

Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn

**Eignung berührungsloser Messverfahren zur Erkennung des Befalls von
Zuckerrüben durch *Heterodera schachtii* (Schmidt) und Möglichkeiten der
teilflächenspezifischen integrierten Bekämpfung**

I n a u g u r a l – D i s s e r t a t i o n

zur
Erlangung des Grades
Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)
der
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt am 10.11.2005

von
Astrid Schmitz
aus
Aachen

Referent: Prof. Dr. R.A. Sikora
Koreferent: Prof. Dr. H.W. Scherer
Tag der mündlichen Prüfung: 27.01.2006
Gedruckt bei: ABI Kopiercenter, Bonn
Erscheinungsjahr: 2006

D 98

Diese Dissertation ist auf dem Hochschulschriftenserver der ULB Bonn
http://hss.ulb.uni-bonn.de/diss_online elektronisch publiziert.

Meinem Freund Matthias und meinen Eltern

Eignung berührungsloser Messverfahren zur Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *Heterodera schachtii* (Schmidt) und Möglichkeiten der teilflächenspezifischen integrierten Bekämpfung

Zur Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *H. schachtii* und zur Differenzierung zwischen den Befallsdichten wurden Gewächshausversuche mit unterschiedlichen Zuckerrübensorten und verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten durchgeführt. Die Beobachtung der Zuckerrüben erfolgte in einem Intervall von sieben Tagen mit einer Multi-spektral- und einer Thermografiekamera sowie mit Hilfe der Laser induzierten Chlorophyllfluoreszenz (LIF) und der Puls Amplituden modulierten Chlorophyllfluoreszenz (PAM). Im frühen Befallsstadium reagierten die Zuckerrüben auf *H. schachtii*-Befall mit einem Rückgang der Photosyntheserate, bei anhaltendem Befall zusätzlich mit verringerten Stickstoff- und Chlorophyllgehalten. Zuckerrüben, die mit 500, 1000 und 1500 *H. schachtii*-Larven/100 ml Boden inokuliert wurden, unterschieden sich weder in ihren Stickstoff- und Chlorophyllgehalten noch in ihren Photosynthese- und Transpirationsraten. Auch ohne erkennbare Symptome war es im frühen Befallsstadium möglich, *H. schachtii*-befallene Rüben von nicht inokulierten Rüben mit Hilfe der LIF-Parameter 'F740' und 'Integral des Spektrums' zu unterscheiden. Bei anhaltendem Befall wurde eine Erhöhung des Parameters 'F686/F740', der Grundfluoreszenz (Fo) und ein Rückgang der photochemischen Effizienz (Fv/Fm) beobachtet. Eine Differenzierung zwischen den verschiedenen Befallsdichten war dagegen mit Hilfe der angewandten Fluoreszenzmessverfahren nicht möglich. Multispektrale Aufnahmen der inokulierten Pflanzen wiesen 28 und 35 Tage nach Inokulation signifikant niedrigere NDVI- und GNDVI-Werte auf als gesunde Rüben. Die verschiedenen Befallsdichten konnten ausschließlich in diesem späten Befallsstadium differenziert werden. Unterschiede in der Oberflächentemperatur zwischen gesunden und befallenen Zuckerrüben waren nur im ersten Stadium des Befalls zu verzeichnen als eine verringerte Transpirationsrate der Zuckerrübenblätter gemessen wurde. Zuckerrüben, die mit verschiedenen *H. schachtii*-Dichten inokuliert wurden, ließen sich nur im frühen Befallsstadium anhand der Oberflächentemperatur der Blätter differenzieren.

Zur Erkennung von *H. schachtii* im Feld wurde aus einem Helikopter die Oberflächentemperatur von zwei befallenen Zuckerrübenfeldern mit einer Thermografiekamera bei Wellenlängen von 8000 bis 12000 nm gemessen. An einem Versuchsstandort wurden bei hohem Befall (> 1500 Eier + Larven/100 ml Boden) bis zu 0,83° C höhere Oberflächentemperaturen der Zuckerrüben gemessen als bei niedrigem Befall (< 500 Eier + Larven/100 ml Boden). Die Temperaturunterschiede waren nur bei ausreichendem Wasserangebot im Boden zu beobachten. Trotz ähnlicher Standort- und Klimabedingungen wurden beim zweiten Feldversuch keine Temperaturunterschiede zwischen gering und stark befallenen Rüben festgestellt. Die Ergebnisse weisen auf die Schwierigkeiten einer zuverlässigen Erkennung von *H. schachtii* mit Hilfe thermografischer Luftbildaufnahmen hin.

Im Hinblick auf eine teilflächenspezifische Bekämpfung wurde der eiparasitäre Pilz *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) zur Kontrolle von *H. schachtii* eingesetzt. Hierzu wurden *H. schachtii*-Zysten verschiedenen Konzentrationen von PL251-Konidien ausgesetzt. Eine Steigerung der Konzentration führte zu höheren Parasitierungsraten der *H. schachtii*-Eier und erhöhter Larvenmortalität. Die Eindringungsraten von *H. schachtii* in die Zuckerrübenwurzeln waren nach zweiwöchiger Behandlung der Zysten mit PL251 signifikant niedriger als ohne Behandlung. Die besten Kontrolleffekte wurden bei über 25° C und 10⁷ Konidien/g Boden erzielt.

Suitability of different remote sensing techniques for the detection of *Heterodera schachtii* infestation on sugar beets and possibilities for site-specific nematode control

Greenhouse experiments with increasing *H. schachtii* densities and with different sugar beet varieties were conducted to detect *H. schachtii* infestation and to differentiate between varying nematode infestation levels using remote sensing methods. Gas exchange parameters, nitrogen and chlorophyll content of sugar beet leaves as well as SPAD values were measured in intervals up to seven days after nematode inoculation. Parallely, high resolution remote sensing images were taken from a near distance by a multispectral and a thermal camera. In addition, laser induced and pulse amplitude modulated chlorophyll fluorescence data was collected. Sugar beet plants reacted to *H. schachtii* infestation initially with a decrease in photosynthesis rate and later with an additional reduction in nitrogen uptake and chlorophyll concentration. In this study, sugar beet leaves infested with 500, 1000 or 1500 juveniles/100 ml of soil did not differ either in reduction of nitrogen or chlorophyll content nor in photosynthesis and transpiration rate. During early stages of nematode infestation it was possible to differentiate *H. schachtii* infested sugar beets from uninfested control plants with LIF parameters F740 and 'Integral of spectrum'. Later stages of infection were accompanied with degradation of chlorophyll content that led to an increase of F686/F740 ratio and ground fluorescence (Fo) and a decrease in photochemical efficiency (Fv/Fm). However, a discrimination of the different *H. schachtii* infestation levels was impossible by means of applied fluorescence techniques. Multispectral images of infested plants showed significantly lower NDVI and GNDVI values at later stages of infection, 28 and 35 days after inoculation. At this stage a differentiation between infestation levels was possible by means of multispectral imaging. Only during early stages of nematode infestation, 7 days after inoculation, the sugar beets showed higher transpiration rates and leaf temperatures compared to healthy plants. Sugar beets infested with 500, 1000 and 1500 juveniles/100 ml soil did not differ in their leaf temperatures.

To detect *H. schachtii* infestations in the field, crop canopy temperature of two different sugar beet fields infested with increasing nematode densities were measured from a helicopter with a thermal infrared camera at 8000 to 12000 nm. At one experimental site, high nematode infestation (> 1500 eggs + juveniles/100 ml soil) led to an increase in canopy temperature of the sugar beets up to 0.83° C compared to low infestation levels (< 500 eggs + juveniles/100 ml soil). Temperature differences were only evident when adequate soil moisture was available for proper crop development. Although environmental conditions of both experimental sites were similar, data from the second field experiment did not show any temperature differences between low and high infested sugar beets. This demonstrated the difficulties in reliability using airborne thermal images for detecting nematode infestation.

Should differentiation between different nematode infestation levels within a field be possible, growers could vary use of resistant cultivars, break crops as well as biological or chemical nematicides. In this study, the egg parasitic fungus *Paecilomyces lilacinus* strain 251 (PL251) was tested for control of *H. schachtii*. In pot trials cysts were exposed to different concentrations of PL251. Higher doses of PL251 conidia resulted in increased egg parasitism and mortality of *H. schachtii* juveniles as well as in significant lower numbers of juveniles penetrating the root system. The best level of biological control of *H. schachtii* was achieved at temperatures above 25° C and at densities of 10⁷ conidia/g soil.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis IV

1 Allgemeine Einleitung 1

1.1. Einführung in die Thematik	1
1.2. <i>Heterodera schachtii</i>	1
1.3. Fernerkundung im Präzisen Pflanzenbau	5
1.4. Spektrale Eigenschaften von Vegetation	6
1.5. Zielsetzung der Arbeit	8

2 Allgemeine Materialien und Methoden 9

2.1. <i>Heterodera schachtii</i>	9
2.1.1. Herkunft und Anzucht	9
2.1.2. Zysten- und Larvenextraktion	9
2.1.3. Bestimmung der Eindringung von <i>Heterodera schachtii</i> -Larven in das Wurzelgewebe	10
2.2. <i>Beta vulgaris</i>	11
2.3. Statistische Auswertung	11

3 Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *Heterodera schachtii* mit Hilfe berührungsloser Messverfahren 12

3.1. Einleitung	12
3.2. Material und Methoden	15
3.2.1. Berührungslose Messverfahren	15
3.2.1.1. Laser induzierte Chlorophyllfluoreszenz (LIF)	15
3.2.1.2. Puls Amplituden modulierte (PAM) Chlorophyll- fluoreszenz	15
3.2.1.3. Thermografie	15
3.2.1.4. Multispektrale Bilderfassung	16
3.2.2. Gewächshausversuche	16
3.2.2.1. Versuchsaufbau	16
3.2.2.2. Stickstoff-, Kohlenstoff- und Chlorophyllgehalt	17
3.2.2.3. Photosynthese und Transpiration	18
3.2.2.4. Sprossfrischgewicht, Wurzelfrischgewicht und Eindringung durch <i>H. schachtii</i>	18
3.2.2.5. Einsatz berührungsloser Messverfahren	19
3.2.2.5.1. LIF und PAM-Chlorophyllfluoreszenz	19
3.2.2.5.2. Thermografie	19
3.2.2.5.3. Multispektrale Bilderfassung	19
3.2.2.6. Auswertung	19
3.2.3. Feldversuche	21
3.2.3.1. Versuchsaufbau	21
3.2.3.2. Auswertung	23
3.3. Ergebnisse	24
3.3.1. Gewächshausversuche	24

3.3.1.1. Stickstoff-, Kohlenstoff- und Chlorophyllgehalt	24
3.3.1.2. Photosynthese und Transpiration	27
3.3.1.3. Sprossfrischgewicht, Wurzelfrischgewicht und Eindringung durch <i>H. schachtii</i>	30
3.3.1.4. LIF und PAM-Chlorophyllfluoreszenz	31
3.3.1.5. Thermografie	37
3.3.1.6. Multispektrale Bildanalyse	39
3.3.1.7. Pearsons Korrelationen	40
3.3.2. Feldversuche	42
3.4. Diskussion	45
 4 Biologische Bekämpfung von <i>Heterodera schachtii</i> mit dem eipathogenen Pilz <i>Paecilomyces lilacinus</i> (BIOACT® Stamm 251)	 56
4.1. Einleitung	56
4.2. Material und Methoden	58
4.2.1. <i>Paecilomyces lilacinus</i>	58
4.2.1.1. Herkunft	58
4.2.1.2. Qualitätskontrolle	58
4.2.1.3. Einarbeitung der Konidien in den Boden	59
4.2.2. <i>Heterodera schachtii</i>	59
4.2.2.1. Inokulation der Zysten	59
4.2.2.2. Bestimmung des Zysteninhaltes	60
4.2.2.3. Bestimmung der Parasitierungsrate von <i>H. schachtii</i> -Eiern durch <i>P. lilacinus</i>	60
4.2.3. Berechnung der Wirkungsgrade	61
4.2.4. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> in Abhängigkeit von der Konzentration	61
4.2.5. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> und die Eindringung von <i>H. schachtii</i> in Zuckerrüben	61
4.2.6. Einfluss der Temperatur auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> und die Eindringung von <i>H. schachtii</i> in Zuckerrüben	62
4.2.7. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf <i>H. schachtii</i> -Larven im Boden in Abhängigkeit von der Konzentration	63
4.2.8. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf <i>H. schachtii</i> -Larven im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur	63
4.3. Ergebnisse	64
4.3.1. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> in Abhängigkeit von der Konzentration	64
4.3.2. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> und die Eindringung von <i>H. schachtii</i> in Zuckerrüben	65
4.3.3. Einfluss der Temperatur auf die Parasitierung von <i>H. schachtii</i> und die Eindringung von <i>H. schachtii</i> in Zuckerrüben	66
4.3.4. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf <i>H. schachtii</i> -Larven im Boden in Abhängigkeit von der Konzentration	69
4.3.5. Einfluss von <i>P. lilacinus</i> auf <i>H. schachtii</i> -Larven im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur	70
4.4. Diskussion	72
 5 Zusammenfassung	 78

6 Literaturverzeichnis	81
7 Anhang	99

Abkürzungsverzeichnis

A	Lichtabsorption
A. <i>demin.</i>	demineralisiertes Wasser
Abb.	Abbildung
BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
bzw.	beziehungsweise
ca.	circa
cm	Zentimeter
E+L	Eier und Larven
et al.	und andere (lateinisch: et alii)
F	Fluoreszenz
Fa.	Firma
g	Gramm
GIS	Geoinformationssystem
GPS	Globales Positionierungssystem
h	Stunde
KWS	Kleinwanzlebener Saatzeit
L ₁	Larve im 1. Entwicklungsstadium
L ₂	Larve im 2. Entwicklungsstadium
LIF	Laser induzierte Fluoreszenz
m	Meter
MgSO ₄	Magnesiumsulfat
ml	Milliliter
mm	Millimeter
mM	millimolar
n	Anzahl, Wiederholungen
n.s.	nicht signifikant
NIR	nahinfrarot
NPK	Nährstoffdünger mit Stickstoff, Phosphat und Kalium
Ø	Durchmesser
P	Irrtumswahrscheinlichkeit
PAM-Fluoreszenz	Puls Amplituden modulierte Fluoreszenz
PAR	photosynthetisch aktive Strahlung (englisch: photosynthetic active radiation)
PL251	<i>Paecilomyces lilacinus</i> Stamm 251
r	Korrelationskoeffizient
R	Reflexion
RRV	Rheinischer Rübenbauerverband
s	Sekunde
Tab.	Tabelle
usw.	und so weiter
v	Volumen
vgl.	vergleiche
WG	wasserlösliches Granulat (englisch: water dispersible granulate)

ZnCl_2

Zinkchlorid

λ

Wellenlänge

ρ

Dichte

μm

Mikrometer

1 Allgemeine Einleitung

1.1. Einführung in die Thematik

In jeder landwirtschaftlich genutzten Fläche treten natürlicherweise Heterogenitäten auf. Sie beruhen auf Unterschieden in Bodenart, Verunkrautung, Wasser- und Nährstoffverfügbarkeit oder Krankheits- und Schädlingsbefall, so dass es zu Teilflächen unterschiedlicher Ertragsfähigkeit kommt (GRENZDÖRFFER, 1998). Bei einer einheitlichen Bewirtschaftungsweise werden Pflanzenschutzmittel und Düngemittel über die gesamte Fläche ausgebracht, so dass einige Teilflächen unterversorgt, andere überversorgt werden. Die gesamte Fläche bildet demnach eine Einheit. Im präzisen Pflanzenbau (precision farming) bildet dagegen eine Teilfläche die kleinste Bewirtschaftungseinheit. Mit dem Ziel einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion finden teilflächenspezifische Unterschiede entsprechend Beachtung. Auch Nematodenbefall kommt selten homogen verteilt innerhalb einer Fläche vor. Eine teilflächenspezifische Erkennung von Rübenzystennematoden und weiteren Nematodenarten sowie deren Befallsstärke ist wünschenswert, um eine variable Bekämpfung zu realisieren. Der Einsatz geeigneter biologischer Schädlingsbekämpfungsmittel wäre dann vor allem in gering bis mittel befallenen Teilschlägen möglich.

1.2. *Heterodera schachtii*

Der Rübenzystennematode *Heterodera schachtii* Schmidt ist ein weltweit verbreiteter Schädling an Zuckerrüben, der erstmals 1859 von dem Botaniker H. Schacht in Deutschland entdeckt wurde (SCHACHT 1859 a, 1859 b). Im Jahre 1871 wurde *H. schachtii* von A. Schmidt in die Systematik eingeordnet (SCHMIDT, 1871 & 1872). Der Wirtspflanzenkreis des Nematoden umfasst etwa 200 Pflanzenarten (STEELE, 1965; SCHLANG, 1991), vor allem Pflanzen der Familien *Chenopodiaceae* und *Cruciferae* (EVANS et al., 1993). Die Ertragsverluste durch *H. schachtii* können unter mitteleuropäischen Klimaverhältnissen mehr als 25 % betragen (SCHLANG, 1991). Sie sind eng korreliert mit der Populationsdichte zu Beginn der Vegetationsperiode. In Abhängigkeit von den Standortbedingungen liegt die wirtschaftliche Schadschwelle von *H. schachtii* bei einer Anfangspopulationsdichte von 500 bis 1000 Eiern und Larven/100 ml Boden (MÜLLER, 1990). Die wirtschaftliche Schadschwelle stellt diejenige Befallsdichte dar, bei deren Überschreitung ein Ertragsverlust zu erwarten ist.

H. schachtii-Befall tritt im Rübenbestand typischerweise nesterweise auf. Stark befallene Pflanzen weisen Wachstumshemmungen auf und sind heller gefärbt. Die Hauptwurzel befallener Rüben ist stark reduziert, und es kommt zu einer starken Seitenwurzelbildung, die auch als Wurzelbärtigkeit beschrieben wird (DECKER, 1969). Eine Welke der Rübenblätter ist oft bei starker Sonneneinstrahlung oder bei einem limitierten Wasserangebot im Boden zu erkennen. Weitere Symptome sind weiße oder braune zitronenförmige Weibchen an den Wurzeln.

Die Zyste ist das Überdauerungsstadium von *H. schachtii*, das zwischen 200 und 500 Eier unterschiedlicher Entwicklungsstufen beinhalten kann. Die Eier enthalten jeweils eine Larve. Larven im 1. Larvenstadium (L_1) können die Zyste nicht verlassen. Erst die sich nach der Häutung entwickelnden L_2 -Larven sind fähig, aus den Eiern zu schlüpfen, die Zyste zu verlassen und die Wurzeln der Pflanzen zu infizieren (BÖRNER, 1990). Die eingedrungenen Larven entwickeln sich zu Adulten. Die Weibchen werden sedentär, schwellen an und durchbrechen mit ihrem hinteren Ende die Wurzel, bleiben mit dem Kopfteil allerdings in der Wurzel verankert. Die Männchen verlassen die Wurzel und befruchten die Weibchen. In den zunächst weißen Weibchen reifen die Eier heran. Nach dem Absterben werden die Weibchen zu braunen zitronenförmigen Zysten und fallen von den Wurzeln ab. Die inzystierten Eier und Larven können im Boden für mehr als zehn Jahre ihre Infektiosität aufrechterhalten und durch Bodenbearbeitung mit Erntemaschinen verbreitet werden.

Sobald sich erneut eierlegende Weibchen entwickelt haben, gilt eine Generation als abgeschlossen. Hierfür wird eine Temperatursumme von 437°C benötigt, die sich aus der Summierung der über $+8^\circ \text{C}$ Tagesmitteltemperaturen ergibt (CURI & SMORAY, 1966). Wegen fehlender Diapause kann *H. schachtii* je nach Temperatur, Wirtspflanzenart und Ernährung zwei bis drei Generationen in einer Vegetationsperiode bilden. Hohe Bodentemperaturen, Korngrößen zwischen 150 und 250 μm sowie mittlere Bodenfeuchten begünstigen die Vermehrung (FICHTNER, 1986). Unter mitteleuropäischen Klimabedingungen und unter Zuckerrüben bildet *H. schachtii* zwei bis drei Generationen (JONES, 1950; DUGGAN, 1959; MÜLLER, 1979; NEJAD & DERN, 1979).

Ein erfolgreicher Zuckerrübenanbau ist langfristig nur zu realisieren, wenn die Verbreitung und Stärke des Befalls durch *H. schachtii* bekannt ist. Um die Nematodenbefallsdichte einer Fläche zu bestimmen, kann man sich verschiedener Verfahrensweisen bedienen. Eine sehr zeit- und arbeitsaufwendige Methode ist die Bodenbeprobung einer gesamten Fläche, die vor der Aussaat der Zuckerrüben vorgenommen wird. Hierbei werden bei Routineuntersuchungen

vier Mischproben pro Hektar aus jeweils ca. 40 Einstichen für einen Schlag analysiert. Eine weitere Möglichkeit zur Bestimmung der Nematodenbesatzdichte ist die gezielte Bodenbeprobung aus Befallsnestern nach der Zuckerrübenenernte. Bei dieser Methode wird allerdings nur die Populationsdichte innerhalb der Befallsnester quantifiziert, so dass das Ergebnis nicht die Besatzdichte der gesamten Fläche repräsentiert. Auch bei der 'Erdschwadbeprobung' werden teilschlagspezifische Unterschiede nicht erfasst, da ausschließlich aus dem Erdschwad, der bei der Ernte und nach der Abreinigung der Rüben am Feldrand zurückbleibt, Bodenproben entnommen werden. Zudem werden bei den beiden zuletzt genannten Methoden nur die Verseuchungsdichten zur Ernte festgestellt und nicht die Populationsdichten zu Beginn der Vegetationsperiode, die für eine Vorhersage der Ertragsverluste aussagekräftiger sind. Ertragsverluste treten nämlich insbesondere dann ein, wenn die Pfahlwurzeln der Rüben durch einen Frühbefall mit *H. schachtii* geschädigt werden (GIERTH, 2004).

EVANS et al. (2002) fanden heraus, dass einige Befallsnester von Kartoffelzystennematoden bei einem Probenahmeraster von 20 m nicht entdeckt wurden. Dies entspricht einer Anzahl von 25 Einstichen pro Hektar. Um in einem Schlag Befallsgrad und Befallsnester feststellen und gezielt Gegenmaßnahmen ergreifen zu können, sind demnach mehr als 25 Einstiche pro Hektar notwendig, die als Einzelproben analysiert werden müssen. Da Zystennematoden sich üblicherweise in Richtung der Bodenbearbeitung ausbreiten (JONES, 1980) und Befallsherde über Jahre hinweg leicht wiederzufinden sind (AVENDAÑO et al., 2003 & 2004), sind diese Erkenntnisse auf Rübenzystennematoden übertragbar.

Die Bekämpfung von Nematoden erfolgte bis zu den 80er Jahren hauptsächlich mit Hilfe chemischer Bekämpfungsmethoden. Eine biologische Bekämpfung von *H. schachtii* wurde durch die Züchtung resistenter Zwischenfrüchte wie Ölrettich- und Senfsorten Anfang der achtziger Jahre möglich. Im Rahmen der Fruchtfolge erfolgte der Anbau von Zwischenfrüchten bis vor wenigen Jahren meist als Zwischenfrucht nach frühräumenden Kulturen wie Wintergerste. Seit einiger Zeit gestaltet sich allerdings der Anbau resistenter Zwischenfrüchte als schwierig, da die Wintergerste wegen sinkender Marktpreise aus der Fruchtfolge verdrängt wurde. Der nun stattdessen häufig angebaute späträumende Winterweizen verschiebt die Aussaat der Zwischenfrüchte um einige Wochen, so dass die zum Schlupf der Nematodenlarven benötigte Bodentemperatur nicht mehr ausreicht, um eine effektive Bekämpfung zu gewährleisten. Eine weitere Alternative zur Bekämpfung von Rübenzystennematoden stellen die seit den 90er Jahren auf dem Markt eingeführten resistenten Zuckerrüben dar. Weiterhin ist eine weitgestellte Fruchtfolge, bei der Zuckerrüben

beispielsweise nur alle vier Jahre angebaut werden, eine Möglichkeit, den Befall mit Rübenzystennematoden zu kontrollieren. Durch den bei *H. schachtii* häufig vorkommenden spontanen Schlupf der Larven ohne Anwesenheit einer Wirtspflanze können auf diese Weise die Populationsdichten bis zu 30 % jährlich reduziert werden, da sich die Larven ohne Wirt nicht weiter entwickeln können. In der Praxis werden solche weitgestellten Fruchtfolgen jedoch aus betriebs- und marktwirtschaftlichen Gründen meist nicht realisiert (HEINICKE, 1990; MEINERT & MITTNACHT, 1992). Im Rahmen des integrierten Pflanzenschutzes sind daher der Einsatz resistenter Zwischenfrüchte in der Fruchtfolge und der Anbau nematodenresistenter Zuckerrüben die am häufigsten angewandten Maßnahmen zur Bekämpfung von Rübenzystennematoden. Der integrierte Pflanzenschutz verfolgt dabei das Ziel, beim Verzicht auf die alleinige Anwendung chemischer Bekämpfungsmittel, eine Integration aller möglichen Bekämpfungsmaßnahmen zu erreichen (BÖRNER, 1990). Der biologische Pflanzenschutz nimmt hierbei eine wichtige Rolle ein.

Seitdem *H. schachtii* wirkungsvoll mit Hilfe resistenter Zuckerrübensorten und resistenter Zwischenfrüchte bekämpft werden kann, sind Nematizide zur Bekämpfung des Rübenzystennematoden in Deutschland nicht mehr zugelassen. Ausschließlich Kartoffelzystennematoden und wandernde Wurzelnematoden an Gemüse, Zierpflanzen und Baumschulgehölzen dürfen derzeit in Deutschland mit Nematiziden bekämpft werden.

Eine weitere Alternative im Bereich der biologischen Bekämpfung von Nematoden könnten zukünftig in Deutschland auch biologische Nematizide bieten. Bereits in der Natur werden pflanzenparasitäre Nematoden in suppressiven Böden reduziert, besonders nach dem Anbau anfälliger Wirtspflanzen oder mehrjähriger Monokulturen (BAKER & COOK, 1974; KERRY, 1987 & 1988). Für dieses von SIKORA (1992 b) auch als 'antagonistisches Potential' eines Bodens bezeichnete Phänomen, das die Einführung oder die Ausbreitung unterschiedlichster Schadorganismen reduzieren und/oder verhindern kann, können verschiedene sowohl biotische als auch abiotische Faktoren verantwortlich sein (SIKORA, 1992 a). Zu den biotischen Faktoren, die für das 'antagonistische Potential' eines Bodens verantwortlich sind, zählen beispielsweise Bakterien, Collembolen, räuberische Nematoden, Mykorrhizapilze und eipathogene Pilze (SIKORA, 1992 b). Aber auch physikalische und chemische Eigenschaften eines Bodens, die den abiotischen Faktoren zugeordnet sind, können suppressiv auf bodenbürtige Schadorganismen wirken (HÖPER & ALABOUVETTE, 1996). Aus diesen suppressiven Böden können verschiedenste Mikroorganismen isoliert werden, um sie in der biologischen Kontrolle gegen pflanzenparasitäre Nematoden einzusetzen. Bedeutende antagonistisch wirkende bakterielle Parasiten sind *Pasteuria penetrans* mit Wirkung gegen

Wurzelgallennematoden (BIRD & BRISBANE, 1988; MINTON & SAYRE, 1989) und Rhizosphärebakterien der Gattungen *Bacillus* und *Pseudomonas*, die Gallen- und Zystennematoden unterdrücken (OOSTENDORP, 1986; RACKE und SIKORA, 1992; NEIPP & BECKER, 1999). Auch pilzliche Antagonisten wurden vermehrt an Nematoden entdeckt und ihre suppressive Wirkung gegen Zystennematoden (*Globodera* sp. und *Heterodera* sp.) (KERRY, 1988) sowie Wurzelgallennematoden (*Meloidogyne* sp.) (STIRLING et al., 1979) beschrieben. Bei antagonistischen Pilzen unterscheidet man zwischen Endoparasiten, fangenden Pilzen sowie Weibchen- und Eiparasiten (NORDBRING-HERTZ, 1988; SCHUSTER & SIKORA, 1993). Während endoparasitäre Pilze meist bewegliche Entwicklungsstadien der Nematoden mit Hilfe von Sporen befallen, fangen nematodenfangende bzw. räuberische Pilze die Nematoden mit speziellen Fangeinrichtungen und penetrieren anschließend deren Kutikula. Ein häufig gegen *H. schachtii* getesteter Pilz ist der endoparasitische Bodenzpilz *Hirsutella rhossiliensis* (TEDFORD et al., 1995), der auch gegen *Meloidogyne javanica* erfolgreich eingesetzt wurde (LACKEY et al., 1993). Auch einige Stämme des endoparasitären Pilzes *Catenaria anguillulae* zeigten eine reduzierende Wirkung auf *H. schachtii* (VOSS et al., 1992). Eine wichtige Gruppe unter den pilzlichen Antagonisten stellen die Ei- und Weibchenparasiten dar. Diese Pilze dringen durch die Zystenkutikula der Nematoden oder durch natürliche Öffnungen des Weibchens ein und parasitieren die darin befindlichen Eier und Larven (MORGAN-JONES & RODRIGUEZ-KABANA, 1985; JATALA, 1986; DOWE, 1987). Eine Besiedlung von *H. schachtii*-Weibchen durch Pilze wurde bereits 1877 beobachtet (KÜHN, 1877).

1.3. Fernerkundung im präzisen Pflanzenbau

Bei der Fernerkundung werden Objekte aus der Ferne aufgenommen, ohne dass ein direkter Kontakt des Aufnahmesystems zu dem zu erkundenden Objekt besteht (DOCKTER, 1990). Im Rahmen des präzisen Pflanzenbaus hat die Fernerkundung die Funktion, zuverlässige Standortinformationen zu liefern (BILL et al., 2002). Sensorgestützte Messverfahren ermöglichen die Datenerfassung und werden in der Präzisionslandwirtschaft gemeinsam mit GIS (Geographic Information Systems) und GPS (Global Positioning Systems) zur Generation von Applikationskarten eingesetzt. Verschiedene Sensorsysteme wie beispielsweise Multi- oder Hyperspektralsensoren, Wärmebildkameras oder Fluorometer auf unterschiedlichen Plattformen (wie zum Beispiel Flugzeug, Satellit, Traktor, Hubsteiger usw.) dienen der berührungslosen Erkennung von Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschädlingen

(vgl. 3.1.), Unkrautbefall sowie Nährstoffdefiziten.

Da sich die Reflexionsspektren einiger Nutzpflanzen von Spektren der Unkräuter signifikant unterscheiden, können verschiedene Unkrautarten in Zuckerrübenbeständen mit Hilfe optischer Sensoren erkannt werden (BILLER & IHLE, 2000). Moderne Kamerasysteme und Bildverarbeitungsprogramme sind in der Lage, Unkräuter innerhalb eines Pflanzenbestandes zu identifizieren, so dass die Generierung von Unkrautverteilungs- und Applikationskarten und somit eine teilschlagspezifische Herbizidapplikation möglich ist (SÖKEFELD et al., 1999). Eine teilflächenspezifische Düngung ist beispielsweise mit Hilfe des sogenannten 'Hydro-N-Sensors' möglich, der die Stickstoffversorgung eines Pflanzenbestandes berührungslos durch Erfassung der Reflexion im sichtbaren und infraroten Wellenlängenbereich ermittelt und 'on-line' eine variable Stickstoffapplikation ermöglicht (EHLERT, 2000; LUDOWICY et al., 2002). Weiterhin wird eine teilflächenspezifische Stickstoffausbringung mit dem sogenannten 'Pendelsensor' realisiert, der mit Hilfe eines Potentiometers den Widerstand eines Pflanzenbestandes ermittelt und dadurch Rückschlüsse auf die Pflanzendichte und somit auf den Versorgungszustand der Pflanzen zieht (EHLERT et al., 2003; EHLERT & LANGNER, 2004).

Georeferenzierte Daten zur elektrischen Leitfähigkeit und Variabilität eines Bodens bilden die Grundlage für eine teilflächenspezifische Bodenbearbeitung (SOMMER, 2003; VOSSHENRICH, 2003). Für die Ertragsprognose verschiedener Nutzpflanzen werden Ernteprognosemodelle eingesetzt, die Fernerkundungsdaten entweder mit im Feld erhobenen pflanzenphysiologischen Parametern kombinieren (RUDORFF & BATISTA, 1991; DAS et al., 1993; OUDEMANS et al., 2002) oder einen mathematischen Zusammenhang zwischen den Reflexionswerten und den Ernteerträgen voraussetzen (HAMAR et al., 1996).

1.4. Spektrale Eigenschaften von Vegetation

Mit Hilfe der Fernerkundung und der spezifischen spektralen Signatur der Vegetation besteht die Möglichkeit, reflektierte Strahlung der Vegetation auch außerhalb des für Menschen sichtbaren Lichtes zu erfassen. Spektrale Information aus dem Bereich des nahen Infrarot (700-1000 nm), des mittleren Infrarot (1000-3000 nm) und des thermalen Infrarot (3000-15000 nm) kann wichtige Aufschlüsse über den Zustand von Pflanzen geben (HATFIELD, 1990 a).

Die auf ein Blatt auftreffende elektromagnetische Strahlung wird in Abhängigkeit von der Wellenlänge und den Eigenschaften des Blattes im sichtbaren und infraroten Spektralbereich zu bestimmten Anteilen reflektiert, absorbiert und transmittiert. Im sichtbaren Spektralbereich

dominiert die Absorption der einzelnen Blattpigmente, vor allem des Chlorophylls (CHAPELLE et al., 1992). Chlorophyll *a* und *b* absorbieren blaue (400-500 nm) und rote (600-700 nm) Strahlung sehr stark, grüne Strahlung (500-600 nm) wird dagegen nur wenig absorbiert, so dass die Absorptionskurve entsprechend im grünen Spektralbereich ein deutliches Minimum bzw. die Reflexionskurve ein Maximum aufweist. Krankheitsbefall oder Mangelversorgung der Blätter mit Nährstoffen lassen sich durch den Abbau von Chlorophyll und einen Anstieg der Reflexion im sichtbaren Spektralbereich erkennen.

Im nahinfraroten Spektralbereich wird die spektrale Signatur der Pflanzen durch den Einfluss der internen Gewebestruktur der Blätter bestimmt (GAUSMANN et al., 1974; SLATON et al., 2001). Ab 700 nm steigt die Reflexionskurve aufgrund geringer Absorption von Strahlung dieses Wellenlängenbereichs durch Blatthaltstoffe stark an. Die Reflexionskurve von gesunden Pflanzen weist beim Übergang vom roten zum nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums einen steilen Anstieg auf. Der als 'Rote Kante' bezeichnete steile Anstieg der Reflexion wird von verschiedenen Fernerkundungsmethoden zur Charakterisierung von Pflanzeigenschaften genutzt. Je nach Gehalt an Chlorophyll und Pflanzenvitalität verändert sich Lage, Steigung und Höhe der 'Roten Kante' (KURZ, 2003).

Ein Anstieg der Reflexion im sichtbaren und ein Abfall im nahinfraroten Bereich des Spektrums weisen auf Pflanzenstress hin, der eine Reduktion der photosynthetisch aktiven Blattfläche zur Folge hat (NUTTER, 1987 & 1989). Bei gesunden Pflanzen wird ca. 80-90 % des absorbierten Lichtes für Photosyntheseprozesse ausgenutzt, geringere Anteile dieser Energie werden als Wärme (5-15 %) oder Fluoreszenz (0,5-2 %) abgestrahlt. Bei gestressten Pflanzen sinkt die Photosyntheserate, der Anteil an Wärme- und Fluoreszenzstrahlung kann dagegen erheblich ansteigen (LICHTENTHALER, 1996).

Im Wellenlängenbereich des mittleren Infrarot wird der größte Teil der Strahlung im Blatt absorbiert. Das folglich geringe Reflexions- und Transmissionsvermögen von Blättern in diesem Wellenlängenbereich ist auf das im Blatt gebundene Wasser zurückzuführen. Mit Hilfe der Strahlung im thermalen Infrarot kann ein Unterschied in der Transpirationsrate der Pflanzen festgestellt werden, da transpirierende Blätter kälter sind und daher weniger Wärme emittieren (GEBHARDT, 1984). Wärme in Form von Energie wird von jedem Körper abgestrahlt, der wärmer ist als 0° Kelvin (Planck'sches Strahlungsgesetz). Je nach Temperatur, Farbe und Oberflächenbeschaffenheit eines Objektes wird unterschiedlich viel Wärme im infraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums emittiert.

1.5. Zielsetzung der Arbeit

Im Hinblick auf eine zukünftige teilflächenspezifische Erkennung und Bekämpfung von *H. schachtii* standen folgende Ziele im Vordergrund:

- Erkennung von *Heterodera schachtii*-Befall an Zuckerrüben und Unterscheidung der unterschiedlichen Befallsdichten mit Hilfe berührungsloser Messverfahren
- Erprobung einer biologischen Bekämpfungsmaßnahme gegen *Heterodera schachtii*.

2 Allgemeine Materialien und Methoden

2.1. *Heterodera schachtii*

2.1.1. Herkunft und Anzucht

Die Nematodenpopulationen von *H. schachtii* stammten aus Zuchten des Instituts für Pflanzenkrankheiten der Universität Bonn. Ein steriles Felderde:Sand-Gemisch 1:2 (v:v) wurde in 0,6 l Plastiktöpfe gefüllt und Winterrapssamen (*Brassica napus* var. *napus*) der Sorte 'Akela' (Fa. Feldsaaten Freudenberger) ausgesät. Die Töpfe wurden im Gewächshaus bei durchschnittlich 20° C aufgestellt. Zwei Wochen nach Aussaat der Rapspflanzen wurden diese mit 5000 Larven des Rübenzystennematoden *H. schachtii* inokuliert. Die Pflanzen wurden täglich gegossen und einmal wöchentlich mit 10 ml einer 2 %igen NPK-Düngerlösung gedüngt (Poly Crescal®, 14-10-14). Unter den oben genannten Bedingungen war nach ca. acht Wochen ein Entwicklungszyklus von *H. schachtii* abgeschlossen, so dass die Extraktion der Zysten erfolgen konnte. Die Zysten wurden je nach Versuchsaufbau in den Boden eingearbeitet oder zur Larvengewinnung auf Oostenbrinkschalen (OOSTENBRINK, 1960) ausgelegt.

Für die Versuche zur biologischen Bekämpfung von *H. schachtii* mit *P. lilacinus* stammten die Zysten und Larven des Rübenzystennematoden aus Nematodenvermehrungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) in Elsdorf. Die Vermehrung der Nematoden erfolgte im Feld an Gelbsenf (*Sinapis alba*) der Sorte 'Albatros' (Fa. Saaten-Union).

2.1.2. Zysten- und Larvenextraktion

Die Extraktion der Zysten von infizierten Raps- oder Gelbsenfpflanzen erfolgte nach der Nasssiebmethode (modifiziert nach AYOUB, 1980). Für die Trennung der Zysten von organischen Bestandteilen und Erdpartikeln wurde eine gesättigte MgSO₄-Lösung ($\rho = 1,28 \text{ g/ml}$, Fa. Merck) verwendet. Die so gewonnenen Zysten wurden auf Oostenbrinkschalen (OOSTENBRINK, 1960) ausgelegt. Um den Larvenschlupf zu initiieren, wurden die Schalen mit 5 mM ZnCl₂ gefüllt. Die ausgewanderten infektiösen L₂-Larven konnten nach 24 Stunden mit Hilfe eines 20 µm Siebes gesammelt werden.

2.1.3. Bestimmung der Eindringung von *Heterodera schachtii* in das Wurzelgewebe

Zur Bestimmung der Eindringung von *H. schachtii* in die Wurzeln von Zuckerrüben wurden die Wurzeln mit Leitungswasser abgewaschen, vom Spross getrennt und das Wurzelfrischgewicht ermittelt. Die Wurzellänge wurde mit Hilfe eines Wurzelscanners (Agfa, Model SNAPSCAN) und der entsprechenden Software (WinRhizo, Version 5.1, Regent Instruments, Kanada) bestimmt. Anschließend wurden die Wurzeln mit einer 0,1 %igen Säurefuchsin-Milchsäurelösung (Fa. Merck) angefärbt (FERRIS, 1985). Zur Anfärbung der Nematoden innerhalb der Wurzeln wurden diese für zwei Minuten in der Mikrowelle bis zum Sieden erhitzt. Danach wurden die Wurzeln mit Wasser abgewaschen und mit einer Schere in ca. 1 cm große Stücke geschnitten und in einem Blender (Ultra-Turrax[®], IKA Labortechnik GmbH & Co. KG, Staufen) mazeriert. Die Suspension wurde auf 50 ml mit Wasser aufgefüllt und 2 x 5 ml der Probe in einer Zählkammer mit Hilfe eines Stereomikroskops ausgezählt. Alle Rübenzystennematoden in und außerhalb der Wurzeln wurden gezählt und die Anzahl an eingedrungenen Nematoden pro Wurzelsystem, Meter und Gramm Wurzel für jede Pflanze ermittelt.

2.2. *Beta vulgaris*

Bei den Gewächshausversuchen wurden Zuckerrübenpflanzen (*Beta vulgaris* L.) der Sorte 'Macarena' (Fa. Kleinwanzlebener Saatucht, KWS) verwendet. Für die Messungen der Fluoreszenz sowie für die thermografischen und multispektralen Aufnahmen wurde zudem die Sorte 'Penta' (Fa. KWS) verwendet. Beide Sorten zeichnen sich durch ihre Anfälligkeit gegenüber Nematoden aus, wobei 'Macarena' eine Resistenz gegenüber *Rizomania* aufweist. Die Zuckerrüben wurden in 0,2 l Plastiktöpfen angezogen, täglich gegossen und einmal wöchentlich mit 3 ml einer 2 %igen NPK-Düngerlösung (Poly Crescal[®], 14-10-14) gedüngt. Für die Versuche zur biologischen Kontrolle wurden Zuckerrüben in 0,6 l Töpfen angezogen und einmal pro Woche mit 10 ml einer 2 %igen Poly Crescal[®]-Düngerlösung gedüngt. Als Substrat wurde jeweils ein autoklaviertes Felderde:Sand-Gemisch 1:2 (v:v) verwendet.

Bei den Feldversuchen wurden die nematodenanfälligen Zuckerrübensorten 'Monza' (Fa. Syngenta) und 'Macarena' (Fa. KWS) sowie die *H. schachtii*-resistente Sorte 'Paulina' (Fa. KWS) verwendet.

2.3. Statistische Auswertung

Die statistische Analyse der Versuchsergebnisse erfolgte mit Hilfe des Statistikprogramms 'SPSS für Windows' (Superior Performance Software System, Inc., Chicago, Version 11.0). Die Daten wurden auf Normalverteilung und Varianzhomogenität geprüft. Bei gegebenen Voraussetzungen wurde anschließend eine Varianzanalyse (ANOVA) durchgeführt. Die Mittelwertsvergleiche der Versuchsglieder wurden nach dem Tukey HSD-Test bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 % bestimmt. Wurden zwei unabhängige Gruppen miteinander verglichen, erfolgte die Analyse mit dem T-Test für unabhängige Stichproben bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von 5 %. Korrelationen zwischen den erhobenen Parametern wurden mit Hilfe des Pearson Korrelationskoeffizienten errechnet. Signifikante Wechselwirkungen zur Erfassung des Einflusses einer Behandlung mit *P. lilacinus* und der Inkubationszeit wurden mit Hilfe einer univariaten Varianzanalyse bestimmt.

Der Einfluss steigender Konzentrationen von *P. lilacinus* Stamm 251 auf den Wirkungsgrad der Parasitierung und der Larvenmortalität wurde mit Hilfe einer Regressionsanalyse des Statistikprogramms SigmaPlot (Version 8.02., SPSS) durchgeführt.

3 Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *Heterodera schachtii* mit Hilfe berührungsloser Messverfahren

3.1. Einleitung

Oberirdische Symptome, verursacht durch die Eindringung endoparasitischer sedentärer Nematoden in das Wurzelgewebe einer Pflanze, beruhen auf der Induktion von Riesenzellen, die das Leitbahnsystem der Wurzeln schädigen und somit den Wasser- und Nährstofftransport zu den oberirdischen Pflanzenteilen beeinflussen. Nematodenbefall führt zur Schließung der Blattstomata und zu einem Rückgang der Blatttranspiration, der erhöhte Oberflächentemperaturen der Pflanzenoberfläche zur Folge hat (NICOLAS et al., 1991). Die durch Nematoden hervorgerufenen physiologischen Veränderungen in der Pflanze können weiterhin auf die Photosynthese und angegliederte Prozesse Einfluss nehmen (HUSSEY & WILLIAMS, 1998). So wurden verringerte Transpirations- und Photosyntheseraten (FATEMY, 1985; POSTUKA et al., 1986; SCHANS & ARNTZEN, 1991; ASMUS et al., 2002) sowie geringere Chlorophyllgehalte der Blätter (SIDDQUI et al., 1999; ASMUS et al., 2002) bei Pflanzen beobachtet, die mit Nematoden befallen waren. Bei hohen Befallsdichten kam es weiterhin zu Wachstumshemmungen der befallenen Pflanzen (MELAKEBERHAN & FERRIS, 1989; SCHANS & ARNTZEN, 1991).

Die 'Laser induzierte Chlorophyllfluoreszenz' (LIF) sowie die 'Puls Amplituden modulierte (PAM) Chlorophyllfluoreszenz' geben Aufschluss über die Photosyntheseleistung und den Chlorophyllgehalt von Pflanzen (CEROVIC et al., 1999; ROHACEK & BARTAK, 1999). Da Stickstoff maßgeblich an der Produktion von Chlorophyll beteiligt ist (SCHULZ et al., 1996), werden 'LIF' und 'PAM-Fluoreszenz' auch als Indikator für den Stickstoffhaushalt von Pflanzen eingesetzt (MC MURTREY et al., 1994; LIMA et al., 1999; LU et al., 2001; LANGSDORF et al., 2000; BREDEMEIER & SCHMIDHALTER, 2001). Im Rahmen einer teilschlagspezifischen Düngung kam die 'LIF' bereits als Indikator für den Stickstoffgehalt von Blättern zum Einsatz (CECCHI et al., 1994, STICKSEL et al., 2001). Sowohl die 'LIF' als auch die 'PAM-Chlorophyllfluoreszenz' können zur Erkennung von Pflanzenstress durch veränderte Chlorophyllfluoreszenz herangezogen werden. Bei gesunden Pflanzen wird nur ein geringer Anteil des photosynthetisch aktiven Lichtes als Fluoreszenz abgestrahlt, unter dem Einfluss von Stress erhöht sich dagegen der Anteil an Fluoreszenzstrahlung (vgl. 1.4.). Die sonnenlichtinduzierte Chlorophyllfluoreszenz wird vom reflektierten Licht fast vollständig überlagert. Aus diesem Grund wurden unterschiedliche Messmethoden entwickelt, welche die Fluoreszenz mit zusätzlichen Lichtquellen induzieren können ohne dabei die Photosynthese

einzuleiten. Bei der 'LIF' wird die Emission der Chlorophyllfluoreszenz mit Hilfe einer blauen Laserdiode induziert. Das Emissionsspektrum des Chlorophylls wird von den Chlorophyll-Protein-Komplexen der Photosysteme I und II gesteuert. Das Spektrum weist zwei Maxima bei den Wellenlängen 686 nm (F686) bzw. 740 nm (F740) auf. Bei der 'PAM-Chlorophyllfluoreszenz' wird die Fluoreszenz mit Hilfe unterschiedlicher Lichtquellen im Photosystem II induziert und an verschiedenen Stationen des Elektronentransportes gemessen.

Veränderte Oberflächentemperaturen von Pflanzen, verursacht durch Wasserstress (PINTER et al., 1979; WALKER & HATFIELD, 1983) oder Pflanzenkrankheiten (EYAL & BLUM, 1989; LINDENTHAL et al., 2004) wurden bereits mit Hilfe der Thermografie festgestellt. Erhöhte Bestandestemperaturen aufgrund von Nematodenbefall wurden von GEBHARDT (1984) und NICOLAS et al. (1991) thermografisch erfasst. Mit Hilfe moderner digitaler Thermografiesysteme wird die Wärmeabstrahlung von Objekten gemessen, in ein elektrisches Signal umgewandelt und anschließend in ein sichtbares digitales Falschfarbenbild (Thermogramm) transformiert.

Spektrale Charakteristika der Vegetation können unter anderem mit Hilfe von spektralen Vegetationsindizes erkannt werden (CHOUDHURY, 1997), die es ermöglichen, das Vorhandensein von Vegetation sowie ihre Eigenschaften zu beschreiben. Der am häufigsten verwendete Vegetationsindex ist der 'Normalized Difference Vegetation Index' (NDVI). Der 'NDVI' (ROUSE et al., 1973) verwendet Kanäle im roten und nahinfraroten Wellenlängenbereich. Als Maß für die photosynthetische Aktivität der Vegetation korreliert er mit Vitalität und Dichte der Vegetationsdecke und charakterisiert die Höhe der 'Roten Kante' (vgl. 1.4). Der 'Green Normalized Difference Vegetation Index' (GNDVI) (GITTELSON et al., 1996) verwendet Kanäle im grünen und infraroten Wellenlängenbereich. Dieser Index korreliert stark mit dem Chlorophyllgehalt. Zur Berechnung des 'NDVI' wird der Quotient aus der Differenz der roten und nahinfraroten Reflexion und der Summe der roten und nahinfraroten Reflexion gebildet (vgl. 3.2.2.6.). Der 'GNDVI' wird ähnlich wie der 'NDVI' berechnet, allerdings wird anstelle der Reflexion im roten Spektralbereich die grüne Reflexion verwendet. Index-Werte von ca. 0,1 symbolisieren blanken Boden. Mit zunehmendem Bedeckungsgrad der Vegetation werden Werte bis zu 1 erreicht. Störfaktoren bedingt durch die Atmosphäre oder den Sonnenstand können, sofern sie die gleiche Größe in allen Kanälen aufweisen, durch die Quotientenbildung eliminiert werden.

Multi- und hyperspektrale Aufnahmesysteme, die die Reflexion des sichtbaren und nahinfraroten Bereich des elektromagnetischen Spektrums registrieren, wurden zur Erkennung von bodenbürtigem Pilzbefall an Kartoffeln (MORGAN et al., 2002) sowie an Zuckerrüben (HOPE et al., 1999; LAUDIEN et al., 2003; STEDDOM et al., 2003) eingesetzt. In den USA konnten multispektrale Reflexionsdaten, GIS, GPS und Prognosemodelle zur Generierung von Befallskarten des regionalen Insekten- und Krankheitsaufkommens sowie zur Prognose des Befalls erfolgreich eingesetzt werden (THOMAS et al., 2002). Da nematodenbefallene Pflanzen im Vergleich zu gesunden Pflanzen häufig geringere Blattchlorophyllgehalte und im Bestand einen geringeren Bedeckungsgrad des Bodens aufweisen, ist eine Detektion des Befalls durch Aufnahme der Reflexion im sichtbaren und infraroten Spektralbereich möglich. Multispektrale Aufnahmen ermöglichten bereits eine Erkennung des Befalls von Zystennematoden in Sojabohnenbeständen (NUTTER et al., 2002) und von Wurzelgallennematoden in Baumwollfeldern (WHEELER & KAUFMAN, 2003). Zur Erkennung der räumlichen Verteilung von Nematoden in Baumwollfeldern wurden hyperspektrale Luftbilder in Kombination mit terrestrischen Referenzwerten, so genannten 'ground truth-Daten', eingesetzt (LAWRENCE et al., 2004).

Um die Ursachen möglicher nematodenbedingter Unterschiede in Fluoreszenz, Oberflächentemperatur und Reflexion an Zuckerrüben ermitteln zu können, wurden in der vorliegenden Arbeit pflanzenphysiologische Parameter wie die Photosynthese- und die Transpirationsrate sowie der Stickstoff- und Chlorophyllgehalt der Blätter unter kontrollierten Bedingungen erhoben. Folgende berührungslose Messverfahren wurden in Gewächshausversuchen auf ihre Eignung zur Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *H. schachtii* untersucht:

- Laser induzierte Chlorophyllfluoreszenz (LIF)
- Puls Amplituden modulierte (PAM) Chlorophyllfluoreszenz
- Digitale hochauflösende Thermografie
- Multispektrale Bilderfassung.

Da Ertragsverluste durch *H. schachtii* stark mit der Populationsdichte zum Saattermin korrelieren (vgl. 1.2.), wurde getestet, wie sich Reflexion, Oberflächentemperatur und Fluoreszenzsignaturen bei unterschiedlichen Nematodenbefallsdichten darstellen und ob verschiedene Befallsdichten mit Hilfe der oben erwähnten Messverfahren unterschieden werden können. Des Weiteren wurden thermografische Aufnahmen von niedrig und stark befallenen Zuckerrüben unter Feldbedingungen erhoben.

3.2. Material und Methoden

3.2.1. Berührungslose Messverfahren

3.2.1.1. Laser induzierte Chlorophyllfluoreszenz (LIF)

Die Fluoreszenz der Zuckerrübenblätter wurde durch einen blauen Laser mit einer Wellenlänge von 408 nm induziert. Der Laserstrahl wird dabei durch ein Glasfaserkabel direkt auf das Blatt gerichtet und erleuchtet einen Kreis von $0,2 \text{ cm}^2$ des Blattes. Gleichzeitig wurde die Reflexion der Blattoberfläche durch einen Helium-Neon-Laserstrahl der Wellenlänge 633 nm induziert. Mit dem Spektrometer FieldSpec™ UV/VNIR (Analytic Spectral Devices, ASD Inc., Boulder, USA) wurde die Intensität der Fluoreszenz und der Laserlichtreflexion mit einer Integrationszeit von 1,9 Sekunden registriert. Gemessen wurde die rote Fluoreszenz bei 686 nm (F686) und die infrarote Fluoreszenz bei 740 nm (F740) sowie die Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633).

3.2.1.2. Puls Amplituden modulierte (PAM) Chlorophyllfluoreszenz

Zur Messung der fluoreszierten Strahlung im Photosystem II wurde die 'PAM Chlorophyllfluoreszenz' eingesetzt und an den Blättern registriert. Zur Bestimmung der Grundfluoreszenz (F_0) wurden die Blätter mit Hilfe eines Imaging-PAM-Chlorophyll Fluorometers (PAM 2000, Heinz Walz GmbH, Effeltrich, Deutschland) mit einem blauen Lichtstrahl der Lichtintensität $0,5 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ beleuchtet. Für die Messung der maximalen Fluoreszenz (F_m) folgte dem blauen ein weißer 0,6 Sekunden anhaltender Lichtstrahl der Lichtintensität $1200 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$. Die maximale photochemische Effektivität (F_v/F_m) wurde durch die Formel $(F_m - F_0)/F_m$ berechnet.

3.2.1.3. Thermografie

Die thermografische Beobachtung der Zuckerrüben erfolgte mit Hilfe einer digitalen Infrarotthermografiekamera (JENOPTIK, Varioscan 3021-ST, InfraTec, Dresden). Das Kamerasystem arbeitet im thermischen Infrarot des elektromagnetischen Spektrums und registriert Strahlung im Bereich von 8000-12000 nm. Die geometrische Auflösung der Kamera beträgt 360×240 Pixel, die thermische Auflösung $0,03^\circ$ Kelvin. Das Kamerasystem verfügt über eine Bildfrequenz von 1-5 Bildern pro Sekunde und einen 6-fach optischen Zoom.

3.2.1.4. Multispektrale Bilderfassung

Bei dem verwendeten Kamerasystem handelte es sich um eine digitale RGB/CIR-Multispektralkamera (MS 3100, Fa. DuncanTech, San Diego, USA). Die Kamera weist eine geometrische Auflösung von 1392 x 1040 Pixel auf und besitzt drei hoch auflösende Sensoren, die Strahlung im grünen, blauen und roten Bereich des sichtbaren Lichtes (400-700 nm) und im nahinfraroten Bereich des Spektrums (700-1100 nm) aufnehmen kann.

3.2.2. Gewächshausversuche

3.2.2.1. Versuchsaufbau

In den Gewächshausversuchen wurden parallel zwei Experimente mit unterschiedlichen Zuckerrübensorten angesetzt. Bei beiden Zuckerrübensorten handelte es sich um *H. schachtii*-anfällige Sorten. Im ersten Experiment wurde die Zuckerrübensorte 'Macarena', im zweiten Experiment die Sorte 'Penta' verwendet. Anzucht und Düngung der Zuckerrüben (vgl. 2.2.) erfolgte im Gewächshaus bei Tag-/Nachttemperaturen von ca. 26° C bzw. 22° C, einer Lichtintensität von ca. 200 $\mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und 69 % Luftfeuchtigkeit. Fünf Tage vor den Messungen mit den verschiedenen Messverfahren, wurden die Pflanzen gedüngt, um mögliche Düngungseffekte auf die Fluoreszenz- und Reflexionssignaturen zu verhindern. Die Experimente wurden einmal wiederholt, wobei im Folgenden jeweils nur die Daten eines Versuchs dargestellt sind.

Die Nematodeninokulation der Rüben erfolgte zwei Wochen nach Aussaat der Zuckerrübensamen. Die *H. schachtii*-Larven wurden 2 cm neben dem Wurzelhals der Pflanzen in eine ca. 2 cm tiefe Vertiefung inokuliert, die kurz vorher mit Hilfe einer Pipette vorbereitet worden war. Um ein Austrocknen der Nematoden zu verhindern, wurden die Löcher nach der Inokulation wieder mit Erde bedeckt. Die Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' wurden mit 0, 1000, 2000 und 3000 L₂-Larven von *H. schachtii* pro Topf inokuliert, dies entspricht einer Nematodendichte von 0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden. Zuckerrüben der Sorte 'Penta' wurden mit *H. schachtii*-Populationsdichten von 0 und 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert. Die *H. schachtii*-Larven stammten aus Nematodenvermehrungen des Instituts für Pflanzenkrankheiten der Universität Bonn (vgl. 2.1.1.).

Eine Woche nach der Nematodeninokulation wurden in einem Intervall von sieben Tagen an jeweils fünf Pflanzen pro Variante pflanzenphysiologische und -morphologische Parameter analysiert. Weiterhin wurden die Pflanzen mit vier verschiedenen berührungslosen Messverfahren untersucht. Im ersten Experiment, bei dem die Sorte 'Macarena' verwendet wurde, erfolgte die Bestimmung der Parameter 7, 14, 21, 28 und 35 Tage nach Inokulation. Bei der Sorte 'Penta' wurden die Messungen bis einschließlich 28 Tage nach Inokulation vorgenommen. Die Bestimmung des Sprossfrischgewichts, des Stickstoff- und Chlorophyllgehaltes wurde bei dieser Sorte ausschließlich sieben und 28 Tage nach Inokulation vorgenommen. Die Bestimmung des Wurzelfrischgewichtes sowie der Eindringung von *H. schachtii* in die Zuckerrübenwurzeln erfolgte bei beiden Zuckerrübensorten jeweils am Ende der Versuchsreihen.

3.2.2.2. Stickstoff-, Kohlenstoff- und Chlorophyllgehalt

Am Ende jeder wöchentlichen Messreihe mit den verschiedenen Messverfahren wurde der gesamte Blattapparat abgetrennt und bei 70° C für 48 Stunden im Trockenschrank getrocknet und anschließend zu einem Pulver zermahlen. Der Gehalt an Stickstoff und Kohlenstoff jeder Pflanze wurde mit Hilfe eines C/N Analysegerätes (NA 1500, Carlo Erba Instrumentazione, Milano, Italien) ermittelt.

Die Bestimmung des Chlorophyllgehaltes der Blätter erfolgte modifiziert nach der Methode von LICHTENTHALER (1987). Zu jedem Messtermin wurden 2,5 cm² große Blattausschnitte mit Hilfe eines Korkbohrers herausgetrennt und anschließend in Kunststoff-Reaktions-Gefäßen bei -20° C gelagert. Bei der anschließenden Bestimmung des Chlorophyllgehaltes wurde 96 %iges Ethanol als Extraktionsmittel verwendet. Die Blattausschnitte wurden gewogen und mit 5 ml des Extraktionsmittels für 1½ Minuten in einer Rüttelmühle (Retsch, MM2, Haan, Deutschland) mazeriert. Nach dem Abzentrifugieren des Homogenats wurde von einem 2 ml Aliquot der Pigmentlösung die Lichtabsorption in einem Spektralphotometer (Shimadzu UV-VIS, UV-160 Shimadzu Corporation, Kyoto, Japan) gemessen. Die Lichtabsorption (A) wurde bei den Wellenlängen $\lambda = 664,2$ nm und $\lambda = 648,9$ nm bestimmt.

Die Berechnung der Pigmentkonzentrationen von Chlorophyll *a* (C_a) und Chlorophyll *b* (C_b) erfolgte nach den Gleichungen:

$$C_a = 13,95 * A_{664,2} - 6,88 * A_{648,9}$$

$$C_b = 24,96 * A_{648,9} - 7,32 * A_{664,2}$$

Des Weiteren wurde an jedem für die Fluoreszenzmessungen herangezogenen Blatt der Chlorophyllgehalt der Blätter mit einem SPAD-Meter (Typ 502, Fa. Minolta) bestimmt. Dazu wurden an jeder Pflanze drei Messungen vorgenommen und der Mittelwert daraus zur Berechnung eines SPAD-Wertes verwendet. Die Generierung der SPAD-Werte erfolgt durch Messung der Lichtdurchlässigkeit eines Blattes bei 650 nm, ein SPAD-Wert bestimmt damit indirekt den Gehalt an Chlorophyll (BLACKMER & SCHEPERS, 1995).

3.2.2.3. Photosynthese und Transpiration

Mit Hilfe eines tragbaren Porometers Typ CIRAS-1 (PPSystems, Hitchin, UK) mit automatischem Gaswechsel und einer Blattkammer des Typs PLC-B wurden die Photosyntheserate ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$), die Transpirationsrate ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sowie die stomatäre Leitfähigkeit ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2}\text{s}^{-1}$) und intrazelluläre CO_2 -Konzentration (ppm) an jeweils einem Blatt jeder Versuchspflanze gemessen. Hierzu wurden die Zuckerrübenblätter seitlich in die Blattkammer eingespannt. Die Messungen wurden bei einer Lichtintensität von $200 \mu\text{mol PAR m}^{-2}\text{s}^{-1}$ und einer CO_2 -Konzentration in der Blattkammer von $400 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$ zwischen 10⁰⁰ und 12⁰⁰ Uhr durchgeführt. Die Durchflussrate innerhalb der Blattkammer wurde auf 220 ml min^{-1} eingestellt.

3.2.2.4. Sprossfrischgewicht, Wurzelfrischgewicht und Eindringung durch *H. schachtii*

Um eine eventuelle Reduktion des Sprossfrischgewichtes durch *H. schachtii* zu erfassen, wurde am Ende jeder Messreihe das Sprossfrischgewicht einer jeden Pflanze bestimmt. Bei der Zuckerrübensorte 'Penta' wurde dieser Parameter am ersten und letzten Messtermin ermittelt. Am Ende der Versuchsreihe wurde bei beiden Sorten das Wurzelfrischgewicht gemessen und die Anzahl eingedrungener Nematoden pro Wurzelsystem, pro Gramm und pro Meter Wurzel ermittelt (vgl. 2.1.3.).

3.2.2.5. Einsatz berührungsloser Messverfahren

3.2.2.5.1. LIF und PAM-Chlorophyllfluoreszenz

Vor Beginn der Fluoreszenzmessungen wurden die Zuckerrüben für 20 Minuten an die Dunkelheit adaptiert. Die Messungen der Fluoreszenz mit Hilfe der 'LIF' und der 'PAM-Chlorophyllfluoreszenz' erfolgten bei jeder Pflanze an der Oberseite des größten vollentwickelten Blattes.

3.2.2.5.2. Thermografie

Die thermografischen Aufnahmen erfolgten in der Klimakammer bei einer Umgebungstemperatur von 25° C und 40 % Luftfeuchtigkeit. Zwölf Stunden vor Aufnahmebeginn wurden die Pflanzen zur Adaption an die Temperaturverhältnisse in die Klimakammer gestellt. Die Aufnahmen erfolgten mit der digitalen Thermografiekamera aus einer Entfernung von einem Meter und aus einem Winkel von 45°. Bei jeweils einer Aufnahme wurde die Wärmeemission einer nicht behandelten Kontrollpflanze und einer nematodenbefallenen Pflanze ermittelt.

3.2.2.5.3. Multispektrale Bilderfassung

Die multispektralen Aufnahmen der Zuckerrüben erfolgten mit der digitalen Multispektralkamera unter definierten Lichtbedingungen. In einer fahrbaren Messkammer, hergestellt im Institut für Pflanzenbau der Universität Bonn, die mit vier 40 Watt Glühlampen ausgeleuchtet war, wurden Aufnahmen von jeweils einer Pflanze aus einem Winkel von 90° und einer Entfernung von einem Meter vorgenommen.

3.2.2.6. Auswertung

Die Fluoreszenzparameter 'F686/F740', 'R633/F686' und 'R633/F740' sowie das Integral des Spektrums der roten und infraroten Fluoreszenz (I) wurden mit der Software 'Origin' (Microcal Software, Northampton, MA, USA) ermittelt. Die Aufnahmen der 'PAM-Fluoreszenz' wurden mit Hilfe der Verarbeitungssoftware 'ImagingWin' für Windows ausgewertet.

Die Auswertung der Thermogramme erfolgte mit der Software 'IRBIS' (InfraTec GmbH, Dresden). Aufgrund schwankender Umgebungstemperaturen in der Klimakammer wurden bei

der Auswertung keine absoluten Temperaturen verwendet, sondern Temperaturunterschiede zwischen Kontrollpflanzen und den entsprechenden Varianten berechnet. Hierzu wurde die mittlere Oberflächentemperatur der Kontrollpflanzen von den jeweiligen Oberflächentemperaturen der mit verschiedenen Nematodendichten inokulierten Rüben abgezogen. Um eine Korrelation zwischen den Temperaturunterschieden und Photosynthese- sowie Transpirationsraten festzustellen, wurden die Differenzen zwischen den gemessenen Transpirations- und Photosyntheseraten der Kontrollpflanzen und den Transpirations- und Photosyntheseraten der inokulierten Zuckerrüben berechnet und die Korrelation bestimmt.

Die Analyse der multispektralen Aufnahmen erfolgte mit Hilfe der Software 'Erdas Imagine', Version 8.4. (Fa. Leica Geosystems GIS & Mapping, Atlanta, USA). Die Reflexion im roten (Rot), grünen (Grün) und nahinfraroten (NIR) Spektralbereich wurde zur Berechnung der Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' herangezogen. Die Berechnung des 'NDVI' erfolgt nach der Formel: $NDVI = \frac{NIR - Rot}{NIR + Rot}$. Der 'GNDVI' wird folgendermaßen berechnet:

$$GNDVI = \frac{NIR - Grün}{NIR + Grün}.$$

3.2.3. Feldversuche

3.2.3.1. Versuchsaufbau

Als Datengrundlage für eine teilschlagspezifische Erkennung des Schädling dienten thermografische Luftbilder von zwei Zuckerrübenslägen mit unterschiedlich hohem *H. schachtii*-Befall. Von Juni bis August 2003 wurden an vier Terminen Aufnahmen der Zuckerrübenbestände mit einer thermalen Infrarotkamera (vgl. 3.2.1.3.) vorgenommen. Die thermografischen Aufnahmen wurden gegen 11³⁰ bzw. 12⁰⁰ Uhr Ortszeit von einem Helikopter aus 200 m Höhe und einem Winkel von ca. 60° durchgeführt. Die Thermogramme wiesen dadurch eine räumliche Auflösung von 50 cm auf (vgl. Abb. 1). Die Versuchsflächen befanden sich an zwei verschiedenen Standorten in Nordrhein-Westfalen. Einer der Parzellenversuche war auf dem Institutsgelände der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA) in Elsdorf angelegt (Abb. 1). Die einzelnen Parzellen maßen eine Größe von 1,5 m x 4,5 m. Lufttemperatur, Luftfeuchtigkeit sowie Niederschlagsmenge und Verdunstung wurden durch eine Wetterstation am Rande des Versuchsfeldes erfasst. Für jeden Überflugtermin wurde die klimatische Wasserbilanz aus den Mittelwerten der vergangenen zehn Tage berechnet. Die klimatische Wasserbilanz spiegelt den Wassergehalt des Bodens wider und wird nach folgender Formel berechnet:

$$\text{Klimatische Wasserbilanz} = \text{Niederschlagshöhe [mm]} - \text{Verdunstung [mm]}.$$

Laut einer Karte der Reichsbodenschätzung von 1938 (Deutsche Grundkarte 1:5000 auf der Grundlage der Bodenschätzung, Elsdorf West, herausgegeben vom Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1955) herrscht am Standort Elsdorf ein stark feinsandiger Lehm Boden vor. Der Bodentyp wird als stark gleyartige Braunerde angegeben. Auf der Versuchsfläche wurden die nematodenanfällige Zuckerrübensorte 'Monza' und die *H. schachtii*-resistente Sorte 'Paulina' randomisiert eingesät. Zur Induktion der verschiedenen Nematodenbefallsdichten wurden im Rahmen der Fruchtfolge im Jahr vor der Zuckerrübensaat resistente und anfällige Zwischenfrüchte in den einzelnen Parzellen eingesät. Für eine Erhöhung der Populationsdichte von *H. schachtii* wurde die nematodenanfällige Ölrettich Sorte 'Siletina' (Fa. Saaten-Union) (3 g Saatgut/m²), zur Reduktion der Besatzdichte die nematodenresistente Ölrettichsorte 'Colonel' (Fa. Saaten-Union) (3 g Saatgut/m²) verwendet. Eine mittlere Besatzdichte wurde durch eine Mischung der beiden Ölrettichsorten (1,5 g Siletina/m² und 1,5 g Colonel/m²) induziert. Der Nematodenbefall wurde in jeder Parzelle vor der Zuckerrübenaussaat mit Hilfe eines Bohrstocks von 5 cm Durchmesser durch Mitarbeiter der BBA bestimmt. Aus dem Kernbereich jeder 5 x 5 m Parzelle wurden vor der Aussaat

16 Bodenproben gezogen, dies entspricht einem Einstich pro m². Anschließend wurde die Anfangspopulationsdichte von *H. schachtii* in Eiern und Larven pro 100 ml Boden determiniert.

Der Versuch am Standort Kelz (Gemeinde Vettweiß) war ein Gemeinschaftsversuch der BBA in Elsdorf, der Zuckerfabrik Jülich und dem Rheinischen Rübenanbauerverband (RRV). Die einzelnen Parzellen hatten eine Größe von 8 m x 3 m. Als Zuckerrübensorten wurden die nematodenanfällige Sorte 'Macarena' und die *H. schachtii*-resistente Sorte 'Paulina' eingesät. Die vorherrschende Bodenart am Versuchstandort ist ein feinsandiger Lehm Boden, der Bodentyp wird in Bodenkarten der Reichsbodenschätzung als Braunerde angegeben (Deutsche Grundkarte 1:5000 auf der Grundlage der Bodenschätzung, Kelz Nordwest, herausgegeben vom Landesvermessungsamt Nordrhein-Westfalen, 1955). Die Wetterdaten wurden von der nächstgelegenen Wetterstation des Deutschen Wetterdienstes in Nörvenich erfragt. Die Induktion der verschiedenen Nematodenbefallsdichten sowie die Bodenprobenahme und -analyse erfolgte wie am Standort Elsdorf, allerdings wurde bei der Einstellung der Befallsdichten als resistente Ölrettichsorte die Sorte 'Adagio' (Fa. Saaten-Union) verwendet.

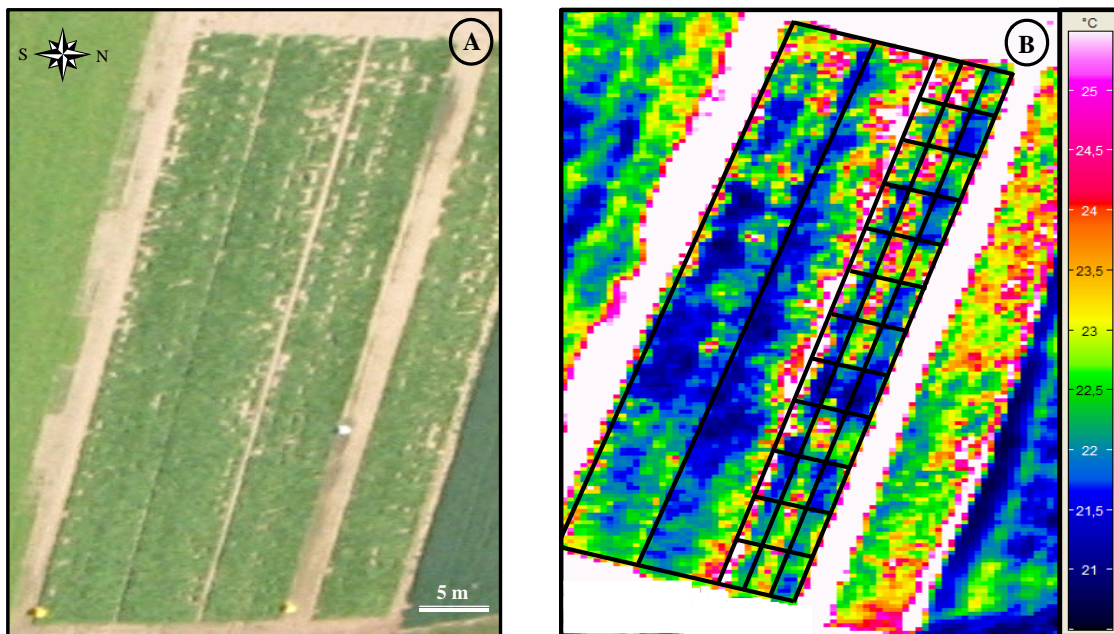


Abb. 1: Digitalbild des Versuchsfeldes in Elsdorf (A) und Thermogramm des Versuchsfeldes mit Parzelleneinteilung rechts (B), aufgenommen am 13.06.03.

3.2.3.2. Auswertung

Da im Juni der Rübenbestand in Elsdorf durch Spätfrost noch nicht vollständig geschlossen war, wurden nur diejenigen Parzellen in die Auswertung einbezogen, die nach einer Bearbeitung mit der Bildbearbeitungssoftware (APS-ASSESS[®], University of Manitoba, Winnipeg, Kanada) keinen Bodenanteil aufwiesen. Die anschließende Bildbearbeitung wurde mit der Software IRBIS[®] (InfraTec GmbH, Dresden) vorgenommen. Auf Basis der Ausgangsverseuchungsdichten, die vor der Aussaat der Zuckerrüben für jede Versuchsparzelle bestimmt wurden, wurden die Parzellen in Klassen unterschiedlich hohen *H. schachtii*-Befalls eingeteilt. Um herauszufinden, ob auch geringe Befallsdichten im Bereich der wirtschaftlichen Schadschwelle (vgl. 1.2.) durch thermografische Luftbilddaufnahmen erkennbar sind, wurde die Einteilung wie folgt gewählt:

- niedriger Befall: < 500 Eier und Larven/100 ml Boden
- mittlerer Befall: 500-1500 Eier und Larven/100 ml Boden
- hoher Befall: 1500-3500 Eier und Larven/100 ml Boden.

3.3. Ergebnisse

3.3.1. Gewächshausversuche

3.3.1.1. Stickstoff-, Kohlenstoff- und Chlorophyllgehalt

Drei Wochen nach der Nematodeninokulation wurden bei der Zuckerrübensorte 'Macarena' erstmals niedrigere Stickstoff- und Chlorophyllgehalte der Blätter bei allen inokulierten Pflanzen im Vergleich zu den Kontrollpflanzen festgestellt (Abb. 2). Die größte Reduktion des Blattstickstoffgehaltes (-40 bis -50 %) und Chlorophyllgehaltes (-36 bis -48 %) im Vergleich zur Kontrolle, wurde am letzten Untersuchungstermin, 35 Tage nach Inokulation, beobachtet (Daten in % nicht gezeigt). Eine signifikante Reduktion der SPAD-Werte bei allen inokulierten Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' wurde erstmals 28 Tage nach Inokulation festgestellt (Abb. 2). Zuckerrüben, die mit unterschiedlichen Populationsdichten von *H. schachtii* inokuliert wurden, unterschieden sich weder signifikant in ihrem Stickstoff- und Chlorophyllgehalt, noch in den gemessenen SPAD-Werten. Die Blätter der Zuckerrüben wiesen Kohlenstoffgehalte zwischen 28,3 bis 36,8 % in der Trockenmasse auf (Tab. A1). Der Kohlenstoffgehalt der Blätter war durch die Inokulation mit Nematoden nicht signifikant beeinträchtigt.

Bei der Zuckerrübensorte 'Penta' wurden der Stickstoff- und Kohlenstoffgehalt der Blätter ausschließlich sieben und 28 Tage nach Inokulation bestimmt. Bereits sieben Tage nach der Inokulation mit 1500 Larven/100 ml Boden wurden 42 % niedrigere Blattstickstoffgehalte als bei den Kontrollpflanzen beobachtet (Daten in % nicht gezeigt). Diese Unterschiede waren nicht signifikant. Vier Wochen nach Inokulation wurde bei den inokulierten Pflanzen eine signifikante Reduktion des Stickstoffgehaltes beobachtet. Der Kohlenstoffgehalt der inokulierten Rüben lag sieben Tage nach Inokulation bei 35,4 % und war damit nicht signifikant niedriger als der Kohlenstoffgehalt der nicht inokulierten Rüben, der bei 36,5 % lag. Dagegen wiesen 28 Tage nach Inokulation die inokulierten Rüben eine deutliche, wenn auch nicht signifikante Reduktion des Kohlenstoffgehaltes auf: Bei *H. schachtii*-befallenen Pflanzen wurden Kohlenstoffgehalte von 21,2 % ermittelt, bei nicht befallenen Rüben Kohlenstoffgehalte von 34,0 %. Vier Wochen nach Inokulation wurden um 50 % niedrigere Chlorophyllgehalte der inokulierten Zuckerrüben im Gegensatz zu den Kontrollpflanzen festgestellt (Abb. 3; Daten in % nicht gezeigt). Eine signifikante Reduktion der SPAD-Werte von inokulierten Zuckerrüben der Sorte 'Penta' wurde bereits 21 Tage nach Inokulation beobachtet.

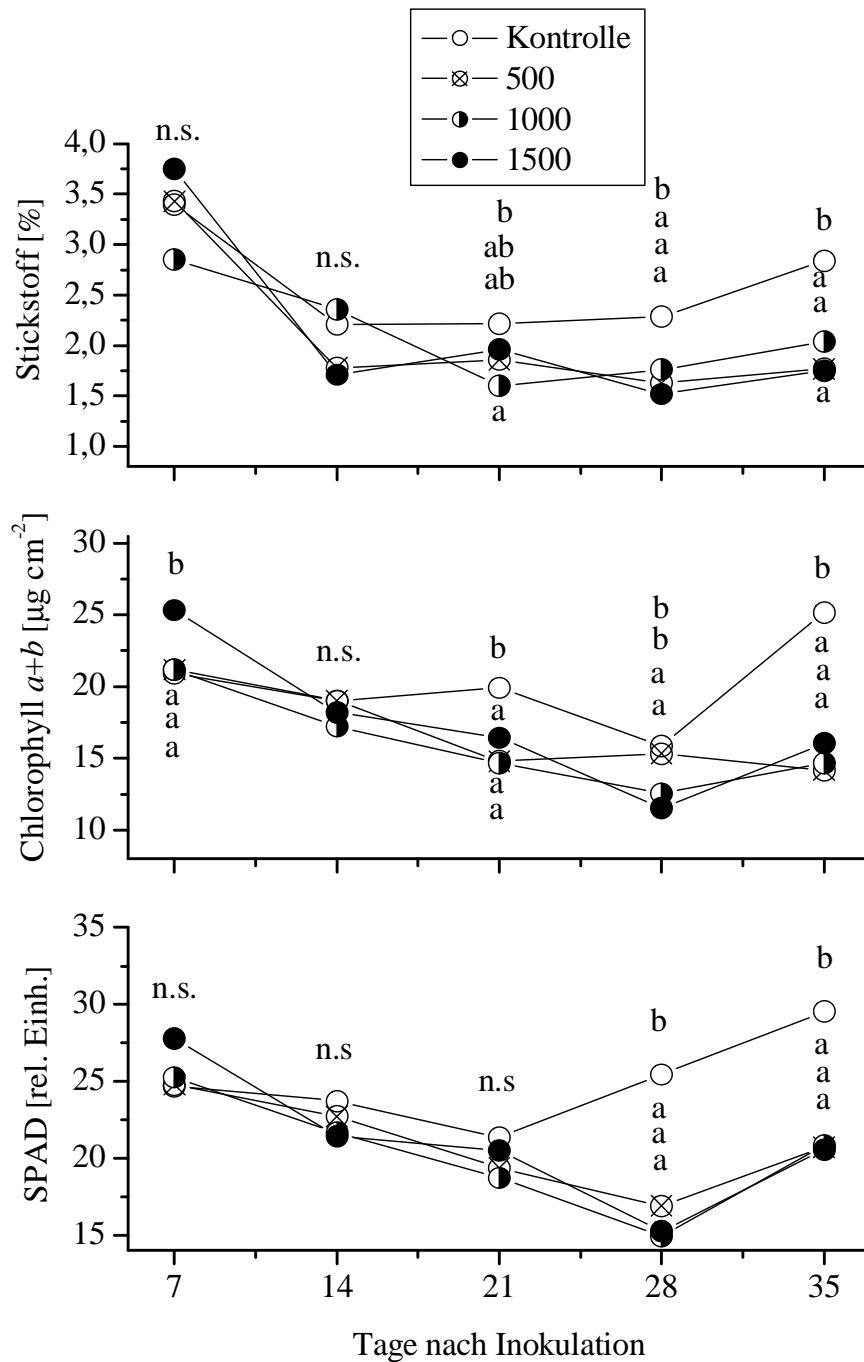


Abb. 2: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle), 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf den Stickstoff- [%] und Chlorophyllgehalt [$\mu\text{g cm}^{-2}$] sowie auf die SPAD-Werte [relative Einheiten] von Blättern der Zuckerrübensorte 'Macarena'.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

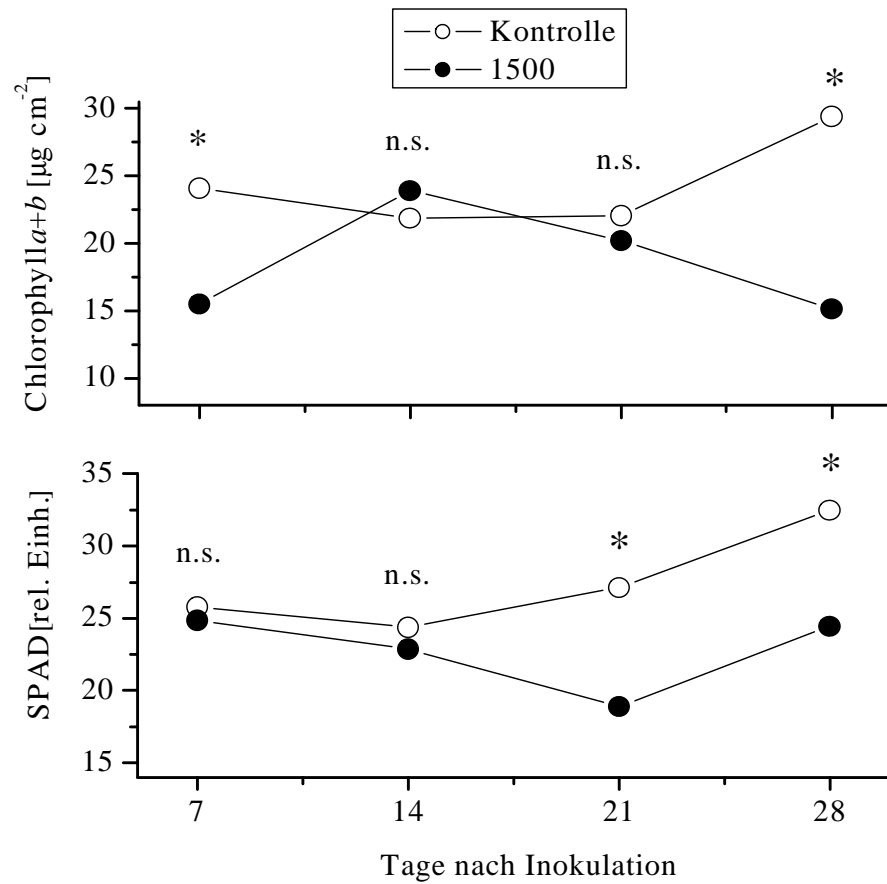


Abb. 3: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle) und 1500 Larven/100 ml Boden] auf den Chlorophyllgehalt [$\mu\text{g cm}^{-2}$] und die SPAD-Werte [relative Einheiten] von Blättern der Zuckerrübensorte 'Penta'.

* = Werte an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

3.3.1.2. Photosynthese und Transpiration

Bei Zuckerrüben der Sorte 'Macarena', die mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokuliert wurden, konnte bereits sieben Tage nach der Nematodeninokulation eine reduzierte Photosyntheserate festgestellt werden (Abb. 4). An allen weiteren Messterminen wiesen alle inokulierten Zuckerrüben signifikant niedrigere Photosyntheseraten als die Kontrollpflanzen auf. Signifikant niedrigere Transpirationsraten der inokulierten Zuckerrüben im Vergleich zu den Kontrollpflanzen konnten bei der Sorte 'Macarena' an den ersten beiden Untersuchungsterminen beobachtet werden. Im Zeitverlauf nahmen die Unterschiede in der Transpirationsrate zunehmend ab. Ebenso wurde eine tendenziell abnehmende stomatäre Leitfähigkeit der inokulierten Zuckerrüben im Vergleich zu den gesunden Pflanzen im Verlauf des Experimentes beobachtet. Rüben, die mit unterschiedlichen *H. schachtii*-Populationsdichten inokuliert wurden, unterschieden sich nicht signifikant in der Photosynthese- und Transpirationsrate noch in der stomatären Leitfähigkeit der Blätter. An allen Untersuchungsterminen wiesen die Kontrollpflanzen eine niedrigere intrazelluläre CO₂-Konzentration auf als die inokulierten Pflanzen (Tab. A2). Signifikante Unterschiede zwischen den Varianten waren 14 Tage nach Inokulation zu beobachten.

Die Photosyntheseraten der inokulierten Rüben der Sorte 'Penta' waren an allen Messterminen signifikant niedriger als bei den Kontrollpflanzen (Abb. 5). Signifikant niedrigere Transpirationsraten der Blätter wurden ausschließlich an den ersten beiden Messterminen beobachtet. Zwar war bei den inokulierten Rüben eine tendenzielle Abnahme der stomatären Leitfähigkeit im Verlauf des Versuchs zu beobachten, doch war die stomatäre Leitfähigkeit der inokulierten Rüben an allen Terminen signifikant niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Die intrazelluläre CO₂-Konzentration der Kontrollpflanzen war an allen Untersuchungsterminen niedriger als bei den inokulierten Pflanzen. Signifikante Unterschiede zwischen den Kontrollpflanzen und den inokulierten Zuckerrüben wurden sieben und 21 Tage nach der Nematodeninokulation beobachtet (Tab. A3).

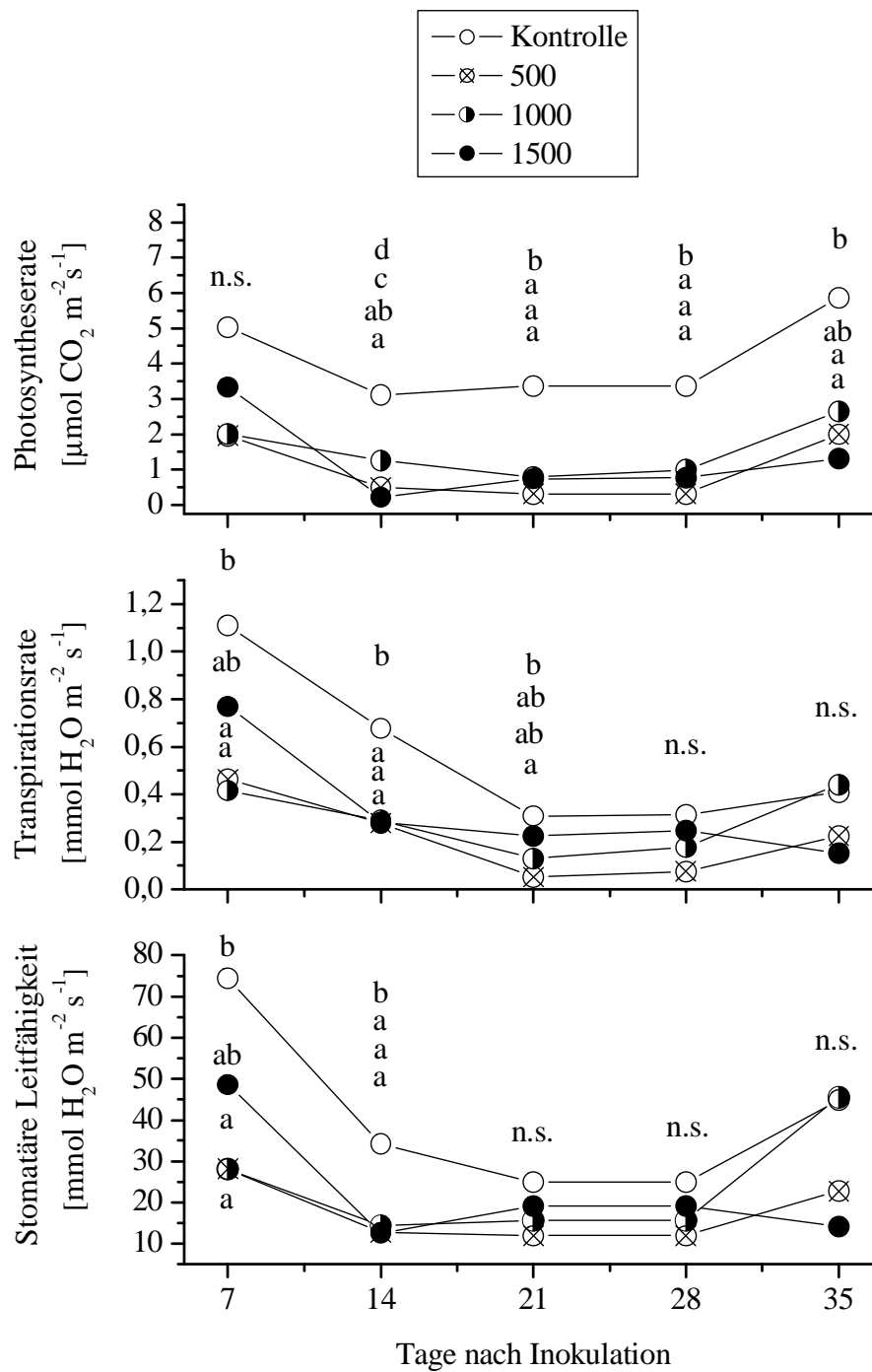


Abb. 4: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle), 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Photosyntheserate, Transpirationsrate und die stomatäre Leitfähigkeit von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Macarena'.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

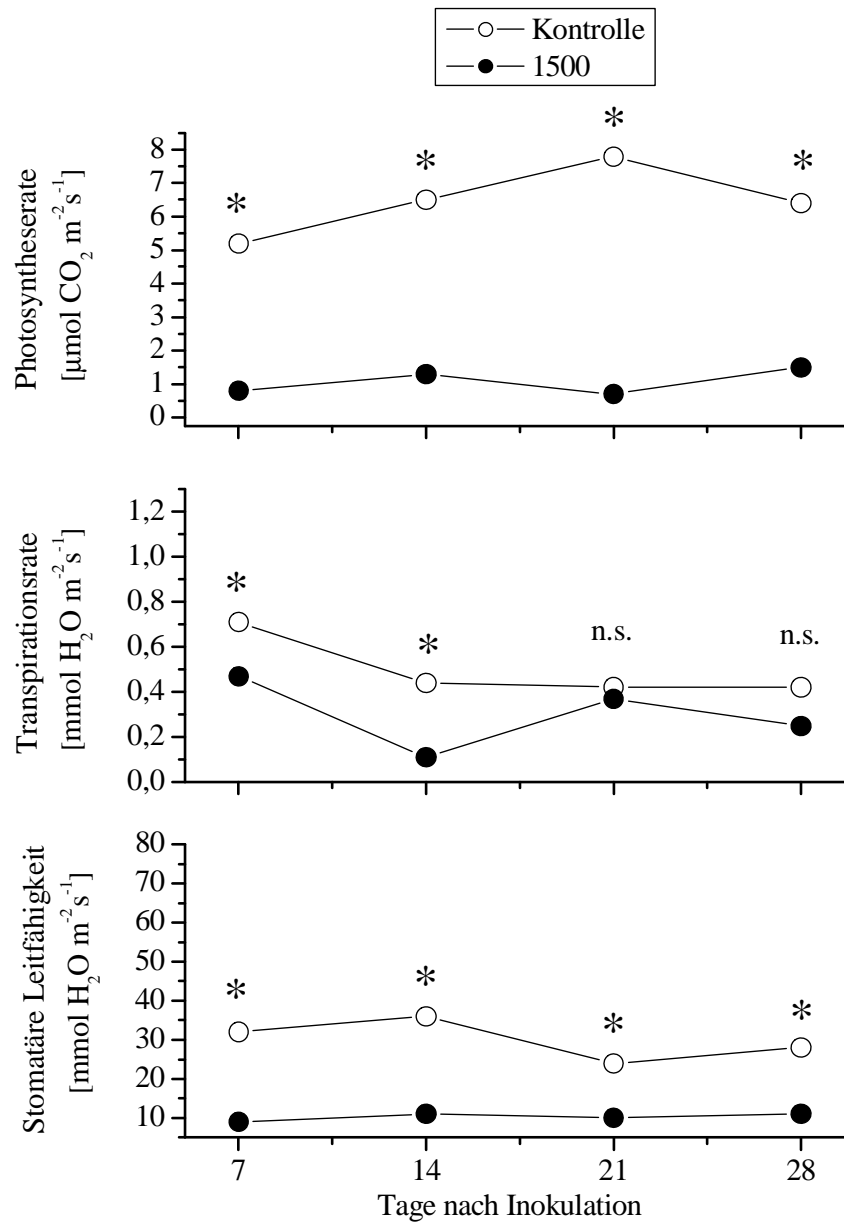


Abb. 5: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle) und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Photosyntheserate, Transpirationsrate und die stomatäre Leitfähigkeit von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Penta'.

* = Werte an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

3.3.1.3. Sprossfrischgewicht, Wurzelfrischgewicht und Eindringung durch *H. schachtii*

An keinem Messtermin hatte eine Inokulation mit *H. schachtii* einen Einfluss auf das Sprossfrischgewicht von Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' (Tab. A4). Mit zunehmender Nematodendichte wurden 35 Tage nach Inokulation geringere Wurzelfrischgewichte sowie höhere Eindringungsraten von *H. schachtii* in die Wurzeln beobachtet (Tab. 1). Alle inokulierten Rüben waren durch signifikant niedrigere Wurzelfrischgewichte und signifikant höhere Eindringungsraten im Vergleich zu den Kontrollpflanzen zu unterscheiden. Weiterhin waren die Eindringungsraten pro Gramm und Meter Wurzel sowie das Wurzelfrischgewicht bei Zuckerrüben, die mit Populationsdichten von 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden, signifikant höher bzw. niedriger als bei Rüben, die mit 500 und 1000 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden.

Das durchschnittliche Sprossfrischgewicht von Zuckerrüben der Sorte 'Penta' wurde ausschließlich 28 Tage nach Inokulation bestimmt. An diesem Messtermin lag das Sprossgewicht von Rüben, die mit 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden, bei 0,79 g und war somit signifikant niedriger als bei den nicht inokulierten Rüben, die nach dem T-Test (bei $P = 0,05$ und $n = 5$) im Durchschnitt Sprossfrischgewichte von 1,5 g aufwiesen. Die inokulierten Zuckerrüben der Sorte 'Penta' wiesen am Ende der Versuchsreihe, 28 Tage nach Inokulation, signifikant niedrigere Wurzelfrischgewichte als die Kontrollpflanzen auf: das durchschnittliche Wurzelfrischgewicht der Kontrollpflanzen lag bei 2,06 g, das der inokulierten Rüben bei 0,64 g. Bei inokulierten Zuckerrüben wurden am Ende der Versuchsreihe 579 Nematoden pro Wurzelsystem, 1043 Nematoden pro Gramm Wurzel und 279 Nematoden pro Meter Wurzel beobachtet.

Tab. 1: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf das Wurzelfrischgewicht sowie auf die Eindringung von *Heterodera schachtii* pro Wurzelsystem, Gramm und Meter Wurzel von Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' 35 Tage nach Inokulation.

Nematoden-dichte	Wurzelgewicht [g]	<i>H. schachtii</i> /Wurzelsystem	<i>H. schachtii</i> /g Wurzel	<i>H. schachtii</i> /m Wurzel
0	2,02 a	0 a	0 a	0 a
500	1,51 b	180 b	145 b	59 b
1000	1,26 b	462 c	362 b	67 b
1500	0,58 c	562 c	1034 c	155 c

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$.

3.3.1.4. LIF und PAM-Chlorophyllfluoreszenz

Einundzwanzig, 28 und 35 Tage nach Inokulation wurde bei Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' eine höhere Laserlichtreflexion bei 633 nm der mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokulierten Rüben gemessen als bei den Kontrollpflanzen (Abb. 6). Vier Wochen nach Inokulation wiesen die Blätter der inokulierten Rüben signifikant höhere Werte im Verhältnis 'F686/F740' auf als nicht inokulierte Zuckerrüben. Signifikante Unterschiede zwischen Kontrolle und inokulierten Pflanzen waren über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg am deutlichsten bei dem Parameter 'Integral des Spektrums' zu erkennen. Zuckerrüben, die mit unterschiedlichen Populationsdichten von *H. schachtii* inokuliert waren, unterschieden sich weder in der Reflexion bei 633 nm noch in den Parametern 'F686/F740' und 'Integral des Spektrums'. Bei den Rüben, die mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokuliert wurden, wurde an allen Messterminen eine höhere Fluoreszenz bei 686 nm und 740 nm gemessen als bei den nicht inokulierten Kontrollpflanzen (Tab. A5). Eine signifikant höhere Fluoreszenz war dagegen nicht an allen Messterminen zu beobachten. Die mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokulierten Zuckerrüben unterschieden sich nicht in ihrer Fluoreszenz bei 686 nm und 740 nm. Die Verhältnisse 'R633/F686' und 'R633/F740' zeigten nach Tukeys HSD-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den Varianten.

Achtundzwanzig und 35 Tage nach Inokulation wiesen alle erhobenen 'PAM-Parameter' bei der Sorte 'Macarena' unterschiedliche Werte zwischen der Kontrolle und den mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokulierten Zuckerrüben auf (Abb. 8). Die Inokulation mit Nematoden führte zu einer erhöhten Grundfluoreszenz (F_0) und einer höheren

maximalen Fluoreszenz (F_m) sowie zu niedrigeren Werten der maximalen photochemischen Effektivität (F_v/F_m). Eine Differenzierung zwischen den unterschiedlichen Befallsdichten war anhand der 'PAM-Fluoreszenz' nicht möglich.

Die Laserlichtreflexion inokulierter Zuckerrüben der Sorte 'Penta' bei 633 nm war nicht signifikant, aber geringfügig höher als bei der Kontrolle (Abb. 7). Vier Wochen nach Inokulation waren sowohl das Verhältnis 'F686/F740' als auch das 'Integral des Spektrums' bei den *H. schachtii*-befallenen Rüben signifikant höher als bei den nicht inokulierten Kontrollpflanzen. An allen Messterminen wurde bei den *H. schachtii*-inokulierten Zuckerrüben eine höhere Fluoreszenz bei 686 nm und 740 nm gemessen (Tab. A6). Die Verhältnisse 'R633/F686' und 'R633/F740' zeigten nach dem T-Test keine signifikanten Unterschiede zwischen den Kontrollpflanzen und den mit 1500 Larven/100 ml Boden inokulierten Rüben.

Die Grundfluoreszenz (F_o) wies bei inokulierten Rüben der Sorte 'Penta' höhere Werte, die maximale photochemische Effektivität (F_v/F_m) niedrigere Werte als bei den Kontrollpflanzen auf, doch waren die Unterschiede nicht signifikant (Abb. 9).

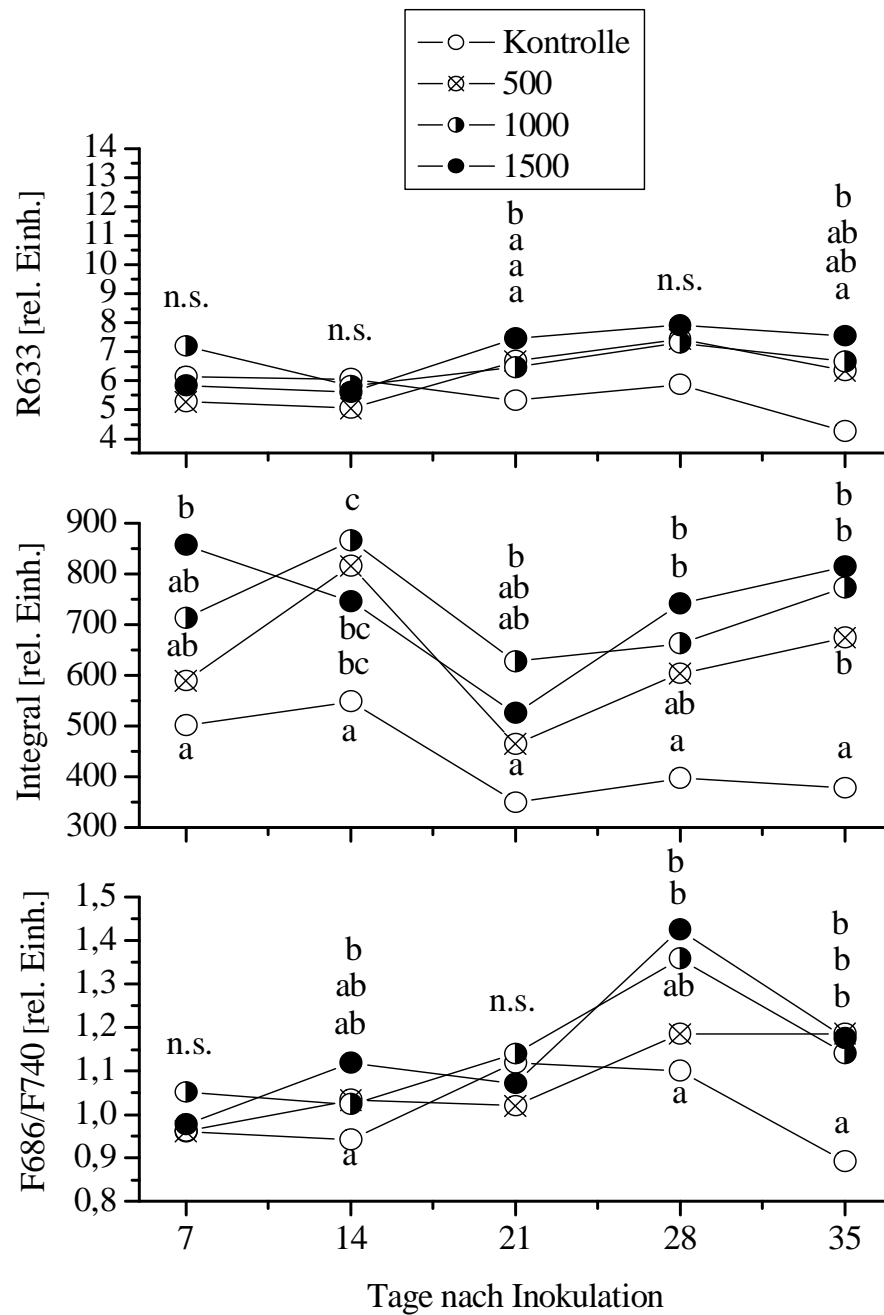


Abb. 6: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle), 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) und die Fluoreszenzparameter 'Integral des Spektrums' und F686/F740 [relative Einheiten] von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Macarena'.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

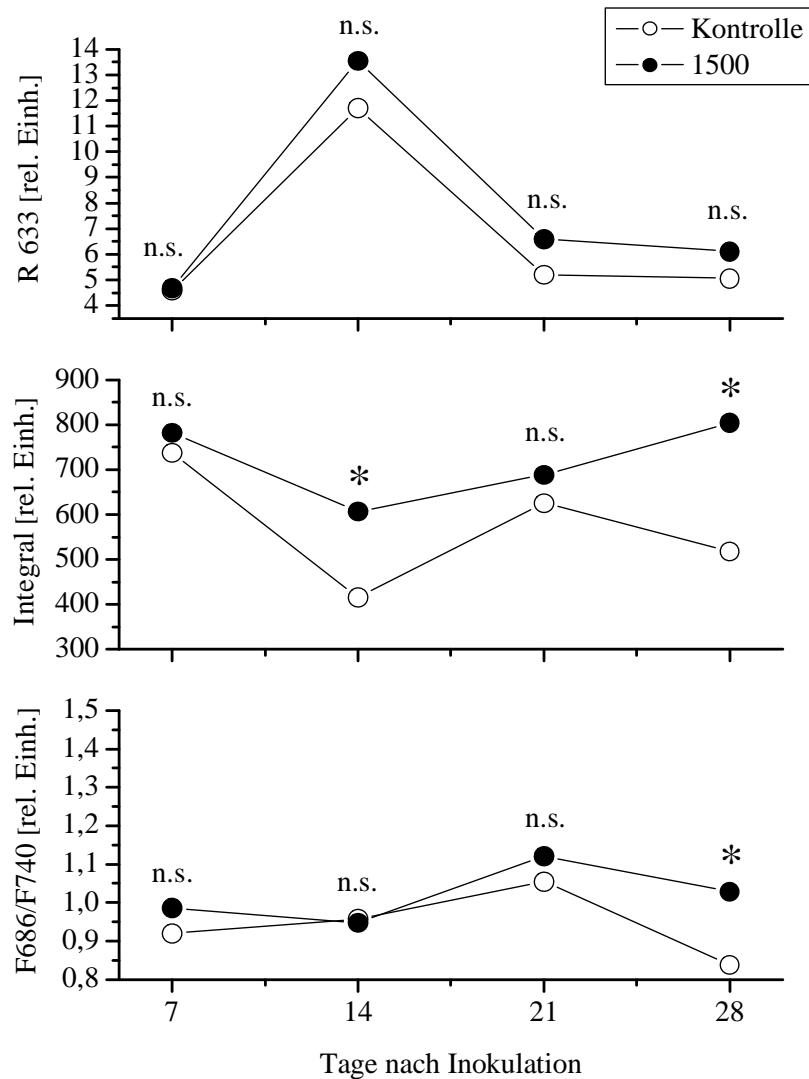


Abb. 7: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle) und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) und die Fluoreszenzparameter 'Integral des Spektrums' und F686/F740 [relative Einheiten] von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Penta'.

* = Werte an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

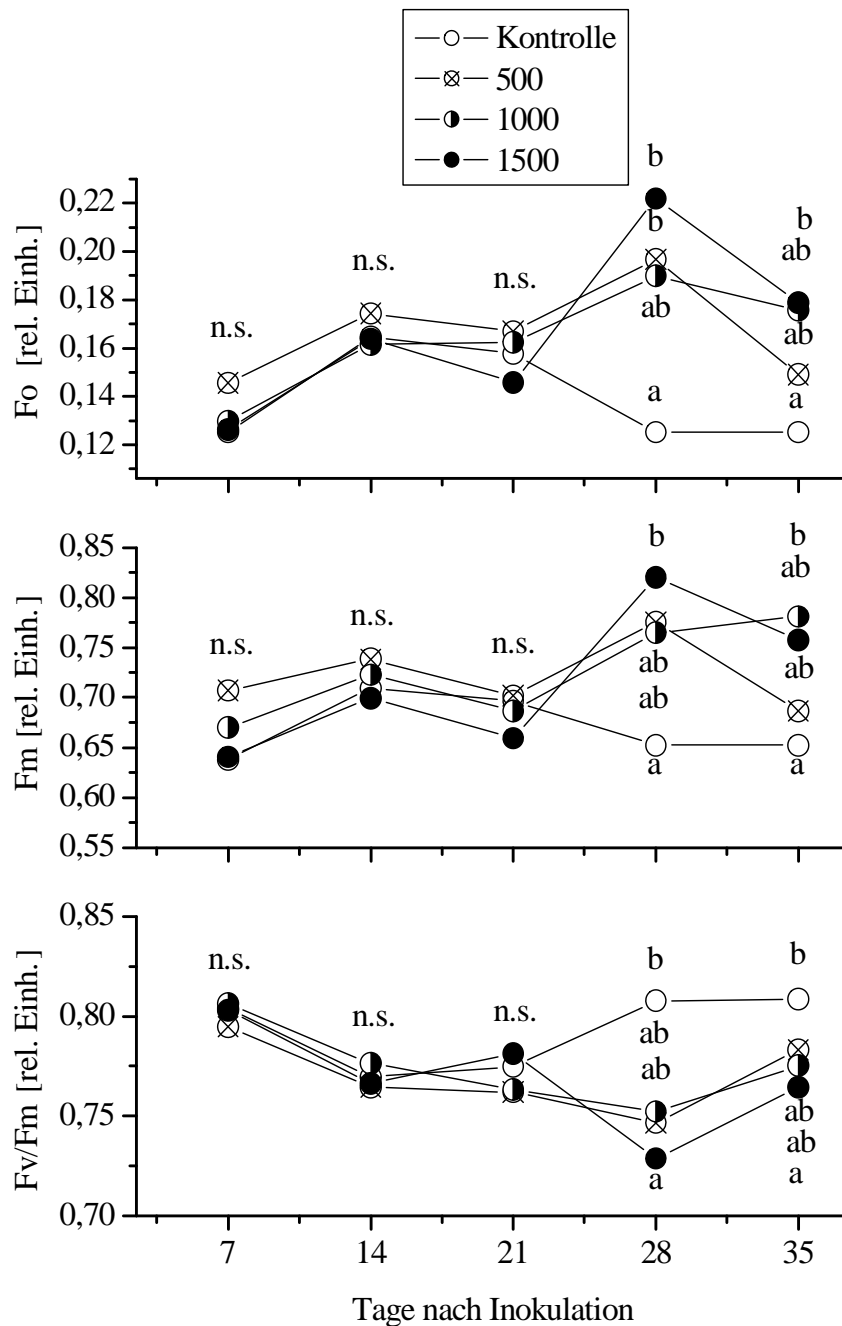


Abb. 8: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle), 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die 'PAM-Fluoreszenzparameter' Fo, Fm und Fv/Fm [relative Einheiten] von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Macarena'.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

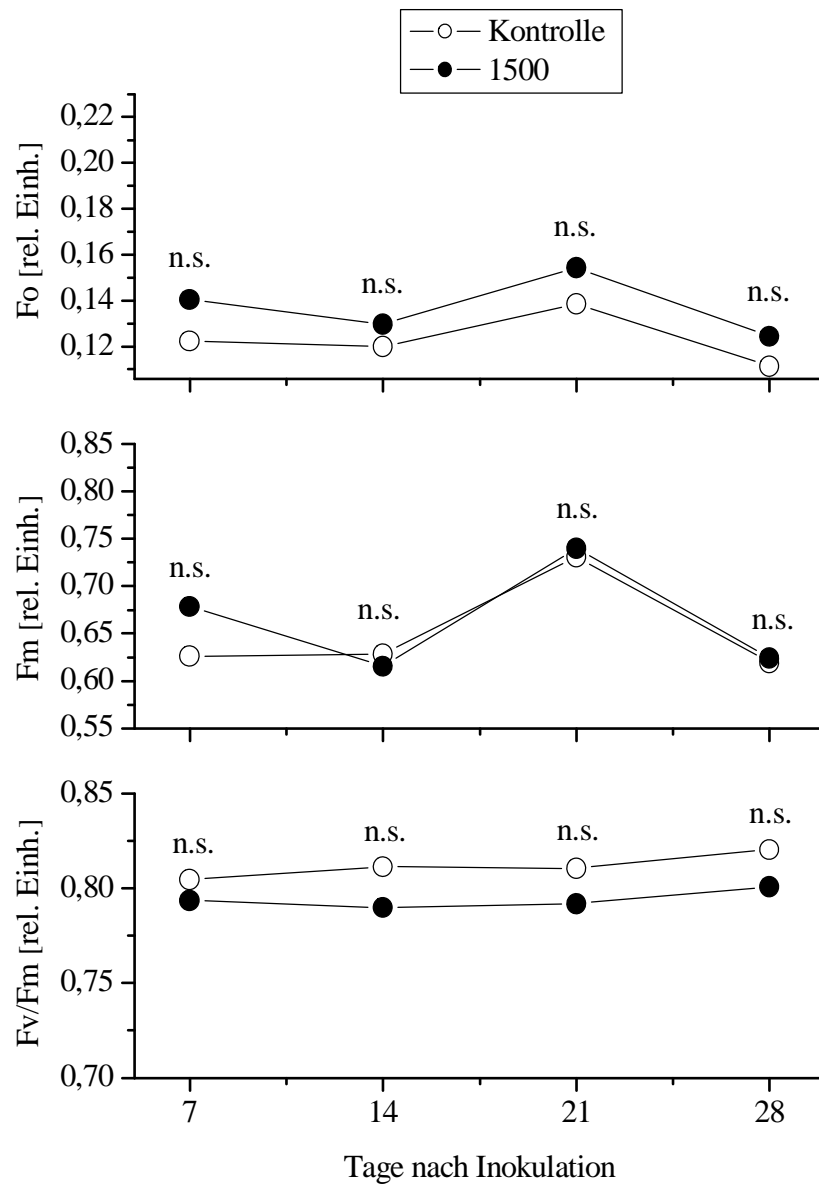


Abb. 9: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 (nicht inokulierte Kontrolle) und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die 'PAM-Fluoreszenzparameter' Fo, Fm und Fv/Fm [relative Einheiten] von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Penta'.

n.s. = Werte an einem Messtermin sind nicht signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$.

3.3.1.5. Thermografie

Zuckerrüben der Sorte 'Macarena', die mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokuliert wurden, wiesen höhere Oberflächentemperaturen als die Kontrollpflanzen auf, so dass nach Subtraktion der mittleren Temperaturen der nicht inokulierten Kontrollpflanzen von den jeweiligen Oberflächentemperaturen der behandelten Rüben, über den gesamten Versuch hinweg positive Temperaturdifferenzen beobachtet wurden (Abb. 10). Die größten Temperaturdifferenzen von ca. 0,8° C wurden sieben Tage nach der Nematodeninokulation zwischen Rüben, die mit 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden und den Kontrollpflanzen beobachtet. Eine Differenzierung der Befallsdichten anhand von Temperaturunterschieden war ausschließlich sieben Tage nach Inokulation möglich.

Zuckerrüben der Sorte 'Penta', die mit 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden, wiesen sieben Tage nach der Nematodeninokulation 0,72° C höhere Blatttemperaturen als die nicht inokulierten Kontrollvarianten auf. Die Temperaturdifferenzen zwischen inokulierten Pflanzen und nicht inokulierten Kontrollpflanzen nahmen allerdings, wie auch bei der Sorte 'Macarena', im Versuchsverlauf ab: Vierzehn Tage nach Inokulation wurden Temperaturdifferenzen von 0,45° C, 21 und 28 Tage nach Inokulation Differenzen von 0,19° C bzw. 0,14° C beobachtet.

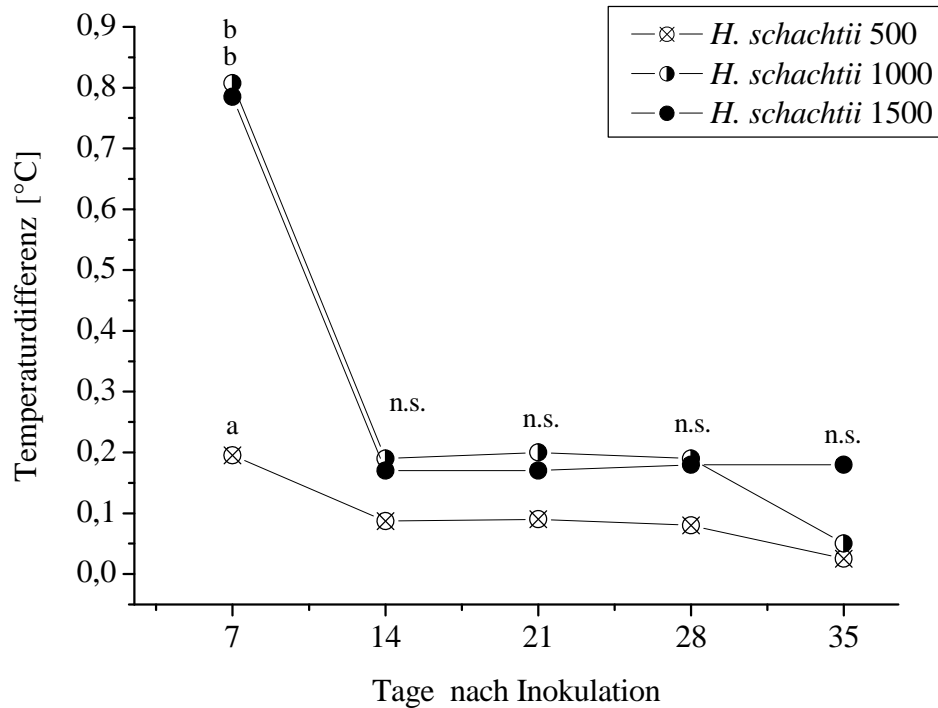


Abb. 10: Durchschnittliche Temperaturdifferenzen [° C] zwischen der Oberflächentemperatur der Kontrollpflanzen sowie der Oberflächentemperatur der mit verschiedenen *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] inokulierten Zuckerrüben der Sorten 'Macarena'. Werte mit unterschiedlichen Buchstaben an einem Messtermin sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

3.3.1.6. Multispektrale Bildanalyse

Bei der Zuckerrübensorte 'Macarena' wiesen die Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' der nicht inokulierten Kontrollpflanzen über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg höhere Werte als die inokulierten Zuckerrüben auf. Nach 35 Tagen waren erstmals signifikante Unterschiede der Indexwerte zwischen gesunden und inokulierten Zuckerrüben bei der Sorte 'Macarena' erkennbar (Tab. 2). Signifikante Unterschiede zwischen der niedrigsten und der höchsten Befalldichte waren ausschließlich 35 Tage nach Inokulation zu beobachten.

Bei der Sorte 'Penta' konnten bereits 28 Tage nach Inokulation signifikante Unterschiede in den Vegetationsindizes zwischen unbehandelten Kontrollpflanzen und *H. schachtii*-befallenen Zuckerrüben beobachtet werden (Tab. 3).

Tab. 2: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' der Zuckerrübensorte 'Macarena'.

Nematoden- dichte	NDVI				
	Tage nach Inokulation				
	7	14	21	28	35
0	0,68	0,69	0,69	0,69	0,78 a
500	0,68	0,68	0,68	0,68	0,62 b
1000	0,65	0,65	0,65	0,65	0,60 bc
1500	0,63	0,63	0,63	0,62	0,51 c
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	
Nematoden- dichte	GNDVI				
	Tage nach Inokulation				
	7	14	21	28	35
0	0,57	0,56	0,57	0,57	0,67 a
500	0,56	0,56	0,57	0,56	0,51 b
1000	0,54	0,55	0,54	0,54	0,49 bc
1500	0,52	0,51	0,51	0,51	0,39 c
	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$; $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

Tab. 3: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' der Zuckerrübensorte 'Penta'.

Nematoden- dichte	NDVI			
	Tage nach Inokulation			
	7	14	21	28
0	0,71	0,71	0,72	0,74 a
1500	0,70	0,69	0,68	0,57 b
	n.s.	n.s.	n.s.	

Nematoden- dichte	GNDVI			
	Tage nach Inokulation			
	7	14	21	28
0	0,60	0,60	0,60	0,62 a
1500	0,57	0,57	0,57	0,45 b
	n.s.	n.s.	n.s.	

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$; $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.

3.3.1.7. Pearsons Korrelationen

Die Tabellen A7 bis A11 im Anhang zeigen Pearsons Korrelationskoeffizienten der erhobenen Parameter für alle Messtermine und beide Zuckerrübensorten. Vier und fünf Wochen nach Inokulation wurden Korrelationen zwischen der Nematodenbefallsdichte und dem Blattstickstoffgehalt ($r = -0,66$ bis $-0,70$), dem Chlorophyllgehalt der Blätter ($r = -0,51$ bis $-0,96$) sowie den SPAD-Werten ($r = -0,59$ bis $-0,88$) beobachtet. Zu diesem Zeitpunkt der Experimente betrugen die Korrelationskoeffizienten zwischen der *H. schachtii*-Befallsdichte und den Fluoreszenz-parametern ca. $r = 0,7$ und reflektierten damit den Rückgang im Stickstoff- und Chlorophyll-gehalt zu diesen Messterminen. Korrelationen zwischen der Nematodendichte und der Photosyntheserate wurden bei beiden Zuckerrübensorten an allen Messterminen beobachtet. Fünf Wochen nach Inokulation wurden bei der Sorte 'Macarena' signifikante Korrelationen zwischen dem Stickstoffgehalt der Zuckerrüben und dem Chlorophyllgehalt, den SPAD-Werten, der Photosyntheserate sowie den 'LIF-Parametern' beobachtet. Bei der Sorte 'Penta' wurden diese Beobachtungen bereits vier Wochen nach Inokulation gemacht.

Chlorophyllgehalt und SPAD-Werte korrelierten bei der Sorte 'Macarena' erstmals fünf Wochen nach Inokulation, bei der Sorte 'Penta' bereits nach vier Wochen.

An den jeweils letzten Untersuchungsterminen (35 Tage nach Inokulation bei der Sorte 'Macarena' und 28 Tage nach Inokulation bei der Sorte 'Penta') korrelierten der Chlorophyllgehalt und die SPAD-Werte mit 'LIF-' und 'PAM-Parametern' bei beiden Zuckerrübensorten. Parallel zu der Abnahme im Stickstoffgehalt wurde bei der Sorte 'Penta' vier Wochen nach Inokulation eine Korrelation von $r = 0,99$ zwischen dem Chlorophyllgehalt und der Lichtabsorption festgestellt.

Bei beiden Sorten wurden an den jeweils letzten Messterminen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,52$ bis $0,75$ zwischen der Photosyntheserate und den 'LIF-Parametern' festgestellt. Die Assimilationsrate zeigte an diesen Terminen weiterhin Korrelationen mit dem Stickstoff-, dem Chlorophyllgehalt und den SPAD-Werten bei beiden Sorten und eine hohe Korrelation mit der Lichtabsorption bei der Zuckerrübensorte 'Penta'.

Die Differenzen zwischen der Oberflächentemperatur der Kontrollpflanzen und den inokulierten Pflanzen korrelierten bei allen untersuchten Inokulumsdichten und beiden Zuckerrübensorten mit den jeweiligen Differenzen in der Transpirationsrate und der stomatären Leitfähigkeit ($r = 0,51$ bis $0,96$). In Bezug auf Temperaturdifferenzen, Differenzen in den Photosyntheseraten und intrazellulären CO_2 -Konzentrationen zwischen Kontrollen und den inokulierten Pflanzen wurde keine Korrelation ermittelt (Tab. A12).

Bei der Sorte 'Macarena' korrelierten die Vegetationsindizes erstmals 35 Tage nach Inokulation mit der Nematodenbefallsdichte ($r = 0,84$ bis $0,85$), dem Stickstoff- ($r = 0,7$ bis $0,77$) und Chlorophyllgehalt ($r = 0,71$ bis $0,72$) sowie den SPAD-Werten ($r = 0,75$ bis $0,76$) (Tab. A13). Ähnlich hohe Korrelationen ($r = 0,65$ bis $0,93$) wurden für die Sorte 'Penta' 28 Tage nach Inokulation beobachtet (Tab. A14). An keinem Messtermin wurden Korrelationen zwischen den Vegetationsindizes und dem Sprossfrischgewicht festgestellt.

3.3.2. Feldversuche

Am Standort Elsdorf konnten ausschließlich an den ersten beiden Überfliegungsterminen Korrelationen zwischen der Nematodenbefallsdichte und der Oberflächentemperatur der Zuckerrübenblätter der anfälligen Sorte 'Monza' festgestellt werden. Die Korrelationen wiesen Korrelationskoeffizienten von $r = 0,53$ bis $0,58$ auf (Tab. 4). Bei der resistenten Sorte 'Paulina' gab es dagegen keine Korrelationen zwischen der Nematodenbefallsdichte und der Oberflächentemperatur der Rüben. Verglichen mit den ersten beiden Überfliegungsterminen war die Lufttemperatur bei den folgenden Terminen wesentlich höher. Das Wasserangebot im Boden, das anhand der klimatischen Wasserbilanz der vergangenen zehn Tage berechnet wurde, war besonders am 29.07. und 07.08. limitiert (Tab. 4).

Die Oberflächentemperaturen der anfälligen Sorte 'Monza' waren an den ersten Überfliegungsterminen bei hohem *H. schachtii*-Befall (1500 bis 3500 Eier und Larven/100 ml Boden) um $0,41^{\circ}\text{C}$ bis $0,83^{\circ}\text{C}$ höher im Vergleich zu gering befallenen Pflanzen (< 500 Eier und Larven/100 ml Boden). Für alle weiteren Untersuchungstermine wurden keine signifikanten Unterschiede zwischen den Befallsdichten festgestellt. Die Oberflächentemperaturen der resistenten Zuckerrübensorte 'Paulina' wiesen über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg keine signifikanten Unterschiede zwischen den verschiedenen Befallsdichten auf (Tab. 5).

Tab. 4: Wetterdaten der Überfliegungstermine am Standort Elsdorf sowie Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen *Heterodera schachtii*-Populationsdichte und der Oberflächentemperatur von Zuckerrüben der Sorten 'Monza' und 'Paulina'.

Datum	Lufttemperatur [°C]	Luftfeuchtigkeit [%]	klimat. Wasserbilanz ¹⁾ [mm]	Pearsons Korrelationskoeffizienten	
				Monza	Paulina
13.06.	23,3	61,8	-12,1	0,58 a	0,23 n.s.
10.07.	23,1	61,8	-10,7	0,53 b	0,25 n.s.
29.07.	27,5	77,4	-25,4	0,15 n.s.	0,38 n.s.
07.08.	33,8	49,7	-62,9	0,24 n.s.	0,29 n.s.

¹⁾ Klimatische Wasserbilanz = Niederschlag [mm] – Verdunstung [mm]

Mittelwerte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich bei $P \leq 0,05$ und $n = 10$; n.s. = nicht signifikant.

Tab. 5: Mittlere Oberflächentemperaturen [° C] der Zuckerrübensorten 'Monza' und 'Paulina' bei unterschiedlichen *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [< 500, 500-1000 und > 1500 Larven/100 ml Boden] am Standort Elsdorf an verschiedenen Überfliegungsterminen.

Zuckerrübensorte	Nematodendichte	Oberflächentemperatur [°C]			
		Überfliegungstermin			
		13.06.	10.07.	29.07.	07.08.
Monza	< 500	21,45 a	24,87 a	25,30	35,62
	500-1500	21,86 ab	25,08 ab	25,41	36,37
	> 1500	22,28 b	25,28 b	25,76	36,53
Tukey-Test				n.s.	n.s.
Paulina	< 500	22,62	24,57	24,97	36,69
	500-1500	22,19	25,32	25,03	36,96
	> 1500	22,50	24,24	25,16	37,52
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Mittelwerte einer Sorte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test ($P = 0,05$; $n = 10$); n.s. = nicht signifikant.

Am Standort Kelz entsprachen die von der nächstgelegenen Wetterstation erfragten Wetterdaten mit geringen Abweichungen denen der Wetterstation am Versuchsfeld in Elsdorf (Tab. 6). In diesem Feldversuch waren mit Hilfe der Thermografie keine signifikanten Korrelationen zwischen den Nematodenbefallsdichten und der Oberflächentemperatur der beiden Zuckerrübensorten 'Macarena' und 'Paulina' zu beobachten. Weiterhin wiesen die verschiedenen Sorten bei den unterschiedlichen Befallsdichten keine signifikanten Unterschiede in der Oberflächentemperatur auf (Tab. 7).

Tab. 6: Wetterdaten der Überfliegungstermine am Standort Kelz sowie Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen *Heterodera schachtii*-Populationsdichte und der Oberflächentemperatur von Zuckerrüben der Sorten 'Macarena' und 'Paulina'.

Datum	Lufttemperatur	Luftfeuchtigkeit	klimat.Wasserbilanz ¹⁾	Pearsons Korrelationskoeffizienten	
	[°C]	[%]	[mm]	Macarena	Paulina
13.06.	23,0	63,2	-11,3	0,20 n.s.	0,19 n.s.
10.07.	22,9	61,9	-10,5	0,19 n.s.	0,22 n.s.
29.07.	27,9	76,8	-27,1	0,21 n.s.	0,27 n.s.
07.08.	33,3	46,2	-61,6	0,17 n.s.	0,13 n.s.

¹⁾ Klimatische Wasserbilanz = Niederschlag [mm] – Verdunstung [mm]

n.s. = nicht signifikant bei $P \leq 0,05$ und $n = 12$.

Tab. 7: Mittlere Oberflächentemperaturen [° C] der Zuckerrübensorten 'Macarena' und 'Paulina' bei unterschiedlichen *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [< 500, 500-1000 und > 1500 Larven/100 ml Boden] am Standort Kelz an verschiedenen Überfliegungsterminen.

Zuckerrübensorte	Nematodendichte	Oberflächentemperatur [°C]			
		Überfliegungstermin			
		13.06.	10.07.	29.07.	07.08.
Macarena	< 500	22,96	24,66	25,67	36,01
	500-1500	23,01	24,72	25,70	36,23
	> 1500	23,34	24,95	25,72	36,42
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Paulina	< 500	22,75	24,87	25,11	36,55
	500-1500	22,22	24,66	24,98	36,47
	> 1500	22,13	24,88	24,89	36,69
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. = Mittelwerte einer Sorte in einer Spalte sind nicht signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 12$.

3.4. Diskussion

In beiden Gewächshausversuchen dieser Arbeit war mit anhaltendem Befall durch *H. schachtii* der Stickstoffgehalt der *H. schachtii*-befallenen Rüben deutlich niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Vermutlich war die Stickstoffaufnahme durch den Nematodenbefall reduziert. Anfällige Zuckerrübensorten zeigen bei Befall mit *H. schachtii* verringerte Glutaminsäuregehalte (GIERTH, 2004), die den Stickstoffgehalt von Blättern widerspiegeln (BURBA & KASTNING, 1971; LOHAUS, 1994). Bei Ölrettich und Raps wurden bei *H. schachtii*-Befall ebenfalls reduzierte Gehalte von Glutaminsäure festgestellt (KRAUTHAUSSEN & WYSS, 1982).

Die niedrigen Stickstoffgehalte der inokulierten Rüben induzierten vermutlich einen Rückgang im Chlorophyllgehalt. Stickstoff ist bei der Chlorophyllproduktion von besonderer Bedeutung (SCHULZ et al., 1996) und wird bei Zuckerrüben zum Aufbau des Blattapparates und zur Bildung des Rübenkörpers verwendet (GEISLER, 1983). Eine Reduktion des Chlorophyllgehaltes von Blättern verursacht durch Stickstoffmangel wurde an Zuckerrüben bereits von TARTACHNIK und RADEMACHER (2003) demonstriert. Auch die SPAD-Werte, die die Lichtdurchlässigkeit der Blätter angeben, sind eng mit dem Stickstoffgehalt von Blättern korreliert (WOOD et al., 1992).

Der negative Einfluss einer Nematodeninfektion auf den Chlorophyllgehalt von Erbsen wurde von SIDDQUI et al. (1999) für den Wurzelgallennematoden *Meloidogyne incognita* beschrieben. Auch in der vorliegenden Arbeit konnten am Ende der beiden Versuche nicht inokulierte Kontrollpflanzen von Pflanzen, die mit verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten inokuliert waren, anhand der Chlorophyllgehalte der Zuckerrübenblätter unterschieden werden. Zuckerrüben, die mit 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden (1000, 2000 und 3000 Larven/Pflanze) inokuliert wurden, unterschieden sich dagegen nicht in ihren Stickstoff- und Chlorophyllgehalten. Einhergehend mit einer Erhöhung der Nematodenbefallsdichte des Zystennematoden *Heterodera glycines* konnten ASMUS et al. (2002) hingegen eine Reduktion des Chlorophyllgehaltes an Sojabohnen feststellen. Allerdings waren die Befallsdichten wesentlich höher als die der vorliegenden Arbeit getesteten Befallsdichten. Bei ASMUS et al. (2002) konnten bei Inokulumdichten von 1200, 3600, 10800, 32400 und 97200 Larven/Pflanze signifikante Unterschiede der Chlorophyllgehalte zwischen den beiden niedrigsten und den beiden höchsten Inokulumdichten festgestellt werden.

Die niedrigen Stickstoff- und Chlorophyllgehalte nematodenbefallener Rüben am Ende der Versuche können durch die anhaltende Schädigung durch *H. schachtii* bedingt sein. Eine weitere mögliche Ursache für das späte Auftreten dieser Symptome könnten die Larven der zweiten Generation von *H. schachtii* gewesen sein, die zusätzlich zu den inokulierten Larven, in die Wurzeln eingedrungen sind und Einfluss auf Stickstoff- und Chlorophyllgehalt genommen haben. Denn die Temperatursumme von 437° C, die für die Entwicklung einer Generation von *H. schachtii* benötigt wird (vgl. 1.2.), war bei den jeweiligen Versuchen vor den Messterminen 28 (bei der Sorte 'Macarena') bzw. 21 Tage nach Inokulation (bei der Sorte 'Penta') erreicht.

Über den gesamten Untersuchungszeitraum hinweg wurde eine verringerte Photosyntheserate der mit *H. schachtii* inokulierten Zuckerrüben festgestellt. Die intrazelluläre CO₂-Konzentration war bei beiden Sorten an allen Messterminen bei den Kontrollpflanzen niedriger, ein Hinweis auf den höheren Kohlendioxidverbrauch durch vermehrte Assimilation der Kontrollpflanzen. Zuckerrüben, die mit unterschiedlichen *H. schachtii*-Befallsdichten inokuliert wurden, zeigten keine signifikanten Unterschiede in der Photosyntheserate. SCHANS und ARNTZEN (1991) beobachteten dagegen signifikant abnehmende Photosyntheseraten an Kartoffelpflanzen mit zunehmender Populationsdichte des Zystennematoden *Globodera pallida* bei Befallsdichten zwischen null und 300 Eiern pro Gramm Boden.

Die Ursachen für eine veränderte Photosynthese von Pflanzen durch Nematodenbefall sehen NAGESH und DHAWAN (1988) in verringerten Chlorophyllgehalten, SAEED et al. (1997 a, b) in einer verminderten stomatären Leitfähigkeit und WALLACE (1974) in einer verringerten Nährstoffzufuhr bedingt durch den Nematodenbefall. KOENNING und BARKER (1995) machen v.a. den verminderten Stickstoffgehalt für geringere Assimilationsraten verantwortlich.

Während die niedrigen Photosyntheseraten der inokulierten Zuckerrüben zu Beginn der Experimente durch niedrigere Transpirationsraten und eine niedrige stomatäre Leitfähigkeit der befallenen Rüben zu erklären sind, resultieren die niedrigen Photosyntheseraten der befallenen Rüben am Ende des Versuchs vermutlich aus dem Rückgang im Stickstoff- und Chlorophyllgehalt. Sowohl die hohen Korrelationen zwischen Photosyntheserate und stomatärer Leitfähigkeit zu Beginn der Versuche als auch die Korrelationen zwischen der Photosyntheserate und dem Stickstoff- sowie Chlorophyllgehalt an den letzten Untersuchungsterminen bestätigen diese Annahme. Stickstoff steigert die Konzentration des Enzyms Ribulose Biphosphat Carboxylase Oxigenase (Rubisco) (WUEST & CASSMANN,

1992) und erhöht damit die Photosyntheserate von Pflanzen (EVANS, 1983; SINCLAIR & HORIE, 1989).

Eine signifikante Reduktion der Blattmasse durch Nematodenbefall, die für einige Nematodenarten wie *Heterodera glycines* an Sojabohne (ASMUS et al., 2002) oder *Heterodera avenae* an Weizen (KAUSHAL & MADAVI, 1992) und auch *H. schachtii* an Zuckerrüben (DECKER, 1969) in der Literatur beschrieben wird, konnte in dieser Arbeit nur für die Zuckerrübensorte 'Penta' bestätigt werden. Im Gegensatz dazu konnte für beide Zuckerrübensorten eine Reduktion des Wurzelfrischgewichtes der Zuckerrüben festgestellt werden sowie signifikante Unterschiede des Wurzelgewichtes zwischen der niedrigsten und höchsten Befallsdichte bei der Sorte 'Macarena'. Ebenso berichten POSTUKA et al. (1986) sowie ASMUS et al. (2002) von einem verringerten Wurzelfrischgewicht bei Sojabohnen mit erhöhten Populationsdichten von Zystennematoden.

Am besten geeignet zur Unterscheidung von *H. schachtii* befallenen und gesunden Rüben erwies sich die Laser induzierte Fluoreszenz, da die Fluoreszenz bei 686 und 740 nm sowie das 'Integral des Spektrums' über den gesamten Untersuchungszeitraum höhere Werte bei befallenen Pflanzen aufwiesen. Obwohl mit zunehmender *H. schachtii*-Inokulumdichte die Eindringung in die Zuckerrübenwurzeln zunahm, war eine Differenzierung zwischen den Nematodenbefallsdichten durch die Laser induzierte und die Puls Amplituden modulierte Fluoreszenz nicht möglich. An den letzten beiden Terminen war allerdings zu beobachten, dass sich die Fluoreszenzstrahlung tendenziell mit steigender Nematodendichte erhöhte.

Signifikante Unterschiede im Verhältnis 'F686/F740' sowie in SPAD-Werten zwischen inokulierten und gesunden Zuckerrüben am Ende der Versuche gingen einher mit signifikant niedrigeren Stickstoff- und Chlorophyllgehalten der inokulierten Zuckerrüben. An diesen Messterminen wurde bei mit *H. schachtii*-befallenen Zuckerrüben eine höhere Laserlichtreflexion bei 633 nm gemessen, was auf eine Reduktion des Chlorophyllgehaltes hinweist. Ein Rückgang im Chlorophyllgehalt beeinflusst den Energiefluss zwischen den Photosystemen. Photosystem I absorbiert weniger Energie, weil von Photosystem II weniger Energie in Form von Fluoreszenz emittiert wird. Als Folge verringert sich die Fluoreszenz bei 740 nm (F740), erhöht sich die Fluoreszenz bei 686 nm (F686) und der Wert des Verhältnisses 'F686/F740' steigt an. Niedrige Chlorophyllgehalte schlugen sich in hohen Werten des Verhältnisses 'F686/F740' nieder. Auch BUSCHMANN et al. (1986), HÁK et al. (1990) und LICHTENTHALER (1996) berichten von steigenden Werten dieses Verhältnisses mit abnehmenden Chlorophyllgehalten.

Mit Hilfe der 'PAM-Fluoreszenz' wurden an den letzten beiden Untersuchungsterminen bei inokulierten Zuckerrüben der Sorte 'Macarena' signifikant höhere Werte der Grundfluoreszenz (F_o) sowie niedrigere Werte der photochemischen Effizienz (F_v/F_m) gemessen. Der Parameter ' F_v/F_m ' nimmt bei vitalen Pflanzen Werte von 0,83 an (LAWLOR, 2001). Niedrigere Werte dieses Verhältnisses weisen auf eine Schädigung im Photosystem II hin (SCHREIBER, 1986; ROHACEK & BARTAK, 1999). Trotz verringerter Chlorophyllgehalte und Photosyntheseraten der *H. schachtii*-befallenen Zuckerrüben war bei der Sorte 'Penta' eine Unterscheidung zwischen vitalen und inokulierten Zuckerrüben mit Hilfe der 'PAM-Fluoreszenz' nicht möglich. Ähnliches berichten ASMUS et al. (2002), die trotz verringerter Photosyntheserate und Chlorophyllgehalte durch den Nematoden *Heterodera glycines* keine Unterschiede in der photochemischen Effizienz an Sojabohnen feststellen konnten. Auch eine Differenzierung der verschiedenen Befallsdichten war mit Hilfe der photochemischen Effizienz nicht möglich.

Bereits sieben Tage nach der Nematodeninokulation reagierten die Zuckerrüben auf *H. schachtii*-Befall mit einer Erhöhung der Oberflächentemperatur (vgl. 3.3.1.6.), ein Hinweis auf eine starke Reaktion der empfindlichen Keimpflanze auf den Primärbefall von Nematoden. Die Differenzen zwischen der Temperatur der Kontrollpflanzen und der Temperatur der inokulierten Zuckerrüben waren zu diesem Messtermin dementsprechend hoch (bis zu 0,8° C). Eine Differenzierung zwischen den Befallsdichten mit Hilfe der Thermografie war nur am ersten Messtermin möglich. Bei allen weiteren Messterminen wurden abnehmende Temperaturdifferenzen beobachtet. Einhergehend mit diesen Beobachtungen waren die Transpirationsraten der inokulierten Pflanzen nur an den ersten Messterminen signifikant niedriger als bei den Kontrollpflanzen. Höhere Oberflächentemperaturen waren demnach auf Veränderungen in der Transpiration bedingt durch *H. schachtii*-Befall zurückzuführen. Bestätigt wird dieser Zusammenhang durch die hohen Korrelationen zwischen den Differenzen der Oberflächentemperatur (ΔT), der Transpirationsrate (ΔTrans) und der stomatären Leitfähigkeit (ΔL) der Kontrollpflanzen und der inokulierten Zuckerrüben. Die stomatäre Leitfähigkeit dient als Maß für den Öffnungszustand der Stomata und ist eng mit der Transpiration korreliert (PARLANGE & WAGGONER, 1970). Laut NICOLAS et al. (1991) kommt es bei Nematodenbefall zur Schließung der Blattstomata und folglich zu einem Rückgang der Blatttranspiration und erhöhten Oberflächentemperaturen von Pflanzen. SCHANS und ARNTZEN (1991) stellten verringerte Transpirationsraten mit Zunahme der Nematodenbefallsdichte an Kartoffelpflanzen fest. Änderungen in der Transpirationsrate verschiedener Pflanzenarten

wurden mit Hilfe der Thermografie bereits von RASKIN und LADYMAN (1987), VAN DER STRAETEN (1995), KUSTAS und NORMAN (1996) sowie JONES et al. (2002) erfasst. INOUE et al. (1990) und LINDENTHAL et al. (2005) wiesen eine lineare negative Korrelation zwischen der Blatttranspirationsrate und der Oberflächentemperatur von Blättern nach. CHAERLE et al. (1999) beobachteten höhere Oberflächentemperaturen an Tabakpflanzen bedingt durch die Infektion mit dem Tabakmosaikvirus und führten den Temperatureffekt auf die Schließung der Blattstomata und eine damit verbundene verringerte Transpiration zurück.

Der Befall mit *H. schachtii* führte am Ende der jeweiligen Versuche zu einer veränderten Reflexion der Zuckerrübenblätter, so dass niedrigere Werte der Vegetationsindizes im Vergleich zu den Kontrollpflanzen beobachtet wurden. Signifikante Unterschiede zwischen den Vegetationsindizes befallener und nicht befallener Zuckerrüben sowie Korrelationen zwischen den Indizes und der Nematodendichte, dem Stickstoff- und Chlorophyllgehalt konnten erstmals am Ende des Versuchs festgestellt werden als bereits eine signifikante Verringerung des Stickstoff- und Chlorophyllgehaltes zu verzeichnen war. Ein Grund für die niedrigeren Werte der Vegetationsindizes bei Nematodenbefall könnte der durch Nematoden verursachte Wassermangel sein, der zu einer Veränderung der Gewebestruktur in den Blättern führt. Durch Verkleinerung der Zellen wird weniger Licht im nahinfraroten Spektralbereich reflektiert. Abnehmende Chlorophyllgehalte lassen die Reflexion im sichtbaren Spektralbereich durch fehlende Absorption der Blattpigmente ansteigen und tragen zu einer Verschiebung der 'Roten Kante' (vgl. 1.4.) in Richtung des nahinfraroten Bereichs des elektromagnetischen Spektrums bei (PINTER et al., 2003; LAWRENCE et al., 2004). Die dadurch bedingte Ausweitung des Minimums der roten Reflexion kann ein weiterer Grund für veränderte Vegetationsindizes sein. DOCKTER (1990) fand eine hohe Korrelation zwischen 'NDVI-Werten' und dem Chlorophyllgehalt von Zuckerrübenblättern. STONE et al. (1996) beobachteten, dass die Stickstoffaufnahme von Weizen mit den 'NDVI-Werten' korrelierten. Ebenfalls ist der enge Zusammenhang zwischen 'GNDVI' mit dem Chlorophyllgehalt von Pflanzen bekannt (GITTELSON et al., 1996). Da *H. schachtii*-Befall zu einer Verringerung im Stickstoff- und Chlorophyllgehalt der Zuckerrüben führte, waren die Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' zur Erfassung des Befalls geeignet. Eine Differenzierung zwischen *H. schachtii*-Populationsdichten von 500 und 1500 Larven/100 ml Boden war nur mit dem Vegetationsindex 'NDVI' am letzten Untersuchungstermin möglich.

Da die in Gewächshausversuchen getesteten *H. schachtii*-Populationsdichten nicht Populationsdichten im Feld widerspiegeln, ist es durchaus denkbar, dass eine Differenzierung von Feldpopulationsdichten, sofern diese eine größere Spannweite aufweisen, mit Hilfe der

erwähnten berührungslosen Messverfahren besser durchführbar ist als in der vorliegenden Arbeit. Die Ergebnisse der Feldversuche weisen nämlich darauf hin, dass bei höheren Befallsdichten im Feld eine Differenzierung durchaus möglich ist.

Bei den thermografischen Luftbildaufnahmen waren am Standort Elsdorf nennenswerte Temperaturdifferenzen zwischen niedrig und stark befallenen Zuckerrüben sowie Korrelationen zwischen Oberflächentemperaturen der Zuckerrüben und der Nematodenbefallsdichte ausschließlich bei der anfälligen Zuckerrübensorte 'Monza' im Juni und Anfang Juli zu beobachten. Ein Grund für Unterschiede in den Oberflächentemperaturen der Rüben zu Beginn der Vegetationsperiode könnte eine höhere klimatische Wasserbilanz im Vergleich zu späteren Aufnahmetermen gewesen sein. Durch Nematoden oder Wasserstress verursachte Übertemperaturen sind laut GEBHARDT (1984) umso deutlicher erkennbar, je größer die Verdunstungsnachfrage an der Blattgrenzschicht bei ausreichendem Wasserangebot im Wurzelraum ist. Aus diesem Grund wird die Messung von Bestandestemperaturen zu Sonnenhöchststand und genügend Wasserangebot im Boden empfohlen. Die Ergebnisse der thermografischen Luftbildaufnahmen am Standort Elsdorf bestätigen diese Annahme. Von den um ca. 11³⁰ Uhr mittags durchgeführten Aufnahmen waren Unterschiede in den Oberflächentemperaturen von befallenen und gesunden Zuckerrüben am deutlichsten bei ausreichendem Wasserangebot im Boden, nämlich bei einer Wasserbilanz von > -12 mm, zu beobachten. Unterschiede in der Temperatur sind weiterhin begründbar mit einer hohen Empfindlichkeit der jungen Zuckerrübe zu Beginn der Vegetationsperiode, wie sie von DECKER (1969) beschrieben wird und ebenfalls in den Ergebnissen der Gewächshausversuche dieser Arbeit in Form einer verringerten Transpirationsrate beobachtet wurde. Da die resistente Zuckerrübensorte 'Paulina' keine signifikanten Unterschiede in der Oberflächentemperatur aufwies und Bodenmischpixel herausgerechnet wurden, kann davon ausgegangen werden, dass erhöhte Temperaturen der anfälligen Sorte 'Monza' auf Nematodenbefall zurückzuführen waren. *Heterodera schachtii* hatte demnach, wie bereits in den Gewächshausversuchen festgestellt wurde, einen Einfluss auf die Oberflächentemperatur der Zuckerrüben. Eine Differenzierung zwischen niedrigem und hohem *H. schachtii*-Befall war mit Hilfe thermografischer Luftbilder am Standort Elsdorf möglich. Auch NICOLAS et al. (1991) beobachteten 0,5° C bis 1° C höhere Bestandestemperaturen an Weizen bei hohem *Heterodera avenae*-Befall im Vergleich zu geringem Befall. Kartoffelparzellen, die hohe *Globodera rostochiensis*-Verseuchungsdichten aufwiesen, zeichneten sich durch höhere Bestandestemperaturen als Parzellen mit resistenten Kartoffelpflanzen aus (GEBHARDT, 1984).

Am Standort Kelz wurden an keinem der Überfliegungstermine signifikante Unterschiede in den Oberflächentemperaturen gering und stark befallener Rüben festgestellt. Ebenfalls konnten resistente und anfällige Zuckerrüben nicht anhand ihrer Oberflächentemperatur unterschieden werden. Da die Wetterdaten mit geringen Abweichungen denen der Wetterstation am Versuchsfeld Elsdorf entsprachen, können die unterschiedlichen Ergebnisse der untersuchten Standorte nicht ausschließlich wetterbedingt gewesen sein. Es ist dagegen möglich, dass innerhalb und oberhalb der Zuckerrübenbestände unterschiedliche mikroklimatische Bedingungen vorherrschten, die eine Erkennung des Nematodenbefalls begünstigten oder überlagerten. Herrscht beispielsweise eine geringe Verdunstungsnachfrage an der Blattgrenzschicht vor, sind Unterschiede in der Oberflächentemperatur verursacht durch Nematoden nicht erkennbar (GEBHARDT, 1984). Zudem wurden auf den beiden Versuchsflächen anfällige Zuckerrüben unterschiedlicher Sorten verwendet. Obwohl die Sorte 'Macarena' in den Nahaufnahmen deutlich auf Nematodenbefall reagierte, könnte diese Sorte im Vergleich zu der Sorte 'Monza' eine geringere Empfindlichkeit aufweisen.

Im Gewächshausversuch konnten gesunde Zuckerrüben von *H. schachtii*-befallenen Rüben anhand ihrer Oberflächentemperatur unterschieden werden. In den Feldversuchen war eine Unterscheidung trotz sehr ähnlicher Wetter- und Bodenbedingungen nicht an beiden Versuchsstandorten möglich. Diese Ergebnisse weisen deutlich auf die Schwierigkeiten einer zuverlässigen und reproduzierbaren Erkennung von *H. schachtii* mit Hilfe von thermografischen Luftbildaufnahmen hin. Im Vergleich zur thermografischen Beobachtung von Einzelpflanzen muss bei der Betrachtung eines gesamten Pflanzenbestandes mit einigen im Feld auftretenden Einflussfaktoren wie beispielsweise einer Änderung der Blattstellung, Entlaubung und Verkleinerung der Blattfläche gerechnet werden (GEBHARDT, 1984). In diesen Fällen wird die thermografisch erfasste Strahlung nicht ausschließlich durch eine veränderte Transpiration verursacht, sondern kann zusätzlich durch Bodenmischpixel beeinflusst sein. Ein geringerer Bodenbedeckungsgrad verursacht durch Nematodenbefall kann in dieser Arbeit nahezu ausgeschlossen werden, da durchscheinender Boden durch weitere Bildbearbeitung herausgerechnet wurde. Ein verringerter Bodenbedeckungsgrad ist besonders bei Pflanzenkrankheiten ein häufig zu beobachtendes Phänomen. Bei der Auswertung von Luftbildern zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten ist es daher bei einem wissensbasierten Ansatz nicht zwingend notwendig, den Anteil des Bodens am Fernerkundungssignal herauszurechnen. Bei der in dieser Arbeit vorliegenden Fragestellung erschien diese Vorgehensweise am Standort Elsdorf dagegen sinnvoll, da der ungeschlossene Bestand auf Spätfrost und nicht auf Nematoden zurückzuführen war.

Zur Erkennung von Pflanzenstress, der eine veränderte Transpirationsrate zur Folge hat, ist die Thermografie ein geeignetes berührungsloses Messverfahren. Sie hat im Gegensatz zu porometrischen Messungen den Vorteil, dass die Transpiration nicht nur punktuell erfasst wird, sondern Heterogenitäten in der Blatttranspiration innerhalb von Pflanzenbeständen festgestellt werden (CHAERLE & VAN DER STRAETEN, 2000). Allerdings ist es bei thermografischen Aufnahmen möglich, dass die Verdunstungsnachfrage an der Blattgrenzschicht nicht ausreicht, um thermografisch eine Veränderung der Oberflächentemperatur von Blättern festzustellen (GEBHARDT, 1984). Weiterhin ist der Zeitpunkt der Messung von besonderer Bedeutung. Unterschiede in der Transpiration bedingt durch Pflanzenkrankheiten oder Schädlinge sind in den frühen Morgenstunden durch thermografische Aufnahmen nicht zu beobachten (GRENZDÖRFER, 1998).

Ein Vorteil multispektraler Luftbilder liegt in der Erfassung veränderter Chlorophyllgehalte und Blattmasse, die sich in der spektralen Signatur bemerkbar machen. Die Position der 'Roten Kante' wird daher als Indikator für die Vitalität von Pflanzenbeständen eingesetzt. Wurzelgallennematoden, Sojabohnen- und Kartoffelzystennematoden wurden anhand einer veränderten Reflexion bereits mit Hilfe von Luftbildern identifiziert (STEPHENS et al., 2000; NUTTER et al., 2002; WHEELER & KAUFMAN, 2003). Doch ist das Fernerkundungssignal bei einer multispektralen Bilderfassung im Feld ebenso von Einflussfaktoren bestimmt wie bei der thermografischen Erfassung. So unterscheidet sich die spektrale Signatur eines Bestandes im Feld häufig von der Signatur einzelner Blätter (PINTER et al., 2003). Für Zuckerrüben ist bekannt, dass sie bei hohem Befall durch *H. schachtii* nur kleine Blätter ausbilden (DECKER, 1969), so dass der Boden im Fernerkundungssignal auftaucht und es zu Mischpixeln kommen kann. Je nach Wassergehalt des durchscheinenden Bodens verändert sich die Reflexion (BUNNIK, 1978; DAUGHTRY, 2001). Bei Turgeszenzverlust bedingt durch Wassermangel verändern Zuckerrüben ihre Blattstellung. Durch Freilegung der Blattstiele und des Bodens kommt es zu einem Anstieg der Reflexion im roten Bereich des elektromagnetischen Spektrums und zu einer Abnahme der Reflexion im nahinfraroten Spektralbereich (DOCKTER, 1990). Weiterhin ist mit einer Veränderung der Reflexion im Tagesverlauf (VON RÜSTEN, 1989) und bei verschiedenen Pflanzdichten (DOCKTER, 1990) zu rechnen. Zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten hat sich die Berechnung von Vegetationsindizes bewährt (HOPE et al., 1999; STEPHENS et al., 2000; NUTTER et al., 2002; LAUDIEN et al., 2003). Vegetationsindizes reagieren weniger empfindlich auf eine veränderte Blattstellung oder den Sonnenstand als absolute Reflexionswerte (DOCKTER, 1990) und korrelieren eng mit dem Blattflächenindex von Pflanzenbeständen (PINTER et al., 2003). Aufgrund der bei vielen Pflanzenkrankheiten

auftretenden Bodenreflexion bieten sich zur Erkennung von Nematodenbefall im Pflanzenbestand bodenkorrigierte Indizes an, wie beispielsweise der 'SAVI' (Soil Adjusted Vegetation Index) oder der 'OSAVI' (Optimised Soil Adjusted Vegetation Index). Diese Indizes eignen sich insbesondere dann, wenn bei aktuellen Luftbildern der bodenkorrigierende Faktor den Reflexionswerten des Bodens angepasst werden kann. Mit Hilfe der Vegetationsindizes 'OSAVI' und 'NDVI' konnten gute Ernteprognosen bei Zuckerrüben erzielt werden (ECKERT & KELLENBERGER, 2001).

Die Laser induzierte Fluoreszenz wurde zur Erkennung von Nematodenbefall noch nicht auf dem Feld eingesetzt, doch liegen einige Arbeiten zum Einsatz der 'LIF' zur Erkennung von Stickstoffmangel unter Feldbedingungen vor (CECCHI et al., 1994, STICKSEL et al., 2001). Da in den Gewächshausversuchen der vorliegenden Arbeit nicht befallene Zuckerrüben von *H. schachtii*-befallenen Rüben mit Hilfe der 'LIF' unterschieden werden konnten und die 'LIF' bereits unter Feldbedingungen erfolgreich eingesetzt wurde, ist diese Methode sehr vielversprechend für eine zukünftige Erkennung von Nematodenbefall im Feld. Im Gegensatz zur thermografischen und multispektralen Bilderfassung im Feld rühren die detektierten Messsignale der 'LIF' ausschließlich von chlorophyllhaltigem Pflanzenmaterial. Durch Unabhängigkeit von den Umgebungslichtverhältnissen bleiben 'LIF-Messungen' unbeeinflusst von unterschiedlichen Sonnenständen oder Bewölkungssituationen. Ein erheblicher Vorteil der 'LIF' könnte weiterhin in der hohen Wiederholrate und in der Kombination der Messungen mit betriebsüblichen Feldüberfahrten liegen, besonders wenn man die noch limitierte Verfügbarkeit von Satellitenszenen und die hohen Kosten für Spontanüberfliegungen in Betracht zieht.

Obwohl die Erkennung spezieller Pflanzenkrankheiten mit Hilfe der Fernerkundung im Rahmen von wissensbasierten Forschungsvorhaben sehr erfolgversprechend ist (ROYLE & LATHROP, 2002; MORGAN et al., 2002; SCHMITZ et al., 2003; STEDDOM et al., 2003), wirft die Differenzierung zwischen verschiedenen Krankheiten noch einige Schwierigkeiten auf (GEBHARD et al., 1984; NILSSON, 1995; PINTER et al., 2003). Pflanzenstress unterschiedlichster Ursache, der Einfluss auf die Transpiration von Pflanzen nimmt, führt zu veränderten Blatttemperaturen (HOWELL et al., 1984; BURKE et al., 1990; HATFIELD, 1990 b). So wurde Stress verursacht durch verschiedene Pathogene oder Schwermetallgase in Form erhöhter Bestandes- oder Blatttemperaturen festgestellt (OMASA, 1985; LALI Z., 1991; NILSON, 1995). Ebenso können verringerte Chlorophyllgehalte, die sich auf die Reflexionseigenschaften von Pflanzen auswirken, sowohl durch Stickstoffmangel der Pflanzen als auch durch Befall verschiedener Krankheiten und Schädlinge verursacht sein.

Auch im Verlauf der Pflanzenentwicklung können sich die Reflexionseigenschaften und Oberflächentemperaturen von Pflanzen ändern (PINTER et al., 2003). Weitere Schwierigkeiten kommen bei der Differenzierung zwischen seneszenten und gering turgeszenten Pflanzenbeständen, die sich in ihrem Reflexionsverhalten sehr ähneln, auf (DOCKTER, 1990). WHEELER und BRONSON (2004) weisen weiterhin auf die Bedeutung verschiedener, oft in Kombination auftretender Stressoren innerhalb eines Feldes hin, die ihrer Meinung nach bei Bewirtschaftungsmaßnahmen im präzisen Pflanzenbau häufig zu wenig Beachtung finden.

Bei Zuckerrüben ließe sich eine Unterscheidung der verschiedenen Krankheiten durch das zeitliche Auftreten der Schädlinge bzw. Krankheiten vornehmen. Während ein Befall durch *H. schachtii* schon ab Juni und Juli zu beobachten ist, werden Schäden durch das Stock- und Stengelälchen *Ditylenchus dipsaci* erst ab August sichtbar. Allerdings kann es bei starkem Befall bei beiden Nematoden auch zu einer frühen Schädigung der Rüben kommen. Die Symptome der späten Rübenfäule *Rhizoctonia solani* treten typischerweise erst Ende August auf. Die Erkennung von Trockenstress und die Unterscheidung von Symptomen verursacht durch Nematodenbefall sind nur durch Überfliegungen derselben Versuchsfläche über mehrere Jahre denkbar, wenn ein nesterweises Welken im Bestand auch unter anderen Kulturen sichtbar wird. Bei der Analyse von Reflexionsmessungen zur Krankheitserkennung sind jedoch Information über Bodenart und Nährstoffversorgung weiterhin unabdingbar, da Bodentemperatur, Wasserstatus und Stickstoffverfügbarkeit die Symptome eines Pathogenbefalls überlagern können (CHAELE & VAN DER STRAETEN, 2000). Beim Vergleich von Präzision, Reproduzierbarkeit und Genauigkeit multispektraler Aufnahmen zur Erkennung von Pflanzenkrankheiten und visuellen Bonituren, wird weiterhin zu einer Kombination beider Verfahren geraten (STEDDOM et al., 2005).

Im Hinblick auf eine Reduzierung von Bodenproben und Einsparung von Nematiziden ist die teilschlagspezifische Erkennung von Nematoden und deren Befallsdichten mittels Fernerkundung ein aktuelles Forschungsvorhaben: LAWRENCE et al. (2004) konnten mit Hilfe von Reflexionsdaten nematodenbefallener Baumwollfelder und anhand von Bodenreferenzwerten Nematodenverteilungskarten generieren, die eine 83 %ige Genauigkeit in Bezug auf die Beziehung zwischen Reflexionsdaten und Nematodenbefallsnestern aufwiesen. Basierend auf intensiven Bodenprobenahmen an ausgewählten Standpunkten von nematodeninfizierten Kartoffelfeldern war es mit Hilfe von GPS und GIS sowie Simulationsmodellen bereits möglich, Befallsherde von Nematoden teilflächenspezifisch zu erkennen und eine 86 %ige Einsparung von Nematiziden zu erreichen (SHOMAKER & BEEN, 1999). Zukünftig ist auch eine Kombination thermografischer und multispektraler

Fernerkundungsverfahren denkbar, da sowohl die Blatttranspiration (NICOLAS et al., 1991; SCHANS & ARNTZEN, 1991) als auch der Chlorophyllgehalt (SIDDIQUI et al., 1999; ASMUS et al., 2002) und die Blattmasse (DECKER, 1969; MELAKEBERHAN & FERRIS, 1989; SCHANS & ARNTZEN, 1991) von Nematoden beeinflusst werden.

4 Biologische Bekämpfung von *Heterodera schachtii* mit dem eipathogenen Pilz *Paecilomyces lilacinus* (BIOACT® Stamm 251)

4.1. Einleitung

Der in dieser Arbeit zur Kontrolle von *H. schachtii* eingesetzte fakultative eipathogene Pilz *Paecilomyces lilacinus* (Thom) Samson zählt zu den Deuteromyceten. Die Konidienträger der Gattung *Paecilomyces* sind unregelmäßig verzweigt. Die einzelligen, 2,5 bis 3,0 µm langen und 2,0 bis 2,2 µm breiten, violett gefärbten Konidien sind kettenförmig an Phialiden aufgereiht (SAMSON, 1975). *P. lilacinus* kann in einem Temperaturbereich von 8 bis 38° C überleben. Laut DOMSCH et al. (1980) findet ein optimales Wachstum aber nur zwischen 26° C und 30° C statt. Andere Autoren konnten bei Temperaturen zwischen 20° C und 25° C (STEPHAN & AL-DIN, 1987) oder erst bei über 30° C (SUBBARAO, 1993) die meiste Sporenproduktion und das beste Myzelwachstum von *P. lilacinus* beobachten.

Paecilomyces lilacinus befällt vornehmlich Nematodeneier, es können aber auch sedentäre Weibchen und bewegliche Nematodenstadien angegriffen werden (CABANILLAS et al., 1989). Studien zur Interaktion des Pilzes mit Kartoffelzystennematoden zeigten, dass *P. lilacinus* die Eier innerhalb der Zysten penetrierte und die Larven zerstörte (JATALA et al., 1979; DAVIDE & ZORILLA, 1983; DAVIDE, 1985). Eine Parasitierung der Eier wurde auch für Wurzelgallennematoden beschrieben (ZAKI & BHATTI 1990; ZAKI & BHATTI 1991; EKANAYAKE & JAYASUNDARA, 1994; ZAKI, 1994). Die Infektionsrate der Eier von Wurzelgallennematoden ist abhängig von der Inkubationszeit (JATALA, 1985; HOLLAND, 2000) sowie der Sporenkonzentrationen pro Gramm Boden (GOMEZ CARNEIRO & CAYROL, 1991). Weiterhin wurde *P. lilacinus* in einigen *H. schachtii*-suppressiven Böden beobachtet (WESTPHAL & BECKER, 2001).

Neben der Eiparasitierung wurde auch eine Reduktion von Nematodenlarven *in vitro*, im Gewächshaus und unter Feldbedingungen beobachtet (ZAKI & BHATTI, 1991; ZAKI, 1994; FREITAS et al., 1995; SIDDIQUI et al., 2000). Ein reduzierter Larvenschlupf bedingt durch *P. lilacinus* wurde für Wurzelgallennematoden (KHAN et al., 2004) und für den Zystennematoden *Heterodera glycines* (CHEN et al., 1996) berichtet.

In der vorliegenden Arbeit sollte das Potential des Pilzes *P. lilacinus* Stamm 251 (PL251) zur Bekämpfung von *H. schachtii* getestet werden. Die Wirksamkeit von *P. lilacinus* Stamm 251 in Form des biologischen Nematizids BIOACT® wurde schon häufig unter Feldbedingungen getestet (KERRY, 1996). Bestätigt sich die Hypothese, dass PL251 *H. schachtii*-Eier parasitiert

und die Eindringung der Nematoden in die Zuckerrübenwurzeln vermindert, gäbe es für die Zukunft neben resistenten Zwischenfrüchten und resistenten Zuckerrüben eine weitere biologische Bekämpfungsmöglichkeit von Rübenzystennematoden.

Zur Auswahl einer geeigneten Konzentration an PL251-Konidien für einen optimalen Bekämpfungseffekt wurden verschiedene Konzentrationen des Pilzes auf ihre Wirksamkeit gegen *H. schachtii* getestet. Weiterhin wurde der Einfluss des Pilzes auf die Larven von *H. schachtii* beobachtet, um auch mobile Nematodenstadien im Boden kontrollieren zu können. Für eine eventuelle Anwendung auf dem Feld und zur Ermittlung der Applikationszeit wurde die Wirksamkeit von PL251 bei verschiedenen Temperaturen und bei unterschiedlich langer Inkubationszeit beobachtet. Alle Experimente wurden mindestens einmal wiederholt, im Folgenden sind jeweils nur die Daten eines Versuchs dargestellt.

4.2. Material und Methoden

4.2.1. *Paecilomyces lilacinus*

4.2.1.1. Herkunft

Verschiedene Stämme von *P. lilacinus* wurden weltweit aus unterschiedlichen Habitaten isoliert. An den Wurzelgallennematoden *Meloidogyne incognita* (JATALA et al., 1979) sowie an *M. arenaria* (GOMES CARNEIRO et al., 1991) wurde *P. lilacinus* als parasitärer Pilz gefunden. Der in der vorliegenden Arbeit verwendete Stamm 251 wurde ursprünglich aus *Meloidogyne*-Eimassen in den Philippinen isoliert, ist heute als BIOACT®WG (water dispersible granulate = wasserlösliches Granulat) registriert und wird in Bulgarien, Kolumbien, Neukaledonien, den Philippinen und in Südafrika bereits zur Kontrolle von Nematoden eingesetzt. Momentan wird die Zulassung von BIOACT®WG für die Mitgliedstaaten der Europäischen Union geprüft. *P. lilacinus* (BIOACT® Stamm 251) wurde von PROPHYTA Biologischer Pflanzenschutz GmbH, Malchow, Deutschland zur Verfügung gestellt.

4.2.1.2. Qualitätskontrolle

Um die Effektivität des Produktes zu gewährleisten wurde die Anzahl keimfähiger Konidien pro Gramm BIOACT® mit Hilfe eines 24h-Schnelltests bestimmt. Hierzu wurde ein Gramm des Granulates in 100 ml sterilem demineralisierten Wasser (*A. demin.*) aufgelöst und auf einem Magnetrührer bei hoher Geschwindigkeit 15 Minuten gemischt. Anschließend wurde eine 10 %ige Verdünnung mit *A. demin.* hergestellt und diese auf einer Petrischale mit Sabouraud Dextrose Agar ausplattiert. Nach einer 24-stündigen Inkubationszeit bei 28° C erfolgte die Auszählung der gekeimten und nicht gekeimten Konidien unter dem Mikroskop. Eine Keimrate von mindestens 75 %, ermittelt aus 2 x 200 Konidien, galt dabei als Voraussetzung für die Durchführung der Versuche.

4.2.1.3. Einarbeitung der Konidien in den Boden

Das Produkt BIOACT®WG enthielt in einem Gramm 10^{10} keimfähige Konidien. Für die verschiedenen Versuche wurden drei Gramm des Granulates in 100 ml Leitungswasser suspendiert und eine 10-fache Verdünnungsreihe hergestellt. Die verschiedenen Suspensionen von BIOACT® wurden anschließend auf die Erde gegeben und sorgfältig untergemischt. Für die Experimente wurde ein gesiebtes und hitzesteriles Felderde:Sand-Gemisch 1:2 (v:v) verwendet. Zur Messung der Parasitierungsrate wurden 0,3 l Töpfe verwendet. Die höchste Konzentration von PL251 im Substrat betrug 10^7 Konidien/g Boden, dies entspricht 0,001 g BIOACT®/g Boden.

4.2.2. *Heterodera schachtii*

4.2.2.1. Inokulation der Zysten

Die Inokulation der Zysten in die Versuchserde erfolgte nach der Diarahmen-Methode (KIEWNICK, 1997). Hierfür wurden je nach Versuch 10 oder 20 gut gefüllte Zysten gleicher Größe unter dem Stereomikroskop mit Hilfe einer Federpinzette gesammelt und direkt auf eine angefeuchtete Nylongaze (Fa. Verseidag GmbH, TechFab) der Maschenweite 200 µm gelegt. Die Nylongaze wurde anschließend gefaltet und in einen Diarahmen (50 x 55 mm, Reflecta, Fa. Agfa) eingeklemmt, so dass sich die Zysten innerhalb der Gaze befanden. Die Diarahmen mit Zysten konnten dann vertikal in die Töpfe geschoben werden bis sie vollständig von Erde umgeben waren. Um einen ausreichenden Kontakt der Zysten mit der Versuchserde zu gewährleisten, wurde die Erde seitlich der Rahmen angedrückt. Zu Versuchsende wurden die Diarahmen aus der Erde gezogen, vorsichtig mit Leitungswasser abgewaschen und anschließend auf feuchtem Filterpapier geöffnet. Die Zysten jedes Rahmens konnten daraufhin mit Hilfe einer Federpinzette entnommen werden.

4.2.2.2. Bestimmung des Zysteninhaltes

Vor jedem Versuch wurde die durchschnittliche Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste bestimmt. Beim Vergleich der durchschnittlichen Anzahl an Eiern und Larven vor dem Versuch mit dem Zysteninhalt der Kontrolle nach dem Versuch konnte getestet werden, ob möglicherweise ein Spontanschlupf der Larven aus den Eiern stattgefunden hat. Weiterhin wurde der Inhalt der behandelten Zysten ermittelt, um einen möglichen Einfluß des Pilzes auf den Spontanschlupf festzustellen. Hierzu wurden zur Freisetzung der Eier und Larven 3 x 10 Zysten in einem Gewebehomogenisator gequetscht. Für die Bestimmung der Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste wurde zweimal ein Aliquot von einem Milliliter in einer RAS-Zählkammer unter dem Mikroskop ausgezählt.

4.2.2.3. Bestimmung der Parasitierungsrate von *H. schachtii* Eiern durch *P. lilacinus*

Nach Freisetzung der Nematoden im Gewebehomogenisator (vgl. 4.2.2.2.) wurde die Nematodensuspension 1:1 (v/v) mit einer 0,5 %igen Bengalrosa (Fa. Fluka) Färbelösung versetzt, die in 5 %igem Alkohol gelöst war (KIEWNICK, 1997). Anschließend wurde die Färbelösung entfernt.

Die Messung der Parasitierungsrate der Eier von *H. schachtii* erfolgte mikroskopisch bei 100-facher Vergrößerung. Aus jeder Probe wurden 2 x 200 Eier nach folgenden Kriterien bewertet:

- vitale, intakte und ungefärbte Eier
- vitale Eier mit oberflächlich anhaftendem Myzel
- Eier ohne pilzliche Besiedlung, im Innern durch Anfärbung rötlich gefärbt
- Eier mit pilzlicher Besiedlung

Als parasitiert wurden Eier mit anhaftendem Myzel und Eier mit pilzlicher Besiedlung eingestuft.

4.2.3. Berechnung der Wirkungsgrade

Die Berechnung der Wirkungsgrade in Bezug auf die Mortalität der Larven erfolgte nach ABBOTT (1925). Die verwendete Formel lautet: Wirkungsgrad in %

$$= \frac{C - T}{C} * 100 = \frac{\text{extrahierte Larven in der Kontrolle} - \text{extrahierte Larven im Versuch}}{\text{extrahierte Larven in der Kontrolle}} * 100.$$

Bei der Berechnung des Wirkungsgrades in Bezug auf die Eiparasitierung wurde eine modifizierte Formel nach UNTERSTENHÖFER (1963) angewandt: Wirkungsgrad in %

$$= \frac{b - k}{100 - k} * 100 = \frac{\% \text{ parasitierte Eier im Versuch} - \% \text{ parasitierte Eier in Kontrolle}}{100 - \% \text{ parasitierte Eier in Kontrolle}} * 100.$$

4.2.4. Einfluss von *P. lilacinus* auf die Parasitierung von *H. schachtii* in Abhängigkeit von der Konzentration

Zehn *H. schachtii*-Zysten wurden in Diarahmen platziert (vgl. 4.2.2.1.) und für 14 Tage im Substrat belassen, das 0, 10⁴, 10⁵, 10⁶ bzw. 10⁷ Konidien/g Boden enthielt. Pro Variante wurden fünf Töpfe mit 300 g hitzesterilem Substrat und der entsprechenden Konzentration an *P. lilacinus* gefüllt und ein Diarahmen in jeden Topf gesteckt. Die Töpfe wurden im Gewächshaus aufgestellt und täglich mit Leitungswasser angefeuchtet. Die durchschnittlichen Tag/Nacht-Temperaturen während der Inkubation der Zysten betrugen 25° C bzw. 20° C. Nach 14 Tagen wurden die Diarahmen aus der Erde gezogen, die durchschnittliche Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste (vgl. 4.2.2.2.) und die Parasitierungsrate der Eier (vgl. 4.2.2.3.) bestimmt.

4.2.5. Einfluss von *P. lilacinus* auf die Parasitierung von *H. schachtii* und die Eindringung von *H. schachtii* in Zuckerrüben

In diesem Experiment wurde neben der Parasitierungsrate untersucht, ob *P. lilacinus* einen Einfluss auf die Eindringung von *H. schachtii* in Zuckerrübenwurzeln hat. Hierbei wurden zwei Konzentrationen (10⁶ und 10⁷ Konidien/g Versuchserde) getestet, mit denen zuvor die höchsten Parasitierungsraten erreicht wurden. Je Variante wurden fünf Wiederholungen angesetzt.

Zur Messung der Parasitierungsrate der Eier durch *P. lilacinus* und zur Ermittlung der Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste wurde in jeden Topf ein Diarahmen mit zehn Zysten gesteckt. Nach zweiwöchiger Inkubationszeit im Substrat erfolgte die Bestimmung der

Parasitierungsrate und der Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste. Während der Inkubationszeit der Zysten betrugen die Gewächshaustemperaturen tagsüber 27° C und nachts 21° C. Der Temperaturverlauf im Gewächshaus während der Inkubation der Zysten ist im Anhang in Abb. A1 dargestellt.

Zur Bestimmung der Eindringung wurde in jeden der Töpfe ein Diarahmen mit 20 Zysten gesteckt und für 14 Tage inkubiert. Anschließend wurden die Diarahmen entnommen und anhaftende Versuchserde entfernt. Die Diarahmen konnten anschließend in Töpfe mit einem sterilen Felderde:Sand-Gemisch 1:2 (v:v) und drei Wochen alten Zuckerrüben überführt werden. Die Anzucht der Zuckerrübenpflanzen (*Beta vulgaris* L.) war zuvor in 0,6 l Töpfen im Gewächshaus bei durchschnittlichen Tag/Nacht-Temperaturen von 27° C bzw. 21° C erfolgt. Verwendet wurde die nematodenanfällige Sorte 'Macarena'. Die Pflanzen wurden täglich gegossen und einmal wöchentlich mit 10 ml einer 2 %igen NPK-Düngerlösung (Poly Crescal® 14-10-14) gedüngt. Nach 14 Tagen erfolgte die Auswertung der Eindringung. Oberirdische Pflanzenteile wurden von den Wurzeln getrennt und das Gewicht sowie die Länge der Wurzeln ermittelt. Anschließend wurde die Eindringung von *H. schachtii* in die Zuckerrübenwurzeln bestimmt (vgl. 2.1.3.).

4.2.6. Einfluss der Temperatur auf die Parasitierung von *H. schachtii* und die Eindringung von *H. schachtii* in Zuckerrüben

In dieser Untersuchung sollte der Einfluss der Temperatur auf die pilzliche Besiedlung der Eier sowie die Eindringung von *H. schachtii* in das Wurzelgewebe ermittelt werden. Zur Bestimmung der Parasitierungsrate und des Zysteninhaltes wurden zehn, zur Bestimmung der Eindringungsrate 20 Zysten in Diarahmen platziert. Die Diarahmen wurden in Töpfe mit 10⁷ Konidien/g Versuchserde sowie in Töpfe mit unbehandelter Erde gesteckt. Die Töpfe samt Diarahmen wurden mit jeweils fünf Wiederholungen bei 15° C, 20° C und 25° C_{±1} in Klimakammern aufgestellt und täglich mit Leitungswasser angefeuchtet. Nach zwei und vier Wochen Inkubationszeit der Zysten wurde der Zysteninhalt sowie die Parasitierungsrate der *H. schachtii*-Eier ermittelt. Die Diarahmen zur Ermittlung der Eindringungsrate wurden nach zwei- und vierwöchiger Inkubationszeit in Töpfe mit drei Wochen alten Zuckerrüben überführt. Die Anzucht der nematodenanfälligen Zuckerrübensorte 'Macarena' erfolgte im Gewächshaus (vgl. 2.2.). Die Tag/Nacht-Temperaturen im Gewächshaus betrugen während des Versuchs 29° C bzw. 26° C für den ersten Auswertungstermin und 28° C bzw. 25° C für den zweiten Auswertungstermin. Die Bestimmung des Wurzelfrischgewichtes, der

Wurzellänge sowie die Ermittlung der Eindringung von *H. schachtii* in die Wurzeln (vgl. 2.1.3.) erfolgte nach weiteren zwei Wochen Inkubation an der Zuckerrübe.

4.2.7. Einfluss von *P. lilacinus* auf *H. schachtii*-Larven im Boden in Abhängigkeit von der Konzentration

Die Wirkung von *P. lilacinus* gegen *H. schachtii*-Larven wurde in Abhängigkeit von der Konzentration getestet. Versuchserde mit 0, 10^4 , 10^5 , 10^6 bzw. 10^7 Konidien/g Boden wurde in 0,2 l Plastikgefäße überführt. Je Variante wurden fünf Töpfe angesetzt. Anschließend erfolgte die Inokulation von 600 *H. schachtii*-Larven pro Topf. Hierzu wurde 1 ml der Larvensuspension pro Topf in eine ca. 2 cm tiefe Vertiefung der Versuchserde inokuliert. Die Gefäße wurden im Gewächshaus bei Temperaturen von durchschnittlich 30° C und 24° C (Tag/Nacht) aufgestellt und einmal täglich mit etwas Leitungswasser angefeuchtet. Nach sieben Tagen wurden die *H. schachtii*-Larven mit Hilfe von Oostenbrinkschalen extrahiert (OOSTENBRINK, 1960) und unter dem Mikroskop ausgezählt.

4.2.8. Einfluss von *P. lilacinus* auf *H. schachtii*-Larven im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur

In diesem Versuch sollte neben dem Einfluss verschiedener Konzentrationen von *P. lilacinus* zusätzlich der Einfluss der Temperatur auf die Larven ermittelt werden. Hierzu wurde die Versuchserde mit 0, 10^4 , 10^5 , 10^6 bzw. 10^7 Konidien/g Boden in 0,2 l Töpfe gefüllt und jeder Topf mit 600 *H. schachtii*-Larven inokuliert. Die Gefäße wurden mit jeweils fünf Wiederholungen bei 15° C, 20° C und 25° C \pm 1 in Klimakammern aufgestellt und täglich mit Leitungswasser angefeuchtet. Nach sieben Tagen erfolgte die Extraktion und Auszählung der ausgewanderten Larven (vgl. 4.2.7.).

4.3. Ergebnisse

4.3.1. Einfluss von *P. lilacinus* auf die Parasitierung von *H. schachtii* in Abhängigkeit von der Konzentration

Bei der Bestimmung der Wirksamkeit von *P. lilacinus* bezüglich der Parasitierung von *H. schachtii*-Eiern war eine Dosis-Wirkungs-Beziehung erkennbar (Abb. 11). Es bestand eine signifikante Korrelation zwischen der Konzentration vitaler Konidien pro Gramm Boden und dem Wirkungsgrad der Eiparasitierung. Der höchste Wirkungsgrad von 43,5 % wurde bei 10^7 Konidien/g Boden ermittelt.

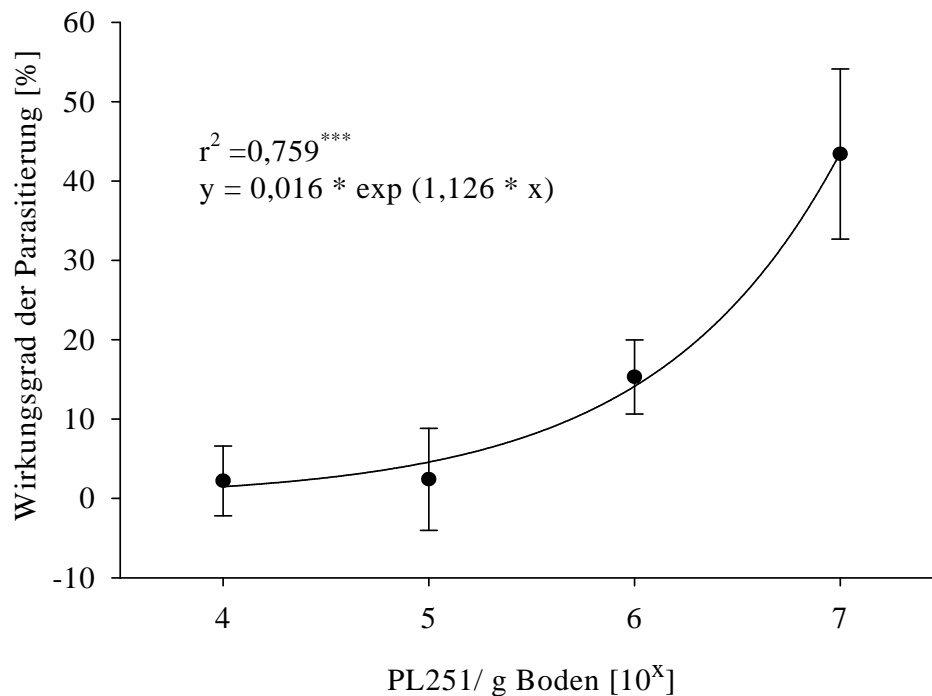


Abb. 11. Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Konzentration von *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und dem Wirkungsgrad der Parasitierung von *Heterodera schachtii*-Eiern nach 14 Tagen Inkubationszeit der Zysten (***) signifikant bei $P < 0,01$; Mittelwerte \pm Standardfehler; $n = 5$).

In Bezug auf die Anzahl Eier und Larven pro Zyste konnten keine signifikanten Unterschiede zwischen den getesteten Konzentrationen von *P. lilacinus* und der Kontrolle festgestellt werden (Abb. A2). Vor Durchführung des Versuchs wurden bei unbehandelten Zysten 74 Eier und Larven pro Zyste ermittelt.

4.3.2. Einfluss von *P. lilacinus* auf die Parasitierung von *H. schachtii* und die Eindringung von *H. schachtii* in Zuckerrüben

Bei beiden verwendeten Konzentrationen von *P. lilacinus* wurden signifikant höhere Parasitierungsraten im Vergleich zur Kontrolle festgestellt (Tab. 8). In Bezug auf die Anzahl Eier und Larven wurden keine signifikanten Unterschiede im Vergleich zur Kontrolle ermittelt: die unbehandelten Zysten enthielten im Durchschnitt 77,5 Eier und Larven. Bei Zysten, die in Erde mit 10^6 Konidien/g Boden inkubiert waren, lag die Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste bei 53,2. Bei der höchsten Konidien-Konzentration von 10^7 Konidien/g Boden wurden 103,4 Eier und Larven/Zyste ermittelt. Vor Ansatz des Versuchs wurden 102 Eier und Larven pro unbehandelter Zyste ermittelt.

Wurzelgewicht und Wurzellänge waren nach Behandlung mit PL251 nicht verschieden von der Kontrolle. Bei beiden getesteten Konzentrationen von PL251 zeigten sich deutlich niedrigere Eindringungsraten pro Wurzel sowie pro Gramm und Meter Wurzel im Vergleich zur Kontrolle. Signifikant waren diese Werte jedoch nur für die hohe Konzentration von 10^7 Konidien/g Boden (Tab. 8).

Tab. 8. Einfluss von *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (10^6 und 10^7 PL251-Konidien/g Boden) auf die Parasitierungsrate von *Heterodera schachtii*, Wurzelfrischgewicht, Wurzellänge und Eindringung von *Heterodera schachtii* in die Zuckerrübenwurzeln nach 14 Tagen Inkubation im Gewächshaus.

Variante	Parasitierungsrate der Eier [%]	Wurzelfrisch- gewicht [g]	Wurzellänge [m]	<i>H.schachtii</i> / Wurzelsystem	<i>H.schachtii</i> / g Wurzel	<i>H.schachtii</i> / m Wurzel
Kontrolle	4,9 a	1,3	22,3	286 a	245,5 a	13,8 a
1×10^6 PL251	34 b	1,2	19,9	139 ab	89,1 ab	5,6 ab
1×10^7 PL251	44,1 b	1,7	27,7	75 b	55,7 b	3,0 b
Tukey-HSD		n.s.	n.s.			

Mittelwerte mit gleichen Buchstaben innerhalb einer Spalte sind nicht signifikant verschieden nach Tukeys HSD-Test ($P \leq 0,05$; $n = 5$); n.s. = nicht signifikant.

4.3.3. Einfluss der Temperatur auf die Parasitierung von *H. schachtii* und die Eindringung von *H. schachtii* in Zuckerrüben

Bei allen drei Temperaturen wurde bei den behandelten Zysten eine signifikant höhere Parasitierungsrate der Eier festgestellt (Tab. 9). Ein signifikanter Einfluss auf die Parasitierung konnte auch für die Inkubationszeit der Zysten mit PL251 bei 15° C und 20° C festgestellt werden (Tab. 10). Doch waren die signifikanten Unterschiede in der Parasitierungsrate nach längerer Inkubationszeit in einigen Fällen niedriger und in anderen Fällen höher (Tab. 9). Die Interaktion zwischen Behandlung und Zeit hatte nur bei 20° C einen signifikanten Einfluss auf die Parasitierungsrate (Tab. 10).

Vor Ansatz des Versuches lag die durchschnittliche Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste bei 409 und somit höher als bei unbehandelten und behandelten Zysten nach dem Versuch, deren Larven während des Versuchs wahrscheinlich geschlüpft sind. Die Behandlung mit PL251 und die Inkubationszeit hatten in einigen Fällen einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste (Tab. 10). Tendentiell wurde bei behandelten Zysten eine geringere Anzahl Eier und Larven pro Zyste ermittelt als bei unbehandelten Zysten. Weiterhin wurde nach längerer Inkubationszeit eine niedrigere Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste festgestellt.

Tab. 9. Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) [10^7 Konidien/g Boden] und der Inkubationszeit der Zysten [Wochen] ohne Zuckerrübenpflanze auf die Parasitierungsrate von *Heterodera schachtii*-Eiern bei drei verschiedenen Temperaturen.

	Parasitierungsrate [%]								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	23,6	6,0	*	10,7	21,7	*	17,2	13,7	n.s.
PL251	41,2	25,7	*	29,0	57,9	n.s.	29,6	32,9	n.s.
Sign. ^b	*	*		*	*		*	*	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s. = nicht signifikant; n = 5.

Tab. 10. Signifikante Einflüsse der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251, der Inkubationszeit der Zysten und der Interaktion zwischen Behandlung und Inkubationszeit auf die Parasitierungsrate von *Heterodera schachtii*-Eiern und den Zysteninhalt.

	Parasitierungsrate [%]			Eier + Larven / Zyste		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
Behandlung	***	***	***	n.s.	n.s.	n.s.
Zeit	***	***	n.s.	n.s.	n.s.	***
Behandlung x Zeit	n.s.	***	n.s.	n.s.	**	n.s.

** = signifikant bei $P \geq 0,05$; *** = signifikant bei $P \geq 0,01$; n = 5.

Ein signifikanter Einfluss der Behandlung auf das Wurzelgewicht war bei keiner Temperatur zu verzeichnen (Tab. 11). Die Inkubationszeit hatte hingegen bei allen Temperaturen einen signifikanten Einfluss sowohl auf das Wurzelgewicht als auch auf die Wurzellänge (Tab. 11). Nach vier Wochen Inkubationszeit waren Wurzelfrischgewicht und Wurzellänge bei 20° C und 25° C signifikant niedriger als nach zwei Wochen (Tab. A16 und A17). Die Interaktion von Behandlung und Zeit hatte keinen signifikanten Einfluss auf Wurzelgewicht und Wurzellänge (Tab. 11).

Tab. 11: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251, der Inkubationszeit der Zysten und der Interaktion zwischen Behandlung und Inkubationszeit auf Wurzelgewicht und Wurzellänge von Zuckerrüben.

	Wurzelfrischgewicht [g]			Wurzellänge [m]		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
Behandlung	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Zeit	**	***	***	**	***	***
Behandlung x Zeit	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

** = signifikant bei $P \geq 0,05$; *** = signifikant bei $P \geq 0,01$; n = 5.

Die Behandlung mit *P. lilacinus* hatte bei keiner Temperatur einen signifikanten Einfluss auf die Anzahl eingedrungener Nematoden pro Wurzelsystem, pro Gramm und pro Meter Wurzel (Tab. 12 und 13; Tab. A18 und A19). Eine Ausnahme bildete die Anzahl eingedrungener Nematoden pro Wurzelsystem bei 25° C. Hierbei waren durch die Behandlung mit PL251

weniger Nematoden pro Wurzelsystem eingedrungen (Tab. 12) und ein signifikanter Einfluss der Behandlung zu erkennen.

Auffällig ist die signifikante Wechselwirkung der Zeit mit der Anzahl eingedrungener Nematoden pro Gramm Wurzel bei allen drei Temperaturen und auf die Eindringung von *H. schachtii* pro Meter Wurzel bei 20° C (Tab. 13). Dieser Einfluss ist in Zusammenhang mit den deutlich niedrigeren Wurzelgewichten und Wurzellängen (Tab. A16 und A17) nach dem zweiten Auswertungstermin zu betrachten.

Tab. 12. Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) [10^7 Konidien/g Boden] und der Inkubationszeit der Zysten [Wochen] auf die Eindringung von *Heterodera schachtii* pro Wurzelsystem bei drei verschiedenen Temperaturen.

	<i>H. schachtii</i> / Wurzelsystem								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	224	138	*	184	204	n.s.	218	208	n.s.
PL251	196	120	n.s.	216	140	*	160	180	n.s.
Sign. ^b	n.s.	n.s.		n.s.	*		*	*	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; n = 5.

Tab. 13. Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251, der Inkubationszeit der Zysten und der Interaktion zwischen Behandlung und Inkubationszeit auf die Eindringung von *Heterodea schachtii* pro Wurzelsystem, pro Gramm und Meter Wurzel bei drei verschiedenen Temperaturen.

	<i>H. schachtii</i> /Wurzel			<i>H. schachtii</i> /g Wurzel			<i>H. schachtii</i> /m Wurzel		
	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C	15°C	20°C	25°C
Behandlung	n.s.	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
Zeit	***	n.s.	n.s.	***	***	***	n.s.	**	n.s.
Behandlung x Zeit	n.s.	***	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

** = signifikant bei $P \geq 0,05$; *** = signifikant bei $P \geq 0,01$; n = 5.

4.3.4. Einfluss von *P. lilacinus* auf *H. schachtii*-Larven im Boden in Abhängigkeit von der Konzentration

Bei der Bestimmung des Wirkungsgrades von *P. lilacinus* Stamm 251 in Bezug auf die Mortalität der Larven von *H. schachtii* war eine Dosis-Wirkungs-Beziehung erkennbar. Der höchste Wirkungsgrad von 58 % wurde bei 10^7 Konidien/g Boden ermittelt (Abb. 12).

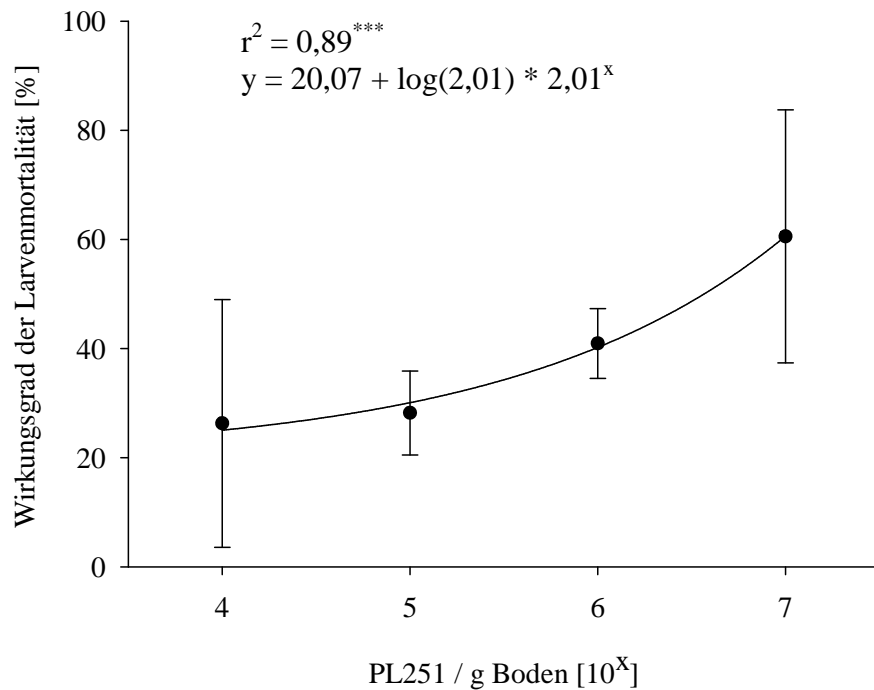


Abb. 12. Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Konzentration von *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und dem Wirkungsgrad der Mortalität von *Heterodera schachtii*-Larven nach 14 Tagen Inkubationszeit der Zysten (***) signifikant bei $P < 0,01$; Mittelwerte \pm Standardfehler; $n = 5$).

4.3.5. Einfluss von *P. lilacinus* auf *H. schachtii*-Larven im Boden in Abhängigkeit von der Temperatur

In Abbildung 13 ist die Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Konzentration von *P. lilacinus* und dem Wirkungsgrad der Mortalität von *Heterodera schachtii*-Larven in Abhängigkeit von der Temperatur dargestellt. Bei 15° C wurde bei Erhöhung der Konidienkonzentration von PL251 kein höherer Wirkungsgrad der Larvenmortalität erzielt. Bei 20° C und 25° C wurde dagegen mit zunehmender Konidienkonzentration im Boden ein höherer Wirkungsgrad beobachtet.

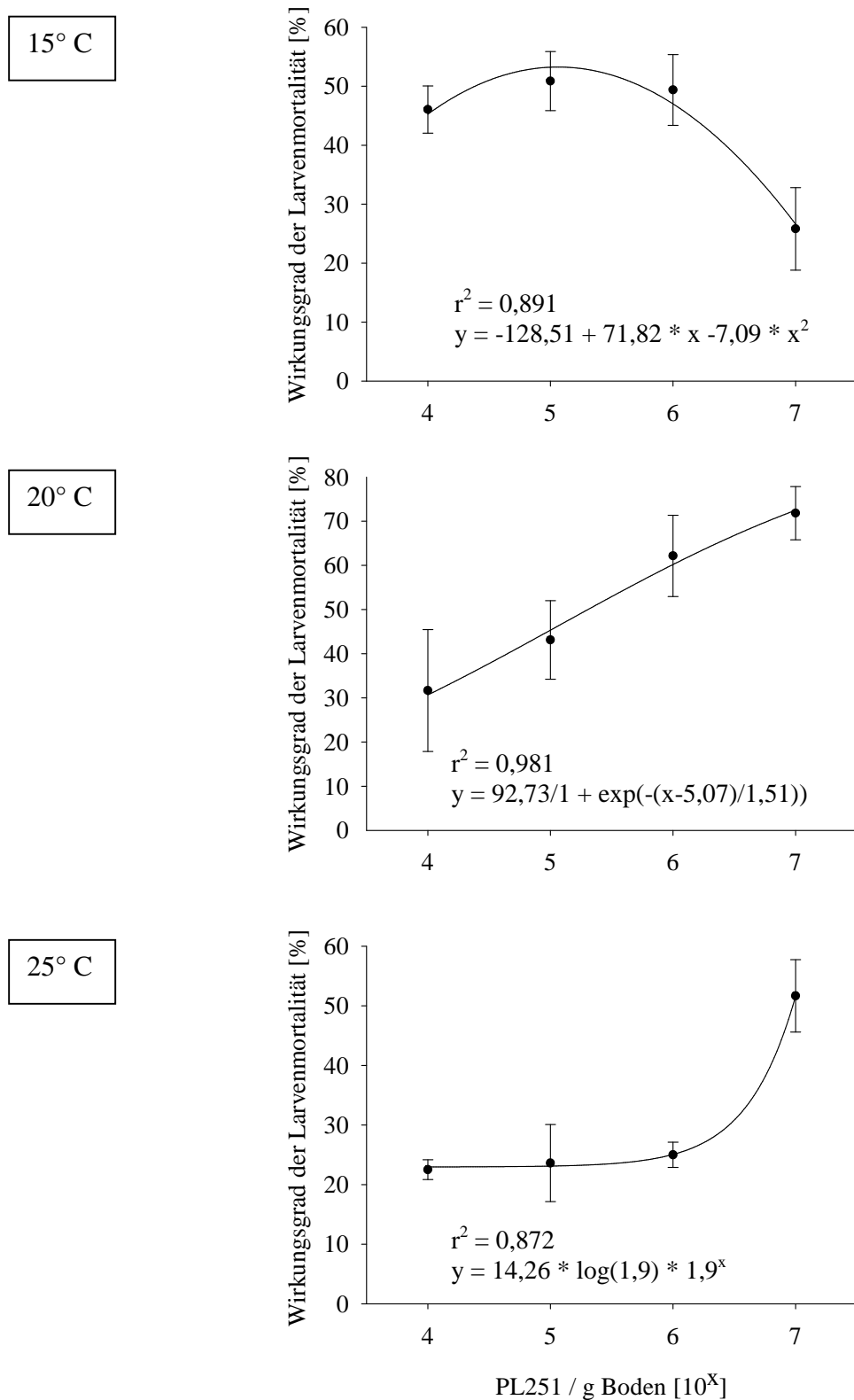


Abb. 13: Dosis-Wirkungs-Beziehung zwischen der Konzentrationen von *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und der Mortalität von *Heterodera schachtii*-Larven nach 14 Tagen Inkubationszeit der Zysten bei unterschiedlichen Temperaturen (** signifikant bei $P < 0,05$; *** signifikant bei $P < 0,01$; Mittelwerte \pm Standardfehler; $n = 5$).

4.4. Diskussion

Es ist bekannt, dass *P. lilacinus* die Eier von Kartoffelzystennematoden (JATALA et al., 1979; DAVIDE & ZORILLA, 1983; DAVIDE, 1985) und verschiedenen Wurzelgallennematoden (ZAKI & BHATTI 1990; ZAKI & BHATTI 1991; EKANAYAKE & JAYASUNDARA, 1994; ZAKI, 1994) parasitiert und in einigen *H. schachtii*-suppressiven Böden vorkommt (WESTPHAL & BECKER, 2001). Eine Parasitierung von *H. schachtii*-Eiern durch *P. lilacinus* wurde jedoch bislang nicht erforscht. In der vorliegenden Arbeit wurde durch Applikation des Pilzes sowohl eine Parasitierung der Eier als auch eine verringerte Eindringung der Nematoden in die Wurzeln beobachtet. Mit zunehmender Anzahl an Konidien von PL251 erhöhte sich der Wirkungsgrad des Präparates BIOACT® in Bezug auf die Parasitierung von *H. schachtii*-Eiern. Ab einer Konzentration von 10^6 Konidien zeigten sich signifikant höhere Infektionsraten im Vergleich zur Kontrolle. Die Beobachtungen entsprechen denen von GOMEZ CARNEIRO & CAYROL (1991), die die Infektionsraten von *Meloidogyne arenaria*-Eiern durch *P. lilacinus* bei Konzentrationen von 10^3 bis 10^6 Konidien/g sterilem Boden beobachteten. Mit Erhöhung der Konidienzahl erhöhten sich die Parasitierungsraten durch *P. lilacinus*.

Antagonistische Pilze, wie beispielsweise endophytische Pilze, können verringerte Eindringungsraten von Nematoden zur Folge haben (SIKORA et al., 2003). So beobachteten SPEIJER (1993), POCASANGRE (2000) und VU THI THANH (2005) nach Applikation endophytischer Pilze eine reduzierte Eindringung der Nematoden *Pratylenchus goodeyi* bzw. *Radopholus similis* in Bananenwurzeln, sowie HALLMANN und SIKORA et al. (1994) verringerte Eindringungsraten von *Meloidogyne incognita* in Tomatenwurzeln. In der vorliegenden Arbeit war bei einer Konzentration von 10^7 Konidien/g steriler Erde die Eindringung von *H. schachtii* in die Wurzeln niedriger als bei der Kontrolle. Bei 10^6 Konidien/g Boden wurden keine signifikant niedrigeren Eindringungsraten im Vergleich zur Kontrolle festgestellt. Mit zunehmender Menge an PL251-Konidien in steriler Erde wurden bereits verringerte Eindringungsraten des Nematoden *Radopholus similis* in die Wurzeln von Bananen beobachtet (MENDOZA et al., 2004).

Bei allen Temperaturen waren die Parasitierungsraten der behandelten Eier signifikant höher als in der Kontrolle, wobei die relativ hohen Parasitierungsraten in der Kontrolle auf das unsterile Zystenmaterial zurückzuführen sind, welches aus einer Vermehrung von *H. schachtii* an Gelbsenf stammte. Auch HOLLAND (2000) zeigte bereits, dass PL251 in der Lage ist, Eimassen von *M. javanica* bei Temperaturen von 15° C bis 30° C zu infizieren.

Weiterhin wurden bei allen Temperaturen ähnliche Parasitierungsraten ermittelt, die Eindringungsraten waren dagegen nur bei Temperaturen von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ verringert. Da bei der Erhebung der Parasitierung nicht zwischen oberflächlich parasitierten Eiern und vollständig parasitierten Eiern differenziert wurde, könnten bei der Bestimmung der Parasitierung auch Eier als parasitiert eingestuft worden sein, die nur außen mit Myzel besiedelt waren. Demzufolge ist es möglich, dass bei 25°C bereits mehr Eier vollständig parasitiert waren und dadurch eine vermehrte Abtötung der Larven zustande kam, was bei niedrigeren Temperaturen nicht möglich war. Die Daten lassen vermuten, dass auch der Stamm 251 ein Temperaturoptimum bei über 25°C aufweist und sind vereinbar mit Ergebnissen von DOMSCH et al. (1980) und SUBBARAO (1993), die ein optimales Myzelwachstum verschiedener *P. lilacinus*-Stämme zwischen 26°C und 30°C bzw. bei Temperaturen über 30°C feststellten. In dieser Arbeit wurde nicht untersucht, ob die Larven durch die Parasitierung der Eier abgetötet wurden. Allerdings wurde für Wurzelgallennematoden von einer Parasitierung der Eier durch *P. lilacinus* und einer anschließenden Abtötung der Larven berichtet (JATALA, 1985; HOLLAND, 2000). Eine weitere Erklärung für gleiche Parasitierungsraten und unterschiedliche Eindringungsraten könnten die Eindringungsmechanismen von *P. lilacinus* bieten: Laut BONANTS et al. (1995) sind lytische Enzyme von *P. lilacinus*, KHAN et al. (2004) zufolge die Enzyme Protease und Chitinase des Pilzes verantwortlich für die Penetration der Eihüllen von *Meloidogyne* spp. Es ist daher möglich, dass diese vom Pilz gebildeten Enzyme bestimmte Temperaturen benötigen, um ihre Wirksamkeit optimal zu entfalten.

Für eine effektive Kontrolle von *H. schachtii* mit PL251 waren in der vorliegenden Arbeit zwei Wochen Inkubationszeit der Zysten ausreichend, um signifikant höhere Parasitierungsraten der Eier und signifikant niedrigere Eindringungsraten als bei der Kontrolle zu erzielen. Von einer zwei Wochen längeren Inkubationszeit mit PL251 blieben diese Parameter dagegen unbeeinflusst. HOLLAND (2000) berichtet im Gegensatz dazu von höheren Infektionsraten von *Meloidogyne javanica*-Eimassen durch PL251 mit zunehmender Inkubationszeit in einem Zeitraum von 30 Tagen. Auch MENDOZA et al. (2003) erzielten die niedrigsten Eindringungsraten von *Radopholus similis* in Bananen bei einer Applikation von PL251 vor der Pflanzung und einer 20 Tage langen Inkubationszeit des Pilzes in *Radopholus similis*-verseuchter Erde. Eine Inkubationszeit von 14 und 8 Tagen erbrachte dagegen nicht so gute Kontrolleffekte. KIEWNICK und SIKORA (2003) konnten *Meloidogyne incognita*-Larven an Tomaten durch längere Inkubationszeit mit PL251 signifikant reduzieren. SPIEGEL und CHET (1998), die die Aktivität verschiedener *Trichoderma*-Isolate

gegen *Meloidogyne javanica* an Tomaten und Auberginen testeten, erreichten bei einer 18 Tage früheren Applikation des Pilzes die besten Bekämpfungserfolge.

Einige Antagonisten im Boden wie beispielsweise Mykorrhizapilze (ELSEN et al., 2003) und endophytische Pilze (POCASANGRE, 2000; VU THI TANH, 2005) haben eine wachstumsfördernde Wirkung auf Pflanzen. Bei *Paecilomyces fumosoroseus* wurde eine Erhöhung des Wurzelgewichtes von Zuckerrüben und eine Unterdrückung von *H. schachtii* durch den eiparasitären Pilz beobachtet (FATEMY, 2000). Ebenso berichten MENDOZA et al. (2003) von einer wachstumsfördernden Wirkung von PL251 auf Wurzelfrischgewicht und Wurzellänge von Bananen bei ansteigender Konidienzahl des Pilzes. Für andere *P. lilacinus*-Stämme ist weiterhin die wachstumsfördernde Wirkung auf oberirdische Pflanzenteile bekannt. Einige Autoren stellten vermehrtes Pflanzenwachstum an Tomaten und Okra nach Applikation von *P. lilacinus* fest (WALIA et al., 1991; ZAKI & BHATTI 1991, EKANAYAKE & JAYASUNDARA, 1994; ZAKI 1994). Die durch den Nematoden *Rotylenchulus reniformis* hervorgerufene Wachstumsdepression von Tomaten wurde durch die Applikation von *P. lilacinus* limitiert (WALTERS & BARKER, 1994). In der vorliegenden Arbeit ist der signifikante Einfluss der Inkubationsdauer sowohl auf das Wurzelgewicht als auch auf die Wurzellänge nicht auf einen Effekt der biologischen Kontrolle sondern auf die unterschiedlichen Temperaturen während des Wachstums der Zuckerrüben zurückzuführen. Sowohl die Kontrollpflanzen als auch die behandelten Zuckerrüben wiesen im zweiten Teil des Versuchs (vier Wochen Inkubationszeit der Zysten) wesentlich geringere Wurzelgewichte und -längen auf als im ersten Teil des Versuchs, vermutlich wegen der niedrigeren Temperatur im Gewächshaus während des Wachstums der Rüben (vgl. 4.2.6.). Dementsprechend ist auch der signifikante Einfluss der Inkubationsdauer auf die Eindringung von *H. schachtii* pro Gramm und Meter Wurzel auf die oben genannten Bedingungen zurückzuführen und nicht durch den Effekt einer längeren Inkubationszeit der Zysten zu erklären.

Wurzellänge sowie Wurzelgewicht der behandelten Zuckerrüben unterschieden sich nicht signifikant von Wurzellänge und -gewicht der Kontrollpflanzen, die mit Nematoden, nicht aber mit PL251 inokuliert wurden. Da in den Versuchen keine Variante ohne Pilz und ohne Nematoden angesetzt wurde, kann kein Rückschluss auf eine wachstumsfördernde oder hemmende Wirkung des Präparates gemacht werden. Die vorliegenden Ergebnisse weisen allerdings darauf hin, dass das Wurzelwachstum nicht wesentlich von einer Behandlung von PL251 beeinflusst wird.

Eine signifikante Wirkung des Pilzes auf den Zysteninhalt bei verschiedenen Temperaturen und unterschiedlich langen Inkubationszeiten konnte in keinem der Versuche festgestellt werden. Die Applikation von PL251 hatte demnach keinen Einfluss auf den Spontanschluß von *H. schachtii*-Larven. Im Gegensatz zu diesen Ergebnissen berichten CHEN et al. (1996) und KHAN et al. (2004) über eine Verringerung des Larvenschlupf durch *P. lilacinus* bei Wurzelgallen- und Zystennematoden. Da die Autoren nicht von einem speziellen Stamm des Pilzes berichten, können diese Unterschiede auf die verschiedenen Wirkmechanismen der einzelnen Stämme zurückzuführen sein. Ein Spontanschluß fand in der vorliegenden Arbeit wahrscheinlich bei allen Versuchen statt, denn vor Ansatz der Versuche lag die durchschnittliche Anzahl an Eiern und Larven pro Zyste jeweils höher als bei unbehandelten und behandelten Zysten im Versuch, weil die Larven wahrscheinlich während des Versuchs geschlüpft sind.

SIDDIQUI et al. (2000) beobachteten eine erhöhte Mortalität von *M. javanica*-Larven mit zunehmender Menge an *P. lilacinus*-Kulturfiltrat *in vitro*. In Bezug auf die Wirkung des Pilzes PL251 auf die Mortalität der *H. schachtii*-Larven wurde in dieser Arbeit eine Dosis-Wirkungs-Beziehung unter Gewächshausbedingungen festgestellt. Auch MENDOZA (2004) fand eine signifikante Korrelation zwischen der applizierten Dosis an PL251-Konidien und der Anzahl an extrahierten *Radopholus similis*-Larven aus sterilem Boden.

Unter kontrollierten Laborbedingungen wurde die Wirksamkeit von PL251 gegen *Meloidogyne incognita*-Larven bereits bei 15° C beschrieben (HOLLAND, 2000). In dieser Arbeit konnte eine Wirkung des Pilzes auf die Larven ausschließlich bei Temperaturen über 20° C festgestellt werden.

Die Ursache für eine geringere Anzahl an extrahierten Larven aus behandelter Erde wurde nicht untersucht. Nach mikroskopischer Untersuchung der Larven konnte keine Anhaftung von Konidien auf den Larven festgestellt werden. Allerdings können auch Larven, die unter dem Mikroskop gesund aussehen, von *P. lilacinus* beeinträchtigt sein (JATALA, 1985; SHARMA & TRIVEDI, 1987). Neben der Parasitierung der Larven ist auch eine Abtötung der Larven durch Toxine möglich, denn *P. lilacinus* und einige endophytische Bakterien besitzen die Fähigkeit, Toxine zu produzieren (CAYROL et al., 1989; MUNIF, 2001). Auch eine Reduktion der Larven durch pilzeigene Enzyme, die ihre volle Tätigkeit bei hohen Temperaturen entfalten, ist in Betracht zu ziehen. Laut KHAN et al. (2004) reduzieren die von *P. lilacinus* gebildeten Proteasen den Larvenschlupf von Wurzelgallennematoden. Da PL251 auch eine Wirkung gegen die Larven von *H. schachtii* aufwies, scheint neben der reduzierten

Eindringung auch eine Reduktion mobiler Nematodenstadien durch Applikation des Pilzes möglich.

Die vorliegenden Versuche zeigen das Potential von *P. lilacinus* als biologisches Nematizid gegen *H. schachtii*. Allerdings können die in sterilem Boden und unter Gewächshausbedingungen erhobenen Daten nicht ohne weiteres auf Feldbedingungen übertragen werden. Für eine effiziente Kolonisation des Bodens durch *P. lilacinus* ist die chemische, physikalische und mikrobielle Zusammensetzung des Bodens von großer Bedeutung (GOMEZ CARNEIRO & CAYROL, 1991). Die Effektivität biologischer Bekämpfungsmittel ist laut WALTERS und BARKER (1994) in natürlichen Böden geringer als in sterilem Boden. Die Beständigkeit eines Antagonisten im Boden ist für den effektiven Einsatz biologischer Bekämpfungsmittel von Bedeutung. GOMEZ CARNEIRO und CAYROL (1991) beschreiben einen schnellen Rückgang des pilzlichen Inokulums von *P. lilacinus* im Boden und folgern aus diesen Beobachtungen, dass eine effektive Kontrolle des Nematoden *Meloidogyne arenaria* nur mit mehrfachen Applikationen von *P. lilacinus* möglich ist. Zu ähnlichen Ergebnissen gelangten KIEWNICK und SIKORA (2003) bei der Kontrolle von *Meloidogyne incognita*. Sie beobachteten einen Rückgang des Inokulums in einem Zeitraum von zwei bis drei Wochen.

Im Hinblick auf eine zukünftige Erprobung von *P. lilacinus* Stamm 251 unter Feldbedingungen erscheint eine Applikation des Pilzes zur Saat der Zuckerrüben aufgrund der niedrigen Temperaturen im März und April nicht geeignet. Eine Applikation zur Zwischenfrucht würde sich aufgrund höherer Temperaturen anbieten. Die Aussaat von nematodenresistenten Gelbsenf- und Ölrettichsorten erfolgt Ende Juli bis Mitte August. Zu dieser Jahreszeit werden die für eine effektive Kontrolle von *H. schachtii* durch *P. lilacinus* erforderlichen Temperaturen von über 25° C erreicht. Ein weiterer Vorteil einer Applikation zum Anbau der Zwischenfrüchte wäre die fördernde Wirkung einiger Zwischenfrüchte auf Antagonisten im Boden. PYROWOLAKIS (1999) und SOSNOWSKA (2000) fanden heraus, dass durch Zwischenfruchtanbau die Parasitierung von *H. schachtii*-Eiern durch *P. lilacinus* und andere antagonistische Pilze gefördert wird. Einige Gelbsenf- und Ölrettichsorten beispielsweise fördern die Ausbreitung eipathogener Pilze (SCHLANG, 1996).

Der Einsatz biologischer Nematizide erscheint an Standorten sinnvoll, an denen resistente Zuckerrübensorten nicht ökonomisch sind oder resistente Zwischenfrüchte nicht erfolgreich in eine momentan weit verbreitete Zuckerrüben-Winterweizen-Winterweizen-Fruchtfolge eingebaut werden können. Im Rahmen einer teilflächenspezifischen Bekämpfung könnte eine

biologische Kontrolle mit PL251 bei gering bis mittel starkem *H. schachtii*-Befall in Kombination mit anfälligen Zuckerrüben zum Einsatz kommen. In Teilschlägen mit sehr hohem Befall ist ein Anbau von resistenten Zuckerrüben denkbar. Weiterhin wäre eine Kombination von *P. lilacinus* mit anderen Antagonisten des Bodens möglich. Eine Applikation von *P. lilacinus* mit dem Bakterium *Pseudomonas aeruginosa* beispielsweise ergab gute Bekämpfungserfolge gegen Wurzelgallennematoden (SIDDIQUI et al., 2000). Zur Eindämmung des Initialschadens könnte PL251 durch reduzierte Eindringung der Nematoden beitragen und weiterhin durch eine Eiparasitierung und Reduzierung mobiler Larvenstadien als Langzeitnematizid wirken.

5 Zusammenfassung

Für einen langfristig erfolgreichen Zuckerrübenanbau ist die Kenntnis über Verbreitung und Stärke des Befalls durch *H. schachtii* von besonderer Bedeutung. Mit Hilfe der Fernerkundung stehen neue Möglichkeiten zur berührungslosen Erkennung von Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschädlingen zur Verfügung, die die routinemäßig durchgeführten und aufwendigen Bodenprobennahmen zur Erfassung der Befallsdichten ersetzen könnten. Mit Nematoden befallene Pflanzen weisen entgegen gesunden Pflanzen verringerte Photosynthese- und Transpirationsraten sowie geringere Blattchlorophyllgehalte auf. Berührungslose Messverfahren können diese pflanzenphysiologischen Veränderungen durch Registrierung der Chlorophyllfluoreszenz, Reflexion und Oberflächentemperatur der Pflanzen erfassen. Bei einer teilflächenspezifischen Erkennung von Nematoden sowie deren Befallsstärke besteht die Möglichkeit einer variablen Bekämpfung. Der Einsatz geeigneter biologischer Schädlingsbekämpfungsmittel ist beispielsweise in gering bis mittel befallenen Teilschlägen denkbar. Im Hinblick auf die ökologischen Risiken chemischer Bekämpfungsmaßnahmen und die Zulassungsbeschränkungen für Nematizide in Deutschland bieten biologische Nematizide eine gute Alternative zur Bekämpfung pflanzenparasitärer Nematoden.

Im Hinblick auf eine zukünftige teilflächenspezifische Erkennung und Bekämpfung von *H. schachtii* standen in der vorliegenden Arbeit folgende Ziele im Vordergrund:

- Erkennung von *Heterodera schachtii*-Befall an Zuckerrüben und Unterscheidung der unterschiedlichen Befallsdichten mit Hilfe berührungsloser Messverfahren
- Erprobung einer biologischen Bekämpfungsmaßnahme gegen *Heterodera schachtii*

Zur Erkennung des Befalls von Zuckerrüben durch *H. schachtii* und zur Differenzierung zwischen den Befalldichten wurden Gewächshausversuche mit unterschiedlichen Zuckerrübensorten und verschiedenen *H. schachtii*-Populationsdichten durchgeführt. Die zeitgleiche Erhebung einiger pflanzenphysiologischer und -morphologischer Parameter und die Beobachtung der Pflanzen mit verschiedenen berührungslosen Messverfahren ermöglichte eine direkte Gegenüberstellung der Daten. Die Beobachtung der Zuckerrüben erfolgte in einem Intervall von sieben Tagen mit einer Multispektral- und einer Thermografiekamera

sowie mit Hilfe der Laser induzierten und der Puls Amplituden modulierten Chlorophyllfluoreszenz.

Im frühen Befallsstadium reagierten die Zuckerrüben auf *H. schachtii*-Befall mit einem Rückgang der Photosyntheserate, bei anhaltendem Befall zusätzlich mit einer verringerten Stickstoffaufnahme und geringeren Chlorophyllgehalten. Zuckerrüben, die mit *H. schachtii*-Populationsdichten von 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden inokuliert wurden, unterschieden sich weder in ihren Stickstoff- und Chlorophyllgehalten noch in ihren Photosynthese- und Transpirationsraten, obwohl mit zunehmender Inokulumdichte die Eindringungsraten der *H. schachtii*-Larven in die Wurzeln der Rüben zunahmen.

Obgleich keine sichtbaren Symptome erkennbar waren, war es im frühen Befallsstadium für beide Zuckerrübensorten möglich, *H. schachtii*-befallene Rüben von nicht befallenen Rüben mit Hilfe der 'LIF-Parameter' 'F740' und 'Integral des Spektrums' zu unterscheiden. Bei anhaltendem Nematodenbefall wurde, einhergehend mit einem Abfall im Stickstoff- und Chlorophyllgehalt der Zuckerrübenblätter, eine Erhöhung des 'LIF-Parameters' 'F686/F740' beobachtet. Eine Erhöhung der Grundfluoreszenz (F_0) sowie ein Rückgang der photochemischen Effizienz (F_v/F_m) waren bei der Sorte 'Macarena' signifikant, bei der Sorte 'Penta' nur tendenziell zu beobachten. Zu diesem Befallsstadium war der Nematodenbefall bereits durch verringerte SPAD-Werte erkennbar. Eine Differenzierung der verschiedenen *H. schachtii*-Befallsdichten war dagegen mit Hilfe der angewandten Fluoreszenzmessungen nicht möglich. Bei beiden getesteten Sorten wiesen multispektrale Aufnahmen der inokulierten Pflanzen signifikant niedrigere 'NDVI'- und 'GNDVI-Werte' auf als nicht befallene Rüben. Mit Hilfe der multispektralen Aufnahmen konnten bei der Sorte 'Macarena' am Ende des Versuchs Befallsdichten von 500 Larven/100 ml Boden von 1500 Larven/100 ml Boden differenziert werden.

Die gemessenen Oberflächentemperaturen der Versuchspflanzen waren von der Transpirationsrate abhängig. Unterschiede in der Oberflächentemperatur zwischen gesunden und befallenen Zuckerrüben waren nur im frühen Stadium des Befalls zu verzeichnen, als eine verringerte Transpirationsrate der Zuckerrübenblätter gemessen wurde. Eine Differenzierung der *H. schachtii*-Populationsdichten war mit Hilfe der Thermografie ausschließlich sieben Tage nach Inokulation zwischen der höchsten und der niedrigsten Befallsdichte möglich.

Die Ergebnisse der Gewächshausversuche weisen auf das Potential der verwendeten berührungslosen Messverfahren zur Erkennung des Befalls von *H. schachtii* hin und lassen

eine Differenzierung von Feldpopulationsdichten mit größerer Spannweite durchaus aussichtsreich erscheinen.

Zur Erkennung von *H. schachtii* im Feld wurde die Oberflächentemperatur von zwei *H. schachtii*-befallenen Zuckerrübenfeldern mit einer Thermografiekamera gemessen. Ausschließlich am Standort Elsdorf konnten Korrelationen zwischen der Nematodenbefallsdichte und der Oberflächentemperatur der Zuckerrübenblätter der nematodenanfälligen Sorte 'Monza' festgestellt werden. Bei hohem Nematodenbefall (> 1500 Eier und Larven/100 ml Boden) wurden bis zu $0,83^{\circ}\text{C}$ höhere Oberflächentemperaturen der Zuckerrüben gemessen als bei niedrigem Befall (< 500 Eier und Larven/100 ml Boden). Temperaturdifferenzen wurden nur im Juni und Juli bei ausreichendem Wasserangebot im Boden beobachtet. Beim zweiten Feldversuch am Standort Kelz wurde die *H. schachtii*-anfällige Sorte 'Macarena' eingesetzt. Obwohl ähnliche Standort- und Klimabedingungen vorherrschten wie am Standort Elsdorf, wurden keine Temperaturunterschiede zwischen gering und stark befallenen Rüben festgestellt. Die unterschiedlichen Ergebnisse der verschiedenen Standorte weisen auf die Schwierigkeiten einer zuverlässigen und reproduzierbaren Erkennung von *H. schachtii* mit Hilfe thermografischer Luftbildaufnahmen hin.

Im Hinblick auf eine teilschlagspezifische Bekämpfung von *H. schachtii* wurde der antagonistische eiparasitäre Pilz *Paecilomyces lilacinus* (Stamm 251) zur Bekämpfung von *H. schachtii* eingesetzt. Hierzu wurden *H. schachtii*-Zysten verschiedenen Konzentrationen von *P. lilacinus*-Konidien in steriler Erde ausgesetzt. Es wurde eine deutliche Beziehung zwischen der verwendeten Dosis an *P. lilacinus*-Konidien und der Parasitierungsrate der *H. schachtii*-Eier beobachtet. Zur Messung der Eindringungsraten von *H. schachtii* in die Zuckerrübenwurzeln wurden unbehandelte Zysten und Zysten, die 14 Tage in *P. lilacinus* behandelter Erde inkubiert wurden, an Zuckerrüben inokuliert. Die Anzahl an eingedrungenen Larven war signifikant niedriger, wenn die Zysten dem Pilz ausgesetzt waren. Bei allen getesteten Temperaturen von 15°C , 20°C und 25°C sowie bei Versuchen, in denen schwankende Temperaturen bis über 30°C vorherrschten, waren die Parasitierungsraten der behandelten Zysten signifikant höher als bei den unbehandelten Zysten. Die *H. schachtii*-Eindringungsraten waren dagegen nur bei Temperaturen von $\geq 25^{\circ}\text{C}$ signifikant verringert. Eine Steigerung der Konzentration an *P. lilacinus*-Konidien führte weiterhin zu einer erhöhten Larvenmortalität. Bei Temperaturen über 25°C wurden die besten Kontrolleffekte erzielt.

6 Literaturverzeichnis

- ABBOTT W.S., 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology* 18: 265-257.
- ASMUS G.L. & FERRAZ L.C.C.B., 2002. Effect of population densities of *Heterodera glycines* race 3 on leaf area, photosynthesis and yield of soybean. *Fitopatologia Brasileira* 27: 273-278.
- AVENDAÑO F., SCHABENBERGER O., PIERCE F. J. & MELAKEBERHAN H., 2003. Geostatistical Analysis of Field Spatial Distribution Patterns of Soybean Cyst Nematode. *Agronomy Journal* 95: 936-948.
- AVENDAÑO F., PIERCE F. J., SCHABENBERGER O. & MELAKEBERHAN H., 2004. The spatial distribution of soybean cyst nematode in relation to soil texture and soil map unit. *Agronomy Journal* 96: 181-194.
- AYOUB S.M., 1980. Plant Nematology - an agricultural training aid. NemaAid Publication, Sacramento, CA: 195 pp.
- BAKER K.F. & COOK R.J., 1974. Biological Control of plant pathogens. Freeman and Company. San Francisco, California.
- BILL R., GRENZDÖRFFER G., FOY T., SELIGE T., SCHMIDTHALTER U., DOHMEN B. & REH A. 2002. Remote Sensing—extended summary of the respective subprojects of pre agro, dealing with „Remote Sensing“. In: Precision Agriculture - Herausforderung an integrative Forschung, Entwicklung und Anwendung in der Praxis. KTBL-Sonderveröffentlichung 38: 93-96.
- BILLER R. & IHLE W., 2000. Pflanzenunterscheidung mit optischen Sensoren. *Landtechnik* 2: 148-149.
- BIRD A.F. & BRISBANE P.G., 1988. The influence of *Pasteuria penetrans* in field soils on the reproductivity of root-knot nematodes. *Revue de Nématologie* 11: 75-81.
- BLACKMER, T. M. & SCHEPERS J. S., 1995. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation for corn. *Journal of Production Agriculture* 8 (1): 56-60.
- BONANTS P.J.M., FITTERS P.F.L., THIJIS H., BELDER E., WAALWIJK C. & HENFLING J.W.D.M., 1995. A basic serine protease from *Paecilomyces lilacinus* with biological activity against *Meloidogyne hapla* eggs. *Microbiology*: 775-784.

- BÖRNER H., 1990. Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart, 6. Auflage.
- BREDEMEIER C. & SCHMIDHALTER U., 2001. Laser-induced chlorophyll fluorescence as a tool to determine the nitrogen status of plants. In: Greinier G. & Blackmore S. (eds.), Plant nutrition: food security and sustainability of agroecosystems through basic and applied research. 14th International Plant Nutrition Colloquium, Hannover, Germany, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht: 726-727.
- BUNNIK N.J.J., 1978. The multispectral reflectance of short wave radiation by agricultural crops in relation with their morphological and optical properties. Proefschrift, Veenman H. & Zonen B.V.-Wageningen.
- BURBA M., KASTNING M., 1971. Stoffwechselphysiologische Untersuchungen an Zuckerrüben während der Vegetationszeit. I. Glutamin, Glutaminsäure, Asparagin und Asparginsäure. Zucker 24: 386-396.
- BURKE J.J., HATFIELD J.L. & WANJURA D.F., 1990. A thermal stress index for cotton. Agronomy Journal 82 (1): 100-103.
- BUSCHMANN C., 1986. Fluoreszenz und Wärmeabstrahlung bei Pflanzen. Naturwissenschaften 73: 691-699.
- CABANILLAS E., BARKER K.R. & NELSON L.A., 1989. Survival of *Paecilomyces lilacinus* in selected carriers and related effects of *Meloidogyne incognita* on tomato. Journal of Nematology 21 (1): 121-130.
- CAYROL J.-C., DJIAN C. & PIJAROWSKI L., 1989. Study of the nematicidal properties of the culture filtrate of the nematophagous fungus *Paecilomyces lilacinus*. Review of Nematology 12: 331-336.
- CECCHI G., MAZZANGHI P., PANTANI L.R., VALENTINI R., TIRELLI D. & ANGELIS P.D., 1994. Remote sensing of Chlorophyll-a fluorescence of vegetation canopies: near and far field measurement techniques. Remote Sensing of Environment 47: 18-28.
- CEROVIC Z.G., SAMSON G., MORALES F., TREMBLAY N. & MOYA I., 1999. Ultraviolet-induced fluorescence for plant monitoring: present state and prospects. Agronomie 19: 543-578.
- CHAEERLE L. & VAN DER STRAETEN D., 2000. Trends in Plant Science. Elsevier Science 5 (11): 495-501.

- CHAERLE L., VAN CAENEGHEM W., MESSENS E., LAMBERS H., VAN MONTAGU M. & VAN DER STRAETEN D., 1999. Presymptomatic visualization of plantvirus interactions by thermography. *Nature Biotechnology* 17: 813-816.
- CHAPELLE E.W., KIM M.S. & MC MURTNEY J.E., 1992. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS) - An algorithm for the remote estimation of the concentration of chlorophyll *a* and chlorophyll *b* and carotenoids in soybean leaves. *Remote Sensing of Environment* 50 (1): 1-17.
- CHEN S.Y., DICKSON D.W. & MITCHELL D.J., 1996. Pathogenicity of fungi to eggs of *Heterodera glycines*. *Journal of Nematology* 28 (2): 148-158.
- CHOUDHURY B.J., 1997. Relationships between vegetation indices, radiation absorption, and net photosynthesis evaluated by sensitivity analysis. *Remote Sensing of Environment* 22: 209-233.
- CURI C. & SMORAY C., 1966. Beziehung klimatischer Faktoren zur Entwicklungsdauer von *Heterodera schachtii* in der Slowakei (CSSR). *Helminthologica* VII: 49-63.
- DAS D.K., MISHRA K.K. & KALRA N., 1993. Assessing growth and yield of wheat using remotely-sensed canopy temperature and spectral indices. In: *International Journal of Remote Sensing* 14 (6): 1403-1408.
- DAUGHTRY C.S.T., 2001. Discriminating crop residues from soil by shortwave infrared reflectance. *Agronomy Journal* 93 (1): 125-131.
- DAVIDE R.G. & ZORILLA R.A., 1983. Evaluation of a fungus, *Paecilomyces lilacinus* (Thom.) Samson, for the biological control of the potato cyst nematode *Globodera rostochiensis* Woll. as compared with some nematicides. *Phil. Agr.* 66: 397-404.
- DAVIDE R.G., 1985. Summary report on the current status, progress and needs for *Meloidogyne* research in region VI. In: *An advanced treatise on Meloidogyne*. Vol. I Biology and Control. Sasser & Carter (eds.): 369-378.
- DECKER H., 1969. *Phytonematologie - Biologie und Bekämpfung pflanzenparasitärer Nematoden*. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin: 505 pp.
- DOCKTER K., 1990. Fernerkundung zur Zustandbeschreibung von Zuckerrübenbeständen. Dissertation Universität Bonn: 160 pp.
- DOMSCH K.H., GAMS W. & ANDERSON T., 1980. *Compendium of soil fungi* - Academic Press, London: 529-532.

- DOWE A., 1987. Räuberische Pilze und andere pilzliche Nematodenfeinde. A. Ziemsen Verlag, Wittenberg Lutherstadt: 156 pp.
- DUGGAN J.J., 1959. On the number of generations of beet eelworm *Heterodera schachtii* Schmidt produced in a year. *Nematologica* 4: 241-244.
- ECKERT S., KELLENBERGER T., 2001. Anwendung einer satellitengestützten Methode zur Ernteprognose im Kanton Waadt. In: Vermessung, Photogrammetrie, Kulturtechnik 10: 640-647.
- EHLERT D. & LANGNER H.R., 2004. Sensoren für die Präzisionslandwirtschaft, Forschungsreport des BMVEL (Bundesministerium für Verbraucherschutz, Ernährung und Landwirtschaft) 1: 8-11.
- EHLERT D., HAMMEN V. & ADAMEK R., 2003. On-line Sensor Pendulum-Meter for Determination of Plant Mass, *Precision Agriculture* 4: 139-148.
- EHLERT, D., 2000. Sensorik zur Gewinnung von Bodenparametern, Pflanzenparametern und Ertragsdaten. In: Elektronik in der Landwirtschaft, KTBL/LAV-Vortragstagung 12. April 2000 in Veitshöchheim: 59-66.
- EKANAYAKE H.M.R.K. & JAYASUNDARA M.J., 1994. Effect of *Paecilomyces lilacinus* and *Beauveria bassiana* in controlling *Meloidogyne incognita* on tomato in Sri Lanka. *Nematologia Mediterranea* 22: 87-88.
- ELSEN A. BEETERENZ R. & DE WAELE D., 2003. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi and two plant-parasitic nematodes on *Musa* genotypes differing in root morphology. *Biol. Fertil. Soil* 38: 367-376.
- EVANS J., 1983. Nitrogen and photosynthesis in the flag leaf of wheat (*Triticum aestivum* L.). *Plant Physiology* 72: 297-302.
- EVANS K., TRUDGILL D.L. & WEBSTER J.M., 1993. Plant Parasitic Nematodes in Temperate Agriculture. Cab International 1993. University Press, Cambridge, UK.
- EVANS K., WEBSTER R.M., HALFORD P.D., BARKER A.D., & RUSSEL M.D., 2002. Site-specific management of nematodes-pitfalls and practicalities. *Journal of Nematology* 34 (3): 194-199.
- EYAL Z., BLUM A., 1989. Canopy temperature as a correlative measure for assessing host response to *Septoria tritici* blotch of wheat. *Plant Disease* 73: 468-471.

- FATEMY S., 2000. Biocontrol of *Heterodera schachtii* by *Paecilomyces fumosoroseus* on sugar beet [*Beta vulgaris* L.]. *Nematologia Mediterranea* (Italy) 28 (2): 201-205.
- FERRIS H., 1985. Crop loss prediction and modelling for management decisions. In: Zuckerman B.M., Mai W.F. & Harrison M.B. (eds.): *Plant Nematology - Laboratory manual*. The University of Massachusetts Agricultural Experimental Station, Amherst, Massachusetts: 27-33.
- FICHTNER E., 1986. Einfluss von Textur, Gehalt an organischer Substanz, Dichte und Luftgehalt des Bodens auf die Vermehrung von *Heterodera schachtii* Schmidt 1871 an Zuckerrüben. *Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz* 22: 343- 350.
- FREITAS L.G., FERRAZ S. & MUCHOVEJ J.J., 1995. Effectiveness of different isolates of *Paecilomyces lilacinus* and an isolate of *Cylindrocarpon destructans* on the control of *Meloidogyne javanica*. *Nematropica* 25 (2): 109-115.
- FUGMANN B., LIEB V., MOESCHLER H., NAUMANN K. & WACHENDORFF U., 1991. Natürliche Pflanzenschutzwirkstoffe; Teil I: Eine Alternative zu synthetischen Pflanzenschutzmitteln? *Chemie in unserer Zeit* 25 (6): 317-330.
- GAUSMANN H.W., ALLEN W.A. & ESCOBAR D.E., 1974. Refractive-index of plant cell walls. *Applied Optics* 13 (1): 109-111.
- GEBHARDT A., 1984. Möglichkeiten zur Früherkennung phytopathologischer Erscheinungen mit Hilfe der Thermografie-Übersicht und erste Ergebnisse. *Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz, Berlin* 20: 437-445.
- GEISLER G., 1983. *Ertragsphysiologie von Kulturarten des gemäßigten Klimas*. Paul Parey Verlag, Berlin und Hamburg.
- GIERTH K., 2004. Pflanzenmorphologische und -physiologische Untersuchungen zur Toleranz in der Wirt-Parasit-Interaktion *Beta vulgaris* - *Heterodera schachtii*. Dissertation Universität Bonn: 102 pp.
- GITELSON A.A., KAUFMAN Y.J. & MERZYLAK M.N., 1996. Use of a Green Channel in Remote Sensing of Global Vegetation from EOS-MODIS. *Remote Sensing of Environment* 58: 289-298.
- GOMES CARNIERO R.M.D. & CAYROL J., 1991. Relationship between inoculum density of the nematophagous fungus *Paecilomyces lilacinus* and control of *Meloidogyne arenaria* on tomato. *Revue de Nématologie* 14 (4): 629-634.

- GRENZDÖRFFER G., 1998. Dokumentation und Analyse kleinräumiger Heterogenitäten mit Fernerkundung und GIS. In: Erfassung kleinräumiger Heterogenität. KTBL/ATB-Workshop 1998, Potsdam: 93-105.
- GÜNTHER K.P., DAHN H.G. & LUDEKER W., 1994. Remote sensing vegetation status by laser-induced fluorescence. *Remote Sensing of Environment* 47 (1): 10-17.
- HÁK R., LICHTENTHALER H.K. & RINDERLE U., 1990. Decrease of the fluorescence ratio F690/F730 during greening and development of leaves. *Radiation and Environmental Biophysics* 29: 329-336.
- HALLMANN J. & SIKORA R.A., 1994. Occurrence of plant parasitic nematodes and nonpathogenic species of *Fusarium* in tomato plants in Kenya and their role as mutualistic synergists in biological control of root knot nematodes. *International Journal of Pest Management* 40: 321-325.
- HAMAR D., FERENCZ C., LICHTENBERGER J., TARCSAI G. & FERENCZ-ARKOS I., 1996. Yield estimation for corn and wheat in the Hungarian Great Plain using Landsat MSS data. In: *International Journal of Remote Sensing* 17 (9): 1689-1699.
- HATFIELD J.L., 1990 b. Measuring plant stress with an infrared thermometer. *Hortscience* 25 (12): 1535-1538.
- HATFIELD J.L., 1990 a. Remote detection of crop stress: application to plant pathology. *Phytopathology* 80: 37-39.
- HEINICKE D., 1990. Rübennematoden integriert bekämpfen. *Pflanzenschutz-Praxis* 1: 31-33.
- HOLLAND R.J., 2000. *Paecilomyces lilacinus* as a biocontrol agent. PhD Thesis, Macquarie University of Sydney, Australia: 197 pp.
- HOPE A., COULTER L., STOW D., PETERSON S. & SERVICE D., 1999. Root rot detection in sugar beet using digital multispectral video. *Proceedings of the 20th Asian Conference on Remote Sensing*.
- HÖPER H. & ALABOUVETTE C., 1996. Importance of physical and chemical soil properties in the suppressiveness of soils to plant diseases. *European Journal of Soil Biology* 32 (1): 41-58.
- HOWELL T.A., HATFIELD J.L., YAMADA H. & DAVIS K.R., 1984. Evaluation of cotton canopy temperature to detect crop water stress. *Transactions of ASAE* 27 (1): 84-88.

- HUETE A. R., 1988. A Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI). *Remote Sensing of Environment* 25: 295–309.
- INOUE Y., KIMBALL B. A., JACKSON R. D., PINTER P. J. & REGINATO R. J., 1990. Remote estimation of leaf transpiration rate and stomatal resistance based on infrared thermometry. *Agric. For. Meteorol.* 51:21-33.
- JATALA P., 1985. Biological control of nematodes. In: *Advanced Treatise on Meloidogyne, Biology and Control*. Sasser J.N. & Carter C.C. (eds.), North Carolina State Graphics: 303-308.
- JATALA P., 1986. Biocontrol of plant-parasitic nematodes. *Annual Review of Phytopathology* 24: 453-489.
- JATALA P., KALTENBACH R. & BOCANGEL M., 1979. Biological control of *Meloidogyne incognita acrita* and *Globodera pallida* on potatoes. *Journal of Nematology* 11: 303.
- JONES F.G.W., 1950. Observations on the beet eelworm and other cyst-forming species of *Heterodera*. *Annual Applied Biology* 37: 407-440.
- JONES F.G.W., 1980. Some aspects of the epidemiology of plant-parasitic nematodes. In: *Comparative epidemiology. A tool for better disease management*. PALT J., KRANZ J. (eds.). Wageningen, Netherlands: 71-92.
- JONES H.G., STOLL M., SANTOS T., DE SOUSA C., CHAVES M.M. & GRANT O.M., 2002. Use of infrared thermography for monitoring stomatal closure in the field: Application to grapevine. *Journal of Experimental Botany* 53: 2249-2260.
- KAUSHAL K.K. & MADAVI R., 1992. Effect of *Heterodera avenae* on the growth, photosynthesis and chlorophyll content in triticales. *Indian Journal of Nematology* 22: 29-35.
- KERRY B.R. & EVANS K., 1996. New strategies for the management of plant parasitic nematodes. In: Hall R. (ed.): *Principles and practice of managing soil borne plant pathogens*. APS Press, St. Paul, Minnesota: 134-153.
- KERRY B.R., 1987. Biological Control. In: Brown R.A. & Kerry B.R. (eds.): *Principles and practice of nematode control in crops*. New York: 233-266.
- KERRY B.R., 1988. Fungal parasites of cyst nematodes. *Agriculture Ecosystems and Environment* 24: 293-305.

- KHAN A., WILLIAMS K.L. & NEVALAINEN H.K.M., 2004. Effects of *Paecilomyces lilacinus* protease and chitinase on the eggshell structures and hatching of *Meloidogyne javanica* juveniles. *Biological control: theory and application in pest management* 31 (3): 346-352.
- KIEWNICK S. & SIKORA R.A., 2003. Efficacy of *Paecilomyces lilacinus* (Strain 251) for the control of root-knot nematodes. *Communications in Applied and Biological Science*, Ghent University, 68 (4a): 123-128.
- KIEWNICK S., 1997. Untersuchungen zur Messung des antagonistischen Potentials von Böden verschiedener Agrarökosysteme gegenüber Zysten- und Wurzelgallennematoden. Dissertation Universität Bonn: 167 pp.
- KOENNING S.R. & BARKER K.R., 1995. Soybean photosynthesis and yield as influenced by *Heterodera glycines*, soil type and irrigation. *Journal of Nematology* 27: 51-62.
- KRAUTHAUSEN H. J., WYSS U., 1982. Influence of cyst nematode *Heterodera schachtii* on relative changes in the pattern of free aminoacids at feeding sites. *Physiological Plant Pathology* 21: 425-436.
- KÜHN J., 1877. Vorläufiger Bericht über die bisherigen Ergebnisse der seit dem Jahr 1875 im Auftrag des Vereins für Rübenzucker-Industrie ausgeführten Versuche zur Ermittlung der Ursachen der Rübenmüdigkeit des Bodens und zur Erforschung der Natur der Nematoden. *Zeitung des Vereins für Rübenzucker-Industrie des Deutschen Reiches*: 452-457.
- KURZ F., 2003. Schätzung von Vegetationsparametern aus multispektralen Fernerkundungsdaten. Dissertation Technische Universität München: 115 pp.
- KUSTAS W.P. & NORMAN J.M., 1996. Use of remote sensing for evapotranspiration monitoring over land surfaces. *Hydrological Sciences Journal* 41 (4): 495-516.
- LACKEY B.A., MULDOON A.E. & JAFFEE B.A., 1993. Alginate pellet formulation of *Hirsutella rossiliensis* for biological control of plant parasitic nematodes. *Biological Control* 3 (2): 155-160.
- LALI Z., 1991. Infrared detection of winter wheat diseases. *Bull. Org. Eur. Mediterr. Prot. Plant* 21: 659-672.

- LANGSDORF G., BUSCHMANN C., SOWINSKA M., BABANI F., MOKRY M., TIMMERMAN F. & LICHTENTHALER H.K., 2000. Multicolour fluorescence imaging sugar beet leaves with different nitrogen status by flash lamp UV-excitation. *Photosynthetica* 38: 539-551.
- LAUDIEN R., BARETH G. & DOLUSCHITZ R., 2003. Analysis of Hyperspectral Field Data for Detection of Sugar Beet Diseases. EFITA Conference 5.-9. Juli 2003, Debrecen, Hungary: 357-381.
- LAWLOR D. W., 2001. Photosynthesis. Springer-Verlag, New York: 386 pp.
- LAWRENCE G.W., KELLEY A.T., KING R.L., VICKERY J., LEE H.K. & MCLEAN K.S., 2004. Remote sensing and precision nematicide application for *Rotylenchus reniformis* management in cotton. *Nematology Monographs & Perspectives* 2: 13-21.
- LICHTENTHALER H.F., 1987. *Methods in Enzymology* 148: 350-382.
- LICHTENTHALER H.F., 1996. Vegetation stress: an Introduction to the Stress Concept in Plants. *Journal of Plant Physiology* 148: 4-14.
- LIMA J.D., MOSQUIM P.R. & DA MATTA F.M., 1999. Leaf gas exchange and chlorophyll fluorescence parameters in *Phaseolus vulgaris* as affected by nitrogen and phosphorus deficiency. *Photosynthetica* 37: 113-121.
- LINDENTHAL M., STEINER U., DEHNE H.-W. & OERKE E.-C., 2005. Effect of Downy Mildew Development on Transpiration of Cucumber Leaves Visualized by Digital Infrared Thermography. *Phytopathology* 95 (3): 233-240.
- LOHAUS G., BURBA M., HEDLT H. W., 1994. Comparison of the contents of sucrose and amino acids in the leaves, phloem sap and taproots of high and low sugar-producing hybrids of sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Journal of Experimental Botany* 44 (277): 1097-1101.
- LU C.M., ZHANG J.H., ZHANG Q.D., LI L.B. & KUANG T.Y., 2001. Modification of photosystem II photochemistry in nitrogen deficient maize and wheat plants. *Journal of Plant Physiology* 158: 1423-1430.
- LUDOWICY C., SCHWAIBINGER R. & LEITHOLD P., 2002. Precision Farming - Handbuch für die Praxis, DLG-Verlags-GmbH, Frankfurt am Main.
- MC MURTREY J. E., CHAPPELLE E.W., KIM M.S., MEISINGER J.J. & CORP L.A., 1994. Distinguishing nitrogen fertilization levels in field corn (*Zea mays* L.) with actively induced fluorescence and passive reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment* 47: 36-44.

- MEINERT G. & MITTNACHT A., 1992. Integrierter Pflanzenschutz: Unkräuter, Krankheiten und Schädlinge im Ackerbau. Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
- MELAKEBERHAN H. & FERRIS H., 1989. Impact of *Meloidogyne incognita* on Physiological Efficiency of *Vitis vinifera*. Journal of Nematology 21 (1): 74-81.
- MENDOZA A., SIKORA R.A. & KIEWNICK S., 2004. Efficacy of *Paecilomyces lilacinus* strain 251 for the control of the burrowing nematode *Radopholus similis* in banana. Communications in Applied and Biological Sciences, Ghent University 69 (3): 365-372.
- MENDOZA A.R.L., 2004. Biological control of the burrowing nematode *Radopholus similis* (Cobb) Thorne in banana (*Musa* spp.) with *Paecilomyces lilacinus* strain 251. Masterarbeit Universität Bonn: 73 pp.
- MINTON N.A. & SAYRE R.M., 1989. Suppressive influence of *Pasteuria penetrans* in Georgia soils on reproduction of *Meloidogyne arenaria*. Journal of Nematology 21: 574.
- MORGAN C.D., STEVENSON W.R., MACGUIDWIN A.E., KELLING K.A., BINNING L.K. & ZHU J., 2002. Plant Pathogen Population Dynamics in Potato Fields. Journal of Nematology 34 (3): 189-193.
- MORGAN-JONES G. & RODRIGUEZ-KABANA R., 1985. Phytonematode pathology: Ultrastructural studies. II. Parasitism of *Meloidogyne arenaria* eggs and larvae by *Paecilomyces lilacinus*. Nematropica 15 (1): 107-114.
- MÜLLER J., 1990. Anforderungen an die Bodenuntersuchung auf den Rübenzystennematoden (*Heterodera schachtii*) im Hinblick auf die Schadensschwelle bei Zuckerrüben. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 97: 563-569.
- MUNIF A., 2001. Studies on the importance of endophytic bacteria for the biological control of the root knot nematode *Meloidogyne incognita* on tomato. Dissertation Universität Bonn: 122 pp.
- NAGESH M. & DHAWAN S.C., 1988. Effect of inoculum density of *Heterodera avenae* on photosynthetic efficiency, chlorophyll and mineral contents of wheat. Indian Journal of Nematology 18: 40-43.
- NEIPP P.W. & BECKER J.O., 1999. Evaluation of biocontrol activity of rhizobacteria from *Beta vulgaris* against *Heterodera schachtii*. Journal of Nematology 31 (1): 54-61.

- NEJAD S. & DERN R., 1979. Über die Populationsentwicklung von Rüben nematoden (*Heterodera schachtii*) nach Anbau von Zuckerrüben in Hessen-Nassau. Gesunde Pflanzen 3: 73-75.
- NICOLAS H., RIVOAL R., DUCHESNE J. & LILI Z., 1991. Detection of *Heterodera avenae* infestations on winter wheat by radiothermometry. Revue de Nématologie 14 (2): 285-290.
- NILSSON H.E., 1995. Remote sensing and image analysis in plant pathology. Annual Review of Plant Pathology 15: 489-527.
- NORDBRING-HERTZ B., 1988. Nematophagous fungi: strategies for nematode exploitation and for survival. Microbiological Sciences 5 (4): 108-116.
- NUTTER F.W. JR. & LITTRELL R.H., 1996. Relationships between defoliation, canopy reflectance and pod yield in the peanut-late leafspot pathosystem. Crop Protection 15 (2): 135-142.
- NUTTER F.W. JR., 1987. Detection of plant disease gradients using a hand-held, multispectral radiometer. Phytopathology 77: 643.
- NUTTER F.W. JR., 1989. Detection and management of plant disease gradients in peanut using a multispectral radiometer. Phytopathology 79: 958-963.
- NUTTER F.W. JR., 2002. Use of remote sensing to detect soybean cyst nematode-induced plant stress. Journal of Nematology 34 (3): 222-231.
- NUTTER F.W. JR., LITTRELL R.H. & BRENNEMANN T.B., 1990. Utilization of a multispectral radiometer to evaluate fungicide efficacy to control late leaf spot in peanut. Phytopathology 80: 102-108.
- OMASA K., 1985. Direct observation of reversible and irreversible stomatal responses of attached sunflower leaves to SO₂. Plant Physiology 79: 153-158.
- OOSTENBRINK M., 1960. Estimating nematode populations by some selected methods. In: SASSER J.N. & JENKINS W.R. (eds.). Nematology. Chapel Hill, Univ. N. Carolina Press: 85-102.
- OOSTENDORP M., 1986. Untersuchungen zur biologischen Bekämpfung des Rübenzystennematoden *H. schachtii* (Schmidt) durch Saatgutbehandlung mit Bakterien. Dissertation Universität Bonn: 105 pp.

- OUDEMANS P.V., POZDNYAKOVA L., HUGHES M.G. & RAHMAN F., 2002. GIS and Remote Sensing for Detecting Yield Loss in Cranberry Culture. *Journal of Nematology* 34 (3): 207-212.
- PACASANGRE L.E., 2000. Biological enhancement of banana tissue culture plantlets with endophytic fungi for the control of the burrowing nematode *Radopholus similis* and the Panama disease (*Fusarium oxysporum* f. sp. *cubense*). Dissertation Universität Bonn: 107 pp.
- PARLANGE J.-Y. & WAGGONER P.E., 1970. Stomatal dimensions and resistance to diffusion. *Plant Physiology* 46: 337-342.
- PINTER P.J. JR., HATFIELD J.L., SCHEPERS J.S., BARNES E.M., MORAN M.S., DAUGHTRY C.S.T. & UPCHURCH D.R., 2003. Remote Sensing for Crop Management. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing* 69 (6): 647-664.
- PINTER P.J., STANGHELLINI M.E., IDSO S.B., REGINATO R.J., JENKINS A.D. & JACKSON R.D., 1979. Remote detection of biological stresses in plants with infrared thermometry. *Science* 205: 585-587.
- POSTUKA J.W., DROPKIN V.H. & NELSON C.J., 1986. Photosynthesis, photorespiration, and respiration of soybean after infection with root nematodes. *Photosynthetica* 20: 405-410.
- PYROWOLAKIS A., SCHUSTER R.-P., & SIKORA R.A., 1999. Effect of cropping pattern and green manure on the potential and the diversity of egg pathogenic fungi in fields with *Heterodera schachtii* infection. *Nematology* 1 (2): 165-171.
- RACKE J. & SIKORA R.A., 1992. Isolation, formulation and antagonistic activity of rhizobacteria towards the potato cyst nematode *Globodera pallida*. *Soil Biology and Biochemistry* 24 (6): 521-526.
- RASKIN I. & LADYMAN J.A.R., 1987. Isolation and characterization of the barley mutant with abscisic acid–intensive stomata. *Planta* 173: 73-78.
- ROHACEK K. & BARTAK M., 1999. Technique of the modulated chlorophyll fluorescence: basic concepts, useful parameters and some applications. *Photosynthetica* 37: 339-363.
- ROUSE J.W., HAAS R.H., SCHELL J.A. & DEERING D.W., 1973. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. 3rd ERTS Symposium, Vol. 1, NASA, Washington DC: 309-317.

- ROYLE D.D. & LATHROP R.G., 2002. Discriminating *Tsuga Canadensis* Hemlock forest defoliation using remotely sensed change detection. *Journal of Nematology* 34 (3): 213-221.
- RUDORFF B.F.T. & BATISTA G.T., 1991. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. In: *International Journal of Remote Sensing* 12 (12): 2477-2484.
- SAEED I.A.M., MACGUIDWIN A.E., ROUSE D.I., 1997 a. Synergism of *Pratylenchus penetrans* and *Verticillium dahliae* manifested by reduced gas exchange in potato. *Phytopathology* 87: 435-439.
- SAEED I.A.M., MACGUIDWIN A.E., ROUSE D.I., 1997 b. Disease progress based on effects of *Verticillium dahliae* and *Pratylenchus penetrans* on gas exchange in Russet Burbank potato. *Phytopathology* 87: 440-445.
- SAMSON R.A., 1975. *Paecilomyces* and some allied hyphomycetes. *Studies in Mycology* 6: 1-119.
- SCHACHT H., 1859 a. Über einige Feinde der Rübenfelder. *Zeitschrift des Vereins der Rübenzuckerindustrie im Zollverein* 9: 175-179.
- SCHACHT H., 1859 b. Über einige Feinde und Krankheiten der Zuckerrübe. *Zeitschrift des Vereins der Rübenzuckerindustrie im Zollverein* 9: 239-250.
- SCHANS J. & ARNTZEN F.K., 1991. Photosynthesis, transpiration and plant growth characters of different potato cultivars at various densities of *Globodera pallida*. *Netherland Journal of Plant Pathology* 97: 297-310.
- SCHLANG J., 1991. Anbau resistenter Zwischenfrüchte zur Biologischen Bekämpfung des Rübenzystennematoden. *Zuckerrübe* 40: 240-242.
- SCHLANG J., 1996. Resistenter Ölrettich ist die beste Waffe gegen Rübenneematoden. *LZ Rheinland* 18: 18-19.
- SCHMIDT A., 1871. Über den Rübenneematoden. *Zeitschrift des Vereins der Rübenzuckerindustrie im Zollverein* 21: 1-19.
- SCHMIDT A., 1872. Zweiter Bericht über den Rübenneematoden. *Zeitschrift des Vereins der Rübenzuckerindustrie im Zollverein* 22: 67-75.

- SCHMITZ A., KIEWNICK S., SCHLANG J., SCHMIDT K. & SIKORA R.A., 2003. Use of remote sensing to identify the spatial distribution of the sugar beet cyst nematode *Heterodera schachtii*. In: Werner A. & Jarfe A. (eds.): Program book of the joint international conference of ECPA–ECPLF: 561-562.
- SCHREIBER W., 1986. Continuous recording of photochemical and non-photochemical chlorophyll fluorescence quenching with a new type of modulation fluorometer. *Photosynthesis Research* 10: 51-62.
- SCHULZ H., WEIDNER M., BAUR M., LAUCHERT U., SCHMITT V., WILD A. & SCHROER B., 1996. Recognition of air pollution stress on Norway spruce (*Picea abies* L.) on basis of multivariate analysis of biochemical parameters. *Journal of Applied Botany* 70: 19-27.
- SCHUSTER R.-P., & SIKORA R.A., 1993. Ausnutzung und Förderung des antagonistischen Potentials von Böden zur biologischen Bekämpfung pflanzenparasitärer Nematoden. In: Zenger U. (Hrsg.): Forschung im ökologischen Landbau. Beiträge zur zweiten Wissenschaftstagung ökologischer Landbau, SÖL-Sonderausgabe 42: 212-215.
- SCHUSTER R.-P., Sikora R.A. & Amin N., 1995. Potential of endophytic fungi for the biological control of plant parasitic nematodes. *Communications in Applied and Biological Sciences*, Ghent University 60 (3b): 1047-1052.
- SHARMA A. & TRIVEDI P.C., 1987. Screening of substrates suitable for the growth of *Paecilomyces lilacinus*. *International Nematology Network Newsletter* 4: 24-46.
- SHOMAKER C.H. & BEEN T.H., 1999. A model of infestation foci of potato cyst nematodes, *Globodera rostochiensis* and *G. pallida*. *Phytopathology* 89: 583-590.
- SIDDIQUI Z.A., MIR R.A. & MAHMOOD I., 1999. Effects of *Meloidogyne incognita*, *Fusarium oxysporum* f. sp. *pisi*, *Rhizobium* sp. and different soil types on growth, chlorophyll and carotinoid pigments of pea. *Israel Journal of Plant Sciences* 47 (4): 251-256.
- SIDDIQUI I.A., QURESHI S.A., SULTANA V., EHTESHAMUL-HAQUE S. & GHAFAR A., 2000. Biological control of root-rot knot disease complex of tomato. *Plant and Soil* 227: 163-169.
- SIKORA R.A., 1992 a. Management of the soil antagonistic potential in agroecosystems for nematode control. In: Gommers F.J. & Maas P.W.T. (eds.): *Nematology from molecule to ecosystem*. Dekker & Huisman, Wildervank, The Netherlands: 249-256.

- SIKORA R.A., 1992 b. Management of the antagonistic potential in agricultural ecosystems for the biological control of plant parasitic nematodes. Annual Review of Phytopathology 30: 245-270.
- SIKORA R.A., NIERE B. & KIMENJU J., 2003. Endophytic microbial biodiversity and plant nematode management in african agriculture. In: Neuenschwander P., Borgemeister C. & Langewald J. (eds.): Biological control in IPM systems in Africa: 179-192.
- SINCLAIR T.R. & HORIE T., 1989. Leaf nitrogen, photosynthesis and crop radiation use efficiency: A review. Crop Science 29: 90-98.
- SLATON M.R., Hunt E.R. & Smith W.K., 2001. Estimating near-infrared leaf reflectance from leaf structural characteristics. American Journal of Botany 88 (2): 278-284.
- SÖKEFELD M., GERHARDS R. & KÜHBAUCH W., 1999. Einsatz der digitalen Bildverarbeitung zur teilschlagspezifischen Unkrautkontrolle. In: Bill R. & Schmidt F. (eds.): Sensorsysteme im Precision Farming. Workshop 27. und 28. September 1999, Universität Rostock. Interner Bericht Nr. 12: 75-82.
- SOMMER C., 2003. Techniken und Verfahren zur ressourcenschonenden Bodennutzung – Rückblick und Perspektiven, Landbauforschung Völkenrode, Sonderheft 256: 101-109.
- SOSNOWSKA D., 2002. The effect of pathogenic fungi on the field population of sugar beet nematode (*Heterodera schachtii* Schmidt) with different rotations and organic fertilizers. In: Integrated systems of plant protection, the present and the future. Soroka S.V., Supranovich R.V., Buga S.F., Trepashko L.I., Zhukova M.I. & Timofeev N.N. (eds.). National Academy of the Republic of Belarus, Minsk: 312.
- SPEIJER P.R., 1993. Interrelationship between *Pratylenchus goodeyi* Sher & Allen and strains of non-pathogenic *Fusarium oxysporum* Schl. emd. Snyder & Hans. in roots of banana cultivars. Dissertation Universität Bonn: 200 pp.
- SPIEGEL Y. & CHET I., 1998. Evaluation of *Trichoderma* spp. as a biocontrol agent against soil borne fungi and plant parasitic nematodes in Israel. IPM Reviews 3: 169-175.
- STEDDOM K., BREDEHOEFT M. W., KHAN M. & RUSH C. M., 2005. Comparison of visual and multispectral radiometric disease evaluations of *Cercospora* leaf spot of sugar beet. Plant Disease 89: 153-158.

- STEDDOM K., HEIDEL G., JONES D. & RUSH C. M., 2003. Remote detection of *rhizomania* in sugar beets. *Phytopathology* 93: 720-726.
- STEELE A.E., 1965. The host range of the sugar beet nematode *Heterodera schachtii* Schmidt. *J. Amer. Soc. Sugar Beet Technologists* 13: 573-603.
- STEPHAN, Z.A. & AL-DIN S.S., 1987. Influence of temperature and culture media on the growth of the fungus *Paecilomyces lilacinus*. *Revue de Nématologie* 10 (4): 494.
- STEPHENS M., WOOD G.A. & TAYLOR J.C., 2000. Opportunities for targeted control of potato cyst nematode using remote sensing. *Aspects of Applied Biology* 60: 213-218.
- STICKSEL E., MAIDL F.X., SCHÄCHTL J., HUBER G. & SCHULZ J., 2001. Laser-induced Chlorophyll-Fluorescence - a tool for online detecting nitrogen status in crop stands. In: Grenier G. & Blackmore S. (eds.): 3rd European Conference of Precision Agriculture, Montpellier: 959-964.
- STIRLING G.R., MC KENRY M.V. & MANCAU R., 1979. Biological control of root-knot nematodes (*Meloidogyne* spp.) on peach. *Phytopathology* 69 (8): 806-809.
- STONE M. L., SOLIE J. B., RAUN W. R., WHITNEY R. W., TAYLOR S. L. & RINGER J. D., 1996. Use of spectral radiance for correcting in-season fertilizer nitrogen deficiencies in winter wheat. *Transactions of the ASAE* 39 (5): 1623-1631.
- SUBBARAO K.V., MICHALIDES T.J. & MORGAN D.P., 1993. Effects of osmotic potential and temperature on growth of two pathogens of figs and a biocontrol agent. *Phytopathology* 83 (12): 1454-1459.
- TARTACHNYK, I. & RADEMACHER I., 2003. Estimation of Nitrogen Deficiency of Sugar beet and Wheat using Parameters of Laser induced and Pulse Amplitude Modulated Chlorophyll Fluorescence. *Journal of Applied Botany* 77: 61-67.
- TEDFORD E.C., JAFFEE B.A. & MULDOON A.E., 1995. Suppression of the nematode *Heterodera schachtii* by the fungus *Hirsutella rossiliensis* as affected by fungus population density and nematode movement. *Phytopathology* 85 (5): 613-617.
- THOMAS C.S., SKINNER P.W., FOX A.D., GREER C.A. & GUBLER W.D., 2002. Utilisation of GIS/GPS based Information Technologies in Commercial Crop Decision Making in California, Washington, Oregon, Idaho and Arizona. *Journal of Nematology* 34 (3): 200-206.

- UNTERSTENHÖFER G., 1963. Die Grundlagen des Pflanzenschutz-Freilandversuches. Pflanzenschutz-Nachrichten „Bayer“ 16: 148-155.
- VAN DER STRAETEN D., CHAERLE L., SHARKOW G., LAMBERS H. & VAN MONTAGU M., 1995. Salicylic acid enhances the activity of the alternative pathway of respiration in tobacco leaves and induces thermogenicity. *Planta* 196: 412-419.
- VON RÜSTEN C., 1989. Modellierung und Messung der Reflexionseigenschaften von Pflanzenbeständen. Mitteilungen aus dem Institut für Geophysik und Meteorologie der Universität zu Köln. In: Ebel A., Neubauer F.M., Raschke E. & Speth P. (Hrsg.): Heft 66.
- VOSS B., UTERMÖHL P. & WYSS U., 1992. Vergleich verschiedener Stämme des nematophagen endoparasitären Pilzes *Catenaria anguillulae* Sorokin. II. Zur Parasitierung des Zystennematoden *Heterodera schachtii* Schmidt in Topfversuchen. Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz 99 (3): 349-358.
- VOßHENRICH H.H., 2003. Ortsspezifische Bodenbearbeitung und Einsparpotential - die wichtigen Schritte zum Erfolg. *Landbauforschung Völkenrode*, Sonderheft 256: 87-95.
- VU THI THANH T., 2005. Modes of action of non-pathogenic *Fusarium oxysporum* endophytes for bio-enhancement of banana towards *Radopholus similis*. Dissertation Universität Bonn: 101 pp.
- WALIA R.K., BANSAL R.K. & BHATI D.S., 1991. Effect of *Paecilomyces lilacinus* application time and method in controlling *Meloidogyne javanica* on okra. *Nematologia Mediterranea* 19: 247-249.
- WALKER G.K. & HATFIELD J.N., 1983. Stress measurement using foliage temperatures. *Agronomy Journal* 75: 623-629.
- WALLACE H.R., 1974. The influence of root-knot nematode, *Meloidogyne javanica*, on photosynthesis and on nutrient demand by roots of tomato plants. *Nematologica* 20: 27-33.
- WALTERS S.A. & BARKER K., 1994. Efficacy of *Paecilomyces lilacinus* in suppressing *Rotylenchulus reniformis* on tomato. Supplement to *Journal of Nematology* 26 (4S): 600-605.
- WESTPHAL A. & BECKER J.O., 2001. Components of soil suppressiveness against *Heterodera schachtii*. *Soil biology & biochemistry* 33 (1): 9-16.

- WHEELER T. A. & BRONSON K.F., 2004. Precision agriculture: tools of the trade. *Nematology Monographs & Perspectives* 2: 5-12.
- WHEELER T. A. & KAUFMAN H. W., 2003. Relationship of aerial broad band reflectance to *Meloidogyne incognita* density in cotton. *Journal of Nematology* 35: 48-57.
- WOOD C.W., REEVES D.W., DUFFIELD R.R. & EDMISTEN K.L., 1992. Field chlorophyll measurements for evaluation of corn nitrogen status. *Journal of Plant Nutrition* 15 (4): 487-500.
- WUEST S.B. & CASSMAN K.G., 1992. Fertilizer-nitrogen use efficiency in irrigated wheat: II. Partitioning efficiency of preplant versus late-season application. *Agronomy Journal* 84: 689-694.
- XU H. & STEVEN M.D., 1996. Monitoring leaf area of Sugar Beet Using ERS-1 SAR Data. *International Journal of Remote Sensing* 17: 3401-3410.
- ZAKI F.A. & BHATTI D.S., 1990. *In vivo* parasitism of *Meloidogyne javanica* by an oviparasitic fungus, *Paecilomyces lilacinus*. *Nematologia Mediterranea* 18: 141-143.
- ZAKI F.A. & BHATTI D.S., 1991. Effect of culture media on sporulation of *Paecilomyces lilacinus* and its efficacy against *Meloidogyne javanica* in tomato. *Nematologia Mediterranea* 19: 211-212.
- ZAKI F.A., 1994. Dose optimization of *Paecilomyces lilacinus* for the control of *Meloidogyne javanica* on tomato. *Nematologia Mediterranea* 22: 45-47.

7 Anhang

Tab. A1: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf den Kohlenstoffgehalt [%] von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Macarena'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation				
		7	14	21	28	35
Kohlenstoff [%]	0	34,3	33,5	35,4	29,1	31,0
	500	34,1	36,0	29,7	28,3	30,0
	1000	34,2	34,3	29,6	35,0	35,5
	1500	28,7	29,1	34,5	36,8	29,9
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. = nicht signifikant nach Tukeys HSD-Test bei P = 0,05 und n = 5.

Tab. A2: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die intrazelluläre CO₂-Konzentration Ci [ppm] der Blätter der Zuckerrübensorten 'Macarena'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation				
		7	14	21	28	35
Ci	0	202	299 a	372	374	253
	500	240	370 ab	515	516	274
	1000	220	298 a	411	409	275
	1500	216	433 b	479	479	349
Tukey-Test		n.s.		n.s.	n.s.	n.s.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei P = 0,05 und n = 5; n.s. = nicht signifikant.

Tab. A3: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die intrazelluläre CO₂-Konzentration Ci [ppm] der Blätter der Zuckerrübensorten 'Penta'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation			
		7	14	21	28
Ci	0	217 a	238	460 a	238
	1500	418 b	248	778 b	248
T-Test			n.s.		n.s.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei P = 0,05 und n = 5; n.s. = nicht signifikant.

Tab. A4: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf das Sprossfrischgewicht [g] von Zuckerrübenpflanzen der Sorte 'Macarena'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation				
		7	14	21	28	35
Sprossgewicht [g]	0	0,85	2,01	1,51	1,55	2,04
	500	0,91	1,63	1,88	1,71	2,28
	1000	1,10	1,35	1,45	1,45	2,35
	1500	0,87	1,50	1,34	1,64	1,52
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. = Werte in einer Spalte sind nicht signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$.

Tab. A5: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0, 500, 1000 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Fluoreszenz bei 686 nm (F686) und 740 nm (F740) und die Parameter R633¹⁾/F686 und R633/F740 [relative Einheiten] der Zuckerrübensorte 'Macarena'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation				
		7	14	21	28	35
F686	0	524 a	522 a	398	454	353
	500	617 ab	844 c	494	716	769
	1000	801 ab	899 c	733	864	863
	1500	914 b	796 b	580	983	922
Tukey-Test				n.s.	n.s.	n.s.
F740	0	547 a	560 a	356	412 a	395 a
	500	641 ab	817 b	479	599 ab	654 ab
	1000	755 ab	878 b	640	631 ab	756 b
	1500	933 b	751 ab	532	703 b	776 b
Tukey-Test				n.s.		
R633/F686	0	1,41	1,23 a	1,34	1,37	1,22
	500	0,89	0,60 b	1,55	1,07	0,88
	1000	1,10	0,65 b	0,91	0,90	0,78
	1500	0,65	0,72 b	1,86	0,81	0,91
Tukey-Test		n.s.		n.s.	n.s.	n.s.
R633/F740	0	1,37	1,19	1,50	1,51	1,08
	500	0,85	0,62	1,56	1,25	1,05
	1000	1,13	0,66	1,03	1,21	0,89
	1500	0,64	0,81	1,90	1,18	1,04
Tukey-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.¹⁾ R633 = Laserlichtreflexion bei 633 nm.

Tab. A6: Einfluss unterschiedlicher *Heterodera schachtii*-Populationsdichten [0 und 1500 Larven/100 ml Boden] auf die Fluoreszenz bei 686 nm (F686) und 740 nm (F740) und die Parameter R633^o/F686 und R633/F740 [relative Einheiten] der Zuckerrübensorte 'Penta'.

Parameter	Nematoden- dichte	Tage nach Inokulation			
		7	14	21	28
F686	0	693	410	690	434 a
	1500	764	613	783	810 b
T-Test		n.s.	n.s.	n.s.	
F740	0	751	428 a	654	502 a
	1500	779	638 b	700	793 b
T-Test		n.s.		n.s.	
R633/F686	0	0,69	3,08	0,77	1,34
	1500	0,63	2,36	0,99	0,81
T-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
R633/F740	0	0,63	2,92	0,82	1,09
	1500	0,63	2,19	1,12	0,84
T-Test		n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

Werte mit unterschiedlichen Buchstaben in einer Spalte sind signifikant unterschiedlich nach T-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$; n.s. = nicht signifikant.^o R633 = Laserlichtreflexion bei 633 nm.

Tab. A7: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem.), Gasaustauschparametern, Sprossfrischgewicht (Spross), Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie LIF- und PAM-Fluoreszenz-Parametern und der Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) von Zuckerrübenblättern der Sorten 'Macarena' (n = 20) und 'Penta' (n = 10) 7 Tage nach Inokulation.

Parameter	Penta																	
	Nem.	Photos.	Trans.	L	Ci	Spross	C	N	Chl	SPAD	R633	F686	F740	F686/F740	I	Fo	Fm	Fv/Fm
Macarena	Nem.	1	-0,99	-0,79	-0,99	0,99	n.s.	n.s.	-0,81	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Photos.	n.s.	1	0,83	0,99	-0,99	n.s.	n.s.	-0,80	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Trans.	n.s.	0,86	1	0,81	-0,79	n.s.	n.s.	0,68	-0,69	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L	n.s.	0,84	1,00	1	-0,99	n.s.	n.s.	-0,81	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Ci	n.s.	-0,70	-0,64	-0,62	1	n.s.	n.s.	0,81	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Spross	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	C	n.s.	n.s.	-0,50	-0,49	n.s.	n.s.	1	0,79	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	N	-0,53	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,81	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Chl	-0,52	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	SPAD	-0,46	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,84	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	R633	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,67
	F686	0,66	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,45	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,87	n.s.	0,94	n.s.	n.s.
	F740	0,67	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,56	n.s.	n.s.	0,98	1	n.s.	0,99	n.s.	n.s.	n.s.
	F686/F740	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,46	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	-0,66
	I	0,69	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,52	n.s.	n.s.	0,99	0,99	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.
	Fo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,90	-0,82
	Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,90	1	n.s.
	Fv/Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,74	n.s.	1

Gasaustauschparameter sind Photosyntheserate (Photos.), Transpirationsrate (Trans.), stomatäre Leitfähigkeit (L) und intrazelluläre CO₂-Konzentration (Ci). LIF-Parameter sind rote Fluoreszenz (F686), infrarote Fluoreszenz (F740), F686/F740 und Integral des Spektrums (I). PAM-Fluoreszenz-Parameter sind Grundfluoreszenz (Fo), maximale Fluoreszenz (Fm) und maximale photochemische Effizienz (Fv/Fm).

P ≤ 0,05; nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A8: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem.), Gasaustauschparametern, Sprossfrischgewicht (Spross), Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie LIF- und PAM-Fluoreszenz-Parametern und der Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) von Zuckerrübenblättern der Sorten `Macarena` (n = 20) und `Penta` (n = 10) 14 Tage nach Inokulation.

Parameter	Penta																	
	Nem.	Photos.	Trans.	L	Ci	Spross	C	N	Chl	SPAD	R633	F686	F740	F686/F740	I	Fo	Fm	Fv/Fm
Macarena	Nem.	1	-0,98	-0,96	-0,91	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,65	n.s.	0,65	n.s.	n.s.	n.s.
	Photos.	-0,74	1	0,99	0,90	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Trans.	-0,74	0,86	1	0,86	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L	-0,75	0,88	0,99	1	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Ci	0,53	-0,77	n.s.	n.s.	1	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Spross	-0,48	0,45	0,53	0,55	n.s.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	N	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,46	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Chl	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,67	n.s.	n.s.	0,77	n.s.
	SPAD	-0,48	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	R633	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,48	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	F686	0,54	-0,66	-0,75	-0,73	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,97	n.s.	0,99	n.s.	n.s.	n.s.
	F740	n.s.	-0,48	-0,64	-0,62	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,93	1	n.s.	0,99	n.s.	n.s.	n.s.
	F686/F740	0,58	-0,65	-0,49	-0,46	0,61	n.s.	n.s.	n.s.	-0,52	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	0,72	n.s.
	I	0,47	-0,58	-0,72	-0,69	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,97	0,99	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.
	Fo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,48	n.s.	n.s.	0,45	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,80	-0,94
	Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,47	n.s.	n.s.	n.s.	0,52	0,53	n.s.	0,52	0,90	1	n.s.
	Fv/Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,49	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,86	-0,56	1

Gasaustauschparameter sind Photosyntheserate (Photos.), Transpirationsrate (Trans.), stomatäre Leitfähigkeit (L) und intrazelluläre CO₂-Konzentration (Ci). LIF-Parameter sind rote Fluoreszenz (F686), infrarote Fluoreszenz (F740), F686/F740 und Integral des Spektrums (I). PAM-Fluoreszenz-Parameter sind Grundfluoreszenz (Fo), maximale Fluoreszenz (Fm) und maximale photochemische Effizienz (Fv/Fm).

$P \leq 0,05$; nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A9: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem.), Gasaustausch Parametern, Sprossfrischgewicht (Spross), Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie LIF- und PAM-Fluoreszenz-Parametern und der Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) von Zuckerrübenblättern der Sorten 'Macarena' (n = 20) und 'Penta' (n = 10) 21 Tage nach Inokulation.

Parameter	Penta																	
	Nem.	Photos.	Trans.	L	Ci	Spross	C	N	Chl	SPAD	R633	F686	F740	F686/F740	I	Fo	Fm	Fv/Fm
Macarena	Nem.	1	-0,91	n.s.	-0,70	0,77	-	-	n.s.	-0,92	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Photos.	-0,53	1	n.s.	n.s.	-	-	-	n.s.	0,90	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Trans.	n.s.	0,47	1	n.s.	n.s.	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L	n.s.	0,47	0,78	1	-0,64	-	-	n.s.	n.s.	-0,66	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,63	n.s.	n.s.
	Ci	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	-	-	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Spross	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	N	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,56	1	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	Chl	n.s.	0,58	0,46	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	SPAD	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	R633	0,53	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	0,66	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	F686	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,93	n.s.	0,97	n.s.	n.s.	n.s.
	F740	0,46	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,98	1	n.s.	0,99	n.s.	n.s.	n.s.
	F686/F740	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,56	n.s.	1	n.s.	0,78	0,71	n.s.
	I	0,48	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,99	1,00	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.
	Fo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,59	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,69	-0,90
	Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,84	1	n.s.
	Fv/Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,69	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,89	-0,50	1

Gasaustausch Parameter sind Photosyntheserate (Photos.), Transpirationsrate (Trans.), stomatäre Leitfähigkeit (L) und intrazelluläre CO₂-Konzentration (Ci). LIF-Parameter sind rote Fluoreszenz (F686), infrarote Fluoreszenz (F740), F686/F740 und Integral des Spektrums (I). PAM-Fluoreszenz-Parameter sind Grundfluoreszenz (Fo), maximale Fluoreszenz (Fm) und maximale photochemische Effizienz (Fv/Fm).

P ≤ 0,05; nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A10: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem.), Gasaustauschparametern, Sprossfrischgewicht (Spross), Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie LIF- und PAM-Fluoreszenz-Parametern und der Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) von Zuckerrübenblättern der Sorten 'Macarena' (n = 20) und 'Penta' (n = 10) 28 Tage nach Inokulation.

Parameter	Penta																	
	Nem.	Photos.	Trans.	L	Ci	Spross	C	N	Chl	SPAD	R633	F686	F740	F686/F740	I	Fo	Fm	Fv/Fm
Macarena	Nem.	1	-0,97	-0,95	-0,91	n.s.	-0,70	n.s.	-0,67	-0,96	-0,88	n.s.	0,70	0,65	0,70	0,68	n.s.	n.s.
	Photos.	-0,50	1	0,99	0,89	n.s.	0,66	n.s.	0,75	0,90	0,82	n.s.	-0,71	-0,66	-0,72	-0,69	n.s.	n.s.
	Trans.	n.s.	0,47	1	0,86	n.s.	0,70	n.s.	0,74	-0,88	0,79	n.s.	-0,66	n.s.	-0,68	-0,64	n.s.	n.s.
	L	n.s.	0,54	0,94	1	n.s.	n.s.	0,65	0,72	-0,86	0,82	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Ci	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Spross	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,70	-0,66	n.s.	-0,69	n.s.	n.s.	n.s.
	C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,76	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	N	-0,66	0,81	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,66	0,59	-0,85	-0,50	n.s.	-0,69	-0,49	n.s.	n.s.
	Chl	-0,54	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	-0,88	n.s.	-0,50	n.s.	-0,68	-0,52	-0,50	0,60
	SPAD	-0,73	0,65	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,82	n.s.	1	n.s.	-0,55	n.s.	-0,59	0,55	-0,65	0,66
	R633	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,52	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	0,67	n.s.	n.s.	n.s.
	F686	0,75	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,50	n.s.	-0,58	0,48	1	0,96	0,77	0,99	n.s.	n.s.
	F740	0,65	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,53	n.s.	0,88	1	n.s.	0,99	n.s.	n.s.
	F686/F740	0,66	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,62	0,76	n.s.	1	0,66	n.s.	n.s.	n.s.
	I	0,73	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,49	n.s.	-0,60	n.s.	0,96	0,98	0,56	1	n.s.	n.s.
	Fo	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	-0,96
	Fm	0,68	-0,50	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,75	n.s.	-0,86	0,58	0,59	0,55	n.s.	0,62	n.s.	1
	Fv/Fm	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,71	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,78	1

Gasaustauschparameter sind Photosyntheserate (Photos.), Transpirationsrate (Trans.), stomatäre Leitfähigkeit (L) und intrazelluläre CO₂-Konzentration (Ci). LIF-Parameter sind rote Fluoreszenz (F686), infrarote Fluoreszenz (F740), F686/F740 und Integral des Spektrums (I). PAM-Fluoreszenz-Parameter sind Grundfluoreszenz (Fo), maximale Fluoreszenz (Fm) und maximale photochemische Effizienz (Fv/Fm).

P ≤ 0,05; nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A11: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem.), Gasaustauschparametern, Sprossfrischgewicht (Spross), Kohlenstoff- (C), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie LIF- und PAM-Fluoreszenz-Parametern und der Laserlichtreflexion bei 633 nm (R633) von Zuckerrübenblättern der Sorten 'Macarena' (n = 20) und 'Penta' (n = 10) 35 Tage nach Inokulation.

		Macarena																	
	Parameter	Nem.	Photos.	Trans.	L	Ci	Spross	C	N	Chl	SPAD	R633	F686	F740	F686/F740	I	Fo	Fm	Fv/Fm
Macarena	Nem.	1	-0,59	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,70	-0,51	-0,59	0,73	0,73	0,70	0,63	0,75	0,73	0,57	-0,74
	Photos.	-0,59	1	0,55	0,56	n.s.	n.s.	n.s.	0,51	0,70	n.s.	-0,65	-0,55	-0,52	-0,53	-0,55	n.s.	n.s.	n.s.
	Trans.	n.s.	0,55	1	0,99	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	L	n.s.	0,56	0,99	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	Ci	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,49	n.s.	0,46	n.s.	0,48	n.s.
	Spross	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	C	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	n.s.	n.s.	-0,35	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	N	-0,70	0,51	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	1	0,66	0,79	-0,69	-0,64	-0,57	-0,78	-0,63	-0,58	n.s.	0,71
	Chl	-0,51	0,70	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,66	1	0,66	-0,60	-0,59	-0,53	-0,65	-0,57	-0,48	n.s.	0,53
	SPAD	-0,59	0,60	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,79	0,66	1	-0,77	-0,50	n.s.	-0,84	n.s.	-0,68	n.s.	0,87
	R633	0,73	-0,65	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,69	-0,60	-0,77	1	0,61	0,49	0,77	0,58	0,63	n.s.	-0,79
	F686	0,73	-0,55	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,64	-0,59	-0,50	0,61	1	0,97	0,80	0,99	0,62	0,56	-0,56
	F740	0,70	-0,52	n.s.	n.s.	0,49	n.s.	n.s.	-0,57	-0,53	n.s.	0,49	0,97	1	0,64	0,99	0,54	0,56	n.s.
	F686/F740	0,63	-0,53	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,78	-0,65	-0,84	0,77	0,80	0,64	1	0,73	0,66	n.s.	-0,81
	I	0,75	-0,55	n.s.	n.s.	0,46	n.s.	n.s.	-0,63	-0,57	n.s.	0,58	0,99	0,99	0,73	1	0,60	0,57	-0,51
	Fo	0,73	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	-0,58	-0,48	-0,68	0,63	0,62	0,54	0,66	0,60	1	0,90	-0,86
	Fm	0,57	n.s.	n.s.	n.s.	0,48	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,56	0,56	n.s.	0,57	0,90	1	-0,55
	Fv/Fm	-0,74	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	0,71	0,53	0,87	-0,79	-0,56	n.s.	-0,81	-0,51	-0,86	-0,55	1

Gasaustauschparameter sind Photosyntheserate (Photos.), Transpirationsrate (Trans.), stomatäre Leitfähigkeit (L) und intrazelluläre CO₂-Konzentration (Ci). LIF-Parameter sind rote Fluoreszenz (F686), infrarote Fluoreszenz (F740), F686/F740 und Integral des Spektrums (I). PAM-Fluoreszenz-Parameter sind Grundfluoreszenz (Fo), maximale Fluoreszenz (Fm) und maximale photochemische Effizienz (Fv/Fm).

P ≤ 0,05; nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A12: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen der Temperaturdifferenz ΔT [°C] bei unterschiedlichen *Heterodera schachtii*-Populationsdichten und der jeweiligen Differenz der Photosynthese Δ Photos. [$\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$], der Transpiration Δ Trans. [$\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] und der stomatären Leitfähigkeit ΔL [$\mu\text{mol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$] bei Zuckerrüben der Sorten 'Macarena' (n = 20) und 'Penta' (n = 10).

Sorte	Parameter	Δ Photos.	Δ Trans.	ΔL	ΔCi
Macarena	ΔT 500	n.s.	0,94	0,77	n.s.
Macarena	ΔT 1000	n.s.	0,92	0,96	n.s.
Macarena	ΔT 1500	n.s.	0,87	0,85	n.s.
Penta	ΔT 1500	n.s.	0,72	0,51	n.s.

ΔT 500 = Differenz der Oberflächentemperatur der Kontrollvarianten und der Pflanzen inokuliert mit 500 *Heterodea schachtii*-Larven/100 ml Boden; ΔT 1000 = Differenz der Kontrollvarianten und der Pflanzen inokuliert mit 1000 *Heterodea schachtii*-Larven/100 ml Boden usw.; $P \leq 0,05$; Nicht signifikante Korrelationen sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A13: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem), Sprossfrischgewicht (Spross), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie den Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Macarena' (n = 20).

Tage n. Inokulation	Parameter	Nem	Spross	N	Chl	SPAD
7	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
14	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
35	NDVI	-0,85	n.s.	0,77	0,72	0,76
	GNDVI	-0,84	n.s.	0,70	0,71	0,75

Nicht signifikante Korrelationen bei $P \leq 0,05$ sind mit n.s. gekennzeichnet.

Tab. A14: Pearsons Korrelationskoeffizienten zwischen Nematodendichte (Nem), Sprossfrischgewicht (Spross), Stickstoff- (N) und Chlorophyllgehalt (Chl), SPAD-Werten (SPAD) sowie den Vegetationsindizes 'NDVI' und 'GNDVI' von Zuckerrübenblättern der Sorte 'Penta' (n = 10).

Tage n. Inokulation	Parameter	Nem	Spross	N	Chl	SPAD
7	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
14	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
21	NDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	GNDVI	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
28	NDVI	-0,92	n.s.	0,66	0,79	0,87
	GNDVI	-0,90	n.s.	0,65	0,78	0,86

Nicht signifikante Korrelationen bei $P \leq 0,05$ sind mit n.s. gekennzeichnet.

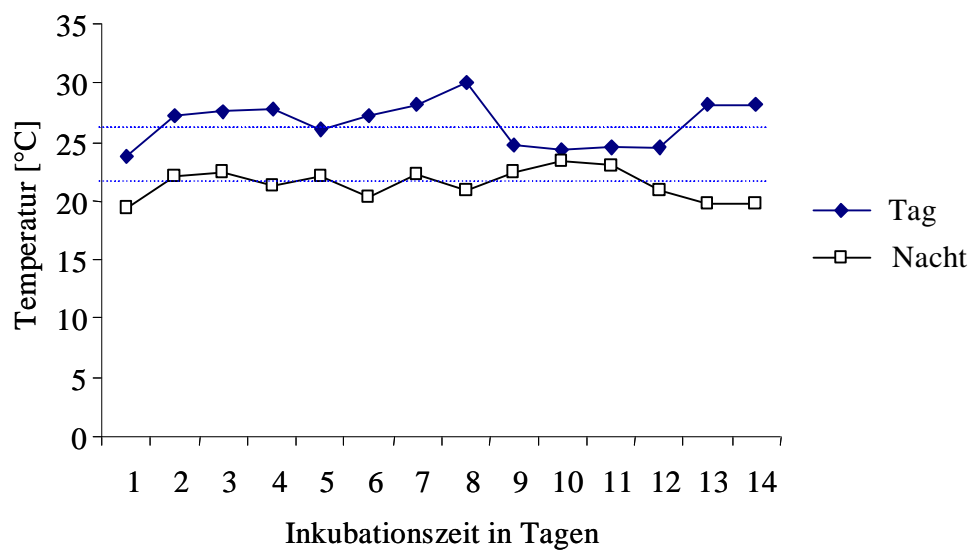


Abb. A1: Temperaturverlauf über Tag und Nacht während der Inkubationszeit der Zysten mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251.

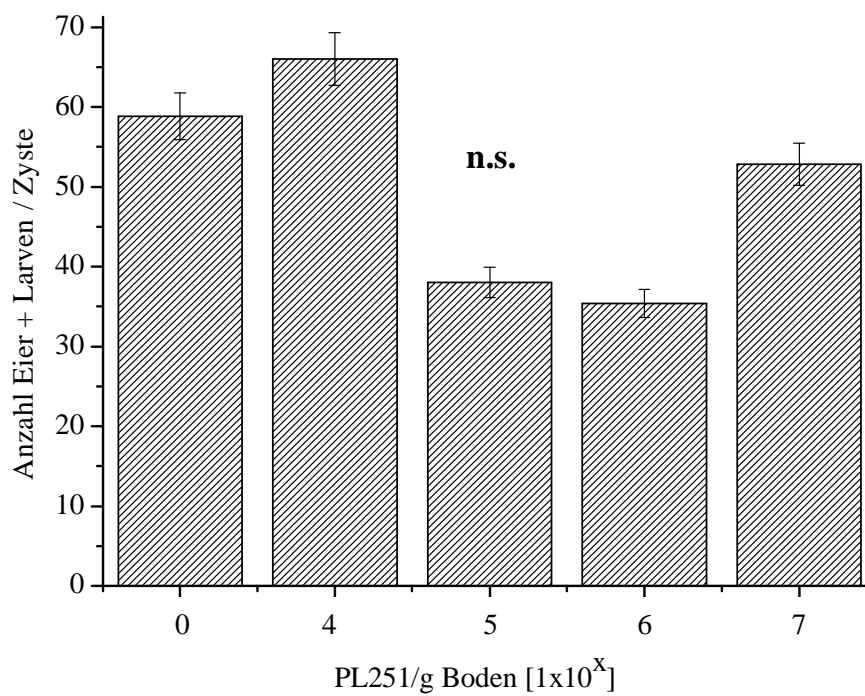


Abb. A2: Einfluss verschiedener Konzentrationen von *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) auf die Anzahl von *Heterodera schachtii*-Eiern und -Larven pro Zyste nach

14 Tagen Inkubationszeit der Zysten im Gewächshaus ohne Zuckerrübenpflanzen;
n.s. = nicht signifikant nach Tukeys HSD-Test bei $P = 0,05$ und $n = 5$.

Tab. A15: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und der Inkubationszeit der Zysten [Wochen] ohne Zuckerrübenpflanze auf den Inhalt von *Heterodera schachtii*-Zysten bei drei verschiedenen Temperaturen.

	Eier + Larven / Zyste								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	296	296	n.s.	279	398	n.s.	298	169	*
PL251	291	232	n.s.	407	287	*	255	197	n.s.
Sign. ^b	n.s.	*		*	n.s.		n.s.	n.s.	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; $n = 5$.

Tab. A16: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und der Inkubationszeit der *Heterodera schachtii*-Zysten [Wochen] auf das Wurzelfrischgewicht von Zuckerrüben bei drei verschiedenen Temperaturen.

	Wurzelfrischgewicht [g]								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	2,33	1,87	n.s.	2,75	1,52	*	2,71	1,88	*
PL251	2,38	1,70	n.s.	2,89	1,37	*	2,31	1,43	*
Sign. ^b	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; $n = 5$.

Tab. A17: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) [10^7 Konidien/g Boden] und der Inkubationszeit der *Heterodera schachtii*-Zysten [Wochen] auf die Wurzellänge von Zuckerrüben bei drei verschiedenen Temperaturen.

	Wurzellänge [m]								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	29,37	24,28	n.s.	31,14	21,67	*	31,04	23,66	*
PL251	31,82	24,15	*	31,72	18,24	*	26,21	23,39	n.s.
Sign. ^b	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; n = 5.

Tab. A18: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) [10^7 Konidien/g Boden] und der Inkubationszeit der *Heterodera schachtii*-Zysten [Wochen] auf die Eindringung von *Heterodera schachtii* pro Gramm Wurzel bei drei verschiedenen Temperaturen.

	<i>H. schachtii</i> / m Wurzel								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	7,8	6,1	n.s.	6,1	9,7	*	7,11	9,14	n.s.
PL251	6,3	5	n.s.	6,8	7,9	n.s.	6,21	8,09	n.s.
Sign. ^b	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; n = 5.

Tab. A19: Einfluss der Behandlung mit *Paecilomyces lilacinus* Stamm 251 (PL251) und der Inkubationszeit der *Heterodera schachtii*-Zysten [Wochen] auf die Eindringung von *Heterodera schachtii*-Larven pro Meter Wurzel bei drei verschiedenen Temperaturen.

	<i>H. schachtii</i> / m Wurzel								
	15°C			20°C			25°C		
	Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]			Inkubationszeit [Wo.]		
	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a	2	4	Sign. ^a
Kontrolle	7,8	6,1	n.s.	6,1	9,7	*	7,11	9,14	n.s.
PL251	6,3	5,0	n.s.	6,8	7,9	n.s.	6,21	8,09	n.s.
Sign. ^b	n.s.	n.s.		n.s.	n.s.		n.s.	n.s.	

Sign.^a = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Reihe; Sign.^b = Mittelwertsvergleich innerhalb einer Spalte; * = signifikant verschieden nach T-Test bei $P \leq 0,05$; n.s.= nicht signifikant; n = 5.

Danksagung

Ich möchte mich besonders bei meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. R.A. Sikora für die Betreuung und Begutachtung dieser Arbeit und die stets motivierenden Diskussionen bedanken.

Herrn Prof. Dr. H.W. Scherer danke ich ganz herzlich für das Interesse an meiner Arbeit und für die Übernahme des Koreferats.

Herrn Dr. S. Kiewnick möchte ich gerne für die Betreuung dieser Arbeit und für die kritische Durchsicht des Manuskripts danken.

Ich danke Herrn Dr. J. Schlang von der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft ganz herzlich für seine stets gewährte Hilfsbereitschaft während der Durchführung dieser Arbeit und für die zahlreichen interessanten Diskussionen. Weiterhin möchte ich den Mitarbeitern der Biologischen Bundesanstalt der Außenstelle in Elsdorf danken, die mich bei der Auswertung der Feldversuche unterstützt haben.

Frau I. Tartachnyk gilt besonderer Dank für die Unterstützung auf dem Gebiet der Laser induzierten und Puls Amplituden modulierten Fluoreszenz.

Ich danke allen Mitarbeitern des Instituts für Pflanzenkrankheiten der Universität Bonn sowie den Kollegen des Graduiertenkollegs, die mir im Verlauf der letzten Jahre immer hilfsbereit zur Seite gestanden haben. Ganz besonders möchte ich mich an dieser Stelle bei meinen Kollegen Jan Lenthe und Jan Jacobi für ihre Hilfsbereitschaft und die aufbauenden Gespräche bedanken.

Herrn Steuerwald vom Rheinischen Rübenbauerverband danke ich herzlich für die interessanten Feldbegehungen und Diskussionen.

Ganz besonders möchte ich mich bei meinem Freund Matthias bedanken, der mich während der letzten Jahre stets unterstützt hat und in allen Phasen der Promotion ein geduldiger Partner und Zuhörer war.

Meiner Familie möchte ich vielmals für ihre vielfältige Unterstützung während meiner Promotionszeit danken. Meinem Bruder Philip gilt besonderer Dank für die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Für die finanzielle Unterstützung des Projekts im Rahmen des DFG-Graduiertenkollegs 722 danke ich der Deutschen Forschungsgemeinschaft.