

## Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelbau (Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien)

Strategies to reduce and avoid copper in organic potato production. Part B: Agronomical strategies

FKZ: 09OE114

**Projektnehmer:**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme  
Liesel-Beckmann-Str. 2, 85354 Freising  
Tel.: +49 8161 71-2405  
Fax: +49 8161 71-3031  
E-Mail: [sebastian.grabendorfer@tum.de](mailto:sebastian.grabendorfer@tum.de)  
Internet: <http://oekolandbau.wzw.tum.de/>

**Autoren:**

Grabendorfer, Sebastian

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft.

Die inhaltliche Verantwortung für den vorliegenden Abschlussbericht inkl. aller erarbeiteten Ergebnisse und der daraus abgeleiteten Schlussfolgerungen liegt beim Autor / der Autorin / dem Autorenteam. Bis zum formellen Abschluss des Projektes in der Geschäftsstelle Bundesprogramm Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft können sich noch Änderungen ergeben.



**Abschlussbericht**

# **Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau**

**Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien**

Forschungsprojekt im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau  
und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft

Förderkennzeichen 2809OE114

Projektlaufzeit: 07/2011 – 08/2015

**Zuwendungsempfänger**

Technische Universität München  
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme  
Liesel-Beckmann-Str. 2, 85354 Freising

**Autor**

Sebastian Grabendorfer  
Technische Universität München  
Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme  
Liesel-Beckmann-Str. 2, 85354 Freising  
Mail: [sebastian.grabendorfer@tum.de](mailto:sebastian.grabendorfer@tum.de)  
Tel.: 08161 / 71-2405

## Kurzfassung

Die Kraut- und Knollenfäule, verursacht durch *Phytophthora infestans*, führt im ökologischen Kartoffelanbau zu Ertrags- und Qualitätseinbußen und in der Folge zu hohen wirtschaftlichen Verlusten. Gegenwärtig stehen im ökologischen Landbau als einzige effektive Regulierungsmaßnahmen kupferhaltige Fungizide zur Verfügung. Allerdings steht der Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel aufgrund der Anreicherungsproblematik im Boden und möglichen negativer Wirkungen auf Nicht-Ziel-Organismen in der Kritik.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau“ wurden mögliche Ansätze für eine Reduzierung des Kupfereinsatzes identifiziert und bearbeitet. Gegenstand des „Teilprojekts B: Ackerbauliche Strategien“ war dabei die Überprüfung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Infektion und Ausbreitung von Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau.

Hierfür wurden zwei Versuchsreihen mit umfangreichen Feldversuchen etabliert: „Screening von Zwischenfrüchten“ zur Überprüfung der Effekte von verschiedenen Zwischenfruchtarten auf die Ertragsbildung der Folgefrucht Kartoffel und dem Befall mit Krautfäule und „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“ zur Überprüfung der Effekte von *Brassicaceae*, dem Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte, der Methode der Biofumigation sowie der Ablagetiefe der Kartoffelpflanzknollen auf die Entwicklung der Kartoffeln und des Krautfäulebefalls. In umfangreichen Feldversuchen konnten keine direkt hemmenden Effekte der ausgewählten acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf die Infektion und die Entwicklung von *P. infestans* festgestellt werden, jedoch konnten positive Effekte des Zwischenfruchtanbaus auf die Ertragsbildung der Kartoffeln nachgewiesen werden.

Im Rahmen des Forschungsprojekts konnte somit zwar keine direkte Alternative zum Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel für die Regulierung von Kraut- und Knollenfäule identifiziert werden, es konnte allerdings gezeigt werden, dass ein gezielter Zwischenfruchtanbau durch die Sicherung der Knollenerträge einen wichtigen Beitrag zu einer umfassenden Anbaustrategie für Kartoffeln im ökologischen Landbau mit dem Ziel der Kupferminimierung leisten kann.

## Summary

Late blight, caused by the oomycete *Phytophthora infestans*, reduces tuber yields and quality in organic potato production and therefore leads to high economic losses. To date, copper fungicides are the only available effective control strategy against late blight in organic farming. However, the use of copper fungicides has come under criticism due to copper accumulation in soil and potential negative effects on non-target organisms.

The aim of the research project „Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau“ was to identify different strategies to reduce the use of copper in organic potato production. Within the subproject „Teilprojekts B: Ackerbauliche Strategien“ several agronomic strategies were evaluated concerning their effects on the infection with *P. infestans* and the progress of late blight.

To this end, two series of tests were established: “Screening von Zwischenfrüchten” to test the effects of cover crop species on the subsequent potato yield and the development of *P. infestans*, and “Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*” to test the effects of several *Brassicaceae*, the time of cover crop incorporation into the soil, the method of biofumigation, and the planting depth of the potato seed tubers on the subsequent potato plants and the progress of late blight. Based on field experiments with several locations in different years, late blight development was not directly inhibited by any of the selected agronomic strategies. However, cover crop cultivation resulted in significantly higher potato tuber yields.

No effective alternative control strategy to copper fungicides against *P. infestans* could be identified in this subproject. However, it can be stated that cover crop cultivation is an important aspect in organic potato production to increase and secure tuber yields and therefore has to be part of an integrated cultivation strategy for potatoes in organic farming with the aim of copper reduction.

## Inhaltsverzeichnis

<b>Kurzfassung</b> .....	<b>2</b>
<b>Summary</b> .....	<b>3</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>4</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis</b> .....	<b>6</b>
<b>Abbildungsverzeichnis</b> .....	<b>7</b>
<b>Tabellenverzeichnis</b> .....	<b>8</b>
<b>1 Einführung</b> .....	<b>9</b>
1.1 Gegenstand des Vorhabens .....	9
1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts .....	10
1.3 Planung und Ablauf des Projekts .....	10
1.3.1 Gliederung in Teilprojekte.....	10
1.3.2 Ablauf Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien .....	12
<b>2 Stand des Wissens</b> .....	<b>13</b>
<b>3 Material und Methoden</b> .....	<b>16</b>
3.1 Screening von Zwischenfrüchten .....	16
3.1.1 Standorte Feldversuche.....	16
3.1.2 Versuchsdesign .....	16
3.1.3 Datenaufnahme und Datenauswertung .....	17
3.2 Effekte glucosinolatreicher <i>Brassicaceae</i> .....	21
3.2.1 In vitro Hemmtests.....	21
3.2.2 Feldversuche.....	23
3.2.2.1 Standorte Feldversuche .....	23
3.2.2.2 Versuchsdesign .....	23
3.2.2.3 Datenaufnahme und Datenauswertung .....	24
<b>4 Ergebnisse</b> .....	<b>28</b>
4.1 Screening von Zwischenfrüchten .....	28
4.1.1 Versuchs- und Wachstumsbedingungen .....	28
4.1.2 Entwicklung der Zwischenfrüchte .....	28
4.1.3 N <sub>min</sub> Gehalte im Boden.....	32
4.1.4 <i>P. infestans</i> Blattbefall .....	34
4.1.5 Knollenerträge der Kartoffeln .....	36
4.2 Effekte von glucosinolatreichen <i>Brassicaceae</i> .....	40
4.2.1 In vitro Hemmtests.....	40
4.2.2 Feldversuche.....	42
4.2.2.1 Versuchs- und Wachstumsbedingungen .....	42

4.2.2.2 Entwicklung der Zwischenfrüchte .....	43
4.2.2.3 N <sub>min</sub> Gehalte im Boden .....	48
4.2.2.4 <i>P. infestans</i> Blattbefall.....	50
4.2.2.5 Knollenerträge der Kartoffeln .....	54
4.2.2.6 Kraut- und Knollenentwicklung .....	58
4.2.2.7 Stickstoffaufnahme der Kartoffeln .....	60
<b>5 Diskussion .....</b>	<b>63</b>
5.1 Screening von Zwischenfrüchten .....	63
5.1.1 Entwicklung der Zwischenfrüchte und N <sub>min</sub> Gehalte im Boden .....	63
5.1.2 Knollenerträge und <i>P. infestans</i> Blattbefall der Kartoffeln .....	65
5.2 Effekte von glucosinolatreichen <i>Brassicaceae</i> .....	66
5.2.1 In vitro Hemmtests.....	66
5.2.2 Feldversuche.....	67
5.2.2.1 Entwicklung der Zwischenfrüchte und N <sub>min</sub> Gehalte im Boden.....	67
5.2.2.2 Knollenerträge und <i>P. infestans</i> Blattbefall der Kartoffeln.....	69
5.2.2.3 Kraut- und Knollenentwicklung und Stickstoffaufnahme .....	70
<b>6 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse .....</b>	<b>72</b>
<b>7 Geplante und erreichte Ziele .....</b>	<b>73</b>
<b>8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen .....</b>	<b>74</b>
<b>9 Danksagung.....</b>	<b>76</b>
<b>10 Literaturverzeichnis .....</b>	<b>77</b>
<b>11 Veröffentlichungen.....</b>	<b>82</b>
11.1 Artikel.....	82
11.2 Vorträge.....	83
11.3 Poster .....	84
11.4 Verschiedenes .....	84

### **Abkürzungsverzeichnis**

ANOVA	analysis of variance
AUDPC	area under the disease progress curve
C	Kohlenstoff
FM	Frischmasse
LMM	linear mixed-effects model
N	Stickstoff
N <sub>min</sub>	mineralischer Stickstoff
ITC	Isothiocyanat
TM	Trockenmasse
Tukey's HSD	Tukey's honest significant difference test

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Oberirdischer Frischmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte .....	29
Abbildung 2: Oberirdischer Trockenmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte .....	30
Abbildung 3: Stickstoff im Aufwuchs der Zwischenfrüchte .....	31
Abbildung 4: N <sub>min</sub> Gehalt im Boden zu Vegetationsbeginn .....	33
Abbildung 5: N <sub>min</sub> Gehalt im Boden rund 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln.....	34
Abbildung 6: Befallsverlauf <i>P. infestans</i> an den Versuchsstandorten.....	35
Abbildung 7: Relative AUDPC ( <i>P. infestans</i> ) nach verschiedenen Zwischenfrüchten .....	35
Abbildung 8: Brutto Knollenerträge nach verschiedenen Zwischenfrüchten.....	37
Abbildung 9: Kartoffelerträge und relative AUDPC ( <i>P. infestans</i> ).....	38
Abbildung 10: Hemmende Wirkung von Allylisothiocyanat auf <i>P. infestans</i> .....	40
Abbildung 11: Hemmende Wirkung von 2-Phenylethylisothiocyanat auf <i>P. infestans</i> .....	41
Abbildung 12: Hemmende Wirkung von Benzylisothiocyanat auf <i>P. infestans</i> .....	41
Abbildung 13: Hemmende Wirkung von Zwischenfrüchten auf <i>P. infestans</i> .....	42
Abbildung 14: Oberirdischer Trockenmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte .....	44
Abbildung 15: Stickstoff im Aufwuchs der Zwischenfrüchte .....	45
Abbildung 16: C/N-Verhältnis der Zwischenfrüchte.....	46
Abbildung 17: N <sub>min</sub> Gehalt im Boden zu Vegetationsbeginn .....	48
Abbildung 18: N <sub>min</sub> Gehalt im Boden rund 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln.....	49
Abbildung 19: Befallsverlauf <i>P. infestans</i> an den Versuchsstandorten.....	50
Abbildung 20: Relative AUDPC ( <i>P. infestans</i> ) .....	51
Abbildung 21: Brutto Knollenerträge nach verschiedenen Zwischenfrüchten .....	54
Abbildung 22: Kartoffelerträge und relative AUDPC ( <i>P. infestans</i> ).....	55
Abbildung 23: Zeiternten Knollen- und Krauterträge für Zwischenfruchtvarianten.....	58
Abbildung 24: Zeiternten Knollen- und Krauterträge für Umbruchstermine .....	59
Abbildung 25: Stickstoffaufnahme in Knolle und Kraut für Zwischenfruchtvarianten .....	61
Abbildung 25: Stickstoffaufnahme in Knolle und Kraut für Umbruchstermine.....	62



## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen.....	19
Tabelle 2: Zwischenfruchtvarianten „Screening von Zwischenfrüchten“.....	20
Tabelle 3: Versuchsvarianten Hemmtests .....	22
Tabelle 4: Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen.....	26
Tabelle 5: Versuchsfaktoren Feldversuche „Effekte glucosinolatreicher <i>Brassicaceae</i> “ .....	27
Tabelle 6: Zwischenfrucht Trockenmasseerträge an den Versuchsstandorten .....	32
Tabelle 7: <i>P. infestans</i> Blattbefall an den Versuchsstandorten .....	36
Tabelle 8: Knollenerträge an den Versuchsstandorten .....	39
Tabelle 9: Zwischenfrucht Trockenmasseerträge an den Versuchsstandorten .....	47
Tabelle 10: <i>P. infestans</i> Blattbefall an den Versuchsstandorten .....	53
Tabelle 11: Knollenerträge an den Versuchsstandorten .....	57
Tabelle 12: Zeiternte Knollenerträge an den Versuchsstandorten .....	60

## 1 Einführung

### 1.1 Gegenstand des Vorhabens

Der ökologische Kartoffelanbau (*Solanum tuberosum* L.) besitzt mit seinen vergleichsweise hohen realisierbaren Deckungsbeiträgen für zahlreiche landwirtschaftliche Betriebe eine große ökonomische Bedeutung. Jedoch steht der Kartoffelanbau im ökologischen Landbau vor verschiedenen Herausforderungen. Veränderte Absatz- und Vermarktungswege führen zu steigenden Anforderungen an die äußere Qualität, da zunehmende Mengen als gewaschene Kartoffeln im Lebensmitteleinzelhandel dem Endverbraucher zum Verkauf angeboten werden (Keiser et al., 2012; Böhm, 2011). Neben der Qualität wird die Wirtschaftlichkeit der ökologischen Kartoffelproduktion maßgeblich von den realisierten Kartoffelerträgen bestimmt.

Die wahrscheinlich am meisten ertragslimitierende Krankheit weltweit bei Kartoffeln ist die Kraut- und Knollenfäule, verursacht durch den Oomyceten *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Ohne Behandlungsmaßnahmen drohen erhebliche Ertrags- und Qualitätseinbußen, die die Rentabilität des Kartoffelanbaus gefährden. Im ökologischen Landbau ist entsprechend der EU-Öko-Verordnung und den privatrechtlichen Bestimmungen der Anbauverbände kein Einsatz von synthetischen Pflanzenschutzmitteln möglich. Als einzige effektive Fungizide stehen im ökologischen Kartoffelanbau Kupferpräparate zur Verfügung. Auch gab es bisher kaum Erfolge bei der Züchtung von Kartoffelsorten, die eine ausreichende Resistenz bzw. Toleranz gegen *P. infestans* besitzen und gleichzeitig den Qualitätsanforderungen des Marktes genügen.

Der Einsatz von kupferhaltigen Pflanzenschutzmitteln wird allerdings kontrovers diskutiert. Negative Aspekte, u.a. Wirkungen auf Nicht-Ziel-Organismen oder die Anreicherung im Boden, zusammen mit generellen Bedenken gegen den Einsatz von Kupfer im ökologischen Landbau, führten bereits zu Mengenbeschränkungen seitens der EU-Öko-Verordnung sowie der Anbauverbände (Wilbois et al., 2009). In der Europäischen Union ist die Zulassung von Kupfer als Pflanzenschutzmittel generell umstritten und gegenwärtig bis zum Jahr 2018 befristet (EC 37/2009; EC 85/2014). Eine Reduktion der Kupferaufwandmengen bzw. die Suche nach alternativen Präparaten und Anbaustrategien zur Vermeidung von Kupferapplikationen erscheint somit für den ökologischen Landbau dringend notwendig zur Sicherung der gesellschaftlichen Akzeptanz sowie des Anbaus der betroffenen Kulturen.

## **1.2 Ziele und Aufgabenstellung des Projekts**

Vor dem Hintergrund der negativen Wirkungen von Kupfer und der befristeten Zulassung als Pflanzenschutzmittel in der Europäischen Union ist der ökologische Landbau in Deutschland um eine stetige Reduzierung der Kupferaufwandmengen bemüht. Hierfür wurde eine Kupferminimierungsstrategie erarbeitet, mit dem langfristigen Ziel, die Kupferzufuhr auf den jährlichen Entzug zu senken, um eine weitere Anreicherung zu vermeiden (Wilbois et al., 2009).

Ziel des durchgeführten Forschungsprojekts war es, im Bereich des ökologischen Kartoffelanbaus Strategien für eine weitere Minimierung bzw. Vermeidung des Kupfereinsatzes zu erarbeiten. Dies sollte durch die Weiterentwicklung verschiedener Methoden des Pflanzenschutzes und Pflanzenbaus erfolgen, so dass die Entwicklung der Kartoffeln gefördert wird bzw. der Befall mit Krautfäule zeitlich so lange verzögert wird, dass der Einsatz von Kupfer hinfällig oder zumindest reduziert werden kann. Dadurch könnten die Verluste durch *P. infestans* im ökologischen Kartoffelanbau auf ein akzeptables Maß reduziert werden und somit die Wirtschaftlichkeit des Produktionszweiges für die Zukunft gesichert werden.

Verschiedene mögliche Ansätze wurden hierfür identifiziert und im Verlauf des Projektes in einzelnen Teilprojekten bearbeitet: Reduzierung des Anteils an latent infizierten Pflanzgutknollen; Vermeidung von Primärbefall aus latent infizierten Knollen; Einsatz alternativer Präparate für Blattapplikationen; Optimierung von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Förderung der Entwicklung der Kartoffeln und ggf. zur Verzögerung der Entwicklung der Krautfäule als Beitrag zur Kupferminimierung.

## **1.3 Planung und Ablauf des Projekts**

### **1.3.1 Gliederung in Teilprojekte**

Im Rahmen eines Verbundvorhabens war das Forschungsprojekt in zwei Teilprojekte unterteilt. Die verantwortlichen Projektpartner bearbeiteten die Teilprojekte selbständig unter der Koordination der gemeinsamen Projektleitung durch die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.

Teilprojekt A: Maßnahmen zur Reduktion des Primärbefalls (FKZ 2809OE045, durchgeführt von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz in Zusammenarbeit mit der Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

Im Rahmen dieses Teilprojekts wurden folgende Fragestellungen bearbeitet:

- (1) Pflanzgutbeizung zur Reduktion des Primärbefalls: in Feld-, Gewächshaus- und Laborversuchen wurden verschiedene Behandlungen des Pflanzgutes mit Kupfer und alternativen Mitteln getestet, entweder nach der Pflanzguternte im Herbst oder vor der Pflanzung im Frühjahr. Dies sollte einerseits die Entstehung von primärem Stängelbefall und die Infektion von Nachbarknollen, andererseits die Etablierung des Erregers auf den Knollen im Lager verhindern.
- (2) Krautbehandlung mit kupferfreien Alternativmitteln: als Teil einer Behandlungs- und Kupferminimierungsstrategie für den ökologischen Kartoffelanbau wurden kupferfreie Alternativmittel zur Blattanwendung im Feld getestet. Als Ersatz für bzw. in Kombination mit Kupfer sollte dies zu einer weiteren Reduktion des Kupfereinsatzes im ökologischen Kartoffelanbau beitragen. Diese Tests wurden durch umfangreiche Laborversuche an einzelnen Blättern oder Pflanzen begleitet bzw. ergänzt.
- (3) Reduktion der Tochterknolleninfektion: durch geeignete Maßnahmen (z.B. genau terminierte Krautbeseitigung oder Behandlung der Dämme vor der Ernte, um *Phytophthora*-Sporen abzutöten) sollte eine Übertragung der Krankheit auf die Tochterknollen reduziert werden.

Dieser Projektteil wird ausführlich im Abschlussbericht der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft behandelt.

Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien (FKZ 2809OE114, durchgeführt von der Technischen Universität München, Lehrstuhl für Ökologischen Landbau und Pflanzenbausysteme)

Als Teil einer umfassenden Kupferminimierungsstrategie wurde der Einfluss von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf das Auftreten und die Entwicklung der Krautfäule untersucht. Die Effekte verschiedener Zwischenfrüchte, Zeitpunkte der Einarbeitung in den Boden, sowie verschiedener Legetiefen der Kartoffeln auf den Befallsverlauf der Krautfäule wurde in Feldversuchen getestet. Gegenstand der Untersuchungen war die Fragestellung, ob durch geeignete Kombination von Zwischenfrucht und Bodenbearbeitung phytosanitäre Wirkungen hinsichtlich des Befalls mit *P. infestans* erzielt werden könnten. Dabei wurde auch die Methode der Biofumigation, d.h. der Anbau und die Einarbeitung glucosinolatreicher *Brassicaceae* vor Kartoffeln untersucht.

Weitere Aufgabenverteilung: Der Bioland Erzeugerring Bayern e.V. war zuständig für die Ableitung von Beratungsempfehlungen aus den Versuchsergebnissen und die Erstellung von Beratungsunterlagen für die landwirtschaftliche Praxis. Der Transfer der Ergebnisse in die Praxis erfolgte über Feldtage, Seminare und die Weiterentwicklung von Versuchsanstellungen während der Laufzeit des Projektes (siehe auch Kapitel 11).

### **1.3.2 Ablauf Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien**

Der Einfluss pflanzen- und ackerbaulicher Strategien auf das Auftreten und die Entwicklung von *P. infestans* sowie der Entwicklung der Folgefrucht Kartoffel wurde anhand der Faktoren Zwischenfrucht, Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte und Legetiefe der Kartoffeln detailliert untersucht. Hierfür wurden zwei Feldversuchsreihen über mehrere Jahre und Standorte etabliert:

- (1) Screening von Zwischenfrüchten und deren Effekte auf die Nachkultur Kartoffel und das Auftreten von Krautfäule. Dabei wurden insbesondere auch bisher wenig beachtete Arten untersucht und mit bereits in der Praxis verbreiteten Zwischenfruchtarten verglichen. Ziel der Feldversuche war die Überprüfung, ob Zwischenfrüchte positive Ertragseffekte auf die Folgefrucht Kartoffel besitzen und ob Unterschiede in der Befallsentwicklung von Krautfäule nach verschiedenen Zwischenfrüchten auftreten.
- (2) Effekte glucosinolatreicher Brassicaceae im Vergleich zu *Fabaceae* bei unterschiedlichen Einarbeitungszeitpunkten und unterschiedlichen Legetiefen der Folgefrucht Kartoffel auf das Auftreten von *P. infestans*. Schwerpunkt der Feldversuche war die Überprüfung der Eignung und Wirksamkeit der Methode der Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau im Rahmen mehrjähriger Feldversuche. Als Grundlage wurde in Laborversuchen die hemmende Wirkung verschiedener Zwischenfruchtmaterialien und reiner Isothiocyanate auf *P. infestans* getestet.

## 2 Stand des Wissens

Die Kraut- und Knollenfäule an Kartoffeln wird vom Oomycet *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary verursacht. Nach gegenwärtigem Stand des Wissens, überdauert bzw. überwintert *P. infestans* in Deutschland überwiegend in befallenen Kartoffelpflanzgut. In Folge zunehmend verbesserter Lagerbedingungen zeigen infizierte Knollen teilweise keine sichtbaren Symptome und werden als latent infizierte Pflanzgutknollen wieder auf die Felder ausgepflanzt. In Untersuchungen konnte ein Anteil an latent infizierten Knollen in den Pflanzgutpartien von rund 10 % nachgewiesen werden (Powelson et al., 2002; Zellner et al., 2011). Bei geeigneten Bedingungen hinsichtlich Bodenfeuchte und Temperaturen kann sich primärer Stängelbefall entwickeln, wenn der Erreger am oder im Inneren des Stängel der Kartoffelpflanze nach oben wächst (Powelson et al., 2002; Wharton et al., 2012). Durch Sporulation an diesen primär befallenen Pflanzen und der Verfrachtung der Sporen auf benachbarte Pflanzen beginnt der Sekundärbefall und somit die weitere Ausbreitung im Bestand. Zusätzlich ist bei ausreichend Bodenfeuchte von einer Verbreitung des Erregers von Knolle zu Knolle im Damm ausgehend von latent infizierten Pflanzknollen auszugehen.

Neben latent infizierten Pflanzgutknollen geben verschiedene Studien Hinweise auf die Bedeutung von Oosporen bei der Überdauerung von *P. infestans*. Im Unterschied zu den asexuell gebildeten Zoosporen sind die sexuell gebildeten Oosporen widerstandsfähige Überdauerungsformen, die längere Zeit im Boden überleben können. Die Bedeutung von bodenbürtigen *P. infestans* Infektionen scheint unterschiedlich zu sein, sie wird u.a. für Schweden (Andersson et al., 1998), Finnland (Lehtinen und Hannukkala, 2004) und Mexico (Fernández-Pavía et al., 2004) beschrieben, jedoch zumindest bisher nicht für Deutschland.

Die Infektion und Verbreitung von *P. infestans* in Kartoffelbeständen ist abhängig von der Stickstoffversorgung. In der Literatur beschriebene Untersuchungen zeigen jedoch kein eindeutiges Bild hinsichtlich der Wirkung einer Stickstoffdüngung (Schöber-Butin, 2001; Hofmeester, 1992). Unter anderem Ros et al. (2008) und Mittelstraß et al. (2006) beobachteten eine Zunahme der Anfälligkeit von Kartoffeln bei höherer Stickstoffdüngung. Möller et al. (2007) stellte nur geringe Effekte der Stickstoffverfügbarkeit auf die Entwicklung der Krautfäule auf ökologisch bewirtschafteten Praxisbetrieben in Süddeutschland fest.

In ökologisch wirtschaftenden landwirtschaftlichen Betrieben, die auf den Einsatz mineralischer Stickstoffdüngemittel verzichten, ist Stickstoff in der Regel ein knappes Gut und somit ein produktionsbegrenzender Faktor, was auch für den ökologischen Kartoffelanbau zutrifft (Berry et al., 2002; Möller et al., 2007; Palmer et al., 2013). In diesem Zusammenhang stellt der Zwischenfruchtanbau einen wichtigen Baustein für das betriebliche

Stickstoffmanagement dar. Durch den Anbau von Leguminosen als Zwischenfrüchte wird zusätzlicher Stickstoff durch symbiotische Stickstofffixierung in den Betriebskreislauf eingebracht. Im ökologischen Kartoffelanbau besitzt der Zwischenfruchtanbau deshalb bereits eine große Verbreitung. In einer eigenen Befragung gaben mehr als 85 % der ökologisch wirtschaftenden Kartoffelbaubetriebe an, Zwischenfrüchte unmittelbar vor Kartoffeln anzubauen. Als Motivation hierfür wurden neben symbiotischer Stickstofffixierung, Nährstoffkonservierung und Erosionsschutz auch anti-phytopathogene Aspekte angeführt.

Ein besonderes Verfahren zur Nutzung anti-phytopathogener Effekte von Zwischenfrüchten ist die Methode der Biofumigation (Morra und Kirkegaard, 2002). Hierbei werden *Brassicaceae* mit hohen Glucosinolatgehalten als Zwischenfrüchte angebaut und zum Zeitpunkt der Blüte zerkleinert und in den Boden eingearbeitet. Durch die Zerstörung der Zellstruktur wird die Bildung toxischer Isothiocyante (ITCs) angeregt, die potenziell gegen zahlreiche Phytopathogene wirksam sind (Smith und Kirkegaard, 2002). Die Wirksamkeit der Methode ist von verschiedenen Aspekten abhängig, neben den Wachstumsbedingungen und dem erreichbaren Glucosinolatertrag auf der Fläche auch von der Art der Zerkleinerung und der Einarbeitung in den Boden (Gimsing und Kirkegaard, 2006; Morra und Kirkegaard, 2002).

Trotz der vielfältig möglichen Interaktionen zwischen ackerbaulichen Maßnahmen in der ökologischen Kartoffelproduktion und dem Auftreten und der Entwicklung der Kraut- und Knollenfäule, liegen bisher nur wenige Untersuchungen dazu vor. Gegenstand des „Teilprojekts B: Ackerbauliche Strategien“ war aus diesem Grund die Überprüfung der Wirkung von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf das Auftreten von Krautfäule. Die drei Aspekte Zwischenfruchtanbau, Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte und Legetiefe der Kartoffelpflanzknollen wurden hierfür ausgewählt und genauer untersucht zur Überprüfung folgender Arbeitshypothesen:

- (1) Der Anbau von Zwischenfrüchten beeinflusst die Stickstoffmineralisierung und Stickstoffverfügbarkeit für die Folgefrucht und beeinflusst somit die Entwicklung der Kartoffelbestände und den Befallsverlauf mit *P. infestans*. Unterschiedliche Zwischenfrüchte besitzen zudem verschiedene phytosanitäre Potenziale hinsichtlich der Folgefrucht Kartoffel.
- (2) Der Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte ist entscheidend für die Beeinflussung der Stickstoffmineralisierung und insbesondere für die Bildung von ITCs als Grundlage der Wirksamkeit der Biofumigation.

- (3) Die Legetiefe der Kartoffeln verändert die Interaktionen zwischen Boden und Pflanzgutknollen. Hierdurch wird die Entwicklung primären Stängelbefalls und somit die Ausbreitung einer Infektion ausgehend von latent infizierten Pflanzgutknollen beeinflusst.

Zur Überprüfung der Arbeitshypothesen wurden in den beiden Teilbereichen „Screening von Zwischenfrüchten“ und „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“ umfangreiche mehrjährige Feldversuchsreihen durchgeführt.



### **3 Material und Methoden**

#### **3.1 Screening von Zwischenfrüchten**

##### **3.1.1 Standorte Feldversuche**

Die Feldversuche der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ wurden in den Versuchsjahren 2012/2013 und 2013/2014 an je zwei Standorten durchgeführt. Die Feldversuche waren nicht standortfest, an jedem Standort wurde der Versuch nur einmal angelegt, d.h. insgesamt liegen Ergebnisse aus vier Umwelten vor. Zur Gewährleistung praxisüblicher Bedingung wurden Praxisschläge ökologisch wirtschaftenden Betrieben mit intensivem Kartoffelanbau als Versuchsstandorte gewählt. Auf den Flächen wurden im Rahmen der Fruchtfolge von den Betrieben alle drei bis vier Jahre Kartoffeln angebaut. Alle Versuchsstandorte befanden sich im Umland von München. Im ersten Versuchsjahr 2012/2013 lag der Standort „Olching“ etwa 25 km nordwestlich von München und der Standort „Geltendorf“ etwa 50 km westlich von München. Im zweiten Versuchsjahr 2013/2014 war der Standort „Petzenhofen“ rund 50 km westlich von München und der Standort „Mintraching“ rund 20 km nördlich von München. Der durchschnittliche Jahresniederschlag und die durchschnittliche Jahrestemperatur der Standorte waren vergleichbar, die Bodenarten reichten von sandigem Lehm bis schluffigem Lehm (siehe Tabelle 1 für weitere Details). Die Vorfrucht war immer Getreide: Wintergerste in Geltendorf und Petzenhofen, Dinkel in Olching und Winterweizen in Mintraching. Das Stroh verblieb in allen Fällen auf der Fläche. Nach einer Stoppelbearbeitung mit dem Grubber wurden an allen Versuchsstandorten mit Ausnahme Mintraching Biogasgärreste mit einer Stickstoffmenge von etwa 100 bis 145 kg N<sub>total</sub> ha<sup>-1</sup> ausgebracht und mit einem Grubber in den Boden eingearbeitet (siehe Tabelle 1).

##### **3.1.2 Versuchsdesign**

Alle Feldversuche der Versuchsreihe wurden mit identischem Versuchsdesign angelegt. Hierfür wurde eine einfaktorielle, randomisierte Blockanlage mit vier Blöcken gewählt mit dem Versuchsfaktor Zwischenfrucht. Die Parzellengröße betrug bei einer Länge von 9 m und einer Breite von 3 m jeweils 27 m<sup>2</sup>. Die äußeren zwei Randreihen wurden verworfen, alle Bonituren sowie die Ertragsermittlung erfolgten bei den zwei inneren Kartoffelreihen. An jedem Versuchsstandort wurden 16 Zwischenfruchtvarianten, bzw. 15 verschiedene Zwischenfrüchte und eine Kontrollvariante ohne Zwischenfrucht etabliert (siehe Tabelle 2 für eine detaillierte Aufstellung der Arten). Mit Ausnahme von Tagetes und Spitzwegerich, die durch Kümmel und Koriander ersetzt wurden, konnten alle Zwischenfruchtarten aus dem ersten Versuchsjahr ins zweite Versuchsjahr übernommen werden. Die Sorten wurden soweit möglich beibehalten, nur bei der Blauen Lupine musste die Sorte zwischen den

Versuchsjahren gewechselt werden. Bei den Kontrollvarianten wurde keine Zwischenfrucht ausgesät, jedoch war keine Unkrautkontrolle möglich, so dass die Kontrollparzellen als natürliche Begrünung etabliert wurden.

Einen Überblick über die durchgeführten Maßnahmen an den einzelnen Versuchsstandorten bietet Tabelle 1. Die Zwischenfrüchte wurden im August des Vorjahres vor dem Auspflanzen der Kartoffeln auf den Parzellen ausgesät. Hierfür erfolgte eine Bodenbearbeitung mit dem Grubber in Geltendorf und Petzenhofen und eine Bodenbearbeitung mit Pflug und Kreiselegge in Olching und Mintraching. Im Oktober wurden die Zwischenfrüchte mit einem Mulchgerät zerkleinert und mit einer Fräse in den Boden eingearbeitet. Das Pflanzbett für die Kartoffeln wurde im Frühjahr mit einer Kreiselegge vorbereitet und zertifiziertes Kartoffelpflanzgut aus ökologischer Vermehrung der Sorte Nicola wurde mit einem Legeabstand in der Reihe von 32 cm und einem Reihenabstand von 75 cm ausgepflanzt, d.h. rund 41700 Knollen ha<sup>-1</sup>. Die endgültigen Kartoffeldämme wurden mit einer Dammfräse aufgebaut, so dass die Pflanzknollen rund 15 cm mit Erde bedeckt waren. Unkräuter wurden mechanisch kontrolliert durch wiederholtes Striegeln und Häufeln. Es erfolgte kein Einsatz von Kupfer oder anderen Präparaten gegen *P. infestans*, gegen Kartoffelkäfer erfolgte falls notwendig eine Behandlung.

### 3.1.3 Datenaufnahme und Datenauswertung

Vor dem Einarbeiten der Zwischenfrüchte in den Boden wurde von allen Zwischenfrüchten der oberirdische Aufwuchs bestimmt. Hierzu wurde eine Fläche von 1 m<sup>2</sup> geschnitten und die Frischmasse (FM) gewogen. Zur Bestimmung der Trockenmasse (TM) und Stickstoffgehalte (N) wurde die FM zerkleinert und getrocknet. Der Gehalt an N<sub>min</sub> im Boden in der Tiefe 0 cm bis 30 cm wurde zu Vegetationsbeginn und etwa 40 Tage nach dem Legen der Kartoffeln bestimmt. Hierzu wurde pro Parzelle eine Mischprobe gezogen, auf 10 mm gesiebt und bis zur Bestimmung im Labor tiefgefroren. Der N<sub>min</sub> Gehalt wurde photometrisch als Nitratgehalt (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) bestimmt. Mit dem ersten Auftreten von Krautfäule in der Versuchsregion wurde ab Mitte Juni der Blattbefall mit *P. infestans* wöchentlich bonitiert. Hierzu wurde der prozentuale Anteil der Blattfläche mit Krautfäule Symptomen geschätzt und basierend auf 15 Boniturterminen im Jahr 2013 und 9 Boniturterminen im Jahr 2014 die Fläche unter der Befallsverlaufskurve berechnet, bezeichnet als „area under the disease progress curve“ (AUDPC). Um einen Vergleich der verschiedenen Standorte zu ermöglichen wurden die Kurven standardisiert und die relative AUDPC als Verhältnis zwischen dem beobachteten Blattbefall und dem maximal möglichen Blattbefall berechnet.

Die Ernte und Bestimmung der Knollenerträge erfolgte im Herbst mit einem angepassten Kartoffelvollernter mit Absackeinrichtung. Dabei wurden die beiden mittleren Kartoffelreihen der Parzellen für die Ertragsermittlung herangezogen. Die geernteten Knollen wurden nach Größe fraktioniert (kleiner 35 mm, 35 mm bis 65 mm, und größer 65 mm Quadratmaß) und die einzelnen Fraktionen gewogen. Von der mittleren Fraktion wurde eine Teilprobe gewaschen, zerkleinert und getrocknet zur Bestimmung des TM Gehalts.

Die Datenauswertung erfolgte mit der Software R Project (R Core Team, 2015). Für die einzelnen Ergebnisse und Standorte wurden zunächst Varianzanalysen (ANOVA) berechnet. „Tukey’s honest significant difference test“ (Tukey’s HSD) wurde zur Identifizierung signifikanter Unterschiede verwendet. So weit möglich erfolgte eine gemeinsame Auswertung der Versuchsstandorte, unter Berücksichtigung der Zwischenfruchtvarianten, die an allen Standorten verfügbar waren. Bezüglich *P. infestans* erfolgte die gemeinsame Auswertung nur für die drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching.

Tabelle 1: Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen

Feldversuchsstandort	Olching	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching
<b>Standorteigenschaften</b>				
Jährlicher Niederschlag <sup>a</sup>	919 mm	861 mm	861 mm	862 mm
Durchschnittliche Temperatur <sup>a</sup>	8.6°C	8.4°C	8.4°C	8.7°C
Bodenart	hsL	uL	uL	anuL
pH-Wert	7,4	6,4	7,3	7,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg 100 <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> Boden)	24	9	23	32
K <sub>2</sub> O (mg 100 <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> Boden)	22	12	22	16
<b>Bewirtschaftungsmaßnahmen</b>				
Versuchsjahr	2012/2013	2012/2013	2013/2014	2013/2014
Kartoffelsorte	Nicola	Nicola	Nicola	Nicola
Ausbringung Biogasgärrest mit N <sub>total</sub> , NH <sub>4</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	09. August 95, 52, 24, 133	18. Juli 106, 33, 35, 161	01. August 144, 60, 50, 216	--- <sup>b</sup> ---, ---, ---, --- <sup>b</sup>
Ansaat Zwischenfrüchte	09. August	02. August	14. August	16. August
Einarbeitung Zwischenfrüchte	11. Oktober	19. Oktober	22. Oktober	22. Oktober
N <sub>min</sub> Bodenproben (März)	20. März	26. März	19. März	18. März
Auspflanzung Kartoffeln	17. April	29. April	10. April	07. April
Auffräsen Kartoffeldämme	06. Mai	16. Mai	25. April	21. Mai
N <sub>min</sub> Bodenproben (40 Tage nach Legen)	24. Mai	07. Juni	23. Mai	21. Mai
Ernte Kartoffeln	11. September	01. Oktober	10. Oktober	10. September

<sup>a</sup> Agrarmeteorologie Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2015)

<sup>b</sup> Keine Ausbringung von Biogasgärresten am Versuchsstandort Mintraching

**Tabelle 2: Zwischenfruchtvarianten „Screening von Zwischenfrüchten“**

	Zwischenfrüchte	Sorte	Saatmenge (kg ha <sup>-1</sup> )	Olching	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching
1	Kontrolle	(ohne Zwischenfrucht)	---	x	x	x	x
2	Sandhafer	<i>Avena strigosa</i>	Pratex	120	x	x	x
3	Sareptasenf	<i>Brassica juncea</i>	Etamine	5	x	x	x
4	Winterrübse	<i>Brassica rapa</i>	Lenox	15	x	x	x
5	Kümmel	<i>Carum carvi</i>		10		x	x
6	Koriander	<i>Coriandrum sativum</i>		10		x	x
7	Ramtill	<i>Guizotia abyssinica</i>		10	x	x	x
8	Iberischer Drachenkopf	<i>Lallemantia iberica</i>		15	x	x	x
9	Kresse	<i>Lepidium sativum</i>		20	x	x	x
10	Blaue Lupine	<i>Lupinus angustifolius</i>	Probor	150	x	x	
11	Blaue Lupine	<i>Lupinus angustifolius</i>	Sonate	150			x
12	Erbse	<i>Pisum sativum</i>	Arvika	200	x	x	x
13	Spitzwegerich	<i>Plantago lanceolata</i>		10	x	x	
14	Ölrettich	<i>Raphanus sativus</i>	Defender	30	x	x	x
15	Gelbsenf	<i>Sinapsis alba</i>	Forum	25	x	x	x
16	Tagetes	<i>Tagetes</i>		10	x	x	
17	Perserklee	<i>Trifolium resupinatum</i>	Gorby	20	x	x	x
18	Ackerbohne	<i>Vicia faba</i>	Isabell	250	x	x	x
19	Sommerwicke	<i>Vicia sativa</i>	Berninova	100	x	x	x

### 3.2 Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*

#### 3.2.1 In vitro Hemmtests

Um erste Hinweise auf die Sensitivität von *P. infestans* auf verschiedene ITCs und Pflanzenmaterialien zu erhalten, wurden verschiedene in vitro Hemmtests im Labor durchgeführt. Der Aufbau der Versuche war dabei stets identisch. Petrischalen mit einem Innendurchmesser von 86 mm mit 20 ml V8 Agar Nährmedium (800 ml destilliertes Wasser, 200 ml Gemüsesaft, 15 g Agar, 2 g CaCO<sub>3</sub>) wurden mittig mit einer 5 mm Agarscheibe mit *P. infestans* inokuliert. Anschließend wurden die Petrischalen umgedreht mit dem Deckel nach unten. In den Deckel wurde 2,5 g FM der zu testenden Zwischenfrucht in zerkleinerter Form bzw. verschiedene Stoffmengen ITCs in Methanol gelöst (Gesamtvolumen immer 3 µl) eingebracht. In die Kontrollvarianten wurde nichts bzw. 3 µl Methanol eingebracht. Mit den verschiedenen ITCs und Methanol wurden Verdünnungsreihen hergestellt. Einen Überblick über die getesteten Zwischenfrüchte, die ITCs und die eingebrachten Stoffmengen bietet Tabelle 3. Zwischen dem Pflanzenmaterial bzw. den ITCs und dem Nährmedium mit *P. infestans* bestand zu keinem Zeitpunkt Kontakt, eine hemmende Wirkung konnte nur über die Gasphase erfolgen. Die Petrischalen wurden luftdicht mit Parafilm verschlossen und mit dem Deckel nach unten bei 17°C im Dunkeln inkubiert. Zu verschiedenen Zeitpunkten wurde der Durchmesser des gewachsenen Myzels gemessen und daraus die relative AUDPC berechnet. Die Hemmversuche mit Pflanzenmaterial wurden dreimal durchgeführt, die Versuche mit ITCs einmal. Alle Varianten waren dabei immer dreimal wiederholt.

Die Datenauswertung erfolgte mit der Software R Project (R Core Team, 2015). Zunächst wurden Varianzanalysen (ANOVA) berechnet, bevor signifikante Unterschiede zwischen den Varianten mit „Tukey’s honest significant difference test“ (Tukey’s HSD) identifiziert wurden. Alle drei Versuche zur hemmenden Wirkung von Zwischenfruchtmaterial wurden zusammen ausgewertet.

**Tabelle 3: Versuchsvarianten Hemmtests**

<b>Hemmtests mit Pflanzenmaterial</b>	
Zwischenfrucht	Sareptasenf ( <i>Brassica juncea</i> , Sorte Etamine) Winterrübse ( <i>Brassica rapa</i> , Sorte Lenox) Ölrettich ( <i>Raphanus sativus</i> , Sorte Defender) Gelbsenf ( <i>Sinapsis alba</i> , Sorte Forum) Sommerwicke ( <i>Vicia sativa</i> , Berninova)
Eingebrachte Menge	2,5 g Frischmasse
Kontrolle	Ohne Pflanzenmaterial
<b>Hemmtest mit Isothiocyanaten</b>	
Verbindungen (Stoffmengen)	Allylisothiocyanat (30,7 µmol; 3,07 µmol; 0,307 µmol; 0,0307 µmol; 0,003 µmol) Benzylisothiocyanat (22,6 µmol; 2,26 µmol; 0,226 µmol; 0,0226 µmol; 0,002 µmol) 2-Phenylethylisothiocyanat (20,1 µmol; 2,01 µmol; 0,201 µmol; 0,0201 µmol; 0,002 µmol)
Eingebrachte Menge	ITC Stoffmenge in Methanol gelöst, Gesamtvolumen 3 µl
Kontrolle	3 µl Methanol

### **3.2.2 Feldversuche**

#### **3.2.2.1 Standorte Feldversuche**

Im Rahmen der Versuchsreihe „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“ wurden in den Jahren 2011/2012, 2012/2013 und 2013/2014 Feldversuche an verschiedenen Standorten durchgeführt. Die Versuchsstandorte in den Jahren 2012/2013 und 2013/2014 waren identisch mit den Versuchsstandorten der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“, die Feldversuche befanden sich jeweils direkt nebeneinander. Zusätzlich wurde im Jahr 2011/2012 ein Feldversuch am Standort „Roggenstein“ angelegt, etwa 25 km nordwestlich von München, in Nachbarschaft zur Versuchsstation Roggenstein der Technischen Universität München. Auch dieser Feldversuch befand sich auf einem Praxis Schlag eines ökologisch wirtschaftenden Betriebes mit intensivem Kartoffelanbau. Die Feldversuche waren nicht standortfest, an jedem Standort wurde der Versuch nur ein Jahr durchgeführt. Details zu den Standorten, Klima und Bodeneigenschaften können Tabelle 4 entnommen werden. Wie bei den Standorten in den Versuchsjahren 2012/2013 und 2013/2014 war auch die Vorfrucht am Versuchsstandort Roggenstein im Jahr 2011/2012 ein Getreide. Das Stroh der Vorfrucht Winterroggen in Roggenstein verblieb ebenfalls auf der Fläche und wurde mit einem Grubber eingearbeitet, zusammen mit Biogasgärresten (siehe Tabelle 4).

#### **3.2.2.2 Versuchsdesign**

An allen Versuchsstandorten wurde als Versuchsdesign eine dreifaktorielle Spaltanlage mit zwei gekreuzten Faktoren bei den Großteilstücken und einem Faktor bei den Kleinteilstücken gewählt. Alle Kombinationen waren in vier Blöcken wiederholt, insgesamt gab es an jedem Standort 64 Parzellen, mit Ausnahme Olching, dort konnten aus Platzgründen nur weniger Varianten mit insgesamt 48 Parzellen realisiert werden. Die Parzellengröße betrug an allen Standorten bei einer Länge von 9 m und einer Breite von 6 m jeweils 54 m<sup>2</sup>, am Standort Olching betrug die Parzellengröße bei einer Länge von 8 m und einer Breite von 6 m jeweils 48 m<sup>2</sup>. Jede Parzelle umfasste dabei acht Kartoffelreihen mit einem Abstand von 75 cm. Da die Breite der Bodenbearbeitungsgeräte 3 m betrug, wurden die Reihen 1, 4, 5 und 8 als Randreihen behandelt. Reihe 2 und 3 dienten für alle Bonituren und waren ansonsten für die Abschlussernte vorbehalten, die Reihen 6 und 7 wurden im Rahmen von Zeiternten vorzeitig geerntet.

Als Versuchsfaktoren wurden die Zwischenfruchtart als Kleinteilstücke und der Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte, sowie die Legetiefe der Pflanzkartoffeln als Großteilstücke berücksichtigt. Die Versuchsfaktoren Zeitpunkt des Umbruchs mit einem Einarbeitungstermin im Herbst und einem im Frühjahr, sowie die Legetiefe der Pflanzkartoffeln mit Bodenniveau



(0 cm) und 5 cm unter Bodenniveau (-5 cm) waren an allen Standorten identisch. Die Zwischenfruchtarten wechselten zwischen den Jahren und Standorten teilweise wie Tabelle 5 zu entnehmen ist. In Roggenstein wurden die drei *Brassicaceae* Ölrettich, Sareptasenf und Winterrübse mit der *Fabaceae* Winterwicke verglichen, in Olching die *Brassicaceae* Ölrettich mit der *Fabaceae* Sommerwicke und einer Kontrollvariante ohne Zwischenfrucht. An den anderen drei Standorten wurden die beiden *Brassicaceae* Ölrettich und Winterrübse mit der *Fabaceae* Sommerwicke und einer Kontrollvariante ohne Zwischenfrucht verglichen. Alle Kontrollparzellen stellen wie bei der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ eine natürliche Begrünung dar.

Die Bodenbearbeitung und Aussaat der Zwischenfrüchte im Sommer vor dem Auspflanzen der Kartoffeln fand zusammen mit der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ statt (siehe Kapitel 3.1.2). Einen Überblick über alle durchgeführten Bewirtschaftungsmaßnahmen bietet Tabelle 4. Am zusätzlichen Standort Roggenstein wurde vor der Aussaat der Zwischenfrüchte gepflügt und das Saatbett mit einer Kreiselegge vorbereitet. Die Zwischenfrüchte wurden entweder Anfang bis Mitte Oktober eingearbeitet (Umbruch Herbst), oder im April des Folgejahres (Umbruch Frühjahr). Die Zwischenfrüchte wurden dabei zunächst mit einem Mulchgerät zerkleinert und unmittelbar danach mit einer Fräse mit einer Bearbeitungstiefe von knapp 20 cm in den Boden eingearbeitet. Die Pflanzbettbereitung und das Auspflanzen der Kartoffeln fanden wiederum zusammen mit der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ statt, bei identischer Reihenweite und Pflanzabstand. Am Standort Roggenstein wurde die Kartoffelsorte Ditta verwendet, in den darauf folgenden Jahren stets die Sorte Nicola. Die Kartoffeln wurden in zwei verschiedenen Pflanztiefen abgelegt. Entweder mit der Oberkante der Pflanzknolle auf dem Niveau der Bodenoberfläche (0 cm), oder mit der Oberkante der Pflanzknolle 5 cm unter der Bodenoberfläche (-5 cm). Das Auffräsen der Kartoffeldämme sowie die weitere Pflege der Kartoffelbestände erfolgte wie bei der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ (siehe Kapitel 3.1.2).

### 3.2.2.3 Datenaufnahme und Datenauswertung

Vor Einarbeitung der Zwischenfrüchte im Herbst und Frühjahr wurde durch das Schneiden einer Fläche von 1 m<sup>2</sup> der oberirdische Aufwuchs bestimmt. Die FM der Zwischenfrüchte wurde gehäckselt und getrocknet zur Bestimmung der TM und des N Gehalts. Die N<sub>min</sub> Gehalte im Boden wurden zu Vegetationsbeginn und circa 40 Tage nach dem Legen der Kartoffeln bestimmt. Ab Mitte Juni wurde, wie auch in der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“, der Befall mit Krautfäule bonitiert und die relative AUDPC berechnet (siehe Kapitel 3.1.3). Am Standort Roggenstein im Jahr 2012 wurden 9 Bonituren durchgeführt. Die Entwicklung der Kartoffelpflanzen und die Stickstoffaufnahme wurden

durch drei Zeiternten je Standort im Abstand von rund 2 Wochen bestimmt, mit Ausnahme des Standorts Olching mit nur zwei Zeiternten. Bei jedem Zeiterntetermin wurden dabei im Jahr 2012 pro Parzelle 14 Pflanzen, in den Jahren 2013 und 2014 pro Parzelle 10 Pflanzen geerntet und die Kraut und Knollen FM und TM Erträge sowie die N Gehalte getrennt bestimmt. Alle Zeiternten wurden dabei aus den Reihen 6 und 7 der Parzellen entnommen. Bei der Abschlussernte wurden die beiden Reihen 2 und 3 vollständig mit einem Kartoffelvollernter gerodet und abgesackt. Die geernteten Knollen wurden nach Größe fraktioniert, gehäckselt und getrocknet wie in Kapitel 3.1.3 beschrieben zur Bestimmung der FM und TM Erträge und der N Gehalte.

Die Datenauswertung erfolgte mit der Software R Project (R Core Team, 2015). Zur Auswertung der Versuchsdaten wurden unter Berücksichtigung des komplexeren Split-plot Designs gemischt lineare Modelle (LMM) herangezogen, berechnet mit dem R Paket lme4 (Bates et al., 2014). Alle LMMs wurden unter Zuhilfenahme von „likelihood ratio tests“ so weit wie möglich vereinfacht, zur Schätzung der Parameter für die fixen Effekte. Die Freiheitsgrade wurden mit der Kenward-Roger Näherung aus dem R Paket pbkrtest (Halekoh und Højsgaard 2014) bestimmt und damit mit dem R Paket lmerTest (Kuznetsova et al. 2014) die p-Werte berechnet. Signifikante Unterschiede wurden mit „Tukey’s honest significant difference test“ (Tukey’s HSD) und „least-squares means“ mit dem R Paket lsmeans (Lenth und Hervé 2015) identifiziert. Neben der separaten Auswertung der einzelnen Standorte wurden die Ergebnisse so weit möglich zusammen ausgewertet. Jedoch waren in Folge der wechselnden Kartoffelsorte und der unterschiedlichen Zwischenfrüchten nur die Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching identisch und wurden zusammen ausgewertet.

**Tabelle 4: Standorteigenschaften und Bewirtschaftungsmaßnahmen**

Feldversuchsstandort	Roggenstein	Olching	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching
<b>Standorteigenschaften</b>					
Jährlicher Niederschlag <sup>a</sup>	919 mm	919 mm	861 mm	861 mm	862 mm
Durchschnittliche Temperatur <sup>a</sup>	8.6°C	8.6°C	8.4°C	8.4°C	8.7°C
Bodenart	hsL	hsL	uL	uL	anuL
pH-Wert	7,5	7,4	6,6	7,2	7,5
P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (mg 100 <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> Boden)	16	23	12	22	27
K <sub>2</sub> O (mg 100 <sup>-1</sup> g <sup>-1</sup> Boden)	14	24	13	19	14
<b>Bewirtschaftungsmaßnahmen</b>					
Versuchsjahr	2011/2012	2012/2013	2012/2013	2013/2014	2013/2014
Kartoffelsorte	Ditta	Nicola	Nicola	Nicola	Nicola
Ausbringung Biogasgärrest mit N <sub>total</sub> , NH <sub>4</sub> , P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> , K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )	16. August 98, 30, 32, 149	09. August 95, 52, 24, 133	18. Juli 106, 33, 35, 161	01. August 144, 60, 50, 216	--- <sup>b</sup> ---, ---, ---, --- <sup>b</sup>
Ansaat Zwischenfrüchte	18. August	09. August	02. August	14. August	16. August
Einarbeitung Zwischenfrüchte Herbst	04. Oktober	11. Oktober	19. Oktober	22. Oktober	22. Oktober
N <sub>min</sub> Bodenproben (März)	22. März	20. März	26. März	19. März	18. März
Einarbeitung Zwischenfrüchte Frühjahr	19. April	17. April	29. April	10. April	07. April
Auspflanzung Kartoffeln	27. April	17. April	29. April	10. April	07. April
Auffräsen Kartoffeldämme	02. Mai	06. Mai	16. Mai	25. April	21. Mai
N <sub>min</sub> Bodenproben (40 Tage nach Legen)	24. Mai	24. Mai	07. Juni	23. Mai	21. Mai
1. Zeiternte	02. Juli	04. Juli	11. Juli	01. Juli	25. Juni
2. Zeiternte	12. Juli	18. Juli	25. Juli	15. Juli	10. Juli
3. Zeiternte	23. Juli	--- <sup>c</sup>	08. August	30. Juli	24. Juli
Ernte Kartoffeln	21. August	11. September	01. Oktober	10. Oktober	10. September

<sup>a</sup> Agrarmeteorologie Bayern (Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, 2015)

<sup>b</sup> Keine Ausbringung von Biogasgärresten am Versuchsstandort Mintraching

<sup>c</sup> keine 3. Zeiternte am Standort Olching durchgeführt

Tabelle 5: Versuchsfaktoren Feldversuche „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“

Versuchsstandort			Roggenstein	Olching	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching
Zwischenfrüchte	Sorte	Saatmenge (kg ha <sup>-1</sup> )					
Kontrolle	(ohne Zwischenfrucht)	---		x	x	x	x
Sareptasenf	<i>Brassica juncea</i>	Etamine	x				
Winterrübse	<i>Brassica rapa</i>	Lenox	x		x	x	x
Ölrettich	<i>Raphanus sativus</i>	Defender	x	x	x	x	x
Sommerwicke	<i>Vicia sativa</i>	Berninova		x	x	x	x
Winterwicke	<i>Vicia villosa</i>	Osts.-Dr. B. <sup>a</sup>	x				
Zeitpunkt der Einarbeitung							
Herbst			x	x	x	x	x
Frühjahr			x	x	x	x	x
Legetiefe Pflanzkartoffeln							
Bodenniveau (0 cm)			x	x	x	x	X
5 cm unter Bodenniveau (-5 cm)			x	x	x	x	x

<sup>a</sup> Ostsaat-Dr. Baumanns

## **4 Ergebnisse**

### **4.1 Screening von Zwischenfrüchten**

#### **4.1.1 Versuchs- und Wachstumsbedingungen**

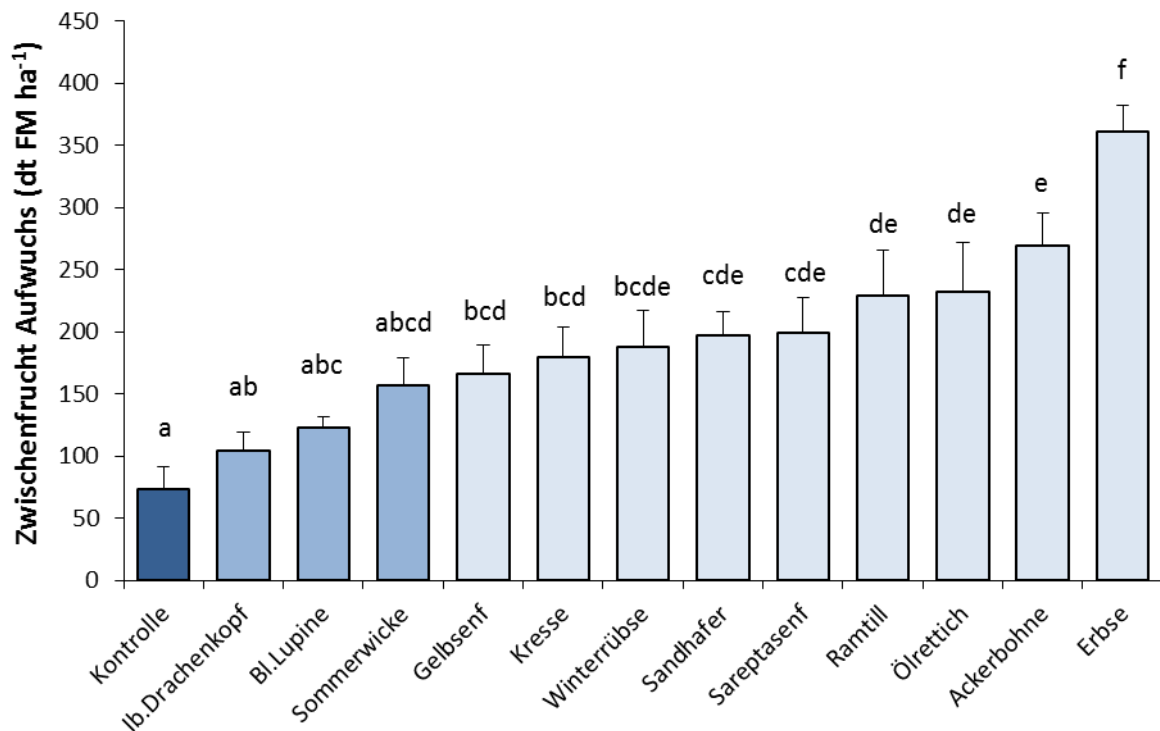
Im ersten Versuchsjahr 2012/2013 der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ unterschieden sich die Standorte und in der Folge auch die Wachstumsbedingungen der beiden Feldversuchsstandorte Olching und Geltendorf deutlich. Im Herbst entwickelten sich die Zwischenfrüchte an beiden Standorten gut. Alle ausgesäten Varianten konnten am Standort Olching geschnitten und eingearbeitet werden, am Standort Geltendorf mussten die Varianten Perserklee, Tagetes und Spitzwegerich aufgegeben werden, da unmittelbar vor der Einarbeitung der Zwischenfrüchte kein ausreichender Aufwuchs festgestellt werden konnte. Das Jahr 2013 war durch ein nasses Frühjahr geprägt, gefolgt von einem sehr trockenen Sommer mit kaum Regen bis Anfang August. Der sandige Standort Olching ohne Möglichkeit zur Bewässerung der Kartoffeln verursachte deutlichen Trocken- und Hitzestress bei den Kartoffeln. Dies führte zu einer verfrühten Abreife und verhinderte die Infektion mit *P. infestans* und das Auftreten von Krautfäule. Somit stehen für den Standort Olching keine Ergebnisse für den Krautfäulebefall zur Verfügung. Am Standort Geltendorf überstanden die Kartoffeln die längere Trockenheit und wuchsen ab Anfang / Mitte August weiter, begleitet von einem zunehmenden Krautfäulebefall.

Im zweiten Versuchsjahr 2013/2014 der Versuchsreihe entwickelten sich die Zwischenfrüchte am Standort Petzenhofen ebenfalls gut, jedoch war das Wachstum der Zwischenfrüchte am Standort Mintraching ohne Ausbringung von Biogasgärresten nur sehr eingeschränkt. Die Zwischenfrucht Kümmel konnte an beiden Standorten nicht erfolgreich etabliert werden, am Standort Petzenhofen mussten zudem die Variante Koriander wegen schlechten Wachstums verworfen werden. Die Wachstumsbedingungen für die Kartoffeln waren an beiden Standorten vergleichbar gut. Nach einem warmen und kurzen Winter konnten die Kartoffeln im April 2014 früh ausgepflanzt werden. Nach Beginn des Krautfäulebefalls verzögerte trockenes Wetter die weitere Ausbreitung bis etwa Mitte Juli. Anschließend zerstörte *P. infestans* das Blattwerk der Kartoffeln innerhalb weniger Tage.

#### **4.1.2 Entwicklung der Zwischenfrüchte**

Der oberirdische Aufwuchs der verschiedenen Zwischenfruchtarten differenzierte deutlich und unterschied sich teils signifikant voneinander. Einen Überblick über die FM und TM Erträge der Zwischenfrüchte im Mittel der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching bieten Abbildung 1 und 2. Alle Zwischenfrüchte hatten einen höheren FM und TM Aufwuchs als die Kontrollparzellen ohne Aussaat einer Zwischenfrucht

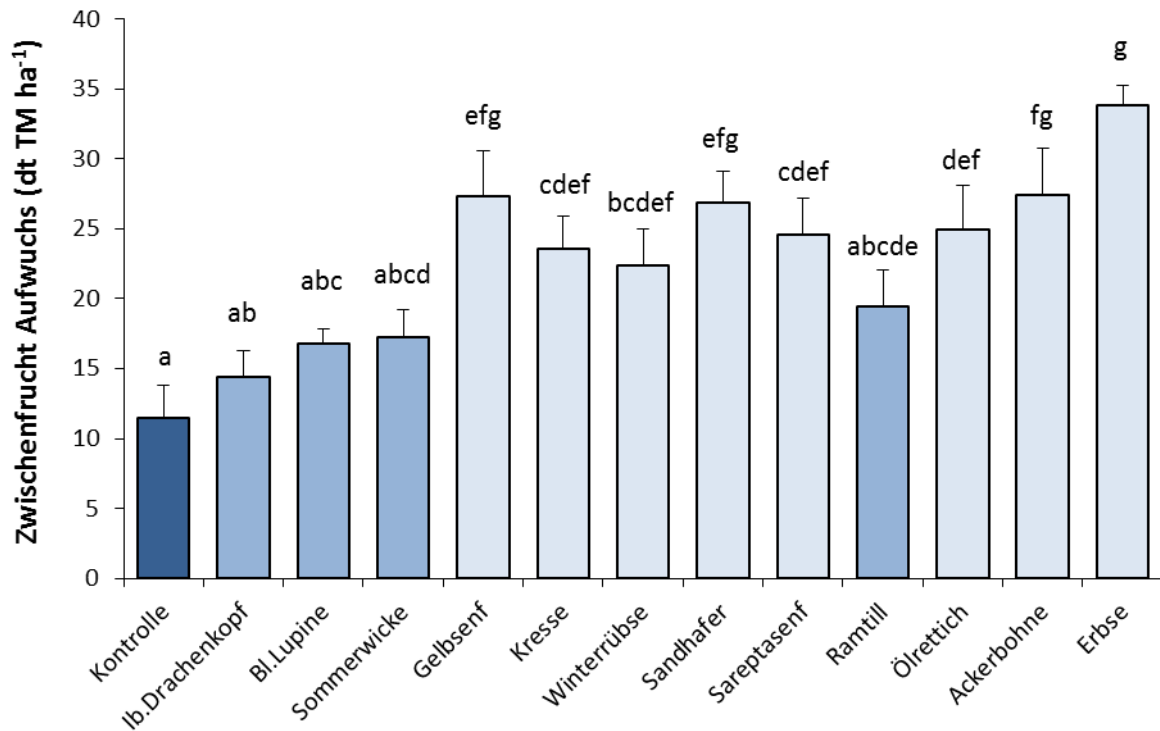
mit 73,2 dt FM ha<sup>-1</sup> und 11,5 dt TM ha<sup>-1</sup>, wenngleich nicht in allen Fällen signifikant. Erbsen erreichten mit 360,9 dt FM ha<sup>-1</sup> und 33,8 dt TM ha<sup>-1</sup> sowohl den höchsten FM als auch TM Aufwuchs im Mittel der vier Standorte. Einige Zwischenfrüchte erreichten einen relativ geringeren FM Aufwuchs, jedoch einen vergleichbar hohen TM Aufwuchs, beispielsweise Gelbsenf und Sandhafer. Die beiden *Fabaceae* Erbse und Ackerbohne zeigten die höchsten FM und TM Erträge, allerdings waren diese im Fall der Ackerbohne nicht signifikant höher als bei verschiedenen andere Arten, beispielsweise Ölrettich, Sareptasenf oder Sandhafer.



### Abbildung 1: Oberirdischer Frischmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte

Mittelwerte und Standardfehler der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

Der Versuchsstandort hatte einen signifikanten Einfluss auf die Zwischenfruchterträge, die Unterschiede im TM Aufwuchs reichten von 11,4 dt TM ha<sup>-1</sup> bei Mintraching, über 21,0 dt TM ha<sup>-1</sup> bei Olching, bis 27,0 dt TM ha<sup>-1</sup> und 30 dt TM ha<sup>-1</sup> bei Petzenhofen und Geltendorf (Tabelle 6). Mit Ausnahme von Tagetes zeigten alle Zwischenfrüchte einen signifikant höheren Aufwuchs als die Kontrolle in Olching, bei allen anderen Standorten waren die Unterschiede nicht so ausgeprägt. Die Rangfolge der TM Erträge der einzelnen Zwischenfruchtarten variierte ebenfalls zwischen den Standorten.

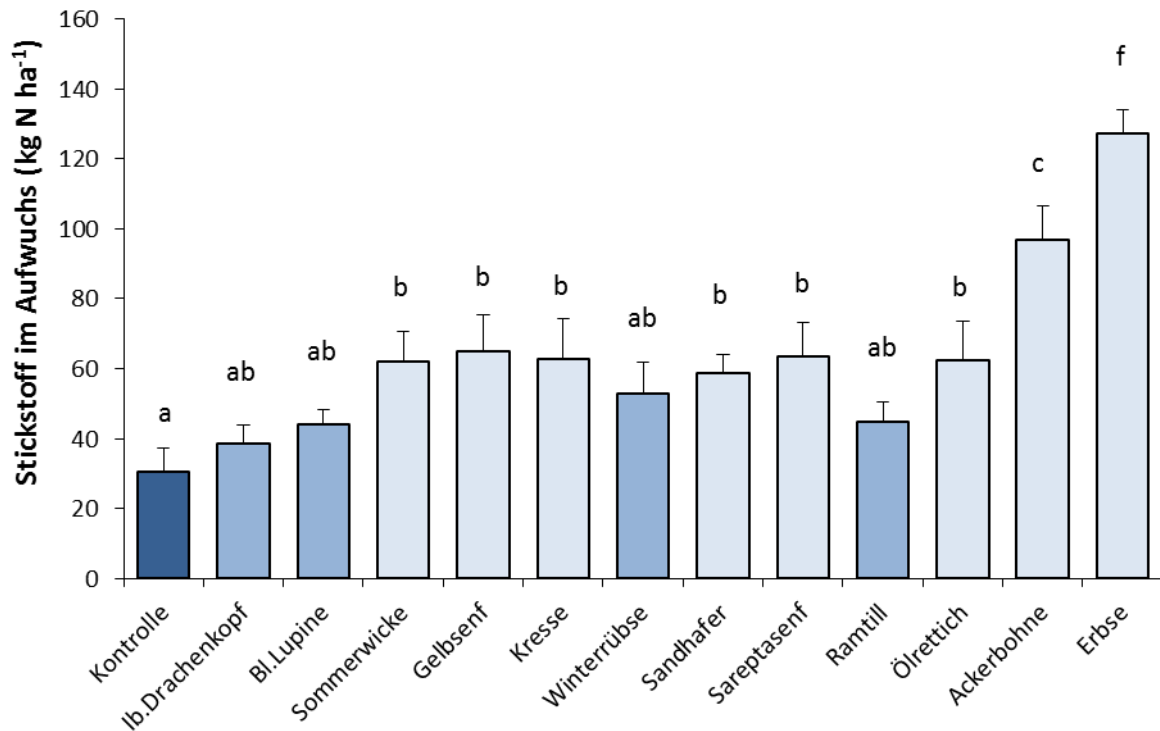


**Abbildung 2: Oberirdischer Trockenmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte**

Mittelwerte und Standardfehler der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

Der in der oberirdischen Biomasse enthaltene Stickstoff zeigte eine ähnliche Verteilung wie die erzielten FM Erträge (Abbildung 3). Bei den beiden *Fabaceae* Erbse und Ackerbohne konnte mit  $127,4 \text{ kg N ha}^{-1}$  und  $96,7 \text{ kg N ha}^{-1}$  deutlich und signifikant mehr Stickstoff im Aufwuchs gefunden werden als bei den anderen Zwischenfruchtarten. Die Zwischenfrüchte Iberischer Drachenkopf, Blaue Lupine, Winterrübse und Ramtill zeigten im Mittel der vier Standorte keinen signifikanten Unterschied zur Kontrollvariante mit  $30,5 \text{ kg N ha}^{-1}$ .

Wie auch bei den TM Erträgen wurde der im Aufwuchs enthaltene Stickstoff signifikant vom Versuchsstandort beeinflusst. Der gefundene Stickstoff war in Mintraching mit  $29,5 \text{ kg N ha}^{-1}$  am geringsten, gefolgt von  $51,0 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Olching, und  $82,4 \text{ kg N ha}^{-1}$  und  $86,2 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Geltendorf und Petzenhofen. Die beiden *Fabaceae* Erbse und Ackerbohne zeigten sowohl in Geltendorf als auch in Mintraching die höchsten Stickstoffmengen im oberirdischen Aufwuchs. In Olching erreichten die drei *Fabaceae* Erbse, Ackerbohne und Sommerwicke die höchsten Stickstoffmengen pro Fläche. Am Versuchsstandort Petzenhofen wurde dagegen in den fünf ausgesäten *Brassicaceae* zusammen mit der Erbse die höchste Menge Stickstoff pro Fläche beobachtet.



**Abbildung 3: Stickstoff im Aufwuchs der Zwischenfrüchte**

Mittelwerte und Standardfehler der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

Das C/N-Verhältnis der Zwischenfrüchte unterschied sich zwischen den Versuchsstandorten. Das engste C/N-Verhältnis wurde mit 11,9 im Mittel für die Zwischenfrüchte am Standort Petzenhofen gemessen, gefolgt von 15,6 und 16,6 an den Standorten Geltendorf und Mintraching. Das weiteste C/N-Verhältnis war 18,1 für das Mittel der Zwischenfrüchte am Standort Olching.

Im Mittel der vier Versuchsstandorte zeigten die *Fabaceae* Erbse, Sommerwicke und Ackerbohne die engsten C/N-Verhältnisse im Bereich von 11:1 bis 11,5:1. Die weitesten C/N-Verhältnisse konnten bei den *Brassicaceae* Sareptasenf, Ölrettich, Winterrübse, Gelbsenf und Kresse im Bereich von 17,2:1 bis 18,8:1 nachgewiesen werden, lediglich übertroffen von Sandhafer mit 19,4:1.



**Tabelle 6: Zwischenfrucht Trockenmasseerträge an den Versuchsstandorten**

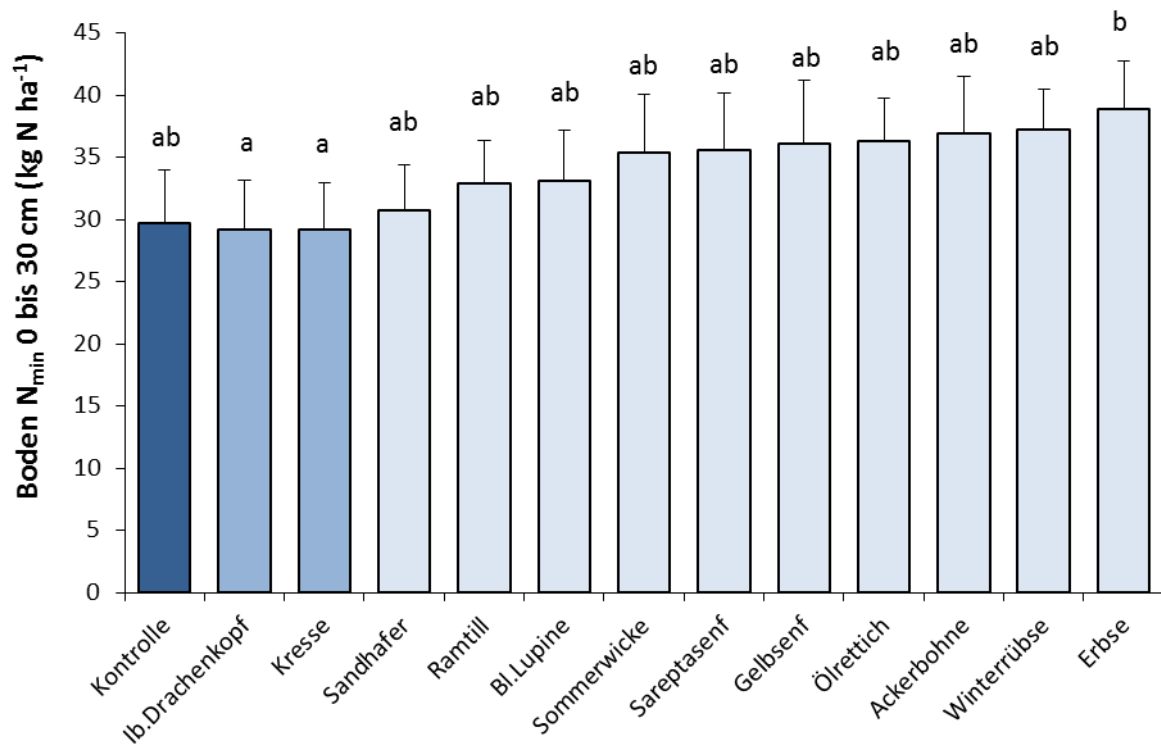
Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten. Tukey's HSD spaltenweise für jeden Standort einzeln [abc] und zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,05$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Zwischenfrucht Aufwuchs (dt TM ha <sup>-1</sup> ) (Mittelwert ± Standardfehler)				
Zwischenfrucht	Geltendorf	Olching	Petzenhofen	Mintraching
Kontrolle	24,8 ± 3,7 ab	5,9 ± 0,5 a	11,5 ± 1,7 a	3,7 ± 0,5 ab
Sandhafer	36,6 ± 1,0 c	30,5 ± 1,9 ef	26,5 ± 0,8 bcde	13,9 ± 1,4 de
Sareptasenf	32,2 ± 1,3 bc	20,6 ± 4,1 cd	33,6 ± 3,0 def	11,8 ± 2,2 cde
Winterrübse	23,3 ± 3,1 ab	18,1 ± 1,3 cd	37,1 ± 1,9 def	11,0 ± 1,3 bcde
Koriander	--- ---	--- ---	--- ---	7,3 ± 1,5 abcd
Ramtill	30,9 ± 3,2 abc	23,1 ± 1,4 cde	18,4 ± 2,2 abc	5,2 ± 0,5 abc
Ib.Drachenkopf	24,2 ± 1,0 ab	17,2 ± 1,3 cd	9,9 ± 1,9 a	6,4 ± 1,0 abcd
Kresse	28,1 ± 1,9 abc	19,9 ± 0,2 cd	34,7 ± 2,4 def	11,6 ± 2,0 bcde
Bl.Lupine	20,8 ± 0,5 a	15,5 ± 0,3 bc	19,5 ± 1,2 abc	11,4 ± 1,5 bcde
Erbse	36,5 ± 1,5 c	38,3 ± 0,3 f	31,4 ± 1,7 cde	29,1 ± 4,0 f
Spitzwegerich	--- ---	15,6 ± 2,3 bc	--- ---	--- ---
Ölrettich	31,5 ± 2,0 bc	19,5 ± 0,9 cd	38,8 ± 6,0 ef	10,1 ± 0,7 abcde
Gelbsenf	27,3 ± 1,8 abc	25,0 ± 1,4 de	45,3 ± 3,5 f	11,5 ± 1,8 bcde
Tagetes	--- ---	9,1 ± 1,1 ab	--- ---	--- ---
Perserklee	--- ---	15,6 ± 1,3 bc	13,3 ± 4,9 ab	2,6 ± 0,6 a
Ackerbohne	48,8 ± 1,6 d	20,2 ± 1,2 cd	25,0 ± 1,1 bcd	15,5 ± 1,9 e
Sommerwicke	24,6 ± 3,1 ab	18,8 ± 1,4 cd	18,9 ± 3,3 abc	6,7 ± 0,9 abcd
Mittelwerte <sup>a</sup>	30,0 ± 1,1 C	21,0 ± 1,1 B	27,0 ± 1,6 C	11,4 ± 1,0 A

<sup>a</sup> Mittelwerte der an allen Standorten verfügbaren Varianten  
n.s.: nicht signifikant

#### 4.1.3 N<sub>min</sub> Gehalte im Boden

Bei den N<sub>min</sub> Gehalten im Boden von 0 bis 30 cm Tiefe konnten für das Mittel der vier Versuchsstandorte nur geringe Unterschiede nach den verschiedenen Zwischenfruchtarten festgestellt werden. Die N<sub>min</sub> Werte zu Vegetationsbeginn im März reichten von 29 kg N ha<sup>-1</sup> bis 39 kg N ha<sup>-1</sup>, wobei sich nur die Zwischenfrucht Erbse signifikant von den beiden Zwischenfrüchten Iberischer Drachenkopf und Kresse unterschied (Abbildung 4). Bis zur zweiten N<sub>min</sub> Probenahme rund 40 Tage nach dem Legen der Kartoffeln stiegen die N<sub>min</sub> Gehalte im Boden an, auf ein Niveau von 77 bis 107 kg N ha<sup>-1</sup> (Abbildung 5). Die einzelnen Varianten unterschieden sich nicht signifikant im Mittel der vier Standorte mit Ausnahme der Zwischenfrucht Winterrübse, die einen signifikant erhöhten N<sub>min</sub> Wert zeigte.

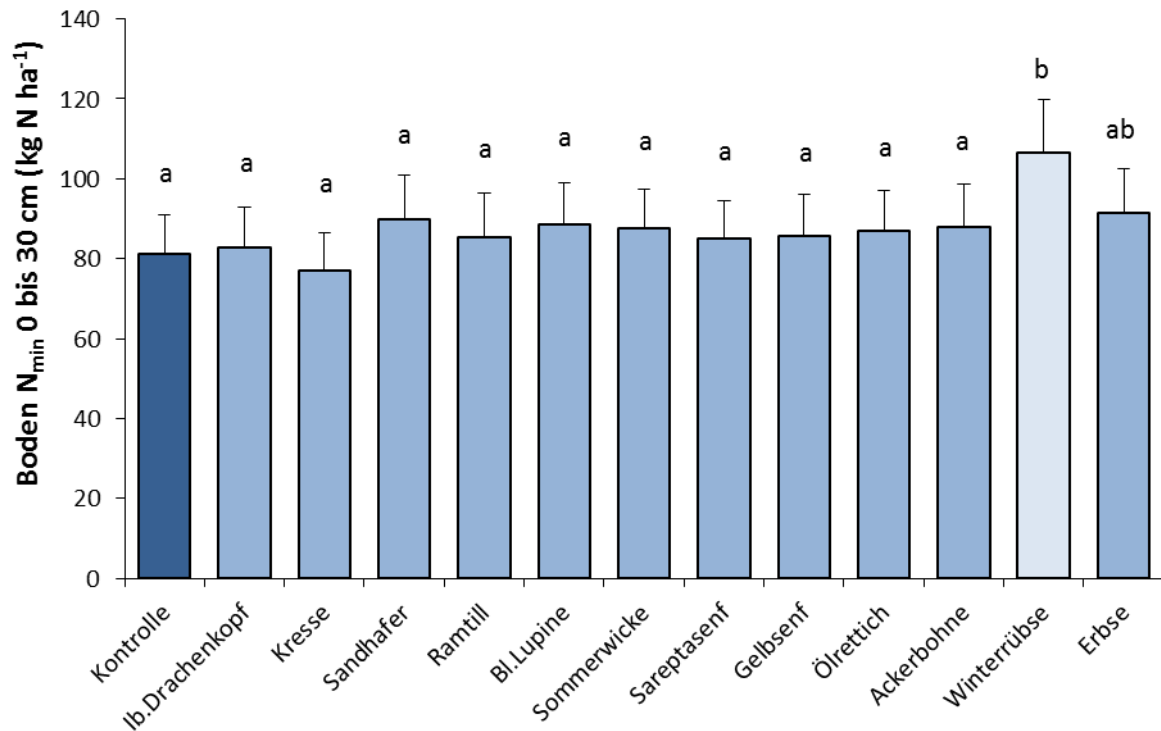


**Abbildung 4:  $N_{\min}$  Gehalt im Boden zu Vegetationsbeginn**

Mittelwerte und Standardfehler der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

Die  $N_{\min}$  Werte unterschieden sich signifikant zwischen den Standorten unter Berücksichtigung der Zwischenfruchtvarianten, die an allen Standorten vertreten waren. Im ersten Versuchsjahr im Frühjahr 2013 zu Vegetationsbeginn lag der Versuchsmittel am Standort Olching bei 21 kg N ha<sup>-1</sup> und am Standort Geltendorf bei 25 kg N ha<sup>-1</sup>. Im zweiten Versuchsjahr lagen die  $N_{\min}$  Werte im Frühjahr 2014 zu Vegetationsbeginn bei 57 kg N ha<sup>-1</sup> am Standort Mintraching und bei 33 kg N ha<sup>-1</sup> am Standort Petzenhofen. Mit Ausnahme von Geltendorf stiegen die  $N_{\min}$  Gehalte bis zur zweiten Probenahme an allen Versuchsstandorten deutlich an auf 79 kg N ha<sup>-1</sup> in Olching, 28 kg N ha<sup>-1</sup> in Geltendorf, 117 kg N ha<sup>-1</sup> in Mintraching und 125 kg N ha<sup>-1</sup> in Petzenhofen.

Der Einfluss der verschiedenen Zwischenfruchtarten auf die gemessenen  $N_{\min}$  Werte an den einzelnen Versuchsstandorten war dagegen vergleichbar gering wie bei der gemeinsamen Betrachtung der vier Standorte.



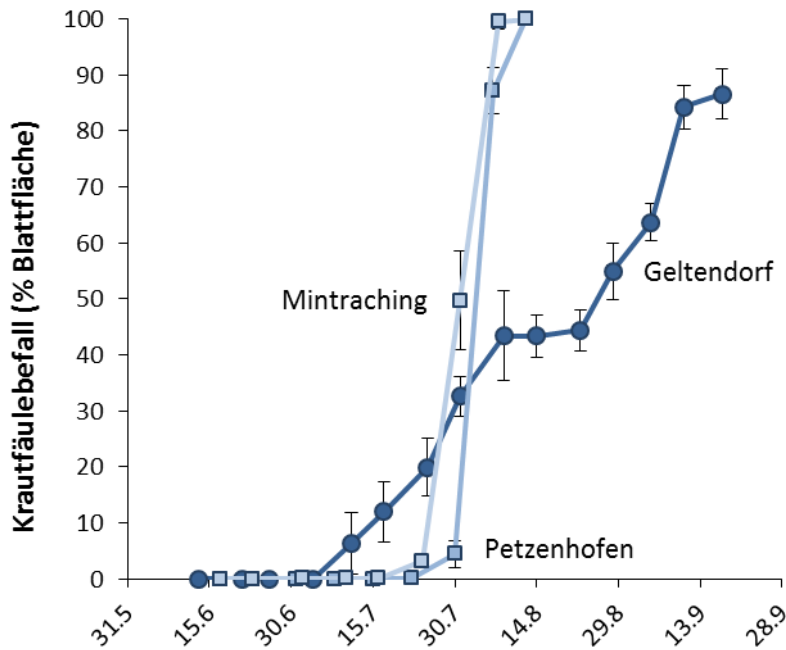
**Abbildung 5:  $N_{\min}$  Gehalt im Boden rund 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln**

Mittelwerte und Standardfehler der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

#### 4.1.4 *P. infestans* Blattbefall

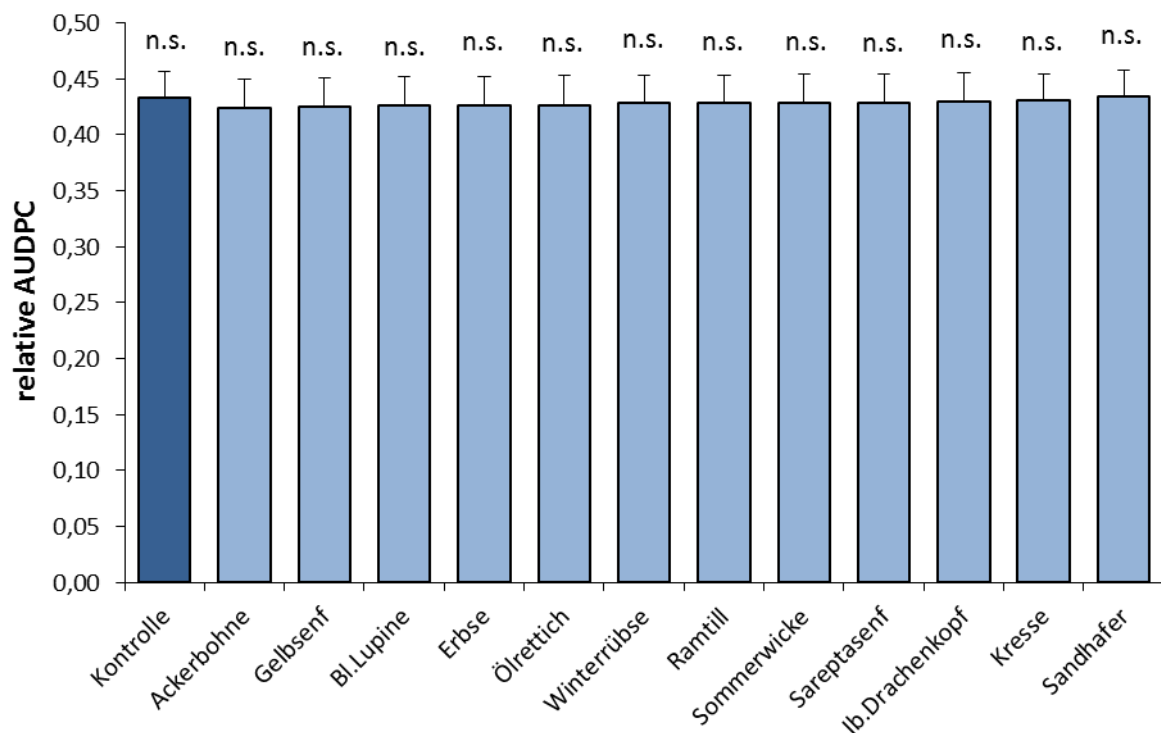
Die unterschiedlichen Versuchs- und Wachstumsbedingungen (vgl. Kapitel 4.1.1) resultierten in deutlich unterschiedlichen Befallsentwicklungen von *P. infestans* an den einzelnen Versuchsstandorten (Abbildung 6). In Folge des durch Hitze und Trockenheit bedingten Ausbleibens von Krautfäule am Standort Olching konnten an diesem Standort keine Daten generiert werden.

Der zweite Versuchsstandort im ersten Versuchsjahr Geltendorf zeigt eine langsame aber stetige Zunahme des *P. infestans* Blattbefalls bis Ende September bedingt durch die infektionshemmende Witterung. Im zweiten Versuchsjahr setzte an den beiden Standorten Petzenhofen und Mintraching die Infektion zwar erkennbar später ein, zerstört allerdings das Blattwerk anschließend innerhalb weniger Tage. Der unterschiedliche Blattbefall wird auch durch die Unterschiede der relativen AUDPC erfasst (Tabelle 7). Bezogen auf das Mittel der Varianten, die an allen Standorten vorhanden sind, unterscheiden sich die drei Standorte signifikant voneinander mit 0,314 (Geltendorf), 0,469 (Petzenhofen) und 0,502 (Mitraching).



**Abbildung 6: Befallsverlauf *P. infestans* an den Versuchsstandorten**

Mittelwerte und Standardabweichung. Blattbefall Krautfäule.



**Abbildung 7: Relative AUDPC (*P. infestans*) nach verschiedenen Zwischenfrüchten**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ). n.s.: nicht signifikant.

Ein Effekt auf den Krautfäulebefall der Kartoffeln konnte jedoch für die vorangestellte Zwischenfrucht nicht nachgewiesen werden. Sowohl im Mittel der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching (Abbildung 7), als auch für die Versuchsstandorte einzeln (Tabelle 7) konnten keine signifikante Unterschiede zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten identifiziert werden.

**Tabelle 7: *P. infestans* Blattbefall an den Versuchsstandorten**

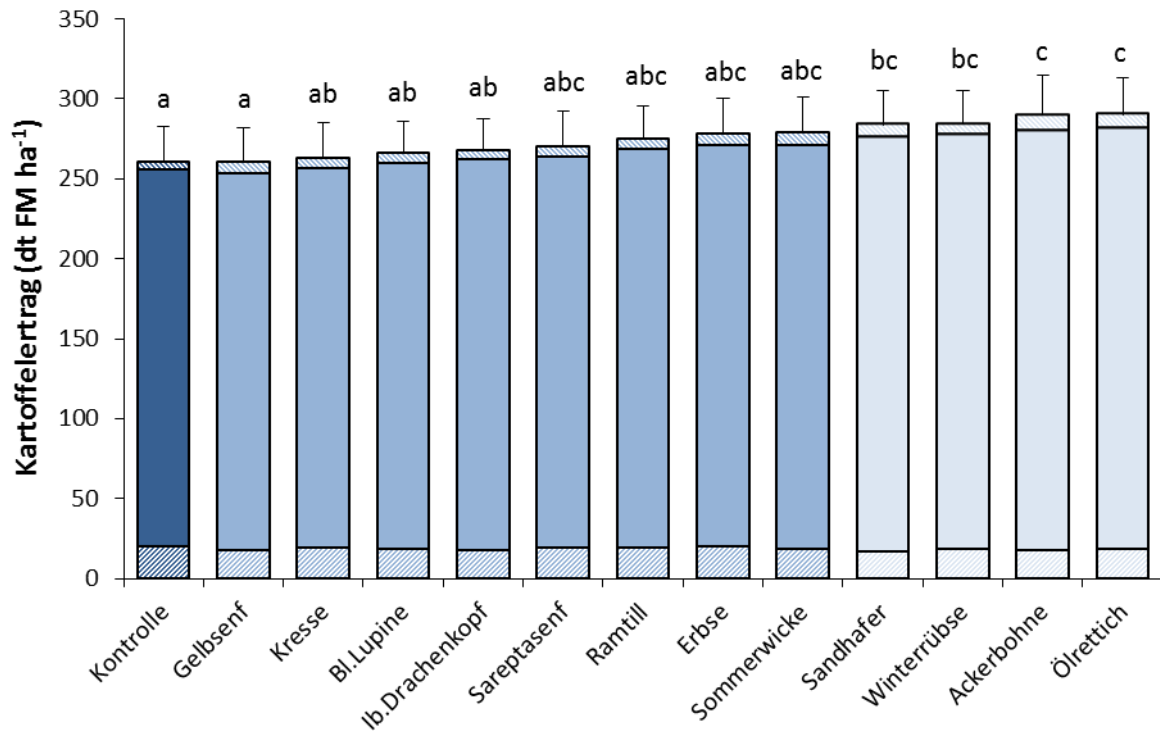
Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten. Tukey's HSD spaltenweise für jeden Standort einzeln [abc] und zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,05$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Zwischenfrucht	relative AUDPC (Mittelwert $\pm$ Standardfehler)		
	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching
Kontrolle	0,326 $\pm$ 0,016 n.s.	0,471 $\pm$ 0,002 n.s.	0,502 $\pm$ 0,003 n.s.
Sandhafer	0,325 $\pm$ 0,012 n.s.	0,470 $\pm$ 0,002 n.s.	0,506 $\pm$ 0,004 n.s.
Sareptasenf	0,315 $\pm$ 0,012 n.s.	0,473 $\pm$ 0,004 n.s.	0,499 $\pm$ 0,002 n.s.
Winterrübe	0,318 $\pm$ 0,018 n.s.	0,468 $\pm$ 0,002 n.s.	0,499 $\pm$ 0,005 n.s.
Koriander	--- ---	--- ---	0,503 $\pm$ 0,004 n.s.
Ramtill	0,317 $\pm$ 0,017 n.s.	0,468 $\pm$ 0,001 n.s.	0,502 $\pm$ 0,004 n.s.
Ib.Drachenkopf	0,310 $\pm$ 0,013 n.s.	0,469 $\pm$ 0,002 n.s.	0,508 $\pm$ 0,004 n.s.
Kresse	0,321 $\pm$ 0,003 n.s.	0,468 $\pm$ 0,002 n.s.	0,503 $\pm$ 0,003 n.s.
Bl.Lupine	0,309 $\pm$ 0,014 n.s.	0,470 $\pm$ 0,001 n.s.	0,500 $\pm$ 0,006 n.s.
Erbse	0,309 $\pm$ 0,013 n.s.	0,470 $\pm$ 0,001 n.s.	0,501 $\pm$ 0,004 n.s.
Ölrettich	0,309 $\pm$ 0,018 n.s.	0,468 $\pm$ 0,002 n.s.	0,504 $\pm$ 0,003 n.s.
Gelbsenf	0,308 $\pm$ 0,011 n.s.	0,467 $\pm$ 0,001 n.s.	0,502 $\pm$ 0,001 n.s.
Perserklee	--- ---	0,470 $\pm$ 0,001 n.s.	0,499 $\pm$ 0,003 n.s.
Ackerbohne	0,306 $\pm$ 0,012 n.s.	0,465 $\pm$ 0,001 n.s.	0,502 $\pm$ 0,002 n.s.
Sommerwicke	0,312 $\pm$ 0,012 n.s.	0,471 $\pm$ 0,004 n.s.	0,504 $\pm$ 0,005 n.s.
Mittelwerte <sup>a</sup>	0,314 $\pm$ 0,003 A	0,469 $\pm$ 0,001 B	0,502 $\pm$ 0,001 C

<sup>a</sup> Mittelwerte der an allen Standorten verfügbaren Varianten  
n.s.: nicht signifikant

#### 4.1.5 Knollenerträge der Kartoffeln

Die Brutto Knollenerträge ohne Berücksichtigung von Knollenqualität im Mittel der vier Versuchsstandorte zeigt Abbildung 8, aufgeteilt nach den drei Größenfraktionen kleiner 35 mm, 35 bis 65 mm und größer 65 mm Quadratmaß. Der Anteil der Größenfraktionen kleiner 35 mm mit rund 7 % und größer 65 mm mit rund 3 % war bei allen Zwischenfruchtvarianten vergleichbar, die Ertragsunterschiede sind vor Allem auf die Normalsortierung zwischen 35 und 65 mm zurückzuführen, die stets 90 bis 91 % des Gesamtertrages umfasste.

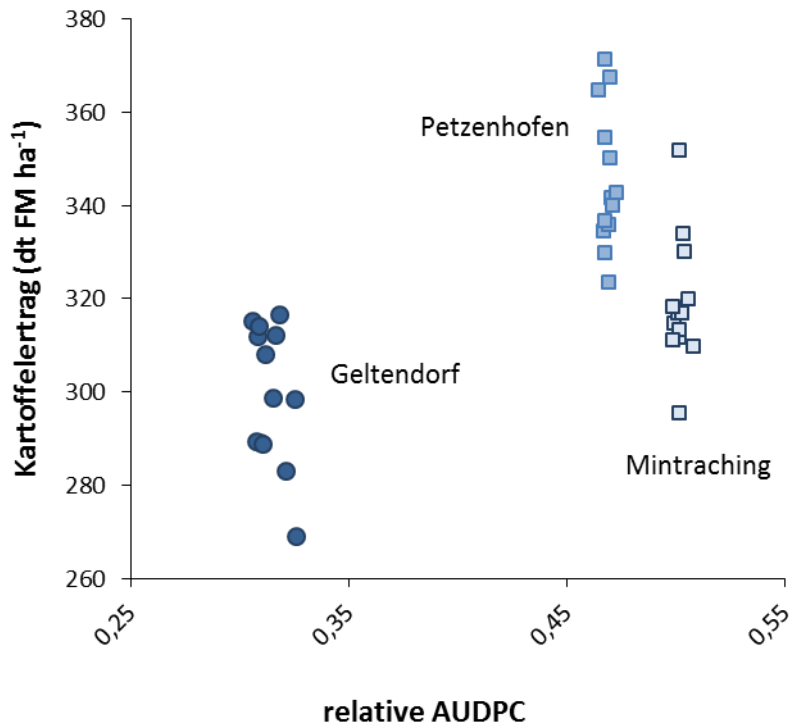


**Abbildung 8: Brutto Knollenerträge nach verschiedenen Zwischenfrüchten**

Mittelwerte der drei Größenfraktionen (von unten nach oben: < 35 mm, 35 – 65 mm, > 65mm) und Standardfehler des Gesamtmittelwertes der vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

Auf den Kontrollparzellen zusammen mit den Gelbsenfvarianten war der FM Knollenertrag am geringsten mit  $260,7 \text{ dt FM ha}^{-1}$  bzw.  $260,5 \text{ dt FM ha}^{-1}$ . Im Vergleich zur Kontrolle ohne Aussaat von Zwischenfrüchten konnten nur nach Sandhafer, Winterrübse, Ackerbohne und Ölrettich signifikant höhere Kartoffelerträge nachgewiesen werden im Mittel der vier Versuchsstandorte.

Der Versuchsstandort beeinflusste die Knollenerträge signifikant. Insbesondere in Olching waren die Brutto Knollenerträge mit  $134,3 \text{ dt FM ha}^{-1}$  nur knapp halb so hoch wie an den drei anderen Standorten (Tabelle 8). Aber auch die drei anderen Standorte unterschieden sich signifikant mit  $299,5 \text{ dt FM ha}^{-1}$  in Geltendorf,  $318,6 \text{ dt FM ha}^{-1}$  in Mintraching und  $345,5 \text{ dt FM ha}^{-1}$  in Petzenhofen.



**Abbildung 9: Kartoffelerträge und relative AUDPC (*P. infestans*)**

Mittelwerte der Varianten für die drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching.

Im Gegensatz zum Mittel der vier Versuchsstandorte, konnten nicht für alle Standorte einzeln signifikante Unterschiede bei den Kartoffelerträgen nach den verschiedenen Zwischenfruchtarten nachgewiesen werden. So gab es bei den Standorten Olching und Mintraching keine signifikanten Effekte. Die Ertragsunterschiede an den verbleibenden Standorten Geltendorf und Petzenhofen waren nur für wenige Zwischenfrüchte signifikant. Für Geltendorf konnten signifikant höhere Erträge nach Winterrübse, Ölrettich und Ackerbohne im Vergleich zur Kontrolle nachgewiesen werden. Am Standort Petzenhofen wurden nach Sandhafer und Ölrettich signifikant höhere Erträge als nach Blauer Lupine festgestellt.

Für keinen der drei Versuchsstandorte mit *P. infestans* Infektion konnte ein negativer Zusammenhang zwischen der beobachteten relativen AUDPC und dem Brutto-Knollenertrag nachgewiesen werden (Abbildung 9). Die Knollenerträge schwankten deutlich trotz nahezu identischem Krautfäulebefall.

**Tabelle 8: Knollenerträge an den Versuchsstandorten**

Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten. Tukey's HSD spaltenweise für jeden Standort einzeln [abc] und zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,10$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Zwischenfrucht	Brutto Knollenerträge (dt FM ha <sup>-1</sup> ) (Mittelwert ± Standardfehler)			
	Geltendorf	Olching	Petzenhofen	Mintraching
Kontrolle	269,0 ± 15,0 a	120,8 ± 7,3 n.s.	341,6 ± 10,6 ab	311,6 ± 02,4 n.s.
Sandhafer	298,4 ± 17,8 ab	150,1 ± 7,7 n.s.	367,4 ± 04,9 b	319,8 ± 09,7 n.s.
Sareptasenf	298,8 ± 14,6 ab	129,2 ± 1,6 n.s.	342,7 ± 07,8 ab	310,9 ± 19,8 n.s.
Winterrübse	316,4 ± 11,4 b	148,0 ± 2,0 n.s.	354,5 ± 08,4 ab	318,1 ± 09,6 n.s.
Koriander	--- ---	--- ---	--- ---	310,9 ± 13,3 n.s.
Ramtil	312,0 ± 10,2 ab	136,3 ± 8,6 n.s.	336,7 ± 06,4 ab	313,3 ± 13,4 n.s.
Ib.Drachenkopf	288,8 ± 11,1 ab	135,6 ± 1,6 n.s.	335,7 ± 08,7 ab	309,5 ± 09,2 n.s.
Kresse	282,9 ± 12,8 ab	123,0 ± 11,0 n.s.	329,6 ± 06,2 ab	316,7 ± 12,6 n.s.
Bl.Lupine	289,0 ± 19,5 ab	138,4 ± 4,0 n.s.	323,4 ± 07,7 a	314,5 ± 08,6 n.s.
Erbse	311,9 ± 09,9 ab	134,6 ± 7,6 n.s.	350,1 ± 07,5 ab	316,9 ± 15,0 n.s.
Spitzwegerich	--- ---	142,2 ± 9,5 n.s.	--- ---	--- ---
Ölrettich	314,1 ± 07,5 b	142,3 ± 6,7 n.s.	371,1 ± 05,7 b	333,8 ± 14,4 n.s.
Gelbsenf	289,4 ± 12,0 ab	122,6 ± 3,1 n.s.	334,3 ± 05,1 ab	295,4 ± 14,8 n.s.
Tagetes	--- ---	131,0 ± 16,8 n.s.	--- ---	--- ---
Perserklee	--- ---	129,6 ± 2,1 n.s.	342,6 ± 10,9 ab	333,2 ± 04,4 n.s.
Ackerbohne	315,2 ± 10,4 b	128,3 ± 9,2 n.s.	364,7 ± 12,4 ab	351,7 ± 05,2 n.s.
Sommerwicke	308,1 ± 14,5 ab	136,9 ± 4,8 n.s.	340,0 ± 22,9 ab	330,0 ± 12,5 n.s.
Mittelwerte <sup>a</sup>	299,5 ± 03,8 B	134,3 ± 02,0 A	345,5 ± 03,1 D	318,6 ± 03,5 C

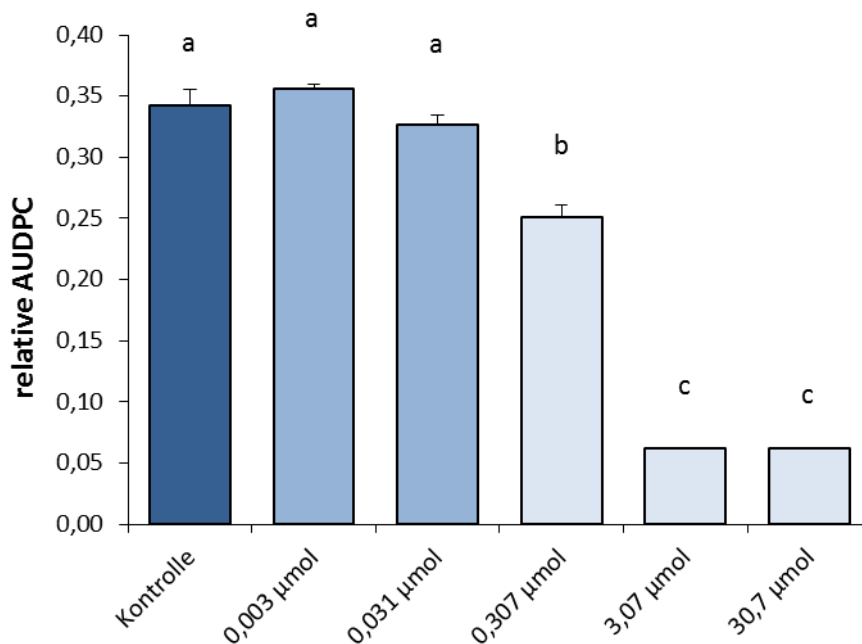
<sup>a</sup> Mittelwerte der an allen Standorten verfügbaren Varianten  
n.s.: nicht signifikant



## 4.2 Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae*

### 4.2.1 In vitro Hemmtests

Insgesamt drei verschiedene reine ITCs wurden mit verschiedenen Stoffmengen in Petrischalen eingebracht zur Überprüfung der Sensitivität des Mycelwachstums von *P. infestans*. Die hemmenden Wirkungen sind dargestellt für Allylisothiocyanat (Abbildung 10), für 2-Phenylethylisothiocyanat (Abbildung 11) und für Benzylisothiocyanat (Abbildung 12).

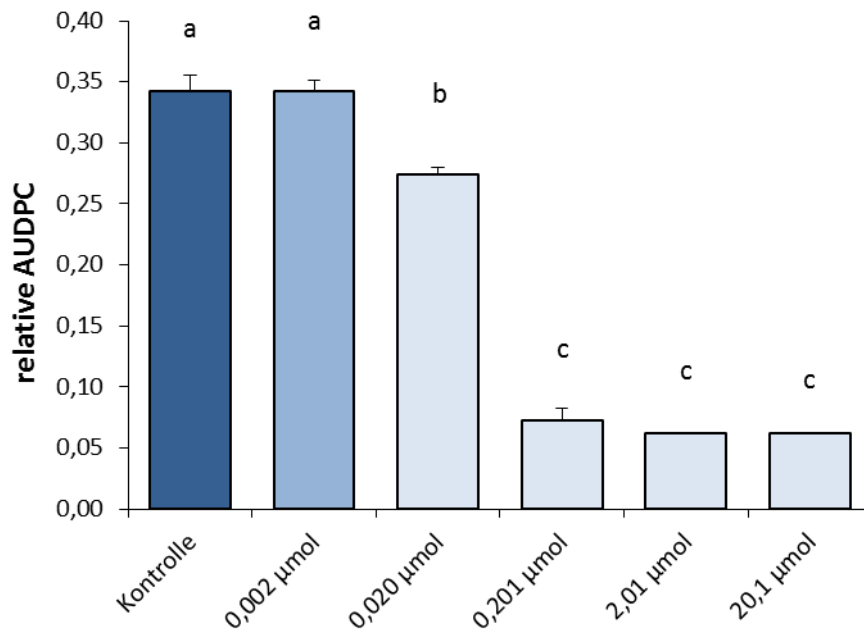


#### Abbildung 10: Hemmende Wirkung von Allylisothiocyanat auf *P. infestans*

Die angegebenen Stoffmengen wurden in Methanol gelöst in versiegelte Petrischalen eingebracht und das Mycelwachstum gemessen. Ein Versuch mit 3 Wiederholungen. Mittelwerte und Standardfehler. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

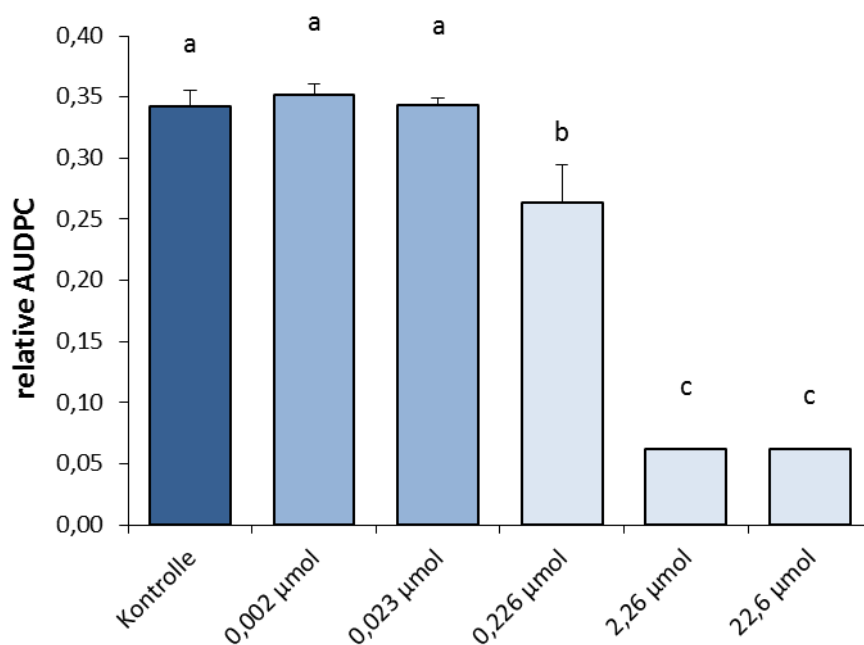
Sowohl bei Allylisothiocyanat als auch bei Benzylisothiocyanat setzte eine signifikante Hemmung des Mycelwachstums über die Gasphase bei einer eingebrachten Stoffmenge von 0,307 µmol bzw. 0,226 µmol ein. Bei 2-Phenylethylisothiocyanat war bereits bei einer Stoffmenge von 0,020 µmol eine signifikante Hemmung zu beobachten. Bei größeren Stoffmengen war eine nahezu vollständige Hemmung des Mycelwachstums bei allen getesteten ITCs zu beobachten.

Bei den vergleichbaren Hemmtest mit frischem Pflanzenmaterial der verschiedenen Zwischenfrüchte konnte bei den vier getesteten *Brassicaceae* Ölrettich, Winterrübe, Sareptasenf und Gelbsenf eine signifikante Hemmung des Mycelwachstums beobachtet werden, nicht jedoch bei der *Fabaceae* Sommerwicke (Abbildung 13).



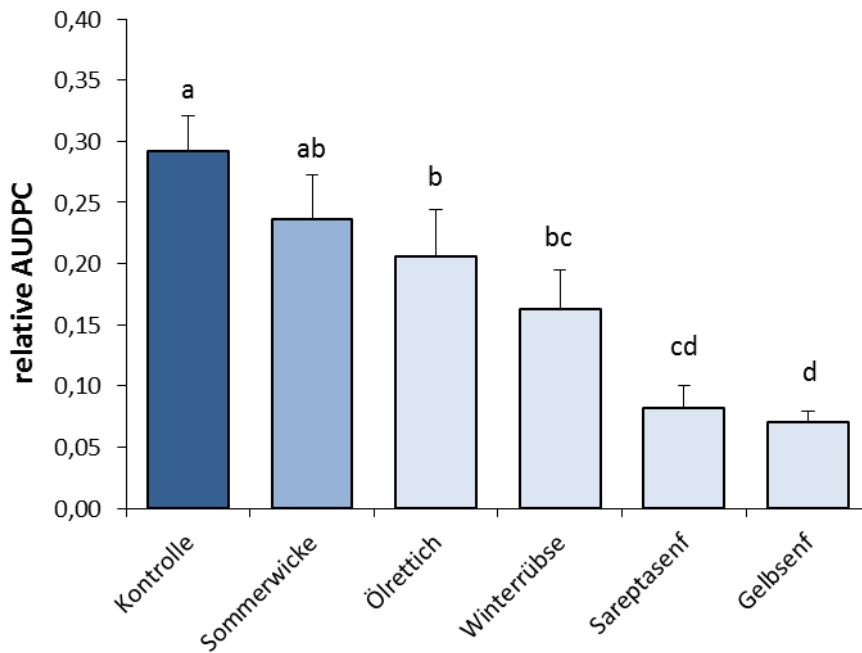
**Abbildung 11: Hemmende Wirkung von 2-Phenylethylisothiocyanat auf *P. infestans***

Die angegebenen Stoffmengen wurden in Methanol gelöst in versiegelte Petrischalen eingebracht und das Mycelwachstum gemessen. Ein Versuch mit 3 Wiederholungen. Mittelwerte und Standardfehler. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).



**Abbildung 12: Hemmende Wirkung von Benzylisothiocyanat auf *P. infestans***

Die angegebenen Stoffmengen wurden in Methanol gelöst in versiegelte Petrischalen eingebracht und das Mycelwachstum gemessen. Ein Versuch mit 3 Wiederholungen. Mittelwerte und Standardfehler. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).



**Abbildung 13: Hemmende Wirkung von Zwischenfrüchten auf *P. infestans***

2,5 g zerkleinerte Frischmasse wurde in versiegelte Petrischalen eingebracht und das Mycelwachstum gemessen. 3 Versuche mit jeweils 3 Wiederholungen. Mittelwerte und Standardfehler. Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant nach Tukey's HSD ( $p < 0,05$ ).

## 4.2.2 Feldversuche

### 4.2.2.1 Versuchs- und Wachstumsbedingungen

Im ersten Feldversuchsjahr 2011/2012 der Versuchsreihe „Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae*“ entwickelten sich nach der Aussaat der Zwischenfrüchte am Standort Roggenstein gleichmäßige und gute Zwischenfruchtbestände. Das Wachstum der darauf folgenden Kartoffeln im Jahr 2012 wurde sehr früh durch eine starke *P. infestans* Epidemie beendet.

Im zweiten Versuchsjahr der Versuchsreihe 2012/2013 entwickelten sich alle Zwischenfruchtbestände durchaus positiv. Jedoch unterschieden sich die Bedingungen für das Wachstum der Kartoffeln an den beiden Standorten Olching und Geltendorf im Jahr 2013 deutlich, wie auch bei den benachbarten Feldversuchen der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ (siehe Kapitel 4.1.1). Nach einem nassen Frühjahr führte ein trockener und heißer Sommer zu deutlichen Trockenschäden an den Kartoffeln am sandigen Standort Olching ohne Möglichkeit einer Beregnung. In der Folge trat keine Krautfäule am Standort Olching auf und die Kartoffelbestände reiften verfrüht ab. Am Standort Geltendorf

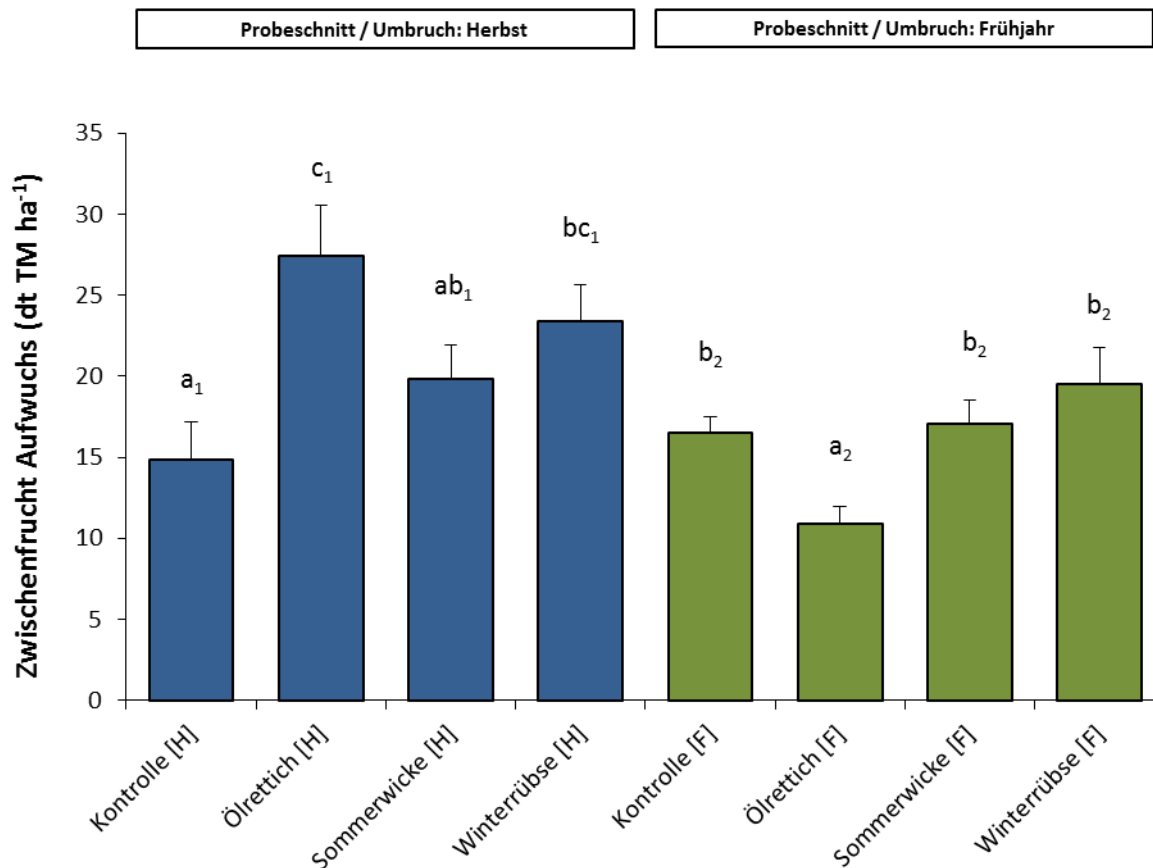
überdauerten die Kartoffeln die Trockenheit und setzten ihr Wachstum ab Anfang bis Mitte August fort zusammen mit dann einsetzendem Befall mit Krautfäule.

Die Zwischenfrüchte im dritten Versuchsjahr 2013/2014 der Versuchsreihe entwickelten sich nur am Standort Petzenhofen zufriedenstellend. Am Standort Mintraching ohne Düngung mit Biogasgärresten konnten nur relativ schlecht entwickelte Zwischenfruchtbestände im Herbst und Frühjahr eingearbeitet werden. Vergleichsweise früh konnte die Auspflanzung der Kartoffeln im Jahr 2014 nach einem warmen und kurzen Winter erfolgen. Die Entwicklung der Krautfäule wurde anfänglich durch trockenes Wetter gehemmt. Ab Mitte Juli wurde jedoch das Blattwerk der Kartoffeln innerhalb weniger Tage durch *P. infestans* vollständig zerstört.

#### 4.2.2.2 Entwicklung der Zwischenfrüchte

Der oberirdische Aufwuchs der verschiedenen Zwischenfruchtarten unterschied sich teils sehr deutlich voneinander. Für die drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching mit identischen Zwischenfruchtvarianten konnten im Mittel für Ölrettich und Winterrübsen mit 27,4 dt TM ha<sup>-1</sup> und 23,4 dt TM ha<sup>-1</sup> signifikant höhere TM Erträge im Vergleich zur Kontrolle ohne Aussaat von Zwischenfrüchten mit 14,8 dt TM ha<sup>-1</sup> festgestellt werden (Abbildung 14). Der nach dem Winter noch vorhandene Aufwuchs war im Mittel mit 16,0 dt TM ha<sup>-1</sup> im Vergleich zu 21,4 dt TM ha<sup>-1</sup> im Herbst geringer. Alle Zwischenfrüchte wiesen im Frühjahr im Vergleich zum Herbst einen geringeren oberirdischen Aufwuchs auf, mit Ausnahme der Kontrollparzellen. Ölrettich hatte im Mittel der drei Standorte im Frühjahr vor der Einarbeitung einen signifikant geringeren Aufwuchs als die anderen Versuchsvarianten.

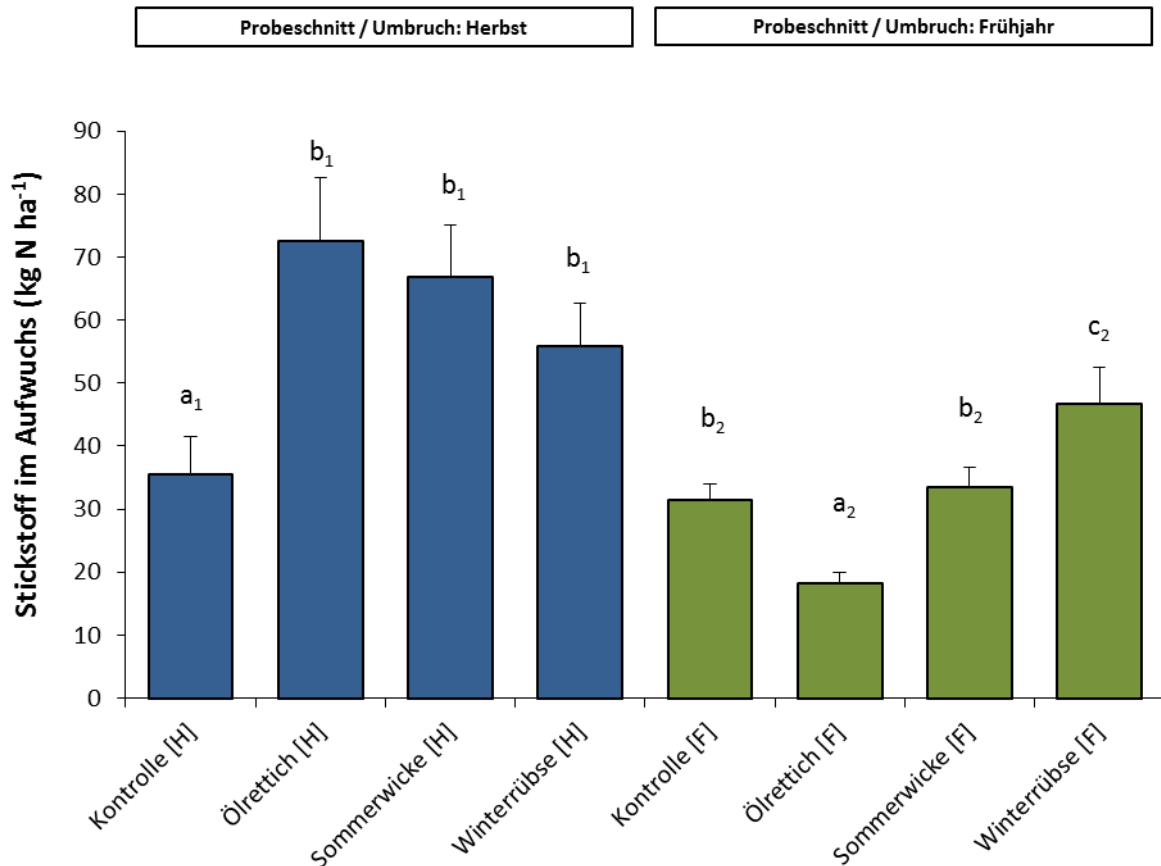
Neben der Zwischenfruchtart beeinflusste auch der Versuchsstandort den oberirdischen Aufwuchs signifikant. Bezüglich der drei Standorte mit den gleichen Zwischenfruchtarten, zeigte beispielsweise Mintraching mit 8,6 dt TM ha<sup>-1</sup> einen signifikant geringeren Aufwuchs im Vergleich zu Geltendorf mit 25,6 dt TM ha<sup>-1</sup> und Petzenhofen mit 30,0 dt TM ha<sup>-1</sup> im Herbst (Tabelle 9). Für alle Schnitttermine an den einzelnen Standorten konnten signifikante Unterschiede nachgewiesen werden, lediglich im Frühjahr am Standort Mintraching nicht. Allerdings änderte sich die Rangfolge der Aufwuchsmenge zwischen den Standorten. So erreichte beispielsweise am Standort Geltendorf die Zwischenfrucht Sommerwicke den höchsten Aufwuchs, nicht jedoch am Standort Olching. Mit Ausnahme des Standortes Geltendorf erreichten die *Brassicaceae* stets höhere Erträge als die *Fabaceae*. Die Kontrollvarianten ohne Zwischenfruchtansaat zeigten die geringsten TM Erträge an den Standorten Olching, Petzenhofen und Mintraching, nicht jedoch am Standort Geltendorf.



**Abbildung 14: Oberirdischer Trockenmasseaufwuchs der Zwischenfrüchte**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Probeschnitt im Herbst und Frühjahr. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Zwischenfrucht für jeden Umbruchstermin [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 2]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Der im oberirdischen Aufwuchs gefundene Stickstoff war ähnlich verteilt wie der beobachtete TM Ertrag der Zwischenfrüchte (Abbildung 15). Im Herbst konnten mit bis zu 72,5 kg N ha<sup>-1</sup> bei Ölrettich höhere Mengen als im Frühjahr festgestellt werden mit maximal 46,7 kg N ha<sup>-1</sup> bei Winterrübe. Ein Einfluss des Versuchsstandortes war ebenfalls nachweisbar. Für den Schnitttermin Herbst lagen die Standortmittel im Bereich von rund 50 bis 80 kg N ha<sup>-1</sup>, nur Mintraching wich dabei deutlich ab mit nur 14,2 kg N ha<sup>-1</sup>. Im Frühjahr zeigten die Standortmittel eine geringere Streuung, es konnten Werte von rund 20 bis 50 kg N ha<sup>-1</sup> gemessen werden.

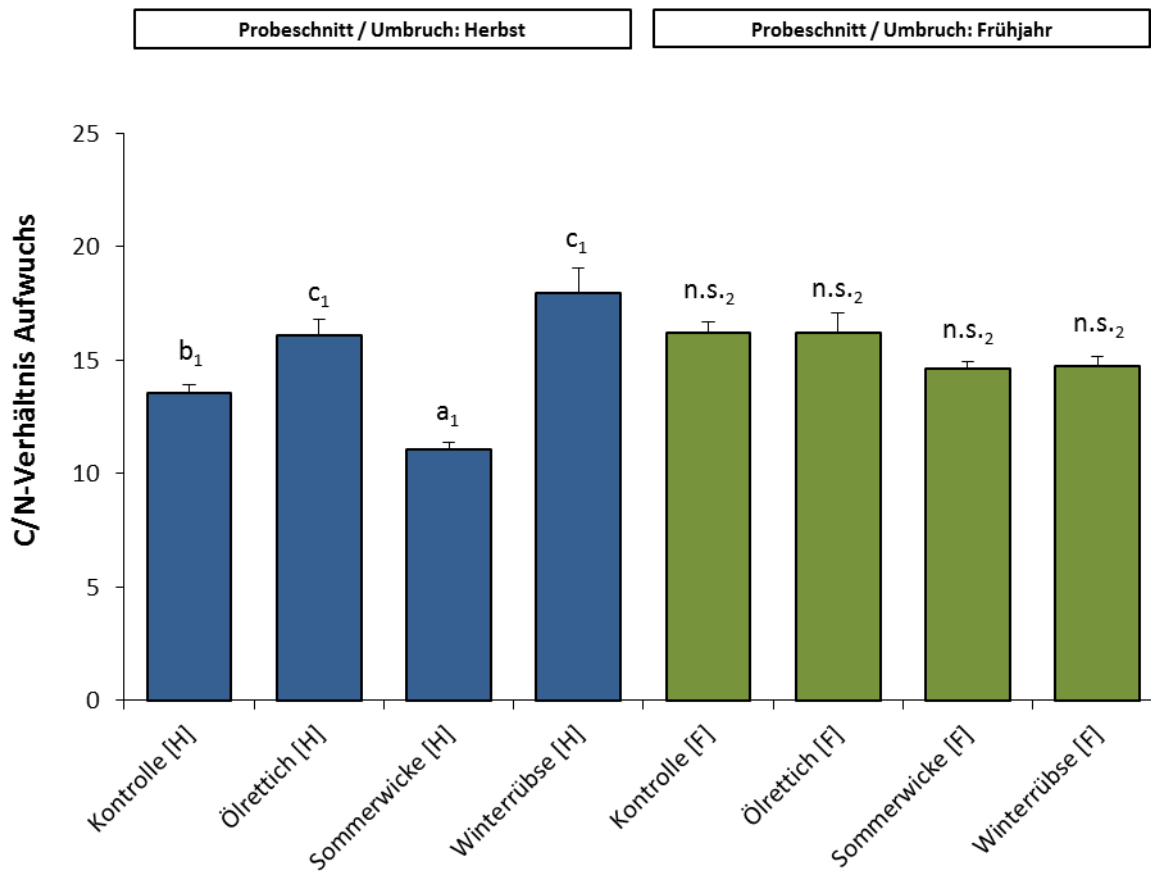


**Abbildung 15: Stickstoff im Aufwuchs der Zwischenfrüchte**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Probeschnitt im Herbst und Frühjahr. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Zwischenfrucht für jeden Umbruchstermin [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 2]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Die Qualität der oberirdischen Biomasse wurde durch das C/N-Verhältnis erfasst. Für die überwinternde Biomasse konnten hierbei im Mittel der drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching keine signifikanten Unterschiede gefunden werden mit C/N-Verhältnissen von 14,6:1 bis 16,2:1 (Abbildung 16). Dagegen zeigte für den Schnitttermin Herbst die *Fabaceae* Sommerwicke das signifikant geringste C/N-Verhältnis mit 11,0:1 im Vergleich zur Kontrolle mit 13,5:1 und den beiden *Brassicaceae* mit 16,1:1 und 18,0:1. Die Wachstumsbedingungen und Wachstumszeiten unterschieden sich zwischen den Jahren und den Standorten und resultierten in verschiedenen C/N-Verhältnissen an den einzelnen Versuchsstandorten, wobei auch die teilweise veränderten Versuchsvarianten zu berücksichtigen sind. Für den Schnitttermin Herbst zeigte Petzenhofen mit 12,9:1 das engste C/N-Verhältnis, gefolgt von Geltendorf mit 13,5:1, Olching mit 14,1:1, Roggenstein mit 15,1:1

und Mintraching mit 17,6:1. Dagegen waren die C/N-Verhältnisse im Frühjahr bei allen Standorten im Bereich von 14,8:1 bis 15,9:1 mit Ausnahme von Roggenstein mit 17,9:1.



**Abbildung 16: C/N-Verhältnis der Zwischenfrüchte**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Probeschnitt im Herbst und Frühjahr. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Zwischenfrucht für jeden Umbruchstermin [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 2]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

**Tabelle 9: Zwischenfrucht Trockenmasseerträge an den Versuchsstandorten**

Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten und Umbruchstermine. Tukey's HSD mit least-squares means spaltenweise für die verschiedenen Zwischenfruchtarten [abc] an jedem Standort einzeln, zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,05$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

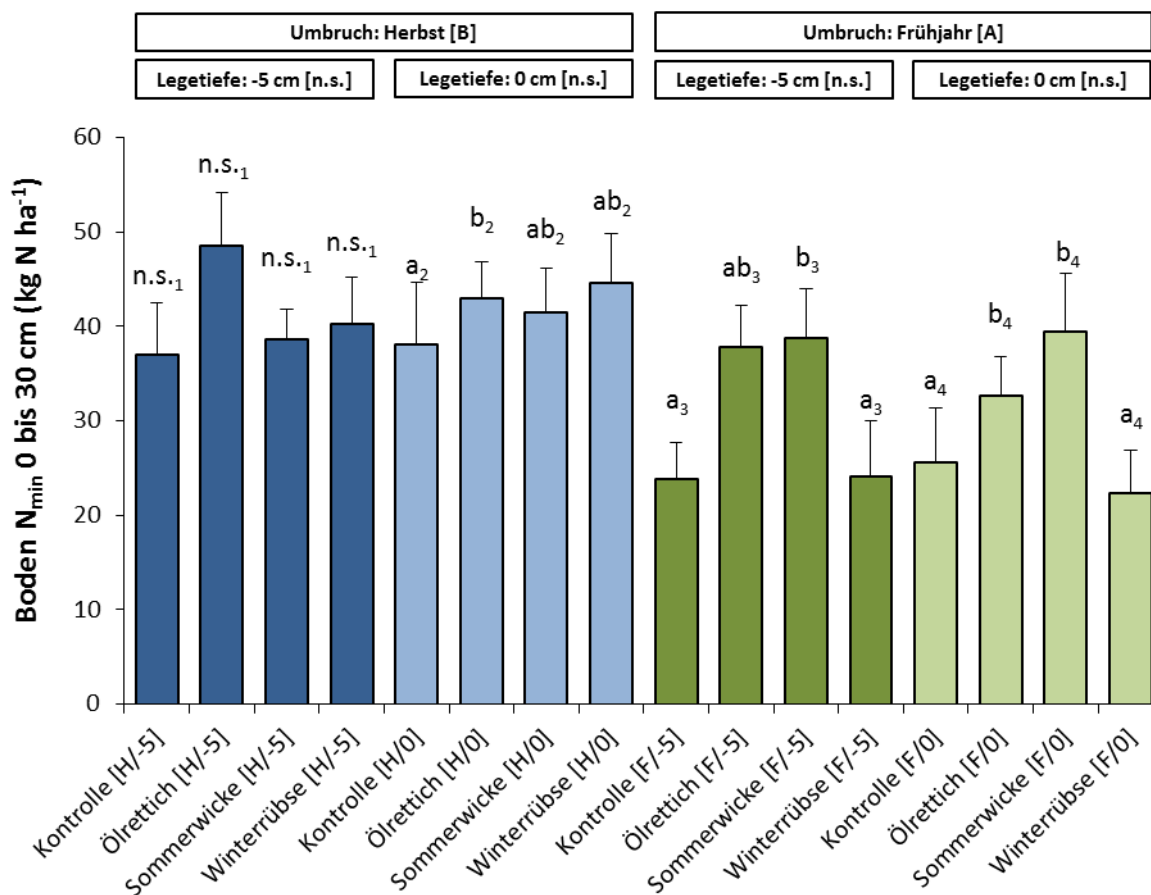
Zwischenfrucht Aufwuchs (dt TM ha <sup>-1</sup> ) (Mittelwert ± Standardfehler)					
Zwischenfrucht	Roggenstein	Geltendorf	Olching	Petzenhofen	Mintraching
Umbruch: Herbst	19,9 ± 2,7 ---	25,6 ± 1,1 B	17,2 ± 1,6 ---	30,0 ± 2,4 B	8,6 ± 0,8 A
Kontrolle	---	26,6 ± 2,1 ab	6,5 ± 0,6 a	14,4 ± 3,4 a	3,4 ± 0,6 a
Ölrettich	23,9 ± 0,9 bc	26,0 ± 2,6 ab	24,2 ± 0,7 c	45,1 ± 2,2 b	11,2 ± 1,2 c
Sommerwicke	---	29,4 ± 1,7 b	21,0 ± 0,5 b	23,0 ± 1,4 a	7,2 ± 1,0 b
Winterrübse	22,2 ± 1,2 b	20,3 ± 0,9 a	---	37,3 ± 2,1 b	12,6 ± 1,1 c
Winterwicke	3,5 ± 1,7 a	---	---	---	---
Sareptasenf	30,2 ± 1,8 c	---	---	---	---
Umbruch: Frühjahr	19,4 ± 1,7 ---	15,0 ± 0,9 A	10,5 ± 1,2 ---	21,3 ± 1,8 B	11,8 ± 0,8 A
Kontrolle	---	17,0 ± 1,4 b	8,4 ± 1,1 a	18,4 ± 2,0 a	14,2 ± 1,4 n.s.
Ölrettich	16,3 ± 2,3 a	11,8 ± 1,3 a	5,9 ± 1,2 a	11,6 ± 2,3 a	9,2 ± 2,0 n.s.
Sommerwicke	---	14,6 ± 1,6 ab	17,4 ± 0,8 b	22,9 ± 2,7 a	13,8 ± 1,5 n.s.
Winterrübse	12,1 ± 1,7 a	16,4 ± 2,5 ab	---	32,1 ± 3,0 b	9,9 ± 1,0 n.s.
Winterwicke	17,1 ± 2,7 a	---	---	---	---
Sareptasenf	32,0 ± 1,9 b	---	---	---	---

n.s.: nicht signifikant



#### 4.2.2.3 N<sub>min</sub> Gehalte im Boden

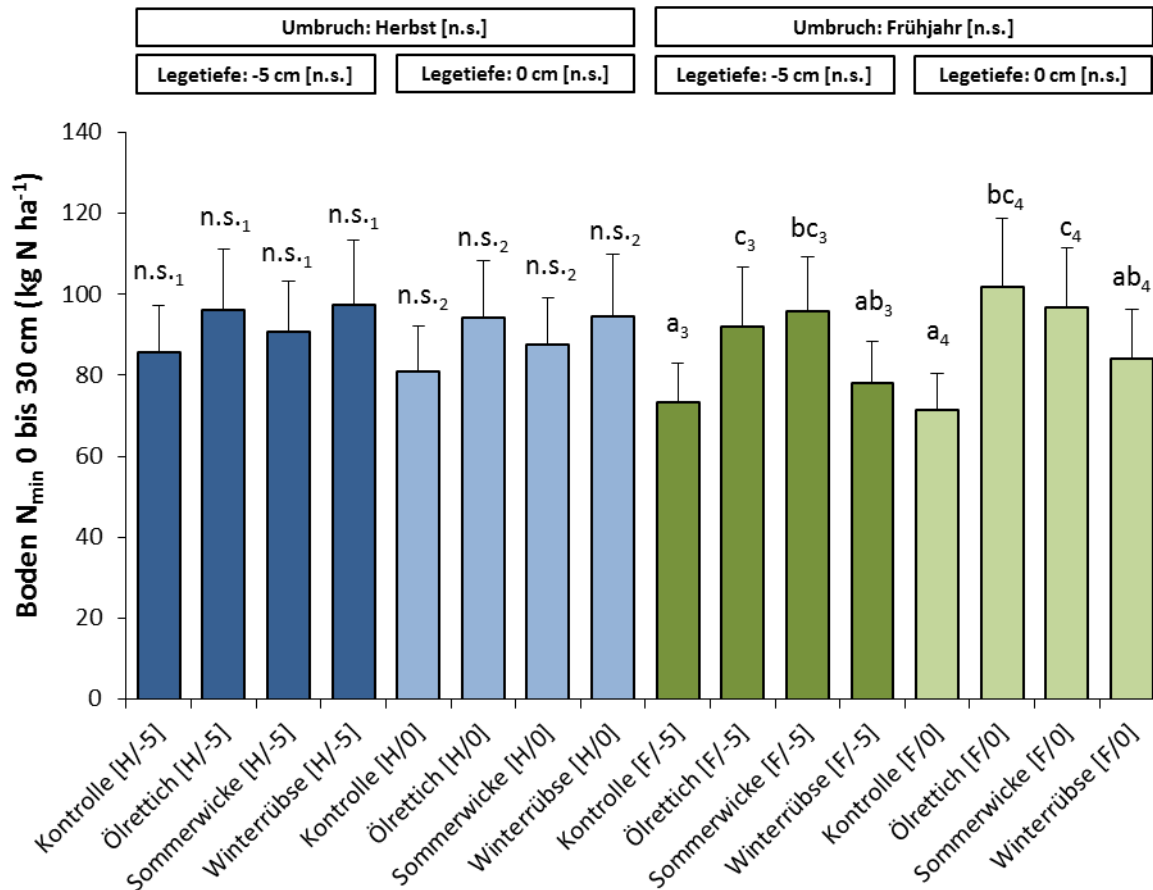
Die in einer Tiefe von 0 bis 30 cm im Boden gefundenen N<sub>min</sub> Gehalte zu Vegetationsbeginn im Jahr der Kartoffeln bei den einzelnen Feldversuchen zeigt Abbildung 17 im Mittel der Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching. Die Werte der Parzellen mit Umbruch im Herbst waren signifikant höher als die Parzellen mit Umbruch im Frühjahr (41 kg N ha<sup>-1</sup> verglichen mit 31 kg N ha<sup>-1</sup>). Der Faktor Legetiefe der Kartoffeln war zu diesem Zeitpunkt noch nicht angelegt und hatte auch keinen signifikanten Effekt. Dagegen unterschieden sich die N<sub>min</sub> Gehalte durchaus zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten, wobei die Differenz jedoch in keinem Fall größer als 15 kg N ha<sup>-1</sup> war.



**Abbildung 17: N<sub>min</sub> Gehalt im Boden zu Vegetationsbeginn**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Umbruchstermin und Legetiefe. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Umbruch und Legetiefe [ABC] und für Zwischenfrucht für jede Umbruch/Legetiefe Kombination [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Bezogen auf die verschiedenen Versuchsstandorte unterschieden sich die  $N_{\min}$  Gehalte zu Vegetationsbeginn in geringem Umfang. Olching, Petzenhofen und Geltendorf zeigten die geringsten  $N_{\min}$  Gehalte mit  $26 \text{ kg N ha}^{-1}$ ,  $27 \text{ kg N ha}^{-1}$  und  $29 \text{ kg N ha}^{-1}$ , gefolgt von Roggenstein mit  $37 \text{ kg N ha}^{-1}$ . Am Standort Mintraching konnten die höchsten  $N_{\min}$  Gehalte nachgewiesen werden mit  $52 \text{ kg N ha}^{-1}$ .



**Abbildung 18:  $N_{\min}$  Gehalt im Boden rund 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Umbruchstermin und Legetiefe. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Umbruch und Legetiefe [ABC] und für Zwischenfrucht für jede Umbruch/Lagetiefe Kombination [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

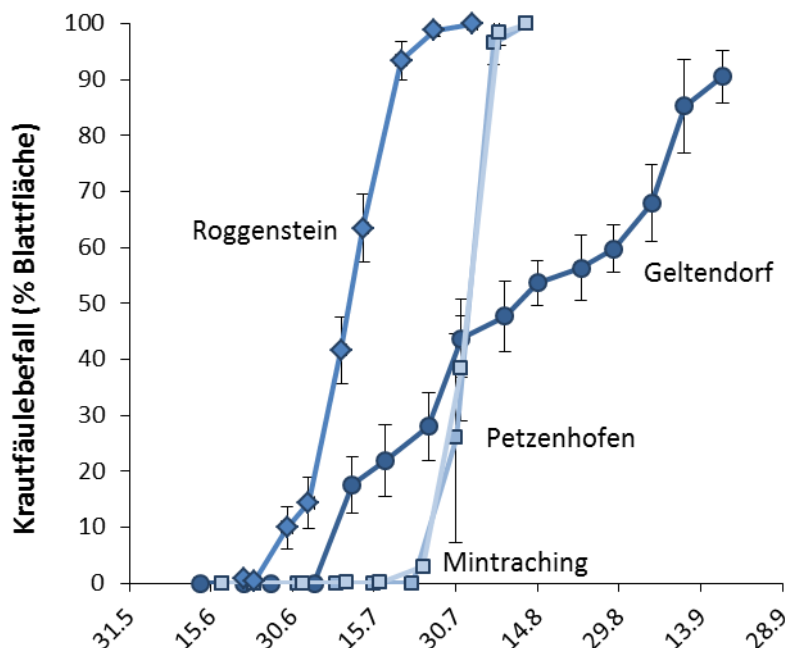
Das Niveau der  $N_{\min}$  Gehalte im Boden 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln war im Vergleich zum Vegetationsbeginn deutlich erhöht (Abbildung 18). Für die Faktoren Umbruch und Legetiefe konnte kein signifikanter Effekt nachgewiesen werden. Für den Umbruchtermin Herbst gab es auch keine signifikanten Differenzen zwischen den einzelnen Zwischenfruchtarten. Dagegen gab es signifikante Unterschiede zwischen den

Zwischenfruchtvarianten für den Umbruchstermin Frühjahr. Die Kontrollvarianten hatten signifikant geringere  $N_{\min}$  Gehalte als die anderen Zwischenfruchtvarianten.

Zwischen den einzelnen Versuchsstandorten gab es beim zweiten Probestern etwa 40 Tage nach dem Pflanzen der Kartoffeln deutlich unterschiedliche  $N_{\min}$  Gehalte. An allen Standorten mit Ausnahme Geltendorf waren die  $N_{\min}$  Gehalte stark erhöht im Vergleich zum ersten Probestern. Am Standort Geltendorf wurden  $34 \text{ kg N ha}^{-1}$  gefunden, verglichen mit  $94 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Olching,  $201 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Mintraching,  $130 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Petzenhofen und  $186 \text{ kg N ha}^{-1}$  in Roggenstein.

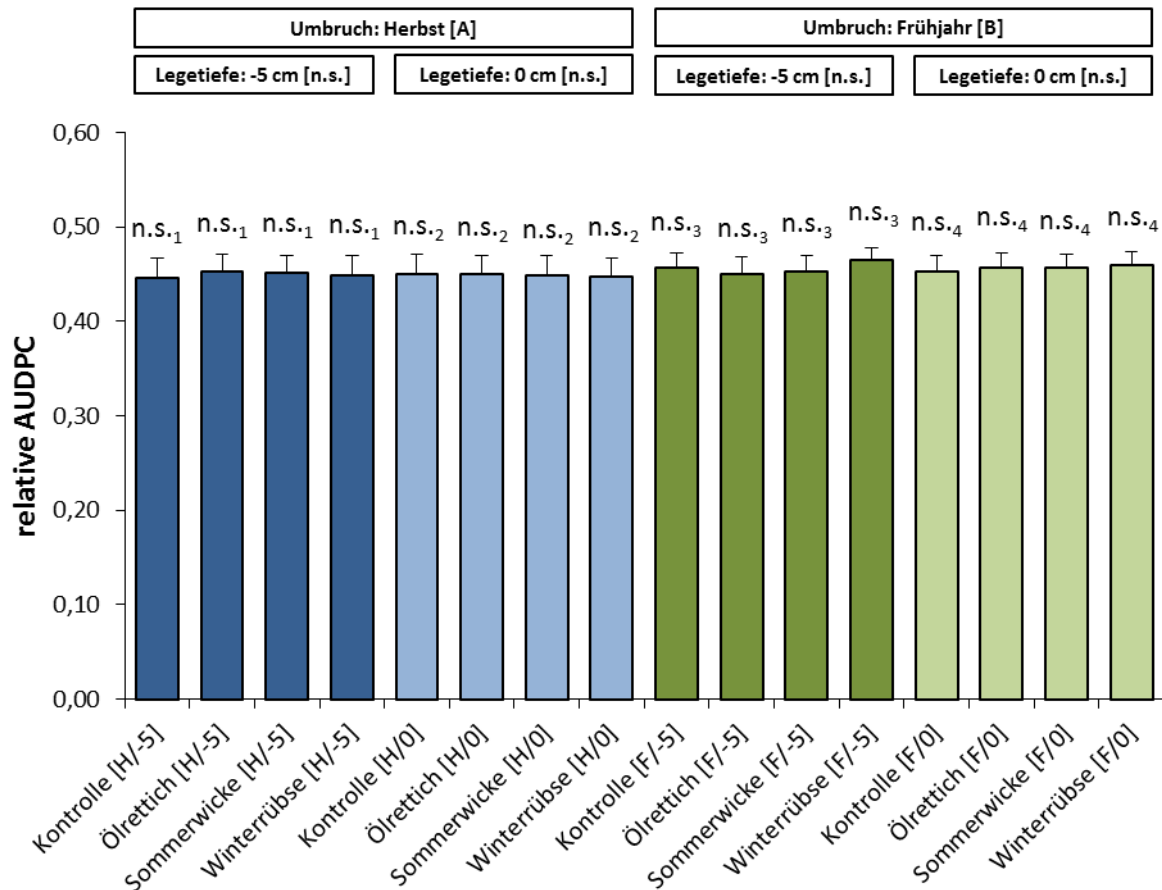
#### 4.2.2.4 P. infestans Blattbefall

Wie auch in der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ führten die unterschiedlichen Versuchs- und Wachstumsbedingungen (vgl. Kapitel 4.2.2.1) zu verschiedenen Entwicklungen von *P. infestans* in den einzelnen Feldversuchen (Abbildung 6). Auch für die Versuchsreihe „Effekte von glucosinolatreichen Brassicaceae“ konnten durch das Hitze und Trockenheit verursachte Ausbleiben von Krautfäule keine Daten am Standort Olching erhoben werden.



**Abbildung 19: Befallsverlauf *P. infestans* an den Versuchsstandorten**  
Mittelwerte und Standardabweichung. Blattbefall Krautfäule.

Einen Überblick über den Befallsverlauf von *P. infestans* an den einzelnen Versuchsstandorten bietet Abbildung 19. Die Standorte Roggenstein, Petzenhofen und Mintraching zeigten hierbei vergleichbar schnelle Zunahmen des Krautfäulebefalls, wengleich der Beginn am Standort Roggenstein circa 3 Wochen früher im Jahresverlauf einsetzte. Deutlich unterschiedlich entwickelte sich dagegen der Befall am Standort Geltendorf mit einer eher stetigen Zunahme des Blattbefalls von Ende Juni bis Ende September.



**Abbildung 20: Relative AUDPC (*P. infestans*)**

Mittelwerte und Standardfehler der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching getrennt nach Umbruchstermin und Legetiefe. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Umbruch und Legetiefe [ABC] und für Zwischenfrucht für jede Umbruch/Legetiefe Kombination [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Die Unterschiede in den Befallsverlaufskurven werden auch durch die relative AUDPC abgebildet (Tabelle 10). Geltendorf zeigte auch hier im Vergleich zu Petzenhofen und Mintraching einen signifikant geringeren Blattbefall mit *P. infestans*.

Dagegen hatten die einzelnen Versuchsfaktoren nur geringe Effekte auf den Krautfäulebefall. So konnte für das Mittel der drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und kein Einfluss der Zwischenfrucht und der Legetiefe auf den Krautfäulebefall beobachtet werden (Abbildung 20). Nur für Umbruch Herbst konnte ein geringerer Blattbefall verglichen mit Umbruch Frühjahr gezeigt werden.

Für die einzelnen Standorte getrennt betrachtet sind für die Legetiefe 0 cm sowohl für Umbruch im Herbst als auch Umbruch im Frühjahr kaum signifikante Unterschiede zwischen den einzelnen Zwischenfruchtvarianten nachweisbar, Ausnahmen stellen nur die Standorte Roggenstein und Geltendorf für den Umbruch Frühjahr dar. Der Zeitpunkt des Umbruchs hatte nur an den Standorten Geltendorf und Mintraching einen signifikanten Effekt. In Geltendorf war der Blattbefall bei Umbruch Herbst geringer, am Standort Mintraching dagegen bei Umbruch Frühjahr.

**Tabelle 10: *P. infestans* Blattbefall an den Versuchsstandorten**

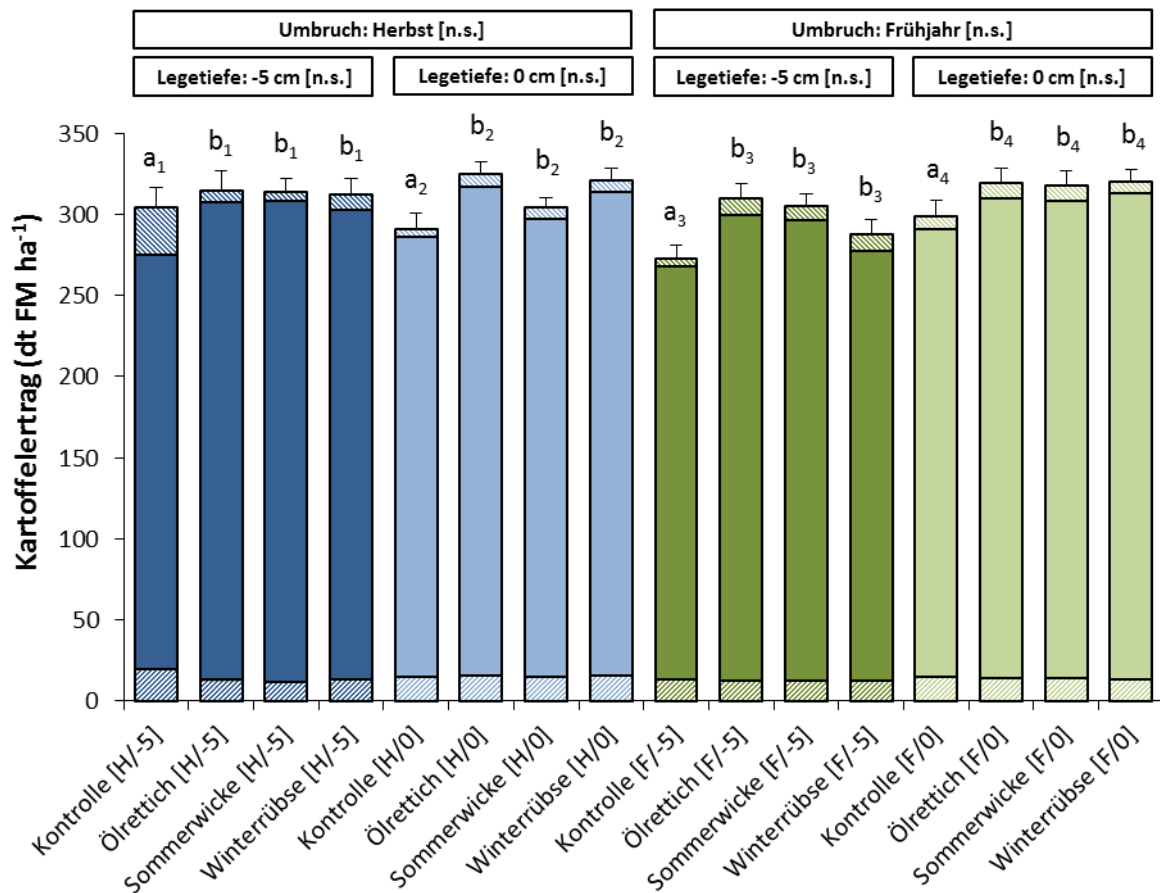
Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten und Umbruchstermine für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means spaltenweise für die verschiedenen Zwischenfruchtarten [abc] und die Umbruchstermine [ABC] an jedem Standort einzeln, zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,05$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Zwischenfrucht	relative AUDPC (Mittelwert ± Standardfehler)				
	Roggenstein	Geltendorf	Petzenhofen	Mintraching	
Umbruch: Herbst	0,720 ± 0,003 N.S.	0,356 ± 0,005 A	0,493 ± 0,005 N.S.	0,496 ± 0,002 B	
Kontrolle	--- ---	0,360 ± 0,015 n.s.	0,495 ± 0,013 n.s.	0,495 ± 0,002 n.s.	
Ölrettich	0,721 ± 0,008 n.s.	0,359 ± 0,010 n.s.	0,494 ± 0,011 n.s.	0,496 ± 0,006 n.s.	
Sommerwicke	--- ---	0,351 ± 0,006 n.s.	0,496 ± 0,016 n.s.	0,497 ± 0,005 n.s.	
Winterrübse	0,719 ± 0,008 n.s.	0,355 ± 0,009 n.s.	0,489 ± 0,006 n.s.	0,496 ± 0,004 n.s.	
Winterwicke	0,720 ± 0,002 n.s.	--- ---	--- ---	--- ---	
Sareptasenf	0,720 ± 0,007 n.s.	--- ---	--- ---	--- ---	
Umbruch: Frühjahr	0,717 ± 0,003 N.S.	0,387 ± 0,008 B	0,488 ± 0,002 N.S.	0,493 ± 0,002 A	
Kontrolle	--- ---	0,375 ± 0,013 ab	0,490 ± 0,004 n.s.	0,494 ± 0,003 n.s.	
Ölrettich	0,721 ± 0,008 b	0,385 ± 0,020 a	0,489 ± 0,004 n.s.	0,495 ± 0,004 n.s.	
Sommerwicke	--- ---	0,391 ± 0,020 ab	0,487 ± 0,005 n.s.	0,490 ± 0,005 n.s.	
Winterrübse	0,718 ± 0,003 ab	0,397 ± 0,018 b	0,486 ± 0,004 n.s.	0,495 ± 0,001 n.s.	
Winterwicke	0,712 ± 0,005 a	--- ---	--- ---	--- ---	
Sareptasenf	0,719 ± 0,002 ab	--- ---	--- ---	--- ---	
Mittelwert Standort	0,719 ± 0,002 ---	0,372 ± 0,005 <u>A</u>	0,491 ± 0,003 <u>B</u>	0,495 ± 0,001 <u>B</u>	

n.s.: nicht signifikant

#### 4.2.2.5 Knollenerträge der Kartoffeln

Die Brutto Knollenerträge nach der Abreife für das Mittel der drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching zeigt Abbildung 21, aufgeteilt nach den drei Größenfraktionen kleiner 35 mm, 35 mm bis 65 mm und größer 65 mm Quadratmaß.. Die Anteile der Unter- und Übergrößen am Gesamtertrag lagen im Mittel bei 5 % bzw. 3 % bei nur geringen Schwankungen. Lediglich für die Kontrollvariante bei der Kombination Umbruch Herbst und Legetiefe 0 cm konnten höhere Anteile beobachtet werden mit 8% Untergrößen und 11 % Übergrößen.



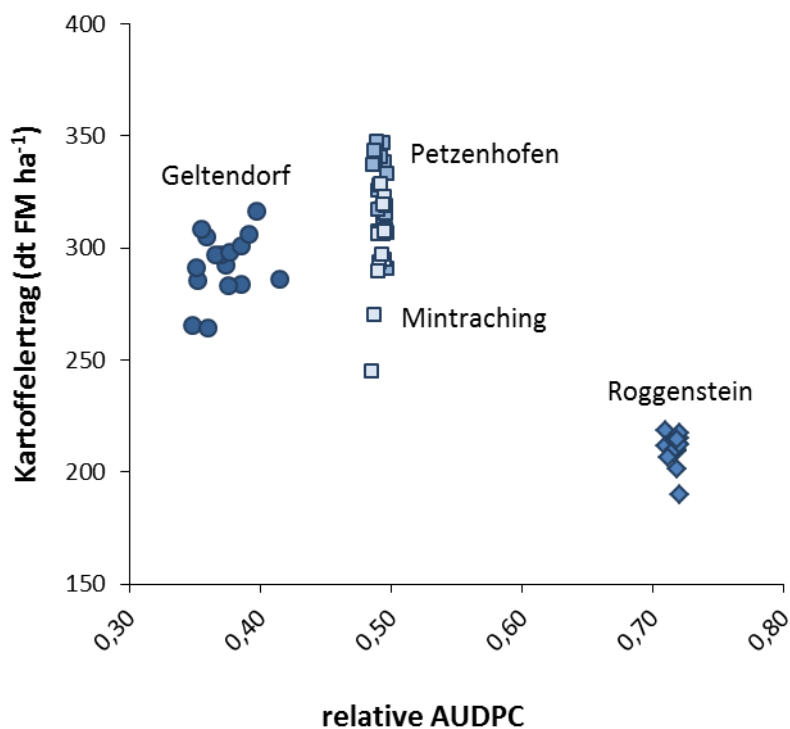
**Abbildung 21: Brutto Knollenerträge nach verschiedenen Zwischenfrüchten**

Mittelwerte der drei Größenfraktionen (von unten nach oben: < 35 mm, 35 – 65 mm, > 65mm) und Standardfehler des Gesamtmittelwertes der drei Versuchsstandorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Umbruch und Legetiefe [ABC] und für Zwischenfrucht für jede Umbruch/Legetiefe Kombination [abc] einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Die beiden Versuchsfaktoren Umbruch und Legetiefe der Kartoffeln zeigten keine signifikanten Effekte auf den Brutto FM Gesamtertrag ohne Differenzierung nach

Größenfraktion. Signifikante Unterschiede waren jedoch zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtarten nachweisbar. So hatte bei jeder Umbruch/Legetiefe-Kombination die Kontrollvariante ohne Aussaat von Zwischenfrüchten signifikant geringere Knollenerträge als alle anderen Zwischenfruchtvarianten.

Auf der Ebene der einzelnen Versuchsstandorte gab es deutliche Ertragsunterschiede (Tabelle 11). Geltendorf erreichte mit 297,0 dt FM ha<sup>-1</sup> einen signifikant geringeren Knollenertrag als die beiden Standorte Petzenhofen und Mintraching mit den gleichen Zwischenfruchtarten und 332,6 dt FM ha<sup>-1</sup> bzw. 307,7 dt FM ha<sup>-1</sup>. Der Zeitpunkt des Umbruchs hatte nur am Standort Olching einen signifikanten Effekt auf den Knollenertrag. Die Knollenerträge nach den verschiedenen Zwischenfruchtarten unterschieden sich nicht signifikant voneinander, jedoch waren die Knollenerträge nach einer Zwischenfrucht höher als ohne Zwischenfrucht, d.h. die Kontrollvariante. Am Standort Roggenstein gab es keine Kontrolle und auch keine signifikanten Unterschiede.



**Abbildung 22: Kartoffelerträge und relative AUDPC (*P. infestans*)**

Mittelwerte der Varianten für die vier Versuchsstandorte Geltendorf, Olching, Petzenhofen und Mintraching.

Wie auch bei der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ (siehe Kapitel 4.1.5), gab es an keinem Versuchsstandort zwischen dem beobachteten Krautfäulebefall und dem erreichten Kartoffelertrag einen signifikanten negativen Zusammenhang. Bei nahezu



identischem Krautfäulebefall unterschieden sich die Knollenerträge teils deutlich. Der Standort Roggenstein weicht sowohl bezüglich dem Krautfäulebefall als auch dem Knollenertrag von den anderen Standorten ab. Bei früherem bzw. stärkerer *P. infestans* Blattbefall konnte nur ein geringer Knollenertrag beobachtet werden.

**Tabelle 11: Knollenerträge an den Versuchsstandorten**

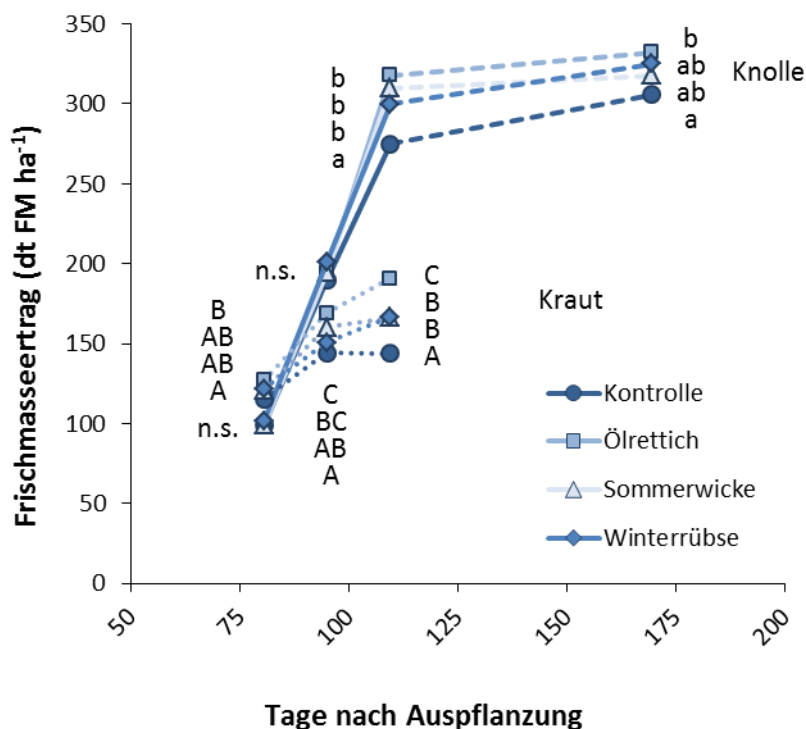
Mittelwerte und Standardfehler für die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten und Umbruchstermine für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means spaltenweise für die verschiedenen Zwischenfruchtarten [abc] und die Umbruchstermine [ABC] an jedem Standort einzeln, zeilenweise für den Vergleich der Mittelwerte der Standorte [ABC] ( $p < 0,05$ ). Varianten mit unterschiedlichen Buchstaben unterscheiden sich signifikant.

Brutto Knollenerträge (dt FM ha <sup>-1</sup> ) (Mittelwert ± Standardfehler)						
Zwischenfrucht	Roggenstein	Geltendorf	Olching	Petzenhofen	Mintraching	
Umbruch: Herbst	214,4 ± 04,8 N.S.	292,4 ± 07,0 N.S.	127,8 ± 07,1 A	331,0 ± 06,4 N.S.	308,2 ± 04,9 N.S.	
Kontrolle	---	264,6 ± 11,2 a	114,2 ± 07,0 a	314,2 ± 17,9 n.s.	294,9 ± 11,3 n.s.	
Ölrettich	215,0 ± 14,3 n.s.	305,2 ± 11,6 b	144,8 ± 07,8 b	347,0 ± 09,2 n.s.	323,0 ± 10,1 n.s.	
Sommerwicke	---	291,3 ± 13,2 b	124,3 ± 17,0 ab	315,2 ± 06,0 n.s.	306,4 ± 07,6 n.s.	
Winterrübse	212,9 ± 11,4 n.s.	308,4 ± 12,8 b	---	347,5 ± 04,1 n.s.	308,4 ± 07,3 n.s.	
Winterwicke	217,2 ± 04,5 n.s.	---	---	---	---	
Sareptasenf	212,7 ± 10,5 n.s.	---	---	---	---	
Umbruch: Frühjahr	208,8 ± 03,9 N.S.	301,7 ± 08,7 N.S.	154,6 ± 05,5 B	334,2 ± 04,9 N.S.	307,3 ± 6,1 N.S.	
Kontrolle	---	283,4 ± 22,6 a	139,3 ± 10,4 a	317,1 ± 09,3 a	296,7 ± 16,0 a	
Ölrettich	212,3 ± 11,6 n.s.	301,1 ± 14,1 b	167,3 ± 06,6 b	339,6 ± 07,4 b	319,3 ± 15,9 b	
Sommerwicke	---	306,0 ± 16,2 b	157,3 ± 06,5 ab	343,1 ± 13,1 b	306,2 ± 04,3 ab	
Winterrübse	214,7 ± 06,4 n.s.	316,2 ± 19,1 b	---	337,1 ± 04,8 ab	307,1 ± 11,1 ab	
Winterwicke	206,7 ± 08,4 n.s.	---	---	---	---	
Sareptasenf	201,5 ± 04,7 n.s.	---	---	---	---	
Mittelwert Standort	211,6 ± 03,1 ---	297,0 ± 05,6 <u>A</u>	141,2 ± 05,2 ---	332,6 ± 04,0 <u>B</u>	307,7 ± 03,8 <u>B</u>	

n.s.: nicht signifikant

#### 4.2.2.6 Kraut- und Knollenentwicklung

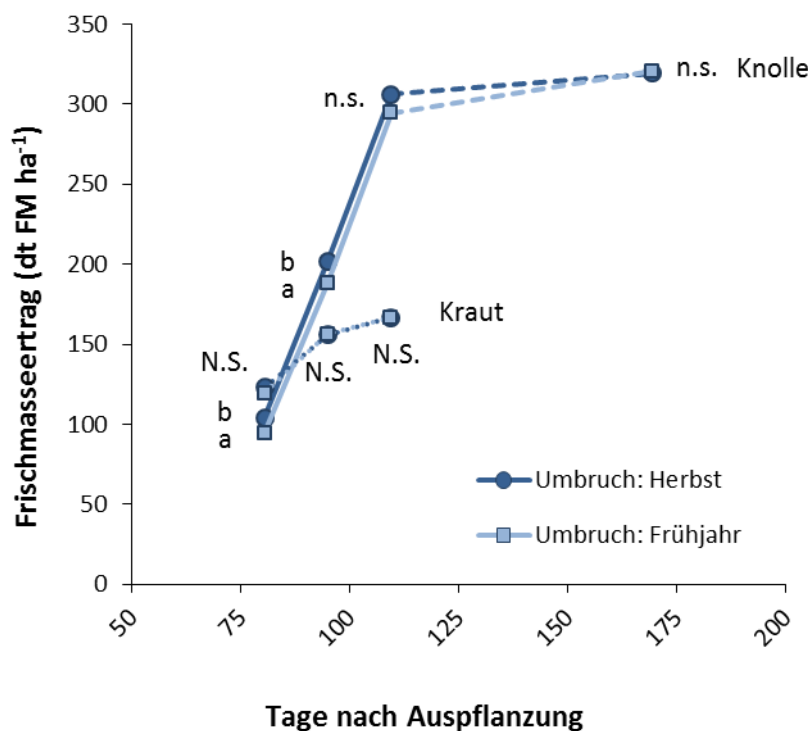
Die Entwicklung der Kartoffelpflanzen bzw. genauer die Entwicklung der Knollen und des Krautes wurden durch die Zeiternten während des Wachstums erfasst. An allen Versuchsstandorten mit Ausnahme Olching wurden drei Zeiternten durchgeführt, allerdings nicht immer zu vergleichbaren Zeitpunkten (vgl. Tabelle 12). Die Standorte Roggenstein und Olching zeigten bei der ersten Zeiternte nach 66 bzw. 78 Tagen nach dem Auspflanzen der Kartoffeln bereits Knollenerträge, die 68 % bzw. 82 % des Knollenertrags der Abschlussernte entsprachen. Ursache hierfür war die verfrühte Abreife bzw. das Absterben der Bestände verursacht durch *P. infestans* in Roggenstein und einer anhaltenden Trockenheit in Olching. Im Gegensatz dazu zeigte Geltendorf noch sehr spät relevante Ertragszuwächse, hier wurden bei der dritten Zeiternte nach 101 Tagen erst 60 % des Gesamtertrags gefunden. Die beiden Versuchsstandorte des Jahres 2014, Petzenhofen und Mintraching, zeigten dagegen vergleichbare Entwicklungen.



**Abbildung 23: Zeiternten Knollen- und Krauterträge für Zwischenfruchtvarianten**

Mittelwerte des Kartoffelkraut und Knollen FM Ertrags der drei Zeiternten und der Abschlussernte für die beiden Versuchsstandorte Petzenhofen und Mintraching für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Knollenertrag [abc] und den Kartoffelkrautertrag [ABC] für jeden Erntetermin. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Für die Standorte Petzenhofen und Mintraching nahm die Zunahme des Kartoffelkrautes über die drei Zeiternten hinweg ab. Die Kontrollvariante ohne vorherige Zwischenfrucht zeigte stets die geringste Krautentwicklung, die Kartoffeln nach Ölrettich bildeten das meiste Kartoffelkraut (Abbildung 23). Die Knollenerträge nahmen im Zeitraum zwischen der ersten und dritten Zeiternte stark zu, mit täglichen Zuwachsraten von rund  $7 \text{ dt FM ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$  im Mittel der beiden Standorte. Bei der dritten Zeiternte waren bereits zwischen 90 % bei der Kontrolle und 96 % nach Ölrettich des Ertrags der Abschlussernte gebildet. Signifikant geringere Knollenerträge bei den Kontrollvarianten ohne Zwischenfrucht konnten bei der dritten Zeiternte und auch bei der Abschlussernte nachgewiesen werden.



**Abbildung 24: Zeiternten Knollen- und Krauterträge für Umbruchstermine**

Mittelwerte des Kartoffelkraut und Knollen FM Ertrags der drei Zeiternten und der Abschlussernte für die beiden Versuchsstandorte Petzenhofen und Mintraching für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Knollenertrag [abc] und den Kartoffelkrautertrag [ABC] für jeden Erntetermin. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant.

Im Gegensatz zur Arte der vorangestellten Zwischenfrucht hatte der Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrucht nur wenig Einfluss auf die Entwicklung der Kartoffelpflanzen. Nur zu Beginn konnte für die Standorte Petzenhofen und Mintraching ein signifikanter Unterschied zwischen dem Knollenertrag nach Umbruch im Herbst im Vergleich zu Umbruch Frühjahr festgestellt werden (Abbildung 24), im weiteren Verlauf glichen sich

jedoch die beiden Varianten an. Weder die Entwicklung des Kartoffelkrautes noch der Knollen wurde durch die Legetiefe der Pflanzkartoffeln beeinflusst.

**Tabelle 12: Zeiternte Knollenerträge an den Versuchsstandorten**

*Mittelwerte der FM Knollenerträge der einzelnen Versuchsstandorte für die Legetiefe 0 cm und prozentualer Anteil des bereits gebildeten Knollenertrags an der Abschlussernte.*

	1. Zeiternte			2. Zeiternte			3. Zeiternte			Ernte		
	T <sup>a</sup>	dt ha <sup>-1</sup>	% <sup>b</sup>	T <sup>a</sup>	dt ha <sup>-1</sup>	% <sup>b</sup>	T <sup>a</sup>	dt ha <sup>-1</sup>	% <sup>b</sup>	T <sup>a</sup>	dt ha <sup>-1</sup>	% <sup>b</sup>
Roggenstein	66	143,5	68	76	187,2	88	87	197,7	93	116	211,6	---
Geltendorf	73	72,3	24	87	133,7	45	101	177,9	60	155	297,0	---
Olching	78	115,3	82	92	151,3	107	---	---	---	147	141,2	---
Petzenhofen	82	109,7	33	96	205,3	62	111	337,1	101	183	332,6	---
Mintraching	79	89,0	29	94	184,4	60	108	263,9	86	156	307,7	---

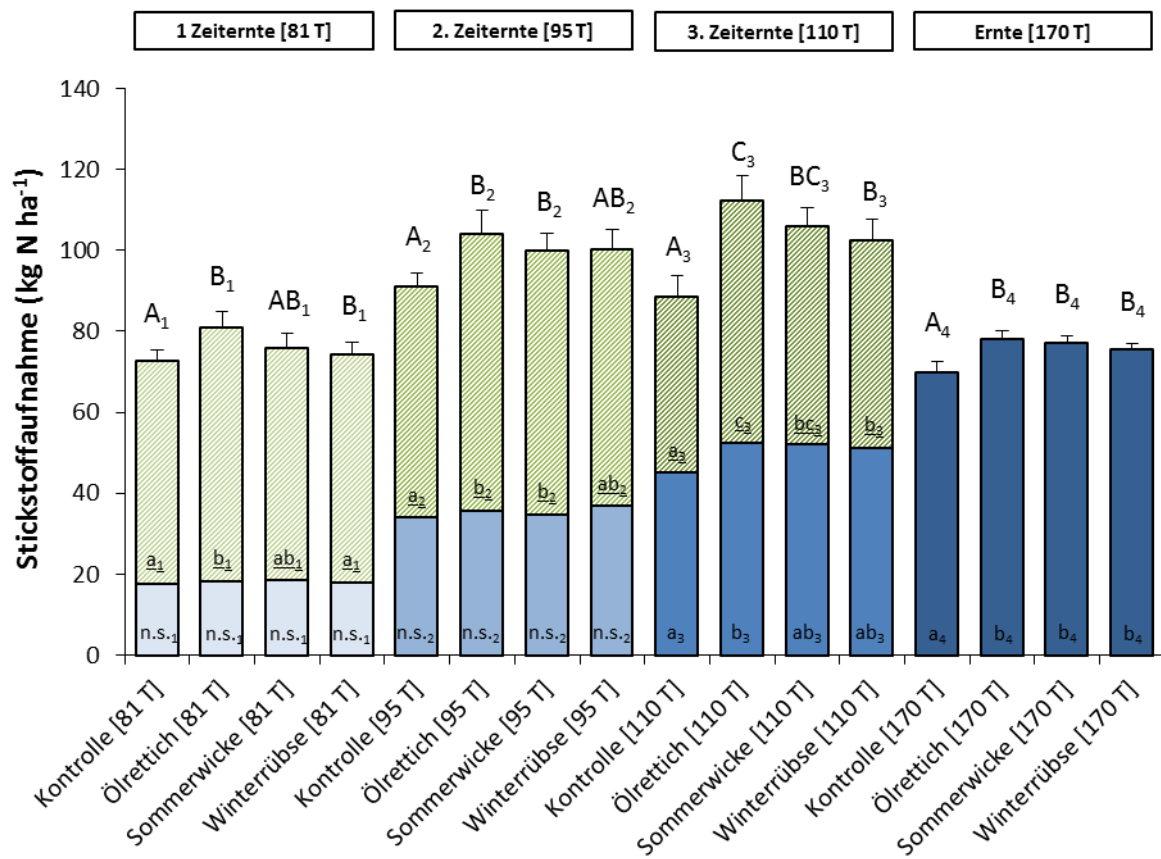
<sup>a</sup> Tage nach Aussaat der Kartoffeln

<sup>b</sup> Anteil Knollenertrag der Zeiternte an Ertrag der Abschlussernte

#### 4.2.2.7 Stickstoffaufnahme der Kartoffeln

Im Rahmen der Zeiternten und der Abschlussernten wurden auch die Stickstoffgehalte der Biomasse und somit die Stickstoffaufnahme der Kartoffeln erfasst. Die Stickstoffaufnahme in Kartoffelkraut und Knollen nach den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten zeigt Abbildung 25. Die gesamte in den Kartoffeln gefundene Menge an Stickstoff nahm während der Zeiternten zu und fiel bis zur Abschlussernte mit dem Absterben des Kartoffelkrautes wieder ab. Die maximale Menge an Stickstoff die in den Pflanzen gefunden wurde war dabei 112,1 kg N ha<sup>-1</sup>. Bei der ersten Zeiternte war mit 76 % mehr Stickstoff im Kraut als in den Knollen gebunden, bei der dritten Zeiternte war mit 51 % Stickstoff im Kraut die Verteilung nahezu ausgeglichen. Unterschiede zwischen den Zwischenfruchtvarianten waren im Kraut früher als in den Knollen nachweisbar. Allgemein wurde in den Kartoffelpflanzen der Kontrollvariante ohne vorherige Zwischenfrucht signifikant weniger Stickstoff als in den Kartoffeln nach einer Zwischenfrucht gefunden. Teilweise zeigten sich zusätzlich signifikante Unterschiede zwischen Örettich und den beiden anderen Zwischenfruchtarten. Der Stickstoffentzug von der Fläche bzw. der in den Knollen enthaltende Stickstoff bei der Abschlussernte reichte von 69,9 kg N ha<sup>-1</sup> bei der Kontrolle bis 78,0 kg N ha<sup>-1</sup> nach Örettich als Zwischenfrucht.

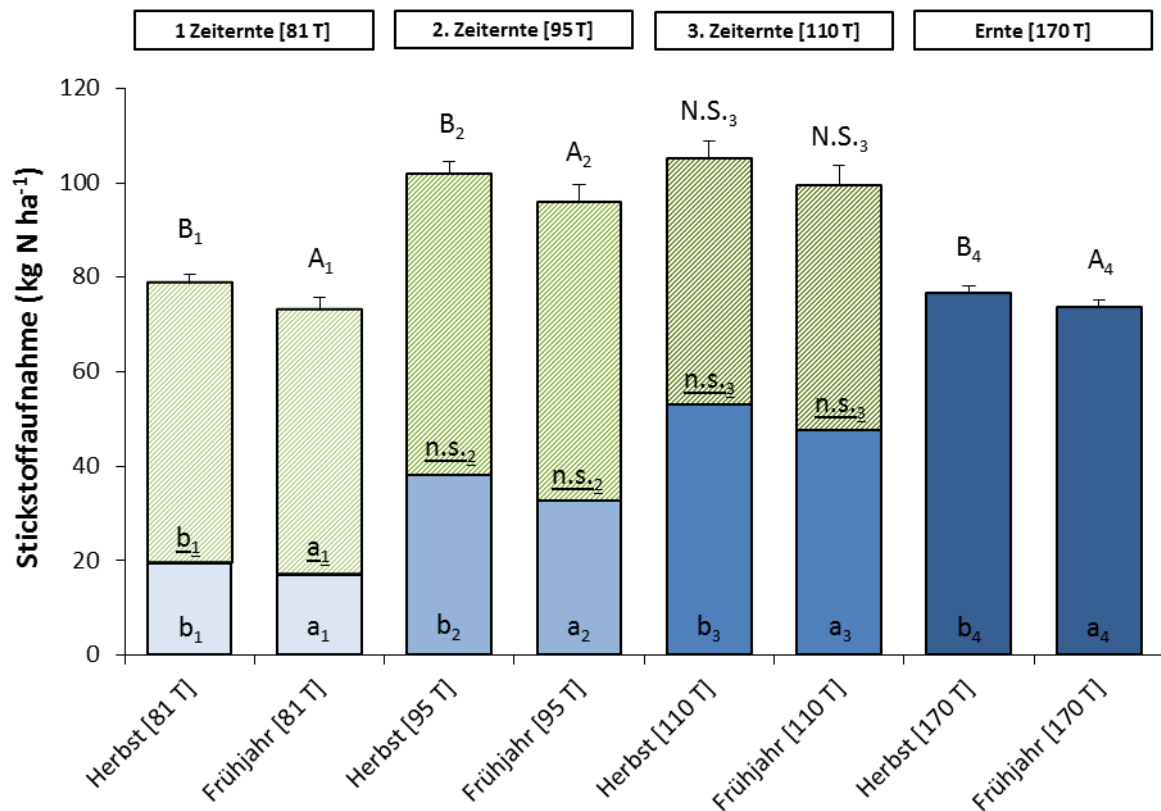
Die Stickstoffaufnahme der Kartoffelpflanzen wurde neben der Zwischenfrucht auch durch den Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte in den Boden beeinflusst. Für die Standorte Petzenhofen und Mintraching war im Mittel bei allen Zeiternten und der Abschlussernte die Stickstoffaufnahme nach der Einarbeitung im Herbst höher als nach der Einarbeitung im Frühjahr (Abbildung 26).



**Abbildung 25: Stickstoffaufnahme in Knolle und Kraut für Zwischenfruchtvarianten**

Mittelwerte der Stickstoffaufnahme in Knollen [einfarbig] und Kartoffelkraut [schraffiert] und Standardfehler der gesamten Stickstoffaufnahme der drei Zeiternten und der Abschlussernte für die beiden Versuchsstandorte Petzenhofen und Mintraching für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Stickstoffaufnahme in Knollen [abc], in Kartoffelkraut [abc] und gesamte Stickstoffaufnahme [ABC] für jeden Erntetermin einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant. T: Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln.

Die Stickstoffaufnahme in den Knollen war stets signifikant höher bei den Herbstvarianten als bei den Frühjahrsvarianten, die Stickstoffaufnahme im Kartoffelkraut nur bei der ersten Zeiternte. Für die beiden Standorte Petzenhofen und Mintraching konnte kein signifikanter Effekt der Legetiefe auf die Stickstoffaufnahme nachgewiesen werden.



**Abbildung 25: Stickstoffaufnahme in Knolle und Kraut für Umbruchstermine**

Mittelwerte der Stickstoffaufnahme in Knollen [einfarbig] und Kartoffelkraut [schraffiert] und Standardfehler der gesamten Stickstoffaufnahme der drei Zeiternten und der Abschlussernte für die beiden Versuchsstandorte Petzenhofen und Mintraching für die Legetiefe 0 cm. Tukey's HSD mit least-squares means ( $p < 0,05$ ) für Stickstoffaufnahme in Knollen [abc], in Kartoffelkraut [abc] und gesamte Stickstoffaufnahme [ABC] für jeden Erntetermin einzeln [Subskripte 1 bis 4]. Varianten mit unterschiedlichen Groß- bzw. Kleinbuchstaben unterscheiden sich signifikant. n.s.: nicht signifikant. T: Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln.

## 5 Diskussion

Gegenstand des „Teilprojekts B - Ackerbauliche Strategien“ war die Überprüfung der Effekte von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf das Auftreten und die Entwicklung von Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau. Eine Identifizierung von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen mit Potenzial zur Hemmung der Infektion und Ausbreitung von *P. infestans* könnte einen wichtigen Beitrag zu einer umfassenden Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategie leisten.

Im vorliegenden Projekt wurden hierfür aus der Vielzahl acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen die drei konkreten Aspekte Zwischenfruchtanbau, Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte und Legetiefe der Kartoffelpflanzgutknollen ausgewählt und einer genaueren Untersuchung im Rahmen von Feldversuchen unterzogen. Zwei Versuchsreihen wurden hierfür etabliert: „Screening von Zwischenfrüchten“ zur Überprüfung einer größeren Anzahl verschiedener Zwischenfruchtarten und „Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae*“ zur Überprüfung der Faktoren Legetiefe und Zeitpunkt des Umbruchs, sowie der Methode der Biofumigation.

### 5.1 Screening von Zwischenfrüchten

#### 5.1.1 Entwicklung der Zwischenfrüchte und $N_{\min}$ Gehalte im Boden

Zwischenfruchtanbau ist stark von den vorherrschenden Standort- und Wachstumsbedingungen bestimmt, die erzielbaren Aufwüchse unterscheiden sich somit stark zwischen verschiedenen Standorten. Dabei lagen die in den Feldversuchen erzielten Zwischenfruchtaufwüchse in der Regel in einem Bereich, der auch von in anderen Studien angegeben wird (Möller und Reents, 2009; Schließer et al., 2010). Die Standorte Petzenhofen und Geltendorf zeigten dabei vergleichbar hohe Erträge, gefolgt von Olching. Am Standort Mintraching dagegen entwickelten sich die Zwischenfrüchte dagegen relativ schlecht. Die vergleichsweise hohen TM Erträge von Erbse und Ackerbohne deuten auf eine mangelhafte Stickstoffversorgung als mögliche Ursache an diesem Versuchsstandort ohne Ausbringung von Biogasgärresten hin.

In der Regel konnte durch die Ansaat einer Zwischenfrucht stets ein größerer Aufwuchs als bei der Kontrollvariante ohne Zwischenfrucht erzielt werden, mit Ausnahme einiger weniger Arten an einzelnen Standorten, beispielsweise Iberischer Drachenkopf, Blaue Lupine oder Perserklee. Auffallend war am Standort Geltendorf der hohe oberirdische Aufwuchs der Kontrolle, die wie an allen Versuchsstandorten als natürliche Begrünung angelegt war. Ursache hierfür war Durchwuchs der Vorfrucht Wintergerste. Die Rangfolge der



verschiedenen Zwischenfrüchte änderte sich durchaus zwischen den Standorten, so erzielten beispielsweise *Fabaceae* mit der Möglichkeit der symbiotischen Stickstofffixierung nicht an allen Versuchsstandorten die höchsten Erträge.

Die Ergebnisse zur Entwicklung und Ertragsleistung der verschiedenen Zwischenfrüchte werden durch weitere Studien bestätigt. Campiglia et al. (2009) und Tosti et al. (2014) berichteten von höheren gemessenen Stickstoffträgen bei *Fabaceae* im Vergleich zu anderen Zwischenfrüchten. Höhere pro Fläche gebundener Stickstoff und engere C/N-Verhältnisse im Aufwuchs wurden auch von Möller und Reents (2009) beobachtet. Zusammenfassend konnte durch die Feldversuche bestätigt werden, dass die Wahl der Art der Zwischenfrucht die in der oberirdischen Biomasse gebundene Menge an Stickstoff beeinflusst und somit zumindest potentiell die Stickstoffverfügbarkeit für die Folgefrucht Kartoffel beeinflusst werden kann.

Zur Einschätzung des für die Kartoffeln zur Verfügung stehenden Stickstoffs wurden  $N_{\min}$  Proben zu Vegetationsbeginn sowie 40 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln gezogen. Die dabei gefunden Werte unterschieden sich zwischen den Standorten und Jahren. So konnten im Jahr 2013 an den Standorten Olching und Geltendorf geringere  $N_{\min}$  Werte zu Vegetationsbeginn gefunden werden im Vergleich zu den Standorten Petzenhofen und Mintraching im Jahr 2014. Dagegen war allerdings der Einfluss der Zwischenfruchtart auf die  $N_{\min}$  Gehalte nur gering, insbesondere bei der ersten Probennahme zu Vegetationsbeginn. Bis zur zweiten Probenahme stiegen die  $N_{\min}$  Gehalte deutlich an, wie auch aus anderen Studien bekannt (Möller und Reents, 2009; Haase et al., 2007). Jedoch konnten auch 40 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln keine größeren Unterschiede zwischen den einzelnen Zwischenfruchtvarianten mit Ausnahme Winterrübse festgestellt werden.

Die unterschiedlichen Stickstoffgehalte in den Zwischenfrüchten führten somit nicht notwendigerweise zu unterschiedlichen Mengen an verfügbarem Stickstoff für die Folgefrucht Kartoffeln. Die Höhe der  $N_{\min}$  Gehalte im Boden im Frühjahr ist von zahlreichen Standortfaktoren abhängig, u.a. Mineralisierung, Auswaschung und Witterung während der Wintermonate (Jabloun et al., 2015; Berry et al., 2002). Die fehlenden Unterschiede bei den  $N_{\min}$  Gehalten, obwohl unterschiedliche Stickstoffmengen in den Zwischenfrüchten gebunden wurden, lassen die Schlussfolgerung zu, dass entweder keine Mineralisierung in nachweisbare Verbindungen stattfand, oder dass Stickstoff in Form von Nitrat in tiefere Bodenschichten verlagert wurde. Bekannt ist, dass eine frühe Einarbeitung von Zwischenfrüchten bei noch verhältnismäßig hohen Temperaturen das Risiko einer Verlagerung von Nitrat in tiefere Bodenschichten erhöht (Mitchell et al., 2000; Möller et al.,

2008). In diesem Zusammenhang scheint es möglich, dass es u.a. durch eine Nitratverlagerung zu einer Angleichung der im Frühjahr gemessenen  $N_{\min}$  Gehalte in der Tiefe von 0 bis 30 cm gekommen ist.

### 5.1.2 Knollenerträge und *P. infestans* Blattbefall der Kartoffeln

Trotz der fehlenden Unterschiede in den  $N_{\min}$  Gehalten zu Vegetationsbeginn und 40 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln, konnten durchaus signifikante Unterschiede hinsichtlich des Knollenertrags zwischen den einzelnen Zwischenfruchtvarianten nachgewiesen werden. Im Mittel der vier Standorte zeigten Kartoffeln nach den Zwischenfrüchten Sandhafer, Winterrübse, Ackerbohne und Ölrettich signifikant höhere Knollenerträge im Vergleich zur Kontrollvariante. Dabei konnten auch erhebliche Unterschiede zwischen den Versuchsstandorten beobachtet werden. Bedingt durch den sandigen Boden und den sehr trockenen Wachstumsbedingungen am Standort Olching konnte dort weniger als 50 % des Ertrages der anderen Standorte geerntet werden.

Die beobachteten Ertragsunterschiede sind nicht ausschließlich durch die unterschiedliche Stickstoffverfügbarkeit zu erklären, wenngleich im ökologischen Landbau allgemein und speziell im ökologischen Kartoffelanbau Stickstoff als einer der wichtigsten limitierenden Faktoren angesehen wird (Palmer et al., 2013; Haase et al., 2007). Zwischenfrüchte besitzen eine Vielzahl von positiven Effekten, u.a. Unkrautkontrolle, Vorbeugung gegen Erosion, Verbesserung der Bodenstruktur (Brust et al., 2014; Poeplau und Don, 2015). Deshalb kann der Nutzen des Zwischenfruchtanbaus kaum auf einzelne Aspekte wie beispielsweise Stickstoffverfügbarkeit reduziert werden. Die Ergebnisse der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ sind insofern vergleichbar mit verschiedenen weiteren Studien, die ebenfalls positive Ertragseffekte von Zwischenfrüchten im Kartoffelanbau nachweisen konnten (Schließer et al., 2010; Campiglia et al., 2009; Möller und Reents, 2009).

Die Entwicklung von Krautfäule ist stark witterungs- und standortabhängig. Im Rahmen der Feldversuche wurden sowohl rasche Verläufe des Befalls mit Krautfäule als auch das Ausbleiben einer *P. infestans* Infektion bis zur Abreife der Kartoffeln beobachtet. Jedoch konnte für keinen Standort ein Einfluss der Zwischenfrucht auf das Auftreten und den Befallsverlauf der Krautfäule nachgewiesen werden. Auch gab es für keinen Standort einen negativen Zusammenhang zwischen dem Auftreten von *P. infestans* und dem Knollenertrag, wie er beispielsweise von Krebs et al. (2013) beobachtet wurde. In der Literatur finden sich Hinweise, dass die Stickstoffversorgung die Anfälligkeit von Kartoffelpflanzen gegenüber *P. infestans* beeinflusst (Schöber-Butin, 2001; Ros et al., 2008). Eine Beeinflussung des Krankheitsverlaufs durch die Stickstoffversorgung scheint somit möglich, wenngleich die

Ergebnisse aus der Literatur nicht eindeutig sind. Allerdings konnten in der vorliegenden Versuchsreihe nur sehr geringe Unterschiede bezüglich den  $N_{\min}$  Gehalten im Boden festgestellt werden. Unter der Annahme, dass die Stickstoffverfügbarkeit nach verschiedenen Zwischenfrüchten unterschiedlich ist und dies die Infektion mit *P. infestans* beeinflusst, waren in Folge dessen auch keine Unterschiede im Krautfäulebefall zu erwarten.

## **5.2 Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae***

Eine Wirksamkeit der Methode der Biofumigation durch die Umsetzung von in *Brassicaceae* enthaltener Glucosinolate in ITCs gegen Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau scheint nur unter zwei Voraussetzungen möglich. Einerseits muss eine hemmende Wirkung der entstehenden ITCs gegen das Pathogen *P. infestans* gegeben sein, andererseits muss eine Interaktion zwischen den ITCs und dem Pathogen möglich sein.

Zur Überprüfung der Sensitivität von *P. infestans* auf verschiedene ITCs und Pflanzenmaterial verschiedener *Brassicaceae* wurden zunächst in vitro Hemmtest durchgeführt. Die vollständige Methode der Biofumigation wurde zudem in Feldversuchen getestet, bei denen der komplexe Faktor Biofumigation in die beiden Faktoren Zwischenfruchtart und Zeitpunkt der Einarbeitung in den Boden aufgeteilt und dem Faktor Legetiefe der Pflanzknollen kombiniert wurde.

### **5.2.1 In vitro Hemmtests**

In verschiedenen Studien konnte die hemmende Wirkung von ITCs auf verschiedene Phytopathogene nachgewiesen werden (Manici et al., 1997; Sarwar et al., 1998; Smith und Krikegaard, 2002). Jedoch gibt es bisher keine Daten zur Sensitivität von *P. infestans* auf ITCs oder auf glucosinolatreiches Pflanzenmaterial von *Brassicaceae*. Mit Hilfe von in vitro Hemmtests wurde deshalb die Wirkung drei verschiedener ITCs und einer Auswahl von zerkleinertem Pflanzenmaterial über die Gasphase auf das Mycelwachstum von *P. infestans* überprüft.

Als zu testende Verbindungen wurden in Reinform erhältliche ITCs gewählt: Allylisoithiocyanat, ein Derivat von Sinigrin, dem Hauptglucosinolat von Sareptasenf (Schütze, 2012), sowie Benzylisoithiocyanat und 2-Phenylethylisoithiocyanat. Alle drei ITCs führten zu einer Hemmung des Mycelwachstums von *P. infestans* auf Nährmedium, bei 2-Phenylethylisoithiocyanat trat eine hemmende Wirkung bereits bei einer geringeren eingebrachten Stoffmenge ein. Zu beachten ist, dass neben der Toxizität auch die

Flüchtigkeit der jeweiligen Substanz die hemmende Wirkung über die Gasphase beeinflusst (Sarwar et al., 1998).

Neben den reinen ITCs wurden auch Hemmtests mit zerkleinertem Pflanzenmaterial durchgeführt. Alle *Brassicaceae* hemmten dabei das Mycelwachstum von *P. infestans*, nicht jedoch die *Fabaceae* Sommerwicke. Die eingebrachte Stoffmenge an Glucosinolaten, die potenziell zu ITCs umgesetzt werden kann, war beispielsweise für Sareptasenf in dem Bereich, der auch durch die Hemmtests mit reinen Allylisothiocyanat abgedeckt wurde. Nach Schütze (2012) liegt der mittlere Gehalt von Sinigrin in Sareptasenf bei rund  $30 \mu\text{mol g}^{-1}$  TM. Bei einem gemessenen TM Gehalt von 12 % des verwendeten Sareptasenf ergibt das bei 2,5 g FM eine eingebrachte Stoffmenge von  $9 \mu\text{mol}$  Sinigrin pro Petrischale.

Die durchgeführten Hemmtests zeigen, dass ITCs potenziell eine hemmende Wirkung auf *P. infestans* aufweisen. Allerdings wurde hierbei nur das Mycelwachstum betrachtet, Rückschlüsse auf andere Entwicklungsstadien wie Zoosporen oder Oosporen sind kaum möglich. Zusätzlich ist zu berücksichtigen, dass in den in vitro Hemmtest die ITCs bzw. das Pflanzenmaterial in unmittelbarer Nähe zum Pathogen eingebracht wurde, so dass eine Interaktion über die Gasphase wahrscheinlich erscheint. Hinweise über die Möglichkeit einer Interaktion im Feld sind jedoch nur über Feldversuche mit entsprechenden Versuchsbedingungen zu generieren.

## 5.2.2 Feldversuche

### 5.2.2.1 Entwicklung der Zwischenfrüchte und $N_{\text{min}}$ Gehalte im Boden

Im Rahmen der Versuchsreihe „Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae*“ wurden die ausgesäten Zwischenfrüchte entweder im Herbst oder im Frühjahr in den Boden eingearbeitet und jeweils unmittelbar zuvor Proben des oberirdischen Aufwuchses geschnitten. Die erzielten Aufwüchse der verschiedenen Zwischenfrüchte lagen in einem vergleichbaren Bereich wie bei den Feldversuchen der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“. Der Aufwuchs der Zwischenfrüchte im Herbst unterschied sich signifikant voneinander. Mit Ausnahme des Standorts Geltendorf, erreichten die *Brassicaceae* im Herbst stets höhere Erträge als die Sommerwicke bzw. Winterwicke. Die ausgesäten *Fabaceae* hatten trotz symbiontischer Stickstofffixierung keinen Ertragsvorteil. Je nach Zwischenfruchtart entwickelte sich die Biomasse über den Winter unterschiedlich. Überwiegend war der oberirdische Aufwuchs im Frühjahr geringer als im Herbst, mit Ausnahme beispielsweise der Kontrollvarianten an den Standorten Olching, Petzenhofen und Mintraching. Die überwinterte Zwischenfrucht Winterwicke zeigte erwartungsgemäß im Frühjahr einen deutlich höheren Aufwuchs als im Herbst.

Der in der Biomasse enthaltene Stickstoff wies eine vergleichbare Verteilung wie die erzielten Zwischenfruchterträge auf. Die gemessenen Werte im Mittel der drei Versuchsstandorte mit identischen Zwischenfruchtarten waren hierfür im Herbst größer als im Frühjahr. Die Qualität der Biomasse gemessen als C/N-Verhältnis glich sich für diese drei Standorte über den Winter hinweg an. Im Herbst wies die Zwischenfrucht Sommerwicke, aber auch die Kontrollvariante mit natürlicher Begrünung ein engeres C/N-Verhältnis als die beiden *Brassicaceae* auf. Wie auch bei der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ (vergleiche Kapitel 5.1.1), zeigte sich ein signifikanter Einfluss der Wahl der Zwischenfrucht auf die im Aufwuchs gebundene Menge an Stickstoff, die potenziell für die Folgefrucht zur Verfügung stand.

Zur Abschätzung der tatsächlich zur Verfügung stehenden Stickstoffmenge wurden  $N_{\min}$  Proben zu Vegetationsbeginn und 40 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln gezogen. Auch hier konnten gewisse Unterschiede zwischen den Versuchsstandorten nachgewiesen werden, interessanter erscheinen jedoch die Effekte der Wahl der Zwischenfrucht und des Zeitpunktes der Einarbeitung, dargestellt an den drei Standorten Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching mit den identischen Versuchsvarianten. Zu Vegetationsbeginn waren die  $N_{\min}$  Gehalte beim Umbruch im Frühjahr geringer als bei Umbruch im Herbst, erklärbar durch eine verminderte Mineralisierung durch die spätere Einarbeitung im Frühjahr (Möller et al., 2008; Weinert et al., 2002). Bis zum zweiten Probenstermin 40 Tage nach Auspflanzung der Kartoffeln erfolgte jedoch eine Angleichung der  $N_{\min}$  Gehalte der beiden Umbruchstermine. Nach den Zwischenfrüchten Örettich und Sommerwicke waren bei Umbruch Frühjahr die  $N_{\min}$  Gehalte höher als nach Winterrübse und der Kontrollvariante, sowohl zu Vegetationsbeginn als auch beim zweiten Probenstermin.

Durch die Einarbeitung der Zwischenfrüchte im Frühjahr konnten somit die  $N_{\min}$  Gehalte zu Vegetationsbeginn gesenkt werden, ein Zeitpunkt zu dem die Kartoffeln den verfügbaren Stickstoff noch nicht aufnehmen können, da sie noch nicht gepflanzt sind. Zudem zeigten sich Unterschiede bei den  $N_{\min}$  Gehalten zwischen den Zwischenfruchtvarianten beim Umbruchstermin Frühjahr, die beim Umbruchstermin Herbst nicht zu erkennen waren (vergleiche auch Kapitel 5.1.1). Bis zum zweiten Probenstermin 40 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln glichen sich die  $N_{\min}$  Gehalte an, wobei die signifikant höheren  $N_{\min}$  Gehalte nach Örettich und Sommerwicke im Vergleich zur Kontrollvariante erhalten blieben. Insofern resultierten aus den höheren in der Biomasse gebundenen Mengen an Stickstoff im Herbst bei Örettich und Sommerwicke, höhere  $N_{\min}$  Werte beim Umbruchstermin Frühjahr. Für genauere Aussagen zum Verbleib des Stickstoffs bzw. zur

Nitratverlagerung in tiefere Bodenschichten wären  $N_{\min}$  Proben in größerer Tiefe notwendig, die im Rahmen des Projekts nicht gezogen werden konnten.

#### **5.2.2.2 Knollenerträge und *P. infestans* Blattbefall der Kartoffeln**

Zumindest teilweise spiegeln sich die unterschiedlichen  $N_{\min}$  Werte als Maß für die Menge an verfügbarem Stickstoff in den geernteten Knollenerträgen wieder. Weder der Zeitpunkt des Umbruchs noch die Legetiefe der Pflanzknollen hatte einen signifikanten Effekt auf den Knollenertrag. Eine Ausnahme stellen lediglich die höheren Knollenerträge am Standort Olching nach Umbruch Frühjahr dar. Für die drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching konnten aber signifikante Unterschiede in den Brutto Knollenerträgen zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtvarianten beobachtet werden. Bei allen Umbruch und Legetiefe Kombinationen konnten für die Kontrollvarianten ohne Zwischenfrucht signifikant geringere Knollenerträge geerntet werden als nach dem Anbau einer der drei Zwischenfrüchte.

Die Versuchsergebnisse bestätigen somit Studien, die positive Ertragseffekte durch den gezielten Anbau von Zwischenfrüchten vor Kartoffeln nachweisen konnten (Schließer et al., 2010; Möller und Reents, 2009; Campiglia et al., 2009). Allerdings zeigten sich keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Zwischenfruchtarten, auch nicht in Kombination mit dem Zeitpunkt des Umbruchs. Die Methode der Biofumigation als Anbau von glucosinolatreichen *Brassicaceae* und deren Zerkleinerung und Einarbeitung in den Boden im Herbst brachte somit keine weiteren positiven Ertragseffekte im Vergleich zum klassischen Zwischenfruchtanbau. Auch in anderen Studien zeigte die Methode der Biofumigation keine eindeutig positiven Ertragseffekte im Kartoffelanbau (Snapp et al., 2007; Larkin und Griffin, 2007). Die geringeren Knollenerträge für Umbruch Herbst am sandigen Standort Olching, zusammen mit den beobachteten  $N_{\min}$  Gehalten, sind Hinweis auf das zunehmende Risiko der Nitratverlagerung in tiefere Bodenschichten bei frühem Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte (Weinert et al., 2002; Mitchell et al. 2000).

Die Befallsverläufe von *P. infestans* der Versuchreihe „Effekte von glucosinolatreichen *Brassicaceae*“ stimmen für die einzelnen Standorte mit der Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“ überein (vgl. Kapitel 5.1.2). Auch hier zeigten die Versuchsfaktoren keine bzw. kaum Effekte auf das Auftreten und die Entwicklung von Krautfäule in den Kartoffelbeständen. Für die drei Standorte Geltendorf, Petzenhofen und Mintraching zeigten weder die Zwischenfrucht noch die Legetiefe einen signifikanten Effekt. Der Zeitpunkt des Umbruchs hatte bei den Standorten Mintraching und Geltendorf entgegengesetzte Wirkungen, mehr Befall bei Umbruch Frühjahr in Geltendorf und weniger Befall für Umbruch

Frühjahr in Mintraching. An beiden Standorten wurde für den jeweiligen Umbruchstermin mit höherem Blattbefall auch eine bessere Krautentwicklung und höher  $N_{\min}$  Werte 40 Tage nach dem Auspflanzen gemessen. Dies deutet auf einen positiven Zusammenhang zwischen der Stickstoffversorgung, der resultierenden Blattentwicklung und dem beobachteten Krautfäulebefall hin (Mittelstraß et al., 2006; Ros et al., 2008). Allerdings zeigte sich an keinem der beiden Standorte Geltendorf und Mintraching ein signifikanter Unterschied der Knollenerträge zwischen den beiden Umbruchsterminen.

Die fehlenden Effekte des Faktors Legetiefe widerlegten die formulierte Hypothese, dass die Ablagetiefe der Pflanzknollen die Feuchtebedingungen im Boden und in der Folge die Ausbildung von primärem Stängelbefall beeinflusst. Allerdings konnte in den Feldversuchen nur eine Bonitur des sekundären Blattbefalls durchgeführt werden und nicht des primären Stängelbefalls. Neben Schwierigkeiten bei der Bonitur scheint auch die Anzahl von Pflanzknollen und den daraus resultierenden Kartoffelpflanzen angesichts der in der Literatur zu finden Häufigkeit der Symptomausbildung eines Primärbefalls zu gering (Keil et al., 2010).

Zusammenfassend konnte kein konsistenter Effekt der Zwischenfrucht und der Methode der Biofumigation auf das Auftreten und die Entwicklung der Krautfäule nachgewiesen werden. Trotz der in den in vitro Hemmtests nachgewiesenen Sensitivität von *P. infestans* gegen ITCs und Pflanzenmaterial von *Brassicaceae*, konnte im Feld keine entsprechende Wirkung beobachtet werden. Als Ursache hierfür ist möglicherweise die fehlende Interaktionsmöglichkeit zwischen den toxischen ITCs und dem Pathogen anzusehen. Die bei der Einarbeitung der Zwischenfrüchte entstehenden ITCs sind flüchtig und nur kurze Zeit im Boden nachweisbar (Gimsing und Kirkegaard, 2006). *P. infestans* ist jedoch in der Versuchsregion nicht als bodenbürtiges Pathogen bekannt, sondern überwintert hauptsächlich durch latent infizierte Pflanzknollen im Lager (Zellner et al., 2011) und wird mit dem Kartoffelpflanzgut auf das Feld eingebracht. Eine mögliche Alternative stellt eventuell eine Einarbeitung von überwinterten *Brassicaceae* im Frühjahr statt im Herbst dar, allerdings konnte auch für im Frühjahr eingearbeitete Winterrübse keine entsprechende Wirkung beobachtet werden.

### **5.2.2.3 Kraut- und Knollenentwicklung und Stickstoffaufnahme**

Mit Ausnahme des Standortes Geltendorf, konnte bei den durchgeführten Zeiternten Ende Juli, rund 90 bis 110 Tage nach dem Auspflanzen der Kartoffeln, stets ein Ertrag von mehr als 85 % der Abschlussernte festgestellt werden. Unter Bedingungen des ökologischen Landbaus wurden ähnliche Werte auch von Möller et al. (2007) gefunden. Insbesondere die verschiedenen Zwischenfruchtvarianten zeigten dabei signifikante Unterschiede sowohl in

der Entwicklung des Kartoffelkrautes als auch bei den Knollen. Diese Unterschiede blieben bis zur Abschlussernte erhalten und resultierten in signifikanten Ertragsunterschieden zwischen der Kontrollvariante und den Zwischenfruchtarten. Zunächst zu beobachtende Unterschiede zwischen den Umbruchsterminen bei den Knollenerträgen glichen sich dagegen im Laufe der Zeit an und resultierten nicht in signifikanten Ertragsunterschieden. Dagegen konnte für die Ablagetiefe der Pflanzknollen kein Effekt auf die Kraut- und Knollenentwicklung gezeigt werden.

Die Stickstoffaufnahme in den Kartoffelpflanzen stieg während der Zeiternten stetig an und nahm anschließend mit Absterben des Kartoffelkrautes bis zur Abschlussernte wieder ab. Dabei spiegelte beim Faktor Zwischenfrucht die Stickstoffaufnahme die Knollenerträge wieder, d.h. Varianten mit höheren Knollenerträgen zeigten auch eine höhere Stickstoffaufnahme. Im Gegensatz dazu zeigte die Umbruchsvariante Herbst stets eine höhere Stickstoffaufnahme als die Umbruchsvariante Frühjahr, jedoch nur zu Beginn der Zeiternten auch höhere Knollenerträge. Verglichen mit den vorliegenden Feldversuchen berichteten Haase et al. (2007) von höheren Stickstoffaufnahmen in Kartoffelknollen unter Bedingungen des ökologischen Landbaus. Dagegen beobachteten Möller et al. (2007) ähnliche bzw. teilweise auch geringere Stickstoffaufnahmen in Kraut und Knolle im ökologischen Kartoffelanbau.



## **6 Nutzen und Verwertbarkeit der Ergebnisse**

Gegenstand und Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts war die Überprüfung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Infektion und Ausbreitung von Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau, als Beitrag einer umfassenden Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategie. Hierfür wurden die Aspekte Zwischenfruchtanbau, Zeitpunkt der Bodenbearbeitung bzw. Einarbeitung der Zwischenfrüchte, die Methode der Biofumigation, sowie die Legetiefe der Pflanzkartoffeln im Rahmen umfangreicher Feldversuchen getestet.

Zwar war für keinen der untersuchten Faktoren eine unmittelbar hemmende Wirkung auf die Infektion und die Entwicklung von *P. infestans* in den Kartoffelbeständen feststellbar, dafür konnten jedoch positive Ertragseffekte des Zwischenfruchtanbaus auf die Folgefrucht Kartoffel statistisch abgesichert werden. Somit können der Praxis zwar keine Empfehlungen hinsichtlich ackerbaulicher Maßnahmen gegeben werden, die eine direkte Reduktion des Krautfäulebefalls erwarten lassen und somit den Einsatz von Kupfer überflüssig erscheinen lassen. Allerdings können in der landwirtschaftlichen Praxis durch den gezielten Anbau von Zwischenfrüchten die Kartoffelerträge gesteigert bzw. abgesichert werden. Angesichts der nur eingeschränkt verfügbaren alternativen direkten Regulierungsmaßnahmen gegen *P. infestans* neben Kupferfungiziden, stellt dies gegenwärtig einen wichtigen Baustein für eine umfassende Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategie dar.

## 7 Geplante und erreichte Ziele

Das ursprüngliche geplante Ziel des vorliegenden Forschungsprojekts „Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau - Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien“ war die Überprüfung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen als Beitrag einer umfassenden Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategie. Im Rahmen zweier Versuchsreihen wurden hierfür verschiedene Aspekte aus dem Bereich des Acker- und Pflanzenbaus genauer untersucht:

- (1) Versuchsreihe „Screening von Zwischenfrüchten“: Geplantes Ziel war die Überprüfung möglicher Vor- und Zwischenfruchteffekte verschiedener Zwischenfruchtarten auf die Entwicklung der Nachkultur Kartoffel sowie das Auftreten von Krautfäule. Es konnten unterschiedliche Effekte der Zwischenfrüchte auf das Wachstums und die Ertragsbildung der Folgefrucht Kartoffeln identifiziert werden, allerdings keine Effekte auf das Auftreten und die Entwicklung von Krautfäule.
- (2) Versuchsreihe „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“: Geplante Ziele waren die Überprüfung der Zwischenfruchteffekte von *Brassicaceae* im Vergleich zu anderen Zwischenfruchtarten, verschiedener Bodenbearbeitungszeitpunkte, verschiedener Ablagetiefen der Kartoffelpflanzknollen und insbesondere auch die Überprüfung der phytosanitären Effekte der Methode der Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau. Auch hier konnten unterschiedliche Effekte auf die Entwicklung und Ertragsbildung der Folgefrucht Kartoffel beobachtet werden, allerdings keine anti-phytopathogenen Effekte von *Brassicaceae* sowie der Methode der Biofumigation auf die Infektion mit *P. infestans* und die Entwicklung von Krautfäule.

Insofern konnte für die untersuchten acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen keine direkte hemmende Wirkung auf Krautfäule nachgewiesen werden, die eine unmittelbare Reduzierung des Kupfereinsatzes im ökologischen Kartoffelanbau ermöglichen würde. Allerdings zeigen die ertragswirksamen Effekte der untersuchten Maßnahmen die Bedeutung von acker- und pflanzenbaulichen Aspekten als Teil einer umfassenden Anbaustrategie für Kartoffeln im ökologischen Landbau.

## 8 Zusammenfassung und Schlussfolgerungen

Die durch *P. infestans* verursachte Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, ist auch im ökologischen Kartoffelanbau für hohe wirtschaftliche Verluste verantwortlich. Bisher stehen der landwirtschaftlichen Praxis im ökologischen Landbau als einzige effektive Regulierungsmaßnahme kupferhaltige Fungizide zur Verfügung. Der Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel steht allerdings aufgrund der Anreicherungsproblematik im Boden und möglichen negativen Wirkungen auf Nicht-Ziel-Organismen in der Kritik. Eine Verminderung bzw. möglichst vollständige Vermeidung des Einsatzes von Kupfer im ökologischen Landbau wurde in einer Kupferminimierungsstrategie als Ziel festgelegt.

Im Rahmen des Forschungsprojekts „Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau“ wurden hierfür verschiedene mögliche Ansätze identifiziert und im Verlauf des Projektes in den einzelnen Teilprojekten bearbeitet: Reduzierung des Anteils an latent infizierten Pflanzgutknollen; Vermeidung von Primärbefall aus latent infizierten Knollen; Einsatz alternativer Präparate für Blattapplikationen; Optimierung von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen zur Förderung der Entwicklung der Kartoffeln und ggf. zur Verzögerung der Entwicklung der Krautfäule als Beitrag zur Kupferminimierung.

Gegenstand des „Teilprojekts B: Ackerbauliche Strategien“ war die Überprüfung acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen hinsichtlich ihrer Wirkung auf die Infektion und Ausbreitung von Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau. Neben der Überprüfung verschiedener Zwischenfruchteffekte, der Bodenbearbeitung und der Legetiefe der Pflanzknollen, wurde insbesondere auch die Anwendbarkeit und Wirksamkeit der Methode der Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau getestet. Biofumigation beschreibt die gezielte Nutzung des anti-phytopathogenen Potentials von *Brassicaceae* im Zwischenfruchtanbau. Verschiedene *Brassicaceae*, beispielsweise Sareptasenf, Winterrübse oder Ölrettich, werden dabei als Zwischenfrucht vor Kartoffeln angebaut und im Herbst bei noch relativ hohen Temperaturen gemulcht und mit einer Fräse in den Boden eingearbeitet. Durch das Zerkleinern der glucosinolatreichen Pflanzen wird die Bildung von Isothiocyanaten angeregt, die toxisch gegen verschiedene Phytopathogene wirken.

Zur Überprüfung der acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen wurden zwei Versuchsreihen mit umfangreichen Feldversuchen etabliert: „Screening von Zwischenfrüchten“ zur Überprüfung der Effekte von verschiedenen Zwischenfruchtarten auf die Ertragsbildung der Folgefrucht Kartoffeln und dem Befall mit Krautfäule und „Effekte glucosinolatreicher *Brassicaceae*“ zur Überprüfung der Effekte von *Brassicaceae*, dem Zeitpunkt der Einarbeitung der Zwischenfrüchte in den Boden, der Methode der

Biofumigation sowie der Ablagetiefe der Kartoffelpflanzknollen auf die Entwicklung der Kartoffeln und des Krautfäulebefalls. In Feldversuchen an verschiedenen Standorten und über mehrere Jahre hinweg, konnten dabei keine direkten hemmenden Effekte der ausgewählten acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf die Infektion und die Entwicklung von *P. infestans* festgestellt werden. Die Methode der Biofumigation zeigte im Vergleich zum üblichen Zwischenfruchtanbau keine zusätzlichen phytosanitären Wirkungen und positiven Effekte auf die Ertragsbildung der Kartoffeln.

Die Wirkungen des Zwischenfruchtanbaus sind vielfältig und umfassen neben phytosanitären Effekten insbesondere auch Veränderungen im Nährstoffhaushalt, beispielsweise durch eine veränderte Stickstoffverfügbarkeiten für die Folgefrucht. So konnten bei den Feldversuchen trotz der fehlenden Effekte auf Krautfäule positive Effekte des Zwischenfruchtanbaus auf die Ertragsbildung der Kartoffeln statistisch abgesichert werden. Dabei zeigten sich für die Methode der Biofumigation Hinweise auf ein erhöhtes Risiko für Nitratverlagerung durch das frühzeitige Mulchen und Einarbeiten der Zwischenfrüchte im Herbst, abhängig von den Standortbedingungen. Die vorliegenden Ergebnisse, in Verbindung mit *P. infestans* als nicht oder zumindest nicht hauptsächlich bodenbürtigen Krankheitserreger, zeigen, dass gegenwärtig das Potential der Methode der Biofumigation zur Regulierung von Krautfäule im ökologischen Kartoffelanbau begrenzt ist.

Trotz der fehlenden direkten hemmenden Wirkungen auf den Krautfäulebefall im ökologischen Kartoffelanbau konnte das vorliegende Forschungsprojekt die Bedeutung des Zwischenfruchtanbaus im ökologischen Kartoffelanbau zur Steigerung und Sicherung der Knollenerträge bestätigen. Somit konnte zwar keine direkte Alternative zum Einsatz von Kupfer als Pflanzenschutzmittel für die Regulierung von Krautfäule identifiziert werden, allerdings kann der gezielte Anbau von Zwischenfrüchten durch die Sicherung der Knollenerträge als Teil einer umfassenden Anbaustrategie für den ökologischen Kartoffelanbau durchaus zur Kupferminimierung beitragen.

## **9 Danksagung**

Gefördert durch das Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages im Rahmen des Bundesprogramms Ökologischer Landbau und andere Formen nachhaltiger Landwirtschaft. (FKZ 2809OE114). Hans Jürgen Reents und Max Kainz initiierten das Forschungsprojekt und die Feldversuche. Vielen Dank an Stefan Kimmelman, Jan-Dirk Otten, Dieter Hirschel, Florian Schmid und allen Mitarbeitern der Versuchsstationen Roggenstein und Viehhausen für die hervorragende Betreuung der Versuche und vielen Dank an das Lehrstuhllabor für die Bestimmung der  $N_{\min}$  Werte und Nährstoffgehalte. Dank an die Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft für die Ermöglichung der Laborversuche und herzlichen Dank an alle beteiligten Landwirte für die freundliche Bereitstellung von Flächen für die Feldversuche.

## 10 Literaturverzeichnis

- Andersson, B.; Sandström, M.; Strömberg, A. 1998: Indications of soil borne inoculum of *Phytophthora infestans*. Potato Research 41. S. 305-310.
- Bates, D.; Maechler, M.; Bolker, B.; Walker, S. 2014: lme4: Linear mixed-effects models using Eigen and S4. R package version 1.1-7. <http://CRAN.R-project.org/package=lme4>.
- Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (Hrsg.) 2015: Agrarmeteorologie Bayern. <http://www.wetter-by.de>. Abgerufen am 05.03.2015.
- Berry, P. M.; Sylvester-Bradley, R.; Philipps, L.; Hatch, D. J.; Cuttle, S. P.; Rayns, F. W.; Gosling, P. 2002: Is the productivity of organic farms restricted by the supply of available nitrogen? Soil Use and Management 18. S. 248-255.
- Böhm, H. (Hrsg.) 2011: Optimierung der ökologischen Kartoffelproduktion. Johann Heinrich von Thünen-Institut. Sonderheft 348.
- Brust, J.; Claupein, W.; Gerhards, R. 2014: Growth and weed suppression ability of common and new cover crops in Germany. Crop protection 63. S. 1-8.
- Campiglia, E.; Paolini, R.; Colla, G.; Mancinelli, R. 2009: The effects of cover cropping on yield and weed control of potato in a transitional system. Field Crops Research 112. S. 16-23.
- Commission Directive 2009/37/EC of 23 April 2009 amending Council Directive 91/414/EEC to include chlormequat, copper compounds, propaquizafop, quizalofop-P, teflubenzuron and zeta-cypermethrin as active substances. Official Journal of the European Union. 24.4.2009 L104/23.
- Commission Implementing Regulation (EU) No 85/2014 of 30 January 2014 amending Implementing Regulation (EU) No 540/2011 as regards the extension of the approval period of the active substance copper compounds. Official Journal of the European Union. 31.1.2014 L28/34.
- Fernández-Pavía, S. P.; Grünwald, N. J.; Díaz-Valasis, M.; Cadena-Hinojosa, M.; Fry, W. E. 2004: Soilborne Oospores of *Phytophthora infestans* in Central Mexico Survive Winter Fallow and Infect Potato Plants in the Field. Plant Disease 88. S. 29-33.

- Gimsing, A. L.; Kirkegaard, J. A. 2006: Glucosinolate and isothiocyanate concentration in soil following incorporation of Brassica biofumigants. *Soil Biology and Biochemistry* 38. S. 2255-2264.
- Haase, T.; Schüler, C.; Heß, J. 2007: the effect of different N and K sources on tuber nutrient uptake, total and graded yield of potatoes (*Solanum tuberosum* L.) for processing. *European Journal of Agronomy* 26. S. 187-197.
- Halekoh, U.; Højsgaard, S. 2014: A Kenward-Roger Approximation and Parametric Bootstrap Methods for Tests in Linear Mixed Models - The R Package pbkrtest. *Journal of Statistical Software* 59. S. 1-30.
- Hofmeester, Y. 1992: Effects of fertilization on pests and diseases. *Netherlands journal of plant pathology* 98. S. 257-264.
- Jabloun, M.; Schelde, K.; Tao, F.; Olesen, J. E. 2015: Effect of temperature and precipitation on nitrate leaching from organic cereal cropping systems in Denmark. *European Journal of Agronomy* 62. S. 55-64.
- Keil, S. B.; Benker, M.; Zellner, M. 2010: Double Setting of Potato Seed Tubers as a New Approach to Research Primary Stem Blight (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary). *American Journal of Potato Research* 87. S. 27-31.
- Keiser, A.; Häberli, M.; Stamp, P. 2012: Quality deficiencies on potato (*Solanum tuberosum* L.) tubers caused by *Rhizoctonia solani*, wireworms (*Agriotes* ssp.) and slugs (*Deroceras reticulatum*, *Arion hortensis*) in different farming systems. *Field Crops Research* 128. S. 147-155.
- Krebs, H.; Musa, T.; Vogelsang, S.; Forrer, H.-R. 2013. Kupferfreie Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule im Bio-Kartoffelbau?. *Agrarforschung Schweiz* 4. S. 238-243.
- Kuznetsova, A.; Brockhoff, P. B.; Christensen, R. H. B. 2014: lmerTest: Tests in Linear Mixed Effects Models. R package version 2.0-20. <http://CRAN.R-project.org/package=lmerTest>.
- Larkin, R. P.; Griffin, T. S. 2007: Control of soilborne potato diseases using Brassica green manures. *Crop Protection* 26. S. 1067-1077.

- Lehtinen, A.; Hannukkala, A. 2004: Oospores of *Phytophthora infestans* in soil provide an important new source of primary inoculum in Finland. *Agricultural and Food Science* 13. S. 399-410.
- Lenth, R. V.; Hervé, M. 2015: lsmeans: Least-Squares Means. R package version 2.14. <http://CRAN.R-project.org/package=lsmeans>.
- Manici, L. M.; Lazzeri, L.; Palmieri, S. 1997: In Vitro Fungitoxic Activity of Some Glucosinolates and Their Enzyme-Derived Products toward Plant Pathogenic Fungi. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 45. S. 2768-2773.
- Mitchell, R. D. J.; Harrison, R.; Russel, K. J.; Webb, J. 2000: The effect of crop residue incorporation date on soil inorganic nitrogen, nitrate leaching and nitrogen mineralization. *Biology and Fertility of Soils* 32. S. 294-301.
- Mittelstraß, K.; Treutter, D.; Pleßl, M.; Heller, W.; Elstner, E. F.; Heiser, I. 2006: Modification of Primary and Secondary Metabolism of Potato Plants by Nitrogen Application Differentially Affects Resistance to *Phytophthora infestans* and *Alternaria solani*. *Plant Biology* 8. S. 653-661.
- Möller, K.; Habermeyer, J.; Zinkernagel, V.; Reents, H.-J. 2007: Impact and Interaction of Nitrogen and *Phytophthora infestans* as Yield-limiting and Yield-reducing Factors in Organic Potato (*Solanum tuberosum* L.) Crops. *Potato Research* 49. S. 281-301.
- Möller, K.; Stinner, W.; Leithold, G. 2008: Growth, composition, biological N<sub>2</sub> fixation and nutrient uptake of a leguminous cover crop mixture and the effect of their removal on field nitrogen balances and nitrate leaching risk. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* 82. S. 233-249.
- Möller, K.; Reents, H.-J. 2009: Effects of various cover crops after peas on nitrate leaching and nitrogen supply to succeeding winter wheat or potato crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* 172. S. 277-287.
- Morra, M. J.; Kirkegaard, J. A. 2002: Isothiocyanate release from soil-incorporated Brassica tissues. *Soil Biology and Biochemistry* 34. S. 1683-1690.



- Palmer, M. W.; Cooper, J.; Tétard-Jones, C.; Srednicka-Tober, D.; Baranski, M.; Eyre, M.; Shotton, P. N.; Volakakis, N.; Cakmak, I.; Ozturk, L.; Leifert, C.; Wilcockson, S. J.; Bilsborrow, P. E. 2013: The influence of organic and conventional fertilisation and crop protection practices, preceding crop, harvest year and weather conditions on yield and quality of potato (*Solanum tuberosum*) in a long-term management trial. *European Journal of Agronomy* 49. S. 83-92.
- Poeplau, C.; Don, A. 2015: Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 200. S. 33-41.
- Powelson, M. L.; Ludy, R.; Partipilo, H.; Inglis, D. A.; Gundersen, B.; Derie, M. 2002: Seed Borne Late Blight of Potato. Online. *Plant Health Progress*.
- R Core Team 2015: R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing. Vienna, Austria. <http://www.R-project.org/>.
- Ros, B.; Mohler, V.; Wenzel, G.; Thümmler, F. 2008: *Phytophthora infestans*-triggered response of growth- and defense-related genes in potato cultivars with different levels of resistance under the influence of nitrogen availability. *Physiologia Plantarum* 133. S. 386-396.
- Sarwar, M.; Kirkegaard, J. A.; Wong, P. T. W.; Desmarchelier, J. M. 1998: Biofumigation potential of brassicas. III. In vitro toxicity of isothiocyanates to soil-borne fungal pathogens. *Plant and Soil* 201. S.103-112.
- Schließer, I.; Schuster, M.; Kolbe, H. 2010: Einfluss verschiedener Zwischenfrüchte als Vorfrüchte für die Ertrags- und Qualitätsleistung von Silomais und Kartoffeln. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Freistaat Sachsen* 27. S. 1-69.
- Schöber-Butin, B. 2001: Die Kraut- und Braunfäule der Kartoffel und ihr Erreger *Phytophthora infestans* (MONT.) DE BARY. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin Dahlem*. Heft 384. Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft. Berlin und Braunschweig.
- Schütze, W. 2012: The glucosinolates of Brassicas – a potential of biological plant protection. In: Kühne, S.; Hoffmann, J. (Hrsg.): *Proceedings. Workshop „Biological Diversity in*

- Agricultural Landscapes“ February 09-10, 2012, Berlin-Dahlem. Julius Kühn-Institut. Kleinmachnow. Julius-Kühn-Archiv 436. S. 146-152.
- Smith, B. J.; Kirkegaard, J. A. 2002: In vitro inhibition of soil microorganisms by 2-phenylethyl isothiocyanate. *Plant Pathology* 51. S. 585-593.
- Snapp, S. S.; Date, K. U.; Kirk, W.; O'Neil, K.; Kremen, A.; Bird, G. 2007: Root, shoot tissues of *Brassica juncea* and *Cereal secale* promote potato health. *Plant and Soil* 294. S. 55-72.
- Tosti, G.; Benincasa, P.; Farneselli, M.; Tei, F.; Guiducci, M. 2014: Barley-hary vetch mixture as cover crop for green manuring and the mitigation of N leaching risk. *European Journal of Agronomy* 54. S. 34-39.
- Weinert, T. L.; Pan, W. L.; Moneymaker, M. R.; Santo, G. S.; Stevens, R. G. 2002: Nitrogen Recycling by Nonleguminous Winter Cover Crops to Reduce Leaching in Potato Rotations. *Agronomy Journal* 94. S. 365-372.
- Wharton, P. S.; Kirk, W. W.; Schafer, R. L.; Tumbalam, P. 2012: Evaluation of biological seed treatments in combination with management practices for the control of seed-borne late blight in potato. *Biological Control* 63. S. 326-332.
- Wilbois, K.-P.; Kauer, R.; Fader, B.; Kienzle, J.; Haug, P.; Fritzsche-Martin, A.; Drescher, N.; Reiners, E.; Röhrig, P. 2009: Kupfer als Pflanzenschutzmittel unter besonderer Berücksichtigung des Ökologischen Landbaus. *Journal für Kulturpflanzen* 61. S. 140-152.
- Zellner, M.; Keil, S.; Benker, M. 2011: Latent infection rate of potato seed tubers with *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary – an underestimated problem. *Journal für Kulturpflanzen* 63. S. 13-16.

## 11 Veröffentlichungen

### 11.1 Artikel

Grabendorfer, S.; Reents, H.J.; Kainz, M. 2012: Phytosanitäre und ertragsphysiologische Wirkungen von Zwischenfrüchten im ökologischen Kartoffelanbau. In: Bodenfruchtbarkeit – Bedeutung und Bestimmung in Pflanzenbau und Bodenkunde. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 24. S. 262-263.

Grabendorfer, S. 2013: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau. In: Nachhaltige Erzeugung von nachwachsenden Rohstoffen. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 25. S. 84-85.

Grabendorfer, S. 2013: Biofumigation in organic potato production. In: International Conference on Organic Agriculture Sciences (ICOAS 2013) Abstracts. S. 34.

Nechwatal, J.; Grabendorfer, S. 2013: Auf dem Weg zur Kupferreduktion. BioNachrichten 5. S. 18-19.

Grabendorfer, S. 2014: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau: Effekte auf Krautfäule und Knollenerträge. In: Technik in der Pflanzenproduktion. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften mit der Max-Eyth-Gesellschaft für Agrartechnik VDI-MEG. Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften Band 26. S. 134-135.

Grabendorfer, S. 2014: Biofumigation - An Alternative Method To Control Late Blight In Organic Potato Production?. In: Rahmann, G.; Aksoy, U. (Hrsg.): Building Organic Bridges. Proceedings of the 4th ISO FAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014. 13-15 October 2014 in Istanbul, Turkey. Thuenen Report 20. Braunschweig. S. 371-374.

Grabendorfer, S. 2014: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau. Teilprojekt B: Ackerbauliche Strategien. Tagungsreader 3. Internationale Bioland und Naturland Kartoffelbautagung „Die versiertesten Bauern haben die besten Kartoffeln!“. Plankstetten, 17.11-19.11.2014.

Grabendorfer, S. 2015: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau: Effekte auf Knollenertrag, Blattnekrosen und Unkrautwachstum. In: Häring, A.M.; Hörning, B.; Hoffmann-Bahnsen, R.; Luley, H.; Luthardt, V.; Pape, J.; Trei, G. (Hrsg.): Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. Beiträge zur

13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau, Hochschule für nachhaltige Entwicklung Eberswalde, 17.-20. März 2015. S. 202-205.

Grabendorfer, S. 2015: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau. Kartoffelbau 66/8. S. 35-39.

## **11.2 Vorträge**

Grabendorfer, S. 2012: Kupferminimierungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau - Projektvorstellung. 1. Treffen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe. Freising. 20.02.2012.

Grabendorfer, S. 2012: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau - Vorstellung des Forschungsprojekts. Internationale Bioland und Naturland Kartoffelbautagung „Dran bleiben an der Qualität“. Fulda. 28.02.-01.03.2012.

Grabendorfer, S. 2013: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelbau. Teilprojekt: Ackerbauliche Strategien. Erste Ergebnisse. 2. Treffen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe. Freising. 05.02.2013.

Grabendorfer, S. 2013: Ackerbauliche Strategien zur Kupferminimierung im ökologischen Kartoffelanbau. Projektvorstellung und Zwischenergebnisse. Bioland Beratung, Fachberatung Kartoffelbau. 28.11.2013.

Grabendorfer, S. 2013: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau. 56. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Freising. 04.09.-06.09.2013.

Grabendorfer, S. 2013: Biofumigation in organic potato production. International Conference on Organic Agriculture Sciences (ICOAS 2013). Budapest und Eger. 09.10.-13.10.2013.

Grabendorfer, S. 2013: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelbau. Teilprojekt: Ackerbauliche Strategien. Projektvorstellung und Ergebnisse. 3. Treffen der projektbegleitenden Arbeitsgruppe. Freising. 10.02.2014.

Grabendorfer, S. 2014: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau: Effekte auf Krautfäule und Knollenerträge. Tagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften e. V. mit der Max-Eyth-Gesellschaft Agrartechnik VDI-MEG. Wien. 16.09.-18.09.2014.

Grabendorfer, S. 2014: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau. Teilprojekt: Ackerbauliche Strategien. 3. Internationale Bioland und Naturland Kartoffelbautagung „Die versiertesten Bauern haben die besten Kartoffeln!“. Plankstetten, 17.11-19.11.2014.

Grabendorfer, S. 2014: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau. Teilprojekt: Ackerbauliche Strategien. Fachgespräch „Kupfer als Pflanzenschutzmittel“. Berlin. 21.11.2014.

### **11.3 Poster**

Grabendorfer, S.; Kainz, M.; Reents, H.J. 2012: Kupferminimierungs- und Vermeidungsstrategien für den ökologischen Kartoffelanbau. Teilprojekt: Ackerbauliche Strategien. Internationale Bioland und Naturland Kartoffelbautagung „Dran bleiben an der Qualität“. Fulda, 28.02.-01.03.2012.

Grabendorfer, S.; Reents, H.J.; Kainz, M. 2012: Phytosanitäre und ertragsphysiologische Wirkungen von Zwischenfrüchten im ökologischen Kartoffelanbau. Bodenfruchtbarkeit – Bedeutung und Bestimmung in Pflanzenbau und Bodenkunde. 55. Jahrestagung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften. Berlin, 25.09.2012.

Grabendorfer, S. 2014: Biofumigation - An Alternative Method To Control Late Blight In Organic Potato Production?. Building Organic Bridges. 4th ISOFAR Scientific Conference at the Organic World Congress 2014. Istanbul. 13.10.-15.10.2014.

Grabendorfer, S. 2015: Biofumigation im ökologischen Kartoffelanbau: Effekte auf Knollenertrag, Blattnekrosen und Unkrautwachstum. Am Mut hängt der Erfolg - Rückblicke und Ausblicke auf die ökologische Landbewirtschaftung. 13. Wissenschaftstagung Ökologischer Landbau. Eberswalde. 17.03.-20.03.2015.

### **11.4 Verschiedenes**

Versuchsvorstellung für Landwirte der Bioland Kartoffelgruppe, Roggenstein. Bioland Beratung, Fachberatung Kartoffelbau. 20.07.2012.

LfL Ökolandbau-Feldtag 2013, Fürstenfeldbruck-Puch. Versuchsführung: „Ackerbauliche Strategien zur Kupferminimierung im ökologischen Kartoffelanbau“. 05.07.2013.

Versuchsvorstellung für Landwirte der Bioland Kartoffelgruppe, Geltendorf. Bioland Beratung, Fachberatung Kartoffelbau. 24.07.2013.

Versuchsvorstellung für Landwirte der Bioland Kartoffelgruppe, Mintraching. Bioland Beratung, Fachberatung Kartoffelbau. 26.06.2014.