

Aus der Abteilung für Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz
des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

**Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger an Weizen (*Triticum aestivum* L.)
in Energiefruchtfolgen und Bedeutung des Halmbasisbefalls mit *Fusarium
culmorum* (W. G. Smith) Sacc. und *Fusarium graminearum* (Schwabe) für
die Mykotoxin-Kontamination der Pflanze**

Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Fakultät für Agrarwissenschaften
der Georg-August-Universität Göttingen

vorgelegt von

Mark Winter

geboren in Göttingen

Göttingen, im Mai 2012

D 7

1. Referent: Prof. Dr. Andreas von Tiedemann
2. Referent: Prof. Dr. Petr Karlovsky

Tag der mündlichen Prüfung: 24. Mai 2012

Inhalt

1	Einleitung	1
1.1	Energiefruchtfolgen.....	1
1.2	Fruchtfolgekrankheiten.....	3
1.3	Mykotoxine	9
1.4	Fragestellung der Arbeit.....	10
2	Material und Methoden.....	12
2.1	Chemikalien.....	12
2.1.1	Verwendete Chemikalien	12
2.1.2	Nährmedien, Puffer und Trenngele.....	13
2.2	Pflanzenmaterial	15
2.3	Pilzisolat.....	16
2.4	Herstellung von Strohinokulum	17
2.5	Inokulationsmethode für Gewächshausversuche.....	17
2.6	Erfassung der Befallsparameter im Feldversuch.....	18
2.7	Bioanalysen der Proben aus Feld- und Gewächshausversuchen.....	21
2.7.1	Probenahme und Probenaufbereitung der Feldproben	21
2.7.2	Probenahme und Probenaufbereitung der Proben aus Gewächshausversuchen	23
2.7.3	Mykotoxinnachweis mittels ELISA (Enzyme-linked Immunosorbent Assay).....	23
2.7.4	Mini-Fermenterversuch.....	24
2.7.5	DNA-Extraktion.....	25
2.7.7	Quantitative Polymerase Kettenreaktion (qPCR).....	26
2.8	Isolation und Identifikation von <i>Fusarium</i> spezies an der Halmbasis von Grünroggen	28
2.9	Feldversuch	28
2.9.1	Standorte	28
2.9.2	Aufbau des Fruchtfolgeversuchs	30
2.10	Inokulation von Grünroggen an der Halmbasis mit <i>Fusarium spp.</i> unter kontrollierten Bedingungen	35
2.11	Statistische Auswertung.....	36

3	Ergebnisse	38
3.1	Fruchtfolgeversuch.....	38
3.1.1	Meteorologische Daten.....	38
3.1.2	Vorkommen von Halmbasis- und Wurzelerkrankungen an Winterweizen.....	41
3.1.2.1	Jahr 2010.....	44
3.1.2.2	Jahr 2011.....	50
3.1.3	Mykotoxingehalte in Korn- und Stängelbasisproben von Winterweizen der Jahre 2010 und 2011.....	74
3.1.4	Vorkommen von <i>Fusarium spp.</i> an der Halmbasis und Toxinbelastung von Grünroggen aus den Feldversuchen (Standort Göttingen).....	76
3.1.5	DON-Gehalt in Maisproben aus den verschiedenen Fruchtfolgen am Standort in Göttingen.....	78
3.2	Anfälligkeit von Grünroggensorten gegenüber Halmbasisinfektionen mit <i>Fusarium spp.</i>	80
3.2.1.	DON-Gehalt.....	80
3.2.2	DNA-Gehalt.....	81
3.2.3	Pflanzliche Biomasse.....	82
3.2.4	Auswirkungen von hoch DON-belastetem Grünroggen auf die Biogasbildung (Mini-Fermenterversuch).....	83
4	Diskussion	86
4.1	Vorkommen von Halmbasis- und Wurzelerkrankungen an Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011.....	87
4.2	Vergleichende Bewertung der Energiefruchtfolgen im Hinblick auf das Befallsgeschehen von Halmbasis- und Wurzelkrankheitserregern an Weizen	93
4.3	Mykotoxine in Korn- und Halmbasis von Weizen, sowie in Ganzpflanzenproben von Mais.....	103
4.4.	Mykotoxine in Grünroggen	109
5	Zusammenfassung	117
6	Summary	120
7	Literatur	123

Anhang

Danksagung

Eidesstattliche Erklärung

Lebenslauf

Abkürzungen und Symbole

Abb.	Abbildung
3-Acetyl-DON	3-Acetyldeoxynivalenol
15-Acetyl-DON	15-Acetyldeoxynivalenol
°C	Grad Celsius
cm	Zentimeter
CRF	Fusarium Halmbasis- und Wurzelerkrankung
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DON	Deoxynivalenol
ELISA	Enzyme linked immunosorbent assay
ES	Entwicklungsstadium
FF	Fruchtfolge
fs	Frühsaat
g	Gramm
GLM	Allgemeines Lineares Modell
Gö	Göttingen
ha	Hektar
HRO	Hansestadt Rostock
kg	Kilogramm
L	Liter
Min	Minute
mm	Millimeter
oTS	organische Trockensubstanz
PCR	Polymerase Kettenreaktion
PS	Pflanzenschutzvariante situationsbezogene Referenz
PS-F0	Pflanzenschutzvariante Fungizid Null
rel.	relativ
sp	Spätsaat
Tab.	Tabelle
TM	Trockenmasse
UK-BK	Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung
UK-PS	Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen
w/v	weight per volume
%	Prozent

1 Einleitung

1.1 Energiefruchtfolgen

Der Anbau von Kulturpflanzen in unterschiedlicher zeitlicher und räumlicher Dichte ist seit dem frühen Mittelalter ein wesentliches Instrument, um den Ertrag im Ackerbau zu sichern (Keller *et al.* 1997). Die Fruchtfolgegestaltung unterliegt heute vermehrt betrieblichen und betriebswirtschaftlichen Entscheidungskriterien wie dem Betriebstyp, dem Abschluss von Lieferverträgen und der Höhe des zu erwartenden Deckungsbeitrags der angebauten Kulturen (Steinmann & von Tiedemann 2006), so dass vor allem die Vielfalt der angebauten Kulturen abgenommen hat. Das führte in den letzten Jahrzehnten zu einer Einengung und Vereinfachung der Fruchtfolgen. Im Jahr 2010 waren 70% der deutschen Ackerfläche mit Weizen (3,26 Mio. ha), Mais (2,32 Mio. ha), Raps (1,47 Mio. ha) und Gerste (1,30 Mio. ha) bestellt. Seit 1990 haben die Anbauumfänge für Weizen um 38%, für Mais um 46% und für Raps um >100% zugenommen (Anonymus 1 2011). Durch politische Instrumente zur Förderung von regenerativen Energien hat sich diese Entwicklung maßgeblich verstärkt. Hervorzuheben ist hierbei einerseits die Einführung des *Gesetzes für den Vorrang Erneuerbarer Energien* (Erneuerbare-Energien-Gesetz, EEG) im Jahr 2000 und andererseits das vom Deutschen Bundestag im Jahr 2006 verabschiedete *Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften* (Biokraftstoffquotengesetz). Das EEG regelt die bevorzugte Stromeinspeisung aus regenerativen Energiequellen und garantiert den Erzeugern feste Mindestverkaufspreise. Es soll die Stromerzeugung aus erneuerbaren Quellen wie u.a. Wasserkraft, Geothermie, Windkraft und Biomasse fördern (Anonymus 2 2000). Die Novellierung des EEGs im Jahr 2004 schaffte die Voraussetzung, um landwirtschaftliche Primärprodukte als Gärsubstrat in Biogasanlagen zur Strom- bzw. Gaserzeugung zu nutzen. Durch den eingeführten Bonus für nachwachsende Rohstoffe (NawaRo-Bonus) wird der Einsatz landwirtschaftlicher Kulturpflanzen in Biogasanlagen finanziell gefördert (Anonymus 3 2004). Die Anzahl an Biogasanlagen ist dadurch in Deutschland von ca. 2000 im Jahr 2004 auf über 7000 im Jahr 2011 angestiegen (Fachverband Biogas e.V. 2012). Das Biokraftstoffquotengesetz regelt seit 01. Januar 2007 die verpflichtende Beimischung eines festen und anwachsenden Mindestanteils von Biokraftstoffen in die Kraftstoffe für Kraftfahrzeuge in Deutschland (Anonymus 4 2006). Mit der Änderung des Biokraftstoffquotengesetzes im Jahr 2009 wurde die Beimischungsquote für den Zeitraum

2010 bis 2014 auf 6,25% festgesetzt (Anonymus 5 2009). Dies hat den Bedarf an pflanzlicher Biomasse zur Erzeugung von Energie weiter erhöht. In Deutschland wurden im Jahr 2011 auf ca. 2,2 Mio. ha Energiepflanzen angebaut. Das entspricht etwa 17% der deutschen Ackerfläche. Hauptsächlich handelte es sich dabei um Pflanzen zur Biogaserzeugung (800.000 ha, der Schwerpunkt liegt hier auf Mais) und Raps zur Biodiesel- bzw. Pflanzenölproduktion (910.000 ha, FNR 2011). Neben der Zunahme des Energiepflanzenanbaus ist eine räumliche Konzentration bestimmter Kulturarten im Anbau zu beobachten. Der Biomasseanbau, besonders der zur Verwendung in Biogasanlagen, muss am Ort des Bedarfs stattfinden. Zusätzlich finden sich viele Biogasanlagen in viehstarken Regionen, wo Mais bereits zuvor als Futterpflanze angebaut wurde und daher nicht in neue Technik investiert werden musste. In einigen Landkreisen (z.B. Cloppenburg, Grafschaft-Bentheim) wird auf bis zu 40% der landwirtschaftlichen Nutzfläche Mais angebaut (Landwirtschaftskammer Niedersachsen 2011). Auf den Gunststandorten wie den Börden dominieren hingegen hohe Anteile an Weizen und Raps in der Fruchtfolge. Den Nachteilen einseitiger Fruchtfolgen wird durch erhöhte Pflanzenschutz- und Düngemaßnahmen entgegengewirkt (Steinmann und Tiedemann 2006).

Das Gesetz zum Schutz der Kulturpflanzen (Pflanzenschutzgesetz) sieht in der Neufassung von 1998 vor, dass die Durchführung des Pflanzenschutzes nur nach guter fachlicher Praxis erfolgen darf. Hierzu müssen die Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes berücksichtigt werden (Anonymus 6 1998). Mit dem Inkrafttreten des Paragraphen 3, Artikel 1 des *Gesetzes zur Neuordnung des Pflanzenschutzrechtes* vom 06. Februar 2012 zur Anpassung an europäische Rechtsakte ist der integrierte Pflanzenschutz nicht nur Leitbild, sondern für die Durchführung von Pflanzenschutzmaßnahmen verbindlich (Anonymus 7 2012). Der integrierte Pflanzenschutz sieht vor, dass alle nicht-chemischen Maßnahmen zugunsten chemischer zu bevorzugen sind, so dass der chemische Pflanzenschutz auf das notwendige Maß begrenzt wird. Zu diesen nicht-chemischen Maßnahmen zählen neben biologischen, biotechnischen, pflanzenzüchterischen auch anbau- und kulturtechnische Maßnahmen (Anonymus 6 1998). Die Fruchtfolgegestaltung gehört somit zu einer wichtigen Größe, um Pflanzenkrankheiten und damit den chemischen Pflanzenschutz zu begrenzen. Die Reduktion des chemischen Pflanzenschutzes ist somit ein gesellschaftlich formuliertes Ziel und wird durch politische Bestrebungen, wie das *Reduktionsprogramm chemischer Pflanzenschutz* für Deutschland aus dem Jahr 2004 (Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und

Verbraucherschutz 2012) und den *Nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln* auf EU-Ebene, vorgelegt von der Europäischen Kommission im Jahr 2006 auf Grundlage der Richtlinie 2009/128/EG aus dem Jahr 2009 (Anonymus 8 2009), umgesetzt.

1.2 Fruchtfolgekrankheiten

Die steigenden Anbauanteile von Raps, Mais und Weizen im deutschen Ackerbau führen zu eingegengten und vereinfachten Anbaufolgen von Kulturpflanzen. Die Folge sind reduzierte Nicht-Wirtszeiten diverser boden- und stoppelbürtiger Krankheiten, was wiederum dazu führt, dass Überdauerungsformen bzw. infektiöses Pflanzenmaterial in geringerem Maße den natürlichen Abbauprozessen unterworfen sind. Es kommt zu angereichertem Bodeninokulum, welches das Risiko für das Zusammentreffen von Wirt und Infektionsmaterial von Pflanzenpathogenen erhöht. Diese stark standortgebundene Form der Wirt-Parasit-Interaktion wird allgemein als Fruchtfolgekrankheit bezeichnet. Es ist aufwendig, bodenbürtige Schaderreger chemisch zu bekämpfen und in Deutschland nur in Ausnahmefällen für 120 Tage nach Artikel 53 der Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 durch Genehmigung des Bundesamtes für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit möglich (Bundesamt Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit 2012). Zudem fehlt es an Methoden, um auf geeignete Sortenresistenzen zu prüfen, so dass spezifische Resistenzen weitestgehend fehlen (Cook 1980). Daher ist der Fruchtwechsel seit langem ein wichtiges Mittel zur Kontrolle von boden- und strohbürtigen Pathogenen (Cook 1980). Winterweizen (*Triticum aestivum*, L.) in enger Folge kann von verschiedenartigen boden- und strohbürtigen Erregern befallen sein (Kirkegaard *et al.* 2008). Hauptsächlich sind hierbei die Halmbasis und die Wurzel von Weizen betroffen. Von Bedeutung sind die Erreger des Scharfen Augenflecks *Rhizoctonia cerealis* van der Hoeven, des parasitären Halmbruchs *Oculimacula yallundae* und *O. aciformis* (Crous *et al.* 2003) und von Halmbasisfusarium *Fusarium spp.*, welche häufig als Erregerkomplex auftreten (Clement & Parry 1998; Duben & Fehrmann 1979, Fischer 1977; Wegener & Wolf 1995). Weiterhin ist der bodenbürtige Erreger der Schwarzbeinigkeit *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx & Olivier var. *tritici* Walker an der Wurzel von Weizen von Relevanz.

Die bedeutendste Krankheit aus der Gruppe der Halmbasiskrankheiten an Weizen in den kühl-feuchten Klimaten ist der parasitäre Halmbruch (Ray 2006; Saur *et al.* 1994). Durch den Befall, der in Form von Symptomen an der Halmbasis sichtbar wird, kommt es zu

einer reduzierten Wasser- und Nährstoffversorgung höher gelegener Pflanzenteile. Bei einer starken Symptomausprägung führt der Befall zu Lagerbildung (Glynne & Salt 1958; Scott und Hollins 1974; Clarkson 1981), dabei sind die Beschreibungen über die Ertragsverluste sehr unterschiedlich. Die prägnantesten Mindererträge stellen sich nach Bockmann (1963) im Weizen ein, wenn alle drei Ertragskomponenten (Bestandesdichte, Tausendkornmasse und Kornzahl/Ähre) der Pflanze durch den Befall mit dem Erreger betroffen sind. Nach künstlicher Inokulation konnten Kornverluste von bis zu 33% beobachtet werden (Glynne & Salt 1958). Die festgestellten Ertragsverluste an einzelnen stark befallenen Halmen konnten bis zu 57% in Monokulturstreifen von Winterweizen betragen (Zimmermann 1984). Der Erreger ist ein fakultativer Parasit, welcher saprophytisch an Getreidestoppeln und Strohresten auf bzw. unter der Bodenoberfläche überdauert (Focke 1977). Die Infektion geht von Konidien aus und findet schon im Keimlingsstadium im Herbst statt. Spätere Infektionen im Frühjahr und Frühsommer sind möglich, werden aber als bedeutungslos angesehen (Fehrmann & Schrödter 1971). Infektionshyphen dringen durch die Kutikula in die Epidermis ein und das Hyphengeflecht durchwächst anschließend nach und nach alle Blattscheiden, bis der Erreger das Innere des Halms erreicht (Defosse & Dekegel 1974; Lange-de la Camp 1966). Ab dem Entwicklungsstadium (ES) des beginnenden Schossens (ES 30/31, Zadoks & Chang 1974) bilden sich an den befallenen Halmbasen typische längs-ovale Befallssymptome mit zentraler Aufhellung und unscharfen braunen Rändern aus (Bockmann & Knoth 1971; Abb. 1).



Abb. 1: Längs-ovaler Augenfleck mit zentraler Aufhellung und unscharfem braunem Rand, typisches Befallssymptom des Erregers des parasitären Halmbruchs *O. yallundae/acuformis* am Halmgrund von Winterweizen, Sorte Skalmeje. Die Pflanzen wurden dem Feldversuch zu Energiefruchtfolgen am Standort in Göttingen im Jahr 2010 zum Stadium der späten Milchreife (ES 77) entnommen.

Neben dem parasitären Halmbruch gehört die Schwarzbeinigkeit an der Halmbasis von Winterweizen zu den bedeutendsten Fruchtfolgekrankheiten in engen Weizenfruchtfolgen (Mielke 1998). Der Erreger der Schwarzbeinigkeit findet in ganz Deutschland auf allen Standorten Verbreitung und durch den zunehmenden Anteil von Weizen in der Fruchtfolge war in der Vergangenheit ein verstärktes Auftreten festzustellen (Mielke 1998). Hierbei wurden regelmäßig Ertragsverluste von über 25% beobachtet (Bockmann & Mielke 1979; Christen 1990). Die Besonderheit des Pathogens *G. graminis* ist das Vorkommen von drei Varietäten, welche an Weizen unterschiedlich aggressiv sind. Demnach schädigen an Hafer bzw. Reis vor allem die Varietäten *avenae* und *graminis*, welche eher in Westeuropa bzw. wärmeren Klimaten vorkommen (Weste 1970). Die Varietät *graminis* findet sich vor allem in Deutschland und Nordeuropa im intensiven Weizen- und Gerstenanbau (Prillwitz 1983). Durch Myzel in Stoppelresten und an Wurzeln von Ausfallgetreide und verschiedenen Gräsern erfolgt die Überdauerung des Erregers. Die Infektion des Weizens erfolgt im Boden hauptsächlich durch Myzel (Hornby 1975; Prew 1980). Schon ab Herbst wird der Winterweizen befallen, was zur Bestandesausdünnung und zu höherer Frostempfindlichkeit führen kann (Jensen & Jørgensen 1973; Höflich und Roth 1981). Höhere Bodentemperaturen fördern die Infektion durch *G. graminis*, welche bis zum Ährenschieben stattfinden kann und zu einem Absterben ährentragender Halme führt (Wong 1980). Durch den Primärbefall kommt es zu Verbräunungen und Verschwärzungen der Keimwurzel (Pearson 1974; Holland und Fulcher 1971). Die Ausbreitung an der Pflanze erfolgt über sogenannte dunkelbraune bis schwarze Laufhyphen, welche in Richtung der Halmbasis wachsen und von denen Infektionshyphen in das Wurzelgewebe und die Leitungsbahnen einwachsen (Weste 1972; Knoth 1975; Prillwitz 1983; Abb. 2). Dies führt zu Störungen des Wasser- und Nährstoffhaushalts. Neben den dunkelbraunen Läsionen an den Haupt- und Nebenwurzeln kommt es bei stark befallenen Pflanzen zur Weißährigkeit. Diese Pflanzen lassen sich leicht aus dem Boden ziehen (Wong 1980; Fitt & Hornby 1978; Clarkson *et al.* 1975; Mielke 1974).

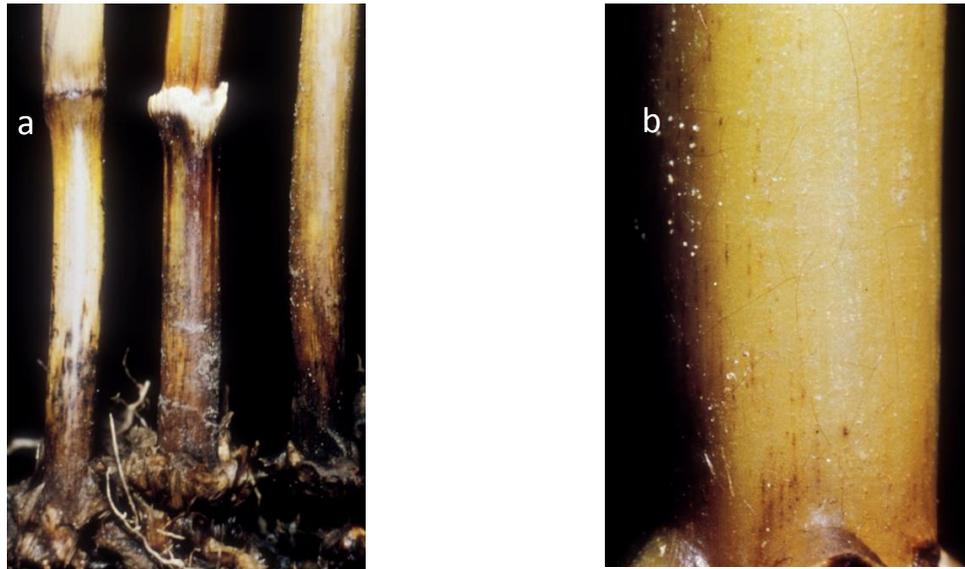


Abb. 2: Dunkelbraune bis schwarze Läsionen hervorgerufen durch den Erreger der Schwarzbeinigkeit *G. graminis* var. *tritici* an den Wurzeln und am Halmgrund von Winterweizen, Sorte Jubilar (a). Laufhyphen von *G. graminis* auf dem Halm an der Basis von Winterroggen, Sorte Petkuser Kurzstroh (b). Fotos: Oeseau 1974

Die Bedeutung des Erregers des Scharfen Augenflecks *R. cerealis* ist noch sehr unklar. In mehreren deutschlandweiten Monitorings bzw. Laborstudien wurde diesem Pathogen immer eine eher untergeordnete Bedeutung beigemessen. Der Erreger trat nie in Vergesellschaftung mit *O. yallundae/acuformis* bzw. *Fusarium spp.* auf, sondern es bestand vielmehr eine Konkurrenzbeziehung zu Ungunsten von *R. cerealis* (Reinecke & Fehrmann 1979; Kapoor & Hoffmann 1983a; Kapoor & Hoffmann 1983b). Zudem wurden die Ertragswirksamkeiten des Befalls als sehr gering eingestuft. Ertragsverluste sind nur nach massivem Befall durch *R. cerealis*, im Besonderen für die Weizenanbauggebiete Chinas, beschrieben (Hamada *et al.* 2011). Im Feld findet sich ausschließlich die teleomorphe Form des Erregers. Die Überdauerung findet in Form von Myzel oder Sklerotien statt, die mehrere Jahre infektiös bleiben (Keijer 1996; Sherwood 1970). Aus den überdauernden Sklerotien wächst das Myzel aus und wächst gerichtet auf den Wirt zu. Dabei zeigt das Myzel eine hohe Wachstumsrate, Besiedelungsstärke und Persistenz im Boden (Papavizas & Davey 1962). Die Hyphen überwachen die Pflanzenoberfläche und anschließend werden die typischen rechtwinkligen T-förmigen Seitenarme gebildet, welche die Infektionsstrukturen ausbilden (Keijer 1996). Der Erreger befällt Weizen schon im Keimlingsstadium. An der Koleoptile zeigen sich braune Läsionen, die bei ansteigender Befallsschwere im Zentrum eingesunken sind. Der Pilz durchwächst die Halmbasis von den äußeren Blattscheiden ausgehend nach innen. Durch den Frühbefall im Herbst kann

es zum Keimlingssterben vor dem Auflaufen kommen (Pitt 1964). An reifen Pflanzen finden sich auf den äußeren Blattscheiden und auf dem Halm graue bis cremefarbene ovale bis kreisförmige Läsionen mit einem braunen, scharf abgegrenzten Rand hin zum gesunden Gewebe (Abb. 3). Auf diesen Läsionen finden sich häufig sklerotienartige Strukturen (Sprague 1937, Pitt 1964). In schweren Befallsfällen durchwächst der Erreger den gesamten Halmgrund und besiedelt die Leitgefäße (Pitt 1964).



Abb. 3: Befallssymptome an der Halmbasis von Winterweizen hervorgerufen durch den Erreger des Scharfen Augenfleck *R. cerealis*: Graue bis cremefarbene ovale bis kreisförmige Läsionen mit einem braunen, scharf abgegrenzten Rand hin zum gesunden Gewebe. Die Pflanzen wurden dem Feldversuch zu Energiefuchtfolgen am Standort in Göttingen im Jahr 2010 zum Stadium der späten Milchreife (ES 77) entnommen.

Die sogenannte Fusarium Fußfäule an der Halmbasis und Wurzel von Weizen wird in der Regel durch mehrere Arten aus der Gattung *Fusarium* verursacht. Dabei zeigten verschiedene Untersuchungen, dass die Erreger *F. graminearum* und *F. culmorum* die dominierenden Vertreter am Halmgrund sind (Smiley 1996; Cook 1980; Clement & Parry 1998; Duben & Fehrmann 1979; Fischer 1977; Wegener & Wolf 1995). Sie können in schweren Fällen eine Rotte der Wurzel, des Wurzelhalses und der Halmbasis verursachen (Smiley 1996). *Fusarium spp.* überdauert hauptsächlich durch infizierte Pflanzenrückstände und Chlamydosporen (Cook 1980). Die von *F. culmorum* gebildeten Chlamydosporen zeigten eine Überdauerungszeit von zwei bis vier Jahren (Inglis & Cook 1986). *Fusarium* infiziert den Weizen schon vier bis sechs Wochen nach der Aussaat während des Auflaufens im Herbst. Mit beginnender Bildung der Kronenwurzeln können erste Symptome einer Infektion in Form von unbestimmten Verbräunungen festgestellt

werden (Cook 1968). Das auskeimende Myzel sowie keimende Sporen besiedeln die äußeren Blattscheiden und durchwachsen sie, bis sie auf den Halm treffen. Die Erreger *F. graminearum* und *F. culmorum* wachsen hauptsächlich interzellulär, sie sind aber auch fähig, epidermale Zellen direkt zu penetrieren. Zu späteren ES (77-87 und 95) wird der gesamte Halmgrund bis hin zum ersten Knoten durch das Hyphengeflecht besiedelt, was zu einer Störung des Wassertransports führen kann (Clement & Parry 1998; Cook 1980). Die Infektionen im Herbst können ein Keimlingssterben verursachen (Duben und Fehrmann 1979). Dabei werden vor allem trocken-warme Herbste als fördernde Faktoren für Starkbefälle angesehen (Cook 1980). Die Infektionen rufen unspezifische streifenförmige braune Läsionen auf dem ersten Internodium des Halms hervor, welche mehrere Zentimeter lang sein können (Abb. 4). Zusätzlich umfassen die Symptome teilweise den gesamten ersten Halmknoten (Cook 1968). Deutliche Symptome an der Halmbasis treten erst in späteren ES auf (Duben und Fehrmann 1979).



Abb. 4: Länglich-streifige Symptome einer Halmbasisinfektion durch *Fusarium spp.* die am ersten Internodium der Halmbasis auftreten und den gesamten ersten Halmknoten mit umfassen können. Die Läsionen sind schokoladenbraun (links) bis ockerfarben (rechts). Pflanzen wurden dem Feldversuch zu Energiefruchtfolgen am Standort in Göttingen im Jahr 2010 zum Stadium der späten Milchreife (ES 77) entnommen.

Fusarium Wurzel- und Halmbasiserkrankungen kommen in allen Weizenanbaugebieten weltweit vor (Cook 1968). Bisher hatte *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Weizen nur eine untergeordnete Bedeutung. Schwere Schäden in Folge von Infektionen sind bisher für die trockenen Weizenanbaugebiete des Pazifischen Nordwestens (Cook 1968; Cook 1980; Smiley 1996), Australiens (Wildermuth *et al.* 1997; Smiley 1996) und des Mittleren

Ostens (Fouly & Pedersen 1996) beschrieben. Cook (1968) beschreibt Ertragsverluste bis zu 50% durch *Fusarium spp.* auf einzelnen Schlägen im Pazifischen Nordwesten der USA.

1.3 Mykotoxine

Die Besonderheit der Gattung *Fusarium* ist die Fähigkeit verschiedener Spezies warmblütertoxische Stoffe in ihrem Sekundärmetabolismus zu bilden und ins pflanzliche Gewebe abzugeben. Pflanzliche Biomasse, die mit *Fusarium*toxinen verseucht ist, kann zu akuten und chronischen Intoxikationen bei Mensch und Tier führen (Desjardins & Hohn 1997). Die bedeutenden Erreger an der Halmbasis *Fusarium graminearum* und *F. culmorum* bilden hauptsächlich Zearalenon und die Typ B Trichothecene Nivalenol und Deoxynivalenol (DON, Leslie & Summerell 2006). Dabei stellt DON inklusive seiner toxischen Derivate 3-Acetyl-DON und 15-Acetyl-DON durch die Häufigkeit des Auftretens und die gefundenen Mengen das bedeutendste *Fusarium*toxin dar (Golinski *et al.* 1996; Snijders 1990). DON zeichnet sich durch eine inhibitorische Wirkung auf die Proteinbiosynthese aus. Zusätzlich verhindert es die Aktivierung von Resistenzgenen und schädigt indirekt die Membranintegrität der Chloroplasten, wodurch die photosynthetisch aktiven Pigmente austreten (Rotter 1996; Bushnell *et al.* 2010). Bruins *et al.* (1993) konnten weiter zeigen, dass DON eine hohe Phytotoxizität besitzt. Das *Fusarium*toxin spielt damit eine entscheidende Rolle für die Ausbreitung von *Fusarium* in der Pflanze und die Krankheitsentwicklung in Gramineen (Desjardins *et al.* 1996; Proctor *et al.* 1995; Wagacha & Muthomi 2007).

Mudge *et al.* (2006) konnten zeigen, dass *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Weizen genauso viel DON wie nach einer Ähreninfektion produziert und ins Gewebe abgibt. Nach einer Sprühhinokulation der ganzen Weizenpflanze zur Blüte mit einer Sporensuspension von *F. culmorum* können in allen Organen erhöhte Mengen an DON, mit den höchsten Mengen im Stroh, gefunden werden (Brinkmeyer *et al.* 2006). Scherm *et al.* (2011) konnten zeigen, dass Trichothecene des Typs B eine wichtige Rolle für die Aggressivität bei Halmbasisinfektionen von Hartweizen (*Triticum turgidum* L. ssp. *durum*) durch *F. culmorum* spielen. So reduzierte sich die Befallshäufigkeit einer Halmbasiserkrankung hervorgerufen durch *F. culmorum* um 40-80% nachdem ein Gen, welches die Trichothecenbildung reguliert, ausgeschaltet wurde. Die Gene TRI5 und TRI4 von *F. culmorum*, die bei einer Infektion der Weizenähre an der Trichothecenbildung beteiligt

sind und eine wichtige Rolle für die Stärke des Befalls spielen, werden auch bei einer Halmbasisinfektion hochreguliert (Beccari *et al.* 2011).

Mit immunocytochemischen Methoden konnten Kang & Buchenauer (1999) DON in drei Spindelstufen oberhalb der inokulierten Spindelstufe in Xylemgefäßen der Ährenspindel feststellen und folgerten daraus einen möglichen systemischen Transport des DONs im Gefäßsystem. Die Verteilung des Toxins in der Pflanze nach einer basalen Infektion wurde bislang noch nicht näher untersucht. Da DON und seine acetylierten Derivate hoch wasserlöslich ist, kann eine systemische Ausbreitung des Toxins in der Pflanze mit dem Wasserfluss im Xylem nicht ausgeschlossen werden. Der Nachweis von DON in Kornproben von Weizenähren, die keine Symptome einer Infektion durch *Fusarium spp.* aufwiesen (Schlüter *et al.* 2006) verstärkt die Annahme, dass es neben einer Ähreninfektion weitere Quellen der Mykotoxin-Kontamination in verschiedenen Pflanzenetagen geben muss.

1.4 Fragestellung der Arbeit

Im Rahmen des Verbundprojekts *Fruchtfolgen mit Energiepflanzen – Chancen und Risiken für den Pflanzenschutz* sollten durch die Anlage eines zweifaktoriellen Fruchtfolgeversuchs an den Standorten in Göttingen und Rostock die Auswirkungen der Fruchtfolgeintensivierung im Energiepflanzenanbau hinsichtlich der bedeutenden bodenbürtigen Krankheitserreger im Getreide untersucht werden. Hierzu zählen die Halmbasis- bzw. Wurzelkrankheitserreger Scharfer Augenfleck (*Rhizoctonia sp.*), Halmbasisfusarium (*Fusarium spp.*), parasitärer Halmbbruch (*Oculimacula yallundae/acuformis*) und die Schwarzbeinigkeit (*Gaeumannomyces graminis var. tritici*). Dabei wurde ein besonderer Schwerpunkt auf Halmbasisfusarien an Weizen und Roggen und die damit verbundene Mykotoxinproblematik gelegt. Hierzu wurden vier Standardfruchtfolgen mit unterschiedlichen Anteilen an Mais, Raps und Weizen etabliert. Die Fruchtfolgeintensivierung wird aus betriebsorganisatorischen und -wirtschaftlichen Gründen weiter zunehmen. Daher soll hier durch eine geschickte Kombination der meistangebauten Energiefrüchte das Potenzial zur Reduktion von Fruchtfolgekrankheiten im Getreide aufgezeigt werden. Neben der Fruchtfolgewirkung spielte das Pflanzenschutzregime eine wichtige Rolle bei der Bewertung der untersuchten Fruchtfolgen. Da neben phytopathologischen auch herbologische Aspekte eine Rolle spielten, wurde eine vierstufige Pflanzenschutzvariante bewertet. Die Verringerung von

Pflanzenschutz aufwendungen ist ein gesellschaftlich formuliertes Ziel. Diese Untersuchungen sollen einen Beitrag zu der Frage leisten, inwieweit die Fruchtfolgegestaltung bodenbürtige Krankheiten an Weizen und damit Pflanzenschutzmaßnahmen reduzieren kann. Die ökonomische Vorzüglichkeit der verschiedenen Energiefruchtfolgen, welche weitestgehend auf den Ertragseffekten beruhte, wurde in einem gesonderten Teilprojekt des Verbundprojektes bearbeitet. In dieser Arbeit wurde nicht auf die direkte Ertragswirksamkeit der verschiedenen Krankheitserreger eingegangen, da das einen anderen Versuchsaufbau erfordert hätte.

Zur Bereitstellung von Biomasse für Biogasanlagen werden Roggen (Grünroggen) und Mais teilweise im Zweitfruchtanbau kultiviert. Beide Kulturen gelten als Wirte für die Gattung *Fusarium*. Über die Auswirkungen des Anbaus von Roggen und Mais in enger Folge in Bezug auf die Belastung mit *Fusarium spp.* und deren Mykotoxinen ist bislang wenig bekannt. Ein Gewächshausversuch mit zwei Roggensorten diente zur Ermittlung der potenziellen Anfälligkeit von Grünroggen gegenüber toxischen *Fusarium*spezies. Die wurde abgeglichen mit einer Untersuchung von Halmbasen des Grünroggens auf *Fusarium*besatz und einer Analyse der Ganzpflanzenkontamination mit DON im Grünroggen und Mais aus dem Feldversuch. Durch Mini-Batch-Versuche, die den Fermentationsprozess in Biogasanlagen widerspiegeln, wurden die Auswirkungen von toxinverseuchtem Gärsubstrat auf die Biogasproduktion getestet.

Die hier vorgestellten Untersuchungen sollen einen Beitrag zur Bewertung von fruchtfolgebedingten Krankheitserregern an Winterweizen in unterschiedlichen Anbaufolgen von Energiefrüchten leisten und damit die Potenziale zur Verminderung von Pflanzenkrankheiten in aufgelockerten Fruchtfolgen aufzeigen. Zudem wird auf die Bedeutung der toxischen Erreger aus der Gattung *Fusarium*, ihre qualitätsbeeinträchtigende Wirkung für das Gärsubstrat und die Verteilung des Mykotoxins DON in der Pflanze eingegangen.

2 Material und Methoden

2.1 Chemikalien

2.1.1 Verwendete Chemikalien

Tab. 1: Verwendete Chemikalien	
Absolute Blue qPCR SYBR Green fluorescein Mix	Abgene limited, Epsom, UK
Agar-Agar	Merck, Darmstadt
Ammoniumacetat (NH ₄ Ac)	Merck, Darmstadt
Cetyltrimethylammoniumbromid (Ctab)	Merck, Darmstadt
Chloroform	AppliChem, Darmstadt
dNTP-Mix (10 mM)	Fermentas, St. Leon-Rot
Ethanol (EtOH, 96% bzw. 99,8%)	Carl Roth, Karlsruhe
Ethidiumbromid	AppliChem, Darmstadt
Ethylendiamintetraacetat (EDTA)	AppliChem, Darmstadt
Isoamylalkohol	AppliChem, Darmstadt
Kartoffel-Dextrose-Agar (PDA)	Fluka Analytical, Buchs/Schweiz
Loadingdyesolution	Fermentas, St. Leon-Rot
Magnesiumchlorid (MgCl ₂) 25mM)	Fermentas, St. Leon-Rot
Natriumacetat (NaAc)	AppliChem, Darmstadt
Natriumchlorid (NaCl)	Merck, Darmstadt
Natrium-EDTA	Merck, Darmstadt
Natriumhydroxid (NaOH)	AppliChem, Darmstadt
Natriumlaurylsulfat (SDS)	AppliChem, Darmstadt
N-Lauroylsarcosin-Natriumsalz	AppliChem, Darmstadt
PCR-Puffer (10x)	Fermentas, St. Leon-Rot
Phenol	Carl Roth, Karlsruhe
Polyethylenglykol 6000	AppliChem, Darmstadt
Polyvinylpyrrolidon K30	AppliChem, Darmstadt
Proteinase K	AppliChem, Darmstadt
RNase	AppliChem, Darmstadt
Salzsäure (HCl)	AppliChem, Darmstadt
Silbernitrat (AgNO ₃)	Carl Roth, Karlsruhe
Sorbitol	AppliChem, Darmstadt
β-Mercaptoethanol	Sigma-Aldrich, Seelze
Streptomycinsulfat	Duchefa, Haarlem, NL
Taq-Polymerase (5U/μL)	Fermentas, St. Leon-Rot
TRIS-Borat-EDTA-Puffer (TBE)	AppliChem, Darmstadt
Trishydroxyaminomethan (TRIS)	Merck, Darmstadt
Pflanzenschutzmittel	
CCC: Chlormequat-chlorid	Bayer CropSciences, Mohnheim
Broadway: Pyroxsulam, Florasulam, Cloquintocet-Mexyl	Dow AgroSciences, Indianapolis, USA

Landor: Fludioxonil, Difenconazol, Tebuconazol	Syngenta Agro GmbH, Basel, Schweiz
Moddus: Trinexapac-ethyl	Syngenta Agro GmbH, Basel, Schweiz
Input: Spiroxamin, Prothioconazol	Bayer CropSciences, Mohnheim
Bravo: Chlorthalonil	Syngenta Agro GmbH, Basel, Schweiz
Champion: Boscalid, Epoxiconazol	BASF SE, Ludwigshafen
Diamant: Epoxiconazol, Fenpropimorph	BASF SE, Ludwigshafen
Ariane C: Fluroxypyr, Clopyralid, Florasulam	Dow AgroSciences, Indianapolis, USA
Atlantis: Iodsulfuron-methyl-natrium, Mefenpyr-diethyl, Mesosulfuron-methyl	Bayer CropSciences, Mohnheim
Bravo: Chlorthalonil	Syngenta Agro GmbH, Basel, Schweiz
Primus: Florasulam	Dow AgroSciences, Indianapolis, USA
Starane: Fluroxypyr, Florasulam	Dow AgroSciences, Indianapolis, USA

2.1.2 Nährmedien, Puffer und Trenngele

Die unten aufgelisteten Nährmedien wurden bei 121°C für 15 min autoklaviert und anschließend im Wasserbad auf eine Temperatur von 55-60°C herunter gekühlt. Bei Bedarf wurde vor dem Autoklavieren der pH-Wert mit Natronlauge (NaOH, 5M) bzw. Salzsäure (HCL, 7,5M) eingestellt. Für die Isolation von Fusariumarten aus Pflanzenmaterial wurde dem PDA-Medium nach dem Autoklavieren ab einer Temperatur von 55°C ein Antibiotikum zugesetzt. Alle Puffer wurden mit Aqua bidest. angesetzt.

Für die Isolation und Identifizierung von Fusariumspezies wurden folgende Medien verwendet:

Kartoffel Dextrose Agar (PDA)

PDA-Fertigmedium	39 g
Streptomycinsulfat	200 mg
Aqua bidest.	Ad 1000 mL

Strohextrakt Agar 2%-ig (SEA), pH: 5,5

Unbehandeltes Weizenstroh (2 mm)	20 g
Agar-Agar	15 g
Aqua bidest.	Ad 1000 mL

Strohextrakt Agar 0,2%-ig (1/10 SEA), pH: 5,5

Unbehandeltes Weizenstroh (2 mm)	2 g
Agar-Agar	15 g
Aqua bidest.	Ad 1000 mL

Für die molekularen Untersuchungen wurden nachfolgende Puffer und Lösungen verwendet:

Ctab-Puffer, pH: 8,0

Na-EDTA	7,4 g
Sorbitol	23 g
N-Lauroylsarcosin-Natriumsalz	10 g
Ctab	8 g
NaCl	47 g
Polyvinylpyrrolidon	10 g
Tris (1 M)	10 mL
Aqua bidest.	Ad 1000 mL

Polyethylenglycol 6000 (PEG, 30%) 300mg/mL Aqua bidest.

Proteinase K 20 mg/mL Aqua bidest.

RNAse 10 mg/mL in 10 mM Tris, 15 mM NaCl
lösen

Natriumchlorid (5 M)

Natriumchlorid	29,22 g
Aqua bidest.	Ad 100 mL

TBE-Puffer (10 x)

TBE-Puffer (10)x	100 mL
Aqua bidest.	Ad 1900 mL

TE-Puffer, pH: 8

TRIS	0,1 M
EDTA	10 mM

Zur Visualisierung der Nukleinsäure-Extrakte und PCR-Produkte unter UV-Licht wurden Trenngel verwendet. Die Dokumentation wie auch die Quantifizierung der Nukleinsäuremengen fanden mit Hilfe einer Kamera und der Geldokumentationssoftware Multi-Analyst (Gel Doc System BioRad, München) statt.

Agarose-Trenngel (1%, exemplarisch)

Agarose	1 g
TBE-Puffer (0,5 x)	100 mL
Ethidiumbromid	3 µL

Zur Sterilisation des verwendeten Saatguts im Klimakammerversuch wurde eine 1%-ige Silbernitratlösung verwendet.

<u>Silbernitrat (1%-ig)</u>	1,7 mg/mL Aqua bidest.
-----------------------------	------------------------

2.2 Pflanzenmaterial

Die in den Feld- und Gewächshausversuchen verwendeten Getreidearten bzw. -sorten sind in Tabelle 2 aufgeführt.

Tab. 2: Verwendete Getreidearten bzw. -sorten in Feld- und Gewächshausversuchen, die Anfälligkeit gegenüber Ährenfusarium und die Neigung zu Lager ist der Beschreibenden Sortenliste 2008 entnommen (Anonymus 11 2008).

Sorte	Getreide art	Typ	Anfälligkeit für Ährenfusarium	Neigung zu Lager	Versuchsart	Züchter
Askari	Roggen	Winter-roggen (H)	-	4	GWH	Hybro Saatzucht GmbH Co. KG
Borfuro	Roggen	Grünroggen (P)	-	4	GWH	Saatzucht Steinach GmbH
Skalmeje	Weizen	Winter-weizen	3	3	Feld	KWS-LochowGmbH

H: Hybridsorte, P: Populationssorte, - : keine Angabe, GWH: Gewächshaus

Die Sterilisation des Roggensaatguts erfolgte mittels Heißwasserbeizung. Dafür wurde das Saatgut in sterilem Wasser unter Rühren bei 51°C für 20 min in Bechergläsern (1 L) im Wasserbad (GFL, Fa. Schütt, Göttingen) inkubiert und nachfolgend gründlich mit sterilem Leitungswasser gewaschen. Anschließend wurde das Saatgut bei 30°C im Trockenschrank für 24h zurückgetrocknet. Zur Vernalisation der Keimlinge wurde das Saatgut für ca. 40 Tage auf zweifach autoklaviertem, feuchten Sand bei 2°C in Glaspetrischalen im Dunkeln inkubiert (Abb. 5). Nach dieser Zeit wurden die Keimlinge für drei Tage bei 5°C und abschließend, vor dem Auspflanzen, für zwei Tage bei Raumtemperatur aufbewahrt.



Abb. 5: Auskeimende Roggenkörner auf zweifach autoklavierten, feuchten Sand in Glaspetrischalen nach ca. 14 d Inkubation im Dunkeln bei ca. 2°C.

2.3 Pilzisolat

Die verwendeten Pilzisolat der Arten *Fusarium culmorum* und *Fusarium graminearum* für die Gewächshaus- und Klimakammerversuche Fc 34, Fc 35 und Fc 36 bzw. Fg 142, Fg 143 und Fg 144 sind der Stammsammlung der Abteilung Allgemeine Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz, Georg-August-Universität Göttingen entnommen. Sie wurden 1994 von Weizenähren in Bayern isoliert. Sie sind pathogen an Weizen und produzieren das Mykotoxin Deoxynivalenol. Die Lagerung erfolgte auf nährstoffarmem SEA-Medium (2%) bei 5°C im Kühlraum.

2.4 Herstellung von Strohinokulum

Zur Gewinnung von Inokulationsmaterial wurden die Pilzisolat der Arten *F. graminearum* und *F. culmorum* auf SEA bei Raumtemperatur angezogen.

Für die Herstellung des Inokulums wurde vermahlene unbehandeltes Weizenstroh (4 mm Sieblochplatte, Getreidemühle, Fa. Retsch, Haan) mit den jeweiligen Erregern *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* infiziert. Die Sterilisation des Strohs erfolgte durch Befeuchten und zweimaliges Autoklavieren im Abstand von 24 Stunden für 15 min bei 121°C. Das autoklavierte Stroh wurde unter sterilen Bedingungen mit einem Gemisch von pilzdurchwachsenen Agarstückchen aus den drei Isolaten des jeweiligen Erregers in einem 1L Becherglas geschichtet und mit Parafilm® (Pechiney PlasticPackaging, Menasha, USA) verschlossen. Die Anzucht des Strohinokulums erfolgte bei 22°C für vier Wochen.

2.5 Inokulationsmethode für Gewächshausversuche

Für jede Variante der Strohinokulation (*F. culmorum* bzw. *F. graminearum*) wurden 10 kg Pflanzerde-Sand-Gemisch (3 Teil Sand, 12 Teile Blumenerde, 4 Teile gedämpfter Kompost) mit jeweils 72 g des infizierten Strohs (bewachsen mit *F. culmorum* bzw. *F. graminearum*) vermischt. Die Göttinger Pflanztöpfe wurden zu zwei Dritteln mit unverändertem Pflanzerde-Sandgemisch befüllt und zu einem Drittel mit infizierter Erde (Abb. 6). In dieser Inokulumschicht fand die Vereinzlung der vernalisierten Keimlinge statt. Als Kontrolle diente eine Variante mit unbehandeltem, zweifach autoklaviertem Stroh.



Abb. 6: Stroh-Boden Inokulum für die Gewächshausversuche. Zweifach autoklaviertes Weizenstroh wurde mit den Erregern *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* infiziert und für 4 Wochen bei 22°C inkubiert. Danach wurde das infizierte Stroh mit dem Bodensubstrat (3 Teil Sand, 12 Teile Blumenerde, 4 Teile gedämpfter Kompost) vermischt (72 g infiziertes Stroh auf 10 kg Bodensubstrat)

2.6 Erfassung der Befallsparameter im Feldversuch

Es erfolgte eine Sichtbonitur des Weizens auf Halmbasis- und Wurzelerkrankungen im Stadium der späten Milchreife (ES 75-79). Daran schloss sich unmittelbar die Sichtbonitur des Halm- und Wurzelbereichs an. Diese wurde in Anlehnung an die EPPO-Richtlinien (Broschewitz 1999) durchgeführt. Für den Befall mit Halmbruch (*Oculimacula yallundae/acuformis*, Scharfer Augenfleck (*Rhizoctonia cerealis*) und Halmbasisfusarium (*Fusarium spp.*) wurde der Grad der Verbräunung des Halmes bis zum zweiten Halmknoten geschätzt und eine visuelle Differenzierung anhand der Symptomausprägung vorgenommen. Die Einordnung der Befallsstärke erfolgte in Befallsklassen von 0 bis 3 (Tab. 3).

Tab. 3: Boniturschema in Befallsklassen für die Halmbasiskrankheitserreger *Fusarium spp.*, *R. cerealis* und *O. yallundae/acuformis*.

Befallsklasse	Befallsstärke
0	kein Befall
1	Halmumfang < 50 % verbräunt
2	Halmumfang \geq 50 % verbräunt, (Halm noch fest)
3	Halmumfang > 50 % verbräunt, (Halm vermorscht)

Nach Klassifizierung der Halme in die einzelnen Befallsklassen wurde der Befallswert ermittelt:

$$\text{Befallswert ES 77 Halmbasiserreger} = \frac{((0,25 * S1) + (0,5 * S2) + S3)}{N} * 100$$

- S1: Anzahl Halme in Befallsstufe 1
- S2: Anzahl Halme in Befallsstufe 2
- S3: Anzahl Halme in Befallsstufe 3
- N: Gesamtzahl der untersuchten Halme

Die Bonitur des Befalls mit *Gaeumannomyces graminis* wurde anhand der Wurzelschwärzung vorgenommen. Hierzu wurde der Anteil verschwärzter Wurzeln am Gesamtwurzelwerk jeder Pflanze bonitiert (Tab. 4).

Tab. 4: Boniturschema in Befallsklassen für die Wurzelschwärzung (%) durch den Erreger <i>G. graminis</i>	
Befallsklasse	% Wurzelschwärzung
0	Kein Befall
1	1-10
2	11-30
3	31-60
4	61-100

Der Befallswert für das Wurzelpathogen wurde mit nachfolgender Formel berechnet:

$$\text{Befallswert ES 77 Wurzelpathogen} = \frac{(X1 * 0 + X2 * 10 + X3 * 30 + X4 * 60 + X5 * 100)}{(X1 + X2 + X3 + X4 + X5)}$$

X1: Anzahl Wurzeln in Befallsklasse 1

X2: Anzahl Wurzeln in Befallsklasse 2

X3: Anzahl Wurzeln in Befallsklasse 3

X4: Anzahl Wurzeln in Befallsklasse 4

Abbildung 7 zeigt die typischen Symptome einer Halmbasisinfektion durch *Fusarium spp.* zur späten Milchreife (ES 77). Die angegebenen Nummern bezeichnen die Befallsstärke der Halmbasisinfektion am Stängelgrund im Bereich des ersten Internodiums.



Abb. 7: Streifige bis fleckige Symptome einer basalen Infektion durch *Fusarium spp.* an den Halmbasen von Weizen im Stadium der späten Milchreife (ES 77) auf einer Skala von 0 bis 3. Der Halmgrund wurde für die Bonitur von allen äußeren Blattscheiden befreit.

0 = keine Symptome; **1** = 1-50% des Halmumfangs tragen Symptome; **2** = 51-100% des Halmumfangs tragen Symptome; **3** = 51-100% des Halmumfangs tragen Symptome, zusätzlich liegt eine Halmvermorschung vor.

Für die Bewertung der Befallsstärke erhielten die Pflanzen Noten von 0-3. Abbildung 7 zeigt von links nach rechts Pflanzen der Boniturstufen 0-3. Lagen keine Symptome vor, so wurde der Stängel mit 0 bewertet, lag eine Verbräunung im Bereich von 1-50% des Halmumfangs vor, so erhielt die Pflanze die Note 1. Konnten Symptome in einem Umfang vom mehr als 50% festgestellt werden, erhielt der Halm die Note 2. Bei einer vollständigen Vermorschung wurde der Halm mit der Note 3 bewertet.

Zusätzlich wurden die Ährchen der Weizenähren im Milchreifestadium visuell auf Symptome einer Ähreninfektion durch *Fusarium spp.* hin untersucht. Anzeichen hierfür sind ausgebleichene Ährchen bzw. Nekrosen auf den Hüllspelzen.

2.7 Bioanalysen der Proben aus Feld- und Gewächshausversuchen

2.7.1 Probenahme und Probenaufbereitung der Feldproben

Zur visuellen Bestimmung der Halmbasis- und Wurzelerkrankungen an Weizen wurden je Behandlungsstufe 25 Pflanzen mit bis zu acht Nebentrieben in vierfacher Wiederholung zufällig entnommen. Aus diesem Probenumfang wurden pro Parzelle 100 Halme zufällig ausgewählt und bonitiert. Die Entnahme erfolgte in einem Beprobungsstreifen rechts und links des Kerndruschstreifens. Nach dem Einkürzen des Halmes oberhalb des zweiten Halmknotens wurden zunächst die Blattscheiden vom unteren Halmbereich entfernt. Anschließend wurden die Proben gründlich in Wasser gereinigt. Danach wurden die Proben trocken und kühl bis zur Bonitur gelagert.

Die Bestimmung des Mykotoxingehalts in Korn- und Stoppelproben von Weizen erfolgte an beiden Standorten in den Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0. Zur Gewinnung der Kornproben wurde ein Kerndrusch der Versuchspartzen mit einem Mähdrescher durchgeführt (Farmliner, Fa. Deutz-Fahr, Köln). Das Erntegut wurde in Leinensäcken (40 x 50 cm) aufgefangen. Für die Mykotoxinanalysen wurde eine Rückstellprobe von ca. 500 g zurückbehalten. Nach der Ernte erfolgte eine Beprobung der Stoppel. Es wurden je Parzelle ca. 25 Pflanzen mit vier bis fünf Seitentrieben gezogen und die Wurzel am Stängelgrund abgeschnitten. Anschließend erfolgte die Analyse auf den Gehalt an Deoxynivalenol (DON). Dazu wurden die Kornproben gereinigt (Probenreiniger SLN 3, Fa. Zuther, Karwitz), gemahlen (Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200, Fa. Retsch, Haan; 1mm Sieb) und mit einem quantitativen Enzymimmunoassay (Ridascreen® DON Elisa-Kit, Fa. Biopharm, Darmstadt) der Gehalt an Deoxynivalenol (DON) ermittelt. Für die Bestimmung des DON-Gehaltes in Halmbasisproben wurde das gleiche Verfahren verwendet. Die Proben wurden zuvor trocken gereinigt, von den äußeren Blattscheiden befreit und vermahlen.

Für die Bestimmung der DON-Belastung von Grünroggen zum Entwicklungsstadium des beginnenden Ährenschiebens (ES 51) wurde aus dem gehäckselten Erntegut jeder Versuchspartzen eine Mischprobe entnommen. Zur Bestimmung des DON-Gehalts in

Ganzpflanzenproben von Mais (zur Siloreife) wurden je Fruchtfolgestreifen zwei Mischproben des gehäckselten Ernteguts entnommen. Die Ernte des Biomasseaufwuchses wurde per Handerte in den einzelnen Parzellen durchgeführt. Hierzu wurden je Parzelle viermal 1 m einer Drillreihe Pflanzenaufwuchs an der Halmbasis mit einer Gartenschere abgeschnitten und zu einer Mischprobe zusammengeführt (Abb. 8). Das Material wurde in einem Gartenhäcksler (Kompostmeister KM 2100, Fa. Cramer Technik GmbH, Leer) bzw. einem Laborhäcksler (Fa. Wintersteiger AG, Ried im Innkreis, Österreich) zerkleinert. Es erfolgte eine Trocknung des Materials bei 55°C bis zur Massekonstanz. Danach wurde das trockene Häckselgut vermahlen (Ultra-Zentrifugalmühle ZM 200, Fa. Retsch, Haan; 1 mm Sieb). Die Toxin-Analysen in Grünroggen und Mais wurden nur für den Standort Göttingen vorgenommen.



Abb. 8: Handerte des Biomasseaufwuchses von Grünroggen, Sorte Borfuro, zum Zeitpunkt des beginnenden Ährenschiebens (ES 51). Es wurden je Parzelle viermal 1 m Drillreihe mit einer Gartenschere ca. 5 cm oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten.

Die Bestimmung des Erregerspektrums von *Fusarium spp.* am Stängelgrund von Grünroggen erfolgte durch das Auslegen von Halmbasisabschnitten auf Nährmedien. Hierzu wurden je Parzelle 20 Pflanzen mit ca. vier bis fünf Nebentrieben zufällig mit der Wurzel gezogen. Mittels Wasserstrahl wurden die Halme von anhaftendem Schmutz und den äußeren Blattscheiden befreit. Die Wurzel wurde am Halmgrund abgetrennt und die Halme auf ca. 15 cm Länge gekürzt. Jeweils zehn kräftige Halme wurden ausgewählt und

in einem Vibrationsschüttler unter fließendem Wasser für 1 Stunde gereinigt. Bis zum Auslegen der Halmbasisabschnitte auf Nährmedium wurden die Proben in sterilen Petrischalen kühl gelagert.

2.7.2 Probenahme und Probenaufbereitung der Proben aus Gewächshausversuchen

Zur Testung der Anfälligkeit der Grünroggensorten Askari und Borfuro in Gewächshausversuchen wurde der Ganzpflanzenaufwuchs zum ES 73 (beginnende Milchreife) geerntet. Dabei bildete immer der Pflanzenaufwuchs aus vier zufällig ausgewählten Töpfen derselben Variante eine Probe. Die Pflanzen wurden oberhalb der Bodenoberfläche abgeschnitten. Vom gesamten Aufwuchs wurde das Frischmassegewicht bestimmt. Anschließend wurden Halmbasisabschnitte 4 cm vom Stängelgrund aufwärts abgeschnitten und in flüssigen Stickstoff für die nachfolgende Quantifizierung der pilzlichen DNA in Zentrifugenröhren (50 mL, Fa. Sarstedt, Nümbrecht) tiefgefroren. Die Halmbasisabschnitte wurden nach dem Gefriertrocknen (Gefriertrocknung Alpha, Christ, Osterode) in einer Ultrazentrifugalmühle (1 mm Sieblochgröße, Fa. Retsch, Haan) vermahlen. Der restliche Pflanzenaufwuchs wurde in wiederverschließbaren Plastikbeuteln (250 mm x 350 mm) gefriergetrocknet und anschließend mit einer Schneidmühle (4 mm Sieblochgröße, Fa. Retsch, Haan) zerkleinert. Bis zur anschließenden DNA-Extraktion, qPCR-Untersuchung und DON-Analyse wurde das Mahlgut kühl und trocken gelagert.

Zur Bestimmung der Unterschiede der gebildeten Gesamtbiomasse zwischen den Sorten bzw. den Behandlungsvarianten wurde die vollständige pflanzliche Biomasse je gepoolter Probe nach der Ernte auf einer transportierbaren Laborwaage (Fa. Sartorius, Göttingen) ermittelt.

2.7.3 Mykotoxinnachweis mittels ELISA (Enzyme-linked Immunosorbent Assay)

Der Nachweis der Mykotoxinkontaminationen im Ganzpflanzenaufwuchs des Roggens aus den Gewächshaus- und Feldversuchen sowie in den Stoppel- und Kornproben aus dem Energiefruchtfolgenversuch erfolgte durch den RIDASCREEN® DON ELISA Kit (Fa. r-Biopharm, Darmstadt). Der hier verwandte Enzymimmunoassay zur quantitativen Bestimmung von Deoxynivalenol (DON) berücksichtigt auch dessen toxische Vorstufen 3-

Acetyldeoxynivalenol und zum Teil 15-Acetyldeoxynivalenol. Daher können die ermittelten Werte um bis zu 20% höher sein als die eigentliche DON-Kontamination der Probe. Das Testverfahren wurde bis auf die Extraktionszeit, die Einwaagen und die Anzahl der DON-Standards gemäß der Anleitung durchgeführt: Die angegebene Extraktionszeit erweiterte sich von 3 min auf 1 Stunde. Die Einwaagen richteten sich nach der zur Verfügung stehenden Probemenge. Für die Mehl- und Stoppelp Proben aus Weizen wurden 5 g eingewogen. Für die Messung des DONs in Ganzpflanzenmaterial von Roggen wurden 2,5 g eingewogen. Die Proben wurden 1:5 (w/v) mit Aqua bidest. aufgeschwemmt. Die vier verwendeten mitgelieferten DON-Standards wurden durch Verdünnungen der Standardlösungen um weitere vier erweitert: 1,23; 22,2; 50 und 75 ppb DON in Aqua bidest. Die Extinktionsmessung fand im Photometer für Mikrotiterplatten (SLT.Spectra, Fa. Tecan, Crailsheim) bei 405 nm (Referenz 592 nm) statt. Aus den acht separaten Standardverdünnungen wurde eine Standardkurve vierter Ordnung extrapoliert, mit der über die Software SLT (Fa. Tecan, Crailsheim) die Mykotoxingehalte der Proben ermittelt wurden.

2.7.4 Mini-Fermenterversuch

In Zusammenarbeit mit dem Lehrstuhl für Abfall- und Stromwirtschaft der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock wurde im „Rostocker Aktivitätstest“ untersucht, ob mit DON belasteter Grünroggen eine Inhibierung des Gärprozesses verursacht und zu niedrigeren Gasausbeuten führt. Das Testverfahren simuliert den Gärprozess im experimentellen Maßstab mit 500 mL Nennvolumen der Gärgefäße (Gas Production System, Fa. Ankom Technology, New York, USA), die Versuche verliefen unter standardisierten Bedingungen. Als Vergleichsprobe wurde ein synthetisches Komplexsubstrat eingesetzt, welches der Gärleistung einer Maissilage entspricht. Zur Untersuchung der Gärleistung von mit DON kontaminiertem Roggen wurden zwei Mischproben von Grünroggen aus dem Gewächshausversuch nach künstlicher Infektion durch *Fusarium spp.* eingesetzt. Die Bestimmung des DON-Gehalts erfolgte mittels ELISA-Verfahren, wie sie für die Grünroggenproben des Gewächshausversuchs beschrieben wurde (s.o.). Die Messungen ergaben für die kontaminierten Proben einen DON-Wert von > 6000 µg/kg TM und für die Kontrollproben einen Gehalt unterhalb der Nachweisgrenze von 18 µg/kg TM. Die beiden Proben wurden in zwei unterschiedlichen Anfangskonzentrationen untersucht. Eine hohe Konzentration von 0,41

g organische Trockensubstanz (oTS) und eine niedrige von 0,17 g oTS/g oTS Impfschlamm. Der Impfschlamm, der die Gärbakterien enthielt, stammte aus einer Kläranlage und diente als Inokulum für die Mini-Fermenter. In den gleichen Konzentrationen wurden zwei nicht kontaminierte Kontrollproben in dreifacher Wiederholung in diesem Verfahren gemessen. Die Erfassung des Gasertrags fand alle 30 min statt. Die Versuchslaufzeit betrug sieben Tage. Es wurde der kumulierte Gasertrag je Messpunkt dargestellt, so dass am Ende der Messung eine kumulierte Gasbildungskurve über die Zeit für die verschiedenen Substrate darstellbar war. So lassen sich durch den Vergleich der Gaserträge Unterschiede in der Gasbildung der verschiedenen Substrate ermitteln. Für die Gasbildung des synthetischen Komplexsubstrats wird zusätzlich über die Inhaltsstoffe der theoretische Gasertrag nach der Methode von Buswell (1936)¹ ermittelt. Weicht der theoretische zu stark vom tatsächlich gemessenen Gasertrag ab, so lässt das auf Prozessinhibitoren durch die geprüften Substrate schließen (Engler 2011).

2.7.5 DNA-Extraktion

Zum qualitativen (PCR) und quantitativen Nachweis (qPCR) von *Fusarium spp.* in den Feld- und Gewächshausversuchen wurden klassische DNA-Extraktionsmethoden verwendet.

Die Extraktion pflanzlicher Gesamt-DNA aus Proben der Gewächshausversuche sowie die Extraktion pilzlicher DNA aus Pilzmyzel erfolgte durch das DNAeasy Plant Mini Kit der Fa. Qiagen, Hilden, gemäß der Anleitung. Zur Extraktion der Gesamt-DNA aus Pflanzenmaterial wurden ca. 50 mg gefriergetrocknetes, feinvermahlendes Material verwendet. Die Gewinnung pilzlicher DNA aus Reinkulturen für die Herstellung von Standards für die qPCR erfolgte aus frischem Myzel. Hierzu wurden die entsprechenden Pilze auf Cellophan-Folie, die auf Petrischalen mit PDA-Medium ausgelegt wurde, angezogen. Durch herkömmliche Objektträger wurde das Myzel für die nachfolgende Kaltzersprödung in flüssigem Stickstoff von der Cellophan-Folie abgetrennt.

Zur Extraktion von Gesamt-DNA aus der Weizenstoppel aus den Feldversuchen wurde das Extraktionsverfahren nach (Brandfass & Karlovsky 2008) auf Ctab-Grundlage verwendet. Die Extraktion erfolgte aus 1 g Strohmehl.

¹ Persönliche Mitteilung von Engler (2011).

2.7.7 Quantitative Polymerase Kettenreaktion (qPCR)

Zur Quantifizierung der pilzlichen DNA in Pflanzenmaterial wurden Standards aus verdünnter pilzlicher DNA der Pilzarten *F. culmorum* und *F. graminearum* hergestellt. Die Dokumentation für die nachfolgende Konzentrationsbestimmung der DNA aus den Pilzen erfolgte densitometrisch über ein herkömmliches Agarosegel (2%) unter UV-Licht mittels Rotfilter (Geldoc 100, Fa. Bio-Rad, Hercules, USA). Der Vergleich der Bandenstärke der pilzlichen DNA nach gelelektrophoretischer Auftrennung zu bekannter Menge an DNA des Bakteriophagen Lambda (MBI, Fa. Fermentas, St. Leon-Rot) erfolgte mit der Software Multi-Analyst (Bio-Rad, Hercules, USA). Da die Quantifizierungen in unterschiedlichen Pflanzenarten und -organen sowie zu unterschiedlichen Wachstumsstadien stattfanden, wurden die Standards mit der jeweiligen Pflanzenmatrix-DNA vermischt. Die Matrix-DNA wurde aus Pflanzen extrahiert, welche in einem im Abstand von jeweils 24h dreifach autoklavierten Boden bzw. in Vermiculit angezogen wurden. Die Standards wurden in TE-Puffer (0,5 x) aufgenommen. Folgende Standardkonzentrationen in Matrix-DNA wurden für die Quantifizierungen verwendet: 500 pg/μL, 50 pg/μL, 5 pg/μL und 0,5 pg/μL und ein Nullstandard (Wasser).

Die Quantifizierung der Pilzbiomasse und die Bestimmung der Erreger *F. culmorum* und *F. graminearum* in den einzelnen Pflanzenarten und -organen erfolgte durch eine quantitative Real Time PCR (qPCR). Für die qPCR wurden die DNA-Extrakte der einzelnen Proben entsprechend ihren Konzentrationen verdünnt, so dass gleiche Mengen in die qPCR eingegeben wurden. Der Nachweis und die Quantifizierung der Erreger *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* erfolgte unter Anwendung der Primer FcOpt18F/FcOpt18rev (Schilling *et al.* 1996) bzw. Fg16NF/Fg16NR (Nicholson *et al.* 1998, Tab. 5).

Tab. 5: Verwendete Primerpaare für die Quantifizierung von *F. culmorum* und *F. graminearum*

Erreger	Bezeichnung	Richtung	Basensequenz	Autor
<i>F. culmorum</i>	FcOpt18F	Forward	GATGCCAGACCAAGACGAAG	(Schilling <i>et al.</i> 1996)
	FcOpt18rev	Reverse	GATGCCAGACGCACTAAGAT	
<i>F. graminearum</i>	Fg16NF	Forward	ACAGATGACAAGATTCAGGCACA	(Nicholson <i>et al.</i> 1998)
	Fg16NR	Reverse	TTCTTTGACATCTGTAAACCCA	

Für die PCR-Reaktion wurde der Premix Absolute Blue qPCR SYBR®greenfluorescein mix (Fa. Thermo Scientific, ABgene, Epsom, UK) verwendet. Dieser beinhaltet alle generellen Reaktionsbestandteile. Für die spezifische Amplifikation wurden die jeweiligen Primer (1

µM) hinzugefügt und der Reaktionsansatz mit sterilem Wasser auf ein Endvolumen von 23 µL aufgefüllt. Je Reaktion wurden 2 µL DNA-Extrakt eingesetzt, so dass das Gesamtvolumen des Reaktionsansatzes 25 µL betrug. Jede Messung fand in zweifacher Wiederholung statt. Für die Amplifikation und die Schmelzkurvenanalyse wurde ein iCycler (Fa. Bio-Rad, Hercules, USA) verwendet. Das verwendete qPCR-Programm für die Amplifikation und die Schmelzkurvenanalyse von *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* ist in Tabelle 6 aufgeführt.

Tab. 6: qPCR-Kontur zur Quantifizierung und Qualifizierung von *Fusarium culmorum*/*F. graminearum*

Abschnitt	Schritt	Phase	Zeit	Temperatur (°C)
Amplifikation	1	Enzymaktivierung	13,30 min	95
	2	Initiale Denaturierung	1,30 min	95
	3	Denaturierung	20 s/30 s	94
	4	Annealing	40 s/45 s	67
	5	Elongation	45 s	72
	6	Finale Elongation	5,00 min	72
Schmelzkurven-analyse	7	Initiale Denaturierung	1,00 min	94/95
	8	Renaturierung	1,00	55
	9	Denaturierung	10s	55-/65-95
		40-/60-fache Wdh.		

Die Filtereinstellung für die Anregung bzw. Emission des Fluoreszenzfarbstoffes SybrGreen lagen bei 490 ± 10 nm und 530 ± 15 nm. Eine Quantifizierung der DNA von *Fusarium spp.* wurde durch Messung der Fluoreszenzsignale durch den Fluoreszenzdetektor des Thermocyclers möglich. Die messbare Fluoreszenz nahm dabei proportional zur Menge an DNA von *Fusarium spp.* in der Probe zu. Durch den Vergleich der CT-Werte (Cycle Threshold) der untersuchten Proben mit den gemessenen CT-Werten bekannter Standards von *Fusarium*-DNA, konnte die pilzliche DNA-Menge in den Proben bestimmt werden. Die Schmelzkurvenanalyse diente dem qualitativen Nachweis des untersuchten Erregers. Diese und die Quantifizierung der DNA-Menge fanden über die Software iCycler (Fa. Bio-Rad, Hercules, USA) statt.

2.8 Isolation und Identifikation von Fusariumspezies an der Halmbasis von Grünroggen

Aus den gereinigten Halmbasisabschnitten wurden vom Halmgrund ausgehend fünf Proben mit einem Skalpell entnommen und auf Nährmedium (PDA) ausgelegt. Die aus den Halmabschnitten auswachsenden Pilze wurden für eine nachfolgende mikroskopische Bestimmung anhand der Sporenmorphologie auf nährstoffarmem Nährmedium (SEA) ausgelegt und für ca. 10 Tage unter UV-Licht inkubiert. Die Identifizierung der Fusariumarten erfolgte anhand des Fusariumkatalogs von (Leslie & Summerell 2006).

2.9 Feldversuch

Die vorgestellten Untersuchungen über die fruchtfolgebedingten Krankheiten an Weizen und Grünroggen in verschiedenen Energiefruchtfolgen fanden im Rahmen eines Verbundprojektes zwischen den Universitäten Rostock und Göttingen statt. An beiden Versuchsstandorten wurde je ein Fruchtfolgeversuch mit identischen Versuchsgliedern betrieben. In Rostock wurde der Versuch 2007 und in Göttingen 2008 angelegt.

2.9.1 Standorte

Göttingen

Der Standort in Göttingen befand sich im Leinetal des oberen Leineberglands zwischen dem westlichen Harzvorland und dem Weserbergland im Übergangsbereich von maritimem und kontinentalem Klima der gemäßigten Breiten auf einer Höhe von 170 m über Normalhöhennull (NHN). Der Winter kann als mäßig kalt und der Sommer als mäßig warm bezeichnet werden. Der Standort ist mit einer mittleren jährlichen Niederschlagssumme von 708 mm ganzjährig regenreich und die mittlere Jahrestemperatur lag in den Jahren 2001 bis 2010 bei 9,5°C (Wetterstation Göttingen 2011). Am Standort Göttingen erfolgte die Anlage des mehrjährigen Fruchtfolgeversuchs auf den Flächen der Versuchswirtschaft Reinshof der Georg-August-Universität Göttingen. Der Standort „Große Breite“ liegt am nordwestlichen Stadtrand von Göttingen zwischen den Ortsteilen Holtensen-Ost und Weende in der Talau des Leinegrabens (Gemarkung Weende, Flur 12). Der vorliegende Bodentyp ist ein Auenboden, der aus jungen

Flusssedimentablagerungen des Holozäns entstanden ist. Oberhalb der im Unterboden befindlichen Wiesenkalkablagerungen herrschten toniger Schluff über schluffigem Lehm über lehmigem Kies vor. Nach Klassifizierung durch die Reichsbodenschätzung bzw. deren Anpassungen handelt es sich in den Versuchsflächenbereichen um einen Lehmboden der Zustandsstufe 2, aus Alluvialböden mit der Bodenzahl 86 und der Ackerzahl 89 (L 2 Al 86/89, Anonymus 9 2005).

Rostock

Der Versuchsstandort in Rostock lag an der Mündung des Flusses Warnow in die Ostsee in der norddeutschen Tiefebene. Der Versuch befand sich auf den Flächen der Versuchstation der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Diese liegt in 15 km Entfernung zur Ostsee auf 45 bis 47 m über NHN im südwestlichen Teil der Stadt Rostock. Das Klima ist aufgrund der geografischen Nähe zur Ostsee maritim beeinflusst. Charakteristisch hierfür sind die ganzjährig hohe relative Luftfeuchte, mit der eine erhöhte Taubildung einhergeht, die milden Winter sowie die niederschlagsreichen Sommer. Die Bodenverhältnisse auf der Versuchstation waren durch Moränensand über tiefem Moränenlehm charakterisiert. Am Standort dominiert die Bodenart lehmiger Sand mit einer Ackerzahl von 45. Im Ap-Horizont (30 cm) betragen die Tongehalte zwischen 6,6 und 8,7%, während die Schluffgehalte zwischen 22 und 27% variieren. Bedingt durch Grund- sowie Stauwasser infolge von Verdichtungen trat in einigen Bereichen zeitweilig eine Vernässung auf. Im Mittel der Jahre von 2005 bis 2010 lag die Jahresdurchschnittstemperatur bei 8,6°C und die Niederschlagsmenge in der Summe bei 697,3 mm. Die Angaben leiteten sich aus Wetterdaten der Rostocker Wetterstation des Steinbeis Transferzentrums (STZ) für Angewandte Landschaftsplanung ab (Steinbeis Transferzentrums (STZ) für Angewandte Landschaftsplanung 2011).

2.9.2 Aufbau des Fruchtfolgeversuchs

Es wurden vier Fruchtfolgen angebaut, für die aus den Komponenten Mais, Raps und Winterweizen agronomisch sinnvolle Folgen mit phytomedizinisch unterschiedlichen Risiken gebildet wurden:

- (1) Maisdaueranbau
- (2) Raps - Winterweizen
- (3) Raps - Grünroggen/Mais - Winterweizen
- (4) Raps - Winterweizen - Grünroggen/Mais - Winterweizen

Bereits durch die Fruchtfolgen ergaben sich in den Versuchen mehrere Kontrastierungsebenen: Mais stand in einer Monokultur, einem dreijährigen und einem vierjährigen Anbau. Außer in der Maismonokultur schloss der Anbau von Grünroggen die Anbaulücke von September bis April. Hier wurden 350 Körner/m² ausgedrillt. Das Saatgut war stets ungebeizt und es wurden keine Pflanzenschutzmaßnahmen durchgeführt.

Raps stand im zwei-, drei- oder vierjährigen Anbau.

Winterweizen wurde zu unterschiedlichen Terminen gesät: nach Raps in den Fruchtfolgen 2 und 4 früh (Mitte September), nach Mais in den Fruchtfolgen 3 und 4 spät (Anfang bis Mitte Oktober). Dabei wurde die Aussaatstärke (Körner/m²) dem Aussaattermin angepasst. In der frühen Variante wurden 300 Körner/m² und in der späten 330 Körner/m² ausgesät (Ackerschlagkartei im Anhang, Tab. 5A und 6A).

Jede Kultur umfasste in jeder Fruchtfolge vier Versuchsglieder:

- | | |
|---------|--|
| (PS) | situationsbezogener Pflanzenschutzmitteleinsatz
(situationsbezogene Referenz) |
| (PS-F0) | wie PS, ohne Fungizide (Fungizid Null) |
| (UK-PS) | Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen, wie in PS |
| (UK-BK) | Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung |

Pflanzenschutzmittel wurden in der Variante PS gezielt nach verfügbaren Schwellenwerten, Entscheidungssystemen oder Bekämpfungsrichtwerten gegen Unkräuter und bodenbürtige Pilzkrankheiten eingesetzt. Um das Unkrautauflaufen beobachten zu können, wurden blattwirksame Herbizide in allen Kulturen bevorzugt. Bei den pilzlichen Schaderregern wurden windbürtige Blattkrankheiten wie Mehltau

(*Blumeria graminis*) und Rostkrankheiten (*Puccinia* spp.) standardmäßig bekämpft. Das gleiche gilt für die Wurzelhals- und Stängelfäule (*Phoma lingam*) im Raps, da für diesen Erreger keine Bekämpfungsrichtwerte vorliegen.

Insekten und Schnecken wurden standardmäßig bekämpft.

In Tabelle 7a/b sind die Fungizidmaßnahmen der vorgestellten Versuchsjahre 2010 (Tab. 7a) und 2011 (Tab. 7b) an den Standorten Göttingen und Rostock für die Kultur Winterweizen aufgeführt. In der Variante PS-F0 wurde kein Fungizid appliziert, um die Auswirkung der jeweiligen Fruchtfolge auf das Krankheitsaufkommen ermitteln und bewerten zu können. Der Pflanzenschutzmitteleinsatz in den Varianten gegen Unkräuter wurde in Abhängigkeit von der Fruchtfolge variiert und wird daher statistisch mit aufgeführt.

Tab. 7a: Pflanzenschutzmaßnahmen in den verschiedenen Versuchsvarianten im Winterweizen am Standort Göttingen in den Jahren 2010 und 2011.

Jahr	Entwicklungsstadium (ES)	Maßnahme	Variante			
			PS	PS-F0	UK-PS	UK-BK
2010	-	Beizung	Landor			
	ES 25	W-regler	CCC	CCC	CCC	CCC
	ES 27	Herbizid	-	-	-	Broadway
	ES 31	W-regler	CCC + Moddus	CCC + Moddus	CCC + Moddus	CCC + Moddus
	ES 31/32	Fungizid	Input + Bravo	-	Input + Bravo	Input + Bravo
	ES 51/55	Fungizid	Champion + Diamant	-	Champion + Diamant	Champion + Diamant
2011	-	Beizung	Landor			
	ES 23/27 WWS/WWF	W-regler	CCC	CCC	CCC	CCC
	ES 27 In WWF	Herbizid	-	-	-	Broadway
	ES 31	W-regler	CCC + Moddus	CCC + Moddus	CCC + Moddus	CCC + Moddus
	ES 31	Fungizid	Input	Input	Input	Input
	ES 59/65 WWS/WWF	Fungizid	Champion + Diamant	-	Champion + Diamant	Champion + Diamant

CCC: Chloromequat-chlorid; **Broadway:** Pyroxulam, Florasulam, Cloquintocet-Mexyl; **Landor:** Fludioxonil, Difenconazol, Tebuconazol; **Moddus:** Trinexapac-ethyl; **Input:** Spiroxamine, Prothioconazol; **Bravo:** Chlorthalonil; **Champion:** Boscalid, Epoxiconazol; **Diamant:** Epoxiconazol, Fenpropimorph

Tab. 7b: Pflanzenschutzmaßnahmen in den verschiedenen Versuchsvarianten im Winterweizen am Standort Rostock in den Jahren 2010 und 2011.

Jahr	Entwicklungs- stadium (ES)	Maßnahme	Variante			
			PS	PS-F0	UK-PS	UK-BK
2010	ES 23 In WWF	Herbizid	Atlantis +	Atlantis +	Atlantis +	Broadway
			Starane	Starane	Starane	
	ES 30 In WWS	Herbizid	Ariane C	Ariane C	Ariane C	Broadway
	ES 31/32	Fungizid	Input	-	Input	Input
ES 51/55	Fungizid	Champion + Diamant	-	Champion + Diamant	Champion + Diamant	
2011	ES 13 In WWF	Herbizid	Primus	Primus	Primus	Primus
	Herbizid	Starane	Starane	Starane	Starane	
		Fungizid	Input	Input	Input	
		Fungizid	Champion + Diamant		Champion + Diamant	Champion + Diamant

Ariane C: Fluroxypyr, Clopyralid, Florasulam; **Atlantis:** Iodsulfuron-methyl-natrium, Mefenpyr-diethyl, Mesosulfuron-methyl; **Bravo:** Chlorthalonil; **Broadway:** Pyroxulam, Florasulam, Cloquintocet-Mexyl; **Champion:** Boscalid, Epoxiconazol; **Diamant:** Epoxiconazol, Fenpropimorph; **Input:** Spiroxamine, Prothioconazol; **Landor:** Fludioxonil, Difenconazol, Tebuconazol; **Primus:** Florasulam; **Starane:** Fluroxypyr, Florasulam

Die Versuchsglieder wurden viermal wiederholt. Der Versuch wurde als modifizierte zweifaktorielle Spaltanlage konzipiert. Der Faktor Pflanzenschutzregime wurde innerhalb eines Blocks als Reihe zweimal wiederholt und in den Spalten streifenförmig als Parzelle randomisiert. Aus agrotechnischen Gründen wurde der Faktor Fruchtfolge nicht vollständig randomisiert, sondern im ersten und zweiten Block hintereinander in Streifen angeordnet (Abb. 9).

Die Parzellengröße lag in Rostock bei 6*6 m bzw. in Göttingen bei 8*7,5 m.

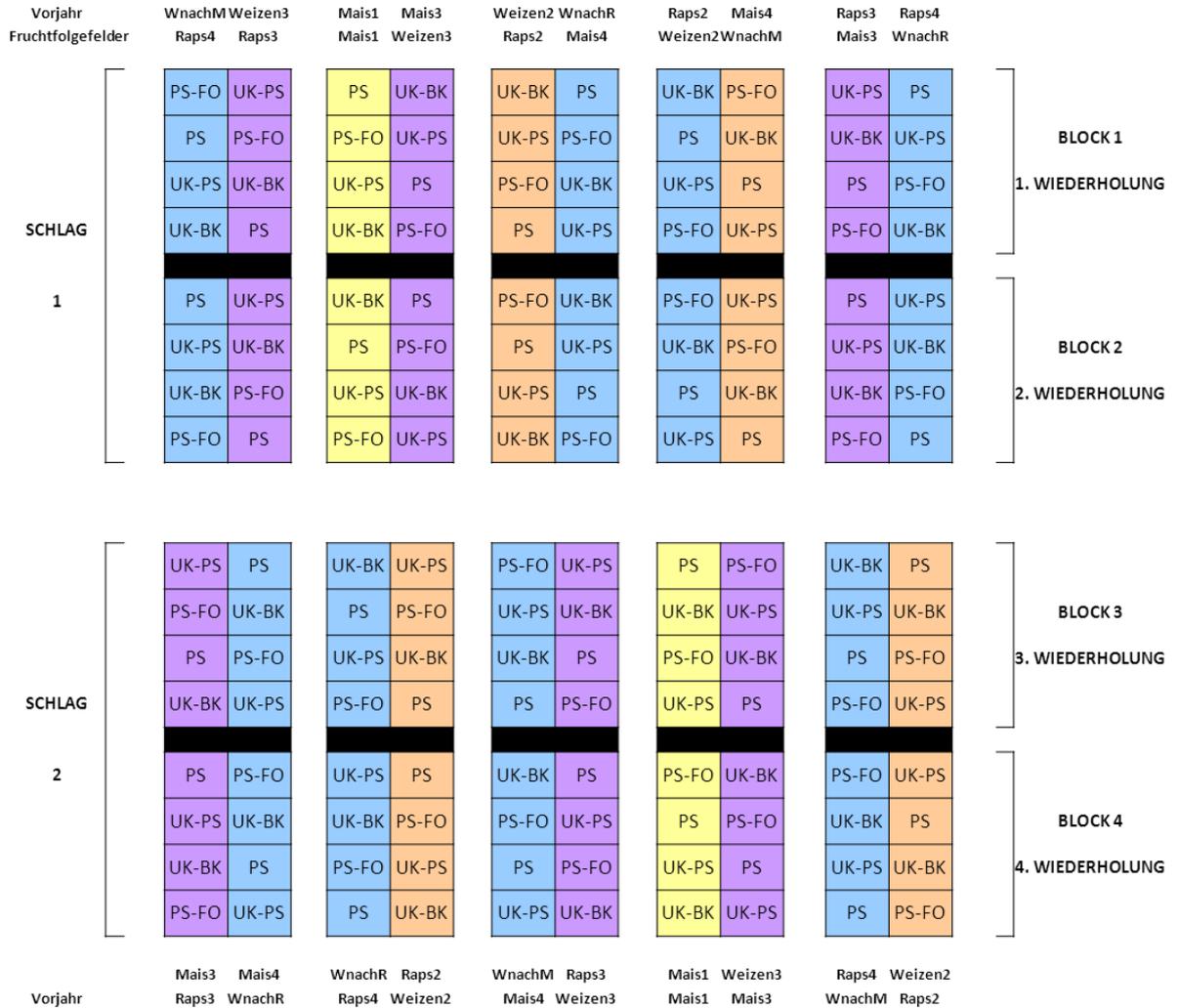


Abb. 9: Schematische Darstellung des Versuchsaufbaus an den Standorten in Rostock und Göttingen. In Rostock lagen Schlag 1 und 2 hintereinander (s.o.) und in Göttingen nebeneinander. Die farbige unterschiedlich gekennzeichneten Streifen bilden die 4 verschiedenen Fruchtfolgen ab. Jedes Fruchtfolgefeld wurde in jedem Jahr angebaut. Die Fruchtfolgestreifen wurden in 4 Blöcke unterteilt. Je Fruchtfolgestreifen und Block wurden 4 Parzellen mit den unterschiedlichen Pflanzenschutzmaßnahmen angelegt, so dass je Fruchtfolge jede Pflanzenschutzvariante in 4-facher Wiederholung vorkam. *FF:* Fruchtfolge; *WW:* Winterweizen; *Zwf:* Zwischenfrucht – hier die Grünroggensorte Borfuro

Alle weiteren pflanzen- und ackerbaulichen Maßnahmen in den Kulturen Winterweizen und Grünroggen wie Art und Menge an Dünger sowie Bodenbearbeitungsmaßnahmen wurden praxisüblich vorgenommen und sind der Ackerschlagkartei des Anhangs zu entnehmen.

Die Versuche wurden beerntet und die Mengenerträge festgestellt. Von Mais und Grünroggen wurde außerdem die Gärausbeute in einer Versuchfermentationsanlage mit Batch-Verfahren untersucht (Engler *et al.* 2009). Diese Daten werden in dieser Untersuchung nicht vorgestellt, da sie im Teilprojekt 4 des Verbundprojekts zur ökonomischen Bewertung der Energiefruchtfolgen eingehend untersucht wurden. Zur Übersicht können die Biomasseerträge von Mais und die Kornerträge von Weizen in Tabelle 22 und 23 im Anhang eingesehen werden.

Abbildung 10 oben zeigt den Feldversuch am Standort in Göttingen kurz vor der Rapsernte im Juli des Jahres 2009 (oben). Das untere Bild der Abbildung 10 zeigt den Feldversuch am Standort in Göttingen im April des darauffolgenden Jahres (2010) kurz vor der Grünroggenernte. Dem Grünroggen folgte der Mais als Zweitfrucht. Die noch unbestellten Streifen (braun) dienten dem Daueranbau von Mais.



Abb. 10: Bilder des Feldversuchs am Standort in Göttingen. Oben: Juli 2009, vor der Rapsenernte. Unten: April 2010, vor der Grünroggenernte.

2.10 Inokulation von Grünroggen an der Halmbasis mit *Fusarium spp.* unter kontrollierten Bedingungen

Die vernalisierten Keimlinge der beiden Roggensorten „Borfuro“ und „Askari“ wurden mittels Strohinokulum entsprechend ihren Versuchsvarianten inokuliert und einzeln in Göttinger Pflanztöpfe (9x9 cm) pikiert (Abb. 11). Pflanzen wurden in einem Gemisch aus Sand, Kompost und Blumenerde (3:4:12) angezogen. Zuvor wurde das Erdegemisch für 24 h bei 80°C gedämpft. Die Anzucht im Gewächshaus erfolgte im Tag-Nacht-Rhythmus von 16 bzw. acht Stunden bei Temperaturen von 20 bzw. 14°C. In diesem Versuch wurden in den inokulierten Varianten je zwei Pflanzen pro Topf, in den Kontrollvarianten je eine Pflanze pro Topf angezogen. Mit beginnender Bestockung wurden die Pflanzen durch

Holzstäbe stabilisiert. Alle Nebentriebe wurden in diesem Versuch erhalten. Dieser zweifaktorielle Versuch (Sorte*Inokulation) mit sechs Prüfgliedern wurde als Blockanlage im Gewächshaus angelegt. Innerhalb dieser Blöcke wurden die Töpfe desselben Prüfglieds in Reihen aufgestellt. Innerhalb jeden Blocks wurden die Reihen vollständig randomisiert (siehe Versuchsplan im Anhang; Abb. 1A). Die Pflanzen wurden während ihrer Entwicklung bedarfsgerecht mit Mehrnährstoffdünger (Hakaphos 15% N, 15% K₂O, 11% P₂O, 1% MgO) gedüngt.



Abb. 11: Vernalisierte Roggenkeimlinge nach dem Auspflanzen in das Stroh-Boden-Inokulum (links) und herangewachsene Roggenpflanzen zur beginnenden Milchreife (ES 73) im Gewächshaus (rechts).

2.11 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Daten erfolgte unter Verwendung der SoftwareR (Version 2.12.0, Copyright (C) 2010 The R Foundation for Statistical Computing) und der Software Statistica (Version 9, Fa. StatSoft, Tulsa). Zur Modellierung der Response-Variablen bei der Auswertung der Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger wurde eine logistische Regression mit Hilfe eines Allgemeinen linearen Modells (GLM) durchgeführt. Als Zielgröße wurde die Befallshäufigkeit des Erregers verrechnet. Da es sich um eine binäre Datenerfassung handelte (befallen oder nicht befallen), wurde die Quasibinomial-Verteilung (family = quasibinomial) angenommen. Die Prüffaktoren Pflanzenschutzregime, Saattermin und Fruchtfolge gingen als unabhängige Variablen in das Modell ein. Zur Bestimmung der Unterschiede innerhalb der Prüffaktoren wurden multiple Mittelwertvergleiche (Tukey-Test, $\alpha = 0,05$) innerhalb des GLMs durchgeführt.

Die statistische Auswertung der Toxin- und DNA-Gehalte erfolgte unter der Annahme der Normalverteilung mit dem Post-Hoc-Verfahren (LSD-Test, $p \leq 0,05$).

3 Ergebnisse

3.1 Fruchtfolgeversuch

3.1.1 Meteorologische Daten

Witterungsdaten der Standorte in Rostock und Göttingen, November 2009 bis August 2010

Die Vegetationsperiode vom Herbst 2009 bis zum Sommer 2010 war durch extreme Witterungsereignisse gekennzeichnet. Nach einem kühlen Herbst mit den ersten Schneefällen im Oktober 2009 folgte ein warmer November (+3,4°C)² mit überdurchschnittlichen Niederschlagsmengen (+26 mm). Ab Mitte Dezember fielen die Temperaturen im Mittel unter 0°C und es folgte ein überdurchschnittlich kalter Januar (-3,3°C) und Februar (-3,1°C) zu Jahresbeginn 2010. Das Frühjahr war gekennzeichnet durch einen kühlen Mai (-2,6°C). Der Vegetationsbeginn lag vergleichsweise spät. Darauf folgte Ende Juni/Anfang Juli (+2,4°C) eine ausgeprägte Hitzeperiode. Von Mitte Juni bis Mitte Juli kam es zu lediglich vier Niederschlagsereignissen, die in der Summe zu 10 mm Niederschlag führten.

Am Standort in Rostock wurde in der Vegetationszeit von November bis Mitte August eine mittlere Tagestemperatur von 8,3°C und eine Niederschlagssumme von 384,8 mm gemessen (Abb. 12). Durch das maritime Klima lag die mittlere Tagestemperatur mit 0,3°C etwas höher als in Göttingen. Hier wurde über den gemessenen Zeitraum eine Durchschnittstemperatur von 8,0°C und eine um 80 mm höhere Niederschlagsmenge von 460,0 mm ermittelt (Abb. 13). Die eingangs beschriebenen Witterungsextrema (feucht-warmer Herbst, zu kalter Jahresanfang mit verzögertem Vegetationsbeginn und ausgeprägte Vorsommertrockenheit) gelten für beide Standorte. Insgesamt war die Witterung gegenüber dem langjährigen Mittel an den beiden Standorten kühler und niederschlagsärmer.

² Die Temperatur- bzw. Niederschlagsangaben in Klammern kennzeichnen die Abweichungen von den langjährigen Durchschnittswerten im Zeitraum 1981-2010. Die Daten wurden der Homepage des Deutschen Wetterdienstes (DWD) entnommen. Deutscher Wetterdienst (2011).

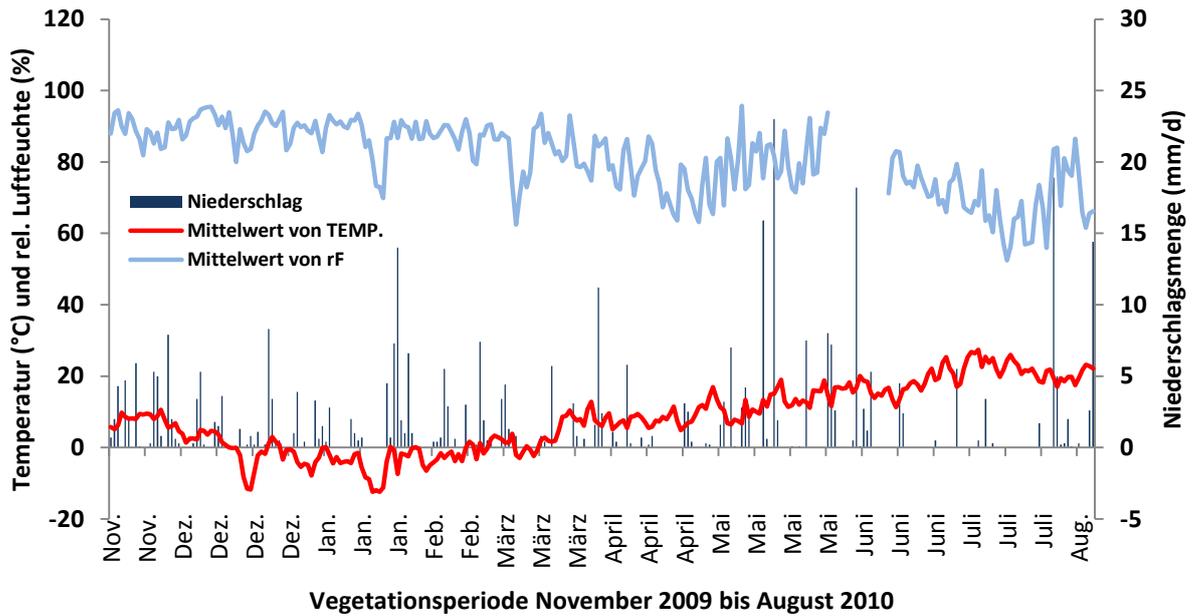


Abb. 12: Tagesmittelwerte der Witterungsparameter Lufttemperatur (°C), relative Luftfeuchte (%) und Niederschlagsmenge (mm) in der Vegetationszeit November 2009 bis August 2010 am Standort in Rostock.

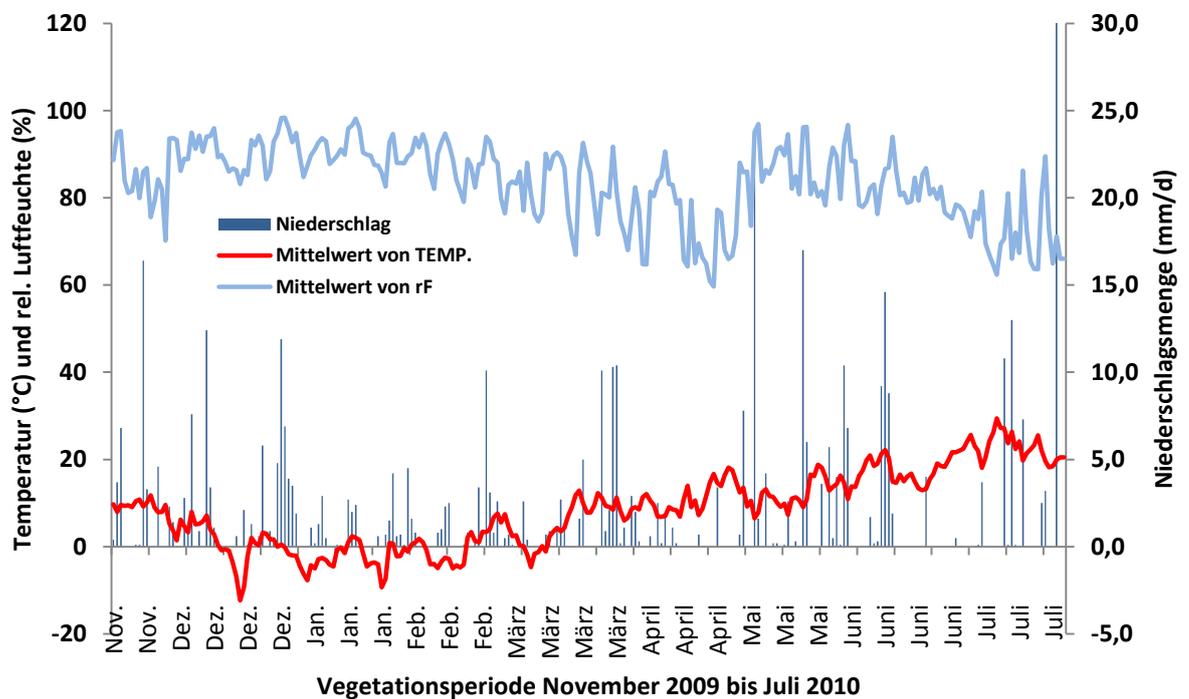


Abb. 13: Tagesmittelwerte der Witterungsparameter Lufttemperatur (°C), relative Luftfeuchte (%) und Niederschlagsmenge (mm) in der Vegetationszeit November 2009 bis Juli 2010 am Standort in Göttingen.

Witterungsdaten der Standorten in Rostock und Göttingen, Oktober 2010 bis August 2011

Die mittlere Temperatur und Niederschlagssumme der Vegetationsperiode 2010/2011 lag im Bereich des Mittels der letzten Jahre. Eine Besonderheit war jedoch die Niederschlagsverteilung. Nach einem sehr nassen November mit ca. 100 mm Niederschlag (+30 mm) folgte Frost im Dezember und ein warmes (+1,7°C) und sehr trockenes Frühjahr (-100 mm). Zu Beginn des Monats Juni setzten nennenswerte Niederschläge ein.

Am Standort in Rostock lag die mittlere Temperatur in den Monaten Oktober bis Juli bei 8,1°C und die Summe der Niederschläge bei 625,8 mm. Die erste Jahreshälfte (Januar bis Mai) kennzeichnete sich durch geringere Niederschläge im Vergleich zum 20-jährigen Mittel³ der Monate Januar bis Mai (-61 mm). Darauf folgten extreme Niederschlagsereignisse in den Monaten Juni (119,1 mm) und Juli (303,6 mm), so dass das langjährige Mittel der Monate Januar bis Juli um 200 mm überschritten wurde. Nachdem die Vegetationsperiode nach einem frost- und schneereichen Winter sehr spät einsetzte, folgte ein sehr warmer April (+3°C; Abb. 14).

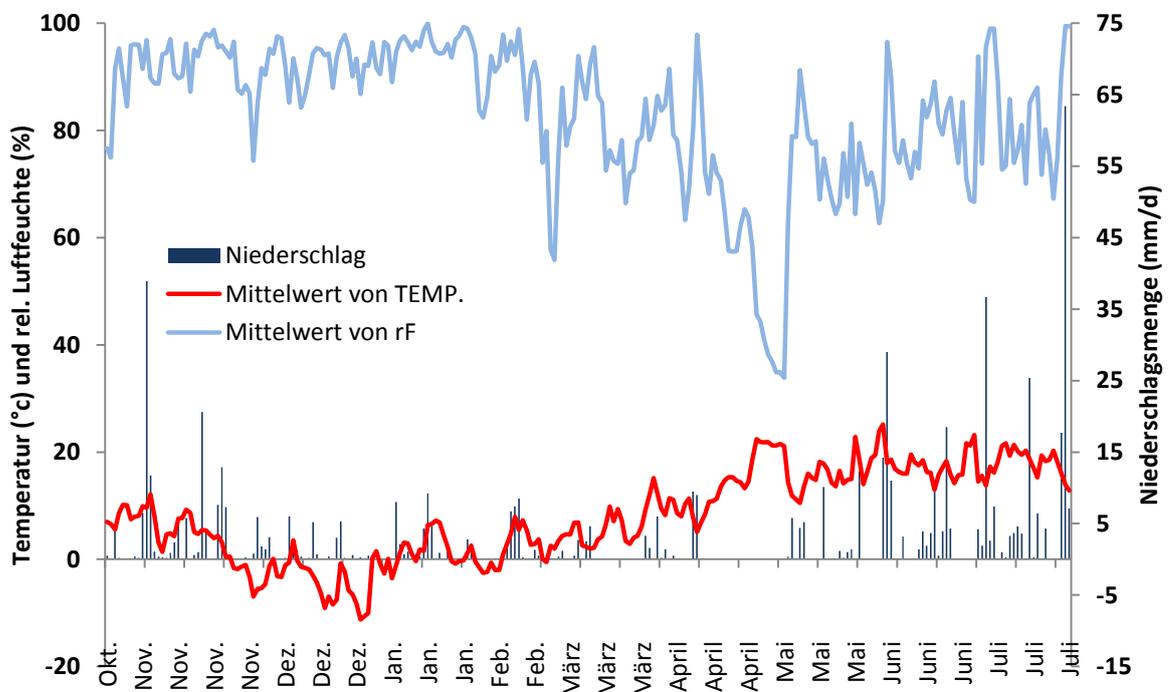


Abb. 14: Tagesmittelwerte der Witterungsparameter Lufttemperatur (°C), relative Luftfeuchte (%) und Niederschlagsmenge (mm) in der Vegetationszeit Oktober 2010 bis Juli 2011 am Standort in Rostock.

³ 20-jähriges Niederschlagsmittel, ermittelt von der Wetterstation auf der Versuchsstation der Universität Rostock von 1981 bis 2000.

Am Standort in Göttingen lag die mittlere Temperatur in den Monaten Oktober bis Juli bei 7,9°C und die Summe der Niederschläge bei 438,6 mm. Die Monate Februar bis Mai waren im Vergleich zum Mittel der vorangegangenen Jahre⁴ deutlich zu trocken (-100 mm) und fielen im März auf ein Minimum von 5,9 mm ab. Zusätzlich zeichneten sich die Monate April (+4°C) und Mai (+1°C) durch zu hohe mittlere Temperaturen aus (Abb. 15).

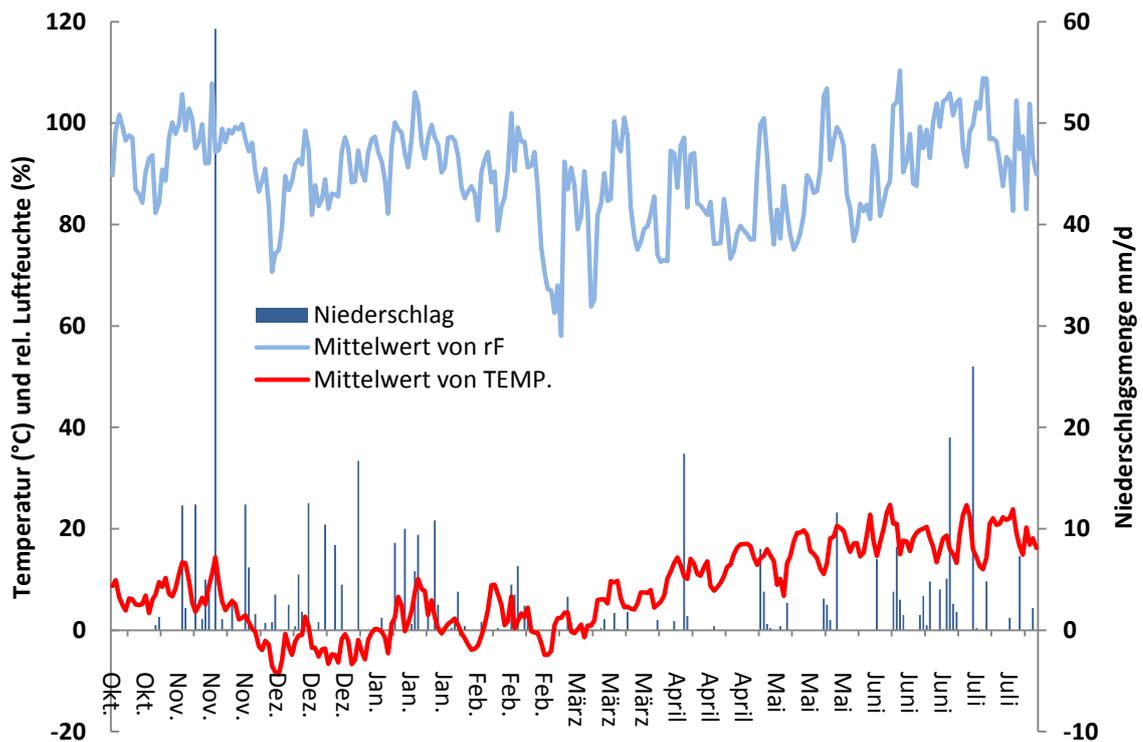


Abb. 15: Tagesmittelwerte der Witterungsparameter Lufttemperatur (°C), relative Luftfeuchte (%) und Niederschlagsmenge (mm) in der Vegetationszeit Oktober 2010 bis Juli 2011 am Standort in Göttingen.

3.1.2 Vorkommen von Halmbasis- und Wurzelerkrankungen an Winterweizen

Im nachfolgenden Kapitel werden die Befallshäufigkeiten und Befallswerte der vier untersuchten Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger Halmbasisfusarium (*Fusarium spp.*), parasitärer Halmbruch (*O. yallundae/acuformis*) und Rhizoctonia (*R. cerealis*) bzw. der Schwarzbeinigkeit (*Gaeumannomyces graminis var. tritici*) aus den Jahren 2010 und 2011 vorgestellt. Hierbei sollen aufgrund der verschiedenen Energiefruchtfolgen und Pflanzenschutzmaßnahmen aufgetretenen Unterschiede der Befallshäufigkeiten an der Pflanzenbasis des Weizens herausgestellt werden. Die

⁴ Langjähriges Mittel der Temperatur- und Niederschlagsdaten für den Standort in Göttingen sind den Aufzeichnungen der Göttinger Wetterstation entnommen (Wetterstation Göttingen 2011).

statistische Analyse der Daten zeigte, dass die gemeinsame Verrechnung der Daten von beiden Versuchsstandorten zu einer schlechten Verteilung der Residuen führte. Daher wurde auf eine statistische Auswertung über beide Versuchsstandorte verzichtet. In den Abbildungen 16 und 17 ist die Residuenverteilung verschiedener statistischer Modelle aufgezeigt. Abbildung 16 zeigt die Residuenverteilung der logistischen Regression, welche den Versuchsstandort als Faktor mit in das Modell einbezieht. Die schwarzen Kreise kennzeichnen hierbei die Residuenverteilung des Standorts Göttingen und die roten die des Versuchsstandorts Rostock. Im Idealfall sollten die Kreise als Wolke gleichmäßig um die Nulllinie verteilt liegen. Stattdessen liegt eine Häufung der Residuen der jeweiligen Standorte vor, wobei die Residuen des Standorts Göttingens stärker oberhalb der Nulllinie und die des Standorts Rostock vermehrt unterhalb der Nulllinie liegen (Abb. 16). Es lässt sich ein linearer Trend je Standort erkennen. Dies bedeutet, dass der Fehlerterm des Modells (die Differenz zwischen den beobachteten und denen vom Modell berechneten Werten) systematisch ist. Mit zunehmenden Werten nimmt daher die Genauigkeit des Modells ab. Die Daten sind nicht homogen verteilt, sie zeigen an den Standorten unterschiedliche Variabilitäten. Eine mögliche Ursache hierfür könnte sein, dass ein wichtiger ortsspezifischer Einflussfaktor wie z.B. die Temperatur oder der Niederschlag im Modell nicht berücksichtigt wurde.

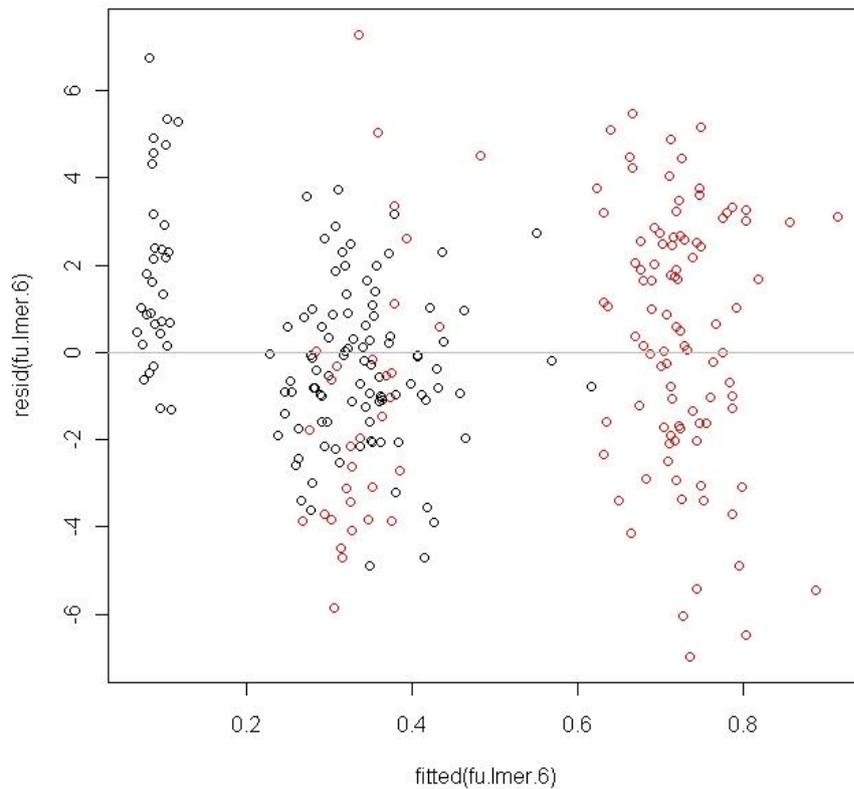


Abb. 16: Angepasste Residuenverteilung des angewandten Modells der logistischen Regression auf die Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* in den Jahren 2010 und 2011 über beide Versuchsstandorte in Göttingen (schwarz) und Rostock (rot).

Führt man die logistische Regression hingegen getrennt nach den Versuchsstandorten durch, so zeigt sich eine gute Verteilung der Residuen um die Nulllinie (Abb. 17). Daher wurden für die weiteren Analysen, auch für die Befallshäufigkeiten des Halmbrucherregers, die Standorte separat ausgewertet.

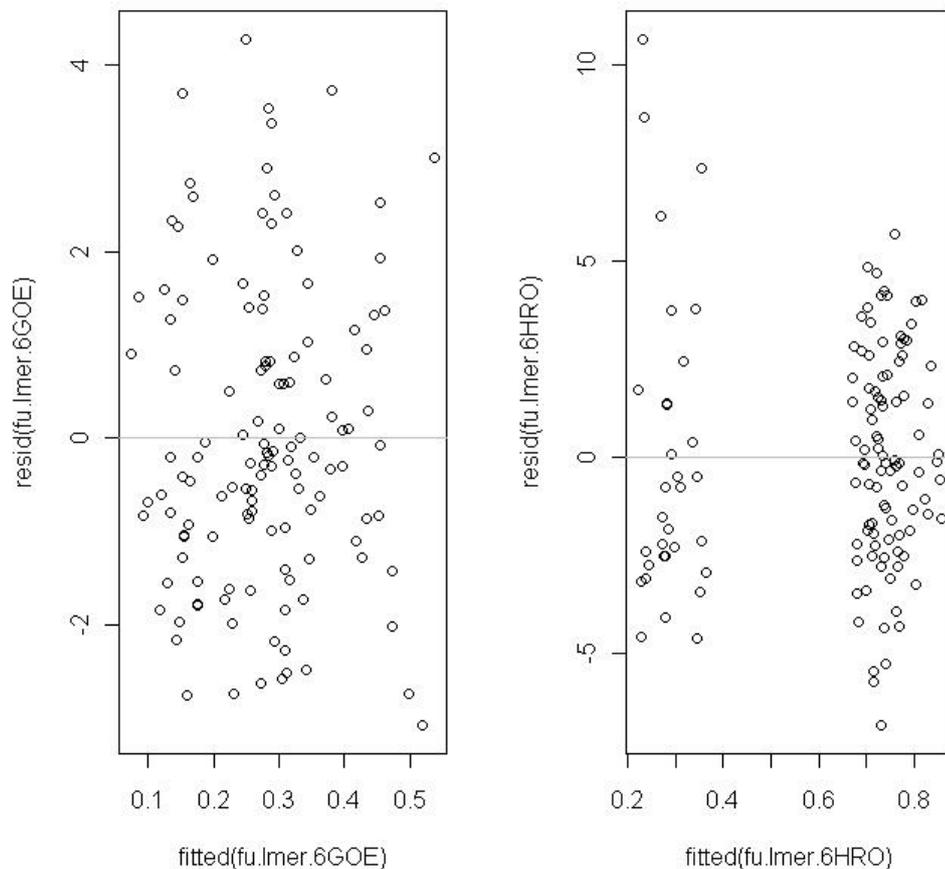


Abb. 17: Angepasste Residuenverteilung des angewandten Modells der logistischen Regression auf die Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* getrennt dargestellt für die beiden Versuchsstandorte in Göttingen (links) und in Rostock (rechts) in den Jahren 2010 und 2011.

3.1.2.1 Jahr 2010

Im Jahr 2010 befand sich der Fruchtfolgeversuch in Rostock im dritten und in Göttingen im zweiten Versuchsjahr. Es wurden in allen Pflanzenschutzvarianten der verschiedenen Energiefruchtfolgen die wichtigsten Halmbasis- bzw. Wurzelkrankheitserreger durch visuelle Bonitur des Weizens erfasst. An beiden Standorten konnte vor allem *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis* festgestellt werden (Abb. 18).

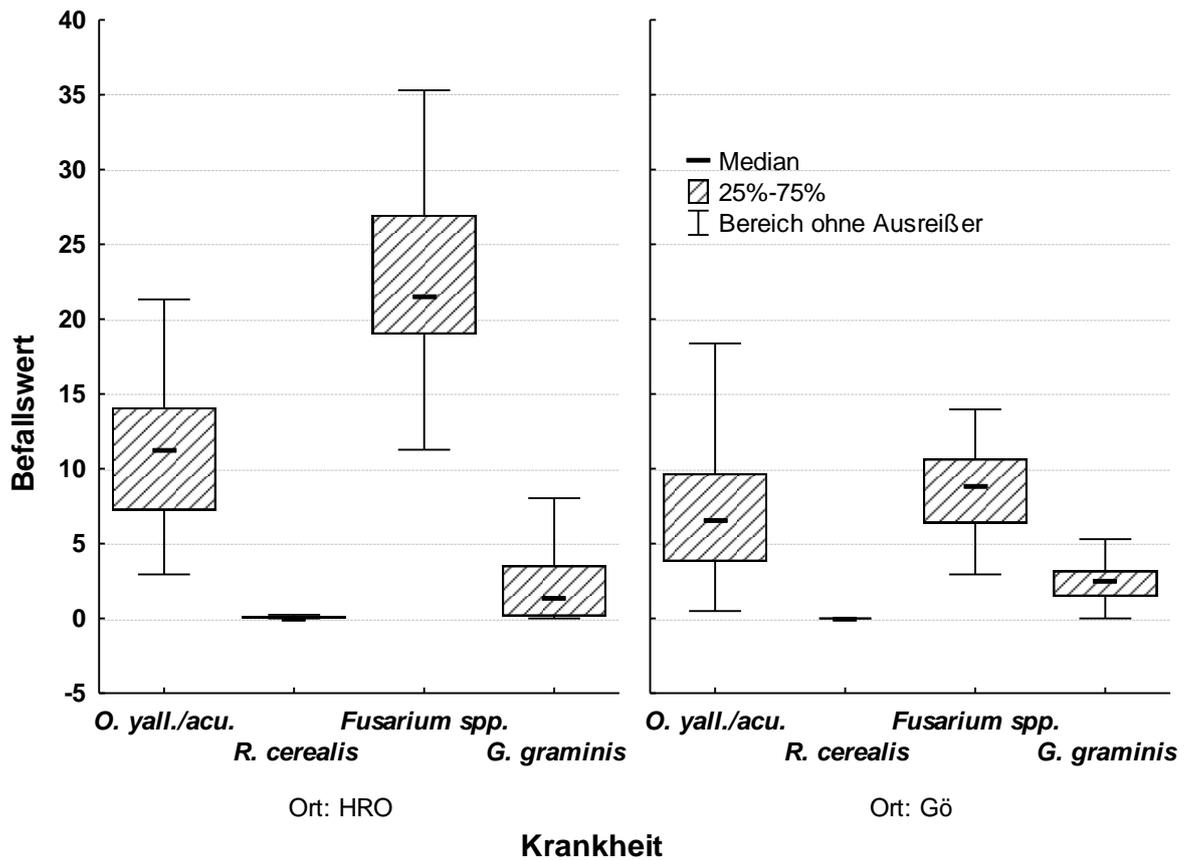


Abb. 18: Lage und Verteilung der Befallswerte von *O. yallundae/acuiformis*, *R. cerealis*, *Fusarium spp.* und *G. graminis* an der Halmbasis bzw. an der Wurzel von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Jahr 2010.

Die Befallsstärke wurde für *O. yallundae/acuiformis*, *R. cerealis* und *Fusarium spp.* auf einer Skala von 0 bis 3 und für *G. graminis* auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet und nach der Formel von Broschewitz (1999) in gewichtete Befallswerte umgerechnet, n = 64.

Die Mediane der Befallswerte variierten von 0,00 für *R. cerealis* (an beiden Standorten) bis 21,45 für *Fusarium spp.* am Standort in Rostock. Für *G. graminis* konnte an beiden Standorten ein niedriger Befallswert festgestellt werden. Nur *O. yallundae/acuiformis* und *Fusarium spp.* zeigten leicht erhöhte Werte, wobei bei der Gegenüberstellung der Versuchsstandorte deutlich Unterschiede hervortraten. So war der Befallswert für *O. yallundae/acuiformis* am Standort Rostock Vergleich zum Standort Göttingen annähernd doppelt so hoch und für *Fusarium spp.* fast dreimal so hoch (Abb. 18). Da die Befallswerte für *R. cerealis* gegen Null gingen, wurde dieser Erreger keiner weiteren statistischen Analyse unterzogen. Die Darstellung des Befallsgeschehens der anderen

Erreger in den verschiedenen Fruchtfolgen und Pflanzenschutzvarianten wurde aufgrund ihrer niedrigen Befallswerte anhand der Befallshäufigkeiten vorgenommen.

Der Standortunterschied trat so noch deutlicher hervor. Dominierender Erreger war *Fusarium spp.* mit einer Befallshäufigkeit von 75% am Standort in Rostock, der dort im Vergleich zum Standort in Göttingen doppelt so häufig identifiziert wurde. Auch für *O. yallundae/acuformis* konnte am Standort in Rostock ein höherer Befall festgestellt werden. Die Befallshäufigkeit des Erregers *G. graminis* lag hingegen am Standort in Göttingen mit 22% doppelt so hoch wie am Standort in Rostock, wo 12% der untersuchten Pflanzen befallen waren. Die Befallshäufigkeiten der untersuchten Erreger unterschieden sich dabei signifikant von einander (Tab. 8).

Tab. 8: Mittlere Befallshäufigkeiten (%) von *O. yallundae/acuformis*, *R. cerealis*, *Fusarium spp.* und *G. graminis* an der Halmbasis- bzw. an der Wurzel von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) an den Standorten in Göttingen (Gö) und Rostock (HRO) in den verschiedenen Pflanzenschutzvarianten im Versuchsjahr 2010. Abweichende Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede nach Tukey-Test ($\alpha = 0,05$), errechnet innerhalb des angewandten GLMs. Großbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten, klein geschriebene Buchstaben kennzeichnen Unterschiede innerhalb der Variante. Unterschiede zwischen den Befallshäufigkeiten in den Pflanzenschutzvarianten wurden nur für die Erreger *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* berechnet.

Ort	Variante	Befallshäufigkeiten (%)			
		<i>O. yallundae/acuformis</i>	<i>R. cerealis</i>	<i>Fusarium spp.</i>	<i>G. graminis</i>
Gö	PS	26,19 ab	0,00	32,38 a	20,85
	PS-F0	33,46 a	0,06	37,75 a	23,47
	UK-BK	22,92 ab	0,00	32,90 a	22,73
	UK-PS	18,10 b	0,12	31,03 a	20,03
Göttingen insg.		25,17 A	0,05	33,51 A	21,77 A
HRO	PS	32,48 b	0,12	74,45 a	18,50
	PS-F0	47,56 a	0,31	75,81 a	8,96
	UK-BK	32,78 b	1,10	71,81 a	13,42
	UK-PS	33,21 b	0,25	76,04 a	5,58
Rostock insg.		36,51 B	0,44	74,53 B	11,62 B
Gesamtergebnis		30,84	0,25	54,02	16,69

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen, UK-BK: Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung, n = 16.

Signifikante Unterschiede zwischen den Pflanzenschutzvarianten konnten für die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* an beiden Standorten ermittelt werden (Einfluss $p = 0,000$). Am Standort in Rostock hob sich die Variante PS-F0 (Fungizid Null) mit einem Befall von 47,56% signifikant zu den anderen Varianten mit im Mittel ca. 32% Befallshäufigkeit ab. Betrachtet man den Standort Göttingen, so ließ sich hier der Effekt

der Pflanzenschutzmaßnahme lediglich in der Tendenz feststellen. Ein signifikanter Unterschied zeigte sich nur zwischen den Varianten PS-F0 (33,46%) und UK-PS (Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen, mit ca. 18% Befallshäufigkeit). Die unterschiedlichen Fruchtfolgen zeigten keinen absicherbaren Einfluss auf die Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis*. Ein Effekt des Aussaattermins konnte nicht ermittelt werden. Am Standort in Göttingen wurde tendenziell eine Befallszunahme durch einen frühen Aussaattermin festgestellt (27,2% früh zu 23,2% spät), wohingegen in Rostock ein gegenläufiger Effekt ermittelt wurde (34,2% früh zu 38,8% spät).

Die Auswertungen der visuellen Bonitur von *Fusarium spp.* an der Halmbasis ergaben, dass die verschiedenen Pflanzenschutzvarianten keinen signifikanten Einfluss auf die Befallshäufigkeiten hatten. Eine separate Analyse der Standorte ergab, dass in Göttingen die PS-F0 Variante zu einem tendenziell höheren Befall führte (Tab. 8). Die Auswertungen der Fruchtfolgeeinflüsse ergaben, dass die Weizenproben der Fruchtfolge 3⁵ am Standort Göttingen den geringsten Befall mit *Fusarium spp.* an der Halmbasis im Vergleich zur Fruchtfolge 2 ($p = 0,054$) aufwiesen und dabei signifikant von der Fruchtfolge 4 ($p = 0,000$) abwichen. Die Fruchtfolgen 2⁶ und 4⁷ unterschieden sich hingegen nicht signifikant voneinander (Abb. 19).

⁵ Fruchtfolge 3: Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen

⁶ Fruchtfolge 2: Raps-Mais

⁷ Fruchtfolge 4: Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen

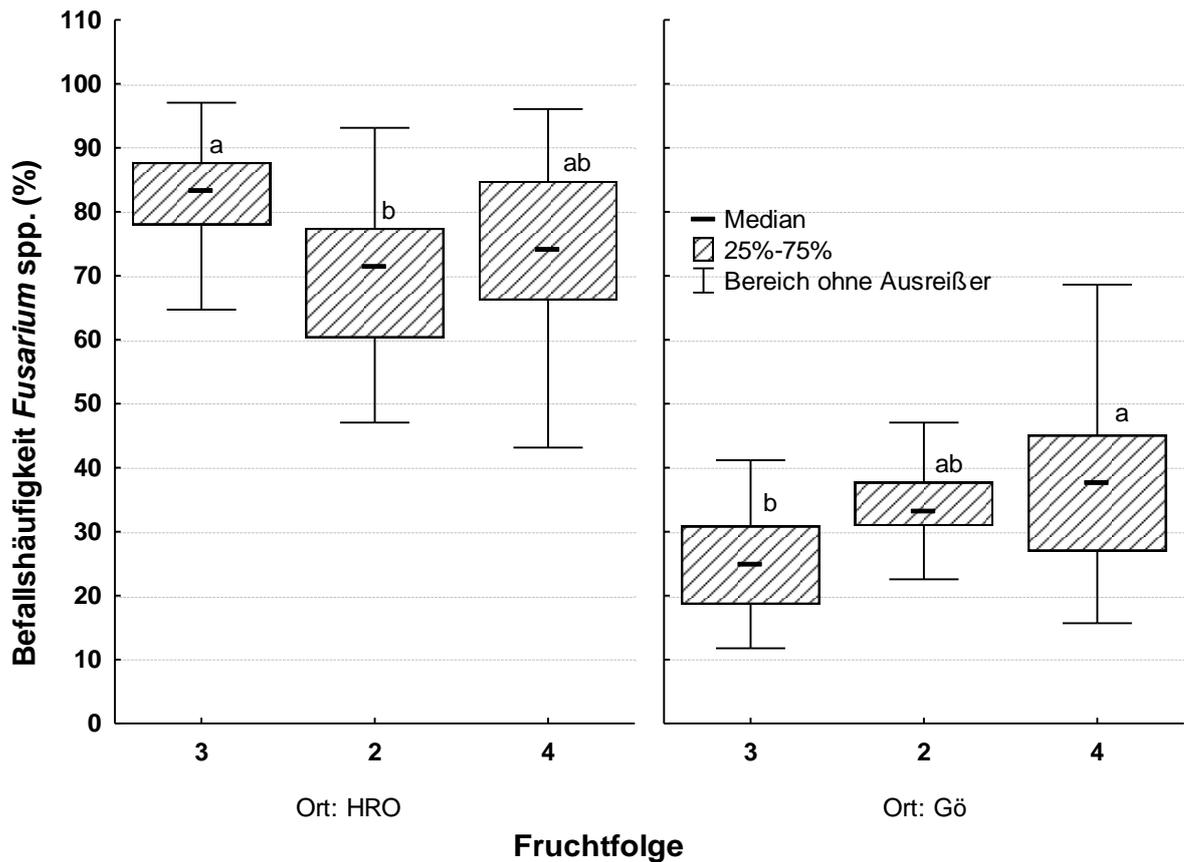


Abb. 19: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2010. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen

Am Standort in Rostock waren die Unterschiede der Fruchtfolgen im Vergleich zu Göttingen hingegen entgegengesetzt. Hier konnte ein signifikanter Unterschied zwischen Fruchtfolge 2 und 3 ($p = 0,016$) ermittelt werden, wobei die Fruchtfolge 3 die höchste Befallshäufigkeit aufwies.

Die größere Streuung der Daten aus Fruchtfolge 4 im Vergleich zu den anderen Fruchtfolgen wies darauf hin, dass ein weiterer, bis dato unberücksichtigter Faktor einen großen Einfluss auf die Befallshäufigkeit besaß. Die verschiedenen Fruchtfolgen bedingten einen unterschiedlichen Aussattermin für den Winterweizen. In Fruchtfolge 4 stand der Weizen entweder nach Raps, was einen frühen Aussattermin ermöglichte oder nach

Mais, was einen späten Aussattermin bedingte. Daher werden die Fruchtfolgen in den folgenden Abbildungen differenziert nach dem Aussattermin gegenübergestellt. An beiden Standorten konnte ein signifikanter Einfluss des Saattermins festgestellt werden ($p = 0,000$). Der Vergleich zeigte, dass am Standort Rostock ein später Aussattermin den Befall mit Halmbasispathogenen erhöhte, wohingegen in Göttingen eine Reduktion ermittelt wurde. Auf dem Versuchsstandort in Göttingen lag die Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* an früh ausgesätem Weizen bei 39,9% und somit signifikant höher als in den spät gesäten Weizenparzellen (27,4%). Der früh gesäte Weizen aus der Fruchtfolge 4 zeigte am Standort Göttingen die signifikant höchsten Befallshäufigkeiten (Abb. 20).

Am Standort in Rostock war ein umgekehrter Pathogenbefall feststellbar. Für den früh gesäten Weizen wurde eine Befallshäufigkeit von 71,3% und für den spät gesäten eine Häufigkeit von 77,8% festgestellt. Dieser Unterschied war auch hier statistisch absicherbar.

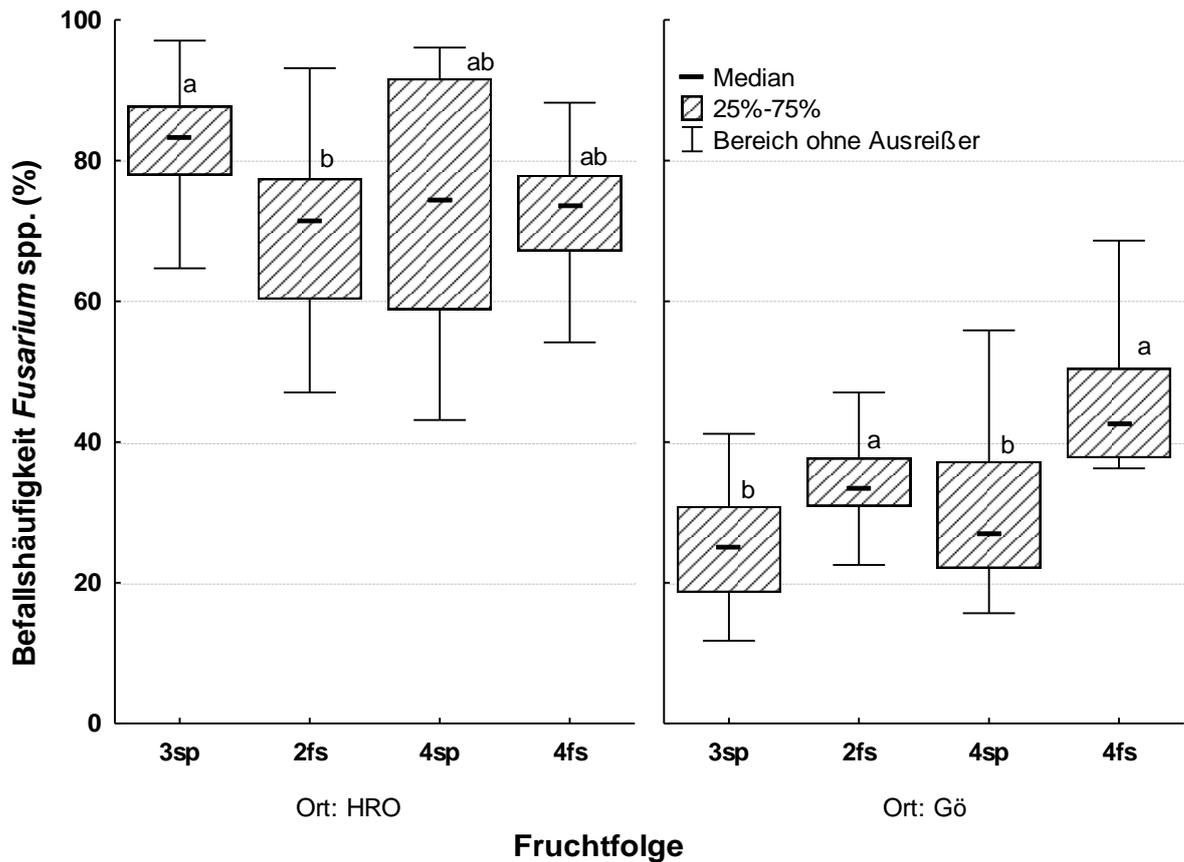


Abb. 20: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2010. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4.

Saatzeitpunkt: fs: Frühsaat (15.09.2009 Rostock, 25.09.2009 Göttingen); sp: Spätsaat (12.10.2009 in Rostock, 14.10.2009 in Göttingen)

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

3.1.2.2 Jahr 2011

Im Jahr 2011 befand sich der Fruchtfolgeversuch in Rostock im vierten und in Göttingen im dritten Versuchsjahr. Es wurden in allen Pflanzenschutzvarianten der verschiedenen Energiefruchtfolgen die wichtigsten Halmbasis- bzw. Wurzelkrankheitserreger durch eine visuelle Bonitur des Weizens erfasst. An beiden Standorten wurden vor allem *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis* festgestellt (Abb. 21). Die Daten aus dem Versuchsjahr 2011 sollten zu einer abschließenden Bewertung der Fruchtfolgen in Hinblick auf die Halmbasis- und Wurzelkrankungen an Weizen genutzt werden.

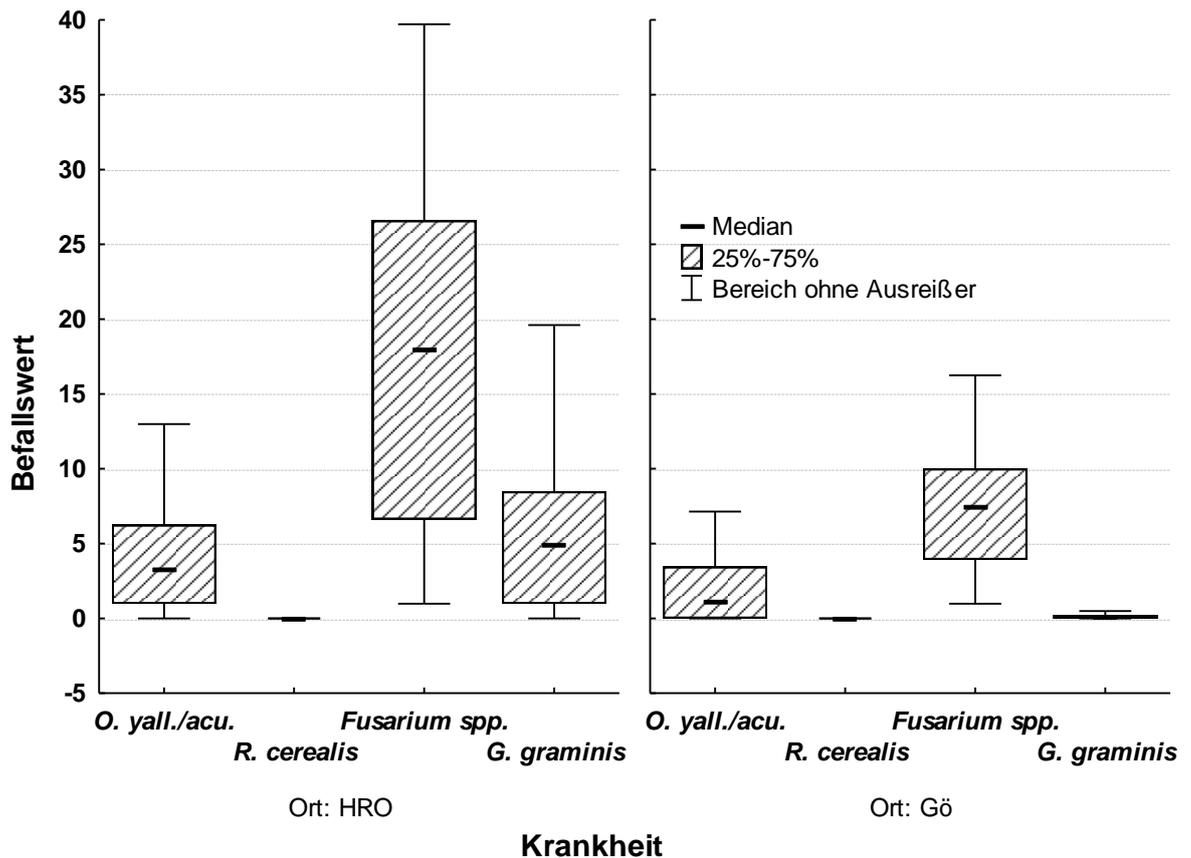


Abb. 21: Lage und Verteilung der Befallswerte von *O. yallundae/acuiformis*, *R. cerealis*, *Fusarium spp.* und *G. graminis* an der Halmbasis bzw. an der Wurzel von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Jahr 2011.

Die Befallsstärke wurde für *O. yallundae/acuiformis*, *R. cerealis* und *Fusarium spp.* auf einer Skala von 0 bis 3 und für *G. graminis* auf einer Skala von 1 bis 4 bewertet und nach der Formel von Broschewitz (1999) in gewichtete Befallswerte umgerechnet, n = 64.

Im Jahr 2011 lag ein moderater Befall der Halmbasis und Wurzelkrankheiten an den Standorten Göttingen und Rostock vor. Die Mediane der Befallshäufigkeiten variierten von 0 (*R. cerealis* an beiden Standorten) bis 17,89 für *Fusarium spp.* in Rostock. Leicht erhöhte Befallswerte wurden lediglich für *Fusarium spp.* festgestellt, wobei der Befallswert in Göttingen mit einem Median von 7,48 nur halb so hoch war wie der am Standort in Rostock gemessene Wert. Für das Wurzelpathogen *G. graminis* konnte lediglich in Rostock ein geringer Befall von 4,95 ermittelt werden (Abb. 21). Da die Mediane von *R. cerealis* an beiden Standorten 0 betragen, wurde auch für das Versuchsjahr 2011 auf eine weitere statistische Verrechnung verzichtet. Die Darstellung des Befallsgeschehens der anderen Erreger in den verschiedenen Fruchtfolgen und

Pflanzenschutzvarianten wurde auch im Jahr 2011 aufgrund ihrer niedrigen Befallswerte anhand der Befallshäufigkeiten vorgenommen.

Tabelle 9 zeigt die Befallshäufigkeiten der Halmbasis- und Wurzelerreger an Weizen für die beiden Standorte in Göttingen und Rostock in den vier verschiedenen Pflanzenschutzvarianten für das Versuchsjahr 2011. Da die Befallshäufigkeit von *G. graminis* nicht durch die Pflanzenschutzmaßnahmen beeinflusst wurde und die Befallshäufigkeiten von *R. cerealis* sich über den gesamten Versuchszeitraum auf einem sehr niedrigen Niveau (0,00 bis 0,38%) bewegte, wurde auf eine Auswertung dieser Erreger verzichtet. In den nachfolgenden Analysen wird nur auf die Erreger *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis* näher eingegangen. Die Befallshäufigkeiten dieser Erreger variierten von 4,65% für *O. yallundae/acuformis* in der Variante situationsbezogene Referenz (PS) am Standort in Göttingen bis 53,86% für *Fusarium spp.* in der Variante PS-F0 am Standort in Rostock. In der Höhe des Befallgeschehens zeigten die Standorte einen signifikanten Unterschied. So lagen die Befallshäufigkeiten für beide Erreger in Rostock mehr als doppelt so hoch wie in Göttingen. Dabei wies die Variante PS-F0 an beiden Standorten für beide Erreger die höchsten Befallshäufigkeiten auf, was sich aber auch im Versuchsjahr 2011 nicht statistisch absichern ließ. Die Interferenzstatistik ermittelte keine signifikanten Unterschiede zwischen den Pflanzenschutzvarianten.

Tab. 9: Mittlere Befallshäufigkeiten (%) von *O. yallundae/acuformis*, *R. cerealis*, *Fusarium spp.* und *G. graminis* an der Halmbasis- bzw. an der Wurzel von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) an den Standorten in Göttingen (Gö) und Rostock (HRO) in den verschiedenen Pflanzenschutzvarianten im Versuchsjahr 2011. Abweichende Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede nach Tukey-Test ($\alpha = 0,05$), errechnet innerhalb des angewandten GLMs. Großbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Standorten, klein geschriebene Buchstaben kennzeichnen Unterschiede innerhalb der Variante. Unterschiede zwischen den Befallshäufigkeiten in den Pflanzenschutzvarianten wurden nur für die Erreger *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* berechnet.

Ort	Variante	Befallshäufigkeiten (%)			
		<i>O. yallundae/acuformis</i>	<i>R. cerealis</i>	<i>Fusarium spp.</i>	<i>G. graminis</i>
Gö	PS	4,65 a	0,00	21,27 a	2,33
	PS-F0	9,27 a	0,06	25,11 a	1,42
	UK-BK	6,57 a	0,07	21,30 a	1,68
	UK-PS	6,69 a	0,05	21,14 a	1,37
Gö Ergebnis		6,80 B	0,05	22,20 B	1,69 B
HRO	PS	12,23 a	0,06	51,74 a	21,54
	PS-F0	20,94 a	0,43	53,86 a	20,50
	UK-BK	16,67 a	0,21	50,56 a	21,78
	UK-PS	10,62 a	0,38	51,20 a	22,49
HRO Ergebnis		14,92 A	0,28	51,86 A	21,60 A
Gesamtergebnis		10,86	0,16	37,03	11,64

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen, UK-BK: Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung, $n = 16$.

Abbildung 22 zeigt die Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* an der Halmbasis des Weizens in den drei verschiedenen Fruchtfolgen. Die logistische Regression je Standort ergab, dass die Fruchtfolge einen signifikanten Einfluss auf das Befallsgeschehen von *Fusarium spp.* hatte ($p = 0,000$ an beiden Standorten). Der geringste Befall wurde in der Fruchtfolge 3 (Göttingen: 12,81% und Rostock: 29,11%) mit dreijährigem Weizenanbau ermittelt. Am Standort in Rostock war der Unterschied dieser Fruchtfolge im Vergleich zu den anderen Varianten signifikant, wohingegen die Fruchtfolge 2 nur am Standort in Göttingen signifikant von der Fruchtfolge 3 abwich. In Fruchtfolge 4 mit zweijährigem Weizenanbau wurde die zweithöchste Befallshäufigkeit (Göttingen: 21,25% und Rostock: 50,47) festgestellt. An beiden Standorten waren die Befallshäufigkeiten mit einem Faktor von 1,5 höher als in Fruchtfolge 3. Im Vergleich zu den anderen Fruchtfolgen zeigte die kurze Fruchtfolge 2 mit einem Weizenanteil von 50% an beiden Standorten die signifikant höchsten Befallshäufigkeiten (Göttingen: 33,49% und Rostock: 77,39%; Abb. 22). Die Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* erhöhte sich signifikant um den Faktor 2,7 von Fruchtfolge 3 mit der niedrigsten Befallshäufigkeit im Vergleich zur Fruchtfolge 2 mit der höchsten Befallshäufigkeit.

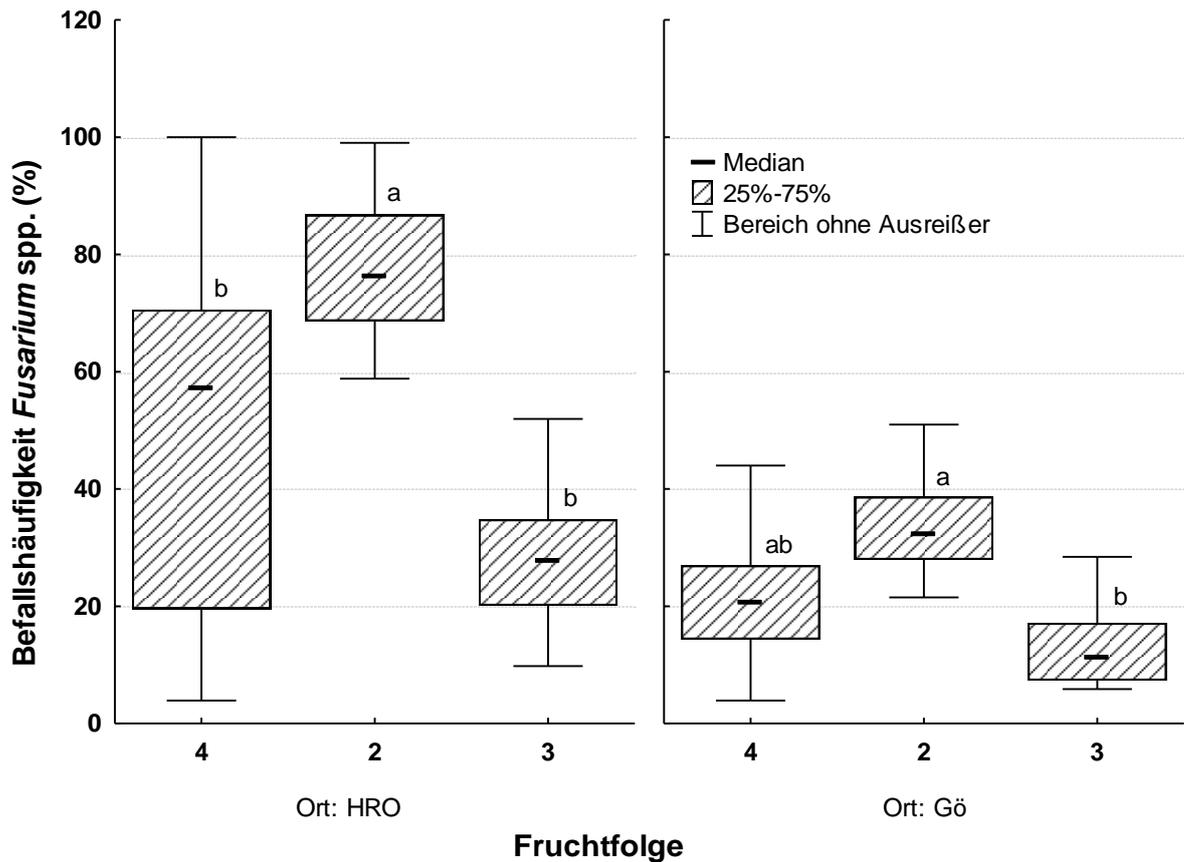


Abb. 22: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4 (früh und spät ausgesäter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Die Fruchtfolgen 2 und 4 kennzeichneten sich durch den gleichen Weizenanteil in der Fruchtfolge. Dabei unterschieden sich die beiden Fruchtfolgen hinsichtlich ihrer Vorfrucht vor dem untersuchten Weizen, welche einen frühen bzw. einen späten Aussattermin in Fruchtfolge 4 zur Folge hatte. Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Einfluss des Saattermins ($p = 0,000$ für beide Standorte). Eine frühe Aussaat verdoppelte die Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* in der Fruchtfolge 4 nahezu im Vergleich zu einer späten Aussaat (Abb. 23).

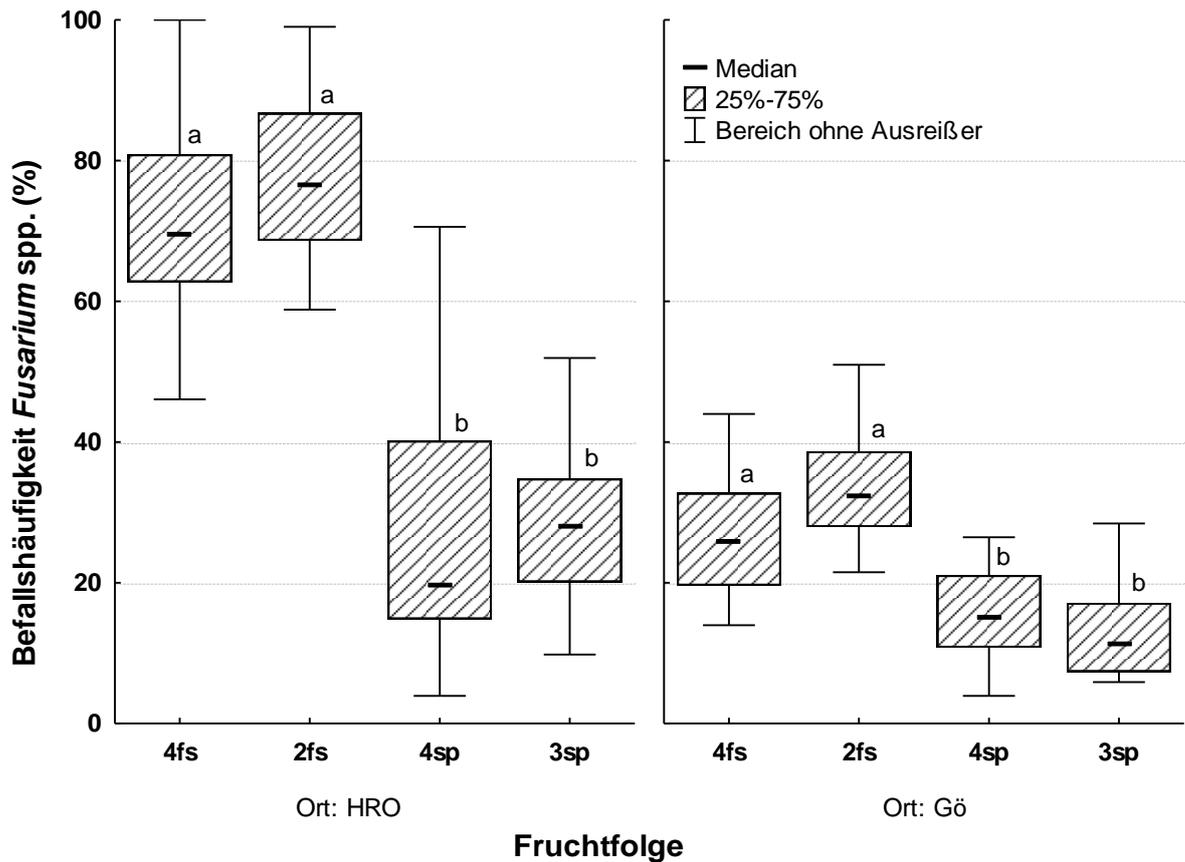


Abb. 23: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4.

Saatzeitpunkt: fs: Frühsaat (17.09.2010 Rostock, 21.09.2010 Göttingen); sp: Spätsaat (06.10.2010 in Rostock, 19.10.2010 in Göttingen)

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Am Standort in Rostock lagen die Befallshäufigkeiten mit ca. 75% in der Fruchtfolge 2 und der frühgesäten Variante in der Fruchtfolge 4 auf gleich hohem Niveau. Sie unterschieden sich signifikant von den Spätsaaten aus Fruchtfolge 3 und 4, welche auf gleichem Niveau lagen. Spätsaaten reduzierten den Befall um den Divisor 2,6 innerhalb der Fruchtfolge 4. In der frühgesäten Variante lagen die Befallshäufigkeiten im Vergleich zum Mittel der Fruchtfolge 4 um ein Viertel höher und in den spätgesäten Varianten um ein Viertel niedriger.

Am Standort Göttingen wiesen die frühgesäten Varianten (Fruchtfolge 2: 33,49% und Fröhsaat Fruchtfolge 4: 27,06%) im Vergleich zu den spätgesäten Varianten ebenfalls signifikant höhere Befallshäufigkeiten auf (Spätsaat Fruchtfolge 4: 15,44% und Fruchtfolge 3: 12,81%). Früh- und Spätsaat unterschieden sich in der Fruchtfolge 4 um den Faktor 1,8.

Befall mit *O. yallundae/acuformis* im Jahr 2011

Der Befall mit *O. yallundae/acuformis* lag im Jahr 2011 auf einem niedrigen Niveau. Die Befallshäufigkeiten variierten von 0,12% in Fruchtfolge 3 am Standort Göttingen bis 22,86% in Fruchtfolge 2 in Rostock. Es konnte ein hochsignifikanter Einfluss der Fruchtfolge auf das Befallsgeschehen des Halmbrucherregers ermittelt werden ($p = 0,000$ für beide Standorte; Abb. 24).

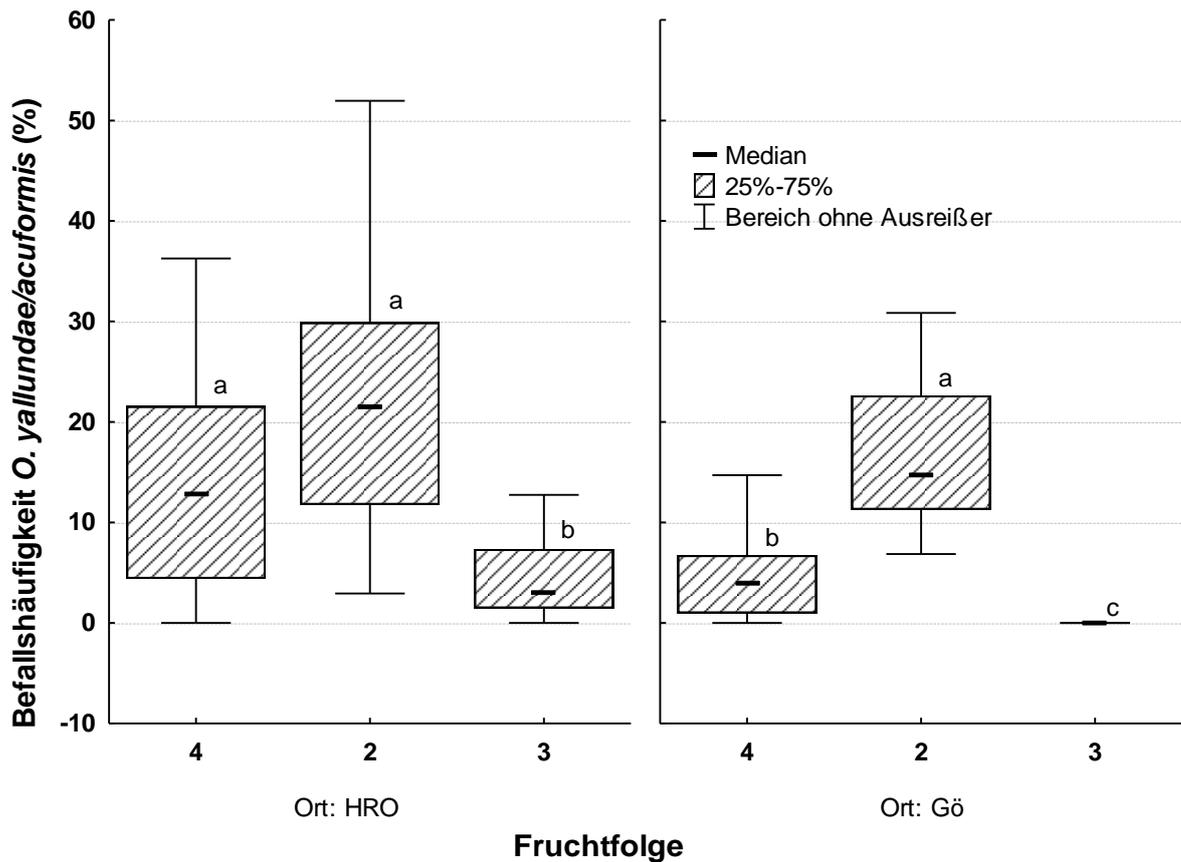


Abb. 24: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Die Fruchtfolge 2 wies mit 17,74% (Göttingen) und 22,86% (Rostock) an beiden Standorten die höchste Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis* auf, wobei die Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen deutlich größer waren als bei Halmbasisinfektionen mit *Fusarium spp.* Die aufgelockerte Fruchtfolge 3 zeigte in Göttingen nahezu keinen Befall (0,12%) und in Rostock einen geringen Befall von knapp 5%. Es konnte eine fast vollständige Befallsreduktion beim Wechsel von Fruchtfolge 2 zu Fruchtfolge 3 festgestellt werden. Dieser Unterschied war hochsignifikant. Für die Fruchtfolge 4 konnte im Vergleich zur Fruchtfolge 2 in Göttingen ein fast vierfach geringerer Befall und am Standort Rostock ein 1,4-fach geringerer Befall festgestellt werden (Abb. 24).

Wie schon für die Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* aufgezeigt, hatte der Aussaattermin auch einen signifikanten Effekt auf die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* ($p = 0,000$). Am Standort in Rostock wiesen die Fruchtfolge 3 und 4 der Variante mit einem späten Aussaattermin eine signifikant geringere Befallshäufigkeit auf als die Fruchtfolge 2. Die Spätsaat reduzierte den Befall um ca. 50%, dies war schwach statistisch absicherbar ($p = 0,071$). Am Standort Göttingen zeigte sich ein ähnliches Bild. Die Fruchtfolgen differenzierten nach Aufteilung gemäß dem Aussaattermin signifikant voneinander. Frühsaaten erhöhten den Befall im Vergleich zur Spätsaat (Abb. 25).

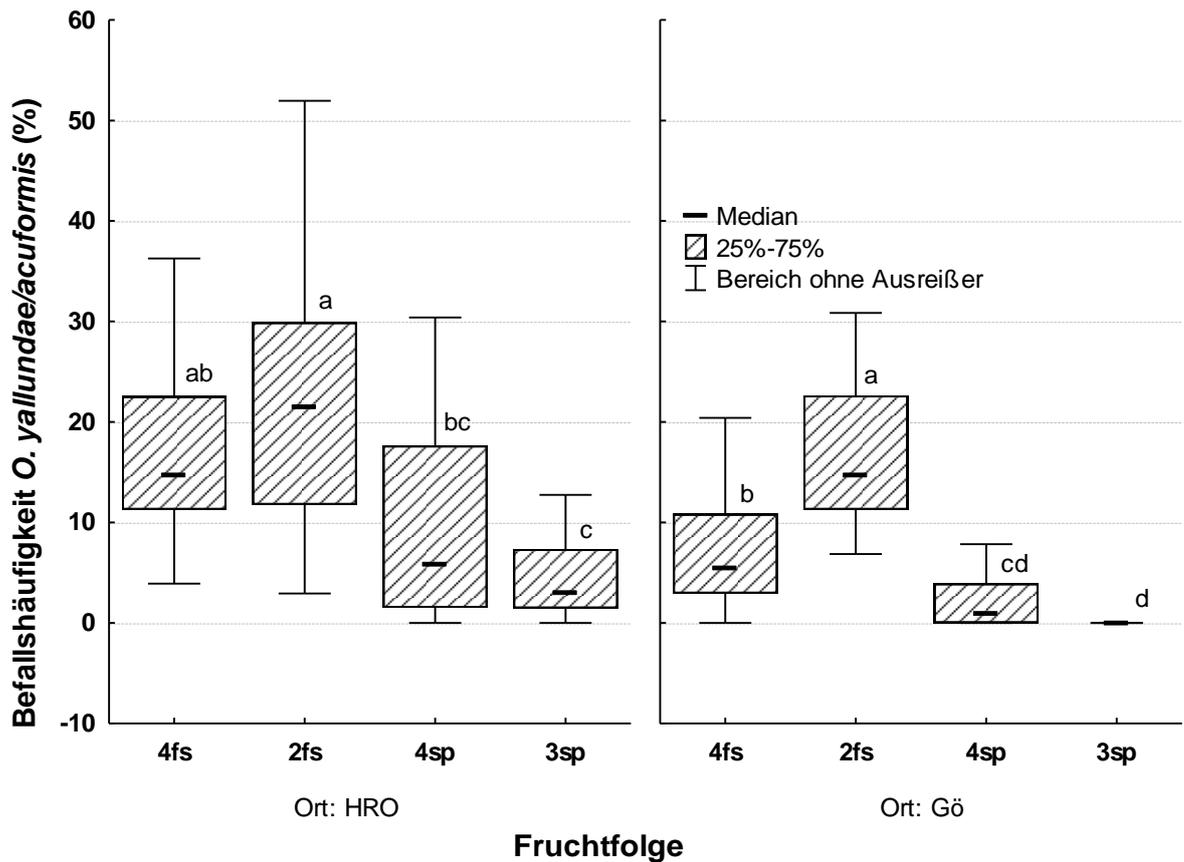


Abb. 25: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4.

Saatzeitpunkt: fs: Frühsaat (17.09.2010 Rostock, 21.09.2010 Göttingen); sp: Spätsaat (06.10.2010 in Rostock, 19.10.2010 in Göttingen)

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Verglichen mit dem Mittel der Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* zeigten die Frühsaaten innerhalb der Fruchtfolge 4 eine Erhöhung der Befallshäufigkeit um ca. 27% und die Spätsaaten eine Reduktion um 36%.

Befall mit *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*

Die statistische Auswertung ergab einen signifikanten Einfluss der Fruchtfolge ($p = 0,000$) auf die Befallshäufigkeit von *G. graminis* am Standort in Rostock.

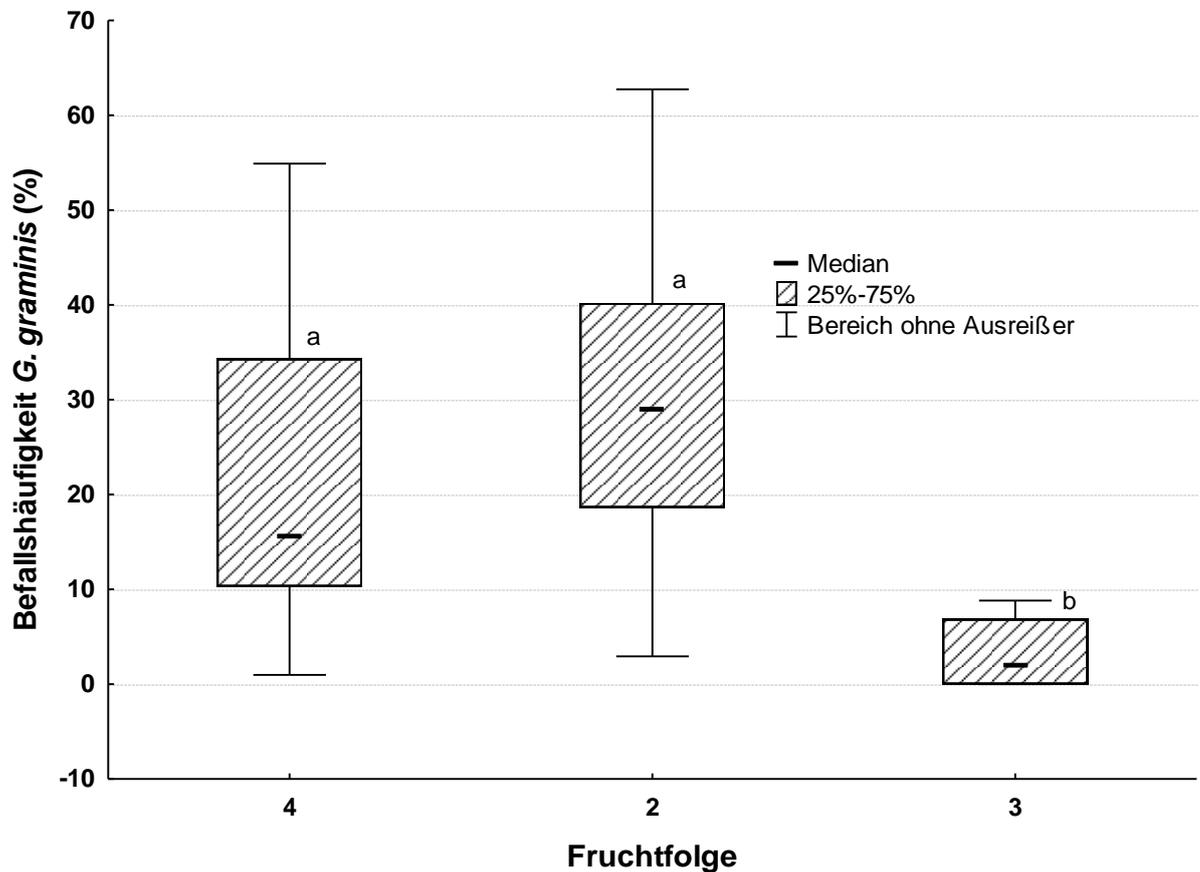


Abb. 26: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *G. graminis* an der Wurzel von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in drei verschiedenen Energiefruchtfolgen an den Standorten in Rostock (HRO) und Göttingen (Gö) im Versuchsjahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Tukey-Test, errechnet innerhalb des verwendeten GLMs, $n = 16$ für FF2 und FF3, $n = 32$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Im Vergleich zu den anderen Fruchtfolgen zeigte Fruchtfolge 3 mit einem Wert von 6,62% den signifikant geringsten Befall mit *G. graminis* (Fruchtfolge 4: 24,51% und Fruchtfolge 2: 30,76%). Somit erhöhte sich die Befallshäufigkeit von *G. graminis* durch eine Zunahme des Weizenanteils in der Fruchtfolge um den Faktor 3,7 (Fruchtfolge 4) bzw. 4,6

(Fruchtfolge 2) im Vergleich zur Fruchtfolge 3 (Abb. 26). Ein Einfluss des Saattermins konnte nicht ermittelt werden.

Im vorangegangenen Abschnitt wurden die Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen in Bezug auf die Befallshäufigkeit der verschiedenen Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger an Weizen dargelegt. Dabei wurde nicht nach den Pflanzenschutzvarianten differenziert. Die Daten aus dem letzten Untersuchungsjahr 2011 sollten außerdem Aufschluss darüber geben, wie und auf welchem Niveau sich die Energiefruchtfolgen hinsichtlich des Krankheitsgeschehens nach mehrjährigem Anbau unterscheiden. In den folgenden Abbildungen werden die Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* bzw. *O. yallundae/acuformis* in den untersuchten Fruchtfolgen innerhalb der beiden Pflanzenschutzvarianten situationsbezogene Referenz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) gegenübergestellt. In der Variante PS-F0 zeigte sich einzig die Auswirkung der Fruchtfolge. Der Vergleich zur Variante PS bildet den Einfluss des Pflanzenschutzes in den verschiedenen Fruchtfolgen ab.

Im Jahr 2011 wies die Fruchtfolge 2 am Standort Göttingen mit 43,08% die höchste Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* auf, ermittelt in der Variante PS-F0. Mit 21,07% in Fruchtfolge 4 bzw. 15,2% in Fruchtfolge 3 waren die Befallshäufigkeiten in diesen Fruchtfolgen um mehr als die Hälfte geringer als in der Fruchtfolge 2. Dieser Unterschied war für den Vergleich von Fruchtfolge 3 zu Fruchtfolge 2 statistisch absicherbar. Die Werte der Fruchtfolgen in der Variante PS folgten dem gleichen Trend, aber auf einem niedrigeren Niveau. Die Befallshäufigkeiten in Fruchtfolge 2 und 4 waren in der Variante PS um den Faktor 2,5 bzw. 3,1 höher als in Fruchtfolge 3. Die Gegenüberstellung der Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 zeigte eine signifikant höhere Befallshäufigkeit für Fruchtfolge 2 und 3 in der unbehandelten Variante (Erhöhung jeweils ca. um den Faktor 1,5; Abb. 27).

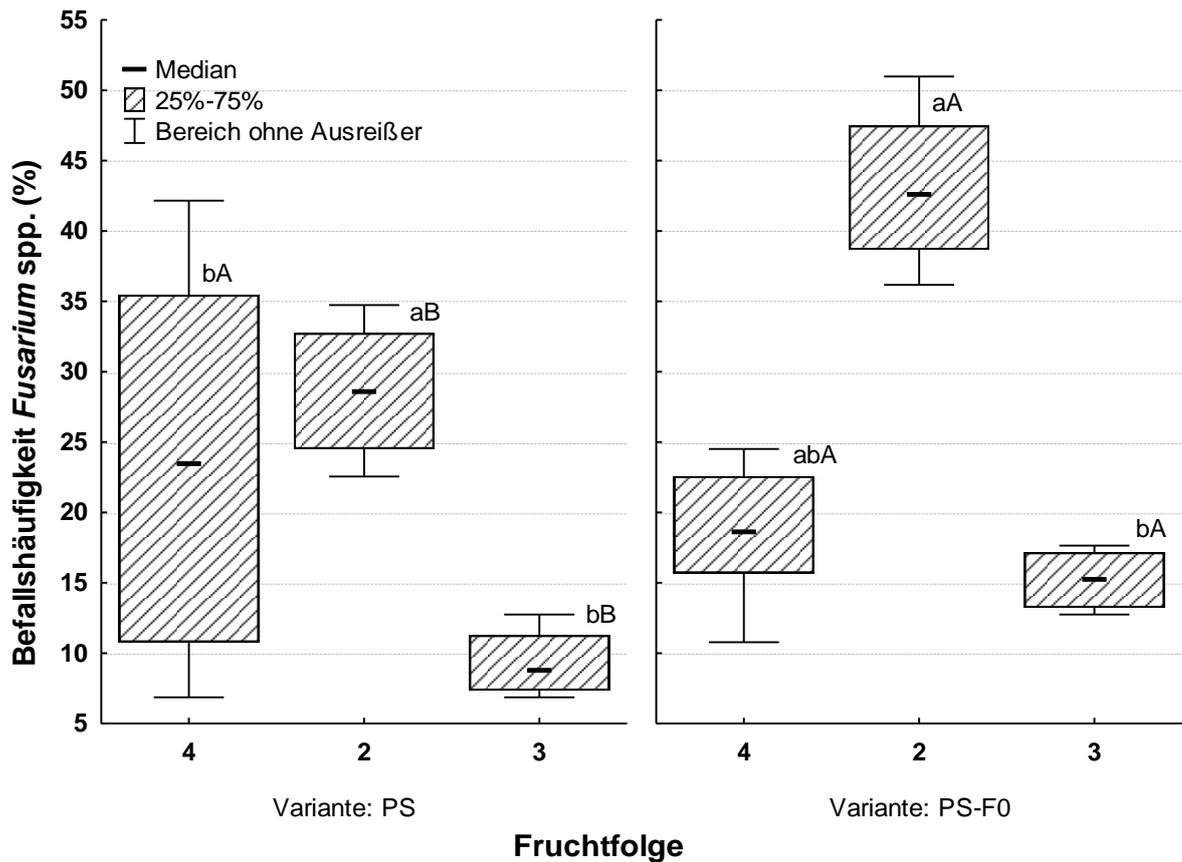


Abb. 27: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in 3 verschiedenen Energiefruchtfolgen in den Varianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) am Standort in Göttingen im Jahr 2011.

Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen (kleine Buchstaben) bzw. zwischen den Pflanzenschutzmaßnahmen innerhalb der Fruchtfolge (Großbuchstaben) auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Kruskal-Wallis Test, $n = 4$ für FF3 und FF2, $n = 8$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Die niedrigste Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* in der Fruchtfolge 3 der Variante PS (9,31%) unterschied sich um den Faktor 4,6 von der Variante PS-F0 der Fruchtfolge 2 mit der höchsten Befallshäufigkeit (43,08%).

Die Versuche am Standort in Rostock wiesen für das Versuchsjahr 2011 ähnliche Ergebnisse wie am Standort in Göttingen auf. Hier lagen die Befallshäufigkeiten aber auf einem wesentlich höheren Niveau. In der Variante PS-F0 zeigte die Fruchtfolge 2 die

höchste Befallshäufigkeit von 85,54% und in der Variante PS eine etwas geringere von 78,68%. Im Vergleich dazu wiesen die Fruchtfolgen 3 und 4 folgende Befallshäufigkeiten auf: Fruchtfolge 3 in der Variante PS-F0 27,21% und in der Variante PS 29,66%, Fruchtfolge 4 in der Variante PS-F0 51,34% und in der Variante PS 49,31%. Die statistisch absicherbare Erhöhung der Befallshäufigkeit zwischen Fruchtfolge 2 und 3 betrug in der Variante PS den Faktor 2,7 und in der Variante PS-F0 3,1 (Abb. 28). Der Wechsel von Fruchtfolge 2 zu Fruchtfolge 4 führte zu einer leichten Absenkung der Befallshäufigkeit um einen Divisor von ca. 1,7 in beiden Pflanzenschutzvarianten. Der größte Unterschied in den Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* wurde am Standort in Rostock ebenfalls zwischen der Fruchtfolge 3 der Variante PS (29,66%) und der Fruchtfolge 2 der Variante PS-F0 (85,54%) ermittelt. Dieser Unterschied betrug eine Erhöhung um den Faktor 2,9. Ein signifikanter Einfluss des Pflanzenschutzes konnte am Standort in Rostock nicht festgestellt werden.

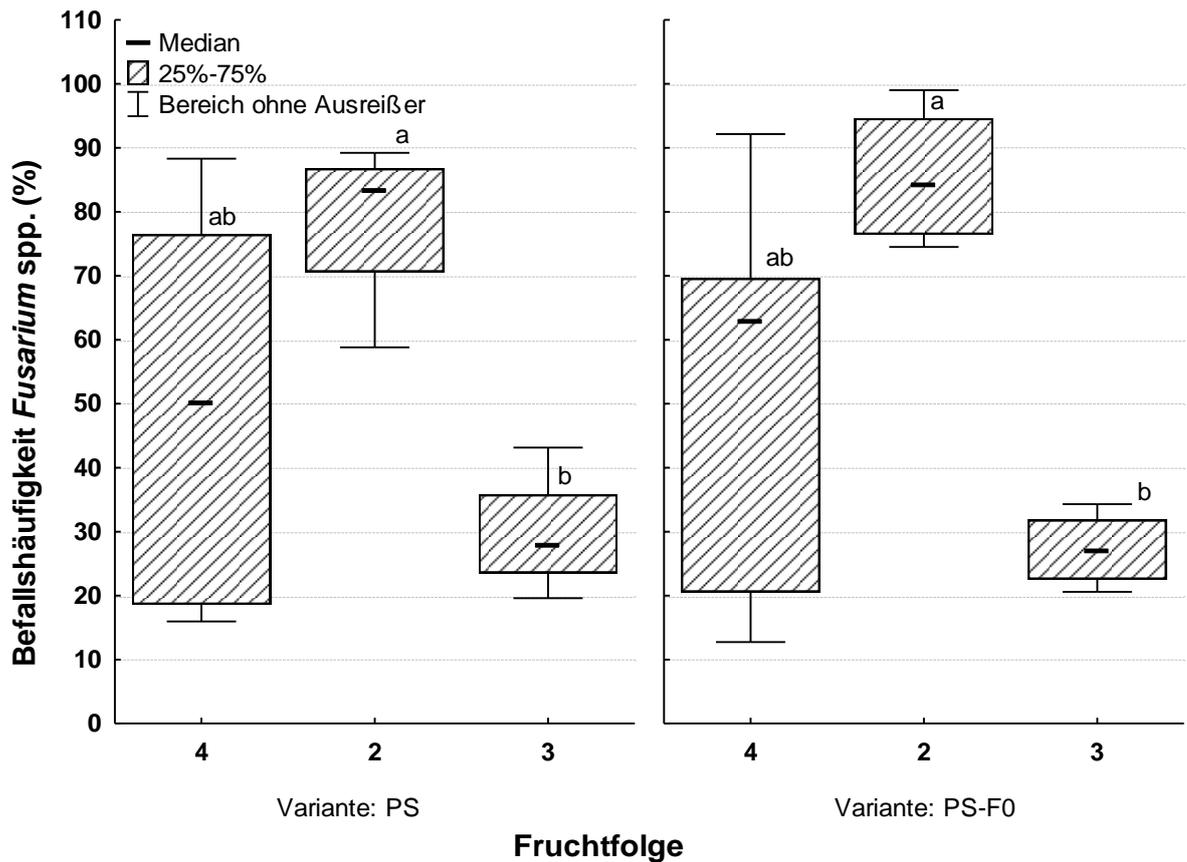


Abb. 28: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in 3 verschiedenen Energiefruchtfolgen in den Varianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) am Standort in Rostock im Jahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Kruskal-Wallis Test, $n = 4$ für FF3 und FF2, $n = 8$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Tabelle 10 zeigt zusammenfassend die Befallshäufigkeiten mit *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Weizen in den Varianten PS und PS-F0 der verschiedenen Energiefruchtfolgen und die Reduktion der Befallshäufigkeit in Form eines Divisors beim Wechsel von Fruchtfolge 2 mit der höchsten Befallshäufigkeit hin zu den Fruchtfolgen 3 und 4 bzw. zwischen den Varianten PS und PS-F0.

Tab. 10: Mittlere Befallshäufigkeiten (%) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur der Halmbasis zur späten Milchreife (ES 77) in den Pflanzenschutzvarianten Fungizid Null (PS-F0) und situationsbezogene Referenz (PS) in den Fruchtfolgen 2, 3 und 4 an den Standorten Göttingen und Rostock im Jahr 2011. Dargestellt sind die prozentualen Reduktionen der Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* ausgehend von Fruchtfolge 2 hin zu den Fruchtfolgen 2 und 3 in Form eines Divisors.

Ort	Variante	Fruchtfolge	FF2	FF3	FF4
		Früchte	Weizen-Raps	Raps-Zwfr./Mais-sWeizen	Raps-fWeizen-Zwfr./Mais-sWeizen
		Anteil in der FF	50% - 50%	33% - 33% - 33%	25% - 25% - 25% - 25%
Göttingen	PS-F0		43,08%	15,20% ↓ 2,8	21,07% ↓ 2,0
	PS		28,63%	9,31% ↓ 3,1	23,57% ↓ 1,2
Rostock	PS-F0		85,54%	27,21% ↓ 3,1	51,34% ↓ 1,7
	PS		78,68%	29,66% ↓ 2,7	49,31% ↓ 1,6

↓, Divisor zwischen der Befallshäufigkeit von Fruchtfolge 2 zu 3 bzw. 4, bzw. zwischen den Varianten PS und PS-F0; ~, kein Effekt; FF = Fruchtfolge; fWeizen = frühgesäter Weizen; sWeizen = spätgesäter Weizen, n = 4 für FF3 und FF2, n = 8 für FF4.

Die Unterschiede in den Befallshäufigkeiten zwischen den Fruchtfolgen der Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 waren an beiden Standorten etwa gleich groß. Die Reduktion der Befallshäufigkeit beim Vergleich der Fruchtfolge 2 zur 3 betrug einen Divisor von ca. 3 und der Unterschied von Fruchtfolge 2 zu 4 betrug einen Divisor von ca. 2. Durch eine Fungizidbehandlung wurde nur am Standort in Göttingen in den Fruchtfolgen 2 und 3 eine Reduktion der Befallshäufigkeit erreicht, welche mit einem Divisor von ca. 1,5 geringer war als der Effekt des Fruchtfolgewechsels. Eine Kombination aus Fruchtfolgewechsel (von Fruchtfolge 2 zu 3) und einer Fungizidapplikation führte zu einer maximalen Reduktion der Befallshäufigkeit um einen Divisor von 4,6 in Göttingen bzw. 2,9 in Rostock. Die Betrachtung der Befallswerte von *Fusarium spp.* in den einzelnen Pflanzenschutzvarianten der verschiedenen Fruchtfolgen für das Jahr 2011 bestätigten die Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen. Die Werte lagen aber auf einem niedrigeren Niveau, wodurch die Unterschiede nicht so deutlich hervortraten (Tab. 3A im Anhang).

Zur Darstellung des Fruchtfolgeeffektes am Ende des Untersuchungszeitraumes im Jahr 2011 werden im nachfolgenden Abschnitt die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* der verschiedenen Fruchtfolgen in den Varianten PS und PS-F0 dargestellt. Die Befallshäufigkeiten am Standort Rostock variierten von 3,92% in der Variante PS-F0 der Fruchtfolge 3 bis 41,42% in der Variante PS-F0 der Fruchtfolge 2. Dabei wies in der

Variante PS-F0 die Fruchtfolge 2 einen signifikant höheren Wert auf als die Fruchtfolge 3. Hier betrug der Unterschied mehr als das 10-fache. In der Variante PS war die Befallshäufigkeit der Fruchtfolge 2 (21,81%) signifikant höher als in den Fruchtfolgen 3 (4,66%) und 4 (11,22%). Hier betrug die Unterschiede einen Faktor von 4,7 (Fruchtfolge 3 zu 2) bzw. 1,9 (Fruchtfolge 4 zu 2).

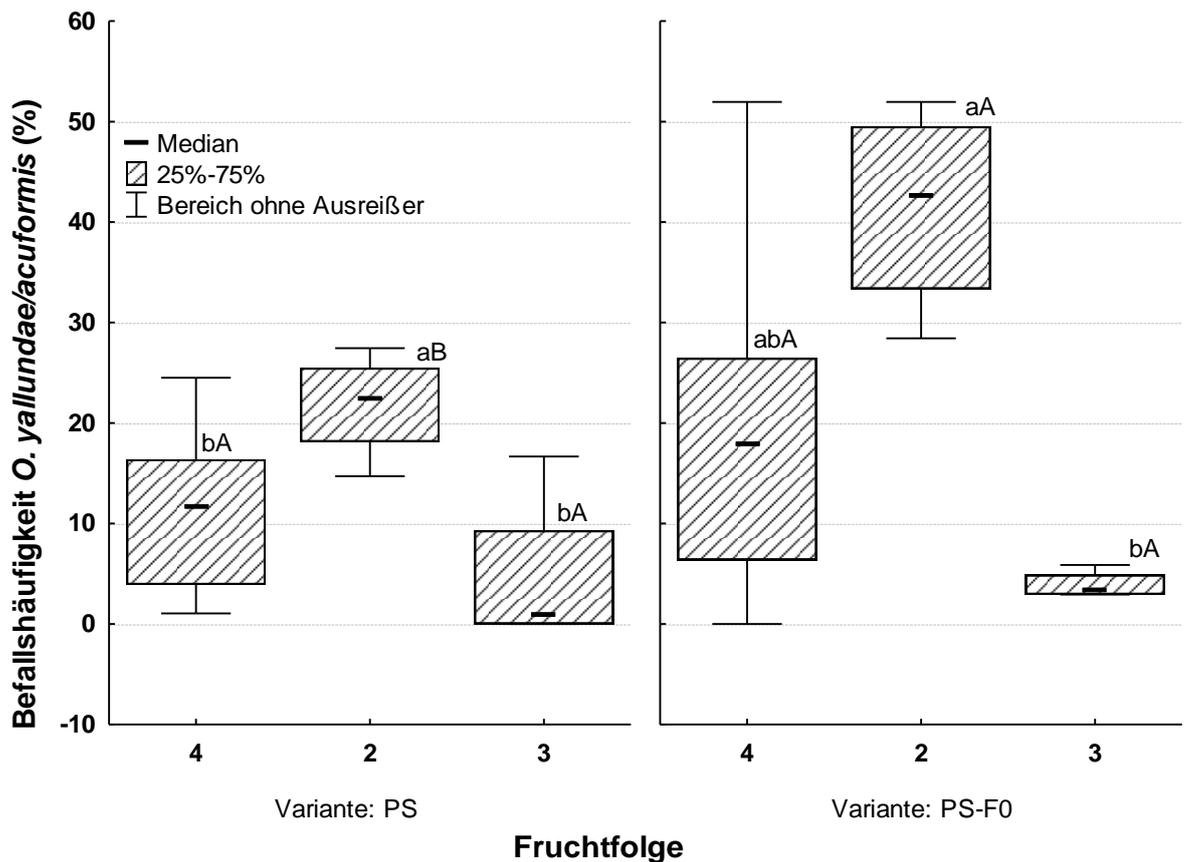


Abb. 29: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in 3 verschiedenen Energiefruchtfolgen in den Varianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) am Standort in Rostock im Jahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen (kleine Buchstaben) bzw. zwischen den Pflanzenschutzmaßnahmen innerhalb der Fruchtfolge (Großbuchstaben) auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Kruskal-Wallis Test, $n = 4$ für FF3 und FF2, $n = 8$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Der Vergleich der beiden Pflanzenschutzvarianten zeigt deutlich, dass die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* in Rostock in den Fruchtfolgen 4 und 2 durch die Fungizidmaßnahme um ca. die Hälfte reduziert wurden, was sich für die Fruchtfolge 2 statistisch absichern ließ (Abb. 29).

Der Unterschied der Fruchtfolgen in den Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 zeigte sich am Standort in Göttingen für die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* noch deutlicher als am Standort in Rostock. In der Variante PS-F0 der Fruchtfolge 3 wurde kein und in der Variante PS nur ein sehr geringer Befall (0,25%) mit *O. yallundae/acuformis* diagnostiziert. Auch die Befallshäufigkeiten in den Varianten PS und PS-F0 der Fruchtfolge 4 lagen mit 2,92% (PS) und 5,39% (PS-F0) auf einem niedrigen Niveau. Die Fruchtfolge 2 zeigte in beiden Pflanzenschutzvarianten hingegen den signifikant höchsten Befall: 12,53% in der Variante PS und 26,31% in Variante PS-F0 (Abb. 30). Tendenziell führte die Fungizidapplikation zu einer Reduktion der Befallshäufigkeit um ca. 50%, was sich allerdings nicht statistisch absichern ließ.

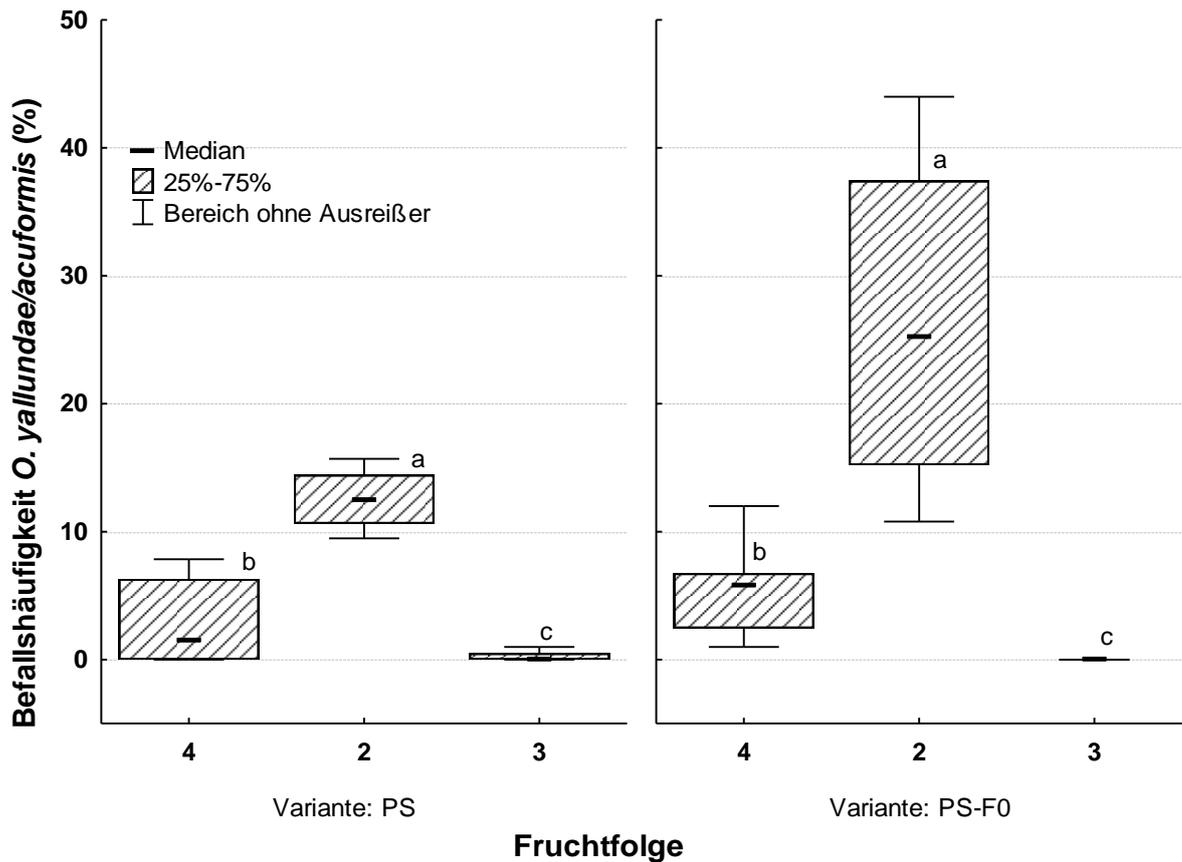


Abb. 30: Lage und Verteilung der Befallshäufigkeit (%) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur im Entwicklungsstadium der späten Milchreife (ES 77) in 3 verschiedenen Energiefruchtfolgen in den Varianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) am Standort in Göttingen im Jahr 2011. Verschiedene Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen auf dem Niveau $\alpha = 0,05$ nach dem Kruskal-Wallis Test, $n = 4$ für FF3 und FF2, $n = 8$ für FF4 (früh und spät ausgesäeter Weizen).

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen.

Der Befall nahm von der Fruchtfolge 4 zur Fruchtfolge 2 im Mittel der Pflanzenschutzvarianten um den Faktor 4,9 zu. Die Auflockerung der Fruchtfolge, wie sie durch die Fruchtfolge 3 im Vergleich zu Fruchtfolge 2 repräsentiert wurde, führte in der Variante PS-F0 zu einer 100%-igen Befallsreduktion des Halmbrucherregers. Die Fungizidmaßnahme zeigte hinsichtlich dieses Pathogens keine Wirkung in der Fruchtfolge 3.

Tabelle 11 zeigt zusammenfassend die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* der Varianten PS und PS-F0 in den verschiedenen Energiefruchtfolgen und die Reduktion der Befallshäufigkeit in Form eines Divisors beim Wechsel von Fruchtfolge 2 mit der höchsten Befallshäufigkeit hin zu den Fruchtfolgen 3 und 4 bzw. zwischen den Varianten PS und PS-F0.

Tab. 11: Mittlere Befallshäufigkeiten (%) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen nach visueller Bonitur der Halmbasis zur späten Milchreife (ES 77) in den Pflanzenschutzvarianten Fungizid Null (PS-F0) und situationsbezogene Referenz (PS) in den Fruchtfolgen 2, 3 und 4 an den Standorten Göttingen und Rostock im Jahr 2011. Dargestellt sind die prozentualen Reduktionen der Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* ausgehend von Fruchtfolge 2 hin zu den Fruchtfolgen 2 und 3 in Form eines Divisors.

Ort	Variante	Fruchtfolge			
		Früchte	2	3	4
	Anteil in der FF	Weizen-Raps	Raps-Zwfr./Mais-sWeizen	Raps-fWeizen-Zwfr./Mais-sWeizen	
Göttingen	PS-F0	26,31%	0,00% ↓ 100%	5,39% ↓ 4,9	
	PS	↓ 2,1	~	~	
Rostock	PS-F0	12,53%	0,25% ↓ 98%	2,92% ↓ 4,3	
	PS	41,42%	3,92% ↓ 10,6	19,20% ↓ 2,2	
		↓ 1,9	~	↓ 1,7	
		21,81%	4,66% ↓ 4,7	11,22% ↓ 1,9	

↓, Divisor bzw. prozentuale Reduktion zwischen der Befallshäufigkeit von FF2 zu FF3 bzw. FF4, bzw. zwischen den Varianten PS und PS-F0; ~, kein Effekt; FF = Fruchtfolge; fWeizen = frühgesäter Weizen; sWeizen = spätgesäter Weizen, n = 4 für FF3 und FF2, n = 8 für FF4.

Die Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* wurden stärker durch den Fruchtfolgewechsel reduziert als durch eine Fungizidapplikation innerhalb der Fruchtfolgen. Der Vergleich von Fruchtfolge 2 und 3 zeigte im Mittel eine fast vollständige Befallsreduktion und der Unterschied zwischen Fruchtfolge 2 und 4 betrug einen Divisor von ca. 4,5 am Standort in Göttingen bzw. 2 am Standort in Rostock. Durch die Fungizidmaßnahme wurden die Befallshäufigkeiten in Fruchtfolge 2 (beide Standorte) und 4 (Rostock) halbiert. Die Befallswerte von *O. yallundae/acuformis* in den untersuchten Pflanzenschutzvarianten der einzelnen Fruchtfolgen zeigten für das Jahr 2011 vergleichbare Unterschiede zu den hier aufgeführten Befallshäufigkeiten. Die Befallswerte lagen jedoch auf einem wesentlich niedrigeren Niveau (Tab. 4A im Anhang).

Die vorangegangene Ergebnisbetrachtung macht deutlich, dass im letzten Untersuchungsjahr deutliche Unterschiede zwischen den Energiefruchtfolgen auftraten. Es wurden jeweils die Effekte in den Untersuchungsjahren 2010 und 2011 getrennt dargestellt, da der Fruchtfolgeeffekt ein kumulativer Langzeiteffekt ist und noch nicht genügend Untersuchungsjahre zur Verfügung standen. Neben den erwähnten Unterschieden ist aber die Größe des Fruchtfolgeeinflusses auf die Befallshäufigkeit im Vergleich zu den anderen ermittelten Faktoren von Bedeutung. Da der Jahreseffekt ein wichtiger Einflussfaktor ist, wird er bei der folgenden varianzanalytischen Betrachtung für das hohe Befallsaufkommen von *Fusarium spp.* mit berücksichtigt. Hierüber soll eine erste Gewichtung des Fruchtfolgeeffekts im Jahresverlauf stattfinden. Tabelle 12 zeigt die Varianztabelle der Zielvariable Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* in den beiden Untersuchungsjahren 2010 und 2011 an den Standorten Göttingen und Rostock. Die Varianztabelle wurde mit Hilfe des Allgemeinen linearen Modells (GLM) über Verrechnung mit dem Chi-Quadrat-Test ermittelt.

Tab. 12: Varianztabelle für die Befallshäufigkeit (%) von *Fusarium spp.* an den Standorten in Göttingen und Rostock in den Versuchsjahren 2010 und 2011. Die Daten wurden untransformiert als Allgemeines lineares Model (GLM) verrechnet und die Varianztabelle über den Chi-Quadrat-Test ermittelt. Dargestellt sind die vier Einflussgrößen und die daraus resultierenden Interaktionskomponenten. Effekte sind signifikant bei einem Wert $p \leq 0,05$ (hoch signifikant bei $p \leq 0,01$, höchst signifikant bei $p \leq 0,001$).

Ort	Effekt	Freiheitsgrad	Abweichung der Residuen	P-Wert
Göttingen	Null		10,54	
	FF	2	8,63	0,000
	PS	3	8,38	0,077
	Erntejahr	1	6,35	0,000
	bhPH	1	5,12	0,000
	FF:PS	6	4,75	0,0120
	FF:Erntejahr	2	4,52	0,045
	FF:BhPH	2	4,00	0,001
Rostock	Null		34,13	
	FF	2	32,02	0,001
	PS	3	31,92	0,882
	Erntejahr	1	24,33	0,000
	bhPH	1	21,69	0,000
	FF:PS	6	21,47	0,958
	FF:Erntejahr	2	16,97	0,000
	FF:BhPH	2	16,42	0,141

FF: Fruchtfolge, PS: Pflanzenschutz, bhPH: Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis*, $n = 128$ je Standort.

Es wird deutlich, dass neben dem Effekt der Fruchtfolge auch der Jahreseinfluss eine hochsignifikante Auswirkung ($p \leq 0,001$) auf die Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* hatte. Dabei zeigte sich weiterhin eine signifikante Interaktion zwischen den verschiedenen

Fruchtfolgen und dem Jahreseinfluss. Bei der Gesamtvarianzanalyse über die Jahre 2010 und 2011 wurde auch der Einfluss des Befalls mit Halmbruch auf den Befall mit *Fusarium spp.* berücksichtigt. An beiden Standorten konnte ein hochsignifikanter Einfluss ($p \leq 0,001$) des Befalls mit Halmbruch auf den Befall mit Halmbasisfusarium festgestellt werden (Tab. 12).

Zur Gewichtung des Effektes der Fruchtfolge wurden die prozentualen Anteile der Abweichungsquadrate der Residuen an der Gesamtsumme der Abweichungsquadrate der Residuen aus der Varianztabelle aller Einflussfaktoren über die beiden Untersuchungsjahre jeweils für die Standorte Rostock und Göttingen berechnet (Tab. 13).

Tab. 13: Anteil der Abweichungsquadrate der Residuen (%) von der Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* an der Gesamtsumme der Abweichungsquadrate an den Standorten in Rostock und Göttingen in den Untersuchungsjahren 2010 und 2011. Dargestellt sind die einzelnen Versuchsfaktoren mit ihren jeweiligen Anteilen an der Gesamtvarianz der Befallshäufigkeit an Weizen.

Ort	Einflussfaktor	Anteil an der Gesamtsumme der Abweichungsquadrate (%)
Göttingen	FF	18,11
	PS	2,38
	Erntejahr	19,25
	bhPH	11,66
	FF:PS	3,52
	FF:Erntejahr	2,16
	FF:bhPH	4,89
	Fehler	38,03
Gesamt		100
Rostock	FF	6,21
	PS	0,28
	Erntejahr	22,26
	bhPH	7,72
	FF:PS	0,63
	FF:Erntejahr	13,19
	FF:bhPH	1,6
	Fehler	48,09
Gesamt		100

FF: Fruchtfolge, PS: Pflanzenschutz, bhPH: Befallshäufigkeit mit *O. yallundae/acuformis*.

Tabelle 13 zeigt die prozentualen Anteile der Einflussfaktoren auf die Gesamtsumme der Abweichungsquadrate der Residuen. Dabei hat an beiden Orten jeweils das Erntejahr mit ca. 19 bzw. 22% die höchsten Anteile an der Abweichungssumme. Nachfolgend zeigte von den Hauptfaktoren die Fruchtfolge mit 18,11 bzw. 6,21% den zweithöchsten Beitrag zur Gesamtsumme der Abweichungsquadrate der Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* Hier wurde wieder der große Unterschied zwischen den Standorten in Rostock und Göttingen deutlich. Am Standort in Göttingen wies die Fruchtfolge, nach dem Jahreseffekt, den mit

Abstand größten Einfluss auf. Am Standort in Rostock hatte die Fruchtfolge nur den viertgrößten Anteil an der Gesamtsumme der Abweichungsquadrate. Zweitgrößten Effekt hatte hier die Interaktion aus Fruchtfolge und Erntejahr. In den beiden Untersuchungsjahren reagierten die Fruchtfolgen im Hinblick auf den Fusariumbefall unterschiedlich. Daran zeigte sich, dass auch am Standort Rostock die Hauptfaktoren Fruchtfolge und Erntejahr, bzw. ihre Interaktion den größten Einfluss auf die Abweichungsquadrate haben. Weiterhin wurde deutlich, dass an beiden Versuchsstandorten der Befall *O. yallundae/acuformis* einen großen Einfluss (11,66 bzw. 7,72%) auf den Befall mit *Fusarium spp* hatte. Von den Hauptfaktoren hatte der Pflanzenschutz den geringsten Anteil an der Gesamtsumme der Abweichungsquadrate mit 2,38 bzw. 0,28%. Die Interaktionen aus Fruchtfolge und Pflanzenschutz bzw. Fruchtfolge und Befall mit dem Halmbrucherreger waren eher gering.

Korrelation zwischen dem Befall mit *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis*

Die Analyse der Gesamtabweichung der Residuen machte deutlich, dass der Befall mit *O. yallundae/acuformis* einen deutlichen Einfluss auf die Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* hatte. In Abbildung 31 ist der lineare Zusammenhang zwischen den Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* an den Standorten in Rostock und Göttingen in den Jahren 2010 und 2011 dargestellt.

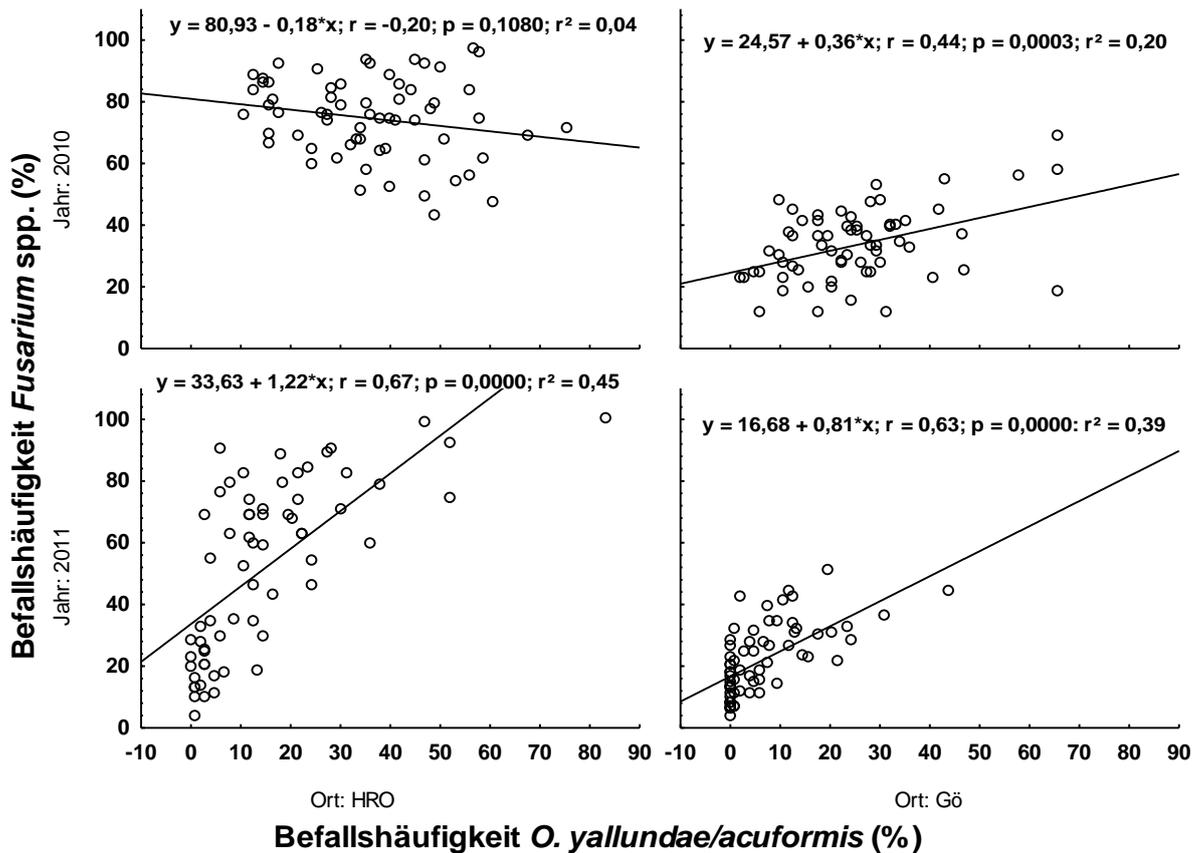


Abb. 31: Lineare Regression zwischen der Befallshäufigkeit mit *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis* an Weizen zur späten Milchreife (ES 77) an den Standorten in Rostock (links) und Göttingen (rechts) in den Jahren 2010 (oben) und 2011 (unten). Zur Ermittlung der p-Werte wurde der globale F-Test verwendet ($p \leq 0,05$).

$R^2 =$ Bestimmtheitsmaß, $r =$ Lineare Regression, $n = 64$.

Die linearen Regressionen zwischen der Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* zeigen, dass nur für das Jahr 2011 ein starker Zusammenhang zwischen den beiden Parametern ermittelt werden konnte. Das Bestimmtheitsmaß betrug für den Standort in Rostock $r^2 = 0,45$ und für den Standort in Göttingen $r^2 = 0,39$. Dieser Zusammenhang war in beiden Fällen statistisch absicherbar. Die Werte zeigten am Standort in Rostock eine größere Streuung, was noch einmal die teilweise sehr hohen Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* (bis 100%) und *O. yallundae/acuformis* (über 80%) in einzelnen Parzellen verdeutlicht. Dabei wiesen die einzelnen Fruchtfolgen Unterschiede auf. Die stärksten Korrelationen wurden in den Fruchtfolgen 2 und 4 festgestellt, wohingegen die schwächsten in der Fruchtfolge 3 ermittelt wurden.

3.1.3 Mykotoxingehalte in Korn- und Stängelbasisproben von Winterweizen der Jahre 2010 und 2011

2010

Die Mykotoxinanalysen der Korn- und Halmbasisproben von Winterweizen des Jahres 2010 ergaben, dass die Kornproben nur marginale Belastungen mit DON aufwiesen. Die beprobten Halmbasisabschnitte hingegen wiesen mittlere (Fruchtfolge 4) bis erhöhte Kontaminationen (Fruchtfolge 2 und 3) auf. Die mittleren DON-Gehalte von Korn- und Basisproben aus Fruchtfolge 4 waren im Vergleich zu den Fruchtfolgen 2 und 3 am geringsten, was aber nicht statistisch absicherbar war. Die Pflanzenschutzmaßnahme wies hingegen einen signifikanten Einfluss auf den Toxingehalt auf. In der nicht behandelten Variante PS-F0 war der DON-Gehalt im Vergleich zur behandelten Variante PS doppelt so hoch. Der mittlere DON-Wert der Halmbasis in der Variante PS-F0 zeigte einen erhöhten Gehalt von über 1000 µg/kg TM (Tab 14).

Tab. 14: DON-Gehalte (µg/kg TM) in Halmbasis- und Kornproben der Fruchtfolgen 2, 3 und 4 bzw. in Abhängigkeit der Pflanzenschutzvarianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) an den Standorten in Göttingen und Rostock im Jahr 2010. Abweichende Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede nach dem Kruskal-Wallis Test ($p \leq 0,05$). Großbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen und klein geschriebene Buchstaben zwischen den Varianten PS und PS-F0 innerhalb der Fruchtfolgen. Der DON-Nachweis erfolgte durch einen ELISA-Test.

Fruchtfolge	Variante	Halmbasis	Korn
2		1084,50 A	5,48
	PS	598,02 a	10,96
	PS-F0	1570,99 a	0,00
3		964,37 A	4,08
	PS	693,98 a	3,76
	PS-F0	1234,77 a	4,40
4		547,75 A	3,59
	PS	347,14 a	1,60
	PS-F0	748,37 a	5,08
Mittel der FF		786,10	4,02
	PS	496,57 a	3,91 a
	PS-F0	1075,62 b	4,12 a

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; n = 16 für Basis Fruchtfolge 2 und 3; n = 32 für Basis Fruchtfolge 4, Basis PS und PS-F0, n = 8 für Korn Fruchtfolge 2, n = 6 für Korn Fruchtfolge 3, n = 28 für Korn FF 4, n = 19 für Korn PS und n = 23 für PS-F0.

2011

Im Untersuchungsjahr 2011 wurden am Standort in Rostock und Göttingen Kornproben in den Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 untersucht. Zusätzlich wurde am Standort Göttingen die Weizenstoppel in den verschiedenen Fruchtfolgen der Varianten PS und PS-F0 auf eine Mykotoxinbelastung hin analysiert. Da am Standort Rostock im Jahr 2011 leicht erhöhte Mykotoxinwerte in den Kornproben festgestellt wurden, werden die Ergebnisse der Untersuchungen der Kornproben nach Standorten getrennt aufgeführt (Tab. 15).

Tab. 15: DON-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg}$ TM) in Halmbasisproben (Göttingen) und Kornproben (Göttingen und Rostock) der Fruchtfolgen 2, 3 und 4 bzw. in Abhängigkeit der Pflanzenschutzvarianten situationsbezogener Pflanzenschutz (PS) und Fungizid Null (PS-F0) im Jahr 2011. Abweichende Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede nach Kruskal-Wallis Test ($p \leq 0,05$). Großbuchstaben kennzeichnen Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen und klein geschriebene Buchstaben zwischen den Varianten PS und PS-F0 innerhalb der Fruchtfolgen. Der DON-Nachweis erfolgte durch einen ELISA-Test.

Fruchtfolge	Variante	Basis	Korn HRO	Korn Gö	Mittel Korn
2		4244,05 A	52,19 A	12,45	30,51
	PS	3064,18 a	10,01 a	0,00	4,00
	PS-F0	5423,93 a	80,32 a	24,90	52,61
3		2490,52 A	224,75 A	0,00	112,38
	PS	1507,49 a	107,76 a	0,00	43,10
	PS-F0	3473,54 a	283,25 a	0,00	161,86
4		5023,01 A	41,05 A	7,35	24,19
	PS	3738,94 a	40,21 a	4,49	82,33
	PS-F0	6307,09 a	41,88 a	10,63	26,26
Mittel der FF		4195,15	87,36	6,85	63,57
	PS	3012,39 a	47,00 a	2,56	43,14
	PS-F0	5377,91 b	119,08 a	11,47	80,24

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; n= 4 für Basis Fruchtfolge 2 und 3; n= 8 für Basis Fruchtfolge 4 in PS und PS-F0.

Die in Tabelle 15 aufgeführten DON-Gehalte machen deutlich, dass die Halmbasis am stärksten mit Mykotoxinen kontaminiert war. Die DON-Gehalte variierten von 1507,49 μg DON/kg TM in Fruchtfolge 3 der Variante PS bis 6307,09 μg DON/kg TM in der Fruchtfolge 4 der Variante PS-F0. Demnach zeigte die Fruchtfolge 3 mit Fungizidbehandlung im Vergleich zur Fruchtfolge 4 ohne Fungizidmaßnahme einen erhöhten Toxingehalt der Basis. Der Unterschied betrug einen Faktor von 4,2. Dies war nicht statistisch absicherbar. Gemittelt über die Pflanzenschutzmaßnahmen PS und PS-F0 wurden die niedrigsten Gehalte in der Fruchtfolge 3 (2490,52 μg DON/kg TM) und die höchsten in der Fruchtfolge

4 (5023,10 µg DON/kg TM) festgestellt. Das Mittel für die Varianten PS (3012,39 µg DON/kg TM) und PS-F0 (5377,91 µg DON/kg TM) über die Fruchtfolgen zeigte, dass die Fungizidbehandlung zu einer signifikanten Absenkung des Toxingehalts der Halmbasis führte. Diese betrug fast 50%. Im starken Kontrast hierzu standen die DON-Kontaminationen der Kornproben. Sie lagen weit unter den Werten der Halmbasisgehalte. Die Gehalte in Göttingen waren niedrig, hier konnten keine Tendenzen oder Unterschiede abgeleitet werden. Am Standort Rostock wurden leicht erhöhte DON-Werte in den Kornproben der Fruchtfolge 3 (224,75 µg DON/kg TM) nachgewiesen. In Fruchtfolge 2 und 4 waren die Werte mit im Mittel 52,19 und 41,05 µg DON/kg TM eher gering. Auch hier zeigte die Fungizidbehandlung eine reduzierende Wirkung auf den DON-Gehalt in den Fruchtfolgen 2 und 3, was nicht statistisch absicherbar war. Das Mittel der DON-Gehalte aus Korn- und Halmbasisproben zeigte, dass die Fruchtfolge 3 die geringsten DON-Gehalte (1063,63 µg/kg TM) aufwies. Für die Fruchtfolgen 2 und 4 ließen sich fast doppelt so hohe Gehalte (ca. 1800 µg DON/kg TM) ermitteln.

3.1.4 Vorkommen von *Fusarium spp.* an der Halmbasis und Toxinbelastung von Grünroggen aus den Feldversuchen (Standort Göttingen)

Am Standort in Göttingen wurde die Zwischenfrucht Grünroggen (vor dem Maisanbau in den Fruchtfolgen 3 und 4) auf den Besatz mit *Fusarium*arten und die Kontamination der Ganzpflanze mit Mykotoxinen im ES 51 analysiert. Hauptsächlich wurden die ubiquitären Saprophyten *Alternaria spp.*, *Eppicoccum spp.* und *Cladosporium spp.* gefunden (38,8% der Halmbasisproben). *Penicillium spp.* trat fast bei jeder Isolation mit auf, wurde aber nicht weiter berücksichtigt.

2010

Am häufigsten trat im Jahr 2010 *Microdochium* spp. aus dem Komplex der frühen Halmbasiserreger auf (21,6%). Von den untersuchten Halmbasisabschnitten konnte nur an ca. 5% *Fusarium* spp. gefunden werden. Hierbei war *F. culmorum* der häufigste Vertreter (Tab. 16). Aufgrund der geringen Anzahl an Isolaten wurde auf eine Berechnung der Einflüsse der Fruchtfolge auf das Fusariumartenspektrum verzichtet.

Tab. 16: Anhand der Sporenmorphologie detektiertes Artenspektrum von *Fusarium* an der Halmbasis von Grünroggen zum Entwicklungsstadium des Ährenschiebens (ES 51) im Feldversuch am Standort in Göttingen im Jahr 2010.

Erreger	Anzahl	Prozent
<i>Fusarium</i> spp.	17	5,3
<i>F. culmorum</i>	7	2,2
<i>F. graminearum</i>	3	0,9
<i>F. oxysporum</i>	2	0,6
<i>F. tricinctum</i>	2	0,6
<i>F. sporotrichoides</i>	3	0,9
<i>Microdochium</i> spp.	69	21,6

n = 320.

Die Toxinanalysen ergaben eine schwache Belastung der Grünroggenbiomasse von im Mittel 86,87 µg DON/kg TM. Eine Quantifizierung der toxigenen Fusariumarten *F. culmorum* und *F. graminearum* in der Halmbasis von Grünroggen durch die qPCR blieb daher erfolglos.

2011

Im Jahr 2011 konnte an 44 Halmbasisabschnitten des Grünroggens *Fusarium* spp. gefunden werden. Somit waren 13,75% der untersuchten Halmbasen mit *Fusarium* spp. befallen, mehr als doppelt so viele wie im Jahr 2010. Der häufigste Erreger war *F. tricinctum* mit einer Befallshäufigkeit von 6,25%, gefolgt von *F. culmorum* mit 4,69%. Zusätzlich konnten vier weitere Arten isoliert werden, ihre Befallshäufigkeit lag aber unter 1% (Tab. 17). Die Aufteilung der nachgewiesenen Erregeranzahlen und der Befallshäufigkeiten auf die Fruchtfolgen 3 und 4 macht deutlich, dass in der Fruchtfolge 3 mehr *Fusarium* spp. reisoliert wurde als von den Halmbasisabschnitten der Fruchtfolge 4. Dies zeigt sich auch für den am häufigsten isolierten Erreger *F. tricinctum*. Hier wurden fast doppelt so viele Isolate gefunden. Insgesamt war die Anzahl gefundener Arten zu gering, um eine statistische Berechnung des Einflusses der Fruchtfolge auf die Artenzusammensetzung vorzunehmen. Da nur an 5% der untersuchten Halmbasen die

DON-produzierenden Arten *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* detektiert wurden, wurde auf eine Toxinanalyse der gesamten Biomasse verzichtet.

Tab. 17: Anhand der Sporenmorphologie detektiertes Artenspektrum von Fusarium an der Halmbasis von Grünroggen zum Entwicklungsstadium des Ährenschiebens (ES 51) in den verschiedenen Fruchtfolgen des Feldversuchs am Standort in Göttingen im Jahr 2011.

Erreger	FF3		FF4		Insgesamt	
	Anzahl	%	Anzahl	%	Anzahl	%
<i>Fusarium spp.</i>	25	15,63	19	11,88	44	13,75
<i>F. tricinctum</i>	13	8,13	7	4,75	20	6,25
<i>F. culmorum</i>	7	4,38	8	5	15	4,69
<i>F. avenaceum</i>	1	0,63	2	1,25	3	0,94
<i>F. graminearum</i>	0	0	2	1,25	2	0,63
<i>F. poae</i>	2	1,25	0	0	2	0,63
<i>F. equiseti</i>	2	1,25	0	0	2	0,63
<i>M. nivale</i>	15	9,38	12	7,5	27	8,44

Fruchtfolge: 2 = Raps-früher Weizen; 3 = Raps-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; 4 = Raps-früher Weizen-Zwischenfrucht/Mais-später Weizen; n = 320.

3.1.5 DON-Gehalt in Maisproben aus den verschiedenen Fruchtfolgen am Standort in Göttingen

Mais gilt als guter Wirt für viele Vertreter der Gattung *Fusarium*. Daher wird in der Tabelle 18 die Belastung von Mais mit DON in den verschiedenen Fruchtfolgen aufgeführt. Dies dient einer weiteren Bewertung der untersuchten Energiefruchtfolgen in Hinblick auf die Toxinbelastung des Pflanzenmaterials. Die Infektion mit toxigenen Vertretern aus der Gattung *Fusarium* führte zu erheblichen DON-Belastungen des Pflanzenmaterials von Mais.

Tab. 18: DON-Gehalt ($\mu\text{g}/\text{kg TM}$) in Ganzpflanzenproben von Mais der verschiedenen Fruchtfolgen aus dem Feldversuch am Standort in Göttingen zum Zeitpunkt der Siloreife des Mais in den Versuchsjahren 2010 und 2011. Der DON-Nachweis erfolgte mittels ELISA-Test.

Jahr	Fruchtfolge	DON ($\mu\text{g}/\text{kg TM}$)
2010		619,33
	1	568,36
	3	592,48
	4	697,15
2011		1186,57
	1	1816,26
	3	1403,98
	4	339,48
Gesamtergebnis		902,95

1 = Mais in Monokultur, 3 = Mais nach Raps, 4 = Mais nach Weizen,
n = 4.

Die Untersuchungen machten deutlich, dass in den Untersuchungsjahren 2010 und 2011 erhöhte Mengen an DON in Mais als Ganzpflanze gefunden wurden. Dabei konnten im letzten Untersuchungsjahr 2011 fast doppelt so hohe Mengen an Toxin (619,33 $\mu\text{g DON}/\text{kg TM}$ zu 1186,57 $\mu\text{g DON}/\text{kg TM}$) festgestellt werden. Hier zeigten die Fruchtfolgen Unterschiede im DON-Gehalt. Für Mais in Monokultur (1816,26 $\mu\text{g DON}/\text{kg TM}$) konnte die höchste Belastung ermittelt werden. Der zweithöchste Gehalt ließ sich in Fruchtfolge 3 (1403,98 $\mu\text{g DON}/\text{kg TM}$) und der mit Abstand niedrigste Gehalt in Maisproben der Fruchtfolge 4 feststellen. Die Unterschiede ließen sich nicht statistisch absichern.

3.2 Anfälligkeit von Grünroggensorten gegenüber Halmbasisinfektionen mit *Fusarium spp.*

3.2.1. DON-Gehalt

In Gewächshausversuchen wurde die Ganzpflanzenkontamination mit Deoxynivalenol (DON) und die Pathogenbelastung durch die beiden toxigenen Erreger *F. culmorum* und *F. graminearum* in Grünroggen untersucht. Dabei ließen sich in den infizierten Varianten signifikant höhere Mykotoxinmengen feststellen (ca. 3000 µg/kg TM für beide Infektionsvarianten gemittelt) als in den nicht infizierten Kontrollen. In den Kontrollen zeigten sich leicht erhöhte Werte von DON, was auf eine Hintergrundkontamination der Erde mit *Fusarium spp.* schließen lässt. Die Grünroggensorte Borfuro war nahezu doppelt so stark mit DON belastet wie die herkömmliche Roggensorte. Demnach hatte die Sorte einen signifikanten Einfluss auf den DON-Gehalt des Grünroggens. So variierten die DON-Gehalte von 531,86 (µg/kg TM) in der Kontrollvariante der Sorte Askari bis über 4500 µg/kg TM in der mit *F. graminearum* infizierten Variante der Sorte Borfuro (Abb. 32). Die stärker belastete Sorte Borfuro zeigte einen signifikanten Unterschied der Infektionsvarianten im Vergleich zur Kontrolle. Hier war der DON-Gehalt zwischen der Kontrolle und der mit *F. graminearum* infizierten Variante um das 3,75-fache höher, wobei in Einzelproben dieser Variante bis über 9000 µg/kg TM DON feststellbar waren.

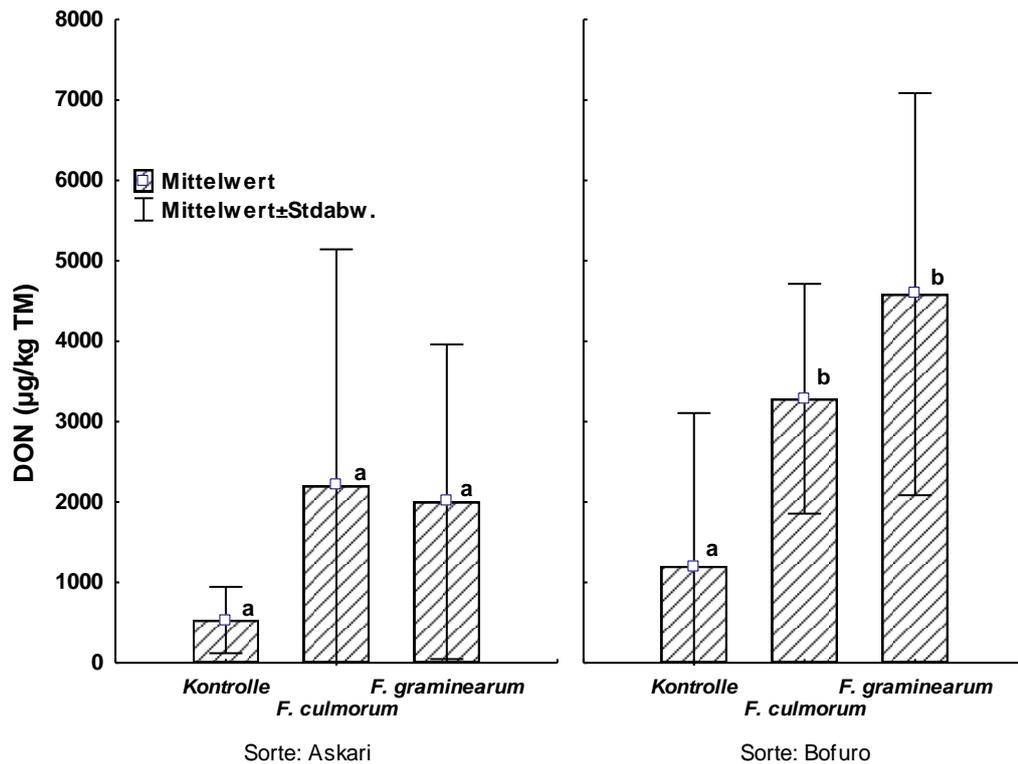


Abb. 32: Mittlere DON-Gehalte ($\mu\text{g}/\text{kg TM}$) in Grünroggen im Entwicklungsstadium der frühen Milchreife (ES 73) nach Infektion mit *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* durch ein Stroh-Boden-Inokulum unter kontrollierten Bedingungen im Gewächshaus, differenziert nach der Sorte (Askari und Bofuro). Unterschiedliche Buchstaben kennzeichnen signifikante Unterschiede nach LSD-Test ($p \leq 0,05$), $n = 10$. Der DON-Nachweis erfolgte mittels ELISA-Verfahren im gesamten Pflanzenaufwuchs.

3.2.2 DNA-Gehalt

Der Sortenunterschied wurde auch durch signifikant höhere DNA-Mengen von *F. graminearum* und *F. culmorum* deutlich. So war der DNA-Gehalt von *F. graminearum* in der Halmbasis von Bofuro mit $1017,2 \text{ pg}/\text{mg TM}$ mehr als doppelt so hoch wie bei Askari ($458,2 \text{ pg}/\text{mg TM}$). Der Nachweis von *F. culmorum* zeigte einen ähnlich deutlichen Sortenunterschied, welcher aber nicht statistisch absicherbar war. Die quantifizierten DNA-Werte waren mit $39,9$ (Askari) und $134,3 \text{ pg}/\text{mg TM}$ (Bofuro) wesentlich niedriger als die festgestellten Werte der DNA von *F. graminearum* (Tab. 19). In den Kontrollpflanzen konnte DNA von *Fusarium spp.* auf niedrigem Niveau nachgewiesen werden.

Tab. 19: DNA-Gehalt (pg/mg TM) von *Fusarium spp.* in der Halmbasis von Grünroggen (Sorten Askari und Borfuro) aus den Gewächshausversuchen im Entwicklungsstadium der frühen Milchreife (ES 73) nach Infektion mit *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* durch ein Stroh-Boden-Inokulum. Unterschiedliche Buchstaben in Spalten (klein) und Zeilen (groß) kennzeichnen signifikante Unterschiede nach LSD-Test ($p \leq 0,05$). Die DNA Quantifizierung erfolgte durch ein qPCR-Verfahren.

Variante	Sorte	
	Askari (pg/mg TM)	Borfuro (pg/mg TM)
<i>F. graminearum</i>	458,2 aA	1017,2 aB
Kontrolle (F.g.)	17,3 bA	3,1 aA
<i>F. culmorum</i>	39,9 aA	134,3 aB
Kontrolle (F.c.)	0,7 bA	20,6 aA

$n = 10$.

3.2.3 Pflanzliche Biomasse

Im Keimlingsstadium kam es zu erheblichen Pflanzenausfällen bei der Sorte Borfuro in der mit *F. graminearum* infizierten Variante. Bei der Bestimmung der pflanzlichen Biomasse wurden diese Ausfälle nicht berücksichtigt. Typische Befallssymptome, wie unspezifische Verbräunungen an der Halmbasis, konnten nicht festgestellt werden.

Tabelle 20 zeigt die mittleren Biomasseerträge der beiden Roggensorten Borfuro und Askari, inokuliert mit *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* in den Gewächshausversuchen. Die FM-Erträge variieren dabei von 61,66 g in der mit *F. graminearum* infizierten Variante der Sorte Askari bis 85,66 g in der entsprechenden Kontrollvariante. Die Varianzanalyse ergab signifikante Einflüsse der Sorte ($p = 0,033$) und der Variante ($p = 0,000$). Die Sorte Borfuro zeigte im Mittel der Varianten eine signifikant geringere Biomassebildung als die Sorte Askari. Eine Infektion mit *F. graminearum* führte zu einem signifikant geringeren Biomasseaufwuchs als eine Infektion mit *F. culmorum*. Beide Infektionsvarianten zeigten im Vergleich zur Kontrollvariante eine signifikante Reduktion der Biomasse im (Tab. 20).

Tab. 20: Mittlere Frischmasseerträge (FM) in g der Grünroggensorte Borfuro und der konventionellen Sorte Askari in Gewächshausversuchen im Entwicklungsstadium der frühen Milchreife (ES 73) nach Infektion mit *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* durch ein Stroh-Boden-Inokulum. Unterschiedliche Buchstaben in Spalten (klein) und Zeilen (groß) kennzeichnen signifikante Unterschiede nach LSD-Test ($p \leq 0,05$).

Variante	Sorte		Gesamtergebnis
	Askari	Borfuro	
<i>F. culmorum</i>	72,81 bA	64,07 bB	68,44 b
<i>F. graminearum</i>	61,66 cA	65,25 bA	63,46 c
Kontrolle	85,66 aA	78,93 aA	82,30 a
Gesamtergebnis	73,38A	69,42B	71,40

$n = 10$.

Die Sorten reagierten unterschiedlich auf die Infektion mit den beiden Fusariumarten. Die Sorte Borfuro zeigte im Vergleich der Infektion von *F. culmorum* mit *F. graminearum* keinen Unterschied bei der Biomassebildung. Die Sorte Askari hingegen wies bei einer Infektion mit *F. graminearum* signifikant weniger Aufwuchs an Biomasse auf als bei einer Infektion mit *F. culmorum*. Der Sortenvergleich innerhalb der Varianten machte deutlich, dass nur bei einer Infektion mit *F. culmorum* ein signifikanter Sortenunterschied festgestellt werden konnte. Die Sorte Borfuro bildete hier 12% weniger Biomasse als die Sorte Askari.

3.2.4 Auswirkungen von hoch DON-belastetem Grünroggen auf die Biogasbildung (Mini-Fermenterversuch)

Stark DON-kontaminierter Grünroggen (DON-Gehalt $>6000 \mu\text{g}/\text{kg TM}$) aus dem Gewächshausversuch mit künstlicher Infektion (3.2.1) wurde im Rostocker Aktivitätstest auf seine Biogasertragsleistung bzw. evtl. Hemmwirkungen hin getestet.

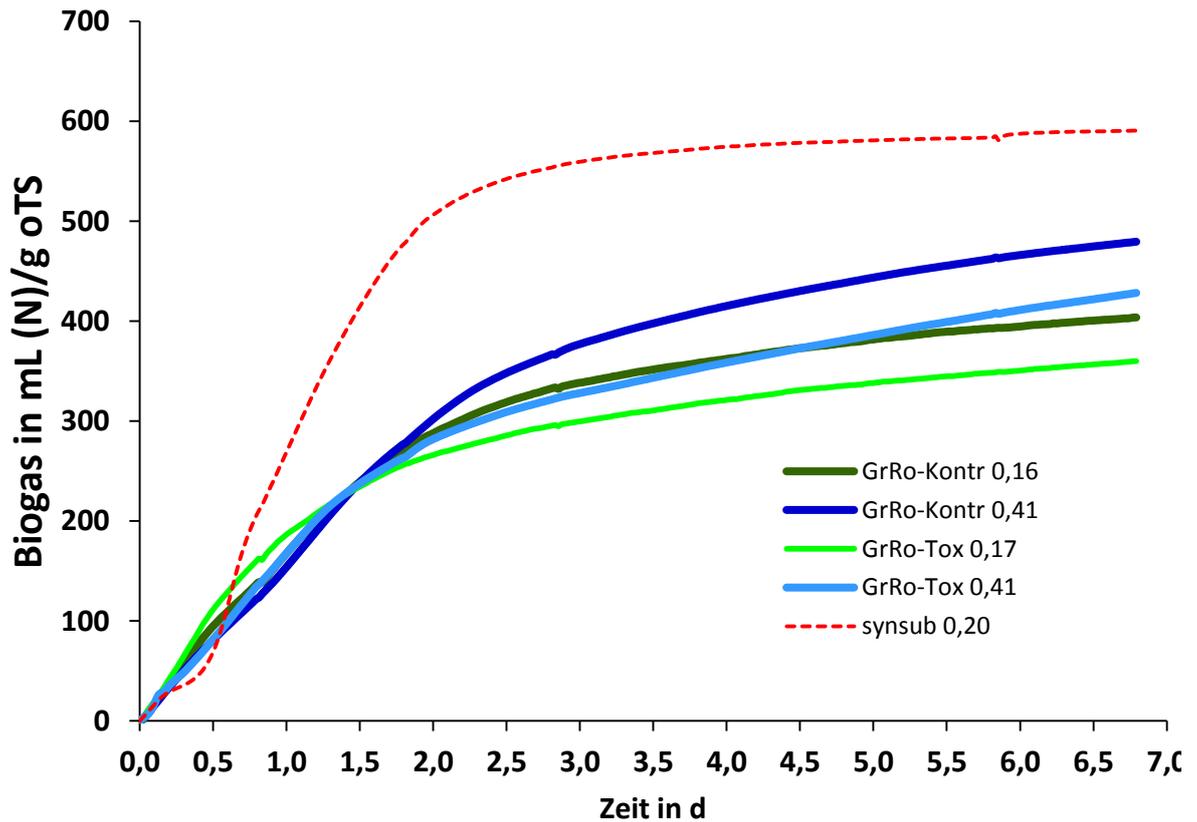


Abb. 33: Biogasproduktion (mL (N)/g oTS) im Mikrofermenter von mit DON belastetem Grünroggen (Ganzpflanze) in 2 Ausgangskonzentrationen (0,17 (hellgrün) bzw. 0,41 (hellblau) g oTS/g oTS Impfschlamm im Vergleich zu einer nicht kontaminierten Kontrolle in zwei verschiedenen Anfangskonzentrationen 0,16 (dunkelgrün) bzw. 0,41 (dunkelblau) g oTS/g oTS Impfschlamm. Zur Kontrolle des Gärprozesses wurde ein synthetisches Komplexsubstrat (rot) verwendet, welches die Gärleistung einer Maissilage simulieren soll.

Die Untersuchungen erfolgten nach der Methode des „Rostocker Aktivitätstest“ im Mini-Batchverfahren am Lehrstuhl für Abfall- und Stromwirtschaft der Agrar- und Umweltwissenschaftlichen Fakultät der Universität Rostock. Der belastete Grünroggen wies eine DON-Belastung von >6000 µg/kg TM auf und wurde aus den Gewächshausversuchen mit künstlicher Bodeninfektion durch toxische *Fusarium spp.* entnommen.

oTS: organische Trockensubstanz; Impfschlamm: Material aus einer Kläranlage zur Inokulation der Mini-Fermentation, n = 3.

Dabei wurden zwei Anfangskonzentrationen des kontaminierten Roggens getestet: 0,17 (hellgrün) und 0,41 (hellblau) g organische Trockensubstanz/g oTS Impfschlamm. Diese Proben wurden mit nicht kontaminierten Roggenproben in ähnlicher Konzentration, die als Kontrollen dienten verglichen: 0,16 (dunkelgrün) und 0,41 (dunkelblau) g oTS/g oTS Impfschlamm (Abb. 33). Das synthetische Komplexsubstrat (roter Graph) stellt hierbei das Idealsubstrat, ähnlich einer Maissilage, dar. Der theoretische Biogasertrag des

synthetischen Komplexsubstrates von 760 mL (N)/g oTS⁸ wurde nach sieben Tagen zu 78% erreicht. Da dies ein üblicher Wert ist, konnte keine Hemmung des Biogasprozesses durch Zugabe von kontaminiertem Grünroggen ermittelt werden (Engler 2011). Die Biogasertragskurven von der belasteten und der nicht belasteten Probe zeigten bei beiden Anfangskonzentrationen nahezu identische Verläufe. Es lässt sich in der Abbaukinetik keine akute Hemmung (Abfall der Kurve von der Kontrollprobe) erkennen. Die Messungen des Biogases für die Kontrollproben ergaben für die kleinere Anfangskonzentration eine akkumulierte Biogasausbeute von 403,70 und für die größere 479,52 mL (N)/g oTS. Die Erträge der kontaminierten Proben lagen bei 359,97 (niedrige Anfangskonzentration) bzw. 428,25 (hohe Anfangskonzentration) mL (N)/g oTS. Der Unterschied zwischen den akkumulierten Biogasausbeuten nach sieben Tagen zwischen kontaminierter und nicht kontaminierter Kontrolle betrug bei beiden Anfangskonzentrationen jeweils ca. 11%, was nicht statistisch absicherbar war. Eine starke Belastung mit DON in Grünroggen als Gärsubstrat reduzierte die Biogasausbeute nach sieben Tagen Testlaufzeit um 11% (Abb. 33).

⁸ Errechnet nach der Formel von Buswell (1936). Persönliche Mitteilung von Engler (2011).

4 Diskussion

Die Intensivierung von Fruchtfolgen in Deutschland aufgrund des steigenden Bedarfs an pflanzlicher Biomasse für die Energieproduktion führt zwangsläufig zu einer Zunahme von bodenbürtigen und fruchtfolgeabhängigen Krankheitserregern. Die Fruchtfolge und ihre Auswirkungen auf den Krankheitsbefall als effektives Mittel des vorbeugenden Pflanzenschutzes ist schon seit langer Zeit Gegenstand agrarwissenschaftlicher Forschung. So stellte Hollrung (1923, S. 54) in „Die Mittel zur Bekämpfung der Pflanzenkrankheiten“ heraus:

„Anlaß zu günstigen Ernährungsbedingungen für die Pflanzenparasiten bildet auch die unzweckmäßige Fruchtfolge. Je seltener die einem bestimmten Schädiger zusagende Nutzpflanze an der nämlichen Örtlichkeit zum Anbau kommt, um so ungünstiger gestalten sich für ihn die Ernährungsverhältnisse. (...) Im Lichte der Pflanzenheilkunde betrachtet ist eine Fruchtfolge dann als zweckmäßig zu bezeichnen, wenn in ihr die besonderen Nährpflanzen einen gegebenen Schädigers im Laufe von vier Jahren höchstens einmal erscheinen.“

Dies würde aus phytomedizinischer Sicht für alle Kulturen ein mindestens dreijähriges Anbauintervall fordern. Bereits seit den sechziger Jahren ist klar, dass diese Forderung für Halmfrüchte nicht zu erfüllen ist (Bockmann 1967, Bockmann 1968). Aus ökonomischen und logistischen Gründen wird der Anbau von Kulturen, welche für die Energiegewinnung am vorzüglichsten sind, weiter zunehmen. Durch eine geschickte Kombination der bedeutendsten Energiepflanzen Mais, Raps und Weizen sollte in dieser Untersuchung aufgezeigt werden, dass darin Potenziale zur Begrenzung von fruchtfolgebedingten Krankheiten liegen. Daher wurden vier Fruchtfolgen mit unterschiedlichen Anbauanteilen von Mais, Raps und Weizen hinsichtlich der wichtigsten Wurzel- und Halmbasiskrankheitserreger im Weizen auf Grundlage der Befallssituation im letzten Untersuchungsjahr bewertet. Die zweijährigen Erhebungen in den Jahren 2010 und 2011 machten deutlich, dass *Fusarium spp.* der dominierende Erreger an der Halmbasis war. Daher wurde in Halmbasis- und Kornproben von Winterweizen sowie in Ganzpflanzenproben von Mais die Belastung mit dem Mykotoxin DON festgestellt. Zusätzlich diente ein Gewächshausversuch mit zwei Roggensorten zur Feststellung der potenziellen Anfälligkeit von Grünroggen gegenüber toxischen *Fusarium*spezies. Mini-Batch-Versuche sollten des Weiteren klären, inwieweit toxinkontaminiertes Gärsubstrat die Biogasproduktion stören

kann. Auf Grundlage dieser Untersuchungen erfolgte die Bewertung der verschiedenen Energiefruchtfolgen. Neben der Fruchtfolgewirkung wurde vor allem das Pflanzenschutzregime und der damit einhergehende fruchtfolgebedingte Aussattermin in den verschiedenen Energiefruchtfolgen erstmalig untersucht. Da neben phytopathologischen auch herbologische Aspekte eine Rolle spielten, fand eine Beurteilung einer vierstufigen Pflanzenschutzvariante statt. Im Vordergrund der Untersuchungen standen die Auswirkungen der Fruchtfolgen auf die Halmbasisgesundheit von Weizen und das Vorkommen von Fusariummykotoxinen in der pflanzlichen Biomasse. Die Biomasserträge der verschiedenen Kulturen in den einzelnen Versuchsvarianten werden hier nicht diskutiert, da sie bei der ökonomischen Bewertung der Energiefruchtfolgen in einem gesonderten Teilprojekt des Verbundprojektes näher untersucht wurden. Aufgrund des Versuchsaufbaus und der niedrigen Befallsstärke der untersuchten Erreger in den beiden Untersuchungsjahren 2010 und 2011 wurden keine Berechnungen der Ertragswirksamkeit der Pathogene in den einzelnen Fruchtfolgen vorgenommen. Hierfür hätten die Fruchtfolgen *ceteris paribus* verglichen werden müssen. Sie wichen aber in wesentlichen pflanzenbaulichen Faktoren wie dem Aussattermin, der Bodenbearbeitung und der Düngung voneinander ab (Tab. 5A und 6A im Anhang), die einen entscheidenden Einfluss auf die Biomassebildung haben.

Im Folgenden werden die Ergebnisse diskutiert und in den Kontext der vorhandenen Literatur gestellt, um eine finale Aussage über die phytomedizinische Vorzüglichkeit der getesteten Energiefruchtfolgen zu treffen. Ferner werden Möglichkeiten aufgezeigt, um fruchtfolgebedingte Krankheiten durch erweiterte Anbaufolgen von Energiefrüchten zu reduzieren.

4.1 Vorkommen von Halmbasis- und Wurzelerkrankungen an Winterweizen in den Jahren 2010 und 2011

Die Untersuchungen an der Halmbasis und der Wurzel des Winterweizens in den Jahren 2010 und 2011 ergaben eher geringe Befallshäufigkeiten für *R. cerealis* und *G. graminis*. *R. cerealis* wurde nur in Einzelfällen gefunden und die Befallshäufigkeit lag jeweils unter 0,5%. Auf eine Auswertung der Daten von *R. cerealis* wurde daher ganz verzichtet. Diese niedrigen Befallshäufigkeiten deckten sich mit deutschlandweiten Bonituren an Halmbasen von Winterweizen. Kapoor & Hoffmann (1984a) stellten eine eher untergeordnete Rolle für *Rhizoctonia* sp. als Halmbasiserreger fest. Dennoch wird

Rhizoctonia sp. zu den Halmbasiserregern in Weizen gezählt. Eine Erklärung für die eher marginale Rolle von *R. cerealis* als Halmbasiserreger kann in der Dominanz von *Fusarium* spp. und *O. yallundae/acuformis* gesehen werden. Die Befallshäufigkeiten waren mit bis zu 100% für *Fusarium* spp. bzw. *O. yallundae/acuformis* in einzelnen Untersuchungspartellen sehr hoch. Diese Erreger findet man häufig in Vergesellschaftung (Brück & Schlösser 1982), wie es sich auch in dieser Studie durch die hohen Korrelationen im Jahr 2011 für *Fusarium* spp. und *O. yallundae/acuformis* ($r^2 = 0,45$ Standort Rostock und $r^2 = 0,39$ Standort Göttingen) zeigte. Zwischen diesen Erregern und *R. cerealis* ist eine Konkurrenzbeziehung zu Ungunsten von *R. cerealis* beschrieben, da *Fusarium* spp. und *O. yallundae/acuformis* toxische, diffusible Stoffe abgeben, welche das Myzelwachstum hemmen (Brück & Schlösser 1982; Kapoor & Hoffmann 1984b).

Für *G. graminis* konnten lediglich am Standort in Rostock im Jahr 2011 Standort- und Fruchtfolgeeinflüsse auf die Befallshäufigkeit festgestellt werden. Interessanterweise lag die Befallshäufigkeit von *G. graminis* im Jahr 2010 am Standort in Göttingen höher als in Rostock. Im Jahr 2011 hingegen wurde nur an 1,5% der untersuchten Wurzeln *G. graminis* am Standort in Göttingen diagnostiziert, wohingegen am Standort in Rostock über 20% der Wurzeln Symptome von *G. graminis* aufwiesen. Dies deckt sich mit den Analysen von (Heß 2006), welcher in Schleswig-Holstein und Mecklenburg-Vorpommern entlang der Küste erhöhte Befallswerte von *G. graminis* feststellte. Verbreitung findet dieser Erreger hauptsächlich auf Standorten mit leichten und sandigen Böden, wie sie in Rostock (lehmgiger Sand, Ackerzahl 45) vorherrschen (Mielke 1985). Der Standort in Göttingen hingegen ist ein typischer Börde- und somit Hohertragsstandort (Löss, Ackerzahl < 90). Den gewichteten Befallswerten für das Jahr 2010 entsprechend, war kein Unterschied zwischen den Standorten zu erkennen, diese lagen am Standort in Göttingen sogar etwas niedriger als am Standort in Rostock. Der Erreger tritt nesterweise auf (Mielke 1974) – findet daher unter befallsfördernden Bedingungen eine Infektion statt (Standort in Rostock), so wird sie zu einem stärkeren Befall an der Wurzel führen. Im Vergleich der Standorte schien dieser Erreger im Jahr 2010 in Göttingen häufiger vorgekommen zu sein. Er hatte aber weniger Auswirkungen auf die Befallsschwere. Im Jahr 2011 entsprachen Befallsschwere und -häufigkeit den Angaben aus der Literatur, die besagen, dass *G. graminis* verstärkt auf leichten, sandigen Böden anzutreffen sei. Dadurch konnte die signifikant höhere Befallshäufigkeit von *G. graminis* am Standort in Rostock im letzten Untersuchungsjahr erklärt werden. Der Standort in Göttingen zeichnet sich durch eine sehr hohe Bodengüte aus. Das Leinetal ist traditionell eine Region für Fruchtfolgen mit

Weizen und Zuckerrüben. Die guten Bodenverhältnisse und der Fruchtwechsel hin zu einer Blattfrucht in der Vorgeschichte des Versuchsstandorts Göttingen legen die Annahme nahe, dass hier das Inokulum von *G. graminis* als eher gering einzuschätzen ist.

Erhöhter Befall konnte hingegen für *O. yallundae/acuformis* und für *Fusarium spp.* festgestellt werden. Mit einer Befallshäufigkeit von 28% am Standort Göttingen bzw. 63% am Standort Rostock im Mittel der Jahre 2010 und 2011 war *Fusarium* die dominante Erregergruppe. Die gewichteten Befallshäufigkeiten der Boniturklassen 0 bis 3 nach Bockmann geben hier Auskunft über die Befallswerte. Danach ergaben sich für *Fusarium spp.* niedrige bis mittlere Werte von 8 (Göttingen) und 20 (Rostock). Dies relativierte die hohen Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* Bei den Untersuchungen trat ein signifikanter Standortunterschied auf. Auch Wegener (1996) konnte in seinen Erhebungen an verschiedenen Standorten eine Variation der Befallshäufigkeit von 10-100% für *Fusarium spp.* und *O. yallundae/acuformis* feststellen, wobei auch hier *Fusarium spp.* dominierte. Der enorme Standortunterschied zwischen Rostock und Göttingen bei *Fusarium spp.* könnte an den Boden- und Klimabedingungen liegen. Geringer Wassergehalt in der Pflanze und warme Witterung fördern den *Fusarium*-befall an der Halmbasis (Inglis & Cook 1986). Zusätzlich können die Überdauerungsformen von *F. culmorum* (Chlamydosporen) bei trocken-warmen Bedingungen wesentlich länger im Boden überdauern (Cook 1980). Die mittlere Temperatur der Vegetationsperiode lag am Standort in Rostock in den beiden Untersuchungsjahren ca. 0,2 bzw. 0,3°C über der Temperatur am Standort in Göttingen und die Bodentextur aus lehmigem Sand in Rostock lässt vermuten, dass die Wasserversorgung der Pflanzen schlechter war als in Göttingen. Die nutzbare Feldkapazität in Lehmböden wird allgemein als doppelt so hoch angesehen wie in Sandböden. Letztere bedingen daher schneller Trockenstress als die Erstgenannten. Da trockene Bodenbedingungen und pflanzlicher Wassermangel Halmbasisinfektionen mit *Fusarium spp.* begünstigen (Davis *et al.* 2009; Cook 1980) birgt der sandige Lehmboden am Standort in Rostock ein potenziell höheres Risiko für Halmbasisinfektionen mit *Fusarium*. Zusätzlich ist die Abbaurate der Chlamydosporen in eher trockenen Bodenverhältnissen reduziert (Cook 1980), was die höheren Infektionsraten in Rostock erklärt.

Witterungseinflüsse sind eine weitere Ursache für die Jahresunterschiede zwischen den Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* in Rostock und Göttingen. Die mittleren Befälle waren im Jahr 2011 (22% für Göttingen und 52% für Rostock) geringer als im Jahr 2010 (34% für Göttingen und 75% für Rostock). Der Herbst 2009 (9°C) war um ca. 1°C wärmer

als das Mittel der Jahre und auch wärmer im Vergleich zum Herbst 2010 mit 8,4°C (Deutscher Wetterdienst 2011). Diese Koinzidenz aus Witterungs- und Standorteinfluss spricht für eine erhöhte Erstinfektion der Keimlinge mit *Fusarium spp.*, welche in einer höheren Befallshäufigkeit mündete. Die teilweise sehr hohen Befallshäufigkeiten mit *Fusarium spp.* führten nicht zu einer bedeutenden Befallsschwere an beiden Standorten in beiden Jahren. Cook (1980) zeigte in seinen Untersuchungen zu Fusarium Halmbasis- und Wurzelerkrankungen (CRF) im Pazifischen Nordwesten der USA, dass es nur in Einzelfällen zu Starkbefall mit *F. culmorum* an der Halmbasis von Weizen und folgender Taubährigkeit bei jährlichen Niederschlagsmengen von unter 200-400 mm kam. Diese Niederschlagsmenge wurde mit ca. 400 mm in Rostock und ca. 450 mm in Göttingen allein für die Vegetationszeiten von Oktober bis Juli/August bereits weit überschritten. Führen die von Cook (1980) genannten Niederschlagsbedingungen in Herbst und Frühjahr zu einer hohen Infektionsrate durch *Fusarium spp.*, kann ein ausreichender Niederschlag nach dem bzw. zum Zeitpunkt des Ährenschiebens (ES 51) eine hohe Befallsstärke durch *Fusarium spp.* an der Halmbasis auch in trockenen Jahren verhindern (Cook 1980). Dies kann die hohen Befallshäufigkeiten mit *Fusarium spp.* von bis zu 100% in Einzelparzellen bei gleichzeitig relativ niedriger Befallsschwere mit einem Median von 17,9 (Rostock) bzw. 7,5 (Göttingen) erklären. Die ausreichende Wasserversorgung an den beiden Standorten über die Vegetationszeit verhinderte wahrscheinlich einen Starkbefall mit *Fusarium spp.* Eine starke Verbreitung der CRF Krankheit verursacht durch Erreger der Gattung Fusarium ist darüber hinaus nicht für die gemäßigten Klimate Mitteleuropas beschrieben, sondern eher für die trockenen Weizenanbaugebiete des Pazifischen Nordwestens (Cook 1968; Cook 1980; Smiley 1996), Australiens (Wildermuth *et al.* 1997; Smiley 1996) und des Mittleren Ostens (Fouly & Pedersen 1996). Unter den sich langfristig abzeichnenden Klimaveränderungen könnte in Mitteleuropa in Zukunft ein wärmeres und trockeneres Klima vorherrschen, welches in Einzeljahren die hohe Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* in einen Starkbefall umwandeln würde. Daher können die im Anschluss an diesen Abschnitt diskutierten Fruchtfolgeunterschiede Aufschluss über mögliche Anpassungsstrategien an eine gesteigerte Bedeutung von Fusariumerkrankungen der Halmbasis von Weizen durch sich ändernde Klimabedingungen geben.

Erhöhte Befallshäufigkeiten für *O. yallundae/acuformis* konnten nur im Jahr 2011 mit 25% am Standort in Göttingen bzw. 37% am Standort in Rostock ermittelt werden. Der Befallswert für *O. yallundae/acuformis* lag bei 6,5 (Göttingen) bzw. 11,3 (Rostock) im Jahr 2010 und 1,1 (Göttingen) und 3,3 (Rostock) im Jahr 2011. Ein Befallswert von

O. yallundae/acuformis von einem Wert kleiner 20 wird als niedrig angesehen (Schaaf 2010), somit war *O. yallundae/acuformis* in den Versuchsjahren 2010 und 2011 von geringer Bedeutung. Erst bei hohen Befallswerten mit starken Läsionsausprägungen des parasitären Halnbrucherregers kommt es zu ertragswirksamen Schäden (Ray 2006). Die geringe Befallsschwere und die teilweise sehr niedrigen Befallshäufigkeiten können durch die Witterung in den Vegetationsverläufen der Untersuchungsjahre erklärt werden. *O. yallundae/acuformis* ist sehr gut an die kühl-feuchte Klimate der gemäßigten Zonen angepasst. Die Studien mehrerer Autoren in Labor und Freiland ergaben, dass das Temperaturoptimum für die Sporenbildung und -entlassung aus den Sporenträgern zwischen 3-10°C liegt (Chang & Tyler 1964; Diercks 1966; Jørgensen 1964; Fehrmann & Schrödter 1971). In Weizenfruchtfolgen kann es schon im Herbst zu ersten Infektionen kommen. Folgt ein früher und langer Winter ist nicht mit einem hohen Infektionspotential zu rechnen. Es finden keine Masseninfektionen statt (Fehrmann & Schrödter 1971). Diese Witterungsbedingungen herrschten in den beiden Untersuchungsjahren vor. Nach einem relativ frühen Wintereinbruch, folgte eine lange Frostperiode im Januar/Februar bis teilweise in den März hinein. Dies führte zu einem späten Einsetzen des Vegetationsbeginns in den beiden Erntejahren 2010 und 2011, was die Erregerentwicklung im Bestand verzögerte. Der Witterungsverlauf der Monate April, Mai und Juni ist entscheidend für die Etablierung und massenhafte Vermehrung des Erregers im Bestand. Dabei spielen eine hohe relative Luftfeuchte, Niederschläge sowie Temperaturen von 10-16°C eine entscheidende Rolle für die Ausbreitung im Bestand (Mielke 1995). Die Temperaturansprüche für eine optimale Infektion und das Wachstum liegen daher eher niedrig. So ist die Ausbreitung in der Pflanze laut Sprague (1937) bei 10°C am günstigsten und sie reduziert sich bereits maßgeblich ab einer Temperatur über 15°C. Wenn die vorangegangenen Bedingungen für die Sporulation der Infektionskörper und für eine Masseninfektion des Weizens im Herbst und zeitigen Frühjahr optimal waren, bleibt bei einer warmen vorsommerlichen und sommerlichen Witterung ein Starkbefall des Weizens aus (Fehrmann & Schrödter 1971).

Die massenhafte Verbreitung im Bestand ist maßgeblich abhängig von Niederschlägen. Dabei ist nicht allein das Vorkommen, sondern mehr noch die Intensität des Niederschlagsereignisses ausschlaggebend (Ponchet 1958). Die beiden Untersuchungsjahre 2010 und 2011 zeichneten sich durch extrem trockene Frühjahre aus. Vor allem im Frühjahr 2011 (Monate März bis Mai) fielen 100 mm weniger Niederschlag im Vergleich zum langjährigen Mittel von 1981 bis 2011. Somit blieb eine Massenausbreitung des

Erregers im Bestand aus. Bei zu geringer Feuchte im Bestand sterben die äußeren infizierten Blattscheiden ab und der Erreger kann nicht bis in den Halm vordringen (Hardwick 2006), was in dieser Untersuchung zusätzlich einen Starkbefall verhinderte. Die Witterungsbedingungen in den Vegetationszeiten beider Erntejahre (ein Winter mit ausgeprägter Frostperiode, ein trockenes Frühjahr und teilweise sehr warme Frühsommer bis Sommer) zeigten gegensätzliche Bedingungen zu den ökologisch optimalen Wachstumsansprüchen von *O. yallundae/acuformis*. Trotz des geringen Befallaufkommens konnten Standortunterschiede festgestellt werden. Diese sind evtl. durch das unterschiedliche Klima der Standorte zu erklären. Das milde feuchte Klima in Meeresnähe des Standorts in Rostock könnte zu einem stärkeren Befall geführt haben. Erhebungen von Gebhardt & Winkler (1994) und Schmidt (1994) ergaben, dass der parasitäre Halmbruch in den Trockengebieten Mitteldeutschlands eher eine untergeordnete Rolle spielt und dies ließ sich in den Versuchsjahren auch unter den vorherrschenden Witterungsverhältnissen am Standort in Göttingen bestätigen. *O. yallundae/acuformis* wird als bedeutendster Halmbasiserreger im Weizen der gemäßigten Klimate angesehen. In dieser Studie konnte aber gezeigt werden, dass *Fusarium spp.* eine wesentlich höhere Befallshäufigkeit und -schwere im Vergleich zu *O. yallundae/acuformis* in den beiden Untersuchungsjahren aufwies. Dies wurde vor allem auf die unterschiedlichen klimatischen Ansprüche der beiden Pathogene zurückgeführt. *Fusarium spp.* wird durch trocken-warme Witterungsverhältnisse begünstigt, wohingegen *O. yallundae/acuformis* sein Infektionsoptimum in kühl-feuchten Bedingungen hat. Die sich ändernden klimatischen Bedingungen hin zu höheren Durchschnittstemperaturen mit längeren Trockenperioden in Mitteleuropa könnten dazu führen, dass *O. yallundae/acuformis* zukünftig an Bedeutung verliert und *Fusarium spp.* zunimmt. Deutliche Unterschiede in der Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* zwischen den untersuchten Fruchtfolgen traten nur im Jahr 2011 auf. Obwohl das Befallsaufkommen von *O. yallundae/acuformis* im letzten Untersuchungsjahr sehr gering war, konnten Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen festgestellt werden, welche im Folgenden Abschnitt dargestellt werden.

4.2 Vergleichende Bewertung der Energiefruchtfolgen im Hinblick auf das Befallsgeschehen von Halmbasis- und Wurzelkrankheitserregern an Weizen

Im letzten Untersuchungsjahr 2011 wurden die drei Energiefruchtfolgen 2, 3 und 4 in Hinblick auf den Befall der drei dominierenden Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger an Weizen verglichen. Die Fruchtfolgen hatten teilweise erst eine Rotation durchlaufen (Fruchtfolge 4), da der Feldversuch in Rostock im Jahr 2007 bzw. in Göttingen im Jahr 2008 angelegt wurde. Da es sich bei dem Fruchtfolgeeffekt um einen kumulativen Effekt handelt, wurde die Bewertung der Fruchtfolgen auf Grundlage der Ergebnisse aus dem letzten Untersuchungsjahr getätigt. Das ausschlaggebende Charakteristikum fruchtfolgebedingter Krankheiten ist ihre Standortgebundenheit. Zu dieser Gruppe an Krankheiten werden hauptsächlich bodenbürtige Schaderreger gezählt. Die Krankheitsübertragung erfolgt über infektiöses Pflanzenmaterial bzw. Überdauerungsformen, die im Boden bzw. auf der Bodenoberfläche verbleiben. Je häufiger der entsprechende Wirt in Raum und Zeit angebaut wird, desto größer wird die Inokulumfracht und damit das Infektionsrisiko sowie die daraus resultierende Befallshäufigkeit. *Fusarium spp.*, *O. yallundae/acuformis* und *G. graminis* gelten als typische Vertreter aus der Gruppe der boden- bzw. strohbürtigen fruchtfolgeabhängigen Krankheitserreger. Daher wurde als Untersuchungsparameter die Befallshäufigkeit dieser Erreger an der Halmbasis von Weizen gewählt, um die Fruchtfolgen in Hinblick auf ihre phytomedizinische Gesundheit zu vergleichen. Innerhalb der untersuchten Fruchtfolgen spielen nicht nur die unterschiedlichen Feldfruchtkombinationen im zeitlichen Verlauf eine Rolle, sondern auch die fruchtartbedingten Aussattermine und Bodenbearbeitungsformen. Daher wird auf diese ackerbaulichen Parameter in der Diskussion kurz eingegangen. Es wurden nicht nur Fruchtfolgen im eigentlichen Sinn verglichen, sondern es handelte sich mehr um einen Vergleich verschiedener Anbausysteme, unter denen die Fruchtfolge mit der Gesamtheit aller Eingriffe zu verstehen ist (Heyland 1998). Da die Rotationen teilweise erst ein einziges Mal durchlaufen wurde, war damit zu rechnen, dass die Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen noch nicht sehr ausgeprägt und durch witterungsbedingte Jahreseffekte überlagert waren. Die statistische Analyse der Daten für den häufigsten Erreger an der Halmbasis von Weizen *Fusarium spp.* zeigte aber für die Auswertung über die Jahre 2010 und 2011, dass der Faktor Fruchtfolge neben dem Jahreseffekt den zweitgrößten Einfluss auf die Befallshäufigkeit hatte. Der Pflanzenschutz spielte als Versuchsfaktor nur eine untergeordnete Rolle und trat lediglich beim direkten Vergleich der Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 in Erscheinung. Somit konnte auf Grundlage der Analysen im

letzten Untersuchungsjahr eine vergleichende Bewertung der Fruchtfolgen vorgenommen werden. Diese fand in der Variante ohne Fungizidapplikation statt, da sich einzig hier die volle Wirkung der Fruchtfolge auf das Befallsgeschehen zeigte. Aus dem direkten Vergleich der Variante PS-F0 zur Variante mit dem situationsbezogenen Pflanzenschutz sollte die Einflussnahme einer Fungizidapplikation auf die Befallshäufigkeit innerhalb der verschiedenen Fruchtfolgen abgeleitet werden. Zusätzlich zeigte dieser Vergleich auch die Gewichtung einer Fungizidmaßnahme im Vergleich zum Fruchtfolgewechsel als Instrument des vorbeugenden Pflanzenschutzes auf.

Die Ergebnisdarstellung des Jahres 2011 über die drei wichtigsten Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger *O. yallundae/acuformis*, *Fusarium spp.* und *G. graminis* machte deutlich, dass bei allen drei Krankheiten die kurze Fruchtfolge 2 (Raps-Weizen) die höchsten Befallshäufigkeiten aufwies. Dabei reduzierte eine Fungizidapplikation häufig den Befall in den einzelnen Fruchtfolgen, was aber nicht immer statistisch absicherbar war. Die größte Verringerung der Befallshäufigkeit ließ sich feststellen, wenn die Fruchtfolge aufgelockert wurde. Durch die Eingliederung einer Maiskultur in Kombination mit einer Zwischenfrucht wurde die enge Raps-Weizen Folge unterbrochen, wie es durch Fruchtfolge 3 (Raps-Zwischenfrucht/Mais-Weizen) repräsentiert wurde. Im Fall von *Fusarium spp.* zeigte der Vergleich der Fruchtfolgen 2 und 3 einen Unterschied um den Faktor 3 bis 4,6 am Standort in Rostock bzw. Göttingen. Für *O. yallundae/acuformis* wurde dieser Unterschied noch deutlicher, beim Vergleich von Fruchtfolge 2 zu 3 reduzierte sich der Befall um 100% in der Variante PS-F0 am Standort in Göttingen. Für *G. graminis* konnte nur am Standort in Rostock eine Auswirkung der unterschiedlichen Fruchtfolgen auf das Erregerauftreten festgestellt werden, daher wird auf *G. graminis* in der Diskussion nur kurz eingegangen. Die Fruchtfolgen zeigten bei diesem Erreger im Vergleich für den Standort in Rostock eine signifikante Verringerung der Befallshäufigkeit um ca. 80% von Fruchtfolge 2 hin zu Fruchtfolge 3.

4.2.1 Effekte auf die Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.*

Die Fruchtfolge 3 zeigte an beiden Standorten den geringsten Befall mit *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Weizen. Im Vergleich zur Fruchtfolge 2 mit den höchsten Befallshäufigkeiten reduzierte sich der Befall signifikant um ca. 70%. Das verwundert, denn in der Fruchtfolge 3 steht der Weizen direkt nach Mais, welcher allgemein als fusariumfördernd angesehen wird. Maisstoppel als Träger von Fusariuminokulum bieten eine längere Überdauerungsmöglichkeit und besitzen eine relative Vorzüglichkeit als Wirt für *Fusarium spp.* im Vergleich zu Weizen (Beck & Lepschy 2000; Krauthausen *et al.* 2003; Dill-Macky & Jones 2000). Vor der Weizenaussaat nach Vorfrucht Mais fand eine Grundbodenbearbeitung statt, so dass sich die Gefahr einer Fusariuminfektion sehr stark reduzierte (Wildermuth *et al.* 1997; Bailey *et al.* 2000). Zusätzlich gilt *Fusarium spp.* als ‚typischer‘ Weizenpilz mit einem hohen saprophytischen Konkurrenzvermögen bei Weizendaueranbau (Domsch 1968). Das Weizenstroh ist in der kurzen Fruchtfolge 2 auf der Bodenoberfläche verblieben, so dass die Menge an Inokulum in Fruchtfolge 2 wesentlich höher gewesen ist als in Fruchtfolge 3 und 4 der Feldfruchtkombination Weizen mit Vorfrucht Mais. Diese Hypothese bestätigt sich durch die Befallshäufigkeiten in Fruchtfolge 4. Hier steht der Weizen einmal nach Mais (entsprechend Fruchtfolge 3) und einmal nach Raps (entsprechend Fruchtfolge 2). Da diese unterschiedlichen Kombinationen zu hohen bzw. niedrigen Befallshäufigkeiten führten (s.o.), wiesen die mittleren Befallshäufigkeiten der Fruchtfolge 4 eine hohe Variation auf. Damit nahm Fruchtfolge 4 eine Zwischenstellung zwischen Fruchtfolge 2 und 3 ein und zeigten daher keinen signifikanten Unterschied zu diesen Fruchtfolgen.

Fusarium spp. ist in der Lage bei nicht-wendender Bodenbearbeitung bis zu drei Jahre im Stroh auf der Bodenoberfläche zu überdauern (Pereyra *et al.* 2004). So kann der Erreger gut die Anbaupausen von Weizen in der kurzen Fruchtfolge 2 überstehen. Neben strohbürtigen Halmbasisinfektionen kann es auch zu bodenbürtigen Infektionen durch *Fusarium spp.* kommen. Die strohbürtige Infektion, wie sie in Fruchtfolge 2 stattfand, hatte somit einen größeren Einfluss als eine potenziell bodenbürtige durch die eingearbeiteten Maisstoppel. Die oben beschriebene Vorzüglichkeit von Maisstoppel als Inokulum für bodenbürtige Halmbasisinfektionen durch *Fusarium spp.* bildete sich also nicht nach einer Pflugfurche aus. Das war nicht der einzige Grund für die geringe Befallshäufigkeit. Die unterschiedlichen Fruchtfolgen bedingten verschiedene Aussaattermine. In Fruchtfolge 2 folgte der Weizen auf Raps – ein früher Aussaattermin war möglich. In Fruchtfolge 3 konnte der Weizen nach der Vorfrucht Mais nur spät ausgesät

werden. In der aufgelockerten Fruchtfolge 4 kamen beide Szenarien vor: Weizen nach Raps und Weizen nach Mais. Im letzten Untersuchungsjahr konnte ein hoch signifikanter Einfluss des Saattermins ($p = 0,000$) an beiden Standorten festgestellt werden. Die Befallshäufigkeiten verdoppelten sich beim Vergleich der frühgesäten Variante zur spätgesäten in Fruchtfolge 4 nahezu und nahmen damit ähnlich Werte wie die Befallshäufigkeiten in Fruchtfolge 2 bzw. 3 an. Dies stellte die Bedeutung des Saattermins für die Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* heraus.

Die erhöhten Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* in den frühgesäten Varianten sind durch die besseren vorwinterlichen Infektionsbedingungen zu erklären. Die oben bereits beschriebenen positiven Witterungsbedingungen im Herbst der Jahre 2009 und 2010 waren sehr förderlich für Halmbasisinfektionen von *Fusarium spp.* Für *F. culmorum* ist bekannt, dass ein warmer, trockener Herbst die Infektionsbedingungen stark begünstigt (Inglis & Cook 1986). Die Witterungsaufzeichnungen haben gezeigt, dass die Herbste der Jahre 2009 und 2010 durchschnittlich bis überdurchschnittlich (das gilt für den November 2009) warm waren. Damit befanden sich die Keimlinge des frühen Weizens genau in der Phase der Erstinfektion (Aussaat ca. Mitte bis Ende September). Etwa vier bis sechs Wochen nach der Aussaat infiziert *F. culmorum* die jungen Keimlinge (Cook 1968). Der späte Weizen wurde in der Untersuchung immer ca. drei Wochen später ausgesät und war somit weniger dem Inokulum unter optimalen Bedingungen im Herbst ausgesetzt. Die Spätsaat verringerte das Risiko für eine erfolgreiche Infektion im Herbst. So könnte zudem der Ausgangsbefall für die Vegetationszeit nach der Winterruhe herabgesetzt und die Verbreitung im Bestand reduziert worden sein. Dadurch kann die höhere Befallshäufigkeit im frühen Weizen im Vergleich zum späten erklärt werden.

Beim direkten Vergleich der Befallshäufigkeiten in den Pflanzenschutzvarianten PS und PS-F0 zeigte sich am Standort in Göttingen weiter ein Einfluss der Fungizidapplikation in den untersuchten Fruchtfolgen 2 und 3. Die Applikation der Fungizide Input® zu Beginn des Schossens und Champion® & Diamant® zum Entwicklungsstadium des Ährenschießens zeigte eine signifikante Reduktion des Befalls um den Faktor 1,5. Beide Präparate gelten als blattaktiv und hochsystemisch. Damit besteht die Möglichkeit, dass Teile der fungiziden Wirkstoffmengen zur Halmbasis transportiert wurden. Zusätzlich weist das Präparat Input® eine kurative Wirkung auf, so dass latente Infektionen gestoppt werden. Zwar haben beide Präparate keine ausgewiesene Zulassung gegen *Fusarium spp.* als Halmbasiserregere im Weizen, aber das Produkt Input® ist als Fungizid gegen *Fusarium spp.* als Halmbasiserregere in Gerste zugelassen (Bayer CropScience 2010; BASF

2010). Die applizierten Präparate enthalten jeweils Wirkstoffe aus der Gruppe der Triazole (Input® - Prothioconazol sowie Champion® & Diamant® - Epoxiconazol), welche die pilzliche Ergosterolbiosynthese hemmen (Lyr 1995). Sie besitzen eine ausgewiesene Wirkung gegenüber Fusarien. Zwar konnte die Fungizidmaßnahme die Befallshäufigkeit reduzieren, aber im direkten Vergleich mit dem Fruchtfolgewechsel ist sie weniger effektiv. Der Vergleich von Fruchtfolge 2 und 3 zeigte eine Reduktion der Befallshäufigkeit um 70%, wobei die Fungizidmaßnahme innerhalb der Fruchtfolge die Befallshäufigkeit nur um die Hälfte reduzierte. In Kombination bewirkten diese Maßnahmen eine Reduktion der Befallshäufigkeit um fast 80%. Durch die Eingliederung der Kultur Mais in die kurze Fruchtfolge 2 zwischen die Fruchtfolgefelder Raps und Weizen wurde der Befall mit *Fusarium spp.* in Kombination mit einer standardmäßigen zweistufigen Fungizidmaßnahme von über 40% auf unter 10% reduziert.

Für die Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* an der Halmbasis sind demnach die Anbauabstände zwischen der anfälligen Kultur Winterweizen, die Terminierung des Aussaattermins sowie die Art der Bodenbearbeitung von größerer Bedeutung als der Anbau einer Blattfrucht vor Weizen als Nichtwirtspflanze. Raps besitzt aus pflanzenbaulicher Sicht eine große Vorzüglichkeit als Vorfrucht vor Winterweizen im Hinblick auf die positive Ertragswirkung der Folgefrucht und das Durchbrechen von Entwicklungszyklen bodenbürtiger Krankheiten von Halmfrüchten (Kirkegaard *et al.* 2008). Die Autoren analysierten die Wirkung von Raps hinsichtlich seiner direkten Vorfruchtwirkung. In der vorliegenden Untersuchung wurden Anbausysteme verglichen, was auf lange Sicht mehr Sinn macht. Denn die Vorzüglichkeit einer Vorfruchtkombination wird, wie hier aufgezeigt, durch die positiven Effekte einer geeigneten Feldfruchtkombination mit den entsprechenden ackerbaulichen Maßnahmen überlagert.

4.2.2 Effekte auf die Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis*

Die Auswirkungen der verschiedenen Fruchtfolgen auf die Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis* war wesentlich höher als bei *Fusarium spp.* Dies zeigte sich erst beim direkten Vergleich der Fruchtfolgen innerhalb der Varianten ohne Fungizidapplikation. Die gemittelten Werte der Standorte waren mit knapp 15% (Rostock) und 7% (Göttingen) im letzten Untersuchungsjahr niedrig und damit wesentlich geringer als im Jahr zuvor (37% am Standort in Rostock und 25% am Standort in Göttingen), was höchstwahrscheinlich mit der bereits beschriebenen Witterungslage im Untersuchungszeitraum zusammenhing. Die wichtigste Besonderheit des Jahres 2011 war jedoch die große Variationsbreite der Befallshäufigkeiten. Im Jahr 2010 lagen die Werte in den verschiedenen Fruchtfolgen auf ähnlichem Niveau an beiden Standorten. Es konnten noch keine fruchtfolgeabhängigen Effekte ermittelt werden. Somit hatten die unterschiedlichen Anbausysteme noch keinen Effekt auf die Befallssituation. Da sich der Fruchtfolgeversuch in Göttingen erst im zweiten und in Rostock erst im dritten Jahr befand, könnte das Inokulumpotential zur Ausbildung von fruchtfolgebedingten Krankheiten noch zu gering gewesen sein.

Im Jahr 2011 hingegen konnte eine ausgeprägte Differenzierung der Fruchtfolgen festgestellt werden. Im letzten Untersuchungsjahr zeigten die Fruchtfolgen entsprechend der Befallssituation deutliche Unterschiede. Fruchtfolge 2 wies mit Abstand die höchste Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis* auf. Der Vergleich der Fruchtfolgen in den Varianten PS-F0 verdeutlichte die Fruchtfolgeunterschiede. Interessanterweise zeigte die Variante PS-F0 für die Fruchtfolge 2 ähnlich hohe Werte wie im Jahr zuvor, wohingegen die anderen Fruchtfolgen der Variante PS-F0 einen wesentlich niedrigeren Wert für 2011 annahmen. Es ist also davon auszugehen, dass der Fruchtfolgeeffekt für die Fruchtfolge 2 relativ beständig war und sich bereits im Jahr 2010 ausgebildet hatte. Die Fruchtfolgeeinflüsse der Fruchtfolge 3 und 4 wurden eventuell durch den höheren Jahreseinfluss im Jahr 2010 überdeckt bzw. konnten aufgrund der unvollständig durchlaufenen Rotation noch nicht zu Tage treten. Eine befalls mindernde Witterungslage wie in der Vegetationszeit 2010/2011 scheint hingegen die Ausprägung von Fruchtfolgeeffekten zu unterstützen. So zeigte der Fruchtfolgevergleich auf Grundlage der Befallshäufigkeit in der Variante PS-F0 für 2011 einen deutlichen Unterschied der Fruchtfolgen. Hier variierten die Häufigkeiten von 0 (PS-F0, Fruchtfolge 3 am Standort in Rostock) bis 41% (PS-F0, Fruchtfolge 2 am Standort in Rostock). Somit erreichten die Befallshäufigkeiten der Fruchtfolge 2 in den Varianten PS-F0 ähnlich hohe Werte wie im

Jahr 2010 mit allgemein stärkeren Befällen und lagen weit über dem Mittel der Standorte. Dies war ein klarer Hinweis darauf, dass hier die unterschiedlichen Fruchtfolgen eine Wirkung auf die Befallshäufigkeiten hatten.

Die Verringerung des Getreideanteils von 50% (Fruchtfolge 2) auf 33% (Fruchtfolge 3) in der Fruchtfolge führte nahezu zu keinem Befall an beiden Standorten. Durch den geringeren Weizenanteil in Fruchtfolge 3 kam es zu einer zweijährigen Anbaupause des Wirtes von *O. yallundae/acuformis*. Dies führte zu einer effektiven Reduktion der Befallshäufigkeit. Für den Erreger ist eine Überdauerung von bis zu dreieinhalb Jahren auf Strohresten beschrieben (Lange-de la Camp & Naumann 1973; Naumann & Lange-de la Camp 1975). Somit sollte eine Infektion auch nach zweijähriger Anbaupause möglich sein. Andere Autoren berichten aber genauer, dass die Sporulationsfähigkeit bis zu 3 Jahre auf Strohresten erhalten bleibt (Macer 1961a; 1961b), was noch nichts über die Infektiosität dieser Sporen aussagt. Fehrmann und Schrödter (1971) folgern daraus, dass der Erreger zwar bis zu drei Jahren überdauere aber nach einer zwei- bis dreijährigen Anbaupause von Weizen das Infektionspotential wesentlich reduziert werde. So verzögere sich die Etablierung von *O. yallundae/acuformis* aus dem standortspezifischen Inokulum maßgeblich. Dies wurde durch verschiedene Autoren bestätigt und es wurde gezeigt, dass die Fruchtfolgehygiene in Halmfruchtfolgen nur erfolgreich ist, wenn eine mindestens zweijährige Anbaupause der Wirtspflanze eingehalten und eine Blattfrucht in die Fruchtfolge aufgenommen wird (Steinbrenner & Höflich 1984; Bockmann 1967; Bockmann 1968). Neben der längeren Anbaupause in Fruchtfolge 3 zeigte der Aussaattermin einen signifikanten Einfluss ($p = 0,000$) auf die Befallshäufigkeit. Dies wurde bei den Befallshäufigkeiten der Fruchtfolge 4 deutlich: Die spätgesäten Weizenparzellen zeigten eine um 36% reduzierte Befallshäufigkeit. Der fördernde Einfluss auf die Befallshäufigkeit von *O. yallundae/acuformis* durch eine Frühsaat ist allgemein anerkannt und wurde in vielen Studien nachgewiesen (Colbach & Saur 1998; Wittrock 2004; Steinbrenner & Höflich 1984). Frühsaaten ermöglichen es dem Erreger, sich schon im Herbst sehr gut in der Pflanze zu entwickeln, was wiederum zu einer guten Vermehrung zu Beginn der Vegetationszeit im Frühjahr führt. Ein weiterer wichtiger Unterschied zwischen Fruchtfolge 3 und 2 war die Bodenbearbeitung. In Fruchtfolge 2 wurde nur eine Lockerbodenbearbeitung durchgeführt, welche einen Großteil der Pflanzenreste nach der Ernte auf der Bodenoberfläche belässt. In Fruchtfolge 3 hingegen wurde zum Weizen immer eine Grundbodenbearbeitung durchgeführt. Die infektiösen Pflanzenrückstände wurden in tiefere Bodenschichten eingearbeitet. Eine bodenbürtige

Infektion durch *O. yallundae/acuformis*, ausgehend von Sporen, die auf eingearbeiteten Strohresten gebildet werden, ist möglich, aber diesem Infektionsweg wird nur eine untergeordnete Bedeutung für eine starke Epidemie zugemessen (Fehrmann & Schrödter 1971). (Colbach & Meynard 1995) sehen eher die Gefahr, dass durch eine Grundbodenbearbeitung Inokulum von *O. yallundae/acuformis* wieder an die Bodenoberfläche gebracht würde und somit eine nachfolgende Wirtspflanze infizieren könne. Somit hätte eine Grundbodenbearbeitung einen eher gegenläufigen Effekt. Steinbrecher & Höflich (1984) und (Colbach & Saur 1998) konnten hingegen in ihren Untersuchungen zum Einfluss von pflanzenbaulichen Maßnahmen auf den Befall von *O. yallundae/acuformis* keinen Effekt feststellen.

Der Faktor Pflanzenschutz zeigte nur im Jahr 2010 einen signifikanten Einfluss auf den Befall von *O. yallundae/acuformis*. Im letzten Untersuchungsjahr, in dem eine Bewertung der Fruchtfolgen stattfand, konnte kein abgesicherter Effekt des Pflanzenschutzes nachgewiesen werden. Es ließ sich lediglich feststellen, dass die Befallswerte in der Variante PS-F0 im Vergleich zu allen anderen Varianten höher lagen. Die beiden Präparate Input® und Champion & Diamant® haben eine ausgewiesene Wirkung gegen *O. yallundae/acuformis*, wodurch die erhöhten Werte in der Variante PS-F0 zu erklären sind (Bayer CropScience 2010; BASF 2010). Auch die Terminierung der Applikation im ES 31/32 war optimal für eine effektive Bekämpfung des Erregers. Der Einsatz von Fungiziden zu Beginn des Schossens als Maßnahme gegen den Befall von Weizen mit *O. yallundae/acuformis* gehört mittlerweile zur gängigen landwirtschaftlichen Praxis. Die hier vorgestellten Untersuchungen machen aber deutlich, dass der Pflanzenschutz zwar ein Instrument zur Reduktion von *O. yallundae/acuformis* ist, aber die Fruchtfolge einen wesentlich höheren Einfluss auf eine Vermeidung des Auftretens von *O. yallundae/acuformis* besitzt.

Der Erreger *O. yallundae/acuformis* trat an der Halmbasis von Weizen in dieser Studie relativ moderat auf. Starkbefälle, die zu einer hohen Befallsschwere führen würden, konnten nicht festgestellt werden. Steinbrenner & Höflich (1984) wiesen in ihren langjährigen Feldversuchen zur Bedeutung von acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf den Befall von *O. yallundae/acuformis* im Mittel der Jahre von 1973 bis 1981 nach, dass ein 40-60%-iger Weizenanteil in Fruchtfolgen zu einem Gesamtbefall von ca. 30-40% führt. Diese Werte wurden in der vorliegenden Untersuchung nur im Szenario mit den günstigsten Befallsvoraussetzungen für *O. yallundae/acuformis* erreicht. Weiterhin folgerten die Autoren aufgrund ihrer langjährigen Erfahrungen, dass

Fruchtfolgen mit einem Getreideanteil von über 75% hinsichtlich des Auftretens von *O. yallundae/acuformis* risikobelastet sind. Die höchsten Weizenanteile lagen mit 50% in der Fruchtfolge 2 und damit weit unter dem vorgeschlagenen Schwellenwert von 75%. Demnach handelte es sich in der vorliegenden Untersuchung nicht um eine risikobelastete Fruchtfolge. Dennoch muss festgehalten werden, dass die Studien von Steinbrenner & Höflich (1984) auf fünffeldrigen Fruchtfolgen mit unterschiedlichen Getreideanteilen fußen. Es handelte sich somit um diversifiziertere Fruchtfolgen als in den vorliegenden Untersuchungen. Neben Winterweizen wurden auch Roggen und Hafer als Getreide angebaut. Die Ergebnisse sind also nicht ohne Einschränkungen vergleichbar, denn Winterweizen gilt unter den Getreiden als anfälligste Halmfrucht gegenüber Halmbasiserkrankungen und Hafer und Winterroggen können das Schadpotential durch *O. yallundae/acuformis* herab senken (Bockmann 1967). Der Anbau von Roggen hat zwar in den letzten Jahren auch aufgrund der Nutzung als Biogassubstrat wieder etwas zugenommen, insgesamt aber haben sich die Anbauumfänge von Roggen und vor allem Hafer im Vergleich zum Referenzzeitraum 1961-79 drastisch verringert. So reduzierte sich die Anbaufläche von Hafer von durchschnittlich 1,05 Mio. ha auf 0,14 Mio. ha und die von Roggen von 1,59 Mio. ha auf 0,63 Mio. ha im Jahr 2010 (FAO, 2011). Dies führte zu einer Einengung der Fruchtfolge hin zu einem höheren Weizenanteil. Damit sollte für heutige Standardfruchtfolgen in der deutschen Landwirtschaft die Risikoschwelle von 75% nicht mehr gelten, da der Getreideanteil im Wesentlichen aus Winterweizen besteht. Dies wird durch diese Untersuchungen bestätigt. Die Befallshäufigkeiten der Fruchtfolge 2 mit einem 50%-igen Weizenanteil lagen auf ähnlichem Niveau wie in den Fruchtfolgen mit gleichem Getreideanteil in den Untersuchungen von Steinbrenner & Höflich (1984). In der vorliegenden Studie wurden allerdings die Erhebungen in Jahren mit sehr befallsmindernden Witterungsbedingungen vorgenommen. Die Untersuchungen der letztgenannten Autoren umfassten hingegen einen Zeitraum von neun Jahren. Der mittlere Jahreseinfluss wurde ausreichend repräsentiert, zudem wurden die Versuche bereits fünf Jahre vor der Datenaufnahme angelegt. Die hier vorgestellten Fruchtfolgen, vor allem die am stärksten befallene Fruchtfolge 2, besitzen somit das Potenzial unter optimalen Witterungsbedingungen einen Starkbefall durch *O. yallundae/acuformis* auszulösen. Inwieweit in dieser Situation eine Pflanzenschutzmaßnahme einen höheren Effekt zeigen würde als in dieser Erhebung, sollte die Grundlage weiterer Forschung sein.

4.2.3 Auswirkungen auf den Befall mit *G. graminis* var. *tritici*

Im letzten Untersuchungsjahr konnten erste Auswirkungen der Fruchtfolge auf den Befall mit *G. graminis* in Rostock festgestellt werden. Fruchtfolge 3 zeigte signifikant die geringsten Befallshäufigkeiten im Vergleich zu den Fruchtfolgen 2 und 4. Der Wechsel von Fruchtfolge 2 zu Fruchtfolge 3 verringerte somit den Befall um nahezu 80%. Fruchtfolge 2 wies mit 30,76% die höchsten Werte auf. Auch Steinbrenner und Höflich (1984) konnten nach einer Rapsvorfrucht ähnlich hohe Werte feststellen und zeigten weiterhin, dass nach einer Maisvorfrucht der Befall wesentlich reduziert war. Damit erwies sich, dass vor allem der Vorfruchteffekt innerhalb der Fruchtfolge einen wesentlichen Einfluss auf den Befall mit *G. graminis* hatte. Der Anbau einer Nichtwirtspflanze als Vorfrucht reduziert maßgeblich den Befall und gilt als effektivste Bekämpfungsmöglichkeit (Mielke 1998; Heß 2006). Der Erreger überdauert als Myzel auf und in Pflanzenresten im Boden und infiziert myzeliogen hauptsächlich die Wurzeln. Für *G. graminis* ist eine eher kurze Überdauerungsfähigkeit beschrieben, als Voraussetzung für die erfolgreiche Etablierung im Boden muss die Wirtspflanze einmal innerhalb von 2 Jahren angebaut werden (Gerlagh 1968). Die längere Anbaupause von Weizen in Fruchtfolge 3 im Vergleich zu Fruchtfolge 2 führte demnach zu einer starken Reduktion des Befalls. Nach (Heß 2006) zählen Mais und Raps nicht zu den ‚Gesundfrüchten‘ in Bezug auf die Fähigkeit den Entwicklungszyklus von *G. graminis* zu durchbrechen. In den genannten Untersuchungen führten die Vorfrüchte Mais und Raps zu einem moderaten Befall von 56%, der also deutlich über den Werten der vorliegenden Erhebungen lag. Nach Steinbrenner und Höflich (1984) haben die Probenahme und die Bonitur erheblichen Einfluss auf die ermittelten Werte bei der Bestimmung der Befallshäufigkeit von *G. graminis*. So wird der Befall mit *G. graminis* häufig unterschätzt, da bei der Probenahme die Feinwurzeln leicht abreißen und daher nicht mit bonitiert werden. Außerdem empfehlen die letztgenannten Autoren die Halmbasen mit den Wurzeln für eine genauere Bonitur in einen mit Wasser gefüllten Zylinder, unter dem sich eine Lichtquelle befindet, zu stellen. In den hier vorgestellten Untersuchungen wurden die Wurzeln trocken bonitiert und die Pflanzen wurden nicht ausgegraben, sondern aus dem Boden gezogen. Das könnte dazu geführt haben, dass die Befallshäufigkeiten von *G. graminis* unterschätzt wurden. Zusätzlich haben die Bodenbearbeitung und der Saattermin einen Einfluss auf die Befallshäufigkeit mit *G. graminis*. Eine frühe Aussaat des Weizens reduziert den Abstand zum vorangegangenen Weizen als Inokulumträger. Aufgrund der kürzeren wirtsfreien Zeit kommt es zu einem verringerten Abbau des Inokulums und die Möglichkeit, dass Pilz und Pflanze

zusammentreffen wird erhöht (Gutteridge & Hornby 2003). So wurde schon in frühen Studien auf die Bedeutung des Saattermins zur Verringerung der Schwarzbeinigkeit hingewiesen (Schaffnit 1930). Der Einfluss der Bodenbearbeitung wird als eher gering eingeschätzt. Verschiedene Autoren konnten nach wendender Bodenbearbeitung aber einen geringeren Befall feststellen als nach nicht wendender (Heß 2006; Colbach *et al.* 1997; Mielke 1998). Die Fruchtfolgeunterschiede sind in Bezug auf die Befallshäufigkeit mit *G. graminis* noch nicht sehr ausgeprägt folgen aber in ihrem Muster den Befällen von *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* in den einzelnen Anbausystemen.

4.3 Mykotoxine in Korn- und Halmbasis von Weizen, sowie in Ganzpflanzenproben von Mais

Zur Bewertung der Fusariumproblematik in Energiefruchtfolgen wurden Toxinmessungen in Korn- und Halmbasisproben durchgeführt. In den Kornproben wurden nur minimale Gehalte von DON gefunden. Die Witterung gilt allgemein als bestimmender Faktor für den Befall der Ähre durch Fusariumspezies mit nachfolgender Toxinkontamination des Ernteguts. Hierdurch sind die niedrigen DON-Gehalte im Korn der beiden Erntejahre zu erklären. Der Infektionszeitraum (Ährenblüte) lag im Jahr 2010 in der zweiten Junidekade und im Jahr 2011 gegen Ende der zweiten Junidekade. In beiden Jahren war es zu diesem kritischen Zeitpunkt relativ trocken. Die Bedingungen für eine massenhafte Sporenbildung und -entlassung in bzw. aus Fruchtkörpern auf Ernterückständen waren somit nicht gegeben. Zusätzlich folgte darauf Ende Juni-Anfang Juli 2010 eine Hitzewelle mit Temperaturen über 30°C ohne Niederschlagsereignisse. Diese sehr trocken-warmen Bedingungen waren für eine erfolgreiche Ähreninfektion hinderlich. Masseninfektionen der Ähre durch toxigene Fusariumspezies werden hauptsächlich durch windbürtige Askosporen des Erregers *F. graminearum* ausgelöst (Brandfaß 2006). Dabei wird Mais als Vorfrucht bei nichtwendender Bodenbearbeitung eine besonders befallsfördernde Rolle zugeschrieben. Die Maiskultur ist ein idealer Wirt für Fusarien und die Überdauerung seiner Ernterückstände ist besonders lang (Sutton 1982, Krauthausen *et al.* 2003, Dill-Macky & Jones 2000). Da durch die wendende Bodenbearbeitung die Maisstoppel in den Fruchtfolgen 3 und 4 weitestgehend von der Bodenoberfläche entfernt wurden, war das Infektionsrisiko minimal. Im Jahr 2011 kam es zu geringfügigen und vereinzelt Niederschlägen Mitte Juni. Dies könnte die leicht erhöhten Toxinwerte im Korn am Standort in Rostock in der Fruchtfolge 3 erklären. Der Großteil der Maisstoppel wurde

durch die Grundbodenbearbeitung von der Bodenoberfläche entfernt, einzelne Stoppel verbleiben dennoch auf dem Acker und könnten zu räumlich stark begrenzten Infektionen im Bestand geführt haben. Der Weizen in Fruchtfolge 3 ist dadurch am stärksten betroffen, da in dieser Fruchtfolge sein Anbau immer dem von Mais folgt. Die Fruchtfolge 4 hingegen ist neben der Mais-Weizen Folge durch eine Raps/Weizen Kombination aufgelockert. Zusätzlich gilt Mais nur in Form einer direkten Vorfrucht als Risiko für eine nachfolgende Fusariumähreninfektion. Nach einer 20-monatigen Rotte ist die Biomasse von Fusarium in den pflanzlichen Rückständen auf dem Acker nahezu vollständig abgebaut, so dass keine Vorvorfruchteffekte auftreten (Oldenburg *et al.* 2007), was die leicht erhöhten Toxingehalte in Fruchtfolge 3 im Vergleich zu den Fruchtfolgen 2 und 4 erklärt. Allerdings lagen die Werte mit im Mittel unter 300 µg DON/kg TM weit unterhalb des gesetzlichen Grenzwerts von 1250 µg/kg TM für unverarbeitete Rohware. Neben der Vorfrucht und der Bodenbearbeitung hat die Sortenresistenz einen entscheidenden Einfluss auf den DON-Gehalt des Ernteguts (Mesterházy 1988). Durch den Anbau einer gering anfälligen Sorte (Skalmeje, KWS Lochow) mit der Anfälligkeitsstufe 3 von 9 (Anonymus 10 2010) reduzierte sich das Risiko einer möglichen Fusariuminfektion mit nachfolgender DON-Belastung des Korns noch weiter.

Die Boniturdaten haben aber gezeigt, dass Fusarium an der Halmbasis im Vergleich zu den anderen untersuchten bodenbürtigen Krankheiten dominierte. Daher wurde analysiert, inwieweit die Halmbasis mit DON verseucht war und ob es dabei Einflüsse der Fruchtfolge bzw. des Pflanzenschutzregimes gab. Die Untersuchungen ergaben, dass im Jahr 2010 in der nicht behandelten Variante bis zu 1500 µg DON/kg TM in der Stoppel nachgewiesen werden konnten. Im Jahr 2011 konnten sogar mehr als 6000 µg DON/kg TM in Halmbasisproben der Variante PS-F0 festgestellt werden. Dies bestätigt, dass hauptsächlich die toxigenen Fusariumarten *F. culmorum* und *F. graminearum* für Halmbasisfusarium verantwortlich sind (Duben & Fehrmann 1979). Beide Arten produzieren genauso viel Toxin nach Halmbasisbefall wie bei einer Ähreninfektion (Mudge *et al.* 2006). Somit ist insgesamt das Stroh mit zum Teil erhöhten Werten des Toxins belastet. Ähnlich hohe Werte konnten auch in den Untersuchungen von (Brinkmeyer *et al.* 2006) in Weizenstroh gefunden werden. Die Autoren inokulierten zur Blüte einen Weizenbestand mit einer Sporensuspension von *F. culmorum*. Sie folgerten daraus, dass es bei der starken Ähreninfektion durch die Inokulation mit der Sporensuspension zu direkten Infektionen aller Pflanzenteile bzw. zu einer sekundären Infektion der Halmbasis kam. Interessanterweise wurden nach dieser künstlichen

Infektion bis zu 5000 µg DON/kg TM im Stroh festgestellt. In den eigenen Untersuchungen konnten hingegen unter natürlichen Bedingungen diese hohen Mengen im Stroh ermittelt werden. Die Autoren schlussfolgerten, dass Infektionen von *F. culmorum* zu einem erhöhten Risiko der Mykotoxinbelastung von Stroh führten. Weiterhin wurde angenommen, dass Toxinkontaminationen der Halmbasis bzw. des Strohs durch natürliche, bodenbürtige Infektionsbedingungen wesentlich häufiger vorkommen als Kornbelastungen mit DON. Dies konnte mit den hier vorgestellten mehrjährigen Untersuchungen belegt werden. Die Halmbasis- und Kornbelastungen zeigten sehr große Unterschiede. Die erhöhten Gehalte der Basis schienen keinen Einfluss auf das Erntegut zu haben. Nach einer halmbürtigen Infektion mit *F. culmorum* konnte gezeigt werden, dass sich der Erreger nicht systemisch in der Pflanze ausbreitet. Die vom Erreger während der Besiedelung ins pflanzliche Gewebe abgegebenen Trichothecene bewegen sich hingegen mit dem Transpirationsstrom in höhere Pflanzenteile. Der Übertritt der untersuchten Toxine von der Spindel ins Korn wird durch eine natürliche Verengung des Xylems im Bereich der Rachilla verhindert (Winter *et al.* 2013). Somit stellen die hohen Mykotoxinmengen in der Halmbasis keine Gefahr für das Erntegut dar. Fruchtfolgeeffekte konnten bei den DON-Werten in der Halmbasis nicht festgestellt werden, d.h. an beiden Standorten war höchstwahrscheinlich ein Grundinokulum an *Fusarium* im Pflughorizont vorhanden, welches in jedem Jahr die Halmbasis von Weizen infiziert. Dies wurde auch an den zum Teil sehr hohen Befallshäufigkeiten deutlich. Im Jahr 2011 differenzierten die Toxingehalte der Basis in den einzelnen Fruchtfolgen aber deutlicher. Ein weiterer Grund für die mangelnde statistische Absicherung könnte die hohe Variation der natürlichen DON-Werte gewesen sein. Interessanterweise wurden im Jahr 2011 tendenziell die höchsten DON-Gehalte in Halmbasisproben der Fruchtfolge 4 gefunden, wohingegen durch die visuelle Bonitur ein geringerer Befall durch *Fusarium spp.* im Vergleich zur Fruchtfolge 2 ermittelt wurde. Dies könnte ein Hinweis auf den Beitrag von Wurzelinfektionen durch *Fusarium spp.* zum DON-Gehalt im Halmgrund geben, welche nicht erfasst wurden. Die Menge an bodenbürtigem Inokulum von *Fusarium spp.* in verschiedenen Fruchtfolgen und die Auswirkungen auf Wurzelinfektionen sind weitgehend unbekannt. Das sollte ein Ansatzpunkt für weitere Forschungen sein.

In den Untersuchungen wurde deutlich, dass im Zeitverlauf die Fruchtfolgen das Bodeninokulum von *Fusarium* differenziert beeinflusst haben müssen, was auf die unterschiedlichen Feldfrüchte und Feldfruchtanteile zurückzuführen ist. Dabei könnte das halmbürtige DON ein guter Indikator für die Befallsstärke mit den toxinproduzierenden

Arten und der Toxinkontamination des Pflanzenmaterials sein. Den Befallshäufigkeiten von *Fusarium spp.* am Standort in Göttingen sehr ähnlich konnte bei den Toxingehalten ein signifikanter Einfluss der Pflanzenschutzmaßnahme ermittelt werden. Die beiden Fungizidmaßnahmen mit Azolpräparaten halbierten den DON-Gehalt der Halmbasis in beiden Untersuchungsjahren.

Der Schwerpunkt dieser Erhebung lag auf den Halmbasiserkrankungen von Winterweizen in verschiedenen Energiefruchtfolgen. Es stellte sich heraus, dass die Gattung *Fusarium* besonders häufig auftrat. In diesem Zusammenhang wird Mais als kritische Vorfrucht für Weizen angesehen. Zur Bewertung der verschiedenen Fruchtfolgen mit Fokus auf *Fusarium*erkrankungen und den daraus resultierenden Mykotoxinbelastungen des gesamten Pflanzenmaterials, wurden DON-Analysen in Ganzpflanzenproben von Mais gemacht. Diese zeigten, dass Mais nicht nur ein potenter Wirt für viele Arten aus der Gattung *Fusarium* ist, sondern selbst stark mit dem Mykotoxin belastet war. Im letzten Untersuchungsjahr konnten erhöhte Werte von bis zu 1800 µg DON/kg TM festgestellt werden. Dabei wurden in Proben der Maismonokultur die höchsten Werte ermittelt. Die Eingliederung von Raps und Weizen in die Fruchtfolge 3 unterbrachen den Daueranbau von Mais und reduzierten somit den DON-Gehalt in den Maisproben. Weiter verringerte Maisanteile in der Fruchtfolge (Fruchtfolge 4) führten zu den mit Abstand geringsten DON-Gehalten. Unterschiede der DON-Werte in Maisproben zwischen den Fruchtfolgen ließen sich statistisch nicht feststellen.

Interessanterweise wirkten die Fruchtfolgen 3 und 4 unterschiedlich auf die DON-Gehalte in Ganzpflanzenproben von Mais und Halmbasisproben von Weizen. Der niedrigste Gehalt an DON konnte in den Maisproben der Fruchtfolge 4 festgestellt werden, wohingegen die Weizenstoppelproben der Fruchtfolge 3 die geringsten Mykotoxinmengen aufwiesen. Die höchsten Gehalte in Weizen und Mais wurden demnach immer in Proben aus Fruchtfolgen mit den größten Anteilen an Mais (Fruchtfolge 1) bzw. Weizen (Fruchtfolge 2) gefunden. Für die bodenbürtige Infektion mit *Fusarium* mit nachfolgender DON-Kontamination war nicht nur die Art der Vorfrucht entscheidend, sondern auch der Anteil des gleichen Wirts in der Fruchtfolge. Somit kann Mais für eine Halmbasisinfektion von Weizen bei wendender Bodenbearbeitung nicht mehr als Risikovorfrucht angesehen werden. Eine mögliche Erklärung ist, dass die toxischen Erreger aus der Gattung *Fusarium* innerhalb von Fruchtfolgen eine Präferenz für die meistangebaute Kultur ausbilden. Diese Ackerfrüchte würden demnach innerhalb der Rotation stärker befallen werden als andere potenzielle Wirte. Maislastige Fruchtfolgen würden somit besonders aggressive

Fusariumisolate an Mais fördern und weizenlastige Fruchtfolgen *vice versa*. Die Erweiterung von engen Weizen- bzw. Maisfruchtfolgen durch die Eingliederung anderer Kulturen kann daher diesen Ausleseprozess unterbrechen, auch wenn diese Kulturen zum Wirtsspektrum von *Fusarium spp.* gehören. Talas *et al.* (2012) konnten in ihren Untersuchungen zur räumlichen Verteilung von Isolaten des Erregers *F. graminearum* innerhalb von Weizenschlägen zeigen, dass die Population eines Feldes in Bezug auf die Aggressivität und DON-Produktion sehr stark variiert. Damit ist die genetische Vielfalt von *F. graminearum* Isolaten sehr groß und könnte in der vorliegenden Untersuchung zu den Unterschieden im DON-Gehalt in Weizenstoppel- bzw. Maisproben geführt haben. Diese Hypothese sollte Gegenstand weitergehender Untersuchungen sein.

Eine andere Erklärung für die DON-Unterschiede in Mais- und Weizenproben könnte im differenzierten Artenspektrum der toxigenen Vertreter der Gattung *Fusarium* zu finden sein. Als Haupterreger der Wurzel-, Stängel- und Kolbenfäule an Mais gelten neben den Arten *F. graminearum* und *F. culmorum* die Arten *F. verticillioides*, *F. subglutinans* und *F. proliferatum* (Asran & Buchenauer 2003; Munkvold 2003; Goswami & Kistler 2004). Deutschlandweite Untersuchungen über das Fusariumerregerspektrum an Maiskörnern haben aufgezeigt, dass die am meisten verbreiteten Arten *F. verticillioides*, *F. graminearum* und *F. proliferatum* waren. Diese Erreger zeichnen sich durch ein differenziertes Mykotoxinprofil aus. *F. verticillioides*, *F. subglutinans* und *F. proliferatum* produzieren hauptsächlich Fumonisin, wohingegen *F. graminearum* und *F. culmorum* als reine Trichothecen B Produzenten (DON u.a.) gelten (Leslie & Summerell 2006). Somit kann man davon ausgehen, dass die analysierten Toxine (DON) in Mais und Weizen von den gleichen Erregern verursacht wurden. Die These, dass die unterschiedlichen Toxingehalte von Mais und Weizenstoppel in den gleichen Fruchtfolgen durch verschiedene toxigene Erreger hervorgerufen wurden, ist also unwahrscheinlich.

Es wird beschrieben, dass die Infektionen der Maispflanze symptomlos verlaufen können (Munkvold 2003; Goswami & Kistler 2004). In den Maisparzellen wurden keine systematischen visuellen Bonituren in Hinblick auf Fusariumerkrankungen gemacht. Bei den routinemäßigen Kontrollen der Bestände konnten aber keine ausgeprägten bzw. häufigen Symptome der Wurzel, Stängel- oder Kolbenfäule festgestellt werden. Mais als Ganzpflanze hat somit eine relativ hohe Toleranz gegenüber Fusariuminfektionen, die aber dennoch zu einer nicht unerheblichen Toxinbelastung des Pflanzenmaterials führt.

Die Analysen der DON-Gehalte in Ganzpflanzenproben von Mais und in der Stoppel von Weizen in den verschiedenen Energiefruchtfolgen machten deutlich, dass in ungünstigen Fruchtfolge-Pflanzenschutzkombinationen sehr hohe Mengen des Fusariumtoxins DON gefunden werden konnten. Betrachtet man die verschiedenen Fruchtfolgen als Anbausystem, so stellt sich heraus, dass die verschiedenen Anbausysteme jährlich zu enormen Mengen an Mykotoxinen in der pflanzlichen Biomasse führten. Die hier festgestellten Gehalte überstiegen häufig die gesetzliche Höchstmenge für unverarbeitete Rohware von 1250 µg DON/kg TM zur Produktion von Lebensmitteln. Für Mais als Grün- und Raufutter in der Tierernährung hat die Europäische Kommission keine verbindlichen Höchstwerte erlassen, sondern lediglich einen Richtwert von 8000 µg/kg TM herausgegeben (Anonymus 11 2006). Dieser Richtwert wurde bei Weitem nicht erreicht. Dennoch stellt sich die Frage, welche Auswirkungen die warmblütertoxischen Verbindungen auf die Prozesskette in der pflanzlichen Energieproduktion haben und ob die relevanten Mengen in Ernterückständen Auswirkungen auf das Ökosystem haben könnten.

Der im Energiepflanzenanbau produzierte Mais wird zur Siloreife geerntet und der Aufwuchs verlässt fast vollständig das System. Die pflanzliche Biomasse wird als Substrat für Biogasanlagen genutzt. Die Ergebnisse der Auswirkungen von DON auf den Fermentationsprozess wurden in Kapitel 3.2.1.4 dargestellt und werden im nächsten Abschnitt diskutiert. Die Toxinmessungen im Weizen wurden in der Stoppel vorgenommen. Da aber beim Weizen, auch zum Zweck der Energiegewinnung, nur das Korn geerntet wird, verblieben bei einem durchschnittlichen Harvest-Index von ca. 60% bis zu 5 t Stroh und Spreu in den Versuchen auf dem Acker. Anbausysteme, welche Fusariuminfektionen und damit hohe Mykotoxinbelastungen der gesamten pflanzlichen Biomasse forcieren, hinterlassen eine große Menge an Fusariumtoxinen im Anbausystem. Dies wurde in den DON-Gehalten der Weizenstoppel der Fruchtfolgen 2 und 4 deutlich. Damit stellt sich die Frage, welche Auswirkungen auf das Ökosystem ungünstige Energiefruchtfolgen mit einem hohen Mykotoxinrisiko für die Ernterückstände haben. Die Bodenbearbeitung nach dem Weizenanbau in den verschiedenen Fruchtfolgen bestand aus einem lockernd-mischenden Arbeitsschritt mit einem Grubber. Somit blieb sehr viel Stroh und Spreu auf der Bodenoberfläche. Regenwürmer gelten als die bedeutendsten Zersetzer von Pflanzenresten an und auf der Bodenoberfläche (Lee 1985). Ein wichtiger Vertreter aus der Familie der Regenwürmer ist *Lumbricus terrestris*. Er gilt als Primärzersetzer und inkorporiert durch vertikales Bohren große Mengen an

Pflanzenrückständen in tiefere Bodenschichten. Mehrere aktuelle Arbeiten haben die Ökosystemleistung von Regenwürmern, im Besonderen von *L. terrestris*, beim Abbau von phytopathogenen und toxigenen Pilzen aufgezeigt (Oldenburg *et al.* 2008; Wolfarth *et al.* 2011a; Wolfarth *et al.* 2011b; Schrader *et al.* 2009). In Freiland- und Laboruntersuchungen haben diese Autoren festgestellt, dass künstlich mit *Fusarium* infiziertes Stroh, welches eine DON-Belastung von über 120.000 µg/kg TM aufwies, wesentlich attraktiver als Futterquelle war als nicht infiziertes Stroh. Die Untersuchungen zeigten weiterhin, dass das *Fusarium*toxin DON innerhalb der elfwöchigen Versuchsdauer nahezu vollständig abgebaut war. Zusätzlich wurde festgehalten, dass die Regenwürmer bei einer *fusarium*infizierten Kost ein höheres Lebendgewicht aufwiesen. Dafür wird der höhere N-Gehalt in dem mit Pilzen bewachsenen Material verantwortlich gemacht. Nach (Oldenburg *et al.* 2008) kann *L. terrestris* das DON direkt degradieren. Er katalysiert durch seine Lebensweise nachhaltig die Mikroorganismenaktivität im Boden, welche als maßgeblich für den Abbau von DON angesehen wird. Eine Akkumulation von DON im Regenwurm bzw. negative Auswirkungen auf seine Lebensweise konnten nicht festgestellt werden, wobei noch unklar ist, ob seine Fertilität bzw. Reproduktivität gestört werden (Schrader *et al.* 2009). Regenwürmer als Hauptersetzer von DON-belasteten Ernterückständen bleiben demnach ungeschädigt. Zusätzlich konnten Untersuchungen von (Völkl *et al.* 2004) zeigen, dass sich aufgrund der Mikroorganismenaktivität kein DON im Boden anreichert. Somit stellten die mit DON hoch-belastete Ernterückstände aus den Fruchtfolgen 2 und 4 keine Gefährdung für das Ökosystem dar.

4.4. Mykotoxine in Grünroggen

Grundsätzlich können alle Getreidearten in allen Entwicklungsstadien von Fusarien befallen werden. Eine Fruchtfolge, welche die Kombination aus Mais und Grünroggen als Vorfrucht beinhaltet könnte somit die *Fusarium*problematik verstärken, da zwei Wirte in einer Vegetationsperiode angebaut werden. Aus diesem Grund erfolgte die Bestimmung des *Fusarium*artenspektrums an den Halmbasen der Grünroggensorte Borfuro vom Standort in Göttingen in den Jahren 2010 und 2011. Im Jahr 2010 konnten nur an 5% der Halmbasen *Fusarium*arten festgestellt werden. Der häufigste Vertreter war die Art *F. culmorum*. Die Toxinmessungen im Häckselgut und die Quantifizierung der toxinproduzierenden Arten in Halmbasisproben fielen negativ aus. Nach dem ersten Versuchsjahr war der Grünroggen noch sehr gesund.

Im Jahr 2011 wurden schon an doppelt so vielen Halmbasen des Roggens Fusariumspezies gefunden (ca. 14%). Dies unterstützt die Annahme, dass sich das Fusariuminokulum im Zeitverlauf in den Fruchtfolgen anhäuft. Interessanterweise konnten nur an 5% der Halmbasisproben toxische Erreger festgestellt werden. In ihrer Verteilung zeigten sie keine Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen. Das Fusariumrisiko und die Toxinverseuchung der pflanzlichen Biomasse sind noch als sehr gering einzuschätzen. Die Infektion von Weizen durch *F. culmorum* als Erreger von Halmbasiserkrankungen erfolgt schon im Herbst. In der Literatur wird beschrieben, dass die pilzliche Entwicklung in der Pflanze über Winter aussetzt bzw. reduziert ist. Erst im Frühjahr breitet sich der Erreger im Bestand und in der Pflanze aus, so dass Symptome sehr spät in der Vegetationszeit auftreten (Cook 1968). Der Grünroggen wurde immer Ende April zum beginnenden Ährenschieben (ES 51) geerntet. Daher reichte die Vegetationszeit noch nicht für eine starke Fusariumbesiedlung des Halmes aus. Die Erreger durchwachsen bei der Infektion die äußeren Blattscheiden und dringen zum Halm vor (Clement & Parry 1998). Die Probennahme fand im zeitigen Frühjahr statt und sämtliche Blattscheiden wurden vor dem Auslegen der Halmbasisabschnitte zur Bestimmung des Erregerspektrums von *Fusarium spp.* vom Halm entfernt. Primärinfektionen, die noch nicht zum vollständigen Durchwachsen der Halmscheiden bis zum Halm führten, wurden daher nicht ermittelt. Eine Fortführung des Projekts wird zeigen, ob sich in Zukunft eine kritische Belastung durch Fusarium in den Fruchtfolgen ausbildet, welche zu stärkeren Infektionen des Roggens führt.

Berücksichtigt man, dass Weizenhalmbasen stark DON-verseucht waren, stellte sich weiterhin die Frage, welche Auswirkungen eine hohe Kontamination von Roggen mit DON haben könnte, wenn er als Gärsubstrat dient. Mit Versuchen im Gewächshaus unter kontrollierten Bedingungen wurde die Anfälligkeit von Grünroggen gegenüber *Fusarium spp.* getestet. Die ausgewiesene Grünroggensorte Borfuro, die auch im Feldversuch Verwendung findet, zeigte dabei eine wesentlich höhere Anfälligkeit als eine konventionelle Sorte. Hieraus lässt sich eine sortenspezifische Resistenz der Halmbasis gegenüber *Fusarium ssp.* (*F. graminearum* und *F. culmorum*) ableiten, welche sich in geringerer Pilzbiomasse in der Basis und geringeren Toxinkontaminationen des gesamten Pflanzenaufwuchses in der Sorte Askari äußerte. Die konventionelle Sorte Askari ist eine Hybridsorte, wohingegen Borfuro eine Populationsorte ist. Die Resistenz gegen Halmbasiserkrankungen wird in Hybrid- und Populationsroggen quantitativ vererbt und beruht somit auf mehreren Genen, wobei keine vollständige Resistenz bekannt ist

(Miedaner *et al.* 1995). Die Anfälligkeit gegenüber Halmbasiserkrankungen kann daher stark variieren, was sich in den beiden Sorten Borfuro und Askari zeigte. Diese Eigenschaft wird weder vom Bundessortenamt noch von den Züchterfirmen angegeben. In der beschreibenden Bundessortenliste des Bundessortenamts findet sich lediglich eine Angabe über das Halmknicken für Askari. Diese Sorte zeigt mit der Note 5 eine mittlere Anfälligkeit (Anonymus 12 2008). Eine Aussage über die Sensitivität für Halmbasiserkrankungen fehlt. Durch eine gezielte Sortenwahl könnte aber evtl. die Fusariumproblematik an der Basis im Zwischenfruchtanbau mit Roggen reduziert werden.

Die nachgewiesenen DON-Werte von über 4500 µg/kg TM in Grünroggen in der mit *F. graminearum* infizierten Variante überstiegen den Höchstwert für Rohgetreide um das dreieinhalbfache. Hierbei handelte es sich um Trockenmassewerte. Bezieht man sie auf die Frischmasse, so reduzieren sie sich auf ca. ein Fünftel. Es wird deutlich, dass besonders der in den Feldversuchen verwendete Grünroggen Borfuro anfällig gegenüber Fusarium ist und hohe Mengen an Toxin akkumulieren kann. Andererseits bedeutet das auch, dass Grünroggen ein guter Wirt für Fusarium innerhalb der Fruchtfolge ist und somit die Fusarienproblematik in Mais erhöhen könnte. Mais wird wie oben aufgezeigt ebenso an der Basis und am Kolben von verschiedenen Fusarienarten befallen. So könnte sich in weiteren Untersuchungen zeigen, dass nicht der Mais eine Risikovorfrucht ist, sondern vielmehr der Grünroggen für Mais im Zweitfruchtanbau.

Die Untersuchungen zeigen, dass Grünroggen und Mais stark mit DON belastet sein können. Neben Mais dient Grünroggen als Gärsubstrat im Biogasprozess, daher wurde getestet, welche Auswirkungen hoch DON-belasteter Grünroggen auf den Fermentationsprozess hat. Durch den Rostocker Aktivitätstest (Engler *et al.* 2009) mit DON belastetem Grünroggen (> 6000 µg DON/kg TM) konnte eine Reduktion der kumulierten Biogasausbeute um 10% im Vergleich zur nicht belasteten Kontrolle nachgewiesen werden. Direkte Hemmwirkungen von DON auf den Biogasprozess wurden nicht festgestellt. Da das kontaminierte Material zu einem Impfschlamm gegeben wurde (17% bzw. 40% des Impfschlammes), erfolgte eine Verdünnung des Toxins um mehr als die Hälfte. Durch die Versuchsanstellung könnten die Auswirkungen des Toxins reduziert worden sein. In der Literatur sind toxische Effekte von DON auf Organismen schon bei niedrigen Konzentrationen beschrieben. Versuche mit tierischen Modellorganismen zeigten, dass eine chronische Exposition mit niedrigen Dosen von DON zu Wachstumsverzögerungen, Immunotoxizität, verschlechterter Reproduktion und Emesis führte (Pestka 2010). Auf zellulärer Ebene induziert das Toxin Beeinträchtigungen der

Proteinbiosynthese an den Ribosomen, welches zu einer unterbrochenen Signaltransduktion, Zelldifferenzierung und -versorgung führt (Pestka 2010). Untersuchungen mit Zellkulturen machten weiter deutlich, dass hohe Konzentrationen von DON zu Apoptose führen. Die Annahme einer möglichen Toxizität von DON gegenüber Mikroorganismen wie den Fermenterbakterien war damit nicht unberechtigt. Gegebenenfalls waren die Verweildauer bzw. die Konzentration von DON im Substrat nicht ausreichend, um inhibierende Effekte auf den Biogasprozess zu bewirken. Goux *et al.* (2010) konnten hingegen zeigen, dass auch bei sehr hohen Mengen von 80.000 µg DON/kg TM in künstlich angereichertem Getreide keine Auswirkungen auf den anaeroben Fermentationsprozess in einer Kleinanlage nach Batch-Verfahren (2 L) zu beobachten waren. Untersuchungen der Sächsischen Landesanstalt für Landwirtschaft (Wesolowski *et al.* 2008) bestätigen diese Aussagen. Hier wurde im Batch-Verfahren die Auswirkung von DON belasteter Triticale im Vergleich zu nicht belasteter auf den Vergärungsprozess und die Prozessstabilität hin getestet. Nach Ablauf der Prozesszeit von 30 Tagen konnte kein DON im Gärrest nachgewiesen werden. Eine Studie der Universität Hohenheim (Frauz *et al.* 2008) zur Inaktivierung von Fusariensporen und zur Reduzierung von DON gab weiterhin Aufschluss über die Abbauprozesse von DON. So findet im Fermenter eine anaerobe, enzymatische Deepoxylierung statt. Das konnten die Autoren durch die Anreicherung des Metaboliten Deepoxy-DON zeigen. Auch hier wurden in kurzer Zeit hohe Mengen an DON während des „Hohenheimer Biogasertragstests“ abgebaut. Schon nach 2,4 Stunden kam es zu einer nennenswerten Reduktion. Damit hat DON keinen hemmenden Effekt auf den Fermentationsprozess.

In der erwähnten Studie von Frauz *et al.* (2008) wurden aber auch reduzierte Methanerträge von 15% bei natürlich kontaminiertem Gärsubstrat im Vergleich zu künstlich angereichertem festgestellt. Als Substrat diente einerseits auf dem Feld mit *Fusarium spp.* infizierter Weizen und andererseits zertifiziert befallsfreier Weizen, welcher mit dem Toxin angereichert war. Inhaltsstoffanalysen der Substrate zeigten, dass der im Feld infizierte Weizen geringere Gehalte an leicht verdaulichen Kohlenhydraten aufwies. Die Autoren folgerten, dass *Fusarium spp.* bei einem Befall diese Inhaltsstoffe als Nahrungsquelle nutzt und sie somit nicht mehr dem Fermentationsprozess zur Verfügung stehen. Die mit *Fusarium spp.* besiedelte Kornfraktion wies im Vergleich zum befallsfreien Weizen 8-10% weniger Stärke und bis zu 17% weniger Zuckerfraktionen auf (Frauz *et al.* 2008). Die Erhöhung des Gesamtproteingehalts in Pflanzenmaterial, welches von *Fusarium spp.* besiedelt war, konnte nicht zur Methanbildung genutzt werden. Das macht

deutlich, dass eine Fusariuminfektion eine Qualitätsbeeinträchtigung für das Gärsubstrat ist. Zusätzlich konnte in den Gewächshausversuchen mit Grünroggen gezeigt werden, dass eine starke bodenbürtige Infektion durch *Fusarium* ssp. zu einem signifikant geringeren Biomasseaufwuchs führt. Durch die Qualitätsbeeinträchtigungen und verringerten Biomasseerträge können Fusariuminfektionen in Energiefruchtfolgen zu erheblichen Problemen führen. Zu einer verminderten Biomassebildung aufgrund von Fusariuminfektionen kommt es nur bei Starkbefällen, die in diesen Untersuchungen nicht festgestellt werden konnten. Die hohen DON-Gehalte in Mais- und Weizenproben haben aber Hinweise darauf ergeben, dass *Fusarium* spp. diese Kulturen in nicht unerheblichem Maß besiedelt. Besonders problematisch ist demnach die latente Infektion von Mais durch Fusarien. Die DON-Analysen in Maissubstrat zeigten, dass es deutliche Abstufungen in der Belastung zwischen den Fruchtfolgen gab. Aus den vorliegenden Ergebnissen wird daher gefolgert, dass es in fusariumfördernden Fruchtfolgen (Fruchtfolge 1) zu Qualitätsbeeinträchtigungen des Gärsubstrats kommen kann. In weiteren Untersuchungen sollten daher die Auswirkungen von verschiedenen Energiefruchtfolgen auf den Befall von Mais mit *Fusarium* spp. ermittelt werden. Die Effekte eines Fusariumbefalls auf die wertgebenden Inhaltsstoffe für die Biogasproduktion in Mais sollten dabei im Mittelpunkt stehen.

4.5 Abschließende Bewertung

Die vorangegangenen Schlussfolgerungen machen deutlich, dass die untersuchten Energiefruchtfolgen zum Teil als phytomedizinisch bedenkliche Anbausysteme angesehen werden können. Es wurden deutliche Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen ermittelt. Die Beurteilung der Halmbasiskrankheitserreger und der Mykotoxingehalte zeigte, dass die Fruchtfolge 2 das am meisten befallene und die Fruchtfolge 3 das gesündeste Anbausystem war. Diese Unterschiede auf zum Teil niedrigem Niveau (*O. yallundae/acuformis*) könnten sich unter anderen Witterungsbedingungen und bei längerer Laufzeit erheblich verstärken und zu gravierenden phytomedizinischen Problemen führen. Die befallserhöhende Wirkung von ungünstigen Anbausystemen bzw. Feldfruchtkombinationen tritt häufig erst innerhalb der zweiten Rotation auf (Steinbrenner & Höflich 1984). Fruchtfolge 2 ist ein besonders extremes Anbausystem, welches durch einen Fruchtwechsel von ausschließlich Raps und Weizen gekennzeichnet ist. Aufgrund der schlechten Selbstverträglichkeit von Raps und den damit verbundenen

Fruchtfolgekrankheiten *Plasmodiophora brassicae*, *Verticillium longisporum* und *Sclerotinia sclerotiorum* ist ein 50%-iger Rapsanteil in der Fruchtfolge im praktischen Anbau eher die Ausnahme. Die Einleitung führte schon kurz zur Problematik der Einengung von Fruchtfolgen aufgrund der zunehmenden Anbauumfänge von den bedeutenden Energiepflanzen Raps und Mais hin. Der Energiepflanzenanbau kann aber nicht losgelöst vom konventionellen Ackerbau in Deutschland gesehen werden. Eine den etablierten Energiepflanzen gleichwertige neue Energiepflanze, welche die konventionellen Anbaumuster aufbricht und als Nichtwirtspflanze die Überdauerung von Schaderregern reduzieren kann, fehlt bislang im Anbau. Die Fruchtfolgegestaltung im Ackerbau wird so immer einseitiger und reduziert sich auf den Anbau weniger Ackerkulturen in enger Folge. Abgeleitet von den hier vorgestellten Ergebnissen sollte ein Anbau von Weizen mit 50% in der Fruchtfolge bei reduzierter Bodenbearbeitung in der Praxis vermieden werden. Dies kann durch die Eingliederung von einer Maiskultur in Kombination mit wendender Bodenbearbeitung in enge Weizenfruchtfolgen erreicht werden. Hierdurch kann das Auftreten des bedeutenden Halmbrucherregers an Weizen im Anbausystem fast vollständig verhindert werden. Zusätzlich nehmen auch die anderen wichtigen Halmbasis- und Wurzelkrankheitserreger an Weizen wie *Fusarium spp.* bzw. *G. graminis* signifikant bei dieser Kombination der Energiefrüchte Raps, Mais und Weizen ab.

In der vorliegenden Studie wurden unterschiedliche Feldfruchtkombinationen von Energiefrüchten untersucht. Bei der Auswahl der Früchte orientierte man sich an den in der Praxis meist genutzten Kulturen hinsichtlich der energetischen Verwertung. Die unterschiedliche Kombination sollte zu einem abgestuften phytomedizinischen Risiko beim Anbau führen. Dabei fanden auch extreme Anbaumuster wie eine Maismonokultur (Fruchtfolge 1) und eine Raps-Weizen-Folge (Fruchtfolge 2) Berücksichtigung. Bei den aufgelockerten Fruchtfolgen 3 und 4 handelte es sich um drei- bzw. vierfeldrige Fruchtfolgeglieder. Tabelle 21 zeigt die meistverbreiteten Anbaumuster von Feldfrüchten und ihren Anteil an der Ackerfläche in Niedersachsen. Der Maisanbau in Monokultur nahm den größten Anteil an der Ackerfläche ein. Bestimmend für die Anbaumuster sind aber dreifeldrige Fruchtfolgen mit einem Getreideanteil (hauptsächlich Weizen) von mehr als 50%. Diese Fruchtfolgeglieder umfassten 27% der niedersächsischen Ackerfläche. Hauptsächlich bestanden die Anbausysteme aus den Feldfrüchten Weizen, Mais, Raps bzw. Rüben und Gerste. Damit entsprechen die in dieser Studie untersuchten Fruchtfolgeszenarien größtenteils der aktuellen Anbaupraxis. Die gewonnenen Ergebnisse

können als praxisrelevante Empfehlungen angesehen werden, um fruchtfolgebedingte Krankheiten im Weizen zu minimieren.

Tab. 21: Die zwölf meist verbreiteten Anbaumuster von Feldfrüchten in Niedersachsen (alle Getreidearten als Wintergetreide, AF = Ackerfläche). Aus: Steinmann (2011).		
Anbaumuster/Rotation	Anteil an AF (%)	kumul. Anteil an AF (%)
Mais-Daueranbau	8,9	8,9
Raps-Weizen-Gerste	8,1	16,9
Rüben-Weizen-Weizen	6,5	23,4
Rüben-Weizen-Gerste	5,2	28,6
Raps-Weizen-Weizen	3,8	32,4
Mais-Mais-Roggen	3,5	35,5
Ackerfutter-Daueranbau	3,0	38,9
Mais-Mais-Weizen	2,2	41,1
Mais-Roggen	1,4	42,4
Mais-Weizen	1,2	43,6
Roggen-Daueranbau	1,0	44,6
Weizen-Daueranbau	1,0	45,6

In Tabelle 21 sind die Anbauanteile verschiedener Feldfruchtkombinationen aufgelistet. Hieran wird deutlich, dass auf nicht unerheblichen Teilen der Ackerfläche Niedersachsens Rotationen mit mehr als 50% Getreide (66-100% Getreide auf 16,5% der Ackerfläche in Niedersachsen) stehen. Das zeigt den Bedarf an Untersuchungen über phytomedizinisch sinnvolle Erweiterungen der Fruchtfolge auf.

Da sich die Anbaugestaltung heute selten an phytomedizinischen Aspekten orientiert, sondern vielmehr nach der betriebswirtschaftlichen und -organisatorischen Vorzüglichkeit der Anbausysteme (Steinmann & von Tiedemann 2006), wird dieser Trend von immer kürzeren Fruchtfolgen in Zukunft weiter zunehmen. Der ansteigende Flächenbedarf für die Kulturen Mais und Raps zur Nutzung als Bioenergieträger verstärkt diese Entwicklung weiter. Als alternative Energiepflanzen wird häufig die Zuckerrübe genannt (Hoffmann & Starke 2011). Ihre Eingliederung in Energiefruchtfolgen ist aber nicht unumstritten, da es in Kombinationen mit Raps zu verstärkten Problemen mit dem Rübennematoden (*Heterodera schachtii*) und in Kombination mit Mais zu einem erhöhten Schad-erregerdruck von *R. solani* kommt (Steinmann & von Tiedemann 2006). Die besondere Brisanz des zunehmenden Energiepflanzenanbaus liegt darin, dass er weitestgehend regional begrenzt am Ort des Bedarfs stattfindet. Die Fruchtfolgegestaltung im

Energiepflanzenanbau auf räumlicher bzw. betrieblicher Ebene wurde im Rahmen der ökonomischen Analyse von Energiefruchtfolgen vorgenommen (s. Teilprojekt 4).

Die Bedeutung von Fruchtfolgen als Mittel des vorbeugenden Pflanzenschutzes besteht vor allem für chemisch schwer oder nicht bekämpfbare Krankheiten wie *Verticillium longisporum* und *Plasmodiophora brassicae* im Raps. Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigten auf, dass vereinfachte bzw. kurze Fruchtfolgen zu einer Zunahme von Pflanzenkrankheiten im Getreide führten. Diese phytomedizinisch nachteiligen Fruchtfolgen fordern mehr Pflanzenschutzmaßnahmen (Steinmann & von Tiedemann 2006). Unter den Gesichtspunkten des integrierten Pflanzenschutzes und des *Nationalen Aktionsplans zur Reduktion der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln* ist diese Entwicklung als äußerst kritisch einzustufen. Die vorgestellten Ergebnisse haben das Potenzial von erweiterten Fruchtfolgen zur Reduktion von Pflanzenschutzmitteln und als Instrument des vorbeugenden Pflanzenschutzes aufgezeigt.

Insgesamt konnte gezeigt werden, dass die unterschiedliche Bodenbearbeitung, der Aussattermin und die verschiedenen Feldfruchtkombinationen (Anzahl und Art) im Zusammenspiel Hauptfaktoren darstellen, die Unterschiede zwischen den Fruchtfolgen bewirkten. Die kurze Fruchtfolge 2 mit 50% Weizenanteil, Lockerbodenbearbeitung und einem frühen Aussattermin zeigte die höchsten Befallshäufigkeiten für die drei untersuchten Halmbasiskrankheitserreger an Weizen. Die Eingliederung von Mais in die Fruchtfolge mit wendender Bodenbearbeitung reduzierte signifikant das Befallsgeschehen. *Fusarium spp.* war der bedeutendste Erreger an Weizen und Mais in den untersuchten Fruchtfolgen. Die Auswirkungen von verschiedenen Energiefruchtfolgen auf den Fusariumbefall besonders im Mais sollten Gegenstand weiterer Untersuchungen sein.

5 Zusammenfassung

Im Rahmen der vorliegenden Arbeit sollten anhand eines zweifaktoriellen Feldversuchs bestehend aus den Faktoren Fruchtfolge und Pflanzenschutz die Potenziale zur Reduktion von fruchtfolgebedingten Halmbasis- und Wurzelkrankheitserregern an Weizen (*Triticum aestivum* L.) durch eine geschickte Kombination von Energiefrüchten aufgezeigt werden. Ein Schwerpunkt lag hierbei auf Halmbasisfusarium und die Ausbreitung des Mykotoxins Deoxynivalenols (DON) von der Halmbasis bis in die Ähre. Hierzu wurden vier Fruchtfolgen mit einer unterschiedlichen Dichte an Ackerkulturen etabliert: (1) Maisdaueranbau, (2) Raps – Winterweizen, (3) Raps – Grünroggen/Mais – Winterweizen und (4) Raps – Winterweizen – Grünroggen/Mais – Winterweizen. Der Versuch wurde auf Versuchsflächen der Universitäten Göttingen und Rostock äquivalent angelegt. Die Erhebungen erfolgten in den Jahren 2010 und 2011. Die Bedeutung der halmbürtigen Mykotoxine für die Belastung des Kornes wurde in ergänzenden Untersuchungen unter kontrollierten Bedingungen untersucht.

Durch eine visuelle Befallsbonitur im Entwicklungsstadium (ES) der späten Milchreife (ES 77) erfolgte die Ermittlung der Befallshäufigkeit von *Rhizoctonia cerealis*, *Oculimacula yallundae/acuformis*, *Fusarium* spp. und *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* an der Halmbasis bzw. Wurzel von Weizen.

Mykotoxinnachweise (ELISA-Test) des Leittoxins Deoxynivalenol (DON) und DNA-Quantifizierungen (qPCR) von toxinproduzierenden Fusariumarten in Pflanzen aus Feld-, Gewächshaus- und Klimakammerversuchen gaben weiterhin Aufschluss über die Mykotoxinbelastung der Pflanze und systemische Verlagerung von DON nach einem Befall der Halmbasis von Winterweizen mit *Fusarium culmorum* und *F. graminearum*.

R. cerealis hatte mit einer Befallshäufigkeit von unter 0,5% in beiden Untersuchungsjahren 2010 und 2011 kaum eine Bedeutung. Erhöhte Befallshäufigkeiten konnten für *G. graminis* var. *tritici* mit ca. 20% im Jahr 2010 am Standort in Göttingen und 2011 am Standort in Rostock festgestellt werden. Die Befallswerte waren mit <5 sehr niedrig. Für *O. yallundae/acuformis* konnten leicht erhöhte Befallshäufigkeiten von maximal 25% bzw. 37% an den Standorten in Rostock und Göttingen im Jahr 2010 festgestellt werden. Im letzten Untersuchungsjahr waren die Befallshäufigkeiten mit 7% bzw. 15% an den Standorten Göttingen und Rostock auf einem niedrigen Niveau. Die zweijährigen Erhebungen in den Jahren 2010 und 2011 machten deutlich, dass

Fusarium spp. der dominierende Erreger mit 28% am Standort in Göttingen und 63% am Standort in Rostock an der Halmbasis im Mittel der Jahre war. Es zeigte sich für das Abschlussjahr 2011, dass nach dem Jahreseffekt die Fruchtfolge (18% am Standort in Göttingen) bzw. die Interaktion aus Fruchtfolge und Jahreseffekt (19% am Standort in Rostock) den größten Einfluss auf die Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* hatte. Die Bewertung der Fruchtfolgen erfolgte anhand der Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.*, die am häufigsten in dieser Untersuchung auftraten. Der Vergleich fand auf Grundlage der Befallshäufigkeiten in der Variante ohne Fungizidapplikation statt und wurde mit denen der Variante mit dem situationsbezogenen Pflanzenschutz verglichen. Es konnte festgestellt werden, dass bei beiden Krankheiten die kurze Fruchtfolge 2 (Raps-Weizen) die höchsten Befallshäufigkeiten aufwies.

Eine Fungizidapplikation führte häufig zu einer Reduktion des Befalls in den einzelnen Fruchtfolgen, was aber nicht immer statistisch absicherbar war. Am stärksten reduzierten sich die Befallshäufigkeiten, wenn die Fruchtfolgen aufgelockert wurden. Durch die Eingliederung einer Maiskultur in Kombination mit einer Zwischenfrucht wurde die enge Raps-Weizen Folge unterbrochen, wie es in Fruchtfolge 3 (Raps-Zwischenfrucht/Mais-Weizen) zu erkennen war. Zusätzlich zeigte der unterschiedliche Aussaattermin (früh/spät) in den Anbausystemen einen hochsignifikanten Einfluss ($p = 0,000$) auf die Befallshäufigkeiten, insbesondere Frühsaaten förderten den Befall. Im Fall von *Fusarium spp.* zeigte der Vergleich der Fruchtfolgen 2 und 3 eine Reduktion der Befallshäufigkeit um ca. 70% an den Standorten in Göttingen und Rostock. Durch die Fungizidmaßnahme in Fruchtfolge 2 und 3 reduzierte sich der Befall am Standort in Göttingen um weitere 40-50%. Für *O. yallundae/acuformis* wurde der Unterschied der Fruchtfolgen 2 und 3 noch deutlicher. Die Befallshäufigkeiten reduzierten sich um nahezu 100% an den Standorten in Göttingen und Rostock. Der Vergleich zur Variante mit situationsbezogenem Pflanzenschutz in der Fruchtfolge 2 machte deutlich, dass die Pflanzenschutzmaßnahme den Befall signifikant um 50% reduzierte.

Die Belastungen der Kornproben mit dem Mykotoxin DON waren sehr gering, wohingegen die Weizenstoppel der Fruchtfolge 4 in der Variante PS-F0 mit bis zu 6000 μg DON/kg TM kontaminiert war. Proben der Fruchtfolge 3 mit 33% Weizenanteil wiesen mit 2500 μg /kg TM die niedrigsten Gehalte an DON auf. In den Fruchtfolgen 2 und 4 mit 50% Weizenanteil wurden nahezu doppelt so hohe Mengen an DON festgestellt. Im Mittel reduzierte die Fungizidmaßnahme zu ES 31 und 51/55 den DON-Gehalt in der Stoppel signifikant um 50%. Der DON-Nachweis im Substrat der Ganzpflanze von Mais zeigte für

den Maisdaueranbau leicht erhöhte Werte von 1800 µg DON/kg TM. Mit abnehmendem Maisanteil in der Fruchtfolge reduzierten sich die DON-Gehalte im Maissubstrat. In Proben der Fruchtfolge 4 mit 25% Maisanteil wurde ein um 80% geringerer DON-Gehalt ermittelt.

Die ausgewiesene Grünroggensorte Borfuro wies nach künstlicher Infektion an der Halmbasis mit *F. graminearum* in Gewächshausversuchen über 4500 µg DON/kg TM in der Ganzpflanze zu ES 73 auf und war damit doppelt hoch mit DON kontaminiert wie eine konventionelle Roggensorte. Dieser signifikante Sortenunterschied wurde durch die Bestimmung pilzlicher DNA in der Halmbasis bestätigt. Durch den Rostocker Aktivitätstest mit hoch DON-belastetem Grünroggen im Mini-Batch Verfahren konnte gezeigt werden, dass DON keine inhibitorische Wirkung auf den Fermentationsprozess hat. Es wurde aber eine 10% geringere Gasausbeute in den Varianten mit kontaminiertem Material festgestellt.

Kurze Fruchtfolgen mit Energiepflanzen (Raps–Weizen) führen zu nicht unerheblichen Befallshäufigkeiten von *O. yallundae/acuformis* und *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Weizen. Eine Kombination der Energiefrüchte Raps, Mais und Weizen in Verbindung mit einem späten Saattermin und wendender Bodenbearbeitung verhindert fast vollständig das Auftreten von *O. yallundae/acuformis* und reduziert signifikant den Befall mit *Fusarium spp.* an Weizen. Fruchtfolgen mit einem hohen Anteil von Mais bzw. führen auch zu hohen Gehalten an DON im Ganzpflanzensubstrat von Mais bzw. in der Halmbasis von Weizen. Zwar hat die Toxinbelastung des Ganzpflanzensubstrats von Mais keine negativen Auswirkungen auf den Gärprozess, aber ist die Gasausbeute reduziert. Es Auswirkungen von Fusariuminfektionen auf die Gärqualität von Mais sollten daher in weiteren Untersuchungen näher betrachtet werden.

6 Summary

In the present study, the impact of energy crop rotations on stem basis and root pathogens of winter wheat (*Triticum aestivum* L.) was evaluated by means of a two-way factorial design in field trials conducted at two locations for 3 and 4 years, respectively. At the site in Göttingen trials were conducted from 2008-2011 in Göttingen and from 2007-2011 in Rostock. The stem basis and root pathogens *Rhizoctonia cerealis*, *Oculimacula yallundae/acuformis*, *Fusarium spp.* and *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* were detected by visual symptom assessment. Wheat plants derived from four energy crop rotations consisting of different percentages of maize, oilseed rape and wheat: (1) Maize in monoculture, (2) oilseed rape – winter wheat, (3) oilseed rape – green rye/maize – winter wheat and (4) oilseed rape – winter wheat – green rye/maize – winter wheat.

Detection of the mycotoxin DON (ELISA) and DNA quantification (qPCR) of toxigenic fusarium species in plants from field, greenhouse and climate chamber experiments served to investigate the sources of mycotoxin contamination of the plant and systemic translocation of DON after a stem base infection of winter wheat with *Fusarium culmorum* and *F. graminearum*, respectively.

Visual symptom assessment of winter wheat stem bases showed, that *R. cerealis* was of minor importance in 2010 und 2011 with a disease incidence of < 0.5%. For *G. graminis* var. *tritici* an increased disease incidence of about 20% in 2010 in Goettingen and 2011 at the site in Rostock was observed. Disease severity was very low (below 5). In 2010 an increased disease incidence of 25% and 37% at the site in Goettingen and Rostock, respectively, was analyzed for the pathogen *O. yallundae/acuformis*. In the last year of this study a low disease incidence of 7% and 15% in Goettingen and Rostock, respectively, was observed for *O. yallundae/acuformis*. In this two-year survey, *Fusarium spp.* was the dominant pathogen at the stem base with an average disease incidence of 28% in Goettingen and 63% at the site in Rostock. In the final year 2011, crop rotation (18% at the site in Goettingen) and the interaction between year and crop rotation (19% at the site in Rostock) had the strongest impact on disease incidence of *Fusarium spp* following the year. The evaluation of the crop rotations was undertaken by comparing the disease incidence of the predominant pathogens *Fusarium spp.* and *O. yallundae/acuformis* in the plots without fungicide treatment. Furthermore the disease incidence in the fungicide untreated plots was compared to fungicide treatment to show the impact of

phytosanitary measures. The highest disease incidence was detected for both pathogens in crop rotation 2 (oilseed rape-wheat). Phytosanitary measures reduced the disease incidence in the crop rotations, but this was not always statistically significant. The strongest impact on disease reduction was achieved by diversifying the crop rotations, represented by integrating maize in combination with a catch-crop into the short oilseed rape-wheat rotation, i.e. rotation 3 (oilseed rape-catch crop/maize-wheat). Additionally, the sowing date showed a significant effect ($p = 0.001$) on disease incidence. Early sowing increased disease incidence in both diseases. The comparison of crop rotation 2 and 3 showed a reduction of disease incidence of *Fusarium spp.* of 70% at the sites in Goettingen and Rostock. The fungicide treatment reduced disease incidence another 40-50% in crop rotations 2 and 3. For *O. yallundae/acuformis* this difference was even more pronounced. The reduction of disease incidence by crop rotation was nearly 100% at the sites in Goettingen and Rostock. In crop rotation 2 a significant reduction due to phytosanitary measures of 50% was estimated.

Contamination of grain samples with DON was very low, whereas stem base samples from wheat of crop rotation 4 with no fungicide treatment had a DON contamination up to 6000 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM. In stem base samples of crop rotation 3 with 33% wheat, the lowest content of DON (2500 $\mu\text{g}/\text{kg}$ TM) was detected. Crop rotations 2 and 4 with 50% wheat in the rotation showed nearly the double amount of DON in the stem base. Fungicide treatment in GS 31 and 51/55 significantly reduced DON contamination of the stem base by 50%. DON analysis in the substrate of whole maize plants showed elevated readings of 1800 μg DON/kg TM for maize in monoculture. With decreasing percentage of maize in the rotation, DON content in the substrate was also reduced. In maize samples of crop rotation 4 with 25% maize in the rotation the DON content was reduced by 80% in comparison to that of maize in monoculture.

In greenhouse experiments, whole green rye plants of cultivars Borfuro and Askari were contaminated with 4500 μg DON/kg DW and 2000 μg DON/kg DW, respectively, after stem base infection with *F. graminearum*. Quantification of fungal DNA in the stem base confirmed the significant difference in susceptibility of the two tested cultivars against *Fusarium spp.* after stem base infection.

In a mini-batch study, the "Rostocker Aktivitätstest" with green rye highly contaminated with DON, DON did not inhibit the biogas fermentation process, but gas yield was

reduced by 10% in the treatment with contaminated substrate in comparison to the non-contaminated control.

In conclusion, the results of this study show that a suitable combination of the most important energy crops maize, oilseed rape and wheat can significantly reduce crop rotation dependent diseases in winter wheat.

7 Literatur

Anonymus 1 (2011). *Beschreibende Sortenliste 2010*. Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Bundessortenamt, Hannover.

Anonymus 2 (2000). Gesetz für den Vorrang Erneuerbarer Energien (Erneuerbare-Energien-Gesetz – EEG) sowie zur Änderung des Energiewirtschaftsgesetzes und des Mineralölsteuergesetzes, *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 13, 305-309.

Anonymus 3 (2004). Gesetz zur Neuregelung des Rechts der Erneuerbaren Energien im Strombereich, *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 40, 1918-1930.

Anonymus 4 (2006). Gesetz zur Einführung einer Biokraftstoffquote durch Änderung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes und zur Änderung energie- und stromsteuerrechtlicher Vorschriften, *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 62, 3180-3188.

Anonymus 5 (2009). Gesetz zur Änderung der Förderung von Biokraftstoffen. *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 41, 1804-1808.

Anonymus 6 (1998). Bekanntmachung der Neufassung des Pflanzenschutzgesetzes, *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 28, 971-995.

Anonymus 7 (2012). Gesetz zur Neuordnung des Pflanzenschutzrechtes. *Bundesgesetzblatt*, Teil 1, Nr. 7, 148-182.

Anonymus 8 (2009). Richtlinie 2009/128/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über einen Aktionsrahmen der Gemeinschaft für die nachhaltige Verwendung von Pestiziden. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L309/71-86.

Anonymus 9 (2005). *Feldschätzkarte: Gemarkung Weende, Flur 12, Maßstab 1 : 2000*. Finanzamt Göttingen.

Anonymus 10 (2010). *Beschreibende Sortenliste 2010*. Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Hackfrüchte. Bundessortenamt, Hannover.

Anonymus 11 (2006). Empfehlung der Kommission vom 17. August 2006 betreffend das Vorhandensein von Deoxynivalenol, Zearalenon, Ochratoxin A, T-2- und HT-2-Toxin sowie von Fumonisin in zur Verfütterung an Tiere bestimmten Erzeugnissen. *Amtsblatt der Europäischen Union*, L 229/7-9.

- Anonymus 12 (2008). *Beschreibende Sortenliste 2010*. Getreide, Mais, Öl- und Faserpflanzen, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte. Bundessortenamt, Hannover.
- Asran, M. & Buchenauer, H. (2003). Pathogenicity of *Fusarium graminearum* isolates on maize (*Zea mays* L.) cultivars and relation with deoxynivalenol and ergosterol contents. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 110, 209-219.
- BASF (2010). Produkte: Champion® & Diamant®. URL: [http://www.agrar.basf.de/agroportal/de/de/produkte /top_produkte/champion_diamant/ Champion Diamant.html](http://www.agrar.basf.de/agroportal/de/de/produkte/top_produkte/champion_diamant/Champion_Diamant.html), besucht am 13. Januar 2010.
- Bailey, K.L., Gossen, B.D., Derksen, D.A. & Watson, P.R. (2000). Impact of agronomic practices and environment on diseases of wheat and lentil in southeastern Saskatchewan. *Canadian Journal of Plant Sciences*, 80, 917-927.
- Bayer CropScience (2010). Produktinformation Input®. URL: [http://xmedia.bayercropscience.de/produkt_pdf/20485 InputClassic.pdf](http://xmedia.bayercropscience.de/produkt_pdf/20485_InputClassic.pdf), besucht am 13. Januar 2010.
- Beccari, G., Covarelli, L. & Nicholson, P. (2011). Infection processes and soft wheat response to root rot and crown rot caused by *Fusarium culmorum*. *Plant pathology*, 60, 671-684.
- Beck, R. & Lepschy, J. (2000): Ergebnisse aus dem Fusarium-Monitoring 1989-1999 – Einfluss der produktionstechnischen Faktoren Fruchtfolge und Bodenbearbeitung. *Schriftenreihe der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau: Risiken durch den Ährenparasiten Fusarium graminearum*, S. 39-47.
- Bockmann, H. & Knoth, K.E. (1971). Der verstärkte Getreidebau aus pflanzenhygienischer Sicht. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 78, 1, 1-33.
- Bockmann, H. & Mielke, H. (1979). Schwarzbeinigkeit und Notreife an Winterweizen. *Bauernblatt/Landpost* 129, 39, 31-33.
- Bockmann, H. (1963). Künstliche Freilandinfektionen mit Erregern der Fuß- und Ährenkrankheiten des Weizens. III. Die Schadensanalyse. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 15, 135-139.
- Bockmann, H. (1967). Fruchtfolgehygiene im Getreidebau. *Gesunde Pflanzen*, 19, 10, 201-206.
-

- Bockmann, H. (1968). Fruchtfolgeaufbau und Fruchtfolgeumstellung im Hinblick auf die Weizenfußkrankheiten und Hafernematoden. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes*, 20,8, 113-119.
- Brandfass, C. & Karlovsky, P. (2008). Upscaled CTAB-based DNA extraction and Real-Time PCR assays for *Fusarium culmorum* and *F. graminearum* DNA in plant material with reduced sampling error. *International Journal of Molecular Sciences*, 9, 2306-2321.
- Brandfaß, C. (2006). Establishment and application of real-time PCR-based methods to study the epidemiology of Fusarium Head Blight. *Dissertation*, Göttingen.
- Brinkmeyer, U., Dänicke, S., Lehmann, M., Valenta, H., Lebzien, P., Schollenberger, M., Südekum, K-H., Weinert, J. & Flachowsky, G. (2006). Influence of a *Fusarium culmorum* inoculation of wheat on the progression of mycotoxin accumulation, ingredient concentrations and ruminal in sacco dry matter degradation of wheat residues. *Archives of Animal Nutrition*, 60, 141–157.
- Broschewitz, B., Frahm, J., Kakau, J., Körschenhaus, J.-W., Krauthausen, H.-J., Kröcher, C. von, Laermann, H-T., Mauler-Machnik, A., Mielke, H., Puhl, T. & Steck, U. 1999: F01. Deutscher Vorschlag für eine EPPO-Richtlinie zur Prüfung der Wirksamkeit von Saatgutbehandlungsmitteln gegen luft- und bodenbürtige Krankheitserreger an Getreide. German proposal for an EPPO-guideline for testing the efficacy of seed treatments against air and soil-borne pathogens on cereal. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Bundesrepublik Deutschland.
- Brück, K.P. & Schlösser, E. (1982). Getreidefußkrankheitserreger. V. Antagonismus zwischen den Erregern. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 89, 6, 337-343
- Bruins, M., Karsai, I., Schepers, J. & Snijders, C. (1993). Phytotoxicity of deoxynivalenol to wheat tissue with regard to *in vitro* selection for Fusarium Head Blight resistance. *Plant Science*, 94, 195-206.
- Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit (2012). Zulassung für Notfallsituationen (letzte Änderung: 6. Februar 2012. URL: http://www.bvl.bund.de/DE/04_Pflanzenschutzmittel/01_Aufgaben/02_ZulassungPSM/01_ZugelPSM/02_Genehmigungen/psm_ZugelPSM_genehmigungen_node.html, besucht am 16. Februar 2012.
-

- Bundesministerium für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (2012). Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln – Historie. URL: <http://www.nap-pflanzenschutz.de/nap-deutschland/historie/>, besucht am 11.02.2012.
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit 2012. URL: http://www.bmu.de/erneuerbare_energien/downloads/doc/45090.php, besucht am 02. Februar 2012.
- Bushnell, W.R., Perkins-Veazie, P., Russo, V.M., Collins, J. & Seeland, T.M. (2010). Effects of deoxynivalenol on content of chloroplast pigments in barley leaf tissue. *Phytopathology*, 100, 1, 33-41.
- Chang, E-W.P. & Tyler, J. (1964). Sporulation by *Cercospora herpotrichoides* on artificial media. *Phytopathology*, 54, 729-735.
- Christen, O. (1990). Ertragsbildung, Ertragsstruktur und Fußkrankheitsbefall von Wintergetreide in Abhängigkeit von Vorfruchtkombination und variiertes Produktionstechnik. *Dissertation*, Kiel.
- Clarkson, D.T., Drew, M.C., Ferguson & I.B., Sanderson, J. (1975). The effect of the take-all fungus, *Gaeumannomyces graminis* on the transport of ions by wheat plants. *Physiological Plant Pathology*, 6, 75-84.
- Clarkson, J.D.S. (1981). Relationship between eyespot severity and yield loss in winter wheat. *Plant Pathology*, 30, 125-131.
- Clement, J. & Parry, D. (1998). Stem-base disease and fungal colonisation of winter wheat grown in compost inoculated with *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* and *Microdochium nivale*. *European Journal of Plant Pathology*, 104, 323–330.
- Colbach, N. & Meynard, J.-M. (1995). Soil tillage and eyespot: influence of crop residue distribution on disease development and infection cycles. *European Journal of Plant Pathology*, 101, 601-611.
- Colbach, N. & Saur, L. (1998). Influence of crop management on eyespot development and infection cycles of winter wheat. *European Journal of Plant Pathology*, 104, 37-48.
-

- Colbach, N., Lucas, P. & Meynard, J.-M. (1997). Influence of crop management on take-All development and disease cycles on winter wheat. *Phytopathology*, 87, 26-32.
- Coleman, J., Blake-Kalff, M. & Davies, T. (1997). Detoxification of xenobiotics by plants: chemical modification and vacuolar compartmentation. *Trends in Plant Science*, 2, 144-151.
- Cook, R.J. (1968). Fusarium root and foot rot of cereals in the Pacific Northwest. *Phytopathology*, 58, 127-131.
- Cook, R.J. (1980). Fusarium foot rot of wheat and its control in the Pacific Northwest. *Plant Disease*, 64, 1061-1066.
- Crous, P., Groenewald, J.Z. & Gams, W. (2003). Eyespot of cereals revisited: ITS phylogeny reveals new species relationships. *European Journal of Plant Pathology*, 109, 841-850.
- Deutscher Wetterdienst (2011). Klimadaten für Deutschland. URL: http://www.dwd.de/bvbw/appmanager/bvbw/dwdwwwDesktop?nfpb=true&pageLabel=dwdwww_klima_umwelt_klimadaten_deutschland&T82002gsbDocumentPath=Navigation%2FOeffentlichkeit%2FKlima_Umwelt%2FKlimadaten%2Fkldaten_kostenfrei%2Fkldat_D_node.html%3F_nnn%3Dtrue, besucht am 19. November 2011.
- Davis, R.A., Huggins, D.R., Cook, J.R. & Paulitz, T.C. (2009). Nitrogen and crop rotation effects on fusarium crown rot in no-till spring wheat. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 31, 456-467.
- Defosse, L. & Dekegel, D. (1974). Penetrations de *Cercospora herpotrichoides* Fron (*Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton) dans le coleoptile du froment (*Triticum vulgare*) observée en microscope électronique. *Annales de phytopathologie*, 6, 4, 471-474.
- Desjardins, A., Proctor, R., Bai, G., McCormick, S., Shaner, G., Buechley, G. & Hohn, T. (1996). Reduced virulence of trichothecene-nonproducing mutants of *Gibberella zeae* in wheat mutants. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 9, 9 775-781.
- Desjardins, A. & Hohn, T. (1997). Mycotoxins in plant pathogenesis. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 10, 147-152.
-

- Deutscher Bundestag (2011). Entwurf eines Gesetzes zur Neuordnung des Pflanzenschutzrechts, 17. Wahlperiode, Drucksache 17/7317, URL: <http://dipbt.bundestag.de/dip21/btd/17/073/1707317.pdf>, besucht am 15. Februar 2012.
- Diercks, R. (1966). Die meteorologischen Grenzen bei Voraussage einer Halmbruch-Epidemie unter besonderer Berücksichtigung der Verhältnisse in Süddeutschland. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 73, 3, 117-137.
- Dill-Macky, R. & Jones, R.K. (2000). The effect of previous crop residues and tillage on Fusarium Head Blight of wheat. *Plant Disease*, 84, 71-76.
- Domsch, K.H., Gams, W. & Weber, E. (1968). Der Einfluss verschiedener Vorfrüchte auf das Bodenpilzspektrum in Weizenfeldern. *Zeitschrift für Pflanzenernährung und Bodenkunde*, 119, 134-149.
- Duben, J. & Fehrmann, H. (1979). Occurrence and pathogenicity of fusarium species on winter wheat in the Federal Republic of Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection* 86, 638-652.
- Engler, N. (2011). Persönliche Mitteilung am 08. Februar 2011.
- Engler, N., Fritz, T., Nelles, M., Merretig-Bruns, U. & Feher, A. (2009). Der Rostocker Aktivitätstest – Entwicklung eines Testverfahrens zur praxisnahen Beurteilung der Fermenterbiologie von NawaRo-Biogasanlagen. 3. Rostocker Bioenergieforum, *Tagungsband*, 229-236.
- Fachverband Biogas e.V. (2012). URL: [http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/\\$file/11-11-15_Biogas%20Branchenzahlen%202011.pdf](http://www.biogas.org/edcom/webfvb.nsf/id/DE_Branchenzahlen/$file/11-11-15_Biogas%20Branchenzahlen%202011.pdf), besucht am 02. Februar 2012.
- FAO (2011). FAOSTAT. URL: <http://faostat.fao.org/site/567/default.aspx#ancor>, besucht am 19. Dezember 2011.
- Fehrmann, H. & Schrödter, H. (1971). Ökologische Untersuchungen zur Epidemiologie von *Cercospora herpotrichoides*. I. Die jahreszeitliche Abhängigkeit von Weizeninfektionen im Freiland. *Phytopathologische Zeitschrift*, 71, 66-82.
- Fischer, H. (1977). Untersuchungen über Fußkrankheiten an Weizen unter besonderer Berücksichtigung von *Fusarium spp.* als Fußkrankheitserreger. *Dissertation*, Bonn.
-

- Fitt, B.D.L. & Hornby, D. (1978). Effect of root infecting on wheat transport processes and growth. *Physiological Plant Pathology*, 13, 335-346.
- FNR (2011). URL: <http://mediathek.fnr.de/grafiken/daten-und-fakten/anbau/anbauflache-fur-nachwachsende-rohstoffe-2011-grafik.html>, besucht am 05. Dezember 2011.
- Focke, I. (1977). Möglichkeiten und Erfahrungen zur Bekämpfung der Halmbrechkrankheit bei Winterweizen in intensiven Fruchtfolgen. *Nachrichtenblatt für den Pflanzenschutz in der DDR*, 31, 157-159.
- Fouly, H. & Pedersen, W. (1996). What root rotting fungi in the "Old" and "New" agricultural lands of Egypt. *Plant Disease*, 80, 1298-1300.
- Frauz, B., Oechsner, H., Drochner, W. & Schollenberger, M. (2008). Untersuchungen zur Inaktivierung von Fusariensporen und zur Reduzierung von Deoxynivalenol in Weizen bei dessen Vergärung in landwirtschaftlichen Flüssig- und Trockenfermentierungsanlagen. *Abschlussbericht*, Stuttgart, Hohenheim.
- Gebhardt, C. & Winkler, H. (1994). Vergleichende Untersuchungen zur Diagnose von *Pseudocercospora herpotrichoides* an Getreide. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 301, S. 181.
- Gerlagh, M. (1968). Introduction of *Ophiobolus graminis* into new polders and its decline. *European Journal of Plant Pathology*, 74, 1-97.
- Glynne, M.D. & Salt, G.A. (1958). Eyespot of wheat and barley. *Report of Rothamsted Experimental Station 1958*, 231-241.
- Glynne, M.D. (1953). Production of spores by *Cercospora herpotrichoides*. *Transactions of the British Mycological Society*, 36, 46-51.
- Golinski, P., Perkowski J., Kostecki M., Grabarkiewicz-Szczesna J. & Chelkowski J. (1996). fusarium species and fusarium toxins in wheat in Poland - a comparison with neighbour countries. *Sydowia*, 48, 12-22.
- Goswami, R.S. & Kistler, H.C. (2004). Heading for disaster: *Fusarium graminearum* on cereal crops. *Molecular Plant Pathology*, 5, 515-525.
-

- Goux, X., Bourguet, L., Giraud, F., Cocco, E., Guignard, C., Hoffmann, L. & Delfosse, P. (2010). Deoxynivalenol concentration decrease during mesophilic anaerobic digestion of wheat flour. *Proceedings, Venice 2010*.
- Gutteridge, R.J. & Hornby, D. (2003). Effects of sowing date and volunteers on the infectivity of soil infested with *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* and on take-all disease in successive crops of winter wheat. *Annals of Applied Biology*, 143, 275-282.
- Hamada, M. S., Yin, Y., Chen, H. & Ma, Z. (2011). The escalating threat of *Rhizoctonia cerealis*, the causal agent of sharp eyespot in wheat. *Pest Management Science*, 67, 1411-1419.
- Hardwick, N.V. (2006). Disease forecasting. In: B. M. Cooke *et al.* (2006, eds.). The epidemiology of plant diseases, 239-264. Springer, Dordrecht.
- Heß, M. (2006). Vorkommen und Bedeutung der Schwarzbeinigkeit in Deutschland als Grundlage für die Bekämpfung durch neue Pflanzenschutzmittel. *Dissertation*, Weihenstephan.
- Heyland, K.U. (1998). Zur Methodik einer integrierten Darstellung und Bewertung der Produktionsverfahren im Pflanzenbau, *Pflanzenbauwissenschaften*, 2, 145-159.
- Hoffmann, C. & Starke, P. (2011). Anforderungen und Potenzial von Zuckerrüben für die Vergärung. Biogas in der Landwirtschaft – Stand und Perspektiven. *Tagungsband FNR/KTBL-Kongress, 20./21. September 2011 in Göttingen, KTBL-Schrift 488*, Kuratorium für Technik und Bauwesen in der Landwirtschaft e.V., Darmstadt.
- Höflich, G. & Roth, R. (1981). Auftreten von Getreidefußkrankheiten in Praxisschlägen in Abhängigkeit von der Fruchtfolgegestaltung. *Nachrichtenblatt für den Pflanzenschutz in der DDR*, 35, 79-81.
- Holland, A.A. & Fulcher, R.G. (1971). A study of wheat roots infected with *Ophiobolus graminis* (Sacc.) using fluorescence and electron microscopy. *Australian Journal of Biological Sciences*, 24, 819-823.
- Hollrung, M. (1923). Die Mittel zur Bekämpfung der Pflanzenkrankheiten. 3. Auflage, Parey, Berlin.
-

- Hornby, D. (1975). Inoculum of the take-all fungus: nature measurement, distribution and survival. *European and mediterranean Plant Protection Organisation (EPPO) Bulletin*, 5, 4, 319-333.
- Inglis, D. & Cook, R.J. (1986). Persistence of chlamydospores of *Fusarium culmorum* in wheat field soils of Eastern Washington. *Phytopathology*, 76, 1205-1208.
- Jensen, H.P. & Jørgensen, J.H. (1973). Reactions of five cereal species to take-all fungus, *Gaeumannomyces graminis* in the field. *Phytopathologische Zeitschrift*, 78, 193-203.
- Jørgensen, J. (1964). Investigations on loss in yield due to attack by *Cercospora herpotrichoides* Fr on in field experiments with winter wheat. *Agriculturae Scandinavica Section B-Soil and Plant Science*, 14, 12-20.
- Kang, Z. & Buchenauer, H. (1999). Immunocytochemical localization of fusarium toxins in infected wheat spikes by *Fusarium culmorum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 55, 275-288.
- Kapoor, I.J. & Hoffmann, G.M. (1984a). Antagonistic effects of soil microbes on *Rhizoctonia solani* and *Rhizoctonia*-like fungi (*Ceratobasidium* sp.) associated with foot rot of cereals. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 91, 2, 186-196.
- Kapoor, I.J. & Hoffmann, G.M. (1984b). Antagonistic action of *Pseudocercospora herpotrichoides* on *Ceratobasidium* sp. and *Rhizoctonia solani* associated with foot rot of cereals. *Journal of Plant Diseases and Protection*, 91, 3, 250-257.
- Keijer, J. 1996. The initial steps of infection process in *Rhizoctonia solani*. In: Sneh, B.; Jabaji-Hare, S., Neate, S., Dijst, G. (1996, eds.). *Rhizoctonia Species: Taxonomy, Molecular Biology, Ecology, Pathology and Disease Control*, 149-162. Verlag Kluwer Academic Publishers. Niederlande.
- Keller, R., Hanus, H., Heyland, K-U. (eds, 1997). *Handbuch des Pflanzenbaues. Band 1: Grundlagen der landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion*. Verlag Ulmer, Stuttgart.
- Kirkegaard, J., Christen, O., Krupinsky, J. & Layzell, D. (2008). Break crop benefits in temperate wheat production. *Field Crops Research*, 107, 185-195.
-

- Knoth, K.E. (1975). Eine Methode zur Beobachtung und Demonstration der Laufhyphenentwicklung von *Ophiobolus graminis* Sacc. beim Weizen. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für land- und Forstwissenschaften Berlin-Dahlem*, 163, 58-64.
- Krauthausen, H.-J., Weinert, J., Bauermann, W. & Wolf, G.A. (2003). Mehrjährige Erhebungen zum Vorkommen von Ährenfusarien und dem Mykotoxin Deoxynivalenol in Getreide aus Rheinland-Pfalz. (Monitoring of Fusarium Head Blight and the mycotoxin deoxynivalenol in cereal crops of Rhineland-Palatinate). *Gesunde Pflanzen*, 55, 136-143.
- Landwirtschaftskammer Niedersachsen (2011). Pressemitteilung. URL: <http://www.lwk-niedersachsen.de/index.cfm/portal/7/nav/1095/article/16095.html>, besucht am 15. März 2011.
- Lange-de la Camp, M. & Naumann, K. (1973). Dauer der Infektionsfähigkeit halmbrechkranker Getreidestoppeln. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene. Zweite naturwissenschaftliche Abt.: Allgemeine, landwirtschaftliche und technische Mikrobiologie*, 128, 595-615.
- Lange-de la Camp, M. (1966). Die Wirkungsweise von *Cercospora herpotrichoides* Fron, dem Erreger der Halmbrechkrankheit des Getreides. I. Feststellung der Krankheit, Beschaffenheit und Infektionsweise ihres Erregers. *Phytopathologische Zeitschrift*, 55, 1, 34-66.
- Lee, K.E. (1985). Earthworms. Their ecology and relationship with soils and land use. Academic Press, Sydney.
- Leslie, J.F. & Summerell, B.A. (2006). *The fusarium laboratory manual*. 1st edn. Verlag Blackwell, Ames, Iowa.
- Lyr, H. (1995). Modern Selective Fungicides. Gustav Fischer Verlag, Berlin.
- Macer, R.C.F. (1961a). Saprophytic colonization of wheat straw by *Cercospora herpotrichoides* Fron and other fungi. *Annals of Applied Biology*, 49, 152-164.
- Macer, R.C.F. (1961b). The survival of *Cercospora herpotrichoides* Fron in wheat straw. *Annals of Applied Biology*, 49, 165-172.
-

- Mesterházy, Á. (1988). Expression of resistance of wheat to *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* under various experimental conditions. *Journal of Phytopathology*, 123, 304-310.
- Miedaner, T., Fromme, F. & Geiger, H. (1995). Genetic variation for foot-rot and Fusarium head-blight resistances among full-sib families of a self-incompatible winter rye (*Secale cereale* L.) population. *Theoretical Applied Genetics*, 91, 862-868.
- Mielke, H. (1974). Untersuchungen über die Anfälligkeit verschiedener Getreidearten gegen den Erreger der Schwarzbeinigkeit *Ophiobolus graminis* Sacc. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem*, 160, 1-61
- Mielke, H. (1985). Untersuchungen über den Befall von *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici* an einer Weizensorte auf anmoorigem Boden im Vergleich zu anderen Bodenarten. *Gesunde Pflanzen*, 37, 160-164.
- Mielke, H. (1995). Studien zum Befall des Weizens mit *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton unter Berücksichtigung der Sorten- und Artenanfälligkeit sowie der Bekämpfung des Erregers. Blackwell Wissenschafts-Verlag, Berlin.
- Mielke, H. (1998): Studien zum Befall des Weizens mit *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) von Arx et Olivier var. *tritici* Walker unter Berücksichtigung der Sorten- und Artenanfälligkeit sowie der Bekämpfung des Erregers. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem*. Heft 359.
- Mudge, A., Dill-Macky, R., Dong, Y., Gardiner, D., White, R. & Manners, J. (2006). A role for the mycotoxin deoxynivalenol in stem colonisation during crown rot disease of wheat caused by *Fusarium graminearum* and *Fusarium pseudograminearum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 69, 73-80.
- Munkvold, G.P. (2003). Epidemiology of fusarium diseases and their mycotoxins in maize ears. *European Journal of Plant Pathology*, 109, 705-713.
- Naumann, K. & Lange-de la Camp (1975). Dauer der Infektionsfähigkeit halmbrechkranker Getreidestoppeln. Zweite Mitteilung. *Zentralblatt für Bakteriologie, Parasitenkunde, Infektionskrankheiten und Hygiene. Zweite naturwissenschaftliche Abt.: Allgemeine, landwirtschaftliche und technische Mikrobiologie*, 130, 171-194
-

- Nicholson, P., Simpson, D., Weston, G., Rezanoor, H., Lees, A., Parry, D. & Joyce, D. (1998). Detection and quantification of *Fusarium culmorum* and *Fusarium graminearum* in cereals using PCR assays. *Physiological and Molecular Plant Pathology*, 53, 17-38.
- Oldenburg, E., Brunotte, J. & Weinert, J. (2007). Strategies to reduce DON contamination of wheat with different soil tillage and variety systems. *Mycotoxin Research*, 23, 73-77.
- Oldenburg, E., Kramer, S., Schrader, S. & Weinert, J. (2008). Impact of the earthworm *Lumbricus terrestris* on the degradation of fusarium-infected and deoxynivalenol-contaminated wheat straw. *Soil Biology and Biochemistry*, 40, 3049-3053.
- Papavizas, G.C. & Davey C.B. (1962). Activity of *Rhizoctonia* in soil as affected by carbone dioxide. *Phytopathology* 52, 759-766.
- Pearson, V. (1974). Virulence and cellulytic enzyme activity of isolates of *Gaeumannomyces graminis*. *Transactions of the British Mycological Society*, 63,163-201.
- Pereyra, S.A., Dill-Macky, R. & Sims, A.I. (2004). Survival and inoculum production of *Gibberella zeae* in wheat residue. *Plant Disease*, 88, 724-730.
- Pestka, J.J. (2010). Deoxynivalenol: mechanisms of action, human exposure, and toxicological relevance. *Archives of Toxicology*, 84, 663-679.
- Pitt, D. 1964, Studies on sharp eyespot disease of cereals. 1. Disease symptoms and pathogenicity of isolates of *Rhizoctonia solani* Kühn and the influence of soil factors and temperatures on disease development. *Annals of Applied Biology*, 54, 77-89.
- Ponchet, J. (1958). La prevision des épidemies du piétin-verse *Cercospora herpotrichoides* Fron. – Importance agronomique, biologique, épiphytologie. *Annals Epiphytries I*, 45-98.
- Prew, R.D. (1980). Studies on the spread of *Gaeumannomyces graminis* var. *tritici*. I Autonomous spread. II. The effect of cultivations. *Annals of Applied Biology*, 94, 391-396.
-

- Prillwitz, H.G. (1983). Pilzliche Krankheitserreger. In: Heinze, K. (1983). Schädlinge und Krankheiten im Ackerbau. *Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft mbH*, Stuttgart Band III, 186-189.
- Proctor, R., Hohn, T. & McCormick, S. (1995). Reduced virulence of *Gibberella zeae* caused by disruption of a trichothecene toxin biosynthetic gene. *Molecular Plant-Microbe Interactions*, 8, 4, 593-601.
- Ray, R.V. (2006). Effect of eyespot caused by *Oculimacula yallundae* and *O. acuformis*, assessed visually and by competitive PCR, on stem strength associated with lodging resistance and yield of winter wheat. *Journal of Experimental Botany*, 57, 2249-2257.
- Reinecke, P. & Fehrmann, H. (1979). Infektionsversuche mit *Rhizoctonia solani* Kühn und *Rhizoctonia cerealis* van der Hoeven an Getreide. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, 86, 5, 241-246.
- Rotter, B.A. (1996). Invited review: Toxicology of deoxynivalenol (vomitoxin). *Journal of Toxicology and Environmental Health*, 48, 1-34.
- Saur, R., Schelberger, K. & Ellenberger, W. (1994). Befallssituation mit *Pseudocercospora herpotrichoides* an Wintergetreide in verschiedenen Ländern Westeuropas und Bekämpfungsmöglichkeiten mit Opus und Opus Top in den Jahren 1988 bis 1993. *Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaften*, 301.
- Schaaf, M. (2010). Ist Halmbruch bei Wintergetreide noch ein Thema? *Getreide Magazin*, 1, DLG-Verlag, 34-36.
- Schaffnit, E. 1930: Ertragseinbußen im Getreidebau durch Fußkrankheiten. *Mitteilungen der Deutschen Landwirtschafts-Gesellschaft*, 247-251.
- Scherm, B., Orrù, M., Balmas, V., Spanu, F., Azara, E., Delugo, G., Hammon, T.M., Keller, N.P. & Migheli, Q. (2011). Altered trichothecene biosynthesis in TRI6-silenced transformants of *Fusarium culmorum* influences the severity of crown and foot rot on durum wheat seedlings. *Molecular Plant Pathology*, 12, 759-771.
- Schilling, A., Möller, E. & Geiger, H. (1996). Polymerase chain reaction-based assays for species-specific detection of *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* and *F. avenaceum*. *Phytopathology*, 86, 515-522.
-

- Schlüter, K., Kropf, U. & Karlovsky, P. (2006). Untersuchungen zur systemischen Infektion von *Fusarium culmorum* an Winterweizen in Schleswig-Holstein. *Gesunde Pflanzen*, 58, 107–116.
- Schmidt, J. (1994). Wirkung der Vorfrucht auf die Ertragsstruktur von Winterweizen und Sommergerste bei limitierter Wasserversorgung auf einem Löß-Schwarzerdestandort des mitteldeutschen Trockengebiets. *Mitteilung der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 7, 269-279.
- Schrader, S., Kramer, S., Oldenburg, E. & Weinert, J. (2009). Uptake of deoxynivalenol by earthworms from fusarium-infected wheat straw. *Mycotoxin Research*, 25, 53-58.
- Scott, P.R. & Hollins, T.W. (1974). Effects of eyespot on the yield of winter wheat. *Annals of Applied Biology*, 78, 269-279.
- Sherwood, R.T. (1970). Physiology of *Rhizoctonia solani*. In: Parmeter, J.R. (1970, ed.). *Rhizoctonia solani, Biology and Pathology*, 69-92, University of California Press, Berkeley, USA.
- Smiley, R.W. (1996). Pathogenic fungi associated with fusarium foot rot of winter wheat in the semiarid Pacific Northwest. *Plant Disease*, 80, 944-949.
- Snijders, C.H.A. (1990). Fusarium Head Blight and mycotoxin contamination of wheat, a review. *Netherlands Journal of Plant Pathology*, 96, 187-198.
- Sprague, R. (1937). A further note on the fungus causing a white foot rot of wheat and oats. *Phytopathology*, 27, 798-799.
- Steinbeis Transferzentrums (STZ) für Angewandte Landschaftsplanung (2011). Wetterstation. URL: <http://www2.auf.uni-rostock.de/II/Schwerpunkte/Wetterstation/wetterstation.html>, besucht am 18. November 2011.
- Steinbrenner, K. & Höflich, G. (1984). Einfluß acker- und pflanzenbaulicher Maßnahmen auf den Befall des Getreides durch *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton und *Gaeumannomyces graminis* (Sacc.) Arx et Olivier. *Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz*, Berlin 20, 6, 469-486.
-

- Steinmann, H-H. & von Tiedemann, A. (2006). Möglichkeiten und Grenzen der Fruchtfolgegestaltung im Ackerbau aus phytomedizinischer, ökologischer und ökonomischer Sicht. *Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* Berlin-Dahlem, 132, 4-9.
- Steinmann, H-H. (2011). Fruchtfolgen, Anbaumuster und Fruchtartenkombinationen in Norddeutschland – dargestellt anhand flächenscharfer Nutzungsdaten. *Mitteilungen der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften*, 23, 114-115.
- Sugita-Konishi, Y., Park, B., Kobayashi-Hattori, K., Tanaka, T., Chonan, T., Yoshikawa, K. & Kumagai, S. (2006). Effect of cooking process on the deoxynivalenol content and its subsequent cytotoxicity in wheat products. *Bioscience, Biotechnology and Biochemistry*, 70, 1764-1768.
- Sutton, J.C. (1982). Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 4, 195-209.
- Talas, F., Kalih, R. & Miedaner, T. (2012). Within-field variation of *Fusarium graminearum* isolates for aggressiveness and deoxynivalenol production in wheat head blight. *Phytopathology*, 102, 128-134.
- Völkl, A., Vogler, B., Schollenberger, M. & Karlovsky, P. (2004). Microbial detoxification of mycotoxin deoxynivalenol. *Journal of Basic Microbiology*, 44, 147-156.
- Wagacha, J. & Muthomi, J. (2007). *Fusarium culmorum*: Infection process, mechanisms of mycotoxin production and their role in pathogenesis in wheat. *Crop Protection*, 26, 877-885.
- Wegener, M. & G. A. Wolf (1995). Halmbasiskrankheit auch durch Fusarien. *Pflanzenschutz-Praxis*, 1, 27-29.
- Wegener, M. (1996). Verbreitung, Artenspektrum und Bekämpfungsmöglichkeiten von Halmbasiskrankheitserregern an Winterweizen unter besonderer Berücksichtigung der Gattung *Fusarium* LK. *Dissertation*, Göttingen.
-

- Wesolowski, S., Ohly, N., Ferchau, E., Mardaus, G., Walter, G. & Jäkel, K., Mildner, U., Krieg, D. & Klostermann, U. (2008). Gaserträge mykotoxinbelasteter Getreidearten. Ermittlung von Gaserträgen mykotoxinbelasteter Getreidearten für die Co- und Monovergärung. *Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie*, 27.
- Weste, G.M. (1970). *Ophiobolus graminis* var. *avenae*, Part II. Enzymes produced within the host tissue. *Phytopathologische Zeitschrift*, 67, 4, 327-336.
- Weste, G.M. (1972). The process of root infection by *Ophiobolus graminis*. *Transactions of the British Mycological Society*, 59, 133-147.
- Wetterstation Göttingen (2011). Klimadaten des Standorts in Göttingen. URL: <http://www.wetterstation-goettingen.de/klimabericht.htm>, besucht am 19. Februar 2012.
- Wildermuth, G., Thomas, G., Radford, B., McNamara, R. & Kelly, A. (1997). Crown rot and common root rot in wheat grown under different tillage and stubble treatments in southern Queensland, Australia. *Soil and Tillage Research*, 44, 211-224.
- Winter, M., Koopmann, B., Döll, K., Karlovsky, P., Kropf, U., Schlüter, K. & von Tiedemann, A. (2013). Mechanisms regulating grain contamination with trichothecenes translocated from the stem base of wheat (*Triticum aestivum* L.) infected with *Fusarium culmorum*. *Phytopathology*, in press
- Wittrock, A. (2004). Auswirkungen variierender Produktionssysteme auf die Schaderregerpopulationen und den Integrierten Pflanzenschutz im Winterweizen. *Dissertation*, Kiel.
- Wolfarth, F., Schrader, S., Oldenburg, E. & Weinert, J. (2011a). Contribution of the endogeic earthworm species *Aporrectodea caliginosa* to the degradation of deoxynivalenol and fusarium biomass in wheat straw. *Mycotoxin Research*, 27, 215-220.
- Wolfarth, F., Schrader, S., Oldenburg, E., Weinert, J. & Brunotte, J. (2011b). Earthworms promote the reduction of fusarium biomass and deoxynivalenol content in wheat straw under field conditions. *Soil Biology and Biochemistry*, 43, 1858-1865.
-

- Wong, R.T.W. (1984). Effect of temperature on growth of some avirulent fungi and cross-protection against the wheat take-all fungus. *Annals of Applied Biology*, 95, 291-299.
- Zadoks, J. & Chang, T. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research*, 14, 415-421.
- Zimmermann, A. (1984). Winterweizen in Monokultur-Untersuchungen über Ertragsbildung, Bestandesstruktur und Krankheitsbefall unter besonderer Berücksichtigung der Befalls-Ertragsrelation bei Halmbasis- und Wurzelerkrankungen. *Dissertation*, Kiel.
-

Anhang

Tab. 1A: Mittlere Biomasse bzw. Kornerträge (dt TM/ha) der Kulturen Grünroggen (GR, Biomasse), Mais (Biomasse) und Winterweizen (WW, Korn) der einzelnen Fruchtfolge-Pflanzenschutz Kombinationen an den Standorten in Göttingen und Rostock im Jahr 2010.

Ort	Kultur	PSM	Fruchtfolge				Gesamtergebnis
			1	2	3	4	
Göttingen	Grünroggen	PS	-	-	98,34	80,76	89,55
		PS-F0	-	-	102,34	79,52	90,93
		UK-BK	-	-	109,06	82,17	95,62
		UK-PS	-	-	92,05	77,75	84,90
		Gesamt GR	-	-	100,45	80,05	90,25
	Mais	PS	256,24	-	237,68	226,99	241,51
		PS-F0	257,44	-	248,43	231,84	244,82
		UK-BK	272,76	-	239,85	230,09	247,57
		UK-PS	262,57	-	238,38	236,57	245,84
		Gesamt Mais	262,25	-	241,08	231,68	245,00
	Weizen	PS	-	83,24	81,32	77,29	79,78
		PS-F0	-	68,14	62,90	59,85	62,69
		UK-BK	-	87,55	78,43	80,56	81,77
		UK-PS	-	85,65	77,04	78,06	79,70
		Gesamt WW	-	81,14	74,92	73,94	75,98
Göttingen Ergebnis		262,25	81,14	138,82	114,90	135,49	
Rostock	Grünroggen	PS	-	-	44,78	38,70	41,74
		PS-F0	-	-	42,43	39,73	41,08
		UK-BK	-	-	40,46	40,30	40,38
		UK-PS	-	-	44,77	35,21	39,99
		Gesamt GR	-	-	43,11	38,49	40,80
	Mais	PS	141,66	-	129,54	119,99	131,34
		PS-F0	109,53	-	122,64	122,73	118,64
		UK-BK	115,75	-	115,34	124,37	118,49
		UK-PS	124,23	-	126,37	109,14	119,92
		Gesamt Mais	122,80	-	123,48	119,23	121,83
	Weizen	PS	-	56,77	53,77	48,11	51,69
		PS-F0	-	50,02	48,04	43,01	46,02
		UK-BK	-	54,65	45,14	47,26	48,58
		UK-PS	-	58,43	44,69	48,73	50,14
		Gesamt WW	-	54,97	47,91	46,78	49,11
Rostock Ergebnis		122,80	54,97	71,50	62,82	71,50	

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen und UK-BK: Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung

1: Maisdaueranbau, 2: Raps-Weizen, 3: Raps-Zwff/Mais-Winterweizen; 4: Raps-Weizen-Zwff/Mais-Weizen -, die Kultur wurde in der Fruchtfolge nicht angebaut, n = 4.

Tab. 2A: Mittlere Biomasse bzw. Kornerträge (dt TM/ha) der Kulturen Grünroggen (GR, Biomasse), Mais (Biomasse) und Winterweizen (WW, Korn) der einzelnen Fruchtfolge-Pflanzenschutz Kombinationen an den Standorten in Göttingen und Rostock im Jahr 2011.

Ort	Kultur	PSM	Fruchtfolge				Gesamtergebnis
			1	2	3	4	
Göttingen	Grünroggen	PS	-	-	88,59	65,13	76,86
		PS-F0	-	-	87,50	72,87	80,18
		UK-BK	-	-	95,71	67,84	81,78
		UK-PS	-	-	99,67	75,69	87,68
		Gesamt GR	-	-	92,87	70,38	81,62
	Mais	PS	237,75	-	167,56	170,46	191,92
		PS-F0	234,56	-	184,36	185,00	201,31
		UK-BK	240,36	-	175,51	176,28	197,38
		UK-PS	243,03	-	181,75	180,63	201,80
		Gesamt Mais	238,92	-	177,29	178,10	198,10
	Weizen	PS	-	82,89	84,45	80,55	82,11
		PS-F0	-	67,99	73,87	69,73	70,33
		UK-BK	-	76,60	85,07	81,23	81,03
		UK-PS	-	74,86	82,09	84,20	81,34
		Gesamt WW	-	75,58	81,37	78,93	78,70
	Göttingen Ergebnis		238,92	75,58	117,18	101,58	119,15
Rostock	Grünroggen	PS	-	-	24,21	14,76	19,48
		PS-F0	-	-	27,01	13,28	20,14
		UK-BK	-	-	24,13	14,33	19,23
		UK-PS	-	-	28,10	14,72	22,37
		Gesamt GR	-	-	25,86	14,24	20,24
	Mais	PS	107,95	-	159,95	127,60	131,83
		PS-F0	100,03	-	157,50	139,79	132,44
		UK-BK	120,46	-	142,07	161,82	141,45
		UK-PS	100,47	-	163,11	140,32	134,64
		Gesamt Mais	107,23	-	155,66	142,38	135,09
	Weizen	PS	-	53,57	45,10	44,19	46,76
		PS-F0	-	48,28	36,71	41,08	41,79
		UK-BK	-	44,05	45,63	47,62	46,23
		UK-PS	-	52,80	41,22	47,95	47,48
		Gesamt WW	-	49,67	42,16	45,21	45,56
	Rostock Ergebnis		107,23	49,67	74,56	62,52	70,12

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsatz - Pflanzenschutz situationsbezogen und UK-BK: Unkrauteinsatz - spezielle Unkrautbekämpfung

1: Maisdaueranbau, 2: Raps-Weizen, 3: Raps-Zwff/Mais-Winterweizen; 4: Raps-Weizen-Zwff/Mais-Weizen -, die Kultur wurde in der Fruchtfolge nicht angebaut, n = 4.

Tab. 3A: Mittlere Befallswerte (errechnet nach der Formel von Broschewitz 1999) von *Fusarium spp.* an der Halmbasis von Winterweizen in den Fruchtfolgen 2, 3 und 4 der verschiedenen Pflanzenschutzvarianten an den Standorten in Göttingen (Gö) und in Rostock (HRO) für die Jahre 2010 und 2011. Proben zum Stadium der späten Milchreife (ES 77) entnommen.

Ort	Jahr	Pflanzenschutzvariante				Gesamtergebnis		
		Fruchtfolge	PS	PS-F0	UK-BK		UK-PS	
Gö			8,07	9,55	8,08	7,62	8,32	
	2010		9,06	10,11	8,98	8,11	9,06	
		2	9,01	10,78	8,03	7,90	8,93	
		3	4,47	7,05	8,27	6,46	6,56	
		4	11,38	11,31	9,80	9,04	10,38	
	2011		7,08	8,99	7,05	7,19	7,58	
		2	9,99	16,23	11,93	11,14	12,27	
		3	2,63	5,21	4,08	4,36	4,09	
		4	7,84	7,26	6,33	6,49	6,98	
	HRO			20,33	20,18	19,83	19,00	19,82
		2010		23,39	22,56	22,56	21,88	22,60
			2	22,12	19,00	20,83	19,30	20,31
		3	27,39	26,23	26,65	24,63	26,23	
		4	22,03	22,51	21,38	21,78	21,93	
2011			17,28	17,80	16,70	16,44	17,05	
		2	28,06	30,39	24,51	25,74	27,25	
		3	8,09	7,54	7,76	8,53	8,03	
		4	16,48	16,64	17,13	15,56	16,45	
		Gesamtergebnis	14,20	14,87	13,95	13,31	14,07	

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen und UK-BK: Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung, n = 4.

Tab. 4A: Mittlere Befallswerte (errechnet nach der Formel von Broschewitz 1999) von *O. yallundae/acuformis* an der Halmbasis von Winterweizen in den Fruchtfolgen 2, 3 und 4 der verschiedenen Pflanzenschutzvarianten an den Standorten in Göttingen (Gö) und in Rostock (HRO) für die Jahre 2010 und 2011. Proben zum Stadium der späten Milchreife (ES 77) entnommen.

Ort	Jahr	Pflanzenschutzvariante				Gesamtergebnis	
	Fruchtfolge	PS	PS-F0	UK-BK	UK-PS		
Gö		4,89	6,70	4,85	3,89	5,07	
	2010	8,19	10,26	7,15	5,57	7,79	
	2	6,13	7,66	7,05	4,11	6,23	
	3	6,13	13,54	5,70	7,22	8,15	
	4	10,25	9,93	7,94	5,48	8,40	
	2011	1,59	3,13	2,21	2,40	2,34	
	2	4,40	8,89	6,37	5,63	6,28	
	3	0,12	0,00	0,00	0,05	0,05	
	4	0,92	1,82	1,47	1,85	1,51	
	HRO		6,44	10,73	7,70	6,13	7,73
	2010		9,36	15,09	10,14	9,65	11,06
	2	11,15	14,64	9,19	12,19	11,80	
3	8,88	16,91	7,35	8,27	10,36		
4	8,70	14,39	12,01	9,07	11,04		
2011		3,52	6,38	4,92	3,01	4,40	
2	6,56	13,42	4,74	4,26	7,22		
3	1,23	0,98	1,63	1,52	1,33		
4	3,15	5,57	6,22	3,16	4,52		
	Gesamtergebnis	5,66	8,72	6,28	5,01	6,40	

PS: situationsbezogener Pflanzenschutz, PS-F0: Fungizid Null, UK-PS: Unkrauteinsaat - Pflanzenschutz situationsbezogen und UK-BK: Unkrauteinsaat - spezielle Unkrautbekämpfung, n = 4.

												23.09.2010						
f				e				d										
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	Tisch 1
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	
B3	B1	B2	A2	A3	A1	B1	B3	A2	A3	A1	B2	A2	A1	B2	B3	B3	A3	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	Tisch 2
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
A1	A2	A3	B1	B2	B3	B2	A3	A1	B3	B1	A2	A3	B2	B3	A1	A2	B1	
a				b				c										
Roggen-Fußinfektion. Mit Stroh-Boden-Inokulum.												6 Prüfglieder, 10 Wiederholungen (4 Pflanzen sind eine Wiederholung)						
A1: Askari Kontrolle																		
A2: Askari infiziert mit <i>F. culmorum</i>																		
A3: Askari infiziert mit <i>F. graminearum</i>												40 Töpfe je Variante= 240 Töpfe						
B1: Bofuro Kontrolle												immer 4 Töpfe poolen, in infizierte Varianten immer 2 Keimlinge						
B2: Bofuro infiziert mit <i>F. culmorum</i>																		
B3: Bofuro infiziert mit <i>F. graminearum</i>																		

Abb. 1A: Versuchsplan für den Gewächshausversuch mit 2 Roggensorten (Askari (A) und Bofuro (B)), infiziert über ein Stroh-Bodeninokulum an der Halmbasis mit den toxischen Erregern *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* im teilrandomisierten Blockdesign mit 6 Prüfgliedern (2 Sorten, infiziert mit *F. culmorum* bzw. *F. graminearum*, Kontrolle), in jedem Block befanden sich 10 Wiederholungen desselben Prüfglieds. Zur Ernte wurde der Biomasseaufwuchs von je 4 Töpfen zu einer Probe zusammengefasst. In die infizierten Varianten wurden jeweils 2 Keimlinge ausgepflanzt.

Tab. 5A: Auflistung der acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen in der Kultur Winterweizen in den verschiedenen Fruchtfolgen (FF) am Standort in Rostock der Versuchsjahre 2010 und 2011.

Jahr	Fruchtfolge	Maßnahme	Datum
2010	2 Weizen nach Raps	Tiefgrubber	31.08.09
		Kreiseln	14.09.09
		Aussaat Skalmeye 250 kfK/m ²	15.09.09
		Bodenproben	15.03.10
		115 kg K ₂ O/ha als KornKali	24.03.10
		1. Gabe 100 kg N/ha als KAS	25.03.10
		Starane XL 1,5 l/ha. Atlantis OD 1,0 l/ha außer UK BK	09.04.10
		Broadway 220 g/ha nur UK BK	
		2. N-Gabe 80 kg/ha KAS	06.05.10
		Input 1,25 l/ha außer F0	10.05.10
		Champion 0,6 + Diamant 0,6 l/ha außer F0	03.06.10
		Ernte	21.08.10
		Stroh häckseln, Stoppeln mulchen	24.08.10
		Scheiben	25.08.10
		3 Weizen nach Mais	Pflugfurche
	Aufreißen mit Grubber		08.10.09
	Kreiselegge,		12.10.09
	Drillen Skalmeye 320 kfK/m ²		
	Bodenproben		15.03.10
	150 kg K ₂ O/ha als KornKali		24.03.10
	100 kg N/ha als KAS		25.03.10
	Ariane C 1,5 l/ha alles ohne UK-BK		
	Broadway220 g/ha nur UK-BK		28.04.10
	2. N-Gabe 80 kg/ha KAS		06.05.10
	Input 1,25 l/ha außer F0		10.05.10
	Champion 0,6 + Diamant 0,6 l/ha außer F0		03.06.10
	Ernte	21.08.10	
Stroh häckseln, Stoppeln mulchen	24.08.10		
4 Weizen nach Raps	Pflugfurche	31.08.09	
	Kreiseln	14.09.09	
	Aussaat Skalmeye 250 kfK/m ²	15.09.09	
	Bodenproben	15.03.10	
	115 kg K ₂ O/ha als KornKali	24.03.10	
	100 kg N/ha als KAS	25.03.10	
	Starane XL 1,5 l/ha. Atlantis OD 1,0 l/ha außer UK BK		
	Broadway 220 g/ha nur UK BK	09.04.10	
	2. N-Gabe 80 kg/ha KAS	06.05.10	
	Input 1,25 l/ha außer F0	10.05.10	
	Champion 0,6 + Diamant 0,6 l/ha außer F0	03.06.10	
	Ernte	21.08.10	
	Stroh häckseln, Stoppeln mulchen	24.08.10	
	Weizen nach Mais	Pflugfurche	25.09.09
		Aufreißen mit Grubber	08.10.09
		Kreiselegge,	12.10.09
		Drillen Skalmeye 320 kfK/m ²	12.10.09
		Bodenproben	15.03.10
150 kg K ₂ O/ha als KornKali		24.03.10	
100 kg N/ha als KAS		25.03.10	
Ariane C 1,5 l/ha alles ohne UK-BK			
Broadway220 g/ha nur UK-BK		28.04.10	
2. N-Gabe 80 kg/ha KAS		06.05.10	
Input 1,25 l/ha außer F0		10.05.10	
Champion 0,6 + Diamant 0,6 l/ha außer F0		03.06.10	
Ernte	21.08.10		
Stroh häckseln, Stoppeln mulchen	24.08.10		

Jahr	Fruchtfolge	Maßnahme	Datum	
2011	2	Tiefgrubber	08.09.10	
		Weizen nach Raps	Kreiseln Aussaat Skalmeye 250 kfK/m ² Primus 75 mL/ha alles 1. Gabe 60 kg N/ha als KAS 55 kg/ha MgO als Kieserit Starane XL 1,5 l/ha + Atlantis WG 500 g/ha+ 1,0 l/ha FHS 2. Gabe 70 kg N/ha als KAS Input 0,8 l/ha außer PS F0 3. Gabe 50 kg N/ha als KAS BBCH 37 Champion+Diamant je 0,4 l/ha außer PS F0 Ernte Stroh häckseln Scheibenegge	16.09.10 17.09.10 18.10.10 22.02.11 04.04.11 11.04.11 14.04.11 10.05.11 23.05.11 06.06.11 04.08.11 05.08.11 05.08.11
	3	Weizen nach Mais	Pflugfurche Kreiseln Drillen Skalmeye 350 kfK/m ² 1. Gabe 60 kg N/ha als KAS 190 kg/ha K ₂ O als Kornkali 2. Gabe 70 kg N/ha als KAS Starane XL 1,5 l/ha Input 0,8 l/ha außer PS F0 3. Gabe 50 kg N/ha als KAS BBCH 37 Champion+Diamant je 0,4 l/ha außer PS F0 Ernte Stroh häckseln Scheibenegge	30.09.10 05.10.10 06.10.10 22.02.11 04.04.11 14.04.11 29.04.11 10.05.11 23.05.11 06.06.11 04.08.11 05.08.11 05.08.11
		4	Weizen nach Raps	Tiefgrubber Kreiseln Aussaat Skalmeye 250 kfK/m ² Primus 75 mL/ha alles 1. Gabe 60 kg N/ha als KAS Starane XL 1,5 l/ha 2. Gabe 70 kg N/ha als KAS Input 0,8 l/ha außer PS F0 3. Gabe 50 kg N/ha als KAS BBCH 37 Champion+Diamant je 0,4 l/ha außer PS F0 Ernte Stroh häckseln Scheibenegge
	Weizen nach Mais		Pflugfurche Kreiseln Drillen Skalmeye 350 kfK/m ² 1. Gabe 60 kg N/ha als KAS 190 kg/ha K ₂ O als Kornkali 2. Gabe 70 kg N/ha als KAS Starane XL 1,5 l/ha Input 0,8 l/ha außer PS F0 3. Gabe 50 kg N/ha als KAS BBCH 37 Champion+Diamant je 0,4 l/ha außer PS F0 Ernte Stroh häckseln Scheibenegge	30.09.10 05.10.10 06.10.10 22.02.11 04.04.11 14.04.11 29.04.11 10.05.11 23.05.11 06.06.11 04.08.11 05.08.11 05.08.11

Tab. 6A: Auflistung der acker- und pflanzenbaulichen Maßnahmen in den Kulturen Mais, Winterweizen und Grünroggen in den verschiedenen Fruchtfolgen (FF) am Standort in Göttingen der Versuchsjahre 2010 und 2011.

Jahr	Fruchtfolge/ Kultur	Maßnahme	Datum und Art der Maßnahme
2010	1/ Mais (Mono)	. Aussaatvorbereitung	Ernte Mais am 30.09.2009
		· Vorfrucht	30.09.2009 Maisstoppeln ab geschlegelt (Versuchsgut)
		· Totalherbizid	14.10.2009 Pflug
		· Bodenbearbeitung	16.04.2010 Kreiselegge
		. Aussaat	28.04.2010
		· Datum und Bedingungen	Maisdrille (IFZ), „Fernandes“
		. Düngung	
		· K	25.05.10
		· N-min Probenahme	80 kg N/ha
		· N-min	26.05.10 ES 13: 60 kg N /ha als KAS
		· 1.N-Düngung	15.06.10 ES 18: 40 kg N /ha als KAS
		· 4.N-Düngung	180 kg N/ha incl. N-min
		. Pflanzenschutz	14.06.2010 ES: 18 1,5 l/ha Callisto
		· 1.Herbizid (alle PS-Parz.)	14.06.2010 ES: 18 1 l/ha Clio Star + 1 l/ha Motivell
3 und 4/ Mais		. Aussaatvorbereitung	Ernte Grünroggen am 10.05.2010
		· Vorfrucht	11.05.2010 Stoppeln ab geschlegelt
		· 1.Stoppelbearbeitung	11.05.2010 Pflug
		· Bodenbearbeitung	12.05.2010 Kreiselegge + Walze
		· Saattbettbereitung	
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	12.05.2010
		· Technik	Maisdrille (IFZ)
		· Saatgut (Menge und Sorte)	„Fernandes“
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	25.05.10
		· N-min	20 kg N/ha
		· 1.N-Düngung	26.05.10 ES 11: 60 kg N /ha als KAS
		· 2.N-Düngung	15.06.10 ES 16: 100 kg N /ha als KAS
· N _{gesamt} (incl. N _{min})	180 kg N/ha incl. N-min		
. Pflanzenschutz			
· 1.Herbizid (alle PS-Parz.)	14.06.2010 ES: 18 1,5 l/ha Callisto		
· 1.Herbizid (alle UK-BK-Parz.)	14.06.2010 ES: 18 1 l/ha Clio Star + 1 l/ha Motivell		
3 und 4/ Grünroggen		Aussaatvorbereitung	Ernte W-Raps am 21.07.2009 ; W-Weizen am
		Vorfrucht	08.08.2009
		· 1.Stoppelbearbeitung	12.08.2009 Spatenrollegge
		· 2.Stoppelbearbeitung	09.09.2009 Spatenrollegge
		· Bodenbearbeitung	21.09.2009 Pflug
		· Saattbettbereitung	23.09.2009 Kreiselegge+Walze
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	25.09.2009
		· Technik	Scheibenschaardrillmaschine "Hassia"
		· Saatgut (Menge und Sorte)	„Borfuro“ 123 kg/ha, 350Kö/m ² , TKG:31,6 gr. , KF.90%
		· Beizung	ungebeizt
		· Wege spritzen	07.04.2010
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	08.03.10
· N-min	40,1 kg N/ha		
· 1.N-Düngung	18.03.10 ES 25: 60 kg N /ha als AHL		
· N _{gesamt} (incl. N _{min})	100 kg N/ha incl. N-min		

Jahr	Fruchtfolge/ Kultur	Maßnahme	Datum und Art der Maßnahme
2010		. Ernte	
		Datum	10.05.2010 mit Ladewagen abgefahren (Landwirt Schünemann)
2 und 4/ früher Weizen		. Aussaatvorbereitung	
		· Vorfrucht	Ernte W-Raps am 21.07.2009
		· 1.Stoppelbearbeitung	12.08.2009 Spatenrollegge
		· Bodenbearbeitung	21.09.2009 Pflug
		· Bodenbearbeitung	23.09.2009 Grubber
		· Saatbettbereitung	24.09.2009 Kreiselegge+Walze
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	25.09.2009
		· Technik	Scheibenschaardrillmaschine "Hassia" „Skalmeje“ 142 kg/ha, 300Kö/m ² , TKG:46,3 gr. , KF.98%
		· Saatgut (Menge und Sorte)	Landor CT
		· Beizung	07.04.2010
		· Wege spritzen	
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	08.03.10
		· N-min	67,4 kg N/ha
		· 1.N-Düngung	18.03.10 ES 23: 60 kg N /ha als AHL
		· 2.N-Düngung	20.04.10 ES 27: 60 kg N /ha als AHL
		· 3.N-Düngung	04.06.10 ES 41: 60 kg N /ha als AHL
		· 4.N-Düngung	
		· N _{gesamt} (incl. N _{min})	247,4 kg N/ha
		. Pflanzenschutz	
		· 1.Herbizid (nur UK-BK)	19.04.2010 ES: 27 220 gr./ha Broadway + 1 l/ha Netzmittel
		· 1.Wachstumsregler	15.04.2010 ES 25: 1,3 l/ha CCC 720
		· 2.Wachstumsregler	05.05.2010: ES 31: 0,8 l/ha CCC 720 + 0,3 l/ha Moddus
		· 1. Fungizid (außer F0)	10.05.2010: ES 31/32 0,7 l/ha Bravo + 0,8 l/ha Input
		· 2.Fungizid	08.06.2010: ES 55: 0,6 l/ha Champion + 0,6 l/ha Diamant
		. Ernte	
		Datum	20.08.2010
3 und 4/ später Weizen		. Aussaatvorbereitung	
		· Vorfrucht	Ernte Mais am 30.09.2009
		· Bodenbearbeitung	14.10.2009 Pflug
		· Saatbettbereitung	14.10.2009 Kreiselegge+Walze
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	14.10.2009
		· Technik	Scheibenschaardrillmaschine "Hassia" „Skalmeje“ 156 kg/ha, 330Kö/m ² , TKG:46,6 gr. , KF.98%
		· Saatgut (Menge und Sorte)	Landor CT
		· Beizung	07.04.2010
		· Wege spritzen	
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	08.03.10
		· N-min	86,3 kg N/ha
		· 1.N-Düngung	18.03.10 ES 21: 60 kg N /ha als AHL
		· 2.N-Düngung	20.04.10 ES 25: 60 kg N /ha als AHL
		· 3.N-Düngung	04.06.10 ES 39: 60 kg N /ha als AHL
		· 4.N-Düngung	
		· N _{gesamt} (incl. N _{min})	266,3 kg N/ha

Jahr	Fruchtfolge/ Kultur	Maßnahme	Datum und Art der Maßnahme
2010		. Pflanzenschutz	
		· 1. Herbizid (nur UK-BK)	19.04.2010 ES: 27 220 gr./ha Broadway + 1 l/ha Netzmittel
		·	
		· 1. Wachstumsregler	15.04.2010 ES 23: 1,3 l/ha CCC 720
		· 2. Wachstumsregler	05.05.2010: ES 31: 0,8 l/ha CCC 720 + 0,3 l/ha Moddus
		·	
		· 1. Fungizid (außer FO)	10.05.2010: ES 31/32 0,7 l/ha Bravo + 0,8 l/ha Input
		· 2. Fungizid	08.06.2010: ES 51: 0,6 l/ha Champion + 0,6 l/ha Diamant
		·	
		· Datum	20.08.2010
		· Ertrag	siehe Erntelisten
2011	1/ Mais (Mono)	. Aussaatvorbereitung	
		· Vorfrucht	Ernte Mais am 15.10.2010
		· 1. Stoppelbearbeitung	18.10.2010 Maisstoppeln geschlegt
		. Totalherbizid	
		· Bodenbearbeitung	18.10.2010 Pflug
		· Saatbettbereitung	19.04.2011 Kreiselegge+Walze
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	19.04.2011
		· Technik	Maisdrille (IFZ)
		· Saatgut (Menge und Sorte)	„Fernandes“
		. Düngung	
			03.03.11 ES VS: SSA(170 Kg / ha) = 35,7 kg N /ha + 40,8 Kg S / ha
		· 1. N-Düngung	
		· 2. N-Düngung	24.05.2011 ES:16 80 kg N/ha als KAS
		· 3. N-Düngung	
		. Pflanzenschutz	
		· 1. Herbizid(Spritzfenster in UK-BK)	23.05.2011 ES:16 1+2 l/ha Laudis Terra Pack+1,5 l/ha Bromoterb
		3 und 4/ Mais	. Aussaatvorbereitung
	· Vorfrucht	Ernte Grünroggen am 03.+04.05.2011	
	· Bodenbearbeitung	05.05.2011 Pflug	
	· Saatbettbereitung	06.05.2011 Kreiselegge + Walze(3x)	
	. Aussaat		
	· Datum und Bedingungen	09.05.2011	
	· Technik	Maisdrille (IFZ)	
	· Saatgut (Menge und Sorte)	„Fernandes“	
	. Düngung		
	· 1. N-Düngung	03.03.11 ES VS: SSA(170 Kg / ha) = 35,7 kg N /ha + 40,8 Kg S / ha	
	· 2. N-Düngung	24.05.2011 ES:10 80 kg N/ha als KAS	
	· 3. N-Düngung	16.06.2011 ES:14 80 kg N/ha als KAS	
	. Pflanzenschutz		
	· 1. Herbizid	27.06.2011 ES:18 1,5 l/ha Callisto	

Jahr	Fruchtfolge/ Kultur	Maßnahme	Datum und Art der Maßnahme
2011	3 und 4/ Grünroggen	. Aussaatvorbereitung	
		· Vorfrucht	Ernte W-Raps am 26.07.2010 Ernte WW am 20.08.2010
		· 1.Stoppelbearbeitung	24.08.2010 Stoppeln geschlegelt
		· Bodenbearbeitung	01.09.2010 Grubber (IFZ) 03.09.2010 Rollegge
		· Saatbettbereitung	21.09.2010 Kreiselegge+Walze 2x
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	21.09.2010
		· Technik	Scheibenschaardrillmaschine "Hassia"
		· Saatgut (Menge und Sorte)	„Borfuro“ 147 kg/ha, 350Kö/m ² , TKG:34,5 gr. , KF.82%
		· Beizung	ungebeizt
		· Wege spritzen	01.11.2010
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	01.03.11
		· N-min	10,6 kg N/ha
		· 1.N-Düngung	03.03.11 ES 23: SSA(170 Kg / ha) = 35,7 kg N /ha + 40,8 Kg S / ha
		· 2.N-Düngung	08.03.11 ES 23: 50 kg N /ha als AHL
		· N _{gesamt} (incl. N _{min})	98,3 kg N/ha incl. N-min
. Ernte			
· Datum	03.05.2011(Handernte) 04.05.2011 (Restfläche) 04.05.2011 mit Ladewagen abgefahren (Landwirt Schünemann)		
2 und 4/ früher Weizen		. Aussaatvorbereitung	
		· Vorfrucht	Ernte W-Raps am 26.07.2010
		· 1.Stoppelbearbeitung	24.08.2010 Stoppeln geschlegelt
		· Bodenbearbeitung	01.09.2010 Grubber (IFZ) 03.09.2010 Rollegge
		· Saatbettbereitung	21.09.2010 Kreiselegge+Walze 2x
		. Aussaat	
		· Datum und Bedingungen	21.09.2010
		· Technik	Scheibenschaardrillmaschine "Hassia"
		· Saatgut (Menge und Sorte)	„Skalmeje“ 142 kg/ha, 300Kö/m ² , TKG:46,3 gr. , KF.98%
		· Beizung	Landor CT
		· Wege spritzen	01.11.2010
		. Düngung	
		· N-min Probenahme	01.03.11
		· N-min	36,0 kg N/ha
		· 1.N-Düngung	03.03.11 ES 21: SSA(170 Kg / ha) = 35,7 kg N /ha + 40,8 Kg S / ha
		· 2.N-Düngung	08.03.11 ES 23: 50 kg N /ha als AHL
		· 3.N-Düngung	20.04.11 ES 30: 60 kg N /ha als AHL
· 4.N-Düngung	24.05.11 ES 51: 40 kg N /ha als KAS		
. Pflanzenschutz			
· 1.Herbizid (nur UK-BK)	08.04.2011 ES: 27 220 gr./ha Broadway + 1 l/ha Netzmittel		
· 1.Wachstumsregler	08.04.2011 ES: 27 1,3 l/ha CCC 720		
· 2.Wachstumsregler	04.05.2011 ES: 31 0,5 l/ha CCC 720 +0,2 l/ha Moddus		
· 1. Fungizid (außer FO)	05.05.2011 ES: 31 0,8 l/ha Input		
· 2.Fungizid	31.05.2011 ES 65: 0,4 l/ha Champion + 0,4 l/ha Diamant		
· 1.Insektizid	30.05.2011 ES:59 125 mL/ha Fastac SC Super Contact		
· Schneckenkorn	04.10.2010 ES 10: 6 kg/ha Metarex		
. Ernte			

Jahr	Fruchtfolge/ Kultur	Maßnahme	Datum und Art der Maßnahme
2011	3 und 4/ später Weizen	. Aussaatvorbereitung · Vorfrucht · 1.Stoppelbearbeitung · Bodenbearbeitung · Saatbettbereitung . Aussaat · Datum und Bedingungen · Technik · Saatgut (Menge und Sorte) · Beizung · Innokulation Frühjahr · Wege spritzen . Düngung · N-min Probenahme · N-min · 1.N-Düngung · 2.N-Düngung · 3.N-Düngung · 4.N-Düngung . Pflanzenschutz · 1.Wachstumsregler · 2.Wachstumsregler · 1. Fungizid (außer FO) · 2.Fungizid · 1.Insektizid · Datum · Ertrag	Ernte Mais am15.10.2010 18.10.2010 Maisstoppeln geschlegelt 18.10.2010 Pflug 19.10.2010 Kreiselegge+Walze 19.10.2010 Scheibenschaardrillmaschine "Hassia" „Skalmeje“ 140 kg/ha, 330Kö/m ² , TKG:41,6 gr. , KF.98% Landor CT 23.03.2011 01.03.11 32,2 kg N/ha 03.03.11 ES 13: SSA(170 Kg / ha) = 35,7 kg N /ha + 40,8 Kg S / ha 08.03.11 ES 21: 50 kg N /ha als AHL 20.04.11 ES 29: 60 kg N /ha als AHL 24.05.11 ES 49: 40 kg N /ha als KAS 11.04.2011 ES: 23 1,3 l/ha CCC 720 04.05.2011 ES: 31 0,5 l/ha CCC 720 +0,2 l/ha Moddus 05.05.2011 ES: 31 0,8 l/ha Input 31.05.2011 ES 59: 0,4 l/ha Champion + 0,4 l/ha Diamant 30.05.2011 ES:55 125 mL/ha Fastac SC Super Contact 02.08.2011 siehe Erntelisten

Danksagung

Ich möchte mich ganz besonders bei Prof. Dr. Andreas von Tiedemann für die Überlassung des Themas, die Diskussions- und Hilfsbereitschaft bedanken. Durch seine Loyalität und die gewährte Freiheit bei der Bearbeitung des Projektes habe ich das Interesse an der Wissenschaft entdeckt.

Prof. Dr. Petr Karlovsky danke ich für die Unterstützung bei den molekulargenetischen Untersuchungen, durch stetes Interesse und innovative Tipps hat er maßgeblich zum Gelingen der Arbeit beigetragen. Zusätzlich danke ich ihm für die Übernahme des Korreferats.

Mein ganz besonderer Dank gilt Dr. Birger Koopmann, Evelin Vorbeck, Dagmar Tacke, Claudia Nordmann und Hubertus Reintke für die ständig pragmatische und wohlwollende Unterstützung bei Labor-, Gewächshaus- und Feldversuchen. Ohne Ihre vielen Tipps und tatkräftige Unterstützung in herzlicher Arbeitsatmosphäre wäre Vieles nicht möglich gewesen.

Ebenso möchte ich mich bei meinem ehemaligen Büronachbarn, dem Makrobiologen Ruben Gödecke, für das ständige Interesse und die direkten Ratschläge zu meiner Arbeit bedanken.

Bei meinen Projektpartnern Becke Strehlow und Hagen Hartmann bedanke ich mich besonders für eine gute Zusammenarbeit, spannende Diskussionen und eine tolle Zeit auch abseits des Feldversuchs. Dem Projektbetreuer Dr. Horst-Henning Steinmann danke ich für seine ständige Diskussionsbereitschaft und Hilfestellung rund um das Energiefruchtfolgenprojekt.

Für die vielen Hinweise, die umfassende Unterstützung und die große Geduld bei der statistischen Auswertung möchte ich mich besonders herzlich bei Dr. Friederike de Mol bedanken.

Meiner Wissenschaftsmanagerin Martina Bode danke ich herzlich für die stets pragmatische, unbürokratische Hilfe in administrativen Angelegenheiten und für ein offenes Ohr in allen Lebenslagen.

Ich möchte mich bei den Zivildienstleistenden Matthias Meyer, Sebastian Streit und Robert Knoll für ihre gute und gewissenhafte Arbeit bedanken.

Weiterhin gilt mein Dank meinen studentischen Hilfskräften Jan Picker, Christine Vogt, Malik Farooq und Joshua Okonya.

Meinen Kollegen und ehemaligen Kollegen in der Abteilung Allgemeine Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz möchte ich für die freundschaftliche Arbeitsatmosphäre und stete Hilfsbereitschaft danken.

Mein Dank gilt weiter Anna Bers und Anne Klie für die kritische Durchsicht der Manuskripte.

Schlussendlich danke ich besonders meinen Eltern für die stete und uneingeschränkte Unterstützung während meiner Ausbildung.

Gefördert mit Mitteln des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Verbraucherschutz (BMELV) über die Fachagentur Nachwachsende Rohstoffe e.V. (FNR) unter der FKZ **220 227 07**

Eidesstattliche Erklärung

Hiermit erkläre ich, dass diese Arbeit weder in gleicher noch in ähnlicher Form bereits anderen Prüfungsbehörden vorgelegen hat.

Weiter erkläre ich, dass ich mich an keiner anderen Hochschule um einen Doktorgrad beworben habe.

Mark Winter

Göttingen, den

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Mark Winter

Geburtsdatum/-ort: 04.08.1981/Göttingen

Adresse: Königshagener Ring 6, 37431 Bad Lauterberg

Hochschulausbildung:

- Seit 2008 Doktorand und Wissenschaftlicher Mitarbeiter im Projekt „Fruchtfolgen mit Energiepflanzen – Chancen und Risiken für den Pflanzenschutz“ am Department für Nutzpflanzenwissenschaften, Abteilung Allgemeine Pflanzenpathologie und Pflanzenschutz der Georg-August-Universität Göttingen
- 2006-2008 Masterstudium der Agrarwissenschaften an der Georg-August-Universität Göttingen. Thema der Masterarbeit: „Zur systemischen Verlagerung von Mykotoxinen nach Halmbasisbefall von Weizen mit toxigenen Fusariumarten“
- SoSe 2005: Auslandsstudium der Agrarwissenschaften an der Ecole Supérieur d’Agriculture d’Angers, Frankreich
- 2003-2006 Bachelorstudium der Agrarwissenschaften an der Georg-August-Universität Göttingen. Thema der Bachelorarbeit: „Bedeutung pflanzenbaulicher Parameter bei der Prognose des Toxin-Risikos im Weizen“
- 2002-2003 Studium der Chemie, Universität Leipzig

Wehr-/Ersatzdienst:

2001-2002 Zivildienst im Integrativen Kindergarten „Kunterbunt“ Herzberg

Schulbildung:

- 1988-1992 Grundschule Barbis
- 1992-1994 Orientierungsstufe Bad Lauterberg
- 1994-1998 Gymnasialzweig der Kooperativen Gesamtschule Bad Lauterberg
- 1998-2001 Ernst-Moritz-Arndt Gymnasium Herzberg

Abitur als Abschluss
