu stoppen. Im Labor wurden die Tiere zunächst mittels Chlorbleiche gereinigt (Wallinger et al. 2013), um falschen Ergebnissen durch außen anhaftende Umwelt-DNA vorzubeugen. Anschließend wurden die Kopfkapseln entfernt und die DNA aus dem verbleibenden Material mit Hilfe eines Extraktionsroboters (BioSprint® 96 (Qiagen, Hilden, Deutschland); DNA Blood Kit) extrahiert.

Next Generation Sequencing:

Zunächst wurden alle Proben mit Hilfe des allgemeinen Primerpaars B49317 und B49466 (Taberlet et al. 1991, 2007) auf das generelle Vorhandensein pflanzlicher DNA überprüft. Von insgesamt 306 Drahtwürmern wurden dabei 123 der Proben positiv getestet und im Folgenden für die Analyse mittels Next-Generation-Sequencing (NGS) weiterverwendet.

Artspezifische Nachweise mittels CE-PCR

Alle 306 Proben wurden ebenfalls mit einer spezifischen Reaktion auf das Vorhandensein

der DNA von Kartoffel und den im Feld ausgebrachten Lockpflanzen (nach Wallinger et al. 2012) getestet.

2.3.1.4 Weer 2018/19

Für diesen Versuch wurde eine langjährige Grünlandfläche am Biobetrieb von Thomas Harb im Bezirk Schwaz ausgewählt. Am 07. August 2018 wurde die Fläche vermessen und umgebrochen. Der Versuch umfasste Parzellen von 7 x 3 m Größe, mit 6 Wiederholungen folgender Varianten:

- a) Pilzgerste in der Zwischenfrucht
- b) Pilzgerste in Kartoffel
- c) Pilzgerste in der Zwischenfrucht + Lockpflanzen
- d) Kartoffel + Pilzgerste in Lockpflanzen
- e) keine Pilzgerste + Lockpflanzen
- f) keine Pilzgerste, keine Lockpflanzen (=Kontrolle)

Am 9. August 2018 wurde das Saatbett bereitet und die Pilzgerste (*M.brunneum* Stamm ART2825) mit einer Aufwandmenge von 123 kg/ha (10^{14} Sporen/ha) in den entsprechenden Parzellen (a & c) ausgebracht. Einen Tag später wurde die Zwischenfrucht bestehend aus Sandhafer (74%), Alexandrinerklee (16%), Ramtillkraut (7%) und Phacelia (3%) gesät. Die erste Entnahme von Bodenproben zur Bestimmung der natürlichen *Metarhizium*-Dichte fand am 9. August 2018 statt. Die zweite Bodenprobenentnahme fand am 26. September 2018 statt. Bei diesem Termin wurde auch die Entwicklung der Zwischenfrucht überprüft. Am 15. April 2019 wurden ein weiteres Mal Bodenproben zur Bestimmung der Pilzdichte entnommen, bevor die Fläche am gleichen Tag erneut umgebrochen und für das Legen der Kartoffeln vorbereitet wurde.

Das Legen der Kartoffeln (Sorte Ditta) fand am 2. Mai 2019 statt. Hierbei wurde in Variante b (Pilzgerste in Kartoffel) die Pilzgerste nicht wie im vorangegangenen Versuch in Imst flächig, sondern direkt unter die Kartoffeln im Damm ausgebracht um die Drahtwürmer dort gezielt mit dem Pilz in Kontakt zu bringen. Am 02. Juli 2019 wurden die Lockpflanzen in den entsprechenden Parzellen in der Furche mittig zwischen die Kartoffelreihen ausgesät. Die Pilzgerste in Variante d wurde mit der Lockpflanzenmischung gemeinsam eingearbeitet. Zusätzlich wurden an diesem Termin, sowie nochmals am 16. August 2019 Bodenproben für die Pilzdichtebestimmung entnommen.

Die erste Probennahme zum Sammeln der Drahtwürmer für die molekularen Nahrungsanalysen fand am 27. Mai 2019 statt. Zunächst mit größeren zeitlichen Abständen und ab dem 9. Juli 2019 wöchentlich bis zur letzten Probennahme am 27.

August 2019 wurden jeweils vier Bodenproben pro Parzelle (in Summe 144 pro Termin) entnommen und auf Drahtwürmer untersucht. Wie schon im vorangegangenen Versuch wurden die Tiere einzeln in Reaktionsgefäßen gekühlt zur UIBK gebracht, wo sie bis zur weiteren Bearbeitung bei -80°C gelagert wurden.

Am 4. September .2019 wurde pro Versuchsvariante und Wiederholung ein Meter der jeweils dritten Kartoffelreihe geerntet und bonitiert. Dabei wurden neben der Anzahl an Drahtwurmlöchern auch andere Parameter wie Drycore-Löcher, Schorf und sonstige Fraßstellen sowie das Kartoffelgewicht für jede einzelne Knolle erfasst. Der Schaden in den Knollen war zu diesem Zeitpunkt allerdings so gering, dass am 08. Oktober 2019 abermals Kartoffeln für die Bonitur aus dem Feld entnommen wurden. Die aus der zweiten Entnahme gewonnenen Kartoffeln wiesen wie erwartet ein höheres Maß an Schäden auf. Deshalb wurden hier die Ergebnisse aller in der Boniturmasse enthaltenen Knollen der zweiten Ernte vom 08. Oktober 19 verwendet.

2.3.1.5 Marchfeld 2019

Dieser Versuch wurde am 16. April 2019 auf dem Betrieb von Paul Votzi von ihm und GLOBAL 2000 angelegt. Der Versuch wurde in Parzellen mit einer Größe von 8 mal 3 Metern für die folgenden 5 Varianten in 6 Wiederholungen durchgeführt:

- a) Kartoffeln mit GranMet-P beim Legen - Pilzgerste wird mit dem Granulatstreuer unter die Saatkartoffel gelegt
- b) Anlockstreifen mit GranMet-P zwischen Kartoffeldämmen - Einsatz von Anlockpflanzen und Pilzgerste vor dem Reihenschluss
- c) Anlockstreifen unbehandelt zwischen Kartoffeldämmen - Einsatz von Anlockpflanzen vor dem Reihenschluss
- d) Anlockstreifen unbehandelt zwischen Kartoffeldämmen - Einsatz von Anlockpflanzen zu einem späteren Zeitpunkt
- e) Kartoffel unbehandelt

In der Variante a wurde Pilzgerste (Stamm Bipesco5/F52) mit einer Aufwandmenge von 125 kg/ha während des Legevorgangs unter die Kartoffelknollen (Sorte Valdivia) gelegt. Da eine rein maschinelle Ausbringung mit einem Lehnerstreuer aufgrund der Beschaffenheit der Pilzgerste nicht möglich war, wurde die Pilzgerste händisch in die Schläuche des Streuers geleitet. Damit wurden $9,24 \cdot 10^{12}$ Sporen/ha (Keimfähigkeit = 86,33 %) in den Boden eingebracht. Auf dem restlichen Versuchsfeld sowie dem Mantel wurden die Kartoffeln ohne Behandlung gelegt.

Am 1. Juni 2019 wurden Bodenproben zur Bestimmung der Sporendichte im Ackerboden genommen. Am 11. Juni 2019 wurde in den Varianten b und c eine Anlockpflanzenmischung bestehend aus Winterroggen (16 kg/ha), Winterweizen (20 kg/ha), Sorghumhirse (2 kg/ha), Linse (6 kg/ha), Erbse (20 kg/ha) und Buchweizen (6 kg/ha) eingesät. Die Einsaat sowie die Ausbringung der Pilzgerste (108 kg/ha) im Zwischendambereich erfolgte händisch.

Beginnend mit dem 3. Juli 2019 wurden zu mehreren Zeitpunkten Bodenproben aus den Parzellen der Varianten b, c und e zur Bestimmung der Drahtwurmdichten genommen. Die Bodenproben wurden sowohl aus dem Zwischendambereich als auch aus dem Wurzelbereich der direkt daneben wachsenden Kartoffelpflanzen genommen. Am 16. August 2019 wurden das Kartoffelkraut und die Zwischendambegrünung händisch

entfernt. Am 20. August 2019 wurde die Anlockmischung in den Parzellen der Variante d ausgesät.

Zirka 6 Wochen vor der Kartoffelernte, am 3. September 2019, wurden Bodenproben (4 Proben pro Parzelle; 3 x 0-10 cm und 1 x 10-20 cm Bodentiefe) zur Bestimmung der absoluten Drahtwurmdichte aus den Kartoffeldämmen entnommen. Am gleichen Termin wurden Köderfallen (2 x pro Parzelle) in den Boden eingebracht. Die Köderfallen wurden nach mehr als 2 Wochen, am 20. September 2019 entnommen und zur weiteren Bearbeitung an den Meles Firmensitz überführt. Da in den Bodenproben (insgesamt 120 Proben) keine Drahtwürmer gefunden werden konnten, wurde beschlossen, eine zweite Fallenfangperiode anzuschließen, um das Risiko zu verringern, keine oder nur sehr wenige Drahtwürmer zu fangen und somit keine verrechenbaren Daten zu erhalten. Daher wurden am 20. September 2019 wieder frische Köderfallen in die Dämme eingesetzt. Diese Fallen wurden am 11. Oktober 2019 entnommen.

Die Kartoffelernte erfolgte händisch am 16. Oktober 2019. Dafür wurden aus den beiden mittleren Dämmen jeder Parzelle entlang von 3 Metern alle Knollen entnommen, in Säcke gefüllt und nach Wien transportiert. Die Bonitur wurde von Global 2000 durchgeführt. Dabei wurden zusätzlich zu Drahtwurmschäden auch der Ertrag, die Verteilung auf Sortiergrößen sowie Schäden durch Mäuse, Engerlinge und sonstige Schäden und Missbildungen dokumentiert.

2.3.2 Versuche mit Bodenfräse

Im Rahmen des Projekts wurden zwei Praxisversuche durchgeführt, in denen der Einsatz einer Spezialfräse zur direkten Drahtwurmbekämpfung untersucht wurde. Die dafür verwendete Fräse konnte speziell für dieses Projekt von einem deutschen Betrieb (Ralf Gensheimer in Offenbach, Nordrhein-Westfalen, Deutschland) ausgeliehen werden. Die Fräse besitzt eine deutlich höhere Schlagkraft als herkömmliche Bodenfräsen und ist mit speziell gehärteten Messern ausgestattet.

2.3.2.1 Innviertel 2016/17

Der Versuch (Abbildung 12) wurde auf dem Betrieb von Martin Paminger/St. Aegidi durchgeführt. Die Anlage erfolgte am 31. August 2016 durch den Betriebsleiter gemeinsam mit GLOBAL 2000. Der Versuch wurde auf Parzellen mit einer Größe von 8 mal 3 Metern mit den folgenden 4 Varianten in 8 Wiederholungen angelegt:

- E1: Unkrautfreie Schwarzbrache + 2 Anlockstreifen, mit Fräse behandelt
- E2: Unkrautfreie Schwarzbrache + 2 Anlockstreifen
- E3: Unkrautfreie Schwarzbrache, unbehandelt
- E4: Zwischenfrucht, unbehandelt

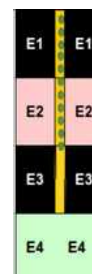


Abbildung 12: Fräs-Versuch Innviertel 2016/2017, Versuchsplan.

In den Parzellen der Varianten E1 und E2 wurden zur Anlockung von Drahtwürmern 400 kg/ha ungebeizter Futterweizen in zwei Längsstreifen im Abstand von 80 cm ausgesät. Anschließend wurde die betriebsübliche Bergrünungssaat bestehend aus Rauhafer (50

%), Ölrettich (40 %) und Sareptasenf (10 %) auf den Parzellen der Variante E4 ausgesät. Die Varianten mit Schwarzbrache wurden mechanisch unkrautfrei gehalten (Abbildung 13).



Abbildung 13: Versuchsstandort St. Aegidi (Innviertel, Betrieb Paminger), 10. September 2016. Weizenstreifen zur Anlockung von Drahtwürmern. Weitere Varianten: Schwarzbrache und betriebsübliche Begrünung

Um den optimalen Fräszeitpunkt zu eruieren, untersuchte GLOBAL 2000 beginnend mit dem 8. September 2016, an dem die ersten Weizenkeimlinge sichtbar waren, in zweitägigen Abständen die Anlockstreifen auf Drahtwürmer. Dazu wurden nach einem zuvor festgelegten Schema alle Weizenpflanzen des Endbereichs der Streifen auf einer Länge von 50 cm entnommen und die Drahtwürmer im Wurzelraum gezählt. Zusätzlich wurde eine Probe vom unkrautfreien Boden 40 cm vom untersuchten Anlockstreifen entfernt genommen und auf Drahtwürmer untersucht. Während im angrenzenden Boden insgesamt nur ein Drahtwurm gefunden wurde, nahm die Anzahl an gefundenen Larven in den Anlockstreifen im Beobachtungszeitraum stetig zu, bis am 16. September 2016 neun Drahtwürmer in insgesamt vier Laufmetern Anlockstreifen gefunden wurden. Die Fräse mit einer Arbeitsbreite von 15 cm wurde deshalb noch am selben Tag eingesetzt (Abbildung 14). Bei der Kontrolle des Bodens im Anschluss an die Fräsbehandlung wurden keine Drahtwürmer gefunden. Auch in den darauffolgenden vier Tagen wurden nur sehr geringe Drahtwurmdichten erhoben.



Abbildung 14: Drahtwurmbekämpfung mittels Spezialfräse am Versuchsstandort in St. Aegidi (Innviertel), 16. September 2016

Am 13. Mai 2017 wurden Kartoffeln der Sorte Freya gelegt. Ende August wurden – wie oben beschrieben – Bodenproben entnommen und Köderfallen vergraben. Am 11. September 2017 wurden die Knollen händisch geerntet. Aus den beiden mittleren Dämmen wurden je 50 Knollen ab einem Quadratmaß von 40 mm entnommen, insgesamt also 100 Knollen pro Parzelle, und nachfolgend auf Drahtwurmschäden bonitiert.

2.3.2.2 Weinviertel 2017/18

Das Versuchsfeld am Betrieb Bauer OG wurde am 7. August 2017 ausgemessen und gegrubbert. Am 8. August 2017 erfolgte die Versuchsanlage, Parzellen mit einer Größe von 8 mal 3 Metern für 5 Varianten in 7 Wiederholungen wurden angelegt:

- a) Anlockstreifen für Fräsbehandlung
- b) Anlockstreifen mit *Metarhizium*
- c) Anlockstreifen ohne Behandlung
- d) Zwischenfrucht
- e) Schwarzbrache

Zuerst wurde in den Parzellen mit Zwischenfrucht die Zwischenbegrünung angebaut. Hier wurde die gleiche Zusammensetzung wie schon beim *Metarhizium*-Versuch im Weinviertel in der Saison 2016/17 gewählt (75 kg/ha Futtererbse, 20 kg/ha Buchweizen, 5 kg/ha Phacelia). Dann wurde in den Varianten a bis c Winterweizen in 2 Streifen mit einem Abstand von 1 Meter in einer Saatstärke von 400 kg/ha ausgesät. Anschließend wurde in der Variante b die Pilzgerste (Stamm Bipesco5/F52) mit einer Aufwandmenge von 250 kg/ha in die Weizenstreifen gesät.

Die Weizenstreifen wurden beginnend mit 21. August 2017 auf Drahtwurmvorkommen untersucht. Wurden bei der ersten Bonitur am 21. August 2017 noch 2,9 Larven pro lfm gefunden, verringerte sich die Zahl am nächsten Tag auf 2,1 Larve pro lfm und drei Tage später auf 1,1. Deshalb wurde entschieden, auf den nächsten ergiebigeren Regen zu warten. Am 27. August gab es 15 mm Niederschlag in der Gegend um Göllersdorf, deshalb wurde die Bonitur am 28. August wieder aufgenommen. An diesem Tag wurden 4,6 Larven/lfm gefunden und die Fräse kam noch am Abend durch die LFS Hollabrunn zum Einsatz. Die anschließende, stichprobenweise Kontrolle ergab keine Drahtwürmer in den gefrästen Streifen.

Um eine Schwarzbrache auch nur annähernd zu simulieren war es im weiteren Versuchsverlauf mehrmals notwendig, die Parzellen händisch von ungewollter Vegetation wie Ausfallgetreide frei zu halten. Da die Anlockstreifen in vielen Parzellen trotz aller Bemühungen nicht exakt zu erkennen waren und obwohl GPS-Software verwendet wurde, wurden am 28. August 2017 nicht alle Streifen mit der Fräse, die ja nur eine Arbeitsbreite von 15 cm aufweist, erwischt. Diese übrig gebliebenen Streifen wurden am 22. September 2017 gefräst.

Am 6. April 2018 wurden Kartoffeln der Sorte Ditta gelegt. Für die Bestimmung von Drahtwurmdichten und -aktivität wurden am 6. September 2018 Bodenproben entnommen und Köderfallen vergraben. Die Ernte am 19. September 2018 wurde händisch von GLOBAL 2000 mit Hilfe von freiwilligen Helferinnen durchgeführt. Dazu wurden alle Knollen der mittleren 2 Reihen einer Parzelle ausgegraben, in Kartoffelsäcke gefüllt und nach Wien transportiert, wo sie kühl und dunkel bis zur Bonitur gelagert wurden. Für die Bonitur wurden 100 Knollen pro Kartoffelsack entnommen, alle Drahtwurmlöcher gezählt und dokumentiert.

2.3.3 Statistik/Auswertung

Weinviertel, Oberösterreich, Marchfeld:

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte mit R version 3.4.0. Bei allen Analysen wurde der Anteil an befallenen Knollen der jeweiligen Parzellen (abhängige Variable) den Treatments (unabhängige Variable) gemäß einem Randomized Block Design gegenübergestellt. Normalverteilung der Residuen und Homogenität der Varianzen als Voraussetzung für eine Varianzanalyse wurden mittels Shapiro Wilk Test und Levene Test (Package car) ermittelt.

Abhängig von den erhaltenen Ergebnissen wurden entweder parametrische (ANOVA) oder nicht-parametrische Signifikanztests (Friedman Test) durchgeführt. Beim Versuch „Paminger“ wurde ein post-hoc T-Test (pairwise t-test) durchgeführt um stärker auf Unterschiede zwischen Varianten mit und ohne Anlockstreifen einzugehen. Beim Versuch „Votzi“ wurden mehrere Faktoren in die Bonitur aufgenommen, da der Befall zu gering war um eine Aussagekraft über Drahtwurmschäden zu erreichen. Statistisch wurde jeder Faktor einzeln nach dem beschriebenen Schema analysiert.

Imst und Weer:

Alle grundlegenden statistischen Analysen, die Art und Larvenstadium der Drahtwürmer betreffen, wurden in RStudio v1.1.463 mit R v3.5.1 durchgeführt. Für die prozentuale Verteilung der Drahtwurmart und Larvenstadien wurde der Anteil an der Gesamtzahl der Drahtwürmer berechnet. Ein Pearson-Chi-Quadrat-Test aus dem R-Paket gmodels v2.18.1 (CrossTable()function) wurde durchgeführt, um die Beziehung zwischen der Behandlungsvariante und der Artverteilung der *Agriotes* Larven zu testen.

Für die statistische Analyse der Drahtwurmverteilung pro Bodenprobenstandort wurden die Variablen „Prozentsatz der Agriotes-Larven in den beiden aus der Kartoffel entnommenen Bodenproben“ und „Prozentsatz der Agriotes-Larven in den beiden im Bereich der Lockpflanzen genommenen Bodenproben“ herangezogen und unter Einbeziehung der Bodenproben ohne Drahtwürmer berechnet. Der erste Probennehmertermin 2018 (30. Mai) wurde von diesen Berechnungen ausgenommen, da die anziehenden Pflanzen erst kurz vor der zweiten Probennahme im Juni ausgesät wurden. Ein Vergleich der beiden Mittelwerte durch einen Wilcoxon-Rang-Summen-Test aus der R-Paket-Statistik v3.5.2 (wilcox.test() function) wurde für jede Behandlung durchgeführt, um anhand der erhaltenen Prozentsätze auf signifikante Unterschiede zu testen. Die

statistischen Unterschiede zwischen den Standorten der Bodenproben wurden aufgrund sehr kleiner Probengrößen und hoher Variabilität für die einzelnen Probenahmedaten nicht berechnet.

Zur Beurteilung des Drahtwurmschadens an den Kartoffelknollen war durch den massiven Befall 2018 für jede Knolle eine Umrechnung auf die Anzahl der Drahtwurmlöcher in einem Gramm Kartoffelmasse erforderlich, um die Behandlungen miteinander vergleichen zu können. Um signifikante Unterschiede zwischen den sechs Behandlungsvarianten zu testen, wurde eine Kruskal-Wallis-ANOVA verwendet, die ebenfalls auf Daten aus der R-Paket stats v3.5.2 (`kruskal.test()` function) basiert. Wenn dieser Test ein signifikantes Ergebnis erbrachte, folgte eine post-hoc-Analyse unter Verwendung des Kruskal-Mehrfachvergleichstests aus dem R-Paket `pgirmess` v1.6.9 (`kruskalmc()` function), basierend auf der von Siegel und Castellan (1988) beschriebenen Methode. Das Vorhandensein signifikanter Unterschiede in der Biomasse und der mittleren Knollenmasse wurde ebenfalls mittels Kruskal-Mehrfachvergleichstests wie beschrieben getestet.

Die Korrelation zwischen Drahtwurm- und Drycore-Schaden wurde unter Verwendung des Spearman'schen Rangkorrelationskoeffizienten aus dem R-Paket stats v3.5.2 (`cor.test()`function, `method = „spearman“`) bewertet. Hier wurde die Variable „Anzahl der Drahtwurmlöcher pro Kartoffelknolle“ verwendet, da der Drycore-Schaden nur in Kategorien erfasst wurde und somit eine Umrechnung in Drycore pro Gramm Kartoffelmasse nicht möglich war.

3. Ergebnisse

3.1 Drahtwurmvorkommen

3.1.1 Verbreitung in Österreich und kleinräumige Verteilung an Standorten

Die Art *Agriotes ustulatus* wies eine schwerpunktmäßige Verbreitung in klimatisch wärmeren und trockeneren Gebieten Ostösterreichs auf (Weinviertel und Marchfeld; Abbildung 15a). Im Gegensatz dazu kommen *Agriotes obscurus* und *A. lineatus* in vergleichsweise kühleren Regionen mit höheren Jahresniederschlägen vor (im Bereich der böhmischen Masse, Tirol; Abbildung 15b). Die Artengruppe *A. sputator* und *A. brevis*, zwei Arten die morphologisch nur äußerst schwierig zu differenzieren sind, war in allen untersuchten Regionen anzutreffen (Abbildung 15c). Dazu ist anzumerken, dass manche der Funde im Trockengebiet ausschließlich auf *A. brevis* zurückzuführen sind, während z.B. in Imst/Tirol von diesen beiden Arten ausschließlich *A. sputator* gefunden wurde.

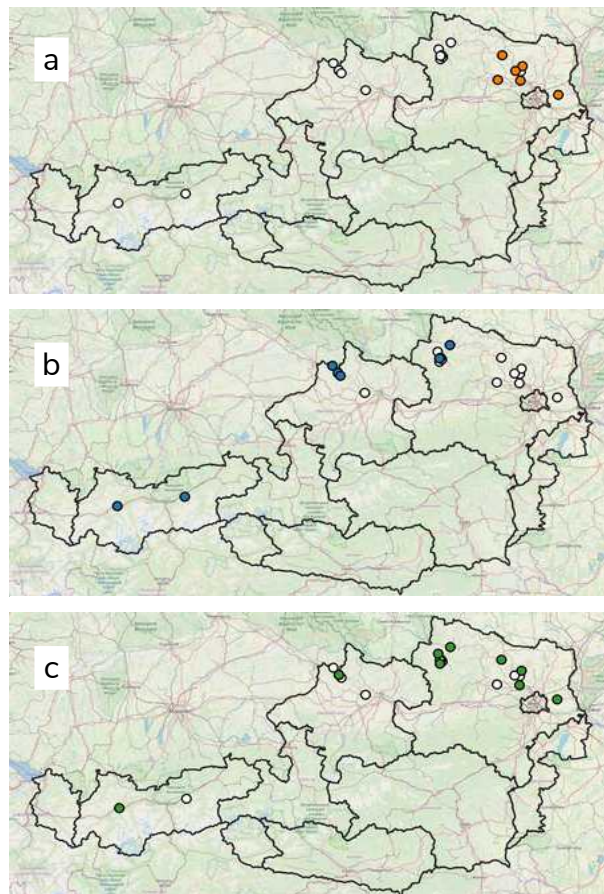


Abbildung 15: Drahtwurmverteilung in Österreich

An den Standorten, an denen die Drahtwurmaktivität mithilfe von Köderfallen rasterförmig erfasst wurde, konnte deren kleinräumige Verteilung erhoben werden. Auffällig waren teilweise stark voneinander abweichende Aktivitäten innerhalb von teilweise unter 20 m Abstand. Ein extremes Beispiel dafür ist ein Standort im Marchfeld (Abbildung 16). Auf dieser ebenen, äußerlich betrachtet gleichförmig erscheinenden Fläche wurden die Drahtwurmaktivitäten im Juni 2017 rasterförmig erhoben. Zu diesem Zeitpunkt stand Winterweizen auf der Fläche. Über einen Zeitraum von 2 Fangperioden vom 7. Juni bis 1. Juli wurden mit 16 in einem Rechteck angeordneten Köderfallen insgesamt 353 Drahtwürmer gefangen. Ungefähr ein Drittel davon waren Individuen der Art *A. ustulatus*, von den restlichen Drahtwürmern konnten nach molekularer Bestimmung 82 % der Art *A. brevis* und 18 % *A. sputator* zugeordnet werden. Wie in der Abbildung zu erkennen, zeigten die Drahtwurmaktivitäten eine extrem geklumpfte Verteilung. So variierten die Aktivitätszahlen zwischen Positionen 4 und 6 um den Faktor 29, und das bei einem Abstand von knapp 25 m! Dies stellt zwar ein Extrembeispiel dar, aber auch auf den anderen untersuchten Flächen konnten teilweise markant geklumpfte Aktivitätsverteilungen festgestellt werden.

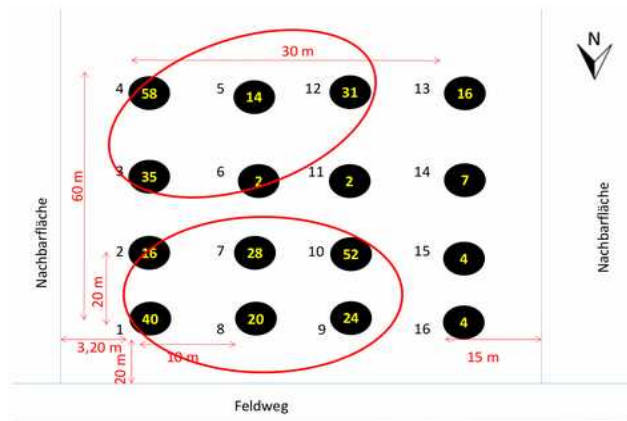


Abbildung 16: Ansicht und Ergebnis des Flächenscreenings eines Feldes im Marchfeld, Juni 2017

3.1.2 Saisonaler Verlauf der Drahtwurmaktivität auf Ackerstandorten (Weinviertel)

Die ab Mitte April 2016 an einem Weinviertler Standort (Betrieb Fiedler/Goggendorf) durchgeführte Erhebung des saisonalen Verlaufs der Aktivität von *Agriotes ustulatus* unter Winterweizen zeigte Anfang Juni einen ersten markanten Anstieg (Abbildung 17). Die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur in 15 cm Bodentiefe lagen in dieser Periode zwischen 16,5 und 18 °C. Ihren Höhepunkt erreichte die Drahtwurmaktivität Mitte Juli. Auch Anfang August war die Aktivität relativ hoch.

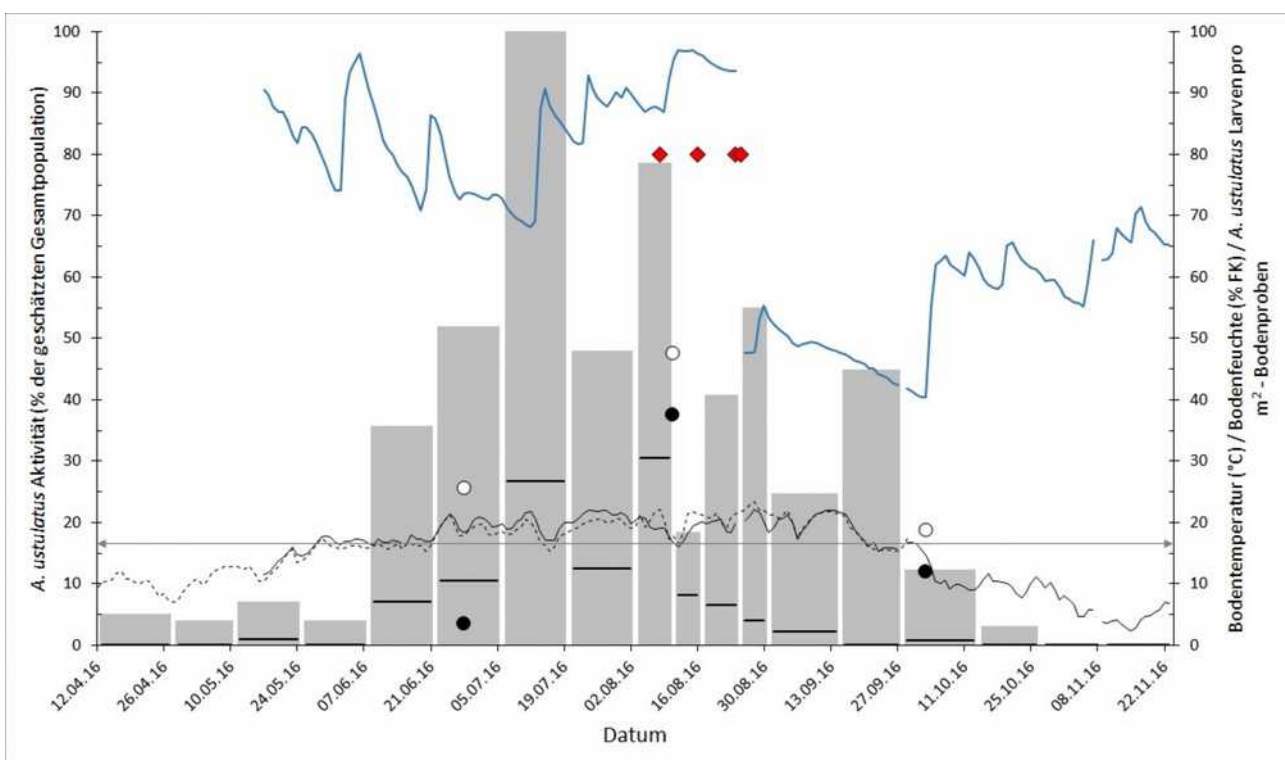


Abbildung 17: Ergebnis der Dauerbeprobung am Standort Goggendorf (Weinviertel). Graue Säulen = *A. ustulatus* Aktivität in der obersten Bodenschicht (% der geschätzten Gesamtpopulation) in der entsprechenden Fangperiode – in der Periode mit 100% Aktivität wurden in 10 Fallen insgesamt 127 *A. ustulatus* Larven gefangen; Abschnitt der grauen Säulen unter der schwarzen horizontalen Linie = %-Anteil der kleinen Larven (Stadien 1 – 6, maximale Kopfkapselbreite 0,5 mm); Kreise: absolute *A. ustulatus* Dichte erhoben mittels Bodenproben = Larven/m², 0 – 10 cm (weiß), 10 – 20 cm (schwarz); Schwarze Linien: Bodentemperatur (15 cm Tiefe, Tagesmittel, durchgehend = gemessene Werte, strichliert = simulierte Werte - BOKU-Meteorologie, Prof. Josef Eitzinger; Blaue Linie = gemessene Bodenfeuchte (% der Feldkapazität, anhand Literatur und Bodenanalysen auf 33 Volumens-% geschätzt, Tagesmittel); Rote Rauten = Bodenbearbeitung, chronologisch – WW Ernte + Grubber, Grubber, Tiefenlockern, Begrünungsanbau

Bemerkenswert war der hohe Anteil an jungen Larven (Larvenstadium 1-6, maximale Kopfkapselbreite 0,5 mm) zwischen Mitte Juli und Mitte August. Nach der betriebsspezifischen Bodenbearbeitung im Anschluss an die Ernte des Winterweizens (zweimaliges Grubbern, einmal Tiefenlockern) im August gab es einen deutlichen Rückgang sowohl der Bodenfeuchte als auch der Drahtwurmaktivität. In der zweiten Septemberhälfte kam es wieder zu einer leichten Zunahme der Drahtwurmaktivität. Ab Anfang Oktober gingen die Fänge stark zurück. Die Tagesmittelwerte der Bodentemperatur in 15 cm Tiefe fielen in der Periode vom 29.9.16 bis 13.10.16 von 16,8 auf 9 °C ab. Im November wurden keine *A. ustulatus* Larven am Standort Fiedler mehr gefangen.

Die Ergebnisse der Aktivitätsmessungen mittels Köderfallen korrelierten mit den Ergebnissen der Drahtwurmdichte-Erhebungen mittels Bodenproben. Bei allen drei Bodenbeprobungen befanden sich mehr Drahtwürmer in den oberen 10 cm des Bodens als in 10-20 cm Tiefe.

3.1.3 Saisonaler Verlauf der Drahtwurmdichten im Grünland (Tirol)

Die Drahtwurmpopulation am Versuchsstandort Imst wurde von *Agriotes sputator* mit 79 % der Larven dominiert. Bei den verbleibenden 21 % handelte es sich ausnahmslos um *Agriotes obscurus*. Der Drahtwurmbestand wies über das gesamte Jahr 2017 einen stabilen Verlauf auf (Abbildung 18a), wobei sich zu den Zeiten der Probennahmen in den oberen Bodenschichten generell mehr Larven aufhielten als in 10-20 cm Tiefe. Im Versuchsjahr 2018 wurden 68,7 % der Larven in 0-10 cm Bodentiefe gefunden, und nur 31,3 % in einer Bodentiefe von 10-20 cm (Abbildung 18b). Vom ersten Probenahmetermin an blieb die durchschnittliche Anzahl der in der oberen Schicht (0-10 cm Bodentiefe) gefundenen *Agriotes*-Larven von ca. 4 bis 5 *Agriotes*-Larven pro Probenahme-Tag bis zum 25. April relativ hoch. Zu diesem Termin wurde ein Tief von durchschnittlich 1,3 *Agriotes*-Larven pro Probe erreicht. Anschließend stiegen die Larvendichten bis 20. Juni auf durchschnittlich 4,1 Larven pro Probenahme-Tag an. Das nächste Tief kam am 19. Juli mit durchschnittlich 1,5 *Agriotes*-Larven pro Probe. Die Anzahl der Drahtwürmer, die aus den tieferen Bodenschichten (10-20 cm Bodentiefe) extrahiert wurden, war insgesamt gering, ab dem 22. Mai kam es zu einem Anstieg mit dem Höhepunkt am 19. Juli mit 2,7 *Agriotes*-Larven pro Probe.

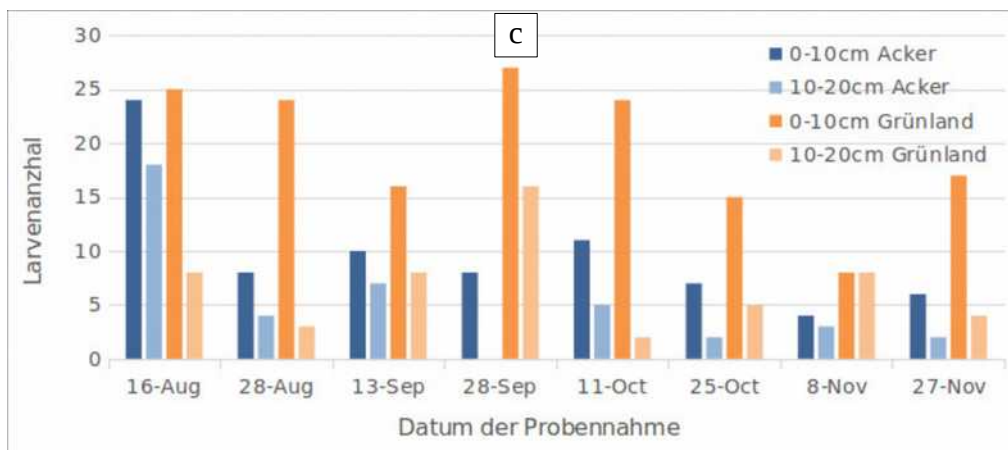
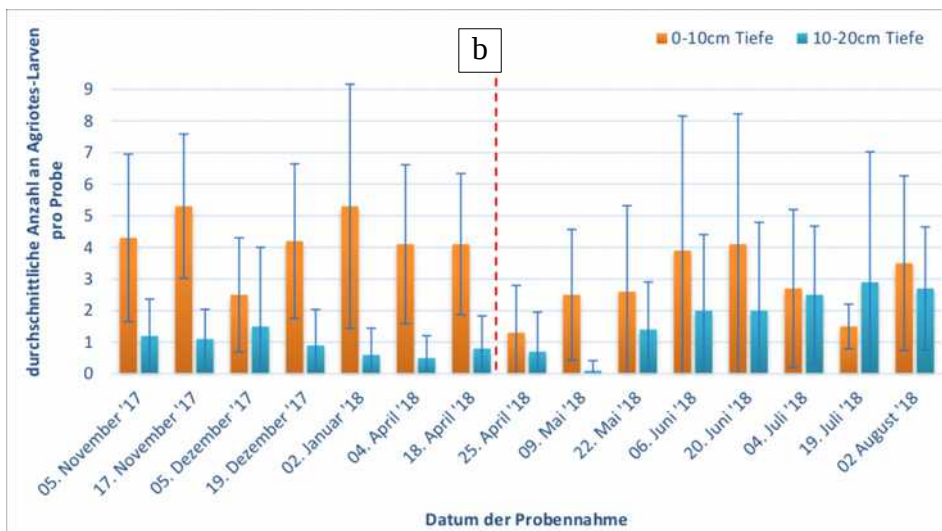
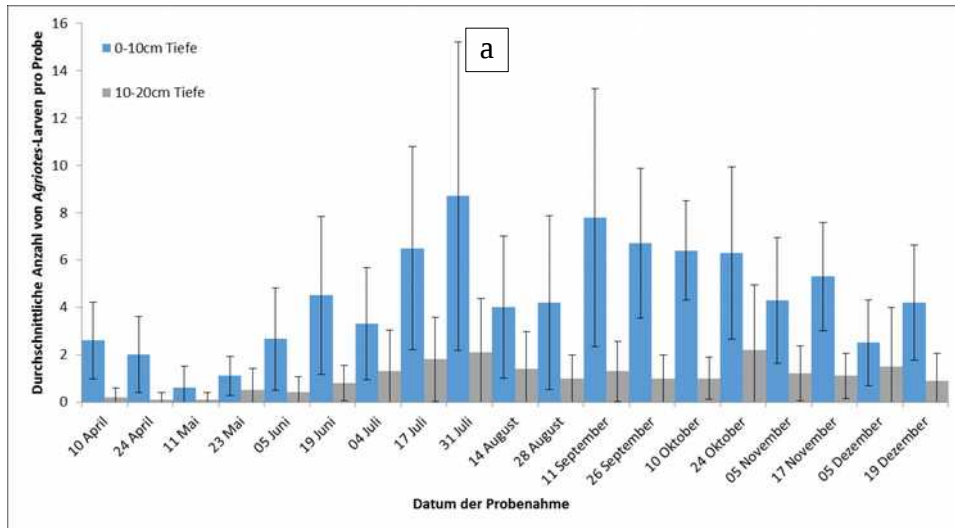


Abbildung 18: Saisonaler Verlauf der Drahtwurmdichten in Grünland und im Acker, Tirol 2017-2018

Nach erfolgreicher Kartoffelernte wurde auf der dafür verwendeten Fläche eine Saatgutmischung für Intensivgrünland ausgebracht und die Drahtwurmuntersuchungen vergleichend mit einer Dauergrünlandfläche fortgeführt. In diesen Untersuchungen zeigte sich, dass die Dauergrünlandfläche („Grünland“) besonders in der obersten Bodenschicht 0-10 cm signifikant höhere Drahtwurmdichten aufwies als die ehemalige Kartoffelfläche („Acker“; Abbildung 18c). Während im Dauergrünland die Population von jungen Larvenstadien (L1-L4) dominiert wurde, überwogen auf der ehemaligen Ackerfläche zu den meisten Beprobungsterminen ältere Larvenstadien (L5-L8).

3.1.4 Ausweichverhalten von Drahtwürmern

In der unbehandelten Variante, in die weder der insektenpathogene Pilz, noch Weizen oder Kartoffeln eingebracht wurden, waren die Drahtwürmer relativ gleichmäßig in den Säulen verteilt (Abbildung 19). Sowohl in der Variante „Erdäpfel ohne Begrünung“, als auch in der Variante „Erdäpfel mit Begrünung“ waren die Drahtwürmer in der unteren Säulenhälfte (Segmente 1 bis 3) zu finden und jeweils keine Drahtwürmer in der oberen Säulenhälfte (Segmente 4 und 5). Bei diesem Versuch war es also mit der Weizenbegrünung nicht möglich, die Drahtwürmer von den austreibenden Kartoffelknollen wegzulocken. Die Variante „Pilz ohne Begrünung“ unterschied sich hinsichtlich der Verteilung der Drahtwürmer in der Säule nicht von der unbehandelten Kontrolle. Ein Ausweichverhalten der Drahtwürmer gegenüber dem insektenpathogenen Pilz *Metarhizium brunneum* (Stamm BIPESCO5/F52) konnte also im Versuch nicht bestätigt werden. Die Variante „Pilz mit Begrünung“ war die einzige Variante, in der Drahtwürmer auch im obersten Säulensegment (Segment 5) gefunden werden konnten. Dies zeigt einerseits, dass der Weizen für die Drahtwürmer attraktiv war, besonders wenn alternativ keine Kartoffel zur Verfügung stand. Andererseits konnte dadurch gezeigt werden, dass durch die Kombination von Weizen und entomopathogenen Pilzen ein längerer Kontakt der Drahtwürmer mit den für sie schädlichen Pilzen erzielt werden kann.

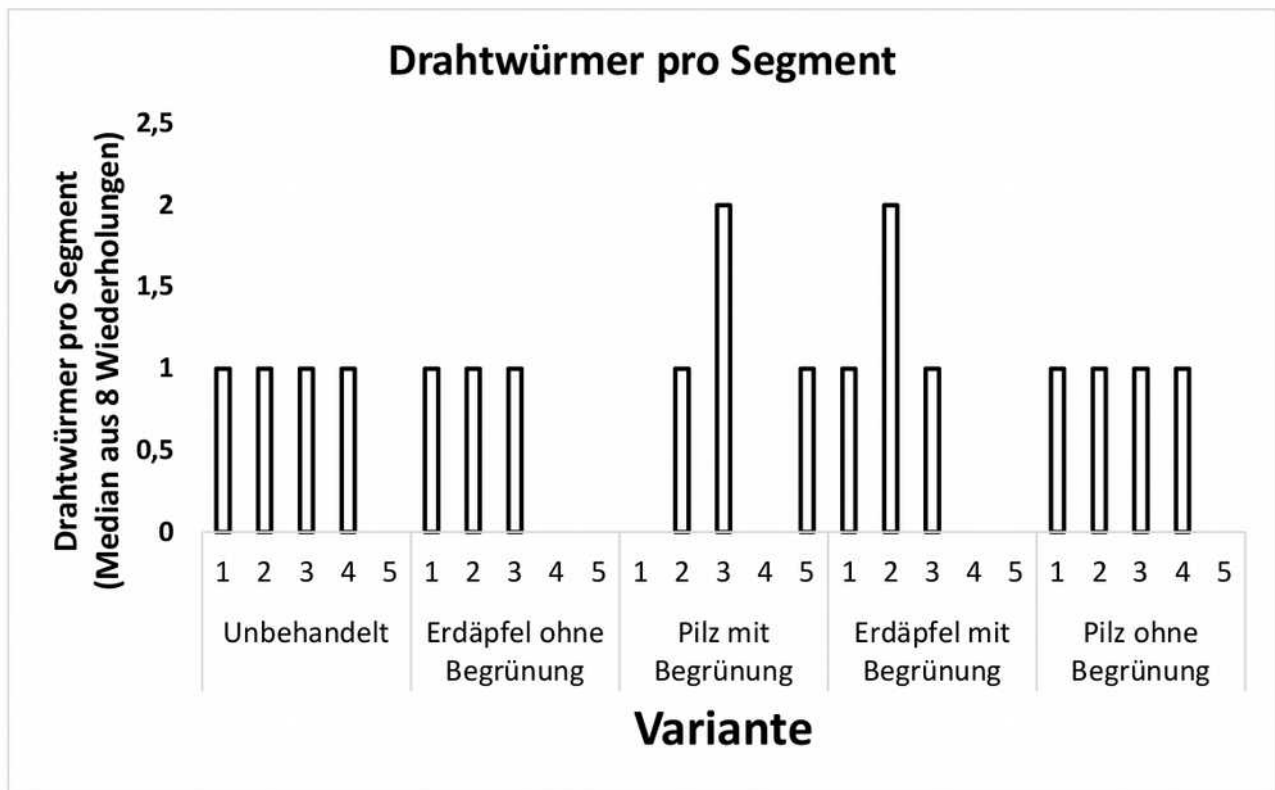


Abbildung 19: Bei der Versuchsauswertung wurde der Aufenthaltsort der Drahtwürmer in den Säulen in Abhängigkeit von der Behandlungsvariante untersucht.

3.2 Laborversuche mit *Metarhizium brunneum*

3.2.1 Virulenz-Tests durch Tauchen in Sporensuspension

In den Versuchen konnten hocheffektive Stämme von *Metarhizium brunneum* gegen alle in diesem Projekt in den österreichischen Kartoffelanbaugebieten gefundenen *Agriotes*-Arten identifiziert werden. Für alle *Agriotes*-Arten wies zumindest ein *Metarhizium*-Stamm nach 7 Wochen Versuchsdauer eine Mortalitätsrate von zumindest 50 % auf (Abbildung 16). Die in den Abbildungen dargestellte Mortalität bezeichnet ausschließlich eine durch *Metarhizium* verursachte Mortalität abzüglich von in der Kontrollvariante durch andere Todesursachen verendete Individuen, welches in einzelnen Abbildungen auftretende Abnahmen der Mortalität im Zeitverlauf erklärt. Der in der Schweiz von einem Drahtwurm isolierte Stamm A wies eine besonders hohe Virulenz gegen *Agriotes obscurus* auf. Dieser Stamm bewirkte schon innerhalb von 3 Wochen eine Mortalität von über 80 %. Gegenüber *Agriotes ustulatus* wies der gleiche Stamm eine deutlich geringere Virulenz auf. Die Stämme B und C wiesen bei den meisten Arten eine ähnliche Virulenz auf, die sich meist markant von der von Stamm A unterschied.

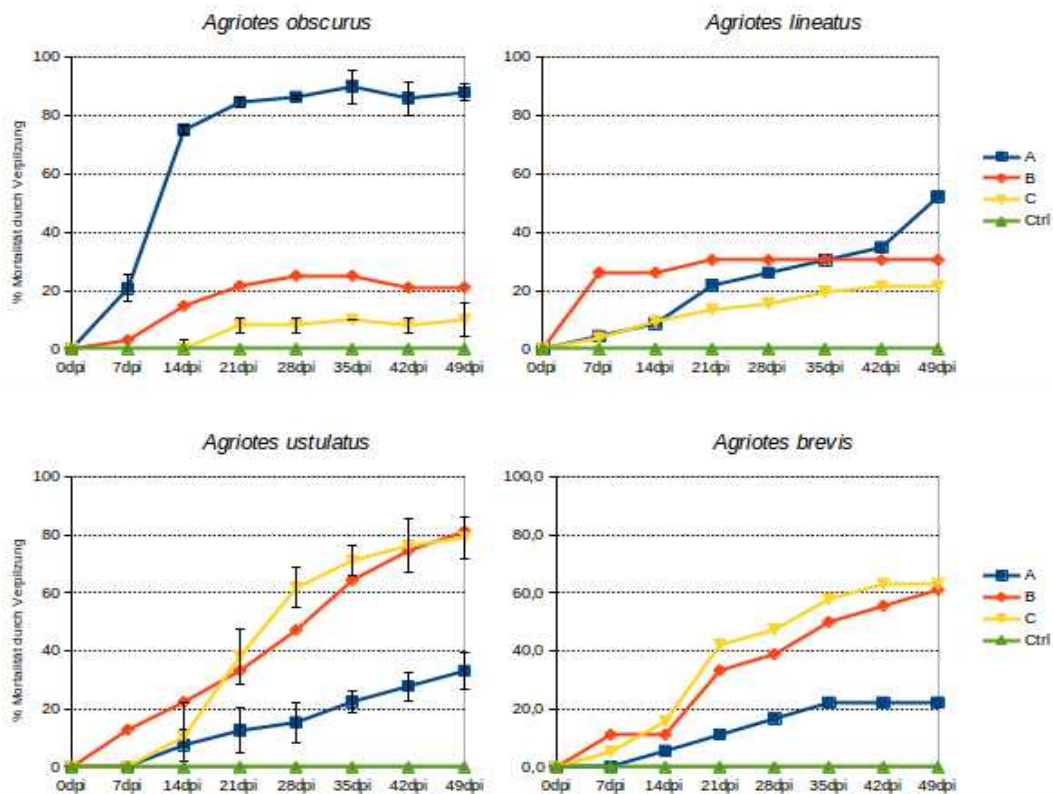


Abbildung 20: Mortalitätsrate von 4 Drahtwurmarten im Virulenztest mit 3 *Metarhizium brunneum* Stämmen.

Anhand der Ergebnisse dieser Virulenztests einigte sich die Operationelle Gruppe darauf, welche *M. brunneum* Stämme für die Feldversuche verwendet werden. Für die Versuche in Ostösterreich mit den dort vorkommenden Arten *A. ustulatus* und *A. brevis* wurde der Stamm Bipesco5/F52 verwendet, und für Standorte mit Vorkommen von *A. obscurus* und *A. lineatus* (Tirol) der Stamm ART2825.

3.2.2 Virulenz-Tests auf natürlichen Böden

Die durch *M. brunneum* F 52 verursachte Mortalität war bei den Drahtwürmern der Art *A. ustulatus* deutlich höher als bei *A. obscurus*. Auch zwischen den verschiedenen Böden waren eindeutige Unterschiede erkennbar. Diese Unterschiede waren bei beiden Drahtwurmartarten gleichermaßen zu beobachten (Abbildung 21). Es ist nicht davon auszugehen, dass die Sporendichte die einzige Ursache für die Unterschiede in der Mortalität zwischen den Varianten war, da die Menge an kolonienbildenden Einheiten von *Metarhizium* im Versuchsboden „Sandiger Lehm“ „(AGES)“ deutlich höher war als beim „Schluffigen Lehm“ (Fiedler)“ oder beim „Lehm“ (Wagner) (Abbildung 22).

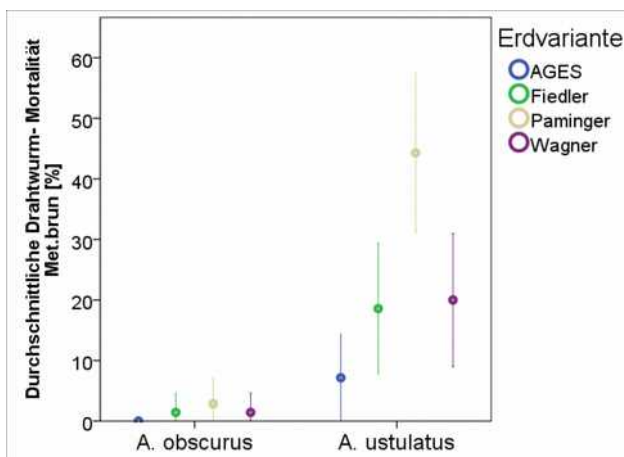


Abbildung 21: Mittelwert und Standardfehler der durch *M. brunneum* verursachten prozentuellen Mortalität bei *A. obscurus* und *A. ustulatus* ($n=70$).

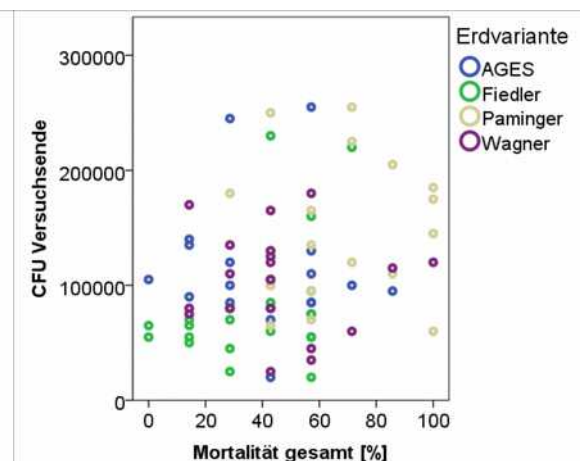


Abbildung 22: Zusammenhang zwischen der *Metarhizium brunneum* Menge und Drahtwurmmortalität.

Die Anzahl der kolonienbildende Einheiten von *M. brunneum* pro Gramm Erde wurde vor Versuchsbeginn und nach Versuchsende mittels Selektivmedium untersucht. Auf mit *M. brunneum* infizierten Larven kam es im Versuch rasch zu Myzelwachstum und Sporenbildung. Dadurch ist eine Zunahme an Sporen während des Versuches zu erklären. Dennoch nahm die Pilzdichte nicht in allen Bodenvarianten zu und auch die durch *M.*

brunneum verursachte Drahtwurmmortalität steht nicht immer mit einer Zu- oder Abnahme der Pilzdichte in Verbindung. So nahm beispielsweise die Sporendichte im Versuchsboden „Lehmiger Sand“ (Paminger) ab (Abbildung 18), obwohl in dieser Bodenvariante bei beiden Drahtwurmartarten die höchste Virulenz von *M. brunneum* beobachtet wurde. Die Erde vom Standort „Paminger“ unterschied sich von den übrigen drei Erdevarianten im Versuch vor allem durch einen niedrigeren pH-Wert und eine vergleichsweise höhere Humosität.

Die Zu- oder Abnahme der *Metarhizium*-Sporen wurde im Versuch signifikant vom Wassergehalt und damit indirekt von der Wasserhaltekapazität der verschiedenen Böden beeinflusst. In feuchteren Böden kam es eher zu einer Zunahme an Sporen als in trockeneren Böden (Tabelle 1, Abbildung 23).

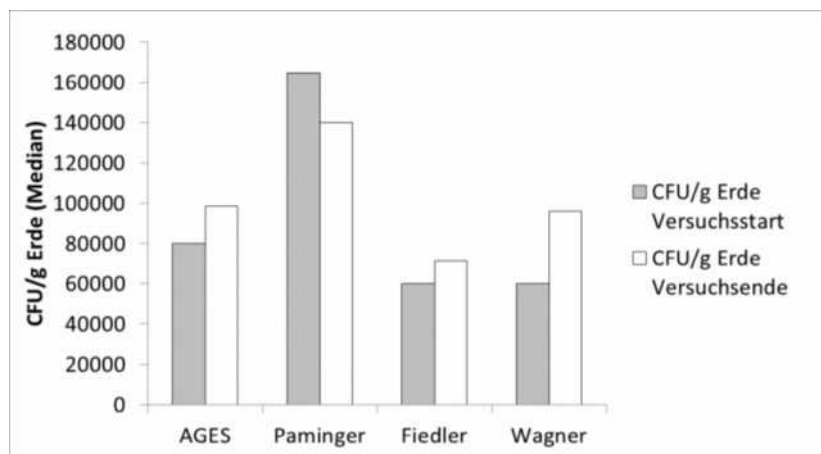


Abbildung 23: Median der koloniebildenden Einheiten (CFU) von *M. brunneum* aus drei Subsamples einer Mischprobe jeweils vor und nach der Versuchsdurchführung.

3.2.3 Pilzgerste Qualitätsbestimmung

Die Untersuchungen ergaben deutliche Unterschiede in der Sporenkonzentration (Tabelle 3) zwischen den verschiedenen Chargen sowie teilweise auch starke Verunreinigungen durch weitere Mikroorganismen. Folglich kam es zu Unterschieden in der auf die Versuchsflächen ausgebrachten Sporenmengen bei den einzelnen Versuchen.

Kontamination der Pilzgerste mit anderen Mikroorganismen hatten auch zur Folge, dass teilweise keine Sporenzählung oder Keimratebestimmung durchgeführt werden konnte. Da andere Pilze, welche auf der Pilzgerste wuchsen, teilweise kleinere Sporen hatten als *Metarhizium*, konnten diese nicht herausgefiltert werden - außerdem waren diese Sporen mengenmäßig dem *Metarhizium* so überlegen, dass in diesen Proben *Metarhizium*-Sporen kaum zu finden waren (Abbildung 24).

Lieferung der Pilzgerste	Zustand des Materials	Sporenkonzentration pro Gramm Pilzgerste	Sporenkonzentration im Feld
November 2016	Körner von Spelzen umschlossen; Nach 48h Inkubation bei 25°C war starkes Hyphenwachstum zu beobachten.	$3,73 \cdot 10^8$	$9,33 \cdot 10^{13}$
März 2017	Körner entspelzt; Nach 48h Inkubation bei 25°C war intensiver Hefegeruch und die Bildung kleiner weißer Kolonien auf den Körnern zu beobachten.	$9,14 \cdot 10^7$	$1,83 \cdot 10^{13}$
Juli 2017	Körner entspelzt; Nach 48h Inkubation bei 25°C war intensiver Hefegeruch und die Bildung kleiner weißer Kolonien auf den Körnern zu beobachten.	$1,38 \cdot 10^9$	$3,45 \cdot 10^{11}$
September 2017	Körner entspelzt; Nach 48h Inkubation bei 25°C war intensiver Hefegeruch und die Bildung kleiner weißer Kolonien auf den Körnern zu beobachten.	$2,09 \cdot 10^7$	$8,69 \cdot 10^{12}$

Tabelle 3: Qualitätsprüfung der Pilzgerste für die Freilandversuche von Global 2000.

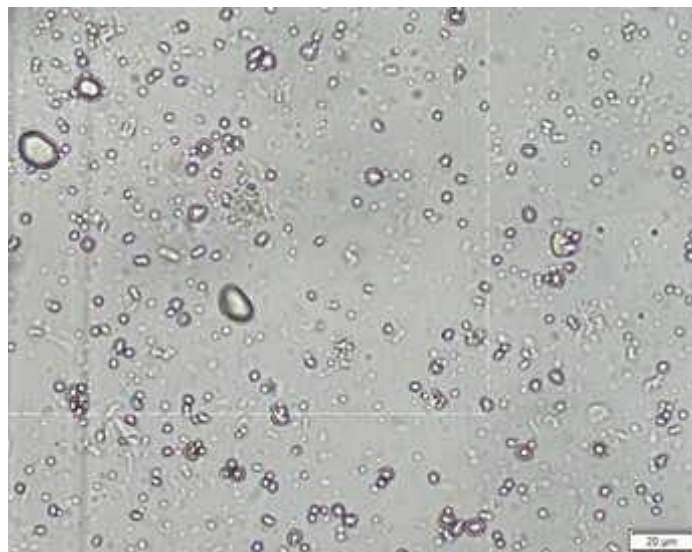


Abbildung 24: Versuch der Sporenzählung - Gefilterte Suspension in der Thomakammer

3.3 Freilandversuche

3.3.1 Exaktversuche mit *Metarhizium*

3.3.1.1 Weinviertel 2016/17

Die Untersuchungen der Entwicklung der Sporendichten von *Metarhizium brunneum* (GranmetP, Stamm BIPESCO5/F52) zeigten, dass sich der Pilz durch das Ausbringen der Pilzgerste in der Zwischenfrucht im August 2016 in den behandelten Parzellen bis zum Frühjahr 2017 etablieren konnte (Abbildung 25). Im weiteren Verlauf kam es möglicherweise witterungsbedingt zu einem Rückgang in der Sporendichte, die sich nachfolgend jedoch wieder erholte. In der Variante mit *Metarhizium* beim Kartoffellegen konnte sich der Pilz offenbar nicht etablieren, die Pilzsporendichte war geringer als in der Kontrollvariante. Zu sehen ist auch, dass sich die Sporendichte in der Variante mit zweimaliger Ausbringung von GranmetP im Herbst und im Frühjahr nicht von der Variante mit einer Ausbringung in die Zwischenfrucht unterschied.

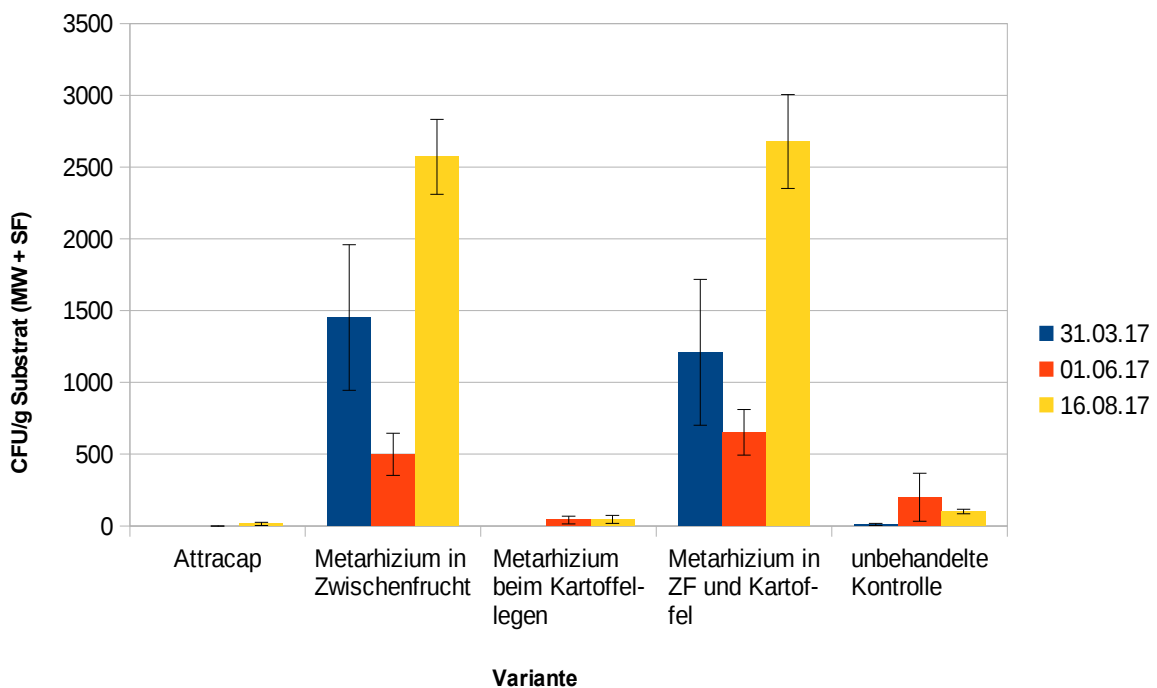


Abbildung 25: Ergebnis (Mittelwerte +/- Standardfehler d. Mittelwerte) der drei Bodenprobennahmen zur Sporenentwicklung von *Metarhizium brunneum*-Stamm CB15 (Variante „Attracap“) und *Metarhizium brunneum* Stamm BIPESCO/F52 am Versuchsstandort „Fiedler“ in Goggendorf (Weinviertel). In der Variante „Metarhizium in Zwischenfrucht“ wurde Pilzgerste am 28.08.2016, in der Variante „Metarhizium in Kartoffel“ am 03.04.2017 und in der Variante „Metarhizium in Zwischenfrucht und Kartoffel“ an beiden Terminen ausgebracht. Attracap wurde außerhalb des Versuchsfeldes zum Kartoffellegen (03.04.2017) in der Saatzfurche ausgebracht. Bodenproben wurden am 31.3., 1.6. und 16.8.2017 entnommen.

Der durch Drahtwürmer verursachte Schaden war insgesamt sehr hoch und mit 85,6 % befallenen Knollen (Knollen ab einem Drahtwurmlloch) in der Variante *Metarhizium* in der Zwischenfrucht vor Kartoffeln am höchsten. Den geringsten Befall (78,3 % befallene Knollen) zeigte die Variante mit einer Kombination von *Metarhizium* in der Zwischenfrucht und beim Kartoffellegen (Abbildung 26). Allerdings betrug selbst hier der Wirkungsgrad nach Abbott nur 7 %, obwohl fast die doppelte Menge an Pilzgerste verwendet wurde. Die leicht bessere Wirkung könnte daraus resultieren, dass der Pilz an zwei verschiedenen Terminen ausgebracht wurde und somit über einen längeren Zeitraum die Möglichkeit hatte Drahtwürmer zu infizieren. Bei der statistischen Analyse im Versuch „Fiedler“ ergab ein nicht-parametrischer Friedman Test einen Chi-square Wert von 2.14 ($p = 0.54$) und zeigte somit keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

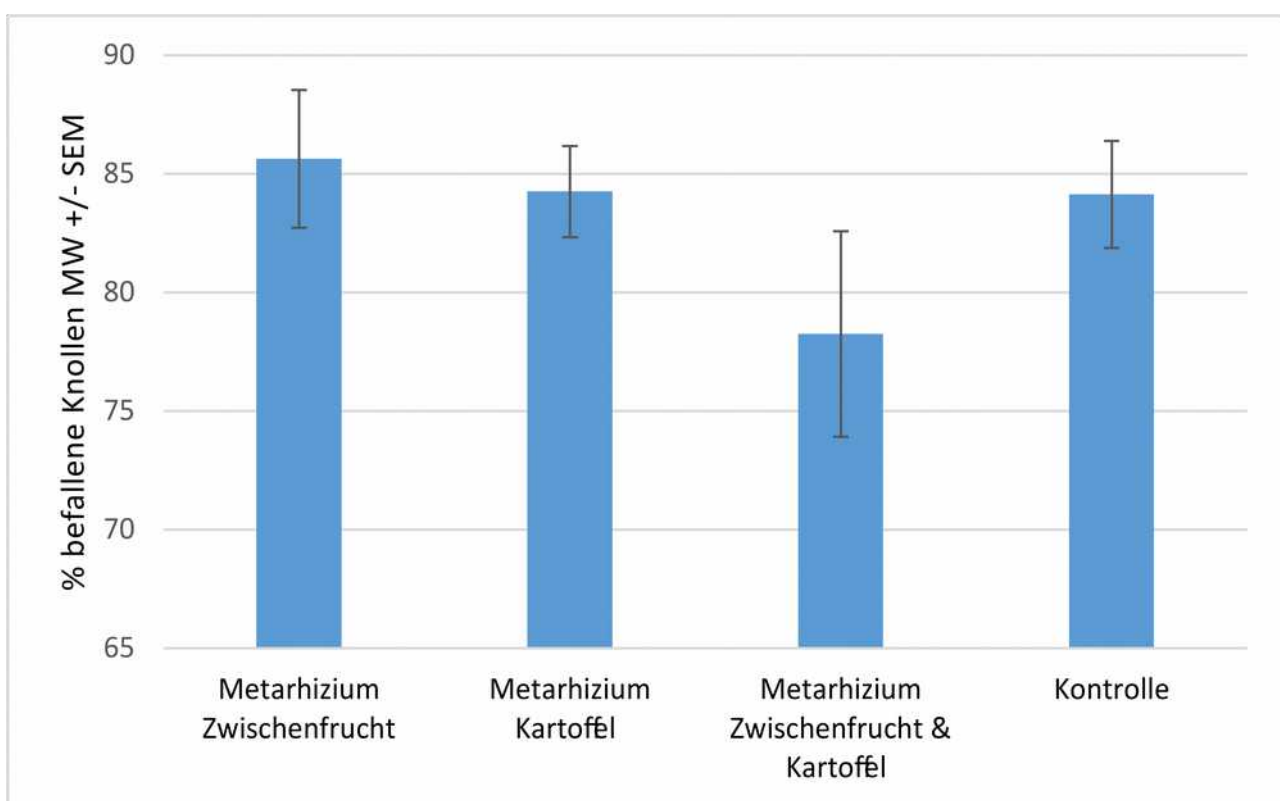


Abbildung 26: Knollenbonitur-Ergebnis *Metarhizium*-Versuch 2016/2017, Weinviertel, Goggendorf, Standort „Fiedler“ Prozentsatz an Knollen mit mindestens einem Drahtwurmlloch (MW +/- SEM)

Die Ergebnisse der Bodenproben zur Erhebung der Drahtwurmdichte vor der Ernte zeigten ein ähnliches Bild wie die Kartoffelbonitur (Abbildung 27). Tendenziell waren die wenigsten Drahtwürmer in den Parzellen mit *Metarhizium*-Behandlung im Frühjahr zu beobachten. Wurden die Larven aus den Bodenproben in Kopfkapsel-Größengruppen aufgeteilt, ergab sich ein schwacher Hinweis darauf, dass ältere Larven möglicherweise

eher durch die Behandlung im Herbst reduziert wurden, jüngere eher durch die Behandlung im Frühjahr. Die Fallenfänge bestätigten dies allerdings nicht. Sie zeigten lediglich in allen Größengruppen tendenziell weniger Drahtwurm-Fänge in Parzellen mit einer *Metarhizium*-Behandlung im Frühjahr. Eine mögliche Erklärung dafür könnte sein, dass der Standort Fiedler eine sehr hohe Drahtwurm-Dichte aufwies. Die Fallen deckten einen Zeitraum nach der Bodenbeprobung ab (13. bis 27. September 2017), in dem im Dauerbeprobungstransect die höchste Larvenaktivität der Saison gemessen wurde. Möglicherweise führte dies zu einer „Verwaschung“ der Effekte, gerade bei den wanderungsfreudigeren großen Larven.

BODENPROBEN Goggendorf 2017 → alle Größen

Mittelwerte +/- SEM

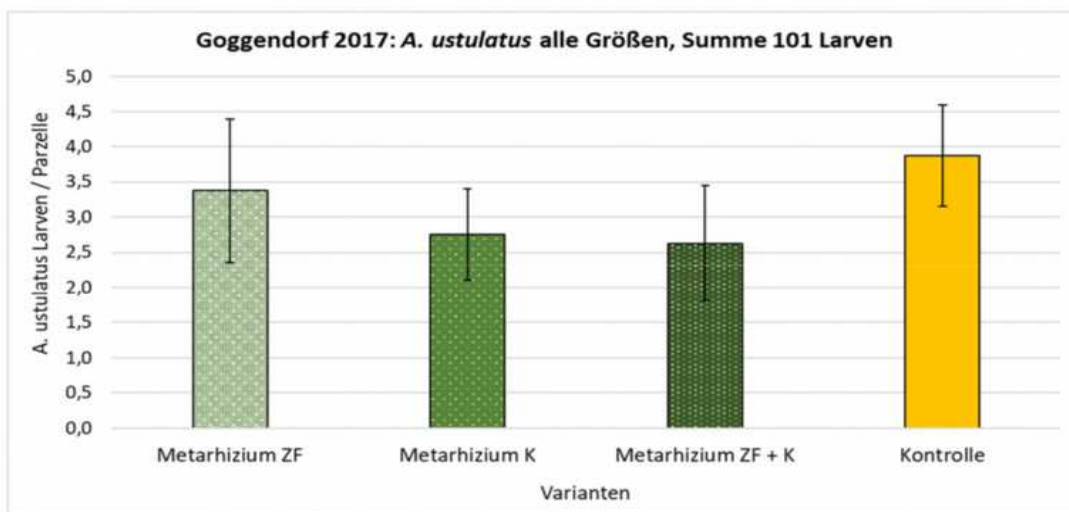


Abbildung 27: Ergebnis der Bodenprobe zur Messung der Drahtwurmdichte am Standort "Fiedler", Goggendorf (Weinviertel) zwei Wochen vor der Kartoffelernte.

3.3.1.2 Marchfeld 2017/18

Untersuchungen der AGES zur Qualität der zum ersten Zeitpunkt ausgebrachten Pilzgerste ergaben eine besonders niedrige Sporenkonzentration von $1,38 \cdot 10^6$ CFU/g Pilzgerste. Die am Feld angestrebte Zielkonzentration von *Metarhizium*-Sporen liegt zwischen 10^{12} und 10^{14} Sporen/ha. Diese wurde mit $3,5 \cdot 10^{11}$ deutlich verfehlt. Auch aus diesem Grund wurde der Versuch ein zweites Mal angelegt. Bei der zweiten Ausbringung war die Sporenkonzentration der neuen Lieferung von GranmetP zufriedenstellend, was im Freiland eine erwartete Sporendichte von $8,7 \cdot 10^{12}$ Sporen/ha bedeutet.

Die Ergebnisse der Sporendichtemessung blieben hingegen, trotz betriebsüblicher Bewässerung von 7x25 mm zwischen 6. Juni und 10. August 2018, hinter den Erwartungen zurück. Die Anzahl an koloniebildender Einheiten (CFU) im Verlauf des Jahres (Abbildung 28) blieben auf ähnlichem Niveau wie das natürliche Vorkommen am Standort in den unbehandelten Parzellen (Variante Zwischenfrucht und Anlockstreifen)

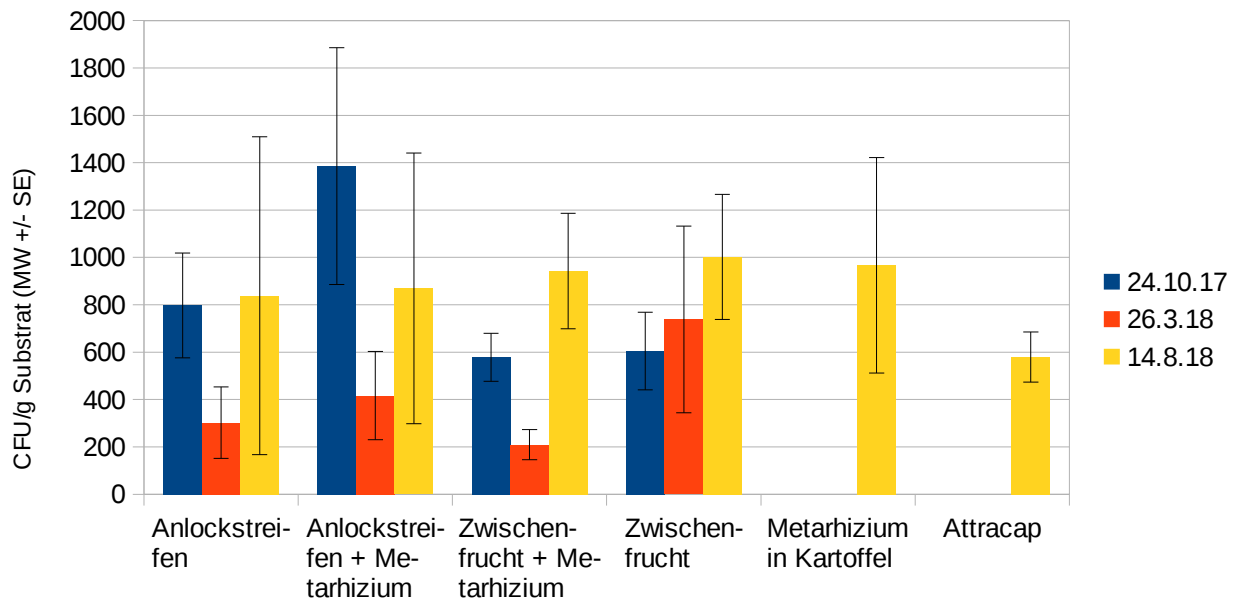


Abbildung 28: Ergebnis (Mittelwerte +/- Standardfehler d. Mittelwerte) der drei Bodenprobennahmen zur Sporenentwicklung von *Metarhizium brunneum*-Stamm CB15 (Variante „Attracap“) und *Metarhizium brunneum* Stamm BIPESCO/F52 am Versuchsstandort „Wagner“ in Obersiebenbrunn (Marchfeld). In den Varianten „Anlockstreifen + Metarhizium“ und „Zwischenfrucht + Metarhizium“ wurde Pilzgerste am 25.09.2017, in der Variante „Metarhizium in Kartoffel“ am 17.04.2018 ausgebracht. Attracap wurde außerhalb des Versuchsfeldes zum Kartoffellegen (17.04.2017) in der Saatfurche ausgebracht. Bodenproben wurden am 24.10.2017, 26.03.2018 und 14.08.2018 entnommen.

Das Ausmaß der Drahtwurmschäden war mit je nach Variante zwischen 50 und 60 % befallenen Knollen sehr hoch (Abbildung 29), wenngleich die meisten Knollen mit Drahtwurmschäden nur 1-2 Löcher aufwiesen. Eine Varianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ($F(4,24)=1.15, p=0.359$).

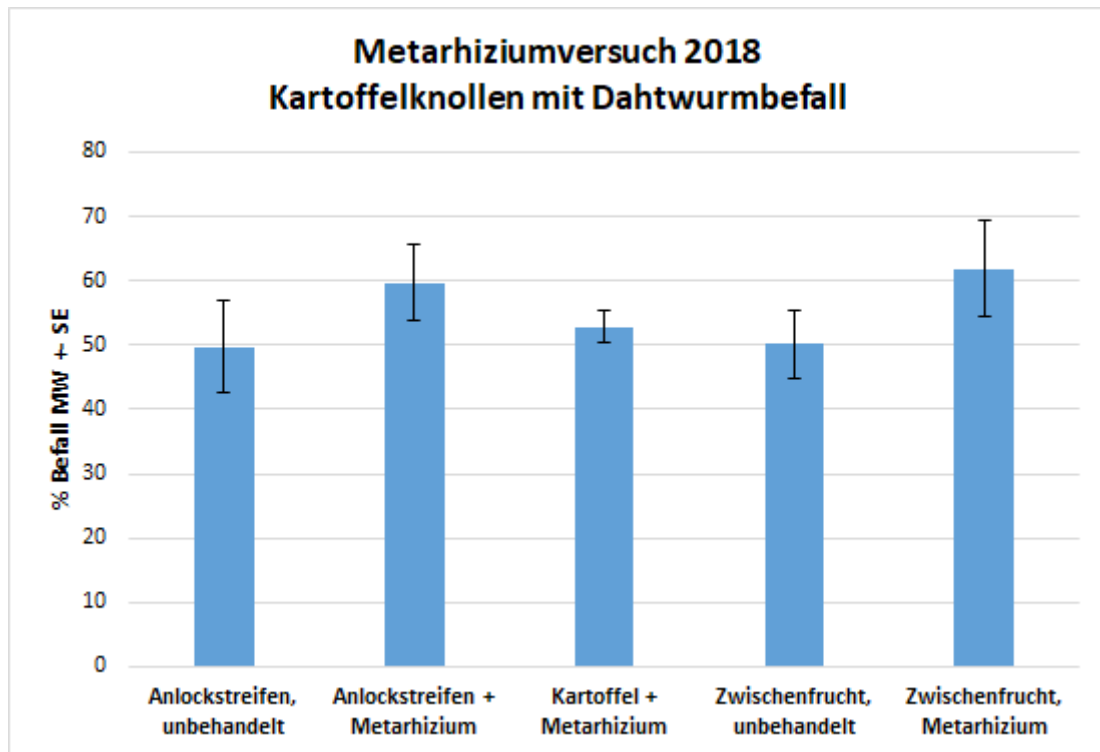


Abbildung 29: Knollenbonitur-Ergebnis Metarhizium-Versuch 2017/2018, Marchfeld, Obersiebenbrunn, Standort „Wagner“ Prozentsatz an Knollen mit mindestens einem Drahtwurmloch (MW +/- SEM)

Bei der Erhebung der Drahtwurmdichte mittels Bodenproben zwei Wochen vor der Ernte wurden überraschenderweise nur wenige Larven gefunden, wobei die meisten der Art *Agriotes ustulatus* angehörten. Während in den Bodenproben insgesamt nur 43 Larven dieser Art gefunden wurden, ergaben die Fänge in den Köderfallen insgesamt 318 Larven mit deutlichen Unterschieden in der Verteilung zwischen den Varianten (Abbildung 30). Unabhängig von der *Metarhizium*-Behandlung waren in den Parzellen mit Weizenstreifen, die im August des Vorjahres ausgesät wurden, auch kurz vor der Kartoffelernte die meisten Drahtwürmer in den Fallen. Die Fänge wurden nach Kopfkapselbreite in ältere (> 0,5 mm) und jüngere Larven (< 0,5 mm) aufgeteilt. Die jüngeren Larven wurden in signifikant größeren Mengen in den Varianten mit Anlockstreifen gefunden, bei den größeren Larven war die Verteilung homogener und ergab keine signifikanten Unterschiede.

Fallen (2/Parzelle) Obersiebenbrunn 2018

Mittelwerte +/- SEM

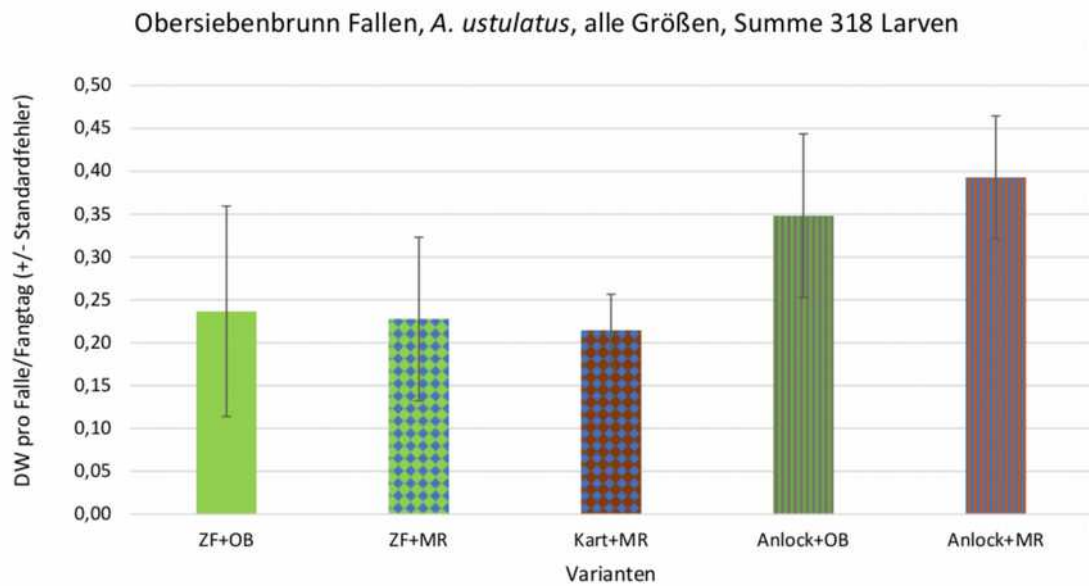


Abbildung 30: Ergebnis der Messung der Drahtwurmaktivität am Standort "Wagner", Obersiebenbrunn (Marchfeld) in den zwei Wochen vor der Kartoffelernte, ZF+OB=Zwischenfrucht unbehandelt, ZF+MR=Zwischenfrucht mit Metarhizium, Kart+MR=Kartoffel+Metarhizium, Anlock+OB=Anlockstreifen unbehandelt, Anlock+MR=Anlockstreifen mit Metarhizium

3.3.1.3 Imst 2017/18

Untersuchungen zur Entwicklung der *Metarhizium*-Sporen in den Parzellen zeigten keinen Anstieg in der Dichte an *Metarhizium*-Sporen im Boden durch die 2017 erfolgte Ausbringung von Pilzgerste im Vergleich zur Kontrolle (Abbildung 31). Auch wurden nur geringe Unterschiede in der Abundanz keimfähiger Sporen zwischen behandelten und unbehandelten Parzellen festgestellt. Es kann also davon ausgegangen werden, dass in diesem Fall die Vorfruchtbehandlung im Grünland nicht oder nur sehr wenig Auswirkung auf die Pilzdichte im Boden hatte. Im Gegensatz dazu führte die Ausbringung der Pilzgerste im Frühjahr 2018, (nach dem Umbruch der Fläche) zu einem deutlichen Anstieg in den beobachteten CFU-Werten in den behandelten Parzellen der Varianten b und d (= ‚Kartoffel‘ und ‚Kartoffel+Lockpflanzen‘).

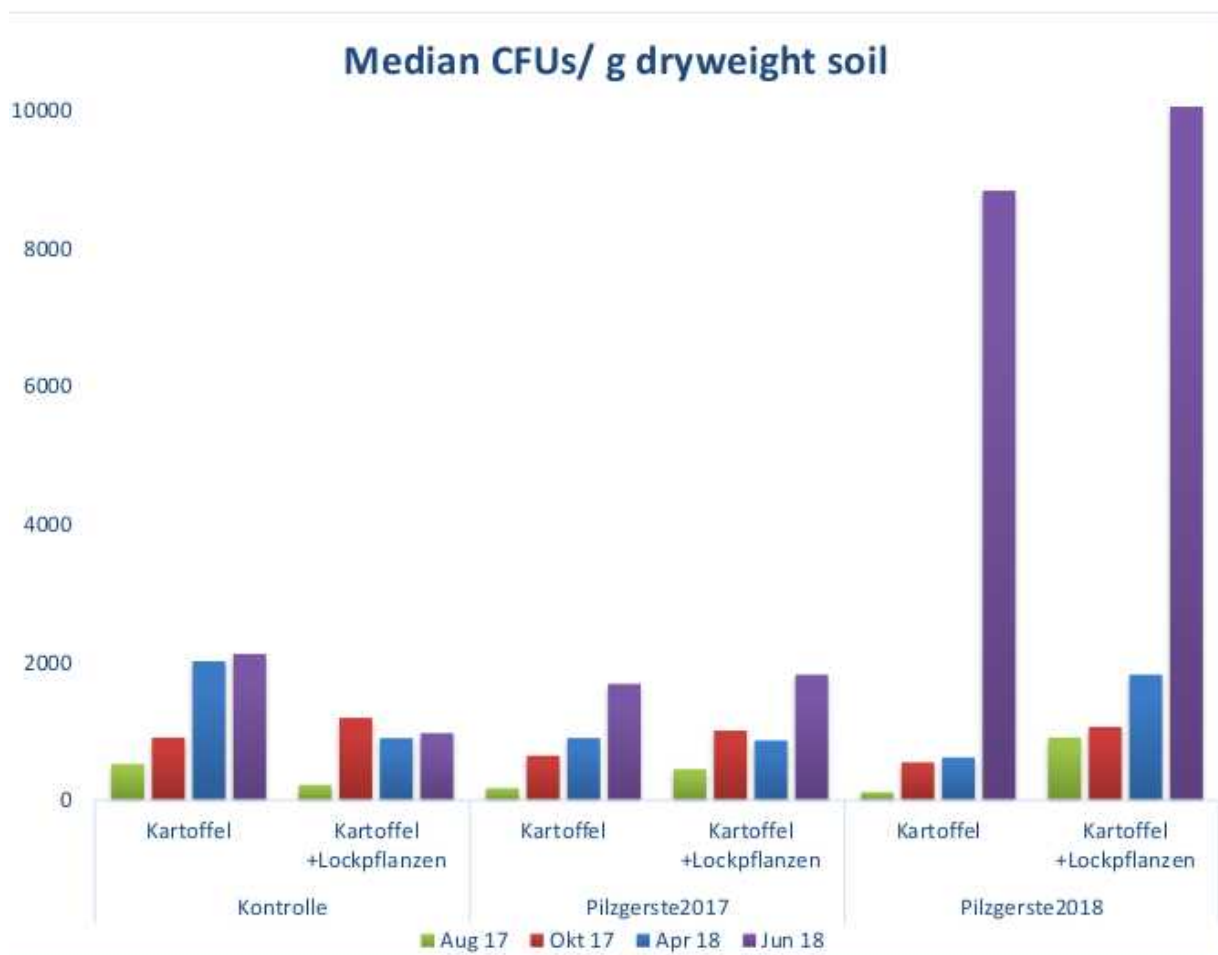


Abbildung 31: Ergebnisse der Probennahme zur Ermittlung der Pilzdichten vor Ausbringung der Pilzgerste (*Metarhizium brunneum* Stamm ART2825) auf der Versuchsfläche in Imst (Aug 17); nach Behandlung der Vorfrucht (Grünland – Okt 17 & Apr 18) und nach Behandlung der Hauptfrucht (Jun 18)

Bezüglich der Drahtwurmdichten wurden über alle Behandlungen hinweg mehr Drahtwürmer in den Dammentrennen – also direkt neben den Kartoffelpflanzen – gestochenen Proben gefunden als in den Bodenproben, die in der Dammböschung im Bereich der Lockpflanzen entnommen wurden (Abbildung 32). Es konnte kein Unterschied zwischen Behandlungen mit und ohne Lockstreifen ausgemacht werden. Ergebnisse zum Jahresverlauf der auf der Versuchsfläche erhobenen Drahtwurmdichten sind im Kapitel 3.1.3 beschrieben.

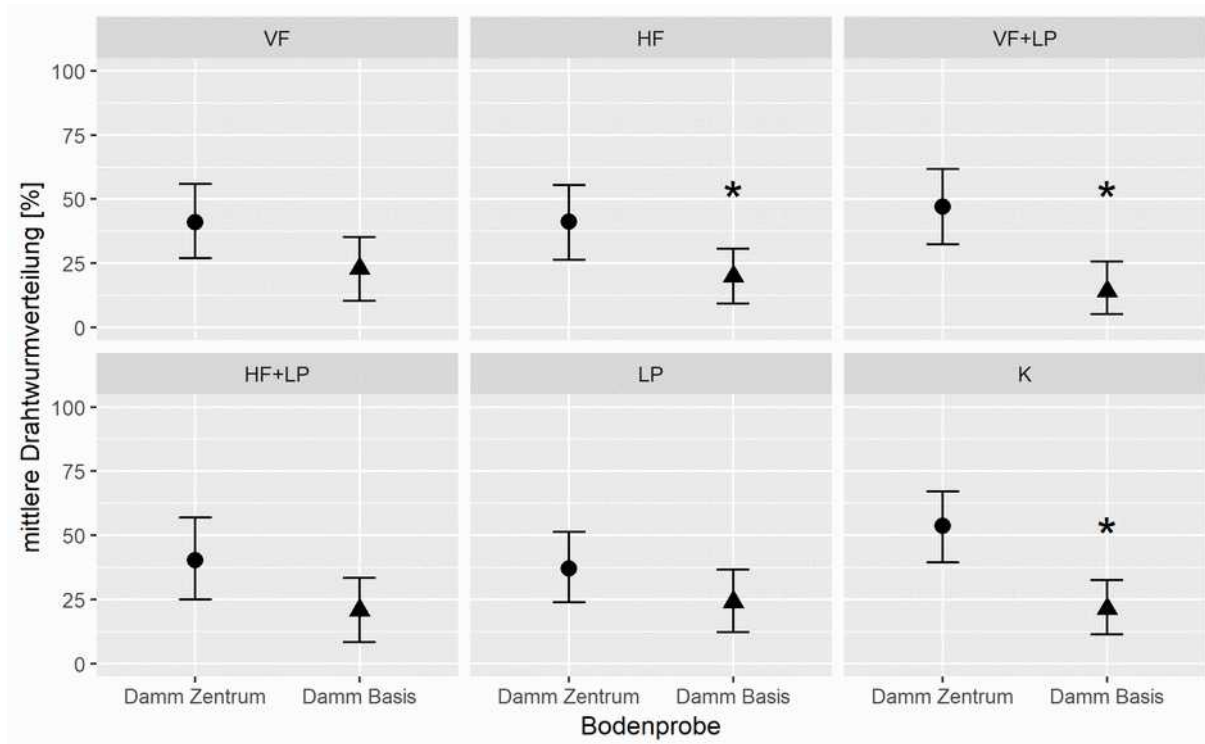


Abbildung 32: Ergebnisse der Bodenprobennahmen im Versuchsjahr 2018 in Imst mit der mittleren Drahtwurmverteilung in Prozent \pm 95% TCI für die einzelnen Behandlungen (VF=Pilzgerste im Grünland 2017; HF=Pilzgerste in der Kartoffel 2018; VF+LP=Pilzgerste im Grünland 2017 + Lockpflanzen in Kartoffel; HF+LP=Pilzgerste in Kartoffel 2018 + Lockpflanzen in Kartoffel; LP=Lockpflanzen in Kartoffel; K=Kontrolle). Gegenübergestellt werden gestochene Bodenproben im Damm Zentrum (direkt neben Kartoffelpflanzen) und an der Damm Basis (= im Bereich der Lockpflanzen).

Bei den auf der Versuchsfläche vorkommenden Arten handelte es sich zu 77 % um *A. sputator* und zu 23 % um *A. obscurus*. Aufgeteilt auf die verschiedenen Behandlungsvarianten lassen sich keine signifikanten Unterschiede in der Artzusammensetzung erkennen (Abbildung 33a). Auch in der Verteilung der Arten zwischen den beiden unterschiedlichen Einstichpunkten bei der Probennahme, nämlich in der Kartoffel und im

Bereich der Lockpflanzen, lassen sich keine statistisch bestätigten Unterschiede erkennen (Abbildung 33b).

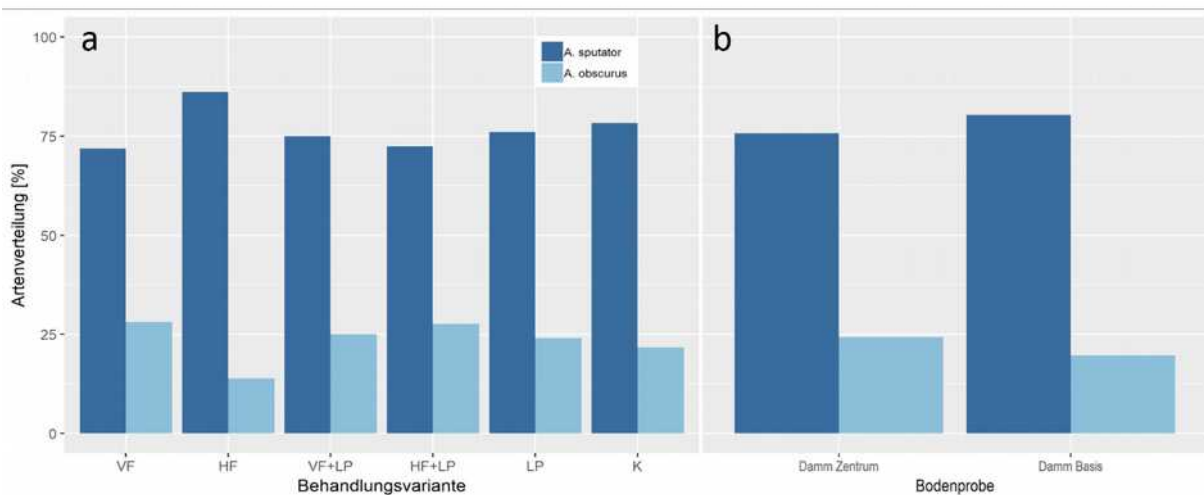


Abbildung 33: Ergebnisse der molekularen Drahtwurmbestimmung. Gezeigt ist die Verteilung der Arten in Prozent a) innerhalb der Behandlungsvarianten (VF=Pilzgerste im Grünland 2017; HF=Pilzgerste in der Kartoffel 2018; VF+LP=Pilzgerste im Grünland 2017 + Lockpflanzen in Kartoffel; HF+LP=Pilzgerste in Kartoffel 2018 + Lockpflanzen in Kartoffel; LP=Lockpflanzen in Kartoffel; K=Kontrolle) und b) zwischen gestochenen Bodenproben im Damm Zentrum (direkt neben Kartoffelpflanzen) und an der Damm Basis (= im Bereich der Lockpflanzen).

Allgemein war der Schaden in den in Imst geernteten Kartoffeln im Jahr 2018 sehr groß. Unter anderem durch die extreme Trockenheit und die ungewöhnlich heißen Perioden waren neben dem Drahtwurmbefall auch Beschädigungen der Knollen durch sonstige Fraßspuren wie z.B. durch Schnecken, Mäuse und Engerlinge sehr ausgeprägt. Auch einige Individuen der Gattung *Agrypnus*, die ebenfalls zur Familie der Schnellkäfer gehören, grundsätzlich aber aufgrund ihrer räuberischen Lebensweise nicht als Schädlinge im Kartoffelanbau gelten, konnten bei der Ernte direkt in einigen Knollen beobachtet werden. Neben tierischen Fraßspuren waren zudem in erheblichem Maße Schäden durch *Rhizoctonia solani* und Schorf zu verzeichnen. Außerdem wurde ein positiver Zusammenhang zwischen Drycore-Befall und zunehmender Anzahl an Drahtwurmlöchern festgestellt. Die Ursache hierfür liegt vermutlich darin, dass dem Pilz durch die Vorschädigung an der Knolle eine Eintrittsmöglichkeit in die Kartoffel geboten wird (Keiser et al. 2012). Zusätzlich sorgte ein früher Befall mit *Phytophthora infestans* (Krautfäule) – gepaart mit dem Auftreten von *Leptinotarsa decemlineata* (Kartoffelkäfer) und der Trockenheit – schon früh in der Saison für einen starken Rückgang des Krauts, weshalb auch der Ertrag relativ gering war.

Zwischen den Behandlungsvarianten mit und ohne Pilz, bzw. mit und ohne Lockpflanzen konnte kein Unterschied im Ertrag (gemessen als Gesamtgewicht der im jeweiligen Plot geernteten Kartoffeln) festgestellt werden (Abbildung 34a). Ein Vergleich des mittleren Kartoffelgewichts zwischen den Behandlungsvarianten ergab allerdings ein signifikant geringeres Knollengewicht in der Kontrolle (Variante f) im Vergleich zu fast allen übrigen Behandlungen (Abbildung 34b). Einzig im Vergleich von Kontrolle und Variante c, in der sowohl Lockpflanzen als auch Pilz (im Grünland 2017) ausgebracht worden waren, konnte kein statistisch belegbarer Unterschied gefunden werden. In der Kontrolle befanden sich somit vermehrt kleine, insgesamt dafür aber mehr Knollen als in den meisten anderen Varianten.

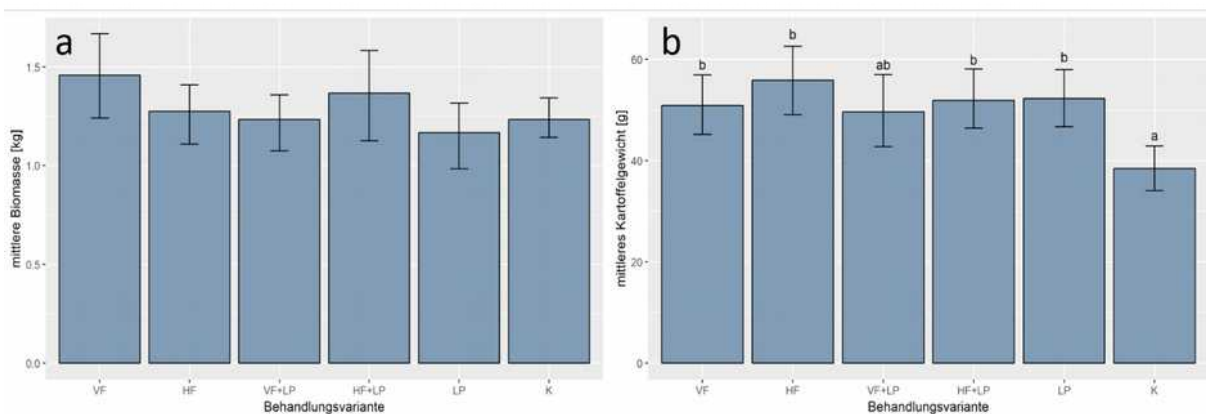


Abbildung 34: Mittlere Biomasse in kg \pm 95% TCI (a) und mittleres Kartoffelgewicht in g \pm 95% TCI (b) pro Behandlungsvariante (VF=Pilzgerste im Grünland 2017; HF=Pilzgerste in der Kartoffel 2018; VF+LP=Pilzgerste im Grünland 2017 + Lockpflanzen in Kartoffel; HF+LP=Pilzgerste in Kartoffel 2018 + Lockpflanzen in Kartoffel; LP=Lockpflanzen in Kartoffel; K=Kontrolle)

Bei einem Vergleich der mittleren Anzahl an Löchern pro Gramm Kartoffelgewicht konnte ein Unterschied von Kontrolle und Variante c (Pilz im Grünland 2017 und Lockpflanzen) zu der Behandlungsvariante d (Pilz in der Kartoffel 2018 und Lockpflanzen) festgestellt werden (Abbildung 35). In Variante d wurden dabei signifikant weniger Drahtwurmlöcher pro Gramm Kartoffel gefunden als in den beiden anderen Varianten. Für die Behandlungen a, b und e konnten keine statistisch belegbaren Unterschiede zu den drei oben genannten Varianten gefunden werden.

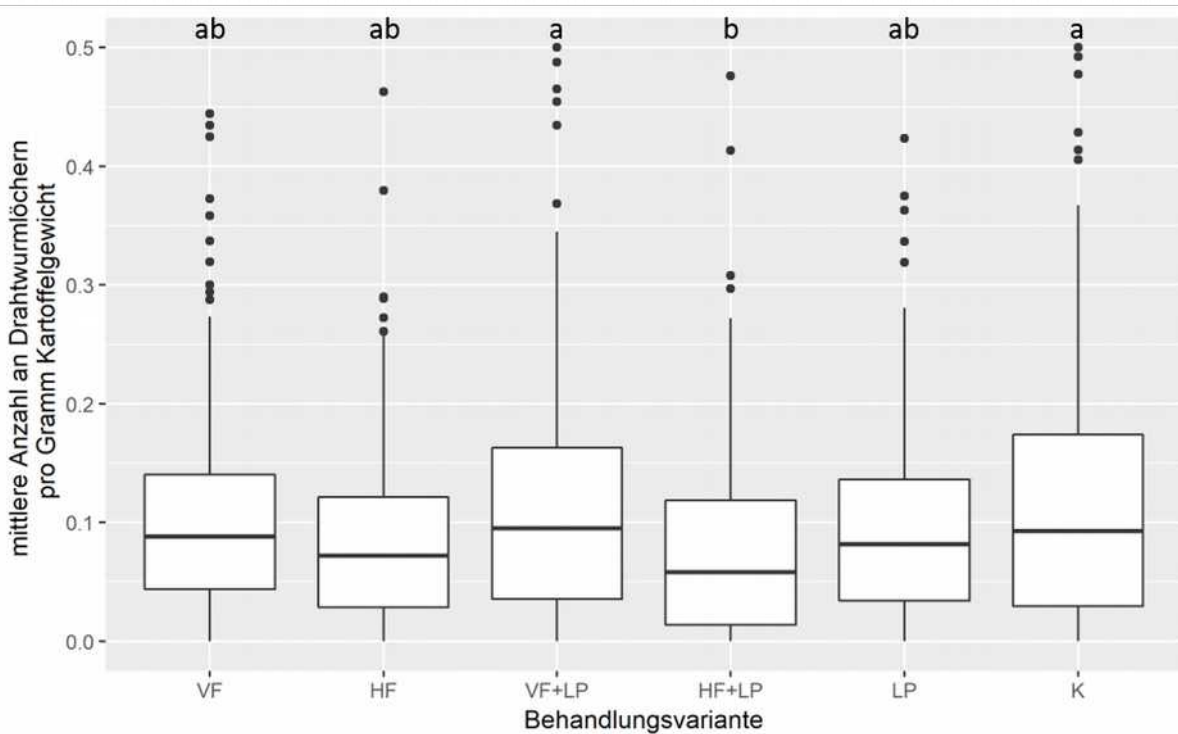


Abbildung 35: Boxplot der mittleren Anzahl an Drahtwurmlöchern pro Gramm Kartoffel als Median für die Behandlungsvarianten (VF=Pilzgerste im Grünland 2017; HF=Pilzgerste in der Kartoffel 2018; VF+LP=Pilzgerste im Grünland 2017 + Lockpflanzen in Kartoffel; HF+LP=Pilzgerste in Kartoffel 2018 + Lockpflanzen in Kartoffel; LP=Lockpflanzen in Kartoffel; K=Kontrolle)

Die Untersuchungen zur molekularen Nahrungsanalyse mittels CE-PCR erbrachten die höchsten Nachweiszahlen für DNA von *Solanum tuberosum* verglichen mit den getesteten Lockpflanzenarten. So stieg die Anzahl der positiv auf Kartoffel getesteten Drahtwürmer während der Saison bis zur Ernte (mit Ausnahme vom 19. Juli 2018) kontinuierlich an (Abbildung 36). Weder die Häufigkeit der Kartoffelnachweise noch die der Lockpflanzen unterschieden sich dabei signifikant zwischen Behandlungsvarianten mit und Varianten ohne Lockpflanzen.

Eine Identifikation von Pflanzenarten mittels des für die NGS-Analysen genutzten Genabschnitts (ein Fragment des trnL-Introns der Chloroplasten-DNA) ist in vielen Fällen nicht möglich. Somit konnten hier lediglich Familien unterschieden werden, da sich die DNA-Sequenz (d.h. die Basenabfolge) auf diesem Teil der DNA nicht unterscheidet. Auch hier konnte ein Großteil der Sequenzen als Solanaceae (zu denen auch die Kartoffel gehört) identifiziert werden. Die Familie der Solanaceae war somit auch in den mittels NGS generierten Sequenzen die signifikant am häufigsten nachgewiesene Gruppe

($p < 0,05$), wohingegen sich alle anderen Gruppen in ihrer Nachweishäufigkeit nicht unterschieden.

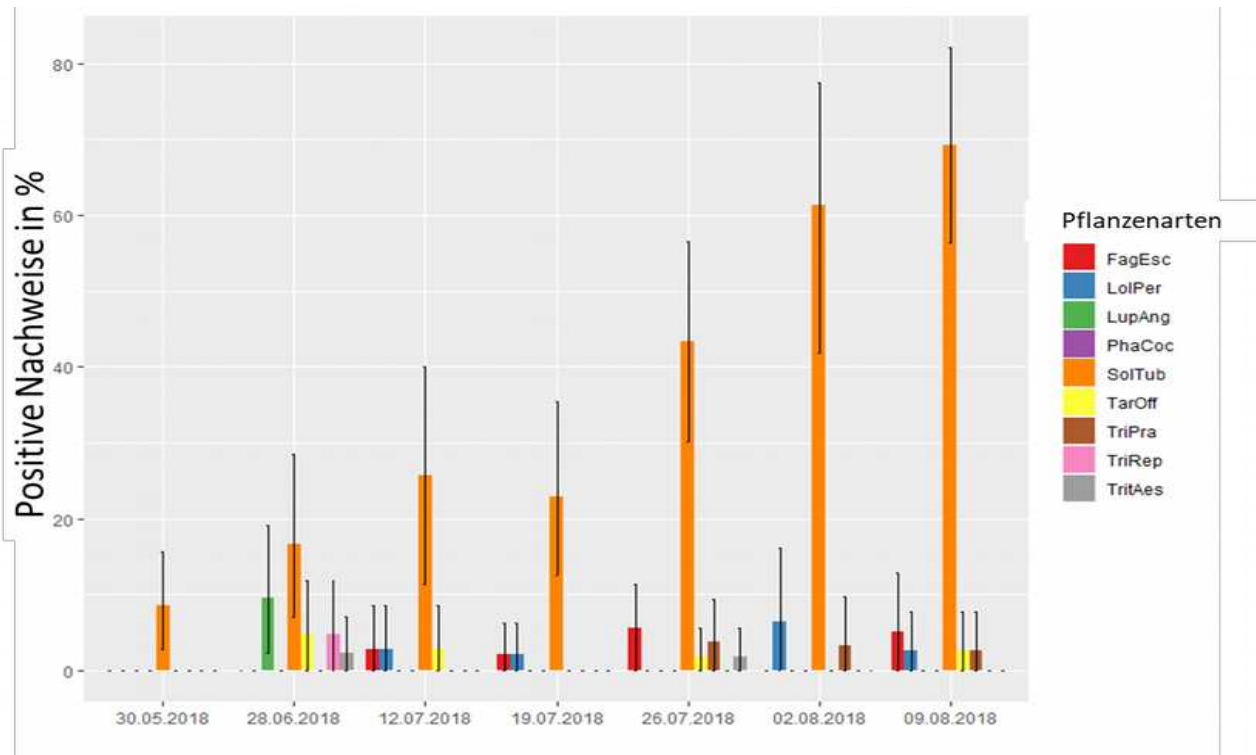


Abbildung 36: Ergebnisse der artspezifischen Nachweise für FagEsc = Buchweizen (*Fagopyrum esculentum*), LolPer = Weidelgras (*Lolium perenne*), LupAng = Blaue Lupine (*Lupinus angustifolius*), PhaCoc = Feuerbohne (*Phaseolus coccineus*), SolTub = Kartoffel (*Solanum tuberosum*), TarOff = Löwenzahn (*Taraxacum officinale*), TriPra = Rotklee (*Trifolium pratense*), TriRep = Weißklee (*Trifolium repens*) und TritAes = Weizen (*Triticum aestivum*). Gezeigt ist der prozentuale Anteil der pro Termin positiv getesteten Drahtwürmer.

3.3.1.4 Weer 2018/19

Die Auswertung der Bodenproben zeigt, dass sich der Pilz in den entsprechenden Parzellen sehr gut entwickelt hat (Abbildung 37). Auffällig ist, dass die Sporenanzahl auch nach der Vorfruchtbehandlung – anders als in Imst – mit einem mittleren Wert von über 28000 koloniebildenden Einheiten (CFUs) pro Gramm Boden-Trockengewicht stark angestiegen ist. Es kann somit davon ausgegangen werden, dass die Behandlung in der Zwischenbegrünung erfolgreich war. Auch im weiteren Verlauf zeigten die Sporendichten eine gute Entwicklung, vor allem nach Ausbringung der Pilzgerste in Verbindung mit der Einsaat der Lockpflanzen, was auf die Konzentration der Pilzapplikation in den Lockpflanzenreihen zurückzuführen ist.

Insgesamt wurden im Laufe der Probennahmen 2019 71 Individuen gesammelt und zur weiteren Untersuchung in die Labore der UIBK gebracht. Nach Bearbeitung aller Proben und der molekularen Artidentifikation stellte sich allerdings heraus, dass es sich nur bei 58 der gesammelten Tiere um Drahtwürmer der Gattung *Agriotes* handelt, von denen alle als *A. obscurus* identifiziert wurden. Es konnten keine statistisch belegbaren Unterschiede in der Verteilung der Larven innerhalb oder zwischen den Behandlungsvarianten gefunden werden.

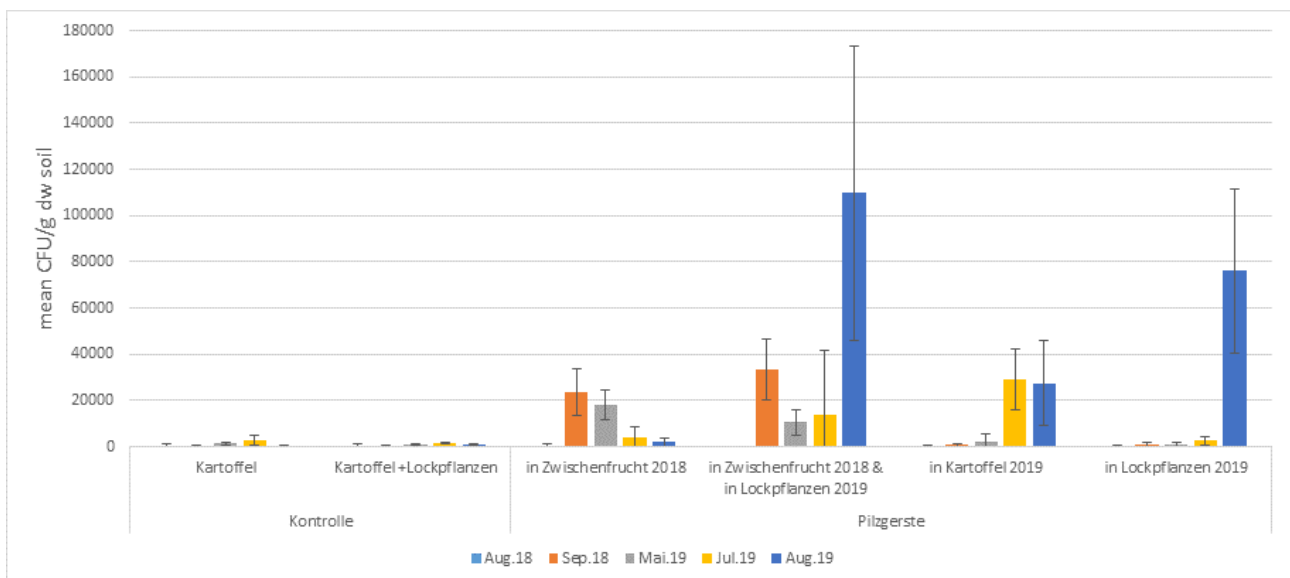


Abbildung 37: Ergebnis der Probennahmen in Weer (Tirol) im Jahr 2018/2019; Koloniebildende Einheiten (cfu) [g-1] pro Gramm Boden (Trockengewicht) \pm Standardabweichung von *Metharizium brunneum* in Bodenproben vom 9.8.18, 26.9.18, 15.4.19, 2.7.19, 16.8.19.

Wie schon im vorangegangenen Jahr wurde für jede der 36 Versuchspartellen der Schaden an allen in der Boniturmasse enthaltenen Knollen (1002) ermittelt. Generell war

der bonitierte Schaden in den Kartoffeln aus dem Jahr 2019 in Weer viel geringer als im vorangegangenen Jahr in Imst. Insgesamt wiesen über 50% der Knollen keinerlei Drahtwurmschaden auf (Abbildung 38). So konnten für das Versuchsjahr 2019 in Weer keine statistisch belegbaren Unterschiede im Ertrag, bzw. für das mittlere Kartoffelgewicht zwischen den Behandlungsvarianten gefunden werden. Auch die Auswertung des Drahtwurmschadens in den sechs verschiedenen Versuchsvarianten erbrachte keine signifikanten Ergebnisse.

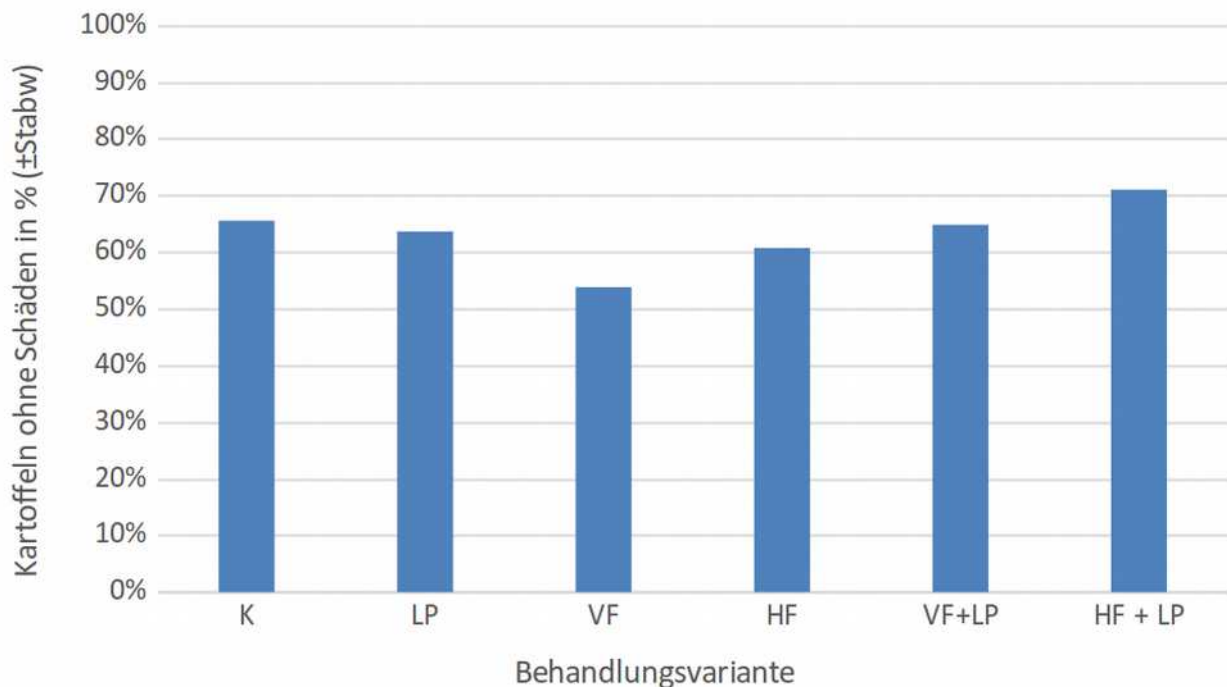


Abbildung 38: Übersicht über die Boniturmasse ohne Drahtwurmschäden aus dem Feldversuch in Weer 2019 in Prozent (\pm Standardabweichung) pro Behandlungsvariante (K=Kontrolle; LP=Lockpflanzen; VF=Pilzgerste in der Zwischenfrucht 2018; HF=Pilzgerste in der Kartoffel 2019; VF+LP=Pilzgerste in der Zwischenfrucht 2018 und in den Lockpflanzen 2019; HF+LP=Pilzgerste in der Kartoffel 2019 und in den Lockpflanzen 2019).

Die geplanten molekularen Nahrungsanalysen wurden aufgrund der geringen Probenanzahl und der damit verbundenen vorherzusehenden geringen Aussagekraft des Datensatzes nicht durchgeführt.

3.3.1.5 Marchfeld 2019

In keiner der ab dem 3. Juli 2019 genommenen Bodenproben wurden Drahtwürmer gefunden, und auch mit den Köderfallen wurden keine Drahtwürmer gefangen.

Die Varianten unterschieden sich nicht im Gesamtknollenertrag und ebenfalls nicht im Anteil der vermarktbaren Ware. Auch an den Kartoffelknollen konnten keine Drahtwurmschäden festgestellt werden. Etliche Knollen wiesen jedoch deutliche Fraßschäden durch Mäuse auf. Die statistische Analyse zeigte einen signifikanten Einfluss der Mausschäden (Friedman Test, Chi-Quadrat Wert = 11.791, $p=0.01897$). Das Ausmaß dieser Mausschäden war in Varianten mit vor dem Reihenschluss der Kartoffelpflanzen eingesäten Anlockpflanzen, von denen sich im Vegetationsverlauf besonders die Hirse sehr üppig entwickelt hatte, signifikant höher als in den anderen Varianten.

3.3.2 Versuche mit Bodenfräse

3.3.2.1 Innviertel 2016/17

In den Bodenproben, die kurz vor der Ernte am 11. September 2017 aus den Parzellen entnommen wurden, waren sehr viele Drahtwürmer enthalten, wobei 28 % der Individuen als *A. obscurus/lineatus* identifiziert wurden und 72 % als *A. brevis/sputator*. 48 % der Larven wurden in 0-10 cm Tiefe gefunden, 52 % der Larven in 10-20 cm Tiefe. Direkt vor der Ernte durchgeführte Köderfallenfänge zeigten ein ähnliches Bild. Die Varianten mit Anlockstreifen wiesen tendenziell höhere Drahtwurm-Zahlen auf als die anderen Varianten (Abbildung 39). Die gefräste Variante zeigte die höchsten Drahtwurm-Dichten.

BODENPROBEN Paminger 2017 → *Agriotes sp.*, alle Größen

Mittelwerte +/- SEM

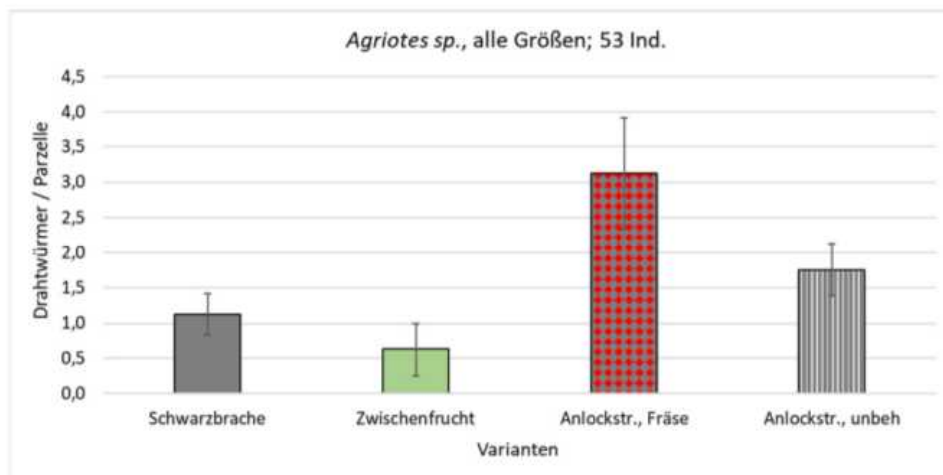


Abbildung 39: Ergebnisse der Bodenproben zur Messung der Drahtwurmdichte am Standort "Paminger" St. Aegidi (Innviertel) zwei Wochen vor der Kartoffelernte

Das Ausmaß der Drahtwurmschäden an den Knollen war mit 17 % befallene Knollen in der Variante „Anlockstreifen gefräst“ am geringsten. In allen anderen Varianten lag der Befall zwischen 25 und 30 % befallene Knollen (Abbildung 40). Eine Varianzanalyse ergab allerdings keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ($F(3,21)=1.63$, $p=0,212$). Es wurde ein post-hoc T-Test durchgeführt, um stärker auf Unterschiede zwischen den Varianten „Anlockstreifen, unbehandelt“ und „Anlockstreifen, gefräst“ einzugehen, welcher einen p-Wert von 0,064 ergab. Der errechnete

Wirkungsgrad von 43 % lässt möglicherweise auf eine gewisse Wirkung der Fräse auf den Drahtwurmbefall schließen.

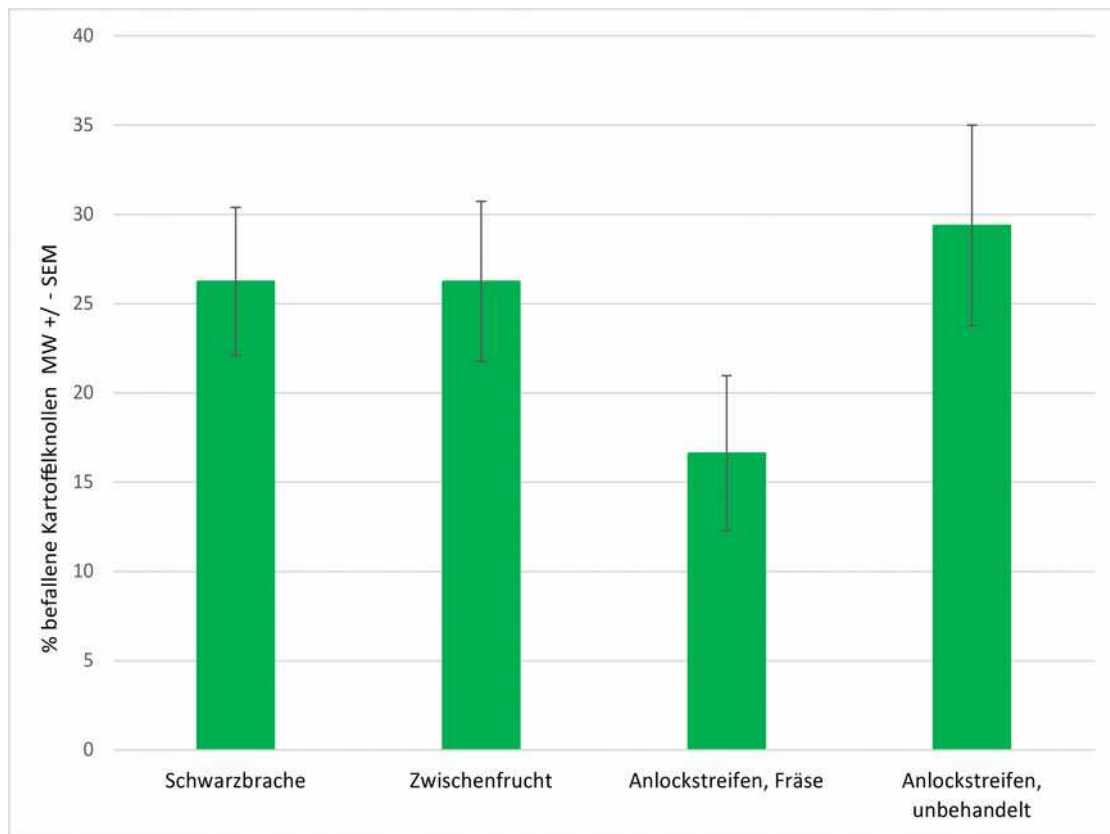


Abbildung 40: Knollenbonitur-Ergebnis Fräsversuch 2016/2017, Innviertel, St. Aegidi, Standort „Paminger“. Prozentsatz an Knollen mit mindestens einem Drahtwurmloch (M +/- SEM)

Jene Variante mit dem geringsten Drahtwurmschaden „Anlockstreifen gefräst“ war auch jene Variante, bei der die meisten Drahtwürmer in den Fallen und Bodenproben gefunden wurden. Diese widersprüchlichen Daten von Drahtwurmdichten im Boden und Drahtwurmschäden an Knollen, die in einer Korrelationsanalyse jedoch eine nicht signifikante Korrelation ergaben, sind schwer interpretierbar.

3.3.2.2 Weinviertel 2017/18

Die Untersuchungen der Sporenentwicklung zeigten ungewöhnlich wenige koloniebildende Einheiten sowohl in der Kontrolle als auch in jenen Parzellen, in denen Pilzgerste ausgebracht wurde (Abbildung 41). Es scheint kaum ein natürliches *Metarhizium*-Vorkommen auf diesem Standort zu geben. Auch konnte sich der mit der Pilzgerste ausgebrachte Pilz anscheinend nicht auf der Fläche etablieren. Erklärungen dafür könnten die geringen Niederschläge der letzten Jahre sein sowie die Hanglage, welche die Fläche besonders dem Wind und damit zusätzlicher Austrocknung aussetzt.

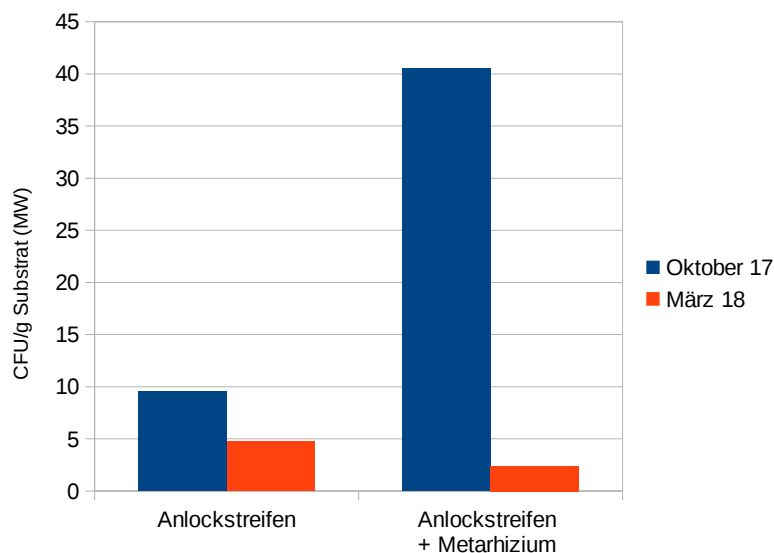


Abbildung 41: Ergebnis der Bodenprobennahmen (24.10.2017 und 26.3.2018) zur Sporenentwicklung von *Metarhizium brunneum* Stamm BIPESCO/F52 am Versuchsstandort „Bauer“ in Göllersdorf (Weinviertel). Pilzgerste wurde am 07.08.2017 ausgebracht. Bodenproben wurden am 24.10.17 und am 26.3.18 entnommen.

Erhebungen der Drahtwurmdichten mittels Bodenproben ergaben signifikante Unterschiede zwischen den Varianten. Wie beim *Metarhizium*-Versuch 2018 in Obersiebenbrunn wurden die meisten Drahtwürmer der am Standort dominanten Art *Agriotes ustulatus* in Parzellen mit Anlockstreifen gefunden. Dies spiegelt die Ergebnisse des Fräsversuchs im Innviertel wider, bei dem signifikant mehr Drahtwürmer in Parzellen mit Anlockstreifen gefunden wurden. Weder die Behandlung mit Fräse noch mit *Metarhizium* hatten eine Auswirkung auf die Drahtwurmdichten (Abbildung 42). Auch Schwarzbrache und Zwischenfrucht unterschieden sich nicht signifikant. Bei den Ergebnissen der Fallenfänge konnte kein signifikanter Unterschied zwischen den Varianten gefunden werden.

BODENPROBEN Göllersdorf 2018

Mittelwerte +/- SEM

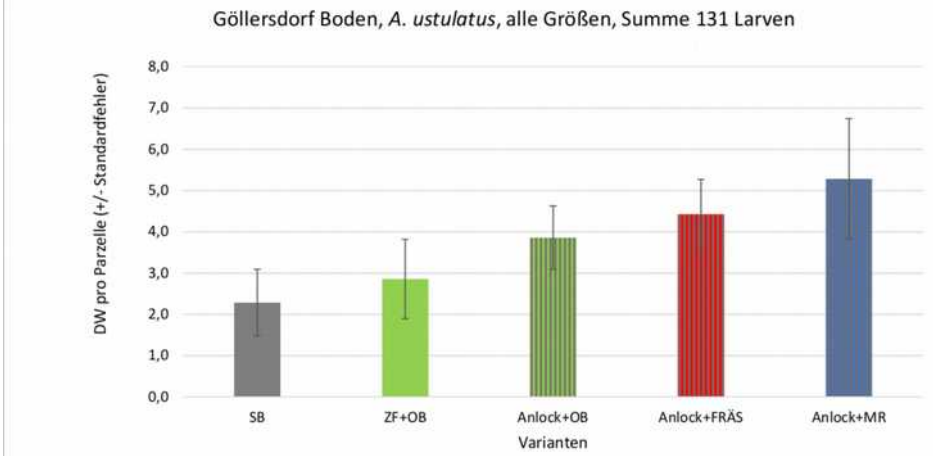


Abbildung 42: Ergebnisse der Bodenproben zur Messung der Drahtwurmdichte am Standort "Bauer" Göllersdorf (Weinviertel) zwei Wochen vor der Kartoffelernte. SB=Schwarzbrache, ZF+OB=Zwischenfrucht unbehandelt, Anlock+OB=Anlockstreifen unbehandelt,

Das Ausmaß der Drahtwurmschäden lag im Durchschnitt zwischen 85 und 90% (Abbildung 43). Eine Varianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Varianten ($F(4,24)=0,534$, $p=0,7118$).

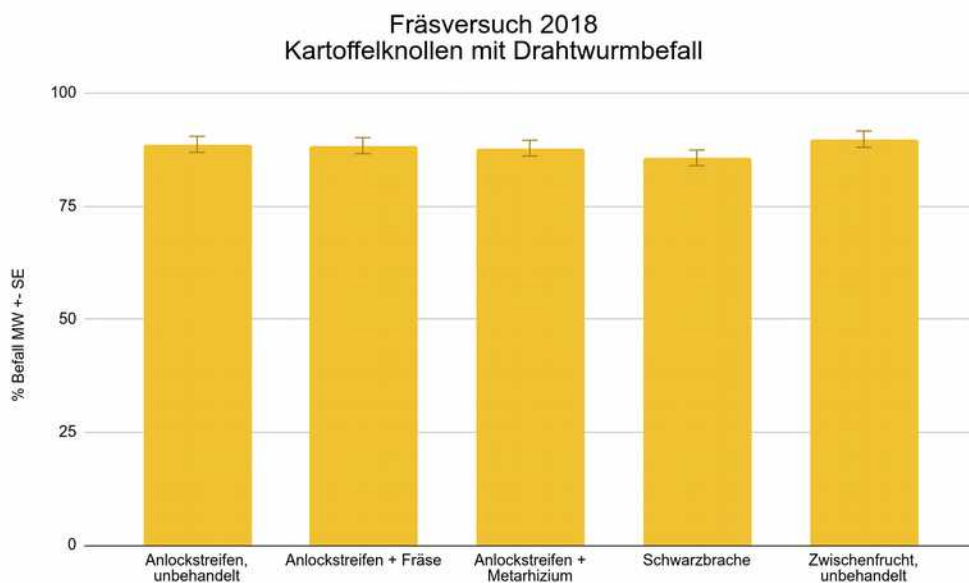


Abbildung 43: Knollenbonitur-Ergebnis Fräsversuch 2017/2018, Weinviertel, Göllersdorf, Standort „Bauer“. Prozentsatz an Knollen mit mindestens einem

4 Diskussion

4.1 Drahtwurmvorkommen

Die in diesem Projekt erhobenen Daten stellen eine substantielle Erweiterung der bisherigen Kenntnisse über die Verbreitung der verschiedenen landwirtschaftlich bedeutsamen Arten innerhalb der Gattung *Agriotes* in Österreich dar. Die hier erzielten Ergebnisse bestätigen die schwerpunktmäßige Verbreitung von *Agriotes ustulatus* in klimatisch wärmeren und trockeneren Gebieten Ostösterreichs (Weinviertel und Marchfeld). Wenn vorhanden, trat diese Art oft in großer Dichte auf, was die Annahme nahelegt, dass dadurch andere Arten verdrängt werden. Auch das häufig gemeinsame Vorkommen von *Agriotes obscurus* und *A. lineatus* in feuchteren und kühleren Regionen Österreichs (Wald-, Innviertel und Tirol, mit einem davon abweichenden Fund im Weinviertel) stimmt sehr gut mit den zu Versuchsbeginn schon vorhandenen Informationen überein. *Agriotes sputator* wurde für mitteleuropäische Bedingungen als euryöke Art bestätigt, und *A. brevis* weist bezüglich Umweltansprüchen anscheinend ebenfalls einen etwas weiteren Toleranzbereich auf.

Die in diesem und in Vorläufer-Projekten anhand von Köderfallenfängen erhobenen Verbreitungskarten decken sich im Untersuchungsgebiet recht gut mit Informationen über die Verbreitung der adulten Käfer, die seit neuestem online auf der Warndienst-Seite der Österreichischen Landwirtschaftskammer abgerufen werden können (www.warndienst.at). Teilweise kommt es jedoch auch zu deutlichen Abweichungen wie z.B. unerwartet hohen Käferzahlen von *A. ustulatus* im Murtal in der Obersteiermark. Das Vorkommen der Käfer wird mithilfe von Pheromonfallen bestimmt, mit denen die Männchen angelockt werden. Weibliche Schnellkäfer weisen jedoch eine deutlich eingeschränkte Flugfähigkeit auf mit einem dadurch limitierten Aktionsradius, sodass aus Pheromonfallenfängen zwar auf das Vorkommen von Drahtwürmern der gleichen Art in der Region, nicht aber in der direkten Umgebung geschlossen werden kann.

Manche Literaturquellen berichten von klimawandelbedingten Arealausweitungen von z.B. *Agriotes ustulatus*. Für Österreich könnte daher eine Ausbreitung nach Westen angenommen werden. *Agriotes ustulatus* ist die Art, die im Vergleich zu allen anderen in Österreich vorkommenden *Agriotes*-Arten warm-trockene Bedingungen wahrscheinlich am besten toleriert. Steigende Temperaturen können den Lebenszyklus beschleunigen, mit Auswirkungen auf das Schadpotential.

Drahtwürmer verursachen Schäden an Kulturpflanzen im Verlauf von Aktivitätsphasen, während der sie sich in der obersten Bodenschicht aufhalten und an den unterirdischen Pflanzenteilen fressen. Das Wissen um die genauen Zeiträume, wann sich Drahtwürmer nahe der Bodenoberfläche aufhalten ist aus mehreren Gründen sehr wichtig: (i) da nur oberflächennahe Drahtwürmer effektiv bekämpft werden können, können damit Bekämpfungsfenster definiert werden, wobei insbesondere die effiziente Anwendung von „Attract & Kill“ Präparaten auch eine hohe Aktivität der Population voraussetzt; (ii) es liefert eine Hilfestellung bei der Planung von Erntezeitpunkten; (iii) zur Abschätzung der Populationsgröße und damit des Schadensrisikos ist es wichtig, die dafür notwendigen Untersuchungen (z.B. Bodenproben, Köderfallen) während fraßaktiver Phasen in der obersten Bodenschicht durchzuführen.

Im Rahmen dieses Projekts wurde der saisonale Verlauf der Aktivität von *Agriotes ustulatus* an einem Ackerstandort unter Winterweizen aufgezeichnet (Abbildung 44). Der dort beschriebene eingipfelige Verlauf der Aktivität mit einem Maximum von Ende Juni bis Mitte August unterscheidet sich stark von Untersuchungen in Kartoffeln, die in den beiden darauffolgenden Jahren im Rahmen des von der AGES koordinierten ElatPro-Projekts erhoben wurden. Diese zeigten einen zweigipfeligen Verlauf (Abbildung 45). Bemerkenswert ist dabei der Umstand, dass der Aktivitätsverlauf in Winterweizen und einmal in Kartoffel am gleichen Standort in direkt aufeinander folgenden Jahren erhoben wurden. Die unterschiedlichen Verläufe könnten kulturbedingt sein, oder auch witterungsbedingt, da die Kartoffel-Jahre deutlich trockener waren.



Abbildung 44: Aktivitätsverlauf von *Agriotes ustulatus* an einem Ackerstandort unter Winterweizen, Weinviertel.

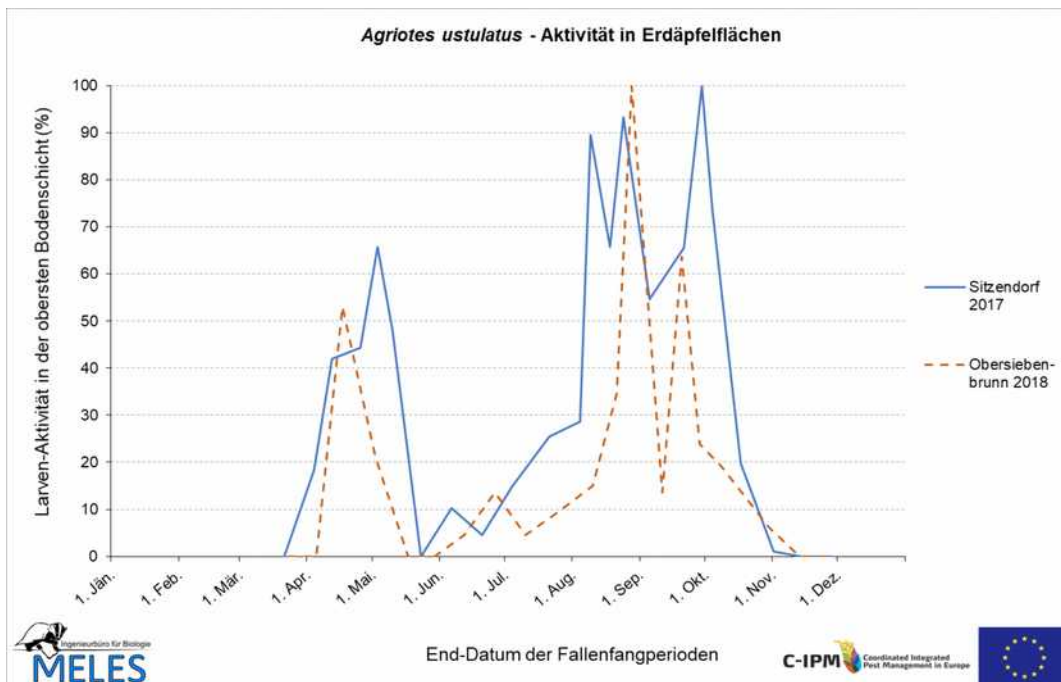


Abbildung 45: Aktivitätsverlauf von *Agriotes ustulatus* in Kartoffeln, Weinviertel und Marchfeld.

In früheren Studien konnte ein teilweise bestimmender Einfluss von Bodentemperatur und -feuchte auf den Verlauf der Aktivitätsphasen von Drahtwürmern festgestellt werden (Jung et al. 2014). Auch in den oben beschriebenen Untersuchungen hatte das

Bodenklima einen gewissen Einfluss auf die Aktivität der Drahtwürmer, hier der Art *Agriotes ustulatus*. In einer Modellberechnung im Rahmen von des ElatPro-Projekts wurde ein Schwellenwert von 11 °C in 15 cm Bodentiefe erhalten, unter dem Larven von *A. ustulatus* nicht in den oberen Bodenschichten aktiv sind. Auch die Bodenfeuchte wies einen Einfluss auf, wobei ein Anstieg zu einer höheren Drahtwurmaktivität führte. Es bestand eine gewisse Übereinstimmung zwischen den mit der Modellberechnung vorhergesagten und den gemessenen Aktivitäten, teilweise lagen die Werte aber auch weit auseinander. Für eine verbesserte Vorhersagewahrscheinlichkeit der Modellberechnungen müssten weitere Daten erhoben und in das Modell eingespeist werden. Besonders an Ackerstandorten beeinflussen auch andere Faktoren wie z.B. Bodenbearbeitung den saisonalen Verlauf der Drahtwurmaktivität.

Für *Agriotes ustulatus* auf Ackerstandorten wurde eine gute Korrelation zwischen den mit Köderfallen festgestellten Aktivitäten und jenen, die mit Bodenproben erhoben wurden, festgestellt. Inwieweit das auch für andere Drahtwurmartarten und Ökosysteme zutrifft, ist derzeit nicht bekannt. Auffällig ist jedoch der gänzlich unterschiedliche Verlauf der Dichten von *Agriotes sputator* und *A. obscurus* in zuerst bestehendem und dann umgebrochenem Grünland, der nur sehr geringfügige jahreszeitliche Schwankungen aufwies. Einzig das Verhältnis der Drahtwurmdichten in den obersten 10 cm Boden zu denen in 10-20 cm Tiefe variierte im Jahresverlauf. Dies wurde auch für *A. ustulatus* auf Ackerstandorten festgestellt.

(Projekt ElatPro) ermöglicht eine teilweise gute Vorhersage von Aktivitätsphasen von *Agriotes ustulatus*. Dass das Vorhandensein von lebenden Pflanzenorganen den Aufenthaltsort von Drahtwürmern in der Bodensäule beeinflusst, zeigt der bei der AGES unter konstanten Klimabedingungen durchgeführte Säulenversuch. Darin wurde eine für Drahtwürmer anlockende Wirkung einer austreibenden Kartoffelknolle bestätigt. Auch Weizenkeimlinge zeigten eine Anlockung, allerdings schwächer. Eine angedeutete anlockende Wirkung des insektenpathogenen Pilzes *Metarhizium brunneum* könnte ein Hinweis auf eine Strategie des Pilzes zur Anlockung einer geeigneten Nahrungsressource darstellen. Dies steht jedoch im Gegensatz zu anderen Studien, in denen Drahtwürmer Bodenvolumen mit erhöhten Dichten von *Metarhizium brunneum* mieden (Kabaluk & Ericsson 2007).

4.2 *Metarhizium brunneum*

In den Versuchen konnten hocheffektive Stämme von *Metarhizium brunneum* gegen alle in diesem Projekt bei den Erhebungen in den österreichischen Kartoffelanbaugebieten gefundenen *Agriotes*-Arten identifiziert werden. Auf Basis dieser Ergebnisse können geeignete Stämme für einen eventuellen Freilandeinsatz in Österreich ausgewählt werden. Auffällig war, dass zwei der untersuchten Pilzstämme eine ähnliche Drahtwurmart-spezifische Wirksamkeit aufwiesen, die sich vom dritten Stamm wiederum deutlich unterschied. Der Stamm ART2825 besaß eine sehr hohe und auch sehr rasche Wirksamkeit gegen *A. obscurus*, jene Drahtwurmart, von der dieser Stamm ursprünglich isoliert worden war. Gegen *A. lineatus*, der im Freiland häufig gemeinsam mit *A. obscurus* anzutreffen ist, war dieser Stamm auch virulenter als die beiden anderen Stämme. Die Pilzstämme Bipesco5/F52 und ein dritter Stamm C wiesen gegen alle fünf untersuchten Arten eine vergleichbare Wirksamkeit auf, und das obwohl sie von unterschiedlichen Wirtsorganismen isoliert worden waren: Bipesco5/F52 von einem Apfelwickler und Stamm C von einem Drahtwurm. Diese beiden Stämme wiesen eine besonders hohe Virulenz gegen *A. ustulatus* auf und eine etwas geringere gegen *A. brevis* und *A. sputator*. Diese Informationen zusammen mit den Ergebnissen zur geografischen Verteilung der Drahtwurmartens weisen darauf hin, dass Bipesco5/F52 und Stamm C eher an warm-trockenen und Stamm A eher an kühl-feuchten Standorten eingesetzt werden sollten. Ausgenommen von dieser vereinfachten Zusammenfassung wären kühl-feuchte Standorte mit einem Vorkommen von *A. sputator* wie z.B. der Versuchsstandort in Imst, an dem zwei Stämme ausgebracht werden müssten, weil die beiden Arten *A. sputator* und *A. obscurus* vorkamen.

Der Pilz *Metarhizium brunneum*, dessen entomopathogene Lebensweise schon seit mehr als 100 Jahren bekannt ist, besitzt generell ein sehr weites Wirtsspektrum. Einzelne Stämme innerhalb dieser Art sind jedoch ausgesprochen wirtsspezifisch, wie Arbeiten in dem vorliegenden Projekt belegen. In diesem Zusammenhang stellt sich die Frage nach der Virulenz gegenüber Nichtzielorganismen. Methodik und Ergebnisse dieser Tests werden im Rahmen des KTI Projekts „Kleiner Pilz mit großer Wirkung: Die grüne Muskardine als biologisches Pflanzenschutzmittel zur Bekämpfung von Drahtwürmern in Kartoffeln“ publiziert.

Aufgrund von Literaturinformationen zu anderen Stämmen (Zimmermann 2007) muss allerdings schon von gewissen negativen Nebeneffekten auf andere Organismen ausgegangen werden, insbesondere auf andere Insekten. In einer übersichtsmäßigen

Bewertung von *Metarhizium brunneum* ging die Europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) davon aus, dass negative Effekte auf Nicht-Zielorganismen begrenzt sein sollten. Im Vergleich zu Insektiziden sind deutlich geringere Nebenwirkungen anzunehmen, wie ein Vergleich mit Fipronil zeigt (Maute et al. 2017), dem Wirkstoff in „Goldor Bait“, der in Österreich mehrere Jahre eine Notfallzulassung gegen Drahtwürmer in Kartoffeln erhalten hatte.

In diesem Projekt wurde ein Einfluss des Bodens auf die Virulenz von *M. brunneum* gezeigt. Die in natürlichen Böden erzielten Mortalitätsraten waren deutlich geringer als die durch Tauchen der Larven in Sporensuspension erreichten, wobei die unterschiedlichen methodischen Ansätze keinen direkten Vergleich zulassen. Drahtwurmart-spezifische Unterschiede in der Virulenz eines Pilzstamms konnten auch im Boden bestätigt werden. Weiters variierte die Mortalitätsrate der Drahtwürmer auf verschiedenen Böden, denen eine gleich große Menge an Pilzsporen von *M. brunneum* zugesetzt worden war. Eine mögliche Erklärung dafür wären die unterschiedlich großen Mengen an natürlich vorkommenden *M. brunneum* Sporen in den verschiedenen Böden. Unterschiede blieben jedoch auch nach Berücksichtigung dieser Mengen bestehen. Die relativ beste Wirkung wurde in einem lehmigen Sand mit einem relativ hohen Humusgehalt erzielt. Solche Böden weisen eine höhere Wasserhaltekapazität auf, was sich günstig auf *M. brunneum* auswirken kann und damit das Ausmaß von Drahtwurmschäden reduzieren kann. Aus Sicht der Praxis ist ein solcher Effekt jedoch nicht durchgehend zu beobachten. Neben der Bodenart kann auch der Humusgehalt des Bodens Einfluss auf die Wechselwirkungen zwischen Drahtwürmern und ihren Antagonisten haben. So kann einerseits Humus Drahtwürmern als Nahrung dienen, andererseits weisen Böden mit höheren Humusgehalten häufig auch höhere Dichten an natürlich vorkommendem *M. brunneum* auf.

Eine wesentliche Voraussetzung für einen erfolgreichen Einsatz von *M. brunneum* gegen Drahtwürmer stellt die Qualität des ins Freiland ausgebrachten Inokulums dar, in unseren Praxisversuchen war das Pilzgerste. Arbeiten in diesem Projekt zeigten sehr unterschiedliche und teilweise unzureichende Qualitäten der für die Versuche verwendeten Pilzgerste-Chargen. Mangelnde Qualitäten waren teilweise auf zu geringe Sporenzahlen zurückzuführen oder auch auf Kontaminationen durch andere Mikroorganismen. Es bestehen zwar gesetzliche Vorgaben, die eine Mindestsporenzahl in solchen Produkten vorschreiben, die Vitalität der darin enthaltenen Organismen wird aber durch viele Faktoren beeinflusst. Wie im Rahmen dieses Projekts bei den Partnertreffen diskutiert, wird diese maßgeblich durch die Produktionsbedingungen beeinflusst (bei *M.*

brunneum z.B. durch Produktion der Pilzgerste in geschlossenen versus offenen Fermentern). Weiters muss darauf geachtet werden, dass der Transport und die Lagerung bei geeigneten, sachgerechten Bedingungen erfolgen (z.B. Kühlung, kein direktes Sonnenlicht, möglichst kurze Zeiträume).

4.3 Freilandversuche

Im Verlauf des Projekts wurden insgesamt sieben Exaktversuche auf Kartoffelflächen unter Praxisbedingungen durchgeführt. In sechs Versuchen wurde die Ausbringung von *Metarhizium brunneum* (Bipesco5/F52 bei Versuchen in Niederösterreich, ART2825 bei Versuchen in Tirol) und in zwei der Einsatz einer Spezialfräse untersucht. In einem der Tiroler Versuche konnte durch den gemeinsamen Einsatz von Lockpflanzen und einem *Metarhizium*-Präparat eine Schadensreduktion bei Kartoffeln um durchschnittlich 33 % festgestellt werden. In den anderen Versuchen, die bis auf eine Ausnahme einen sehr hohen Drahtwurmbefall aufwiesen, konnte keine praxisrelevante Reduktion des Schadens erzielt werden.

Eine Fräsbehandlung kann aus Sicht der Versuchsergebnisse und der momentan nicht als praxisnah möglich erscheinenden Durchführbarkeit sowie der stark negativen Auswirkungen auf Bodenstruktur und Bodenleben nicht empfohlen werden. Durch die große Schlagkraft wurden der Boden und alles, was sich an der Oberfläche oder in den oberen 10 cm des Bodens befand, pulverisiert. Besonders problematisch und aus ökologischer Sicht abzulehnen wäre ein Einsatz auf Flächen mit Erosionsneigung. Bei massivem Drahtwurmbefall auf einer Fläche und einer durch Kombination mit Anlockstreifen möglichst kleinflächigen Anwendung wäre es theoretisch vorstellbar, dass der Nutzen einer Fräsbehandlung größer sein könnte als die negativen Auswirkungen auf Bodenstruktur und Bodenleben. Wenn das Wanderverhalten der Drahtwürmer größere Abstände zwischen den Anlockstreifen zulässt, würde sich auch der Anteil der bearbeiteten Fläche reduzieren und damit auch die negativen Auswirkungen. Literaturangaben und unveröffentlichte Erfahrungen der Forschungspartnern ergaben allerdings, dass für eine ausreichende Anlockwirkung die Weizenanlockstreifen in einem maximalen Abstand von 1,5 Meter anzuordnen wären.

Die in diesem Projekt erhobene geringe Wirksamkeit von *M. brunneum* steht im Gegensatz zu Versuchsergebnissen aus z.B. Deutschland, die teilweise signifikante und mit chemisch-synthetischen Insektiziden vergleichbare Reduktionen von

Drahtwurmschäden erzielen konnten. Mögliche Ursachen dafür sowie potentielle Lösungsansätze wurden im Projektkonsortium intensiv diskutiert.

Ein für die Wirksamkeit von *M. brunneum* unter Freilandbedingungen sehr wichtiger Aspekt ist das Etablieren von für eine effektive Drahtwurmbekämpfung ausreichend hohen Sporendichten im Boden. Wie schon im vorigen Kapitel angesprochen wird dies maßgeblich durch die Qualität des ausgebrachten Inokulums beeinflusst. In diesem Projekt wurden die Inokula durchgehend als Pilzgerste ausgebracht. Dies hat den Vorteil, dass dem Pilz dadurch Nährstoffe mitgeliefert werden. Außerdem kann die Pilzgerste mit auf Betrieben bereits vorhandenen Sägeräten oder Pulverstreuern ausgebracht werden. Als nachteilig ist das vergleichsweise große Volumen anzuführen. Es gibt jedoch auch die Möglichkeit den Pilz in Form von Sporensuspensionen auszubringen oder wie im Produkt Attracap, den Pilz in kleine Kapseln eingeschlossen. Diese Kapseln werden in feuchtem Boden durch mitgelieferte Mikroorganismen aufgelöst und locken mit dem dabei freigesetzten CO₂ Drahtwürmer zu den *M. brunneum* Sporen. Alle diese Methoden setzen eine gewisse Mindestfeuchte im Boden voraus, die für eine Keimung und weitere Entwicklung von *M. brunneum* erforderlich ist. Dies könnte auch eine erste mögliche Erklärung für Unterschiede in der Wirksamkeit zwischen Standorten in Deutschland mit doch höheren Jahresniederschlägen und den Versuchsstandorten im ostösterreichischen Trockengebiet sein.

Zusätzlich zur Bodenfeuchte beeinflussen viele andere abiotische wie auch biotische Faktoren eine Etablierung von ausgebrachtem *M. brunneum* in Böden. Dazu ist es nützlich, Informationen aus Untersuchungen über das natürliche Auftreten von *M. brunneum* in Böden heranzuziehen. Zusammenfassend weisen Grünlandböden häufig höhere Dichten als Ackerböden auf (Keller et al. 2003), und bei Ackerböden weisen jene mit biologischer Wirtschaftsweise höhere im Vergleich zu jenen mit konventioneller (Kleespies et al. 1989 zitiert in Keller & Schweizer 2001). Dies kann dahingehend interpretiert werden, dass *M. brunneum* direkt oder indirekt durch höhere Humusgehalte und einem größeren Nahrungsangebot gefördert werden könnte.

Eine gänzlich andere Erklärung für eine verminderte Wirksamkeit von *M. brunneum* in natürlichen Böden liefern Untersuchungen von Kabaluk et al. (2017), die auf die Möglichkeit verweisen, dass Drahtwürmer an manchen Standorten endozooisch lebende Bakterien aufweisen, die antimikrobiell einer durch *M. brunneum* induzierten Mortalität entgegenwirken könnten. Diese Untersuchungen bedürfen jedoch noch einer ausführlichen Verifizierung.

Eine Wirksamkeit von *M. brunneum* zur Drahtwurmschadensreduktion setzt auch intensiven Kontakt zwischen dem Pilz und Drahtwürmern voraus. Dies konnte möglicherweise in einem der Freilandversuche durch Kombination der Pilzausbringung mit dem Einsatz von Lockpflanzen erreicht werden (Kapitel 3.3.13). Die Möglichkeit der Anlockung von Drahtwürmern wird in sogenannten „Attract & Kill“ Verfahren genutzt, wie z.B. durch Kombination eines Köders mit einem Insektizid (Beispiel „Goldor Bait“) oder mit *M. brunneum* (Produkt Attractap). Auch Pflanzenwurzeln üben durch das abgegebene CO₂ eine anlockende Wirkung auf Drahtwürmer aus. Dabei unterscheiden sich Pflanzenarten in ihrer Attraktivität, was im Rahmen dieses Projekts in einigen Tastversuchen untersucht wurde. Dabei wiesen vor allem Weizen, Erbse und in etwas geringerem Ausmaß auch Linse eine tendenziell höhere Anlockwirkung auf Drahtwürmer auf. Demgegenüber zeigten die auf Basis von DNA-Analysen durchgeführten Untersuchungen über Nahrungspräferenzen der Drahtwürmer eine deutlich größere Attraktivität der Kartoffel. Die anlockende Wirkung von Weizenstreifen, die nach Ernte der Vorfrucht eingesät wurden, auf ansonsten vegetationsfrei gehaltenen Flächen vor Kartoffeln konnte in einigen Versuchen belegt werden (Kapitel 3.3.1, 3.3.2). Dabei erwies es sich als wichtig, ein Aufkommen von Unkräutern oder Ausfallgetreide auf der restlichen Fläche zu verhindern. Die Wirkung von Winterweizen-Anlockstreifen direkt nach der Vorfrucht blieb auch bis kurz vor der Ernte der Kartoffeln bestehen. Die Ursachen für diese Langzeitwirkung konnten nicht geklärt werden, sollten aber bei weiteren Arbeiten zur Drahtwurmbekämpfung berücksichtigt werden.

In diesem Projekt wurden verschiedene Ansätze einer Kombination von Anlockpflanzen mit einer direkten Bekämpfung untersucht. Der einzige, eine signifikante Reduktion bewirkende Ansatz war die Kombination einer flächigen Ausbringung von Pilzgerste beim Legen der Kartoffeln und mit der Einsaat von Lockpflanzen kurz vor dem Reihenschluss. In diesem Versuch erfolgte die Ausbringung händisch. Um diesen Ansatz weiter zu verfolgen, müsste auch an einer Mechanisierung der Ausbringung gearbeitet werden. Bestehende Ansätze wie eine Kombination aus Einsaat mit nachfolgendem Anhäufeln und Dammformen oder pneumatische Zuführung mit Andruckrollen erscheinen nicht ausreichend praktikabel. Wichtig ist auch die richtige Terminisierung einer solchen Maßnahme. Diese könnte kurz vor Reihenschluss bzw. während der Krautreduktion der Kartoffeln erfolgen. Vor einer Praxisanwendung bräuchte es allerdings noch weitere Untersuchungen dazu.

5 Schlussfolgerungen und Ausblick

Die Ergebnisse dieses Projekts legen nahe, dass bei einer direkten Drahtwurmbekämpfung über einen einjährigen Zeitraum mit einem nur mäßigen oder möglicherweise unzureichenden Bekämpfungserfolg gerechnet werden muss. Für eine effektive Drahtwurmbekämpfung braucht es daher einen mehrjährigen Ansatz. Grundsätzliches Ziel sollte es sein, Drahtwurmpopulationen über mehrere Jahre hinweg auf den Anbauflächen stetig zu reduzieren. Eine ausschließliche Bekämpfung innerhalb einer Fruchtfolge in der gegenüber Drahtwurmschäden empfindlichsten Kultur (z.B. Kartoffel) wird als nicht ausreichend erachtet. Die Herausforderung bei der Umsetzung einer solchen mehrjährigen Strategie mit bestenfalls einer Kombination verschiedener Maßnahmen wird es sein, die einzelnen Bekämpfungsmaßnahmen in die betriebliche Praxis einzubauen.

Von den in diesem Projekt untersuchten direkten Bekämpfungsmaßnahmen wird der Einsatz einer Fräse als nicht praxistauglich bewertet. Dieser Ansatz erscheint auch aufgrund der stark negativen Auswirkungen auf Bodenstruktur und Bodenleben als ökologisch problematisch und daher nicht weiter verfolgenswert. Demgegenüber wurden in diesem Projekt und besonders auch in süddeutschen Studien teils erfolgversprechende Ergebnisse mit dem insektenpathogenen Pilz *Metarhizium brunneum* in Kombination mit einer Anlockung erzielt. Zur optimalen Nutzung der anlockenden Wirkung von in Kartoffelbestände eingesäten Lockpflanzen bedarf es allerdings noch weiterer Untersuchungen, den richtigen Zeitpunkt, die Mechanisierung und geeignete Lockpflanzen betreffend.

Eine effektive Drahtwurmbekämpfung mit *M. brunneum* setzt eine ausreichend hohe Anzahl an vitalen Vermehrungseinheiten des Pilzes im Boden voraus. Dies erfordert einerseits Pilzinokulum von hoher Qualität und andererseits eine vertiefte Kenntnis darüber, welche Umweltfaktoren die Wirksamkeit von *M. brunneum* beeinflussen. So ist eine ausreichende Bodenfeuchte für das Wachstum des Pilzes erforderlich, was Unterschiede in der Wirksamkeit einer Pilzbehandlung zwischen Standorten im ostösterreichischen Trockengebiet und in Süddeutschland erklären könnte. Die Bodenfeuchte hängt wiederum von Faktoren wie z.B. Jahresniederschlag, Bodenart (Projekt ElatPro) ermöglicht eine teilweise gute Vorhersage von Aktivitätsphasen von *Agriotes ustulatus*. und Bodenhumusgehalt ab, Zusammenhänge, deren Auswirkungen auf die Etablierung des Pilzes im Boden und die Wirksamkeit von *M. brunneum* noch einer weiteren Klärung bedürfen.

Untersuchungen im Rahmen des Projekts haben teilweise unzureichende Qualitäten bei den für die Versuche angeschafften Pilzinokulum-Chargen aufgezeigt (niedrige Sporenzahlen, geringe Keimfähigkeit, Verunreinigungen mit anderen Mikroorganismen). Laut übereinstimmender Meinung aller am Projekt Beteiligten muss in Zukunft eine hohe Qualität von Pilzinokula (= hohe Sporendichte, hohe Keimfähigkeit der Sporen) sichergestellt werden. Diese wird einerseits durch geeignete, streng kontrollierte Produktionsbedingungen erzielt, aber auch durch die nachfolgende Handhabung beeinflusst. Eine zeitnahe Produktion und sachgerechte, kühle Lagerung könnten diesen Einfluss möglichst gering halten. Eine hohe Wirksamkeit setzt außerdem die Kenntnis der am Einsatzort vorkommenden Drahtwurmart voraus.

Die im Rahmen dieses Projekts erarbeiteten Ergebnisse unterstreichen, dass ein vertieftes Wissen um die Verbreitung und Ökologie der vorkommenden Drahtwurmart eine Grundvoraussetzung zum Erreichen einer nachhaltigen Reduktion von Drahtwurmschäden an Kulturpflanzen darstellt. So ist die Kenntnis darüber, wann Drahtwürmer während fraßaktiver Phasen in oberflächennahen Bodenschichten auftreten, für eine wirksame Bekämpfung unbedingt erforderlich. Ein mit Daten auch aus diesem Projekt entwickeltes und auf Bodenklimadaten basierendes Prognosemodell (Projekt ElatPro) ermöglicht eine teilweise gute Vorhersage von Aktivitätsphasen von *Agriotes ustulatus*. Für genauere Vorhersagen braucht es neben mehr Daten allerdings auch ein noch besseres Verständnis dafür, welche weiteren Umweltfaktoren das extrem plastische Auftreten der Drahtwürmer bestimmen.

Zusätzlich zu den fraßaktiven Phasen beeinflussen Umweltfaktoren auch das Ausmaß der durch Drahtwürmer verursachten Knollenschäden. Praxiserfahrungen zeigen, dass witterungsbedingte Schwankungen im Schadensausmaß nicht durchgehend mit Lehrbuchwissen übereinstimmen. So beobachteten Praktiker in Kartoffelbeständen auf sandigen Böden tendenziell geringere Drahtwurmschäden, obwohl aufgrund deren geringerer Wasserhaltekapazität anzunehmen ist, dass in Phasen höherer Trockenheit Drahtwürmer sich vermehrt in die wasserreichen Kartoffeln fressen.

Ergebnisse zum saisonalen Verlauf der Aktivität von *Agriotes ustulatus* Drahtwürmern deuten auf einen deutlichen reduzierenden Einfluss einer Bodenbearbeitung im Sommer auf die Aktivität vor allem der jungen Larven hin. Insbesondere die Eigelege und die ersten drei Larvalstadien sind gegenüber Austrocknung und mechanischer Einwirkung empfindlich. Eine zielgerichtete Bodenbearbeitung zu jenen Zeiten im Entwicklungszyklus der Schnellkäfer, zu denen sich empfindliche Stadien nahe der Bodenoberfläche aufhalten,

könnte nach übereinstimmender Ansicht im Konsortium ein hohes Potential zur Reduktion von Drahtwurmpopulationen aufweisen. Diese Annahme wird auch durch Erfahrungen aus Deutschland und Belgien erhärtet, wo Bodenbearbeitung teilweise hohe Wirkungsgrade erzielte. Für einen möglichst praxistauglichen und auch ökologisch nachhaltigen Einsatz von Bodenbearbeitung zur direkten Drahtwurmbekämpfung sind weitere Erkenntnisse zu geeigneten Zeitfenstern erforderlich. Es gilt außerdem herauszufinden, wie dies ohne Reduktion des Bodenumusgehalts bewerkstelligt werden kann. Ein möglicher, an Citizen Science angelehnter Ansatz für die Landwirtschaft könnte die auf Betriebsebene gesammelten Bewirtschaftungsdaten mit relevanten Begleitdaten in einer Datenbank sammeln und mit standardisierten Daten zu Drahtwurmschäden verknüpfen. Nach entsprechender tiefgehender statistischer Auswertung könnte dies wertvolle Informationen zur Entwicklung und laufenden Optimierung drahtwurm-reduzierender Bewirtschaftungsmaßnahmen liefern.

7 Literatur

- Ansari, M. A., Evans, M., & Butt, T. M. (2009). Identification of pathogenic strains of entomopathogenic nematodes and fungi for wireworm control. *Crop protection*, 28(3), 269-272.
- Barsics, F., Haubruge, E., & Verheggen, F. J. (2013). Wireworms' management: an overview of the existing methods, with particular regards to *Agriotes* spp. (Coleoptera: Elateridae). *Insects*, 4(1), 117-152.
- Burghause F., Schmitt M. (2011): Monitoringergebnisse der Schnellkäfergattung *Agriotes* (Elateridae, Coleoptera) in den Jahren 2008 bis 2010 in Rheinland-Pfalz. *Gesunde Pflanzen* 63, 27-32
- Čačija, M., Kozina, A., Barčić, J. I., & Bažok, R. (2018). Linking climate change and insect pest distribution: an example using *Agriotes ustulatus* Shall. (Coleoptera: Elateridae). *Agricultural and forest entomology*, 20(2), 288.
- Ansari, M. A., Evans, M., & Butt, T. M. (2009). Identification of pathogenic strains of entomopathogenic nematodes and fungi for wireworm control. *Crop protection*, 28(3), 269-272.
- Cate PC (2007) Elateroidea (Cebrioninae, Lissominae, Subprotelaterinae). In: Löbl I, Smetana A (eds) *Catalogue of palaeartic coleoptera*, vol 4. Apollo Books, Stenstrup, pp 94-209.
- Eckard, S., Ansari, M. A., Bacher, S., Butt, T. M., Enkerli, J., & Grabenweger, G. (2014). Virulence of in vivo and in vitro produced conidia of *Metarhizium brunneum* strains for control of wireworms. *Crop protection*, 64, 137-142.
- EFSA. (2019). *Metarhizium brunneum_BIPESCO5_F52_RAR_01_Volume 1_2019-06-03.pdf*
- EPPO 2005 Standard 1/46 (3) Wireworms
- Hann, P., Wechselberger, K., Schmid, R., Trska, C., Putz, B., Diethart, M., Kromp, B., Jung, J., Eitzinger, J. (2013). Validierung des auf Bodentemperatur und Bodenfeuchte basierenden Drahtwurm-Prognosemodells SIMAGRIO-Wim ost-österreichischen Ackerbaugesamtgebiet. Endbericht StartClim2013.G.
- Hof-Kautz, C. (2013). Qualitäten der Ökokartoffel sichern - Stand der Beratung bei Drahtwurmproblemen. Vortrag bei 14. Kartoffeltag, 09.01.2013, Haus Düsse.

- Jung, J., Racca, P., Schmitt, J., & Kleinhenz, B. (2014). SIMAGRIO-W: Development of a prediction model for wireworms in relation to soil moisture, temperature and type. *Journal of applied entomology*, 138(3), 183-194.
- Kabaluk, J. T., & Ericsson, J. D. (2007). Environmental and behavioral constraints on the infection of wireworms by *Metarhizium anisopliae*. *Environmental entomology*, 36(6), 1415-1420.
- Kabaluk, T., Li-Leger, E., & Nam, S. (2017). *Metarhizium brunneum*—An enzootic wireworm disease and evidence for its suppression by bacterial symbionts. *Journal of invertebrate pathology*, 150, 82-87.
- Kamptner, A. (2017). Drahtwurmschäden in Erdäpfel minimieren. *Biogemüsefibel*, 2018, 21-23.
- Keller, S., & Schweizer, C. (2001). Ist das Drahtwurm-Problem ein Pilz-Problem? *Agrarforschung*, 7(8), 248-251.
- Keller, S., Kessler, P., & Schweizer, C. (2003). Distribution of insect pathogenic soil fungi in Switzerland with special reference to *Beauveria brongniartii* and *Metharhizium anisopliae*. *BioControl*, 48(3), 307-319.
- Keller, S., & Zimmermann, G. (2005). Scarabs and other soil pests in Europe: Situation, perspectives and control strategies. *Bulletin OILB/SROP*, 28(2), 9-12.
- Keiser, A., Häberli, M., & Stamp, P. (2012). Quality deficiencies on potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers caused by *Rhizoctonia solani*, wireworms (*Agriotes* spp.) and slugs (*Deroceras reticulatum*, *Arion hortensis*) in different farming systems. *Field Crops Research*, 128, 147-155.
- Klausnitzer B. Familie Elateridae. In: Klausnitzer B, editor. (1994), Die Larven der Käfer Mitteleuropas. Band 2, Myxophaga/Polyphaga, Teil 1. Jena: Gustav Fischer Verlag; pp. 118–189.
- Kleespies, R., Bathon, H., & Zimmermann, G. (1989). Untersuchungen zum natürlichen Vorkommen von entomopathogenen Pilzen und Nematoden in verschiedenen Böden in der Umgebung von Darmstadt. *Gesunde Pflanzen*, 41(10), 350-355.
- Kölliker, U., Jossi, W., Kuske, S., Ehlers, R. U., Crickmore, N., & Enkerli, J. (2009). Optimised protocol for wireworm rearing. *IOBC/wprs Bull*, 45, 457-60.

- Maute, K., French, K., Story, P., Bull, C. M., & Hose, G. C. (2017). Short and long-term impacts of ultra-low-volume pesticide and biopesticide applications for locust control on non-target arid zone arthropods. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, *240*, 233-243.
- Reddy, G. V., Tangtrakulwanich, K., Wu, S., Miller, J. H., Ophus, V. L., Prewett, J., & Jaronski, S. T. (2014). Evaluation of the effectiveness of entomopathogens for the management of wireworms (Coleoptera: Elateridae) on spring wheat. *Journal of invertebrate pathology*, *120*, 43-49.
- Staudacher K., Pitterl P., Furlan L., Cate P.C. & Traugott M. (2011): PCR-based species identification of *Agriotes* larvae. *Bulletin of Entomological Research*. 101, 201-210
- Staudacher, K., Schallhart, N., Pitterl, P., Wallinger, C., Brunner, N., Landl, M., Kromp, B., Glauning, J., Traugott, M. (2013). Occurrence of *Agriotes* wireworms in Austrian agricultural land. *Journal of Pest Science* *86*, 33–39.
- Strasser, H., Forer, A., Schinner, F. (1996). Development of media for the selective isolation and maintenance of virulence of *Beauveria brongniartii*. In: Jackson TA, Glare TR, editors. Proceedings of the 3rd International Workshop on Microbial Control of Soil Dwelling Pests. pp 125-130.
- Taberlet P, Gielly L, Pautou G, Bouvet J (1991) Universal primers for amplification of three non-coding regions of chloroplast DNA. *Plant Mol Biol* *17*:1105–1109
- Taberlet P, Coissac E, Pompanon F, Gielly L, Miquel C, Valentini A, Vermet T, Corthier G, Brochmann C, Willerslev E (2007) Power and limitations of the chloroplast trnL (UAA) intron for plant DNA barcoding. *Nucleic Acids Res* *35*:e14. <https://doi.org/10.1093/nar/gkl938>
- Traugott, M., Benefer, C. M., Blackshaw, R. P., van Herk, W. G., & Vernon, R. S. (2015). Biology, ecology, and control of elaterid beetles in agricultural land. *Annual review of entomology*, *60*, 313-334.
- Wallinger C, Juen A, Staudacher K, Schallhart N, Mitterrutzner E, et al. (2012) Rapid Plant Identification Using Species- and Group-Specific Primers Targeting Chloroplast DNA. *PLoS ONE* *7*(1): e29473. doi:10.1371/journal.pone.0029473
- Wallinger C, Staudacher K, Schallhart N, Peter E, Dresch P, Juen A, Traugott M (2013) The effect of plant identity and the level of plant decay on molecular gut content analysis in a herbivorous soil insect. *Mol Ecol Resour* *13*:75–83. <https://doi.org/10.1111/1755-0998.12032>

Zimmermann, G. (2007). Review on safety of the entomopathogenic fungus *Metarhizium anisopliae*. *Biocontrol Science and Technology*, 17(9), 879-920.