

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

**Auftreten der partiellen Taubährigkeit in Weizenbeständen –
räumliche Verteilung der *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine**

Inaugural-Dissertation
zur
Erlangung des Grades
Doktor der Agrarwissenschaften
(Dr. agr.)

der
Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät
der
Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität
zu Bonn

vorgelegt am 30. September 2009
von Dipl.-Ing. agr. Norbert Schlang
aus Düren

Referent:	Prof. Dr. H.-W. Dehne
Koreferent:	Prof. Dr. J. Leon
Tag der mündlichen Prüfung:	21. Dezember 2009
Erscheinungsjahr:	2010

**Meinem verstorbenen Vater
Dr. agr. Josef Schlang
gewidmet**

**„You can't build a peaceful world
on empty stomachs and human misery“**

Dr. Norman E. Borlaug
(1914 – 2009)
Vater der Grünen Revolution

Kurzfassung

Norbert Schlang

Auftreten der partiellen Taubährigkeit in Weizenbeständen – räumliche Verteilung der *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine

In den Jahren 2006 und 2007 wurde die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine in natürlich infizierten Weizenfeldern auf der Regionalebene und auf der Bestandesebene untersucht. Auf der Regionalebene lagen die beprobten Flächen 100 m bis 10 km auseinander, während auf der Bestandesebene in einem 20 m x 20 m-Raster beprobt wurde. Ein Großteil der Untersuchungen wurde auf rekultivierten Flächen durchgeführt, da deren Bodenhomogenität die Analyse räumlicher Verteilung erleichtert. Die Bestimmung des Befalls mit *Fusarium* spp. geschah mikrobiologisch und mittels quantitativer PCR. Die Mykotoxinkontamination wurde mit einer Analysemethode (LC-ESI/MS) zum simultanen Nachweis von 32 Mykotoxinen durchgeführt.

Vorherrschende Arten auf den Flächen auf der Regionalebene waren in beiden Jahren *F. avenaceum* und *F. poae*. Auch *F. culmorum* und *F. graminearum* wurden regelmäßig isoliert. Im Jahr 2006 traten zusätzlich *F. proliferatum* und *F. tricinctum* auf. Die Häufigkeit befallener Körner lag mit 7,2 % und 5,9 % in beiden Jahren auf einem ähnlichen Niveau. Unterschiedliche Witterungsbedingungen zwischen Blüte und Ernte führten jedoch zu deutlich unterschiedlichen Befallsintensitäten in beiden Jahren (68 pg mg⁻¹ in 2006, 513 pg mg⁻¹ in 2007). Die Mykotoxine Deoxynivalenol, Zearalenon und Enniatin B wurden in allen Proben nachgewiesen, was deren hohe Bedeutung für die Getreideproduktion unterstrich. 3-Acetyldeoxynivalenol, Moniliformin, Monoacetoxyscirpenol und Nivalenol traten vereinzelt auf, dann aber in relativ hohen Konzentrationen.

Die Häufigkeit *Fusarium*-befallener Körner zeigte in vielen Fällen eine Aggregation im Bestand, was auf die heterogene Verteilung von Ernteresten der Vorfrüchte zurückzuführen war. Bei der Befallsintensität herrschten zufällige räumliche Verteilungen vor. In einigen Fällen wurde eine Tendenz zur Aggregation oder regelmäßigen Verteilung nachgewiesen. Die räumliche Verteilung der Mykotoxinbelastung war abhängig vom Mykotoxin. So traten Deoxynivalenol und Moniliformin vorwiegend zufällig verteilt auf, Enniatin B regelmäßig verteilt und Nivalenol, Zearalenon sowie Zearalenol zeigten ein aggregiertes Auftreten. Der Nachweis verschiedener Verteilungen für die Befallsparameter unterstrich die Bedeutung angepasster und optimierter Beprobungs- und Monitoringstrategien, um die Situation im Bestand adäquat abbilden zu können.

Isolate von *F. graminearum* aus einem Weizenbestand wiesen eine ähnlich hohe genetische Diversität auf wie Populationen auf höheren Skalenebenen.

Abstract

Norbert Schlang

Occurrence of *Fusarium* head blight in wheat fields – spatial distribution of *Fusarium* species and associated mycotoxins

Investigations into the spatial distribution of *Fusarium* spp. and associated mycotoxins in naturally infected wheat fields were carried out in 2006 and 2007, both on a regional and a local scale. On the regional scale the distances between the sampled fields were 100 m to 10 km, whereas the sampling on the local scale was carried out in a 20 m x 20 m-grid. A major part of the investigations took place on recultivated lots where the putative homogeneity of the soil substrate was thought to facilitate the analysis of spatial distributions. Infection with *Fusarium* spp. was analysed both microbiologically and using quantitative PCR. Mycotoxin contamination was determined using a liquid chromatography method (LC-ESI/MS) for simultaneous detection of 32 mycotoxins.

Predominant species in both years were *F. avenaceum* and *F. poae*, whereas *F. culmorum* and *F. graminearum* occurred less frequently. In 2006 *F. proliferatum* and *F. tricinctum* were also isolated from wheat kernels. The frequency of infected kernels was similar in both years, at 7.2 % in 2006 and 5.9 % in 2007. However, different climatic conditions in the period from flowering to harvest resulted in major differences in fungal biomass between years (68 pg mg⁻¹ in 2006 and 513 pg mg⁻¹ in 2007). The mycotoxins deoxynivalenol, zearalenone and enniatin B were detected in each sample, demonstrating their high relevance in the production of small grain cereals. 3-acetyldeoxynivalenol, moniliformin, monoacetoxyscirpenol and nivalenol were isolated less frequently, but in relatively high concentrations.

The frequency of infected kernels showed aggregated patterns in half of the fields, which was explained by aggregations of residues of the previous crop. The spatial distribution of fungal biomass most frequently had random patterns, although in some cases a tendency to regular and aggregated patterns was observed. The spatial distribution of mycotoxin contamination depended on the mycotoxin. Deoxynivalenol and moniliformin showed predominantly random patterns, whereas enniatin B was largely distributed regularly. Nivalenol, zearalenone and zearalenole showed aggregated patterns. The occurrence of different patterns for the various disease parameters demonstrated the high relevance of adjusted and optimised sampling and monitoring strategies for analysing the disease situation in the field.

Isolates of *F. graminearum* from one wheat canopy showed a similar high level of genetic diversity to populations on larger scales.

Abkürzungsverzeichnis

Allgemeine Abkürzungen:

Abb.	Abbildung
bp	Basenpaare
°C	Grad Celsius
CLA	Carnation Leaf Agar
CZID	Czapek-Dox-Iprodion-Dichloran-Agar
d. h.	das heißt
ECa	apparent electric conductivity (scheinbare elektrische Leitfähigkeit)
GM	Größenmarker
I _a	Aggregationsindex
kg	Kilo-Gramm
LOD	Level of detection (Nachweisgrenze)
m	Meter
mg	Milli-Gramm
min	Minute
ml	Milli-Liter
mM	Milli-Molar
mS	Milli-Siemens
N	Norden
n	Anzahl
NC	Negativkontrolle
ng	Nano-Gramm
nM	Nano-Molar
PDA	Potato Dextrose Agar
pg	Piko-Gramm
s	Sekunde
S	Sorte
SNA	Synthetischer nährstoffarmer Agar
Tab.	Tabelle
µg	Mikro-Gramm
µl	Mikro-Liter

VF	Vorfrucht
WA	Wasser-Agar
z. B.	zum Beispiel

Abkürzungen *Fusarium*-Arten:

<i>F.</i>	<i>Fusarium</i>
FAVE	<i>Fusarium avenaceum</i>
FCUL	<i>Fusarium culmorum</i>
FGRA	<i>Fusarium graminearum</i>
FPOAE	<i>Fusarium poae</i>
FPRO	<i>Fusarium proliferatum</i>
FTRI	<i>Fusarium tricinctum</i>
FUSSPP	<i>Fusarium</i> spp.

Abkürzungen Mykotoxine:

15AcDON	15-Acetyldeoxynivalenol
3AcDON	3-Acetyldeoxynivalenol
BEA	Beauvericin
DON	Deoxynivalenol
ENNB	Enniatin B
HT2	HT2-Toxin
MAS	Monoacetoxyscirpenol
MON	Moniliformin
NIV	Nivalenol
T2	T2-Toxin
ZEA	Zearalenon
ZOL	α -Zearalenol

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung.....	1
2	Material und Methoden.....	11
2.1	Organismen.....	11
2.1.1	Pflanzen.....	11
2.1.2	Pilze.....	11
2.2	Versuchsflächen.....	12
2.3	Chemikalien und Verbrauchsmaterialien.....	12
2.4	Geräte.....	15
2.5	Isolierung und Kultivierung von <i>Fusarium</i>-Arten.....	16
2.5.1	Kulturmedien.....	16
2.5.2	Isolierung von <i>Fusarium</i> spp. von Weizenkörnern.....	17
2.5.3	Identifizierung der <i>Fusarium</i> -Arten.....	17
2.6	Probenahme.....	18
2.6.1	Rasterbeprobung.....	18
2.6.2	Probenahme von Mischproben.....	18
2.7	Erfassung von Standortfaktoren.....	19
2.7.1	Scheinbare elektrische Leitfähigkeit.....	19
2.7.2	Wetterdaten.....	19
2.8	Molekularbiologische Methoden.....	19
2.8.1	DNA-Extraktion.....	19
2.8.1.1	Wizard magnetic DNA purification system for food.....	20
2.8.1.2	DNeasy Plant Mini Kit.....	21
2.8.2	Bestimmung der DNA-Konzentration.....	22
2.8.2.1	Spektrophotometrie.....	22
2.8.2.2	Agarose-Gel Assay.....	22
2.8.3	Polymerase-Kettenreaktion (PCR).....	22
2.8.3.1	Artspezifische Multiplex-PCR.....	22
2.8.3.2	Quantitative TaqMan®-Real-time PCR.....	23

2.8.3.3	Chemotyping und Abschätzung der genetischen Diversität.....	24
2.9	Mykotoxin-Analyse.....	25
2.9.1	Probenahme.....	25
2.9.2	Multimykotoxin-Analyse.....	25
2.10	Computergestützte Datenanalyse.....	26
2.10.1	Statistische Auswertung.....	26
2.10.2	Analyse der räumlichen Verteilung.....	26
2.10.3	Geostatistische Datenverarbeitung.....	27
3	Ergebnisse.....	28
3.1	Räumliches Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. und assoziierter Mykotoxine auf regionaler Ebene.....	28
3.1.1	Witterung in der Region Aldenhoven im Jahr 2006.....	29
3.1.2	Befallssituation in der Region Aldenhoven im Jahr 2006.....	29
3.1.3	Befallssituation in der Region Ligurien, Italien im Jahr 2006.....	36
3.1.4	Witterung in der Region Aldenhoven im Jahr 2007.....	37
3.1.5	Befallssituation in der Region Aldenhoven im Jahr 2007.....	37
3.1.6	Zusammenhang verschiedener Befallsparameter auf regionaler Ebene.....	44
3.1.6.1	Befallshäufigkeit und Befallsintensität.....	44
3.1.6.2	Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung.....	44
3.1.6.3	Befallsintensität und Mykotoxinbelastung.....	45
3.1.6.4	Koinzidenz des Auftretens verschiedener <i>Fusarium</i> -Arten.....	46
3.2	Räumliches Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. und assoziierter Mykotoxine auf Bestandesebene.....	47
3.2.1	Überprüfung der Homogenität des Bodensubstrates.....	48
3.2.1.1	Räumliche Verteilung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit.....	48
3.2.1.2	Homogenität des Bodensubstrates auf den Schlägen R1 und R8.....	49
3.2.2	Räumliche Verteilung von Befallsparametern von <i>Fusarium</i> spp. an Weizenkörnern.....	50
3.2.2.1	Befallshäufigkeit im Jahr 2006.....	50

3.2.2.2	Befallshäufigkeit im Jahr 2007.....	52
3.2.2.3	Befallsintensität im Jahr 2006.....	58
3.2.2.4	Befallsintensität im Jahr 2007.....	62
3.2.2.5	Mykotoxinbelastung im Jahr 2006.....	66
3.2.2.6	Mykotoxinbelastung im Jahr 2007.....	68
3.2.3	Zusammenhang verschiedener Befallsparameter auf Bestandesebene.....	77
3.2.3.1	Befallshäufigkeit und Befallsintensität.....	77
3.2.3.2	Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung.....	78
3.2.3.3	Befallsintensität und Mykotoxinbelastung.....	80
3.2.3.4	Koinzidenz des Auftretens verschiedener <i>Fusarium</i> -Arten.....	82
3.3	Genetische Diversität von <i>F. graminearum</i> innerhalb eines Weizenbestandes.....	83
3.3.1	Chemotypen von <i>F. graminearum</i>	83
3.3.2	Sequenzvariation beim Primersystem Fg16.....	85
4	Diskussion.....	87
5	Zusammenfassung.....	110
6	Literaturverzeichnis.....	113

1 Einleitung

Vor 200 Jahren wurde die Gattung *Fusarium* zum ersten Mal durch Heinrich Friedrich Link beschrieben (LINK, 1809). Die Gattung ist ubiquitär vertreten und zeichnet sich durch ein sehr breites Wirtsspektrum aus (LEPSCHY, 1992). Für nahezu alle ökonomisch wichtigen Nutzpflanzen sind Krankheiten in Verbindung mit *Fusarium* spp. bekannt. Dies gilt in besonderem Maße für die *Gramineae*, da fast alle Getreidearten von *Fusarium* spp. befallen werden können. Im Vordergrund stehen hier Weizen, Gerste und Mais (TANAKA *et al.*, 1988; JELINEK *et al.*, 1989; PARRY *et al.*, 1995). Im Weizen hat neben der Stängel- und Wurzelfäule (*Fusarium* crown rot) die partielle Taubährigkeit (*Fusarium* head blight) eine hohe Bedeutung, die in nahezu allen Weizenanbaugebieten, besonders aber unter humiden Bedingungen, auftritt und zum ersten Mal von SMITH (1884) beschrieben wurde. Beim Befall der Ähre zerstören die Pilze das Stärkegranulat sowie Zellwände und Proteine der Weizenpflanze (DEXTER *et al.*, 1996; NIGHTINGALE *et al.*, 1999). Dadurch können Ertragsverluste von bis zu 70 % entstehen. Neben den quantitativen Verlusten sind aber besonders die qualitativen Verluste von großer Bedeutung, die durch die Bildung toxischer Sekundärmetabolite, sogenannter Mykotoxine, entstehen (STRANGE & SCOTT, 2005).

Die partielle Taubährigkeit wird durch einen Erregerkomplex verursacht, der bis zu 17 Arten umfassen kann (PARRY *et al.*, 1995). Die Arten *Fusarium graminearum*, *F. culmorum* und *F. avenaceum* sind weltweit aber vorherrschend (Tab. 1).

Tab. 1: Weltweit wichtigste *Fusarium*-Arten im Weizenanbau mit Hauptfruchtformen (PARRY *et al.*, 1995; BACKHOUSE *et al.*, 2001; LESLIE & SUMMERELL, 2006).

Anamorph	Teleomorph
<i>Fusarium avenaceum</i> (Corda ex Fr.) Sacc.	<i>Gibberella avenacea</i> R. J. Cook
<i>Fusarium crookwellense</i> Burgess., Nels. & Touss.	unbekannt
<i>Fusarium culmorum</i> (W.G. Smith) Sacc.	unbekannt
<i>Fusarium equiseti</i> (Corda) Sacc.	<i>Gibberella intricans</i> Wollenw.
<i>Fusarium graminearum</i> Schwabe	<i>Gibberella zeae</i> (Schw.) Petch
<i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht. ex Fr.	unbekannt
<i>Fusarium poae</i> (Peck) Wollenw.	unbekannt
<i>Fusarium sporotrichioides</i> Sherb.	unbekannt
<i>Fusarium tricinctum</i> (Corda) Sacc.	<i>Gibberella tricincta</i> El-Guoll, McRit, Schoult. & Rid.
<i>Fusarium proliferatum</i> (Mats.) Nirenberg	unbekannt

Das Auftreten der Arten ist von den Umweltbedingungen sowie den Wirtspflanzen abhängig (PARRY *et al.*, 1995; DOOHAN *et al.*, 2003). In heißeren Regionen hat *F. graminearum* eine hohe Bedeutung, während *F. avenaceum*, *F. culmorum* und *F. poae* eher in kühleren, maritim geprägten Regionen anzutreffen sind. In nordeuropäischen Regionen wie Großbritannien und Skandinavien sind *F. avenaceum* und *F. culmorum* als vorherrschend beschrieben, während in Südeuropa besonders *F. graminearum* eine wichtigere Rolle spielt (PARRY, 1990; ESKOLA, 2001; YLI-MATTILA, 2004). In Osteuropa findet sich in trockenen und warmen Regionen ebenfalls sehr häufig *F. graminearum*, während *F. avenaceum* neben *F. culmorum* und *F. poae* in kühleren Regionen anzutreffen ist (MANKA *et al.*, 1985; GOLINSKI *et al.*, 1999). In den Niederlanden ist *F. graminearum* trotz des eher kühl-maritimen Klimas von großer Bedeutung. Obwohl *F. graminearum* in Nord-, Mittel- und Süddeutschland als vorherrschend beschrieben wird, haben in Westdeutschland, und dort besonders im Rheinland, *F. avenaceum* und *F. poae* eine hohe Bedeutung. Auch *F. culmorum* und *F. graminearum* werden dort aber regelmäßig von infizierten Weizenpflanzen isoliert (MIELKE & MEYER, 1990; ELLNER 2000 & 2001; LIENEMANN, 2002; MEIER, 2003; WAALWIJK *et al.*, 2003; MEYER, 2005).

Das Hauptreservoir des Primärinokulums für die Infektion der Weizenpflanzen stellen Erntereste der Vorfrucht dar. Auf diesen können die *Fusarium*-Arten saprophytisch, in Form von Myzel und Chlamydosporen, überleben. Besonders günstig für die Entwicklung sind Maisstoppeln sowie Mais- und andere Getreidekörner. Allgemein kann der Pilz auf schwer abbaubaren Ernteresten länger überleben (SUTTON, 1982; BAI & SHANER, 1994; PARRY *et al.*, 1995; GILBERT & FERNANDO, 2004). Während reduzierte Bodenbearbeitung einen positiven Effekt auf die Überlebensdauer des Inokulums hat, da die Erntereste auf der Bodenoberfläche verbleiben und dort langsamer abgebaut werden, reduziert sich die Überlebensrate durch hohe Bodenfeuchtigkeit, besonders im Winter (SUTTON, 1982). Das Inokulumpotenzial wird damit hauptsächlich durch die Art der Vorfrucht und die Menge an Ernteresten bestimmt. Auf den Ernteresten finden die Bildung und Reifung der Sporen statt. Alle *Fusarium*-Arten bilden Konidiosporen, die innerhalb weniger Stunden reifen können. So sporulieren die Pilze immer wieder in milden Perioden zwischen der Ernte der Vorfrucht und der Blüte des nachfolgenden Weizens. Damit ist auch eine Infektion bisher nicht besiedelter Erntereste möglich, wodurch sich die Überlebensrate erhöhen kann. Die Ascosporen von *F. graminearum* benötigen nach dem Winter jedoch eine längere Reifezeit. Die Reifung des Inokulums wird durch Kälte und Trockenheit gehemmt (CHAMPEIL *et al.*, 2004a).

Niederschlag spielt eine wichtige Rolle in der Epidemiologie der partiellen Taubähigkeit. Schwere Epidemien finden nur in Jahren mit ausreichend Niederschlag statt. Neben der Bedeutung von Feuchtigkeit zur Reifung des Inokulums findet die Ausbreitung der Konidien hauptsächlich über Regenspritzer statt, die die Sporen sukzessive über die Blattetagen oder direkt zur Ähre transportieren. Die Ausbreitungsdistanz ist dabei bis zu 60 cm vertikal und bis zu 100 cm horizontal (JENKINSON & PARRY, 1994; PARRY *et al.*, 1995; GILBERT & TEKAUZ, 2000; HÖRBERG, 2002). Neben der Ausbreitung über Regenspritzer wird für einige Arten, wie *F. poae*, die Mikrokonidien bilden, auch die Verbreitung durch Wind vermutet (MARKELL & FRANCL, 2003). Auch eine Ausbreitung über tierische Vektoren wie Milben (*Siteroptes graminum*), Stubenfliege (*Musca domestica*) und Feldheuschrecke (*Melanoplus bivittatus*) ist möglich, die Bedeutung dieses Transportweges aber als eher gering anzusehen (GORDON, 1959). Die relative Bedeutung der einzelnen Verbreitungswege ist allerdings abhängig von den klimatischen Bedingungen in der Region. Ascosporen von *F. graminearum* werden aktiv ausgeschleudert und durch Wind verbreitet. Dadurch ist die Überwindung größerer Distanzen als beim Transport der Konidien durch Regenspritzer möglich. Im Gegensatz zu den Konidien geschieht die Freisetzung von Ascosporen periodisch (SUTTON, 1982; PARRY *et al.*, 1995; MCMULLEN *et al.*, 1997). Obwohl ein Langstreckentransport von Ascosporen durch Wind möglich scheint, ist eine lokale Kontamination wahrscheinlicher. Dies zeigt sich schon daran, dass benachbarte Felder mit gleicher Sorte oft einen unterschiedlichen Befall mit *F. graminearum* aufweisen (DILL-MACKY & JONES 2000; CHAMPEIL *et al.*, 2004b).

Die Infektion der Weizenpflanze ist vom Ährenschieben bis zur Teigreife möglich. Das anfälligste Stadium ist allerdings die Blüte (BAI & SHANER, 1996; PARRY *et al.*, 1995; LACEY *et al.*, 1999; NICHOLSON *et al.*, 2007). Konidio- und Ascosporen keimen auf den Deckspelzen der Ährchen und auf den Antheren. Für die Primärinfektion ist eine hohe Anzahl an Hyphen notwendig. Die beiden Substanzen Cholinchlorid und Betainhydrochlorid, die besonders in den Antheren in hoher Konzentration vorhanden sind, stimulieren das Hyphenwachstum (SCHROEDER & CHRISTENSEN, 1963; STRANGE & SMITH, 1978). Die Primärinfektion findet dann über die Antheren statt. Von dort wachsen die Pilze inter- und intrazellulär bis zur Ährenspindel durch und können sich in dieser weiter ausbreiten, was vorwiegend basipetal geschieht. Von der Spindel aus können später Sekundärinfektion weiterer Ährchen stattfinden (WEINERT & WOLF, 1994; PRITSCH *et al.*, 2000; BUCHENAUER & KANG, 2002). Die Besiedlung der Spindel unterbricht den Wasser- und Nährstofftransport zu den darüberliegenden Ährchen; diese bleichen in der Folge aus. Aufgrund der unzureichenden

Kornfüllung bilden sich Kümmerkörner, die aber oft nicht vom Pilz besiedelt sind. Auch die infizierten Ährchen oder Ährenstufen bleichen aus. Von diesen Phänomenen des Ausbleichens infizierter und nicht-infizierter Ährchen leitet sich der Name „partielle Taubährigkeit“ ab (SNIJDERS & KRECHTING, 1992). Im späteren Verlauf entwickeln sich auf den Deckspelzen der befallenen Ährchen typische orange- oder lachsfarbene Sporenlager aus.

Die meisten *Fusarium*-Arten, die in Verbindung mit der partiellen Taubährigkeit stehen, bilden eine Vielzahl sekundärer Metabolite, darunter auch Mykotoxine (Tab. 2; PARRY *et al.* 1995; JESTOI, 2004; MURPHY *et al.*, 2006; GLENN, 2007; NICHOLSON *et al.*, 2007). Im Fokus der Forschung stehen die Toxingruppen der Trichothecene, Zearalenone und Fumonisine sowie in jüngerer Zeit auch das Mykotoxin Moniliformin. Die Trichothecene sind die wichtigste Mykotoxingruppe. Sie leiten ihren Namen vom Pilz *Trichothecium roseum* ab, aus dem zum ersten mal Mykotoxine dieser Gruppe isoliert wurden (GLENN, 2007). Trichothecene inhibieren die Proteinbiosynthese in Eukaryontenzellen und sind in vielen Pflanzen- und Tierarten aktiv (ROTTER & PRELUSKY, 1996). Die Gruppe lässt sich weiter in zwei Untergruppen aufteilen. In die Untergruppe der A-Trichothecene fallen die Mykotoxine Mono- und Diacetoxyscirpenol (MAS und DAS) sowie T2- und HT2-Toxin. Die B-Trichothecene umfassen Deoxynivalenol (DON) mit seinen acetylierten Derivaten 3-Acetyldeoxynivalenol (3AcDON) und 15-Acetyldeoxynivalenol (15AcDON) sowie Nivalenol und Fusarenon-X (DESJARDINS, 2006). Das Mykotoxin DON ist der wichtigste Vertreter der Trichothecene und tritt quantitativ am häufigsten auf. Es wird von *F. culmorum* und *F. graminearum* gebildet und stellt für diese einen Pathogenitätsfaktor dar. Während diese Pilze für die Primärinfektion der Ähre kein DON benötigen, ist es für die Ausbreitung in der Spindel essenziell. Mutanten von *F. culmorum* und *F. graminearum* mit inhibierter DON-Biosynthese sind nicht in der Lage, sich innerhalb der Ährenspindel auszubreiten (BAI *et al.*, 2002). Aufgrund des häufigen Auftretens spielt DON eine wichtige Rolle für die menschliche und tierische Ernährung. Konzentrationen von 0,3 mg DON pro kg Futter führen bereits zu einer reduzierten Futteraufnahme bei Schweinen. Höhere Konzentrationen lösen bei den Tieren Erbrechen aus (LACEY *et al.*, 1999; DESJARDINS, 2006). Bei Menschen kann eine dauerhafte Aufnahme von DON zu Nierenschäden führen (RODEMANN, 1999). NIV und T2-Toxin werden in der Regel seltener und in geringeren Mengen nachgewiesen als DON. Die Phytotoxizität von NIV ist zwar geringer als die von DON, die Toxizität gegenüber Warmblütern wird aber als 10-fach höher eingeschätzt (JOFFE, 1986). NIV und T2-Toxin haben eine immunosuppressive Wirkung in Warmblütern. Weiterhin gilt das T2-Toxin als Auslöser der Alimentären Toxischen Aleukie (ATA). Diese Krankheit brach nach dem

zweiten Weltkrieg in Russland aus und forderte dort viele Opfer in der Bevölkerung (DESJARDINS, 2006). Die wichtigsten Vertreter der Zearalenone sind das namensgebende Zearalenon (ZEA) sowie sein Derivat α -Zearalenol (ZOL). Zearalenone haben eine östrogene Wirkung in Warmblütern, was bei Schweinen und Rindern zu Fruchtbarkeitsstörungen führen kann (ROTH, 1990; RAISBECK *et al.*, 1991). Die östrogene Wirkung von ZOL ist dabei ca. 3-mal so hoch wie die von ZEA (FITZPATRICK, 1989). Bei den Fumonisinen sind Fumonisin B1, Fumonisin B2 und Fumonisin B3 (FB1, FB2 und FB3) von hoher Bedeutung. Fumonisine gelten als Auslöser von Lungenödemen bei Schweinen sowie der Leukoenzephalomalazie bei Pferden (RILEY *et al.*, 1998; MATTHIASCHK *et al.*, 1999). Moniliformin wird von *F. avenaceum* gebildet und gilt als zytotoxisch. Schon bei wesentlich geringeren Dosen als bei DON ist eine akute Toxizität festzustellen. Dieses Mykotoxin wird als Auslöser der Keshin-Beck-Krankheit diskutiert, einer Gelenk- und Knochenkrankheit, die in vielen Gebieten Asiens, besonders aber in China, endemisch auftritt (MEYER, 2005; YU *et al.*, 1995; DESJARDINS, 2006).

Tab. 2: Potenzial der wichtigsten *Fusarium*-Arten zur Mykotoxinbildung

	A-Trichothecene	B-Trichothecene	Zearalenone	Fumonisine	Moniliformin	Enniatine	Beauvericin	Fusaproliferin
<i>F. avenaceum</i>	-	-			+	+	+	
<i>F. cerealis</i>		+	+					
<i>F. culmorum</i>		+	+		(+)			
<i>F. equiseti</i>	+		+				+	
<i>F. graminearum</i>		+	+		-			
<i>F. poae</i>	+	+				(+)	+	
<i>F. proliferatum</i>				+	+		+	+
<i>F. sporotrichioides</i>	+			+				
<i>F. tricinctum</i>	-	-			+	+		

- = keine Produktion nachgewiesen, + = Produktion nachgewiesen, (+) = Produktion im Einzelfall vermutet (DESJARDINS, 2006; LESLIE & SUMMERELL, 2006)

Neben diesen relativ gut bekannten Mykotoxinen richtet sich der Fokus der Forschung seit kurzem auch auf andere Mykotoxine. Ein besonderes Augenmerk liegt, neben

Fusaproliferin und Beauvericin auf der Gruppe der Enniatine (JESTOI, 2008). Fusaproliferin ist ein bicyklisches Sesterterpen. Es wird von den Arten *F. proliferatum*, *F. subglutinans* und *F. verticillioides* gebildet, die häufig in Verbindung mit der Kolbenfäule beim Mais nachgewiesen werden (RANDAZZO *et al.*, 1993). In einigen Anbaugebieten, besonders unter heißen und trockenen Bedingungen und mit Mais als Vorfrucht, können dieser Arten aber auch von Weizenpflanzen isoliert werden. Über die Toxizität von Fusaproliferin ist wenig bekannt. Es hat phytotoxische Eigenschaften in Mais und wirkt in Hühnerembryos teratogen. In Versuchen mit Salinenkrebse (*Artemia salina*) zeigte Fusaproliferin eine vergleichbar hohe Toxizität wie Aflatoxin B1 (LOGRIECO, 1996; SCHMIDT, 1989; NADUBINSKA *et al.* 2003). Beauvericin (BEA) und Enniatine sind zyklische Hexadepsipeptide. Das Mykotoxin BEA wurde zum ersten Mal aus dem insektenpathogenen Pilz *Beauverina bassiana* isoliert (HAMILL *et al.*, 1969). Die Enniatine lassen sich unterteilen in Enniatin A, Enniatin A1, Enniatin B und Enniatin B1 (JESTOI, 2008). Sie wurden von GÄUMANN *et al.* (1947) aus einer Kultur von *Fusarium orthoceras* var. *Enniatum* (später umbenannt in *F. oxysporum*) isoliert. Die Biosynthesepfade von BEA und der Enniatine sind sehr ähnlich. Sie werden vor allem von *F. avenaceum* und *F. tricinctum* gebildet. Für BEA ist zusätzlich *F. poae* als Produzent bekannt. Dies wird auch für die Enniatine vermutet, jedoch wurden hier nur einige Isolate von *F. poae* gefunden, die anscheinend über diese Fähigkeit verfügen (JESTOI, 2008). Bei *In vitro*-Tests wurden sowohl für BEA als auch für die Enniatine antibiotische, insektizide, phytotoxische und zytotoxische Wirkungen festgestellt. Für Enniatin B wurden starke zytotoxische Effekte bei Tumorzelllinien beschrieben. Enniatine und BEA verfügen über lipophile Eigenschaften und stehen daher im Verdacht sich in Gewebe zu akkumulieren (JESTOI, 2008; FÖLLMANN *et al.*, 2009). Für die Mykotoxine DON, ZEA, FB1 und FB2 wurden von der Europäischen Gemeinschaft Höchstgehalte für verschiedene Lebensmittelerzeugnisse festgelegt (Tab. 3; ANONYM, 2005). Die Einhaltung der Höchstmengen wird überprüft. Lebensmittelerzeugnisse, die die Höchstgehalte überschreiten dürfen nicht vermarktet werden. Belastetes Erntegut darf nicht mit weniger belastetem oder nicht belastetem verschnitten werden (ANONYM, 2001 & 2005).

Arten der Gattung *Fusarium* können eine innerartliche genetische Diversität aufweisen, die Auswirkungen auf Aggressivität und Mykotoxinbildung hat. So fanden CUMAGUN & MIEDANER (2004) unter 153 Nachkommen einer Kreuzung zweier *Gibberella zeae*-Isolate (anamorph: *F. graminearum*) signifikante Unterschiede in Aggressivität und DON-Produktion. Ein anderer Aspekt der genetischen Diversität ist die Produktion unterschiedlicher Mykotoxine durch Isolate einer Art. Bekanntestes Beispiel sind die

Chemotypen von *F. culmorum* und *F. graminearum*. Für beide Arten sind NIV- und DON-Chemotypen bekannt, die jeweils entweder NIV oder DON produzieren. Für einige wenige Isolate ist auch die Produktion beider Mykotoxine beschrieben (DESJARDINS, 2006; NICHOLSON *et al.*, 2007).

Tab. 3: Erlaubte Höchstgehalte für die *Fusarium*-Mykotoxine Deoxynivalenol, Zearalenon und Fumonisin B1 bzw. B2 in verschiedenen Lebensmittelerzeugnissen, Auszug aus der EG-Verordnung 856/2005 (ANONYM, 2005)

Mykotoxin	Erzeugnis	Höchstgehalt [ng g ⁻¹]
Deoxynivalenol	Andere unverarbeitete Getreide als Hartweizen, Hafer und Mais	1250
	Unverarbeiteter Hartweizen, Hafer und Mais	1750
	Getreidemehl einschließlich Maismehl, Maisgrits und Maisschrot, Teigwaren (trocken)	750
	Brot, Feine Backwaren, Kekse, Frühstückscerealien	500
	Getreidebeikost und andere Beikost für Säuglinge und Kleinkinder	200
Zearalenon	Andere unverarbeitete Getreide als Mais	100
	Unverarbeiteter Mais, Maismehl, Maisschrot, Maisgrits und raffiniertes Maisöl	200
	Brot, Feine Backwaren, Kekse, Getreide-Snacks	50
	Getreidebeikost für Säuglinge und Kleinkinder aus Mais (Höchstgehalt bezogen auf die Trockenmasse)	20
Summe der Fumonisine B1 und B2	Unverarbeiteter Mais	2000
	Maisgrits, Maisschrot und Maismehl	1000
	Andere Lebensmittel aus Mais zum unmittelbaren Verzehr	400
	Getreidebeikost aus Mais und andere Beikost für Säuglinge und Kleinkinder	200

Das Management der partiellen Taubähigkeit ist schwierig und verlangt einen integrierten Ansatz. Eine der wichtigsten Maßnahmen ist der Anbau resistenter Sorten. Keine der in Deutschland verfügbaren Sorten weist jedoch eine vollständige Resistenz gegenüber *Fusarium* spp. auf, so dass dies alleine keinen Schutz vor Infektion und daraus resultierender Mykotoxinbelastung bieten kann (LIENEMANN, 2002; RODEMANN, 2004). Hauptinokulumquelle für *Fusarium* spp. sind die Erntereste der Vorfrucht. Eine weite

Fruchtfolge mit möglichst wenigen anfälligen Wirten wäre aus epidemiologischer Sicht wünschenswert (SUTTON, 1982). Dies ist aber aus ökonomischen Gründen für den Landwirt kaum durchführbar. So folgt in vielen Felderfolgen Weizen auf Mais oder Gerste, was zu einem hohen Angebot an Inokulum führt. Eine Entfernung der Ernterückstände von der Bodenoberfläche durch wendende Bodenbearbeitung ist eine Möglichkeit das Inokulumpotenzial zu verringern. So zeigten OBST *et al.* (1997), dass wendende Bodenbearbeitung, im Vergleich zu reduzierter Bodenbearbeitung, den DON-Gehalt des nachfolgenden Getreides um den Faktor 10 senken kann. In vielen Weizenanbaugebieten, besonders in niederschlagsärmeren Regionen, geht der Trend aufgrund verschiedener Vorteile jedoch hin zur reduzierten Bodenbearbeitung, was zu einem höheren Risiko durch eine *Fusarium*-Infektion und Mykotoxinkontamination führt. Eine direkte Bekämpfungsmöglichkeit stellt der Einsatz von Fungiziden dar. Besonders wirksam sind hier die Azole mit den Wirkstoffen Metconazol und Tebuconazol (MIELKE & WEINERT, 1996; PIRGOZLIEV *et al.*, 2003). Die Applikation des Fungizids muss von kurz vor bis kurz nach der Blüte stattfinden um eine Wirkung zu erzielen. Das schwierige Timing sowie die oft nicht vollständige Abtötung aller Sporen führen zu Wirkungsgraden einer Fungizidapplikation von nur ca. 70 %. Weiterhin kann eine nicht vollständige Abtötung von Sporen und Myzel die Mykotoxinproduktion sogar noch erhöhen (D'MELLO *et al.*, 1998; SIMPSON *et al.*, 2002). Es zeigt sich also, dass eine vollständige Kontrolle der partiellen Taubährigkeit und der daraus resultierenden Mykotoxinbelastung des Ernteguts nicht möglich ist. Zur Einhaltung der Grenzwerte ist ein integrierter Ansatz notwendig, aber auch damit kann, unter widrigen Bedingungen, die Mykotoxinhöchstgrenze nicht sicher unterschritten werden.

Prognosemodelle eröffnen die Möglichkeit schon vor der Ernte das Risiko einer *Fusarium*-Epidemie abschätzen zu können. Auf Basis eines Regressionsmodells analysierten VIGIER *et al.* (1997) die Entwicklung der Kolbenfäule an Mais durch *F. graminearum* und *F. subglutinans*. HOOKER *et al.* (2002) entwickelten in Ontario ein Prognosesysteme für die Höhe der DON-Kontamination in Weizen. Ähnliches versuchten DE WOLF *et al.* (2003) in Ohio. Die Vorhersagegenauigkeit für eine *Fusarium*-Epidemie und die Höhe der DON-Kontamination lag dabei zwischen 62 % und 85 %. All diesen Modellen ist gemeinsam, dass sie für die Prognose Wetterdaten verwenden, da das Wetter einen erheblichen Einfluss auf die Entwicklung von *Fusarium* spp. und die Pathogenese hat. Gleichzeitig ist die Witterung innerhalb einer Region aber ähnlich und wird auch nur an wenigen Punkten, beispielsweise offiziellen Wetterstationen, erfasst, so dass ein Bezug auf einzelne Schläge mit diesen Modellen kaum möglich ist. WILHELM & JONES (2005) zeigten, dass die Befallssituation in

benachbarten Schlägen durchaus völlig verschieden sein kann und sich benachbarte Schläge kaum gegenseitig beeinflussen. Prognosemodelle, die auf Regionalebene arbeiten, scheinen also nicht geeignet zu sein, um die Befallssituation und somit die Mykotoxinbelastung von Chargen einzelner Schläge abschätzen zu können. Weiterhin zeigten XU *et al.* (2008) auch innerhalb eines Schlages eine große Variabilität hinsichtlich des Auftretens von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine. Das Auftreten der *Fusarium*-Arten ist anscheinend nicht unbedingt zufällig oder regelmäßig, sondern kann Aggregationen zeigen (SHAH & BERGSTROM, 2001; WILHELM & JONES, 2005; XU *et al.*, 2008). Für die Entwicklung von Prognosemodellen auf Bestandesebene und für das Monitoring von Befallssituation und Mykotoxinbelastung ist es daher notwendig, mehr über die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine in Weizenbeständen zu wissen.

Unabhängig von der Skalenebene gibt es für Pflanzenkrankheiten drei grundsätzliche Verteilungsmuster: zufällige Verteilung, regelmäßige Verteilung und aggregiertes Auftreten (POOLE, 1974). Der einfachste Fall ist die Zufallsverteilung. Diese ist besonders dort anzutreffen, wo die Pathogene im Saat- oder Pflanzgut vorhanden sind und kein Sekundärbefall stattfindet. Beispiele sind hier Brandkrankheiten, hervorgerufen durch Arten der Gattungen *Tilletia* und *Ustilago*, die Streifenkrankheit der Gerste (*Drechslera graminea*) sowie parasitäre Welken wie *Verticillium*- und *Fusarium*-Tracheomykosen (HOFFMANN *et al.*, 1976). Zufällige Verteilungen können aber auch durch Windverbreitung der Pathogene, wie z. B. Pilzsporen, entstehen (DEL PONTE *et al.*, 2003). Regelmäßige Verteilungen deuten bei Pflanzenkrankheiten auf eine Windverbreitung des Inokulums bei gleichzeitig hohem Angebot an Sporen vorrangig aus Quellen außerhalb des Feldes hin. Auch sehr gleichmäßige Entwicklungsbedingungen können regelmäßige Verteilungen fördern. Wichtigste Ursachen für das Auftreten von Aggregationen sind unterschiedliche Wirtseignung der Pflanze bedingt durch Standort, Attraktivität, Anfälligkeit oder Resistenz sowie die örtliche Vermehrung um primäre Befallsstellen herum (HOFFMANN *et al.*, 1976). So finden sich Aggregationen besonders bei Krankheiten, bei denen, ausgehend vom Erstbefall, Sekundärinfektionen erfolgen. Beispielhaft genannt seien hier die Roste der Gattungen *Puccinia* und *Uromyces* sowie die Fruchtkrankheitserreger der Gattungen *Venturia*, *Botrytis* und *Penicillium* (HOFFMANN *et al.*, 1976; AGRIOS, 2005). Auch bei monozyklischen Krankheiten können Aggregationen auftreten, wenn beispielsweise das Primärinokulum schon aggregiert vorliegt (SHAH & BERGSTROM, 2001; WILHELM & JONES, 2005). Die Ermittlung der Befallsstärke oder ähnlicher Befallparameter ist bei Aggregationen naturgemäß schwieriger als bei zufälligen oder regelmäßigen Verteilungen. Grundsätzlich muss der Probenumfang und die

beprobte Fläche beim Auftreten von Aggregationen wesentlich größer sein als bei zufälligen und regelmäßigen Verteilungen.

Ziel der Arbeit war es, die Grundlage für die Entwicklung von Monitoringstrategien und Prognosemodellen auf Bestandesebene zu schaffen. Dafür sollte die räumliche Verteilung verschiedener Befallsparameter von *Fusarium* spp. und die Belastung mit assoziierten Mykotoxinen untersucht werden. Ein Großteil der Versuche wurde auf rekultivierten Flächen, entstanden durch die Verkipfung von Braunkohletagebauen, durchgeführt. Es wurde vermutet, dass durch das relativ einheitliche Bodensubstrat (Lösslehm) der Einfluss des Bodens keine großen Variationen aufweisen würde und so die Auswertung räumlicher Verteilungen erleichtern würden. Untersuchungen auf der Regionalebene sollten Auskunft über die aktuelle Befallssituation im jeweiligen Jahr geben und die Frage klären, ob hinsichtlich des Artenspektrums und der Befallssituation Unterschiede zwischen rekultivierten und langjährig genutzten Flächen zu erwarten sind. Auf der Bestandesebene wurden Weizenschläge in einem Raster beprobt und der Befall mit *Fusarium* spp. bestimmt. Weiterhin wurde mit einer Multimykotoxinanalyse die Kontamination der Proben bestimmt. Hiermit konnten nicht nur die klassischen „Leittoxine“ DON, NIV und ZEA untersucht werden sondern auch weitere, bisher nur wenig untersuchte Mykotoxine. Für die Bestimmung des Befalls mit *Fusarium* spp. wurde neben der klassischen mikrobiologischen Isolierung der Pilze von den Körnern auch die pilzliche Biomasse mittels quantitativer PCR bestimmt. Eine Quantifizierung des Pilzes versprach einen besseren Einblick in die Epidemiologie und den Zusammenhang zwischen Auftreten des Pilzes und der Bildung von Mykotoxinen. Weiterhin sollte für *F. graminearum* untersucht werden, ob die bekannte genetische Diversität auch innerhalb eines Schlages auftritt, da dies einen großen Einfluss auf die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. und der assoziierten Mykotoxine haben kann.

2 Material und Methoden

2.1 Organismen

2.1.1 Pflanzen

Für die Untersuchungen wurden Proben von verschiedenen Sorten von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.) genommen. Diese unterschieden sich hinsichtlich ihrer Anfälligkeit gegenüber *Fusarium* spp. (Tab. 4).

Tab. 4: Anfälligkeit für *Fusarium* spp. der verwendeten Weizensorten in den Versuchsjahren 2006 und 2007 (ANONYM, 2009, Beschreibende Sortenliste)

Sorte	Anfälligkeit für <i>Fusarium</i> spp.
Dekan	5
Drifter	5
Tommi	5

2.1.2 Pilze

Für die Untersuchungen wurden Pilze der Gattung *Fusarium* von Weizenkörnern isoliert. Die Standards für die Quantitative TaqMan®-Real-time PCR wurden aus Isolaten aus der Sammlung des INRES-Phytomedizin hergestellt (Tab. 5).

Tab. 5: *Fusarium*-Isolate aus der Sammlung des INRES-Phytomedizin, die für die Herstellung von Standards für die quantitative TaqMan®-Real-time PCR verwendet wurden

Art	Bezeichnung des Isolats
<i>F. avenaceum</i>	AG30f
<i>F. culmorum</i>	AG6d
<i>F. graminearum</i>	AG32d
<i>F. poae</i>	AG32m

2.2 Versuchsflächen

Die Untersuchungen wurden mit Weizenproben von Praxisflächen aus der Region Aldenhoven (Niederrheinische Bucht) durchgeführt (Tab. 6). Die Böden unterschieden sich hinsichtlich ihrer Entstehung. Ein Teil der Böden war natürlich gewachsener Boden, ein anderer Teil Böden, die durch Verkippung von Braunkohletagebauen und anschließender landwirtschaftlicher Rekultivierung entstanden. Die rekultivierten Flächen wurden für die Untersuchungen ausgewählt, weil vermutet wurde, dass durch die Verkippung mit einheitlichem Lösslehmmaterial die Böden eine geringere Heterogenität als gewachsene Böden aufweisen und sich somit für epidemiologische Fragestellungen besonders gut eignen würden.

Tab. 6: Versuchsflächen der Jahre 2006 und 2007 mit Informationen zu Bodentyp, angebaute Sorte und Vorfrucht

Schlag	Jahr	Boden	Sorte	Vorfrucht
RB235	2006	Rekultiviert	Drifter	Weizen
RB104		Rekultiviert	Drifter	Weizen
K5		Rekultiviert	Dekan	Weizen
K7		Rekultiviert	Drifter	Weizen
K3		Rekultiviert	Dekan	Zuckerrübe
K1		Rekultiviert	Drifter	Zuckerrübe
M1		Parabraunerde	Dekan	Weizen
M2		Parabraunerde	Dekan	Weizen
R1	2007	Rekultiviert	Tommi	Luzerne
R2		Rekultiviert	Tommi	Weizen
R3		Rekultiviert	Tommi	Luzerne
R4		Rekultiviert	Tommi	Weizen
R5		Rekultiviert	Tommi	Luzerne
R6		Rekultiviert	Drifter	Stilllegung
R7		Rekultiviert	Drifter	Stilllegung
R8		Rekultiviert	Drifter	D. Weidelgras

2.3 Chemikalien und Verbrauchsmaterialien

Applied Biosystems (Foster City, USA)

TaqMan®-Sonden, TaqMan® Universal PCR-Mastermix, MicroAmp™ Fast Optical 96-Well Reaction Plate, MicroAmp™ Optical Adhesive Film

AppliChem GmbH (Gatersleben, Deutschland)

Ampicillin, Penicillin, Streptomycin, Chlortetracyclin, Chloramphenicol, Ethanol, Ethidiumbromid, Isopropanol, Natriumhypochlorid (NaOCl), TAE-Puffer

Axygen (Union City, USA)

0,5 ml Reaktionsgefäße, 0,2 ml thin-wall 8 strip PCR tube, 96 well PCR microplate, AxySeal™ Verschlussfilm

biomers.net GmbH (Ulm, Deutschland)

Oligonukleotide

CZT GmbH (Kriftel, Deutschland)

1,5 ml Autosampler Vials mit Schraubkappen

Eppendorf AG (Hamburg, Deutschland)

Reaktionsgefäße (1,5 ml, 2 ml, 15 ml und 50 ml)

Greiner Bio-One GmbH (Solingen, Deutschland)

Petrischalen (60 mm und 94 mm Durchmesser)

Invitrogen GmbH (Karlsruhe, Deutschland)

Lambda DNA

Merck KGaA (Darmstadt, Deutschland)

Czapek-Dox Agar, Potato dextrose Agar, Kupfersulfat (CuSO₄), Zinksulfat (ZnSO₄), Dicloran, Kaliumhydrogenphosphat (KH₂PO₄)

Promega GmbH (Mannheim, Deutschland)

Wizard® magnetic DNA purification system for food (enthält: Lysis Buffer A, Lysis Buffer B, Ribonuklease A, Precipitation Solution, MagneSil®), DNA Größenmarker (100 bp DNA ladder), GoTaq Polymerase, GoTaq Reaktionspuffer, Desoxyribonukleotidtriphosphate (dNTPs)

Qiagen GmbH (Hilden, Deutschland)

DNeasy plant mini kit (enthält: Buffer AP1, Buffer AP2, Buffer AP3/E, Buffer AW, Buffer AE, Ribonuklease A)

Roth GmbH (Karlsruhe, Deutschland)

Agar-Agar, Saccharose

Sigma-Aldrich (München, Deutschland)

Glukose, Kaliumnitrat (KNO₃), Kaliumchlorid (KCl), Agarose

Tab. 7: Oligonukleotide (Primer) für die artspezifische PCR und das Chemotyping

Primer Target	Primer Name	Sequenz (5' → 3')	Produktgröße (bp)	Quelle
<i>Fusarium</i> spp.	ITSF ITSR	AACTCCCAAACCCCTGTGAACATA TTTAACGGCGTGGCCGC	431	A
<i>F. acuminatum</i>	FAC-F FAC-R	GGGATATCGGGCCTCA GGGATATCGGCAAGATCG	602	B
<i>F. avenaceum</i>	FaF FaR	CAAGCATTGTCGCCACTCTC GTTTGGCTCTACCGGGACTG	920	C
<i>F. avenaceum</i>	JIA-F JIA-R	GCTAATTCTTAACTTACTAGGGGCC CTGTAATAGGTTATTTACATGGGCG	220	D
<i>F. crookwellense</i>	CroAF CroAR	CTCAGTGTCCACCGCGTTGCGRAG CTCAGTGTCCCAATCAAATAGTCC	842	E
<i>F. culmorum</i>	Fc01F Fc01R	ATGGTGAACCTCGTCGTGGC CCCTTCTTACGCCAATCTCG	570	F
<i>F. graminearum</i>	Fg16F Fg16R	CTCCGGATATGTTGCGTCAA GGTAGGTATCCGACATGGCAA	400-580	F
<i>F. graminearum</i>	Fg16NF Fg16NR	ACAGATGACAAGATTCAGGCACA TTCTTTGACATCTGTTCAACCCA	280	F
<i>F. poae</i>	Fp82F Fp82R	CAAGCAAACAGGCTCTTCACC TGTTCCACCTCAGTGACAGGTT	220	G
<i>F. proliferatum</i>	TH5F TH5R	GATAACGTCCAAGGCTACG GGGGTCGTTTCAGCTCAAGG	330	H
<i>F. subglutinans</i>	61-2F 61-2R	GGCCACTCAAGAGGCGAAAG GTCAGACCAGAGCAATGGGC	445	I
<i>F. verticillioides</i>	VER1 VER2	CTTCCTGCGATGTTTCTCC AATTGGCCATTGGTATTATATATCTA	578	J
tri5-Gen	Tox5F Tox5R	GCTGCTCATCACTTTGCTCAG CTGATCTGGTCACGCTCATC	658	K
NIV & DON	ToxP1 ToxP2	GCCGTGGGGRTAAAAGTCAAA TGACAAGTCCGGTCGCACTAGCA	300 (NIV) 360 (DON)	L
DON, High ¹	N1-2 N1-2R	CTTGTTAAGCTAAGCGTTTT AACCCTTTCCTATGTGTTA	200	M
DON, Low ¹	4056 3551	ATCCCTCAAAAAGTCCGCT ACTTTCCACCGAGTATTC	650	M
Chemotyp (tri3-Gen)	3CON 3NA 3D15A 3D3A	TGGCAAAGACTGGTTCAC GTGCACAGAATATACGAGC ACTGACCCAAGCTGCCATC CGCATTGGCTAACACATG	840 610 243	N
Chemotyp (tri12-Gen)	12CON 12NF 12-15F 12-3F	CATGAGCATGGTGATGTC TCTCCTCGTTGTATCTGG TACAGCGGTCGCAACTTC CTTTGGCAAGCCCGTGCA	840 670 410	N

¹ Unterscheidung von Isolaten, die große bzw. kleine Mengen DON bilden

A, BLUHM *et al.*, (2002); B, WILLIAMS *et al.*, (2002); C, DOOHAN *et al.*, (1998); E, YODER & CHRISTIANSON, (1998); F, NICHOLSON *et al.*, (1998); G, PARRY & NICHOLSON, (1996); H, WAALWIJK *et al.*, (2003); I, MÖLLER *et al.* (1999); J, MULE *et al.*, (2004); K, NIESSSEN & VOGEL, (1998); L, LI *et al.*, (2005); M, BAKAN *et al.*, (2002); N, STARKEY *et al.*, (2007); DON = Deoxynivalenol; NIV = Nivalenol

Tab. 8: Oligonukleotide (Primer) für die quantitative TaqMan® Real-time PCR

Primer Target	Primer Name	Sequenz (5' → 3')	Produktgröße (bp)	Quelle
<i>F. avenaceum</i>	avenaceum MGB-F avenaceum MGB-R avenaceum probe ¹	CCATCGCCGTGGCTTTC CAAGCCCACAGACACGTTGT ACGCAATTGACTATTGC	58	A
<i>F. culmorum</i>	culmorum MGB-F culmorum MGB-R culmorum probe ¹	TCACCCAAGACGGGAATGA GAACGCTGCCCTCAAGCTT CACTTGGATATATTTCC	60	A
<i>F. graminearum</i>	graminearum MGB-F graminearum MGB-R graminearum probe ¹	GGCGCTTCTCGTGAACACA TGGCTAAACAGCACGAATGC AGATATGTCTCTTCAAGTCT	94	A
<i>F. poae</i>	poae 1-F poae 1-R poae probe ¹	AAATCGGCGTATAGGGTTGAGATA GCTCACACAGAGTAACCGAAACCT CAAAATCACCCAACCGACCCTTTC	220	A

¹ Alle Sonden sind am 5'-Ende FAM-markiert. Der Quencher am 3'-Ende ist in allen Fällen ein Blackhole-Quencher; A, WAALWIJK *et al.*, (2004);

2.4 Geräte

eTrex H	GPS-Empfänger	Garmin GmbH, Gräfelfing, Deutschland
HI-204	GPS-Empfänger	Haicom, Taipei, Taiwan
EM38	Bodensonde	Geonics Ltd. Mississauga, Kanada
LD 350	Laborährendrescher	Wintersteiger, Ried, Österreich
Contador	Kornzählgerät	Pfeuffer GmbH, Kitzingen, Deutschland
ZM 1	Zentrifugalmühle	Retsch, Haan, Deutschland
Mikro-Dismembrator U	Schwingmühle	B.Braun, Melsungen, Deutschland
Milli-Q	Reinstwasseranlage	Millipore, Billerica, USA
ABI 7500 Fast	Real-time Thermocycler	Applied Biosystems, Foster City, USA
TGradient	Thermocycler	Biometra, Göttingen, Deutschland
Sub-Cell GT	Gelelektrophoresekammer	Bio Rad, München, Deutschland
NanoDrop 1000	Spektrophotometer	NanoDrop, Wilmington, USA
Finepix	Digitalkamera	Fuji

2.5 Isolierung und Kultivierung von *Fusarium*-Arten

2.5.1 Kulturmedien

Die folgenden Medien wurden zur Isolierung und Identifizierung von *Fusarium* spp. genutzt. Die Medien wurden bei 121°C und 1 bar Druck für 20 min autoklaviert und danach in Petrischalen mit 60 bzw. 94 mm Durchmesser ausgegossen.

Potato Dextrose Agar (PDA)

Potato Dextrose Agar	39,0 g
Aqua demin.	1 l

Synthetischer Nährstoffarmer Agar (SNA, nach NIRENBERG 1976)

KH ₂ PO ₄	1,0 g
KNO ₃	1,0 g
MgSO ₄	0,5 g
KCL	0,5 g
Glukose	0,2 g
Saccharose	0,2 g
Agar-Agar	20,0 g
Aqua demin.	1 l

Czapek-Dox Iprodion Dicloran Agar (CZID-Agar, ABILDGREN *et al.*, 1987)

Czapek-Dox Agar (Merck)	35,0 g
Agar-Agar	10,0 g
CuSO ₄	5 mg
ZnSO ₄	10 mg
Chloramphenicol	50 mg
Dicloran (0,2 % in Ethanol)	1 ml

Nach dem Autoklavieren wurde dem CZID-Agar nach Abkühlen auf ca. 55°C die Antibiotika und das Iprodion (Rovral®) zugegeben. Diese wurden zuerst in sterilem Aqua demin. gelöst.

Penicillin	50 mg
Streptomycin	50 mg
Tetracyclin	50 mg
Rovral© (50% Iprodion)	6 mg

Wasser-Agar (WA)

Agar-Agar	20,0 g
Aqua demin.	1 l

Carnation Leaf Agar (CLA, nach FISHER *et al.* 1982)

Junge Blätter von Landnelken (*Dianthus caryophyllus* L.) wurden in ca. 10 mm² große Stücke geschnitten und im Ofen für 3 Stunden bei 70°C getrocknet. Die getrockneten Blätter wurden nun entweder in Papierhandtücher und Alufolie eingepackt und autoklaviert (121°C, 1 bar, 20 min) oder für 5 min in 70% Ethanol desinfiziert und danach in einer Sterilbank getrocknet. Nach dem Trocknen wurden je ca. 10 Blattstücke auf eine Petrischale mit Wasser-Agar ausgelegt.

2.5.2 Isolierung von *Fusarium* spp. von Weizenkörnern

Weizenkörner wurden mit einer 1,3 %-igen NaOCl-Lösung für 2 min oberflächlich desinfiziert, anschließend für 2 x 2 min mit Aqua demin. gespült und auf sterilem Filterpapier in einer Petrischale getrocknet. Danach wurden sie auf CZID-Agar ausgelegt (7 Körner pro Petrischale). Die Platten wurden bei 20 ± 1°C für ca. 9 Tage inkubiert.

2.5.3 Identifizierung der *Fusarium*-Arten

Von Myzel, das nach dem Auswachsen nach morphologischen Kriterien (Farbe und Form des Myzels, Färbung des Agars) als Myzel von *Fusarium* spp. erkannt wurde, wurden auf PDA Hyphenspitzen-Isolate erstellt. Dazu wurde ein kleiner Teil des Myzels mit einer Impföse auf einer PDA-Platte ausgestrichen und davon nach 24 Stunden mit einer Impfnadel die Spitze einer einzelnen Hyphe entnommen. Diese wurde auf PDA und SNA überimpft und für 3 Wochen unter langwelligem UV-Licht bei 20 ± 1°C wachsen gelassen. Auf dem nährstoffarmen SNA bilden sich unter langwelligem UV-Licht artspezifische Konidien, die zur mikroskopischen Differenzierung der *Fusarium*-Arten nach LESLIE & SUMMERELL

(2006) genutzt wurden. Auf dem PDA bilden die *Fusarium*-Arten ein arttypisches Myzel und charakteristische Agarverfärbungen. Im Jahr 2007 wurde CLA anstatt SNA verwendet.

Sollte die Identifizierung der *Fusarium*-Isolate mittels einer PCR-Methode durchgeführt werden, so wurden die Hyphenspitzen nur auf PDA überimpft und für 2 Wochen bei $20 \pm 1^\circ\text{C}$ wachsen gelassen. Aus dem Myzel wurde die DNA extrahiert und damit die weiterführenden molekularbiologischen Untersuchungen durchgeführt.

2.6 Probenahme

2.6.1 Rasterbeprobung

Auf den Versuchsfeldern K5 und M1 wurden im Jahr 2006 und auf R1 und R8 im Jahr 2007 Rasterbeprobungen durchgeführt. Die Rasterweite betrug 20 m x 20 m. Die Beprobungspunkte wurden mit einem eTrex GPS-Empfänger eingemessen. Die Beprobung wurde ca. 1 Woche vor Erntebeginn durchgeführt. An jeden Probenahmepunkt wurden Weizenähren von ca. $0,25 \text{ m}^2$ abgeschnitten und in Papiertüten gesammelt. Nach der Beprobung wurden die Papiertüten mit den Ähren für einige Tage in einem Gewächshaus zum Nachtrocknen zwischengelagert. Die Ähren wurden dann mit einem Laborährendrescher LD 350 gedroschen und die Körner in Kunststoffbeutel gefüllt. Die Beutel wurden anschließend mit einem Folienschweißgerät evakuiert und verschweißt. Die Proben wurden bei $+4^\circ\text{C}$ gelagert

2.6.2 Probenahme von Mischproben

Von den Schlägen M1, M2, K1, K3, K5, K7, RB104 und RB 235 wurden im Jahr 2006 und von den Schlägen R1, R2, R3, R4, R5, R6, R7 und R8 im Jahr 2007 Mischproben genommen. Die Proben wurden im Abstand von ca. 20 m auf der Diagonalen genommen. Hierbei wurden an jeden Probenahmepunkt Ähren von ca. $0,25 \text{ m}^2$ abgeschnitten und in einer Papiertüte gesammelt. Alle Einzelproben von einem Feld wurden direkt nach der Beprobung zu einer Mischprobe zusammengeführt. Die weiteren Schritte der Probenaufbereitung wurden wie bei den Proben aus der Rasterbeprobung.

2.7 Erfassung von Standortfaktoren

2.7.1 Scheinbare elektrische Leitfähigkeit

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (apparent electric conductivity, ECa) des Bodens wurde mit einer EM38-Bodensonde bestimmt. Die EM38-Sonde besitzt eine Sende- und eine Empfangsspule. Die Sendespule induziert ein sekundäres elektrisches Feld im Boden, dessen Stärke von der Empfängerspule erfasst wird. Die EM38-Sonde liefert ca. 10 Messwerte pro Sekunde. Zusammen mit einem GPS-Empfänger wurde die EM38-Sonde auf einen Messschlitten montiert. Die Aufnahme des EM38-Signals und der Position erfolgte alle 2 Sekunden durch eine von HOFFMANN (2004) entwickelte Aufnahmesoftware für einen PDA. Die ECa wurde auf Transekten mit einem Abstand von 8 m erfasst. Die Auflösung innerhalb der Transekte beträgt bei einer durchschnittlichen Geschwindigkeit von 4 km h⁻¹ etwa 2,2 m. Dadurch wird eine Messdichte von etwa 600 Messpunkten pro ha erreicht.

2.7.2 Wetterdaten

Die Wetterdaten stammten vom Deutschen Wetterdienst. Die Klimadiagramme wurden aus dem an der Wetterstation Jülich erfassten Tagessmittel der Temperatur und der Tagesniederschlagsmenge für die Jahre 2006 und 2007 sowie für das langjährige Mittel (1976-1990) erstellt.

2.8 Molekularbiologische Methoden

2.8.1 DNA-Extraktion

Zur Bestimmung der pilzlichen Biomasse wurde die DNA direkt aus Pflanzenmaterial (Weizenkörnern) extrahiert. Hierfür wurden die Körner mit einer Zentrifugalmühle zunächst mehlfein vermahlen und dann 20 mg des Mehls in 2 ml Reaktionsgefäße eingewogen.

Zur Identifizierung mittels artspezifischer PCR und zur Erfassung des Chemotyps erfolgte die Extraktion der DNA aus reinen Pilzkulturen. Dazu wurde das Myzel mit einem sterilen Spatel von der Agar-Oberfläche gekratzt und in ein 2 ml Reaktionsgefäß überführt. Das Reaktionsgefäß mit dem Myzel wurde für 6 Stunden bei -80°C gekühlt und anschließend gefriergetrocknet. In das Reaktionsgefäß wurde dann eine Stahlkugel mit 2 mm Durchmesser gegeben und das Myzel für 1 min in einer Schwingmühle bei 2000 min⁻¹ gemahlen. Vom gemahlene Myzel wurden ca. 20 mg in neues 2 ml Reaktionsgefäß überführt.

2.8.1.1 Wizard magnetic DNA purification system for food

Die DNA-Extraktion mit dem Wizard magnetic DNA purification system for food (Promega, Deutschland) wurde mit einem modifizierten Protokoll durchgeführt:

1. Einwaage von 20 mg Ausgangsmaterial in einem 2 ml Reaktionsgefäß
2. Zugabe von 400 µl Lysis Buffer A und 4 µl RNase A, gut schütteln um alles Ausgangsmaterial zu lösen
3. Zugabe von 200 µl Lysis Buffer B, für 15 Sekunden auf Laborschüttler schütteln
4. 10 min Inkubation bei Raumtemperatur
5. Zugabe von 600 µl Precipitation Solution, gut vermischen
6. Für 10 min bei 14000 min⁻¹ zentrifugieren
7. Überstand (flüssige Phase) in ein neues 2 ml Reaktionsgefäß überführen
8. MagneSil® PMPs für ca. 1 min auf Laborschüttler schütteln um Lösung völlig zu resuspendieren
9. 50 µl MagneSil® PMPs zum Überstand hinzugeben, gut schütteln
10. 1000 µl Isopropanol hinzugeben und Reaktionsgefäß 15 mal über Kopf drehen um den Inhalt zu mischen.
11. Für 5 min bei Raumtemperatur inkubieren, zwischendurch mehrmals das Gefäß über Kopf drehen
12. Das Gefäß in den MagneSphere® Ständer stellen und 1 min warten, dann Gefäß ausschütten (Gefäß verbleibt dabei im Ständer)
13. Gefäß aus dem Ständer herausnehmen und 250 µl Lysis Buffer B hinzufügen, kurz schütteln, zurück in den Ständer stellen und 1 min warten, dann Gefäß ausschütten
14. 1 ml 70% Ethanol in Gefäß geben, Gefäß mehrmals im Ständer drehen und Gefäß dann ausschütten, diesen Schritt zweimal wiederholen
15. Reste von Ethanol vorsichtig mit einer Pipette entfernen während das Gefäß im Ständer ist, dabei MagneSil®-Pellet nicht berühren
16. Geöffnete Gefäß im Ständer für 15 min bei 65°C in einem Trockenschrank trocknen
17. Gefäß aus dem Ständer nehmen, 200 µl Reinstwasser hinzugeben und Pellet lösen und für 5 min bei 65°C inkubieren
18. Gefäß für 1 min in den Magnetständer stellen, dann Wasser mit Pipette in eine neues 500 µl Reaktionsgefäß überführen. Dabei Pellet nicht berühren.

2.8.1.2 DNeasy Plant Mini Kit

Die DNA-Extraktion mit dem DNeasy Plant Mini Kit (Qiagen, Deutschland) wurde mit einem modifizierten Protokoll durchgeführt:

1. Einwaage von 20 mg Ausgangsmaterial in einem 2 ml Reaktionsgefäß
2. 400 μ l Buffer AP1 und 4 μ l RNase A zugeben, gut schütteln um alles Ausgangsmaterial zu lösen
3. Für 60 min bei 65°C inkubieren, zwischendurch mehrmals aufschütteln
4. 130 μ l Buffer AP2 zugeben, mischen und 5 min auf Eis inkubieren
5. Für 10 min bei 14000 min^{-1} zentrifugieren
6. Lysat in ein QIAshredder Mini spin column (in einem 2 ml Reaktionsgefäß) pipettieren und für 2 min bei 14000 min^{-1} zentrifugieren
7. Durchfluss in ein neues 2 ml Reaktionsgefäß überführen
8. 1,5-faches Volumen von Buffer AP3/E hinzufügen und durch pipettieren mischen
9. 650 μ l der Lösung in DNeasy Mini spin column (in einem 2 ml Reaktionsgefäß) geben, 1 min bei 8000 min^{-1} zentrifugieren und Durchfluss verwerfen
10. Schritt 9 für den Rest der Lösung wiederholen
11. DNeasy Mini spin column in ein neues 2 ml Reaktionsgefäß platzieren, 500 μ l Buffer AW hinzugeben und für 1 min bei 8000 min^{-1} zentrifugieren, Durchfluss verwerfen
12. 500 μ l Buffer AW hinzugeben und für 1 min bei 14000 min^{-1} zentrifugieren, Durchfluss verwerfen
13. DNeasy Mini spin column in ein neues 1,5 ml Reaktionsgefäß platzieren
14. 100 μ l Buffer AE auf die Membran pipettieren, für 5 min bei Raumtemperatur inkubieren, für 1 min bei 8000 min^{-1} zentrifugieren
15. Schritt 14 wiederholen

2.8.2 Bestimmung der DNA-Konzentration

Für die artspezifische PCR und die Chemotypisierung wurde die DNA-Lösung auf eine Konzentration von $10 \text{ ng } \mu\text{l}^{-1}$ eingestellt.

2.8.2.1 Spektrophotometrie

Die spektrophotometrische Bestimmung der DNA-Konzentration wurde mit einem NanoDrop 1000 Spektrophotometer (NanoDrop products, Wilmington, USA) durchgeführt. Hierzu wurden $2 \mu\text{l}$ der DNA-Lösung in dreifacher Wiederholung gemessen und aus den Messwerten das arithmetische Mittel gebildet.

2.8.2.2 Agarose-Gel Assay

$10 \mu\text{l}$ der DNA-Lösung wurden mit $2 \mu\text{l}$ Ladepuffer gemischt und auf einem 2% Agarosegel bei 100 V für 60 Min laufen gelassen. Als Mengenstandards lief Lambda-DNA in 5 Konzentrationen mit ($1, 5, 10, 25$ und $50 \text{ ng } \mu\text{l}^{-1}$). Dem Agarosegel war $2 \mu\text{l}$ 1%-Ethidiumbromidlösung je 100 ml Gel zugesetzt. Unter UV-Beleuchtung wurden mit einer Fuji-Finepix-Digitalkamera Bilder vom fertigen Gel gemacht.

2.8.3 Polymerase-Kettenreaktion (PCR)

Für die Untersuchungen wurden verschiedene PCR-Methoden eingesetzt. Die Identifizierung der *Fusarium*-Arten erfolgte über eine PCR mit genus- und artspezifischen Primern, wobei mehrere Primersysteme zu Multiplex-PCRs zusammengesetzt wurden (2.8.3.1). Die Bestimmung der pilzlichen Biomasse erfolgte über eine quantitative Echtzeit-Detektions PCR (Real-time PCR) basierend auf dem TaqMan®-System (2.8.3.2). Zur Erfassung des Chemotyps und der genetischen Diversität von *F. graminearum*-Isolaten wurden in einer Standard PCR-Methode chemotypspezifische Primer eingesetzt um zwischen den verschiedenen Nivalenol- und Deoxynivalenol-Chemotypen zu differenzieren sowie ein Primersystem, mit dem anhand einer Größenvariation des PCR-Produkts auf genetische Diversität innerhalb der Art geschlossen werden konnte (2.8.3.3).

2.8.3.1 Artspezifische Multiplex-PCR

Die molekularbiologische Identifizierung von *Fusarium*-Arten wurde sukzessive anhand von zwei Multiplex-PCRs sowie mehrerer Singleplex-PCRs durchgeführt. In der ersten Multiplex-PCR wurden die Primerpaare ITSF/ITSR und Tox5F/Tox5R genutzt um zu

bestimmen ob das Isolat zur Gattung *Fusarium* gehört und ob es sich um einen Trichothecenbildner handelt. In der zweiten Multiplex wurden die Primerpaare FaF/FaR, Fc01F/Fc01R, Fg16NF/Fg16NR, Fp82F/Fp82R, Cro-AF/Cro-AR, TH5F/TH5R verwendet um eine artspezifische Identifikation durchzuführen. Wurde in der zweiten Multiplex-PCR kein eindeutiges Ergebnis erzielt so kamen zur genaueren Bestimmung die Primerpaare 61-2F/61-2R und VER1/VER2 jeweils in einer Singleplex-PCR zum Einsatz. Wurde in der zweiten Multiplex-PCR ein Isolat als *F. avenaceum* identifiziert so wurden zwei weitere Singleplex-PCRs mit den Primerpaaren JIA-F/JIA-R und FAC-F/FAC-R durchgeführt, da das Primerpaar FaF/FaR eine leichte Kreuzspezifität mit *F. acuminatum* aufweist. Konnte das Isolat durch die artspezifische PCR nicht identifiziert werden, wurde eine morphologische Bestimmung durchgeführt.

Die Reaktionen wurden in 10 µl Volumen durchgeführt. Der Reaktionsansatz für alle Reaktionen enthielt je 0,2 µM von jeden Forward- und Reverse-Primer, 100 µM je dNTP, 1,5 mM MgCl₂ und 1 U Taq Polymerase. Es wurde jeweils 1 µl DNA-Lösung (10 ng µl⁻¹) verwendet. Die Reaktionen wurden in einem Biometra TGradient Thermocycler durchgeführt. Das Thermocycler-Programm war wie folgt: 95°C für 5 min, 5 Zyklen mit 95°C für 30 s, 64°C für 30 s und 72°C für 1 min, 5 Zyklen mit 95°C für 30 s, 62°C für 30 s und 72°C für 1 min, 25 Zyklen mit 95°C für 30 s, 60°C für 30 s, 72°C für 1 min gefolgt von einem finalen Extensionsschritt mit 72°C für 10 min. Danach wurde der Reaktionsansatz auf 10°C heruntergekühlt.

Nach der PCR wurde ein 1,3 %-Agarose Gel hergestellt (1,3 g Agarose auf 100 ml TAE-Puffer plus 2 µl 10%-Ethidiumbromid) Die Reaktionsansätze wurden vollständig auf das Gel geladen und für 60 min bei 160 V elektrophoretisch aufgetrennt. Die Auswertung erfolgte auf einem UV-Schirm mit einer Fuji-Finepix-Digitalkamera.

2.8.3.2 Quantitative TaqMan®-Real-time PCR

Für die absolute Quantifizierung wurden zunächst DNA-Mengenstandards hergestellt. Dafür wurde aus Myzel der Isolate AG30f, AG6d, AG32d und AG32m die DNA mit dem Wizard® magnetic DNA purification system for food extrahiert, die Konzentration mittels Agarose-Gel-Assay und Spektrophotometrie bestimmt und je eine Verdünnungsreihe (9000 pg µl⁻¹, 900 pg µl⁻¹, 90 pg µl⁻¹ und 9 pg µl⁻¹) hergestellt und 2 µl je Standard davon in der Real-time-PCR verwendet.

Die Real-time PCR-Reaktionen wurden in 30 µl Volumen durchgeführt. Die Reaktionsansätze enthielten 15 µl TaqMan® Universal PCR-Mastermix (Applied

Biosystems), jeweils 333nM von Forward- und Reverse-Primer, 167nM TaqMan®-Sonde, 10,5 µl Aqua demin. und 2 µl DNA-Lösung. Die Reaktionen wurden in einem ABI 7500 Fast Real-time Thermocycler (Applied Biosystems) im Standard-Modus durchgeführt. Dabei wurden Reaktionsplatten mit 96 Kavitäten (Applied Biosystems) verwendet. Das Thermocycler-Programm war wie folgt: 50°C für 2 min zum Verdau Uracil-haltiger DNA, 95°C für 10 min zur Inaktivierung der Uracil-N-Glykosidase und zur initialen DNA-Denaturierung, gefolgt von 40 Zyklen mit 95°C für 15 s und 60° für 1 min.

2.8.3.3 Chemotyping und Abschätzung der genetischen Diversität

Für die Bestimmung des Chemotyps wurde zunächst mit den Primerpaaren Fg16NF/Fg16NR und Tox5F/Tox5R überprüft ob es sich um Isolate von *F. graminearum* handelte, die in der Lage waren Mykotoxine zu bilden. In einem weiteren Schritt wurde mit dem Primerpaar ToxP1/ToxP2 getestet, ob das Isolat vom NIV- oder vom DON-Chemotyp war. Die Primersysteme 3CON/3NA/3D15A/3D3A und 12CON/12NF/12-15F/12-3F wurden dazu eingesetzt um bei DON-Chemotypen weiter zu differenzieren zwischen dem 3AcDON-Typ und dem 15AcDON-Typ. Mit den Primerpaaren N1-2/N1-2R und 4056/3551 wurde untersucht ob es sich um einen starken oder schwachen DON-Bildner handelte. Eine PCR mit dem Primersystem Fg16F/Fg16R gab Aufschluss über die Anzahl der Wiederholungen eines 30 bp großen Sequenzmotivs und damit über die genetische Diversität der *F. graminearum*-Isolate.

Die Reaktionsansätze wurden wie für die artspezifische Multiplex-PCR hergestellt. Das Thermocycler-Programm war ebenfalls identisch nur für die Primersysteme 3CON/3NA/3D15A/3D3A und 12CON/12NF/12-15F/12-3F wurde ein anderes Programm verwendet: 95°C für 5 min, 35 Zyklen mit 95°C für 30 s, 57°C für 1 min und 72°C für 1 min, gefolgt von einem finalen Extensionsschritt mit 72°C für 10 min. Danach wurde der Reaktionsansatz auf 10°C heruntergekühlt.

Die PCR-Ansätze wurden auf einem 2 %-Agarose-Gel (2 g Agarose auf 100 ml TAE-Puffer plus 2 µl 10%-Ethidiumbromid) für 90 min bei 110 V elektrophoretisch aufgetrennt. Die Auswertung erfolgte auf einem UV-Schirm mit einer Fuji-Finepix-Digitalkamera.

2.9 Mykotoxin-Analyse

2.9.1 Probenahme

Für die Mykotoxinanalyse wurde das Mehl der Kornproben verwendet (s. 2.5.1). Dabei wurden zweimal 250 mg in 1,5 ml Autosampler Vials eingewogen.

2.9.2 Multimykotoxin-Analyse

Die Multimykotoxinanalyse wurde nach einer LC-ESI/MS-Methode von HEREBIAN et al. (2009) am Institut für Umweltforschung (INFU) der Universität Dortmund durchgeführt. Hiermit konnten 32 Mykotoxine nachgewiesen werden (Tab. 9)

Tab. 9: Mykotoxine die mit der Multimykotoxinanalyse nachgewiesen werden können sowie Nachweisgrenzen (nach HEREBIAN et al., 2009)

Mykotoxin	Nachweisgrenze [ng g ⁻¹]
Moniliformin	1
Nivalenol	4
Deoxynivalenol	10
3-Acetyldeoxynivalenol	10
Fusarenon-X	10
Gibberillinsäure	10
Altenuen	1
Alternariol	1
Alternariolmethylether	1
Zearalenon	4
α -Zearalenol	4
Patulin	800
Citrinin	10
Neosolaniol	15
15-Acetyldeoxynivalenol	10
Monoacetoxyscirpenol	10
Diacetoxyscirpenol	10
Ergotamin	1

Fortsetzung Tab. 9:

Mykotoxin	Nachweisgrenze [ng g ⁻¹]
Ergocornin	0,5
Aflatoxin G1	1
Aflatoxin G2	10
Aflatoxin B1	0,5
Aflatoxin B2	30
Ochratoxin A	4
Ochratoxin B	1
Fumonisin B1	35
Fumonisin B2	30
Enniatin B	0,5
Beauvericin	0,5
Verrucarin	1
T2-Toxin	1
HT2-Toxin	8

2.10 Computergestützte Datenanalyse

2.10.1 Statistische Auswertung

Um die Stärke einer Beziehung zweier Variablen zu bestimmen, wurde der Korrelationskoeffizient nach Pearson mit dem Programm Microsoft Excel© 2002 berechnet. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten betragen in diesem Testverfahren $\alpha = 0,05$, $\alpha = 0,01$ und $\alpha = 0,001$.

2.10.2 Analyse der räumlichen Verteilung

Die räumliche Analyse der Daten, in diesem Fall eine Aggregationsanalyse, wurde mit dem Softwaretool SADIE durchgeführt (PERRY, 1995; PERRY et al., 1996; PERRY et al., 1999). SADIE steht für Spatial Analysis by Distance Indices. Dieses Tool wird zur Beurteilung der Verteilung zweidimensional georeferenzierter Daten eingesetzt. Zunächst wird mittels eines Transportalgorithmus die minimale Distanz berechnet, die nötig wäre, um eine regelmäßige Verteilung der Messwerte zu erreichen (Distanz zur regelmäßigen Verteilung = D_{obs}). Mit dem Versuchsdatensatz werden nun einige tausend Permutationen

durchgeführt, die Distanz zur regelmäßigen Verteilung jeder Permutation errechnet und dann gemittelt (D_{exp}). Der Quotient von D_{obs} und D_{exp} ergibt den sogenannten Aggregationsindex (I_a). Der Aggregationsindex ist dimensionslos und gibt den Grad der Aggregation an. Ein Aggregationsindex um 1 bedeutet eine Verteilung ähnlich einer zufälligen Verteilung. Ein Aggregationsindex kleiner 1 weist auf eine Verteilung hin, die regelmäßiger ist, als dies von einer zufälligen Verteilung erwartet würde. Erreicht der Aggregationsindex Werte größer 1, so bedeutet dies, dass die Messwerte eine größere Aggregation zeigen, als man dies von einer zufälligen Verteilung erwarten würde. Die Aggregationsindizes verschiedener Datensätze lassen sich direkt miteinander vergleichen. SADIE errechnet für den Aggregationsindex die Wahrscheinlichkeit p_a mit der dieser von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden ist.

Ein weiterer Index, der von SADIE berechnet wird, ist der sogenannte Clusterindex. Hierbei wird im Gegensatz zum Aggregationsindex nicht ein Indexwert für den gesamten Datensatz berechnet sondern ein Wert für jeden Messpunkt. Der Clusterindex zeigt die Zugehörigkeit eines Messpunktes zu einem Cluster an. Cluster sind Aggregationen von Messwerten ähnlicher Größe. Es wird zwischen zwei Typen von Clustern unterschieden: ein Gap-Cluster beinhaltet kleine Messwerte oder Nullwerte, ein Patch-Cluster große Messwerte. Je ähnlicher die Messwerte, die einen bestimmten Messpunkt umgeben, diesem sind, desto höher der Clusterindex dieses Messpunktes. Ein Messpunkt der Teil eines Patch-Cluster ist, hat einen Clusterindex größer 1. Dasselbe gilt für einen Messpunkt der Teil eines Gap-Cluster ist. Hier werden jedoch per definitionem negative Vorzeichen vergeben, um Patch- und Gap-Cluster unterscheiden zu können. Clusterindizes zwischen 1 und -1 bedeuten, dass ein Messpunkt keinem Cluster zugeordnet werden kann. Die Zugehörigkeit zu einem Cluster bedeutet jedoch noch nicht, dass eine statistisch signifikante Aggregation vorliegt. Wurde mit dem Aggregationsindex eine Aggregation festgestellt, so können anhand des Clusterindex die Aggregationszonen identifiziert werden. Gap-Cluster werden in Blau dargestellt und Patch-Cluster in Rot.

2.10.3 Geostatistische Datenverarbeitung

Die geostatistische Datenverarbeitung erfolgte mit dem Geoinformationssystem ArcGIS Editor 9.2 (ESRI Deutschland GmbH, Kranzberg). Für Kriging wurde das ESRI Zusatzprogramm 'Geostatistical Analyst' verwendet.

3 Ergebnisse

In der vorliegenden Arbeit sollte auf verschiedenen Skalenebenen das Artenspektrum sowie die räumliche Verteilung des Auftretens von *Fusarium* spp. und der daraus resultierenden Mykotoxinbelastung untersucht werden. Weiterhin lag das Augenmerk auf dem Zusammenhang des Befalls durch *Fusarium* spp. und der Mykotoxinbelastung. Zusätzlich sollte auch der Frage nachgegangen werden, ob Pathogene einer Art auch innerhalb eines Schlages eine genetische Diversität aufweisen können.

Die Untersuchungen wurden in den Jahren 2006 und 2007 auf regionaler Ebene und Bestandesebene durchgeführt. Zum Vergleich dienten einige Weizenproben überregionaler Herkunft. Es wurde davon ausgegangen, dass der Boden eine wichtige Rolle für die Ausbreitung und Entwicklung der Krankheit spielt. Daher wurde ein Großteil der Untersuchungen auf rekultiviertem Neuland durchgeführt, da angenommen werden kann, dass Neulandflächen über ein homogeneres Bodensubstrat verfügen und somit der Einfluss des Faktors Boden weitgehend ausgeschlossen werden konnte.

3.1 Räumliches Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine auf regionaler Ebene

Mit diesen Untersuchungen sollte der Frage nachgegangen werden, inwieweit Unterschiede und Variationen im Artenspektrum und der Befallssituation von *Fusarium* spp. innerhalb einer Region auftreten. Weiterhin sollte überprüft werden, ob sich das Artenspektrum von Schlägen auf rekultivierten Flächen vom dem auf langjährig bewirtschafteten Flächen unterscheidet. Dazu wurden in den Jahren 2006 und 2007 je acht Weizenschläge in der Region Aldenhoven beprobt. Im Jahr 2006 wurden zusätzlich Proben von drei italienischen Weizenfeldern aus der Region Ligurien in Norditalien ausgewertet. Innerhalb einer Region lagen die Weizenfelder in einem Abstand zwischen 100 m und 10 km zueinander.

Von allen Schlägen wurden Mischproben von Körnern genommen und hinsichtlich des Artenspektrums und der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. untersucht. Für die Proben aus Deutschland wurde in den Jahren 2006 und 2007 zusätzlich die Intensität des Kornbefalls mit *Fusarium* spp. erfasst und im Jahr 2007 die Belastung mit Mykotoxinen. Von den acht Schlägen des Jahres 2006 aus Deutschland befanden sich sechs auf rekultiviertem Neuland und zwei auf langjährig bewirtschafteten Ackerflächen. Die Proben aus Italien stammten ausschließlich von langjährig bewirtschafteten Schlägen, während sich die Probeflächen des

Jahres 2007 in Deutschland ausschließlich auf Neuland-Schlägen befanden. Im Zuge dieser Untersuchungen wurde auch der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und -intensität mit *Fusarium* spp. und der Mykotoxinbelastung auf regionaler Ebene analysiert.

Die Tagessumme der Niederschlagshöhe und das Tagesmittel der Temperatur wurden im Versuchsgebiet Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007 in der für die Infektion durch *Fusarium* spp. und der Krankheitsentwicklung wichtigen Phase von April bis August ausgewertet und mit dem langjährigen Mittel verglichen. Dafür wurden die Wetterdaten der Wetterstation Jülich des Deutschen Wetterdienstes verwendet.

3.1.1 Witterung in der Region Aldenhoven im Jahr 2006

Im Jahr 2006 waren die Monate April bis Juli im Vergleich zum langjährigen Mittel überdurchschnittlich warm (Abb. 1). Im April und Mai wurden große Niederschlagsmengen aufgezeichnet mit einem Starkregenereignis am 25.04.2006. Auffällig war ein starker Temperaturanstieg von Anfang bis Mitte Juni. In dieser Zeit fiel kein Niederschlag.

Von Mitte Juni bis Ende Juli hielt sich die Temperatur auf einem hohen Niveau. Die Durchschnittstemperatur im Juli 2006 lag ca. 5°C höher als das langjährige Mittel. Die Niederschlagshöhe im Juni und Juli 2006 war etwas niedriger als im langjährigen Mittel jedoch fiel 85 % des gesamten Niederschlages an vier Tagen. Dem heißen Juli folgte ein eher kühler und niederschlagsreicher August.

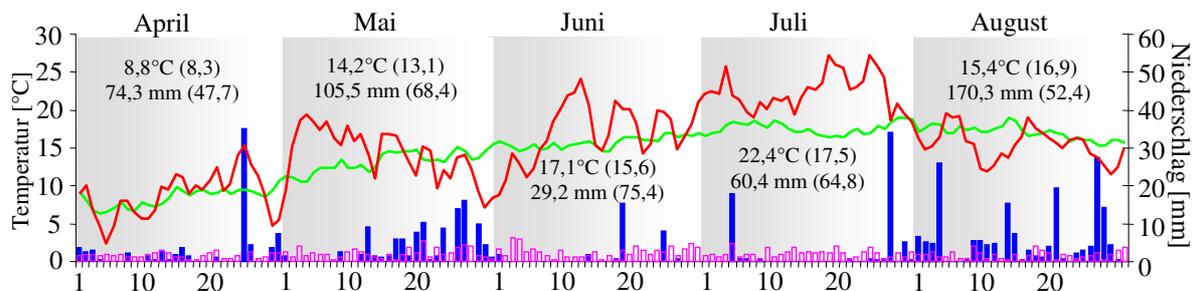


Abb. 1: Tagesdurchschnittstemperatur (DT) und Tagesniederschlagssumme (NS) des Jahr 2006 und langjähriges Mittel (1976-1990) an der Wetterstation Jülich (Deutscher Wetterdienst); rote Linie = DT 2006; grüne Linie = DT langjähriges Mittel; blaue Säulen = NS 2006; violette Säulen = NS langjähriges Mittel; Monatsdurchschnittstemperatur und Monatsniederschlagssumme im Diagramm angegeben (langjähriges Mittel in Klammern)

3.1.2 Befallssituation in der Region Aldenhoven im Jahr 2006

Im Jahr 2006 konnten in der Region Aldenhoven die Arten *Fusarium avenaceum*, *F. culmorum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. proliferatum* und *F. tricinctum* von Weizenkörnern isoliert werden. Die durchschnittliche Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. lag bei 7,2 %

(Abb. 2). Dominierende Art war *F. avenaceum* mit 3,4 % gefolgt von *F. poae* mit 1,6 %. Die Arten *F. culmorum* (0,3 %), *F. graminearum* (0,8 %), *F. proliferatum* (0,6 %) und *F. tricinctum* (0,5 %) lagen auf einem niedrigeren Niveau. *F. proliferatum* und *F. tricinctum* konnten nur im Jahr 2006 nachgewiesen werden.

Die Intensität des Kornbefalls lag im Jahr 2006 im Durchschnitt bei 68 pg mg^{-1} (Abb. 3). Die höchsten Befallsintensitäten wurden mit 18 pg mg^{-1} und 48 pg mg^{-1} für die Arten *F. avenaceum* und *F. poae* nachgewiesen. Wie auch bei der Befallshäufigkeit waren diese Arten bei der Intensität des Kornbefalls vorherrschend.

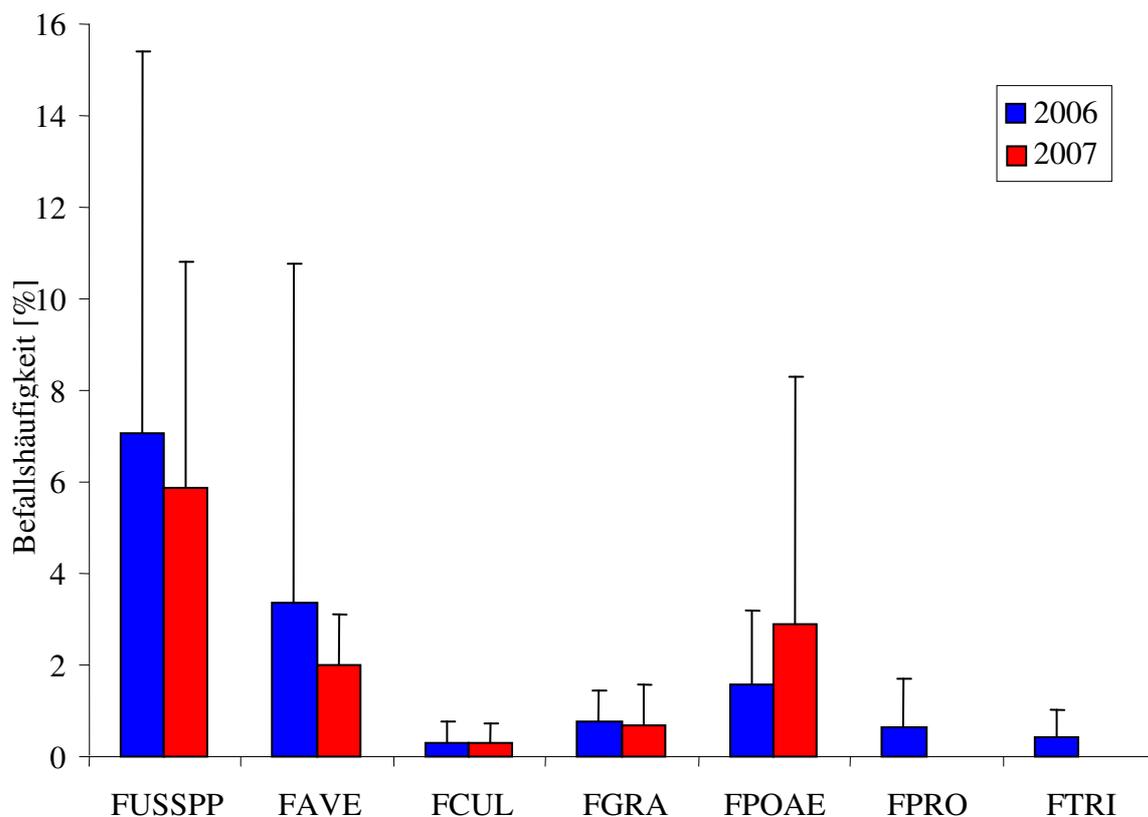


Abb. 2: Häufigkeit des Befalls von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. auf den Versuchsschlägen in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007; die Standardabweichung ist dargestellt.

F. culmorum und *F. graminearum* spielten mit 2 pg mg^{-1} bzw. $0,6 \text{ pg mg}^{-1}$ auch hier nur eine untergeordnete Rolle. Eine Bestimmung der Intensität des Kornbefalls konnte für die Arten *F. proliferatum* und *F. tricinctum* nicht durchgeführt werden, da keine entsprechende Messmethode zur Verfügung stand.

In den Abbildungen 4 und 5 ist die Häufigkeit und Intensität des Befalls von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. für die einzelnen Schläge räumlich dargestellt.

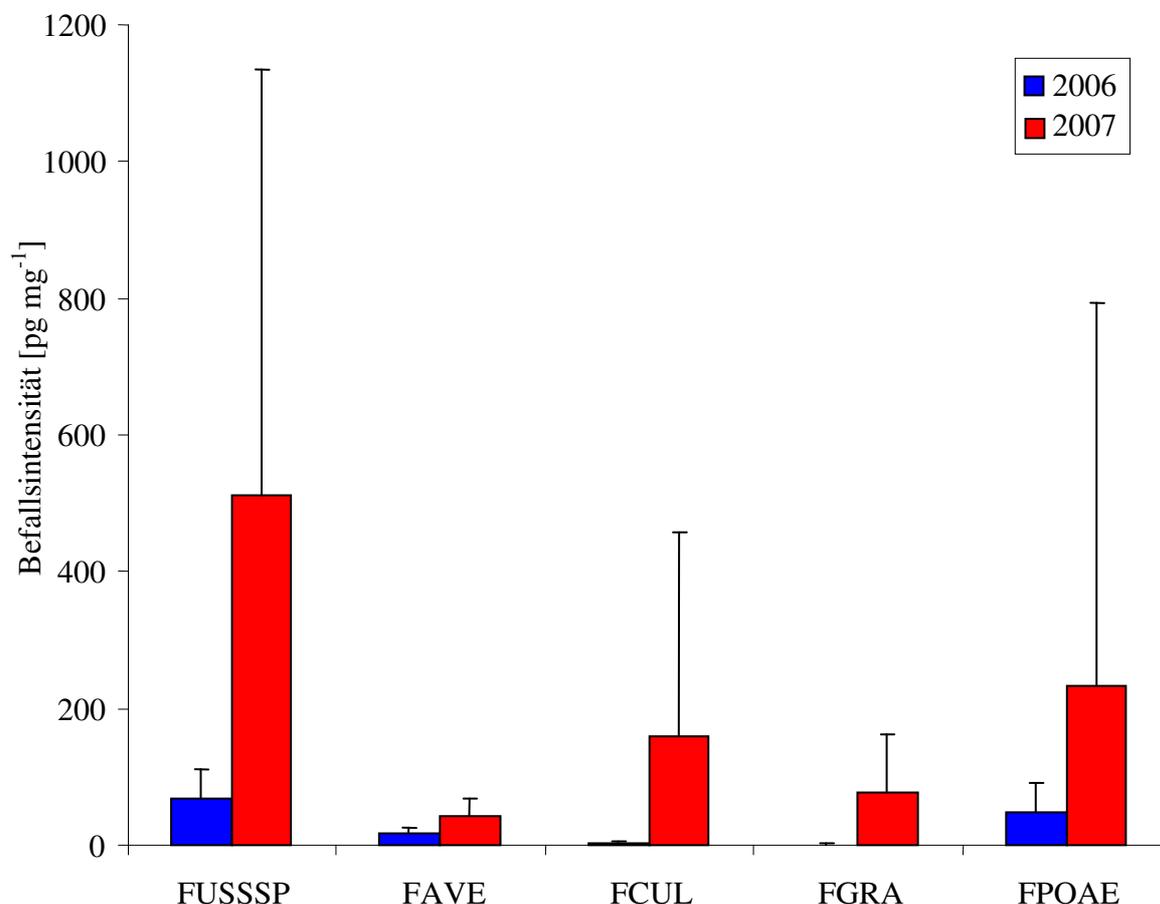


Abb. 3: Intensität des Befalls von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. auf den Versuchsschlägen in der Regionalebene in den Jahren 2006 und 2007; die Standardabweichung ist dargestellt.

Schlag RB235a

Auf dem Schlag RB235 lag die Häufigkeit des Befalls mit *Fusarium* spp. bei 1,8 % (Abb. 4). Es wurden nur die Arten *F. graminearum* und *F. poae* nachgewiesen, die beide auf einem ähnlichen Niveau lagen. Die Befallsintensität auf Schlag RB235 lag bei 18 pg mg⁻¹ (Abb. 5). Obwohl die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* nicht bestimmt werden konnte, wurde diese Art bei der Bestimmung der Intensität des Befalls erfasst.

Schlag RB104

Mit 12,3 % lag die Befallshäufigkeit auf dem Schlag RB104 wesentlich höher als auf dem Schlag RB235 (Abb. 4). Es war auch der einzige Schlag in dem ein Kornbefall mit allen sechs Arten erfasst wurde. Dominierende Art war *F. poae*. In keinem anderen Feld wurde im

Jahr 2006 eine höhere Befallshäufigkeit mit *F. poae* festgestellt. Wie im Feld RB235 konnte die Intensität des Kornbefalls nur für die Arten *F. avenaceum* und *F. poae* ermittelt werden (Abb. 5). Mit 121 pg mg^{-1} lag sie aber ebenfalls wesentlich höher als im Schlag RB235. Die hohe Befallshäufigkeit von *F. poae* korrespondierte mit der hohen Befallsintensität.

Schlag K5

Für den Schlag K5 wurde bei der Bestimmung der Befallshäufigkeit nur die Art *F. poae* nachgewiesen (Abb. 4). Der Befall lag mit 0,7 % auf einem etwas niedrigeren Niveau als auf dem Feld RB235. Auch in K5 konnte pilzliche Biomasse von *F. avenaceum* nachgewiesen werden, obwohl dieser Pilz nicht von den Körnern isoliert werden konnte (Abb. 5). Weiterhin konnte pilzliche Biomasse von *F. poae* erfasst werden. Die Gesamtbefallsintensität lag mit 60 pg mg^{-1} auf einem Niveau zwischen dem der Felder RB235 und RB104. In der Abstufung der Befallsintensitäten ergab sich ein ähnliches Bild wie auf dem Schlag RB104. Allerdings korrespondierte in K5 die hohe Befallsintensität nicht mit einer hohen Befallshäufigkeit, wie dies auf dem Schlag RB104 beobachtet werden konnte.

Schlag K7

Die Häufigkeit des Kornbefalls mit *Fusarium* spp. lag mit 3,6 % auf dem Schlag K7 auf einem relativ niedrigen Niveau (Abb. 4). Neben *F. poae* konnten auch *F. culmorum* und *F. proliferatum* isoliert werden. Die letzteren traten weniger häufig auf als *F. poae*. Mit 147 pg mg^{-1} war die Befallsintensität auf K7 die höchste aller Schläge aus dem Jahr 2006 (Abb. 5). Maßgeblich bestimmt wurde die Höhe der Befallsintensität durch *F. poae*. Dieses Pathogen war mit einer Intensität des Kornbefalls von 116 pg mg^{-1} absolut dominierende Art. Die Abstufung von *F. avenaceum* und *F. poae* war ähnlich der im Feld RB104, jedoch auf leicht höherem Niveau. K7 war der einzige Neulandschlag, auf dem im Jahr 2006 pilzliche Biomasse von allen vier Arten nachgewiesen werden konnte. Auf den Schlägen RB104 und K7 wurde die Weizensorte Drifter angebaut. In den beiden Schlägen war die Befallsintensität von *F. poae* mit 110 pg mg^{-1} bzw. 116 pg mg^{-1} auffällig höher als auf den Schlägen mit der Weizensorte Dekan.

Schlag K3

Auf K3 lag die Befallshäufigkeit auf demselben Niveau wie auf K7 (Abb. 4). Auch der Arten-Komplex von *Fusarium* spp. war ähnlich, allerdings trat auf dem Feld K3 anstelle von *F. proliferatum* die Art *F. graminearum* auf. Diese Art wurde auch am häufigsten isoliert.

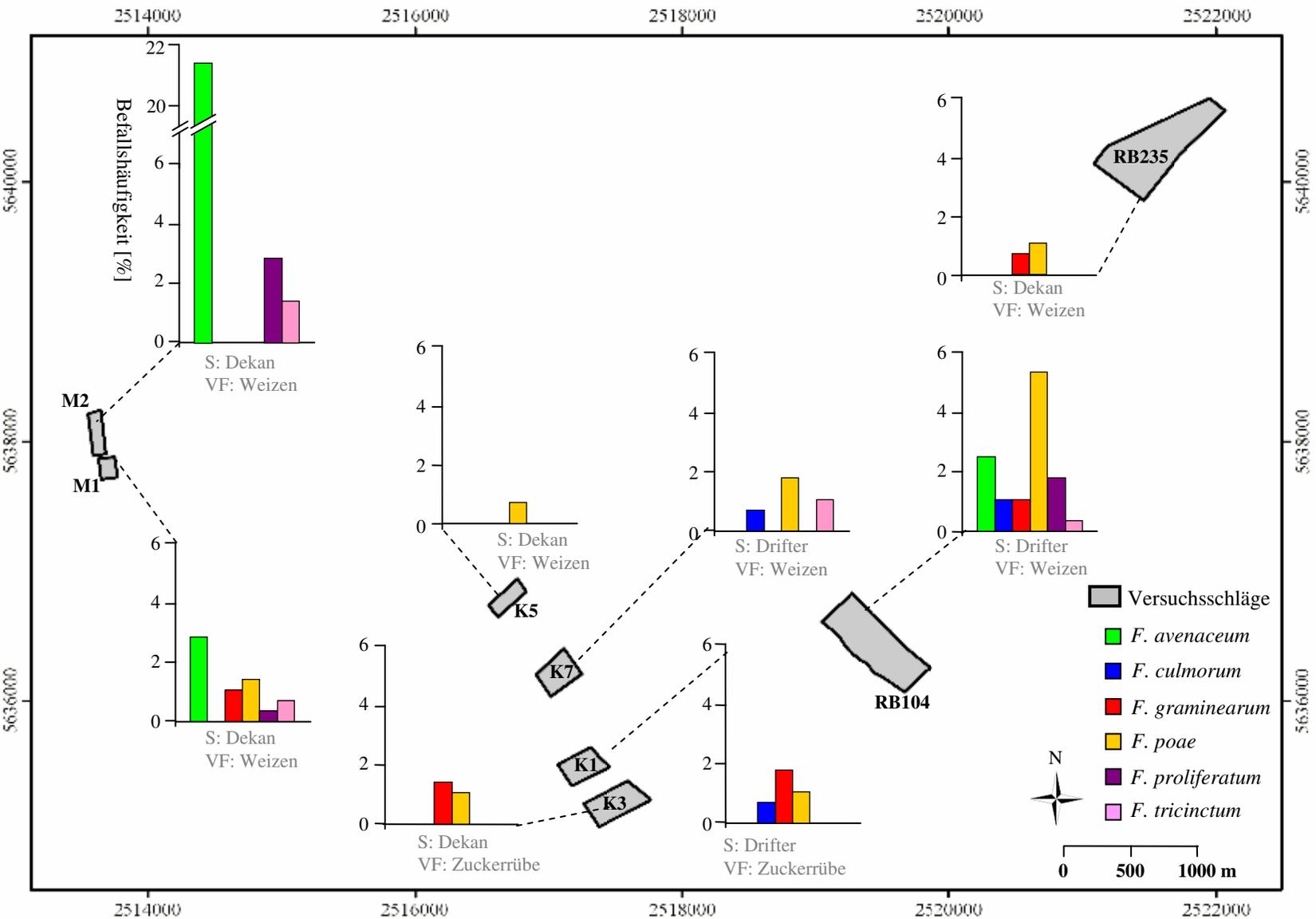
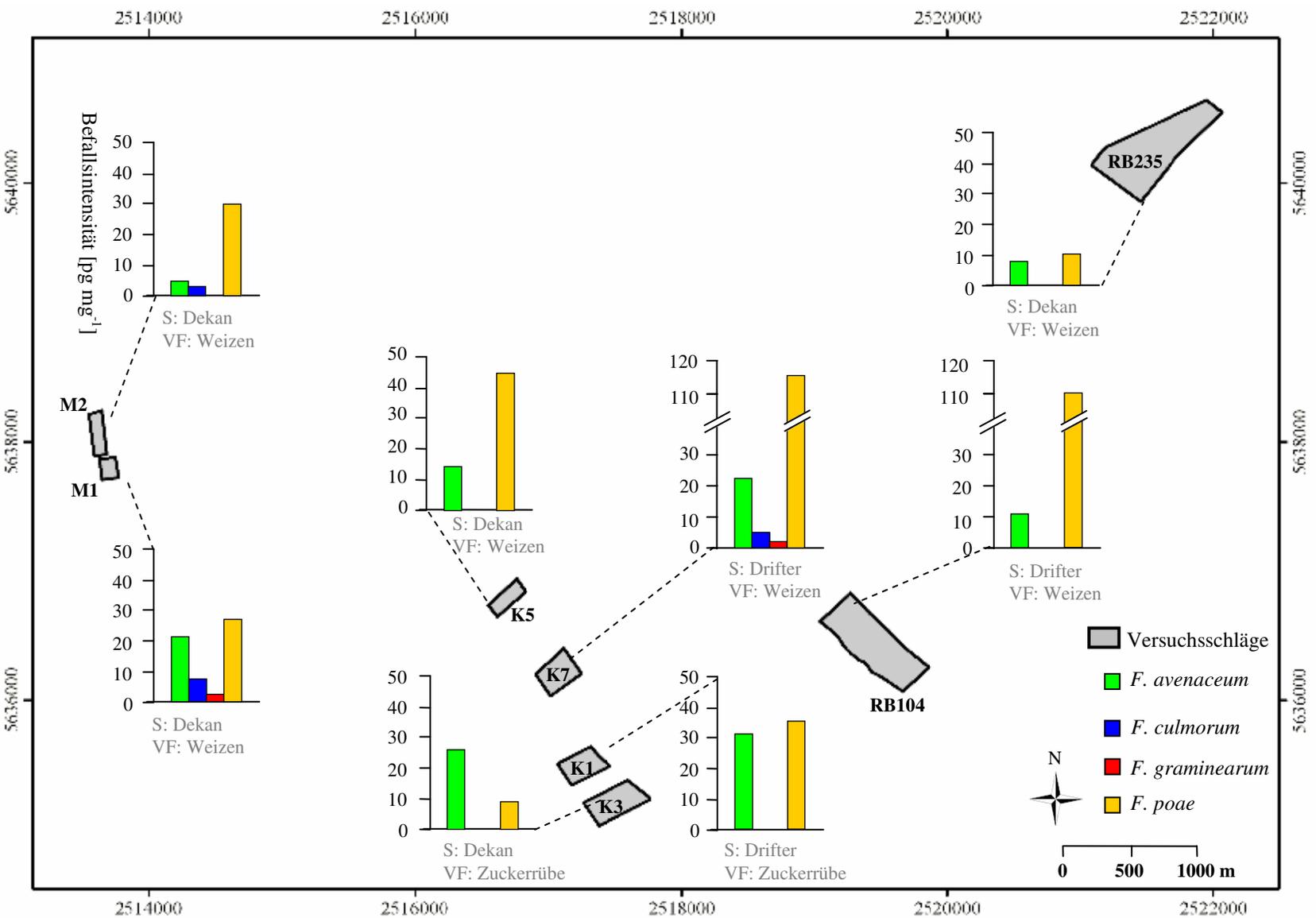


Abb. 4: Räumliche Darstellung der Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. auf den Versuchsschlägen mit Weizen in der Region Aldenhoven aus dem Jahr 2006; S = Weizensorte; VF = Vorfrucht; Maßstab 1:45000



Pilzliche Biomasse wurde erneut nur für die Arten *F. avenaceum* und *F. poae* nachgewiesen, die auf einem Niveau lagen (Abb. 5). Auch auf dem Schlag K3 wurde die Weizensorte Drifter angebaut. Die Befallsintensität von *F. poae* war zwar auch hier relativ hoch, jedoch nicht so deutlich wie auf den Schlägen RB104 und K7.

Schlag K1

Ein ähnliches Bild der Befallshäufigkeit wie auf dem Schlag K3 zeigte sich auch auf dem Schlag K1 (Abb. 4). Das Niveau lag mit 2,5 % ein wenig niedriger. Die Art *F. culmorum* konnte, im Gegensatz zu Schlag K3, nicht nachgewiesen werden. Die Befallsintensität lag mit 35 pg mg⁻¹ ebenfalls niedriger als auf dem Schlag K3. Vorherrschende Art war hier klar *F. avenaceum*. Die Schläge K1 und K3 hatten als einzige Zuckerrübe als Vorfrucht. Auf beiden Schlägen war *F. graminearum* die Art, die am häufigsten von den Körnern isoliert werden konnte. Weiterhin lag auf beiden Schlägen die Intensität des Kornbefalls mit *F. avenaceum* höher oder auf einem gleichen Niveau mit der Befallsintensität von *F. poae* (Abb. 5). Auf den Schlägen mit Weizen als Vorfrucht war die Befallsintensität von *F. poae* stets höher.

Schlag M1

Bis auf *F. culmorum* konnten auf dem Schlag M1 alle *Fusarium*-Arten, die in den Versuchsjahren 2006 und 2007 identifiziert werden konnten, nachgewiesen werden (Abb. 4). Die Befallshäufigkeit lag mit 6,5 % auf einem mittleren Niveau im Vergleich zu den anderen Schlägen, die im Jahr 2006 beprobt wurden. Häufigste Art war *F. avenaceum*. Neben K7 war der Schlag M1 der einzige auf dem pilzliche Biomasse aller vier möglichen *Fusarium*-Arten nachgewiesen werden konnte (Abb. 5). Mit 59 pg mg⁻¹ lag auch die Befallsintensität auf einem mittleren Niveau für das Jahr 2006. *F. avenaceum* und *F. poae* waren auf M1 erneut die Arten, die die höchsten Befallsintensitäten aufwiesen.

Schlag M2

Mit 25,7 % lag die Befallshäufigkeit auf dem Schlag M2 deutlich höher als auf den anderen Schlägen aus dem Jahr 2006 (Abb. 4). Absolut dominierende Art war *F. avenaceum* mit einer Befallshäufigkeit von 21,6 %. Daneben wurden auch *F. proliferatum* und *F. tricinctum* nachgewiesen. Obwohl diese im Vergleich zu *F. avenaceum* auf dem Schlag M2 nur eine untergeordnete Rolle spielen, wurden sie dennoch wesentlich häufiger nachgewiesen als in den anderen Schlägen. Es fiel auf, dass *F. proliferatum* nur auf Schlägen isoliert wurde, in denen auch *F. tricinctum* und *F. avenaceum* gefunden wurden.

Im Gegensatz zur sehr hohen Befallshäufigkeit lag die Befallsintensität mit 38 pg mg^{-1} auf einem niedrigen Niveau (Abb. 5). Relativ hohe Intensitäten zeigt *F. poae*. Auffällig ist die nur geringe Befallsintensität von *F. avenaceum*, der die sehr hohe Befallshäufigkeit dieser Art entgegensteht.

3.1.3 Befallssituation in der Region Ligurien, Italien im Jahr 2006

Im Jahr 2006 wurden zusätzlich drei Weizenproben aus der Region Ligurien in Italien untersucht, um das Artenspektrum und den Befall mit *Fusarium* spp. überregional einordnen zu können. Wie in der Region Aldenhoven fiel zur Zeit der Weizenblüte in Ligurien kaum Niederschlag und die Phase von Ende Mai bis Mitte Juni war durch einen starken Anstieg der Temperatur gekennzeichnet (Wetterdaten nicht dargestellt).

Die Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. der italienischen Proben aus dem Jahr 2006 lag auf einem ähnlichen Niveau wie die Befallshäufigkeit in den Proben aus Deutschland im Jahr 2006 und variierte zwischen 3,0 % und 4,5 % (Abb. 6).

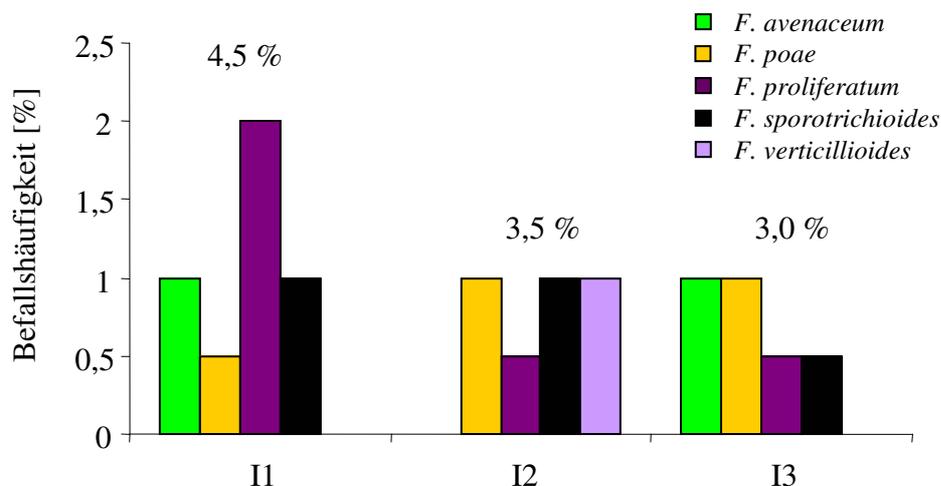


Abb. 6: Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. an den Weizenproben aus der Region Ligurien, Italien aus dem Jahr 2006; die Gesamtbefallshäufigkeit für jeden Schlag ist zusätzlich dargestellt.

Unterschiede fanden sich im Artenspektrum. In Italien wurden ein Befall mit den Arten *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. proliferatum* wie auch in Deutschland relativ häufig nachgewiesen. Zusätzlich fanden sich aber auch die Arten *F. sporotrichioides* und *F. verticillioides*, die von den Weizenproben aus Deutschland nicht isoliert werden konnten.

3.1.4 Witterung in der Region Aldenhoven im Jahr 2007

Der April 2007 war auffällig trocken mit einigen überdurchschnittlich warmen Tagen (Abb. 7). Ab der zweiten Maiwoche fielen jedoch regelmäßige Niederschläge. Insgesamt war der Sommer überdurchschnittlich niederschlagsreich. Mai und Juni waren etwas wärmer als im langjährigen Mittel. Die Temperaturen im Juli und August bewegten sich im Bereich des langjährigen Mittels. Im August gab es mehrere Tage mit relativ großen Niederschlagshöhen.

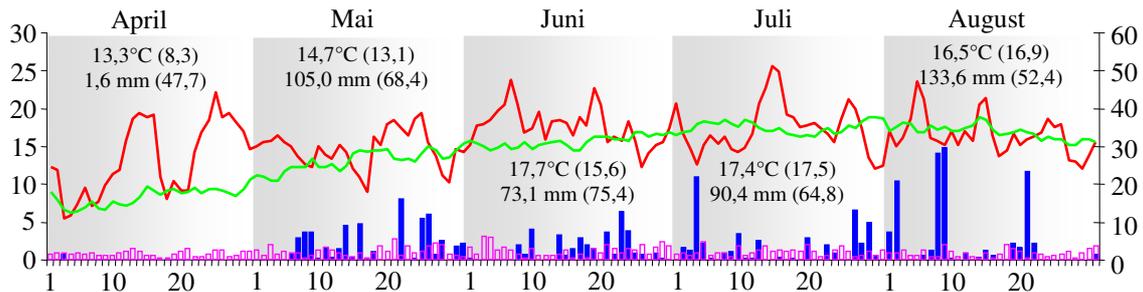


Abb. 7: Tagesdurchschnittstemperatur (DT) und Tagesniederschlagssumme (NS) des Jahr 2007 und langjähriges Mittel (1976-1990) an der Wetterstation Jülich (Deutscher Wetterdienst); rote Linie = DT 2007; grüne Linie = DT langjähriges Mittel; blaue Säulen = NS 2006; violette Säulen = NS langjähriges Mittel; Monatsdurchschnittstemperatur und Monatsniederschlagssumme im Diagramm angegeben (langjähriges Mittel in Klammern)

3.1.5 Befallssituation in der Region Aldenhoven im Jahr 2007

Die Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. auf den Schlägen des Jahres 2007 lag mit 5,9 % auf einem ähnlichen Niveau wie im Jahr 2006 (Abb. 2). Dominierende Arten waren auch in 2007 wieder *F. avenaceum* mit 2,0 % und *F. poae* mit 2,9 %, allerdings, im Gegensatz zum Jahr 2006, in umgekehrter Rangfolge. *F. culmorum* und *F. poae* lagen mit 0,3 % bzw. 0,7 % auf dem gleichen Niveau wie im Jahr 2006. *F. proliferatum* und *F. tricinctum* konnten im Jahr 2007 nicht nachgewiesen werden.

Die Intensität des Kornbefalls lag mit 513 pg mg^{-1} auf einem wesentlich höheren Niveau als im Jahr 2006 (Abb. 3). Die dominierende Art war, wie bei der Befallshäufigkeit, *F. poae* mit 233 pg mg^{-1} . Trotz des geringsten Wertes bei der Befallshäufigkeit, wies *F. culmorum* mit 160 pg mg^{-1} die zweithöchste Befallsintensität auf. *F. graminearum* und *F. avenaceum* lagen mit 77 pg mg^{-1} bzw. 43 pg mg^{-1} auf einem niedrigerem Niveau.

In den Abbildungen 8 und 9 ist die Häufigkeit und Intensität des Befalls von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. für die einzelnen Schläge räumlich dargestellt.

Schlag R1

Auf dem Schlag R1 lag die Befallshäufigkeit bei 4,7 %. Am häufigsten waren die Körner mit *F. poae* infiziert (Abb. 8). *F. avenaceum* zeigte eine ähnlich hohe Befallsintensität während *F. graminearum* seltener auftrat. Die Befallsintensität auf Schlag R1 lag bei 88 pg mg⁻¹ (Abb. 9). Damit wies R1 die geringste Befallsintensität aller Schläge aus dem Jahr 2007 auf, lag damit aber trotzdem noch über dem Durchschnitt aller Schläge aus dem Jahr 2006. Obwohl *F. poae* die größte Befallshäufigkeit aufwies, konnte keine Biomasse von dieser Art nachgewiesen werden. Neben *F. avenaceum*, das die höchste Befallsintensität aufwies, wurde auch Biomasse von *F. culmorum* und *F. graminearum* nachgewiesen, die aber beide auf einem niedrigen Niveau lagen als *F. avenaceum*. Auf dem Schlag R1 wurden die drei Mykotoxine Deoxynivalenol (DON), Zearalenon (ZEA) und Enniatin B (ENNB) detektiert (Tab. 10).

Schlag R2

Mit 9,3 % lag die Befallsintensität auf dem Schlag R2 doppelt so hoch wie auf dem Schlag R1 (Abb. 8). Auf R2 konnten alle vier Arten, die im Jahr 2007 identifiziert wurden, nachgewiesen werden. Häufigste Arten waren *F. avenaceum* und *F. graminearum*, während *F. culmorum* und *F. poae* seltener auftraten. Obwohl *F. culmorum* auf dem Schlag R2 die Art mit der geringsten Befallshäufigkeit war, war R2 gleichzeitig auch der Schlag in dem *F. culmorum*, im Vergleich zu den anderen Schlägen, am häufigsten isoliert wurde. Auch *F. avenaceum* und *F. graminearum* wurden, im Vergleich zu den anderen Schlägen, auf dem Schlag R2 am häufigsten nachgewiesen. Auch bei Befallsintensität zeigte sich ein ähnliches Bild wie auf Schlag R1 (Abb. 9). *F. avenaceum* wies die größte Intensität beim Kornbefall auf während *F. culmorum* und *F. graminearum* gemeinsam auf einem niedrigeren Niveau lagen. Der Unterschied zwischen *F. avenaceum* und den beiden anderen Arten war jedoch nicht so groß wie auf dem Schlag R1. Die Ähnlichkeit zwischen den Situationen auf den Schlägen R1 und R2 zeigte sich auch für die Mykotoxinbelastung (Tab. 10). Es wurden die gleichen Mykotoxine nachgewiesen, allerdings war die Höhe der Belastung eine andere. Während der Gehalt von DON und ENNB im Schlag R2 höher war als im Schlag R1, war es im Falle von ZEA umgekehrt. Auf beiden Schläge wurde die gleiche Weizensorte angebaut.

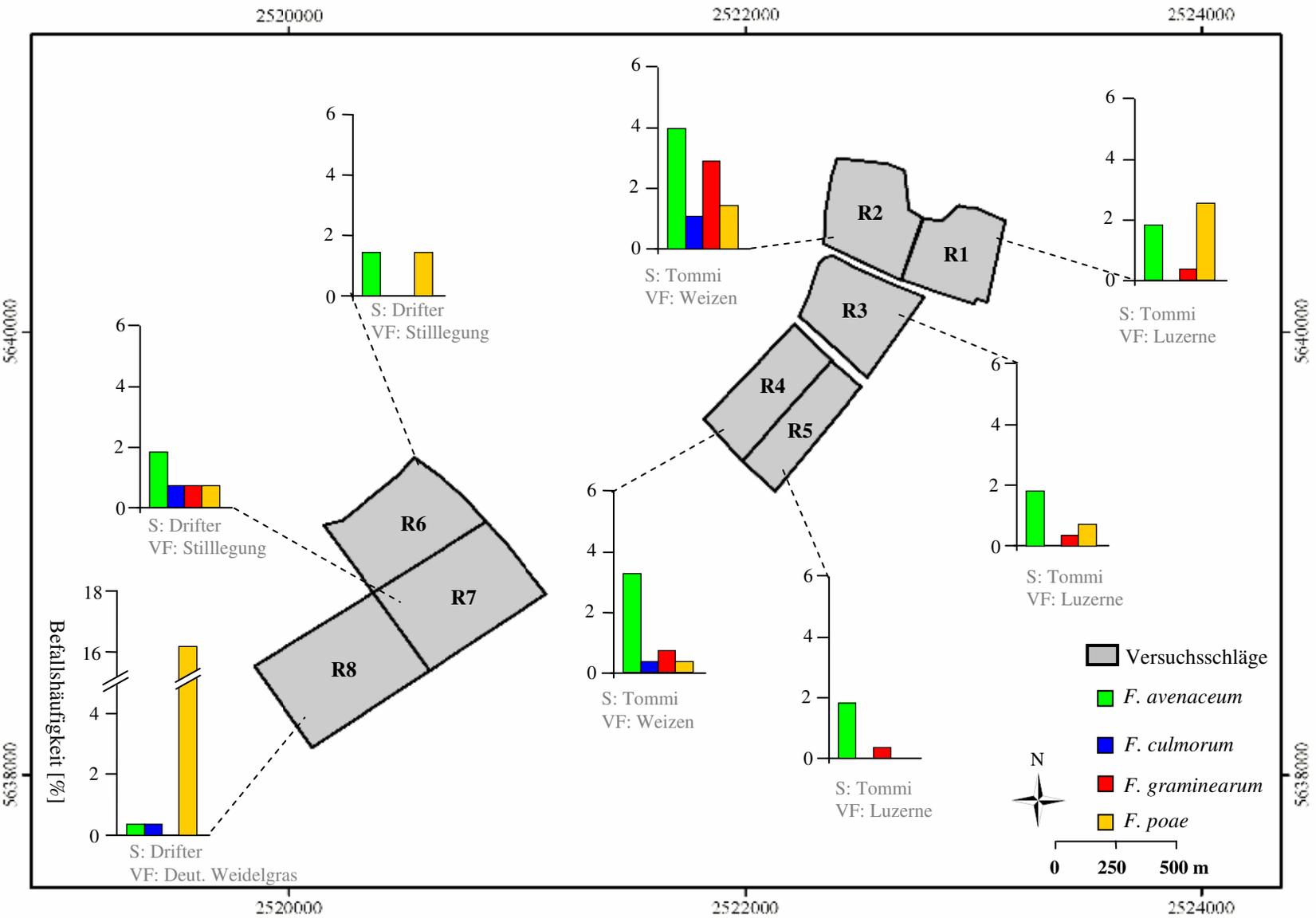


Abb. 8: Räumliche Darstellung der Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. auf den Versuchsschlägen mit Weizen in der Region Aldenhoven aus dem Jahr 2007; S = Weizensorte; VF = Vorfrucht; Maßstab 1:25000

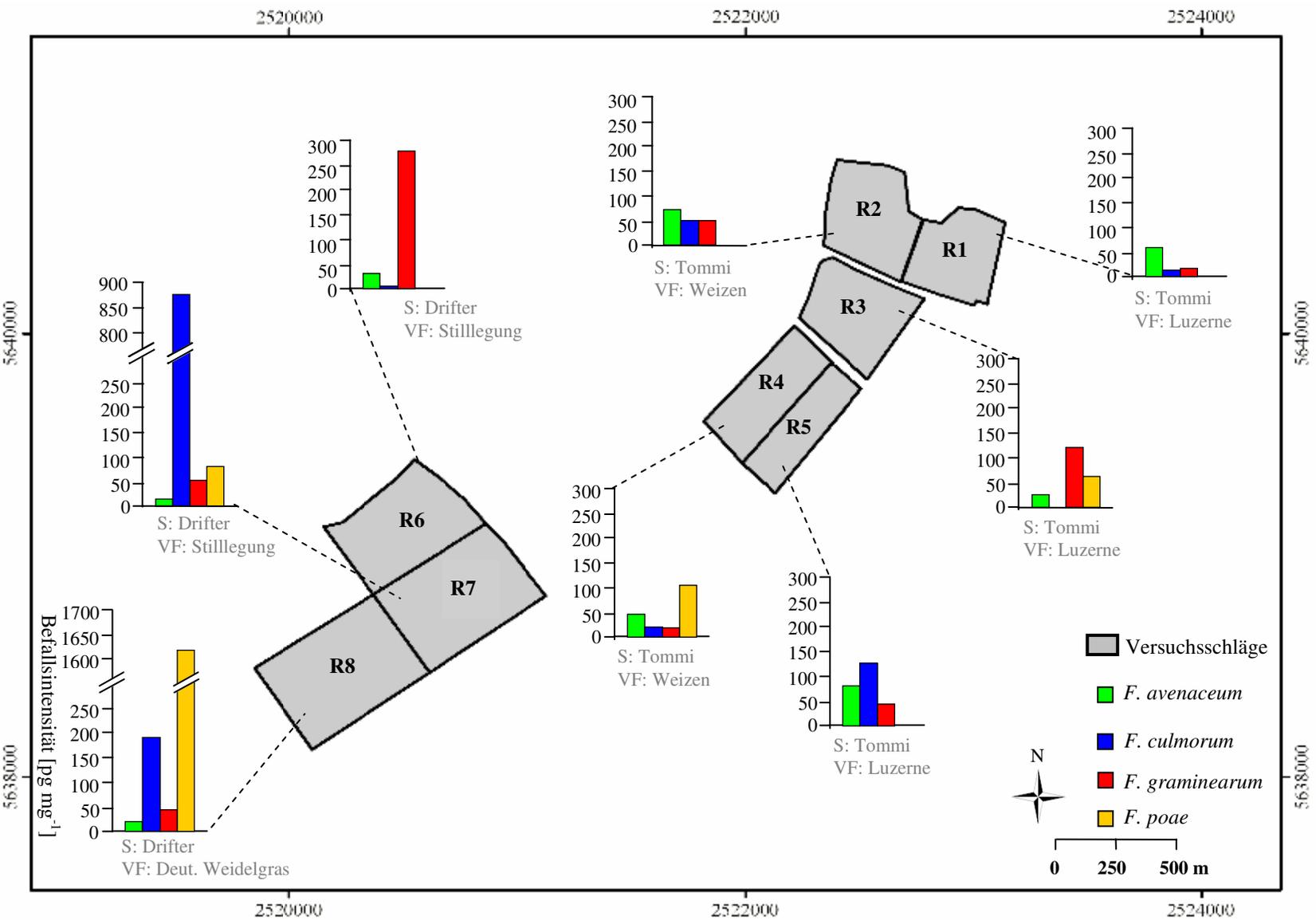


Abb. 9: Räumliche Darstellung der Befallsintensität von *Fusarium* spp. auf den Versuchsschlägen mit Weizen in der Region Aldenhoven aus dem Jahr 2007; S = Weizensorte; VF = Vorrucht; Maßstab 1:25000

Schlag R3

Auf dem Schlag R3 wurde das gleiche Artenspektrum von *Fusarium* spp. nachgewiesen wie auf dem Schlag R1 (Abb. 8). Die Befallshäufigkeit lag mit 2,9 % aber niedriger. Vorherrschende Art war *F. avenaceum*, während *F. poae* seltener auftrat als auf dem Schlag R1. Die Befallsintensität lag auf dem Schlag R3 mit 207 pg mg⁻¹ auf einem etwas höheren Niveau als im Schlag R2 (Abb. 9). Vorherrschende Art war hier, im Gegensatz zu Befallshäufigkeit, *F. graminearum*. Wie auf den Schlägen R1 und R2 waren die Mykotoxine DON, ZEA und ENNB die einzigen Mykotoxine, die im Schlag R3 detektiert wurden (Tab. 10). Mit 1144 ng g⁻¹ lag die DON-Belastung wesentlich höher als in den Schlägen R1 und R2. Die ZEA-Belastung auf dem Schlag R3 hingegen war die niedrigste im Vergleich zu den anderen Schlägen aus dem Jahr 2007. Der Gehalt an ENNB lag auf dem gleichen Niveau wie auf dem Schlag R1.

Schlag R4

Auch auf dem Schlag R4 konnten alle vier Arten nachgewiesen werden (Abb. 8). Die Abstufung der Befallshäufigkeiten der einzelnen Arten war ähnlich wie auf dem Schlag R2 mit *F. avenaceum* als dominierender Art. Allerdings wurde *F. graminearum* deutlich seltener isoliert. Insgesamt lag das Niveau mit 4,7 % auch etwas niedriger. Auf einem ähnlichen Niveau wie auf R3 lag die Befallsintensität mit 187 pg mg⁻¹ (Abb. 9). Auf R4 konnte die Befallsintensität von allen vier Arten bestimmt werden. Analog zu Schlag R2 führte eine hohe Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* offenbar nicht zu einer hohen Befallsintensität. Auch auf dem Schlag R4 wurden nur die Mykotoxine DON, ZEA und ENNB nachgewiesen (Tab. 10). Der Schlag R4 war der Schlag mit der geringsten DON-Belastung, während die Belastung mit ZEA und ENNB im mittleren Bereich der Versuchsschläge aus dem Jahr 2007 lag.

Schlag R5

Der Schlag R5 wies mit 2,2 % die geringste Befallshäufigkeit aller Schläge aus dem Jahr 2007 auf (Abb. 8). Auch hier war *F. avenaceum* wieder die dominierende Art. *F. graminearum* hingegen spielte nur eine untergeordnetere Rolle. Die Befallsintensität lag mit 250 pg mg⁻¹ auf einem etwas höherem Niveau als auf dem Schlag R4 (Abb. 9). Obwohl *F. culmorum* nicht von infizierten Körnern isoliert werden konnte, lag die Befallsintensität von *F. culmorum* deutlich am höchsten.

Auf dem Schlag R5 war die Belastung mit DON zehnmal höher als auf dem Schlag R4 (Tab. 10). Hier wurden auch die höchsten Gehalte an ZEA und ENNB nachgewiesen. Zusätzlich war R5 der einzige Schlag auf dem Moniliformin (MON) detektiert wurde.

Tab. 10: Mykotoxinbelastung der Weizenproben von den Versuchsschlägen aus der Region Aldenhoven aus dem Jahr 2007 [ng g^{-1}]; wenn kein Wert angegeben, dann Messwert $<$ LOD; Minima und Maxima jeweils hervorgehoben

Feld	DON	3AcDON	NIV	ZEA	MAS	MON	ENNB
R1	91	-	-	103	-	-	32
R2	140	-	-	74	-	-	177
R3	1144	-	-	45	-	-	47
R4	63	-	-	80	-	-	76
R5	643	-	-	133	-	59	651
R6	915	-	-	80	-	-	38
R7	1253	13	-	83	-	-	3
R8	232	-	175	120	144	-	4

Schlag R6

Mit 2,8 % lag die Befallshäufigkeit auf dem Schlag R6 auf einem ähnlichen Niveau wie auf dem Schlag R5 (Abb. 8). Es wurden nur die Arten *F. avenaceum* und *F. poae* nachgewiesen, die beide auf einem Niveau lagen. Die Befallsintensität war mit 312 pg mg^{-1} etwas höher als im Schlag R5 (Abb. 9). Obwohl *F. culmorum* und *F. graminearum* nicht von den Körnern isoliert wurden, konnte Biomasse dieser beiden Pathogene nachgewiesen werden. *F. graminearum* dominierte deutlich und zeigte die höchste Befallsintensität aller Schläge aus dem Jahr 2007. Bei den beiden Arten, die von den Körnern isoliert werden konnten, zeigte sich ein anderes Bild. Die Befallsintensität von *F. avenaceum* war relativ gering, während die Befallsintensität von *F. poae* unter der Nachweisgrenze lag. Auf dem Schlag R6 wurden ebenfalls die drei Mykotoxine DON, ZEA und ENNB detektiert (Tab. 10). Der Gehalt an DON war 50 % höher als auf dem Schlag R5, wohingegen sich die Belastungen durch ZEA und ENNB auf einem mittleren Niveau bewegten.

Schlag R7

Die Befallshäufigkeit auf dem Schlag R7 lag mit 3,9 % auf einem relativ niedrigen Niveau (Abb. 8). Es konnten alle vier Arten nachgewiesen werden. Dominierende Art war erneut *F. avenaceum*, während die anderen Arten auf einem etwas niedrigerem Niveau lagen.

Mit 1025 pg mg^{-1} lag die Befallsintensität wesentlich höher als auf dem Schlag R6 (Abb. 9). Absolut dominierende Art war *F. culmorum*. Die anderen Arten spielten, trotz der im Vergleich zu den anderen Schlägen im mittleren Bereich angesiedelten Befallsintensitäten, nur eine untergeordnete Rolle. Die höchste Kontamination mit DON wurde mit 1253 ng g^{-1} auf dem Schlag R7 festgestellt (Tab. 10). Auch hier wurden wieder ZEA und ENNB nachgewiesen. Wie auf dem Schlag R6 lag der Gehalt an ZEA auch auf dem Schlag R7 auf einem mittleren Niveau, während die Belastung mit ENNB mit 3 ng g^{-1} die niedrigste aller Schläge war. Zusätzlich war R7 der einzige Schlag auf dem das DON-Derivat 3-Acetyldeoxynivalenol (3AcDON) nachgewiesen wurde. Die 3AcDON-Belastung lag bei etwa 1% der DON Belastung.

Schlag R8

Der Schlag R8 wies mit 16,9 % die deutlich höchste Befallsintensität aller Schläge aus dem Jahr 2007 auf (Abb. 8). Absolut vorherrschend war *F. poae* während *F. avenaceum* und *F. culmorum* auf einem Niveau lagen und nur eine untergeordnete Rolle spielten. *F. graminearum* konnte auf dem Schlag R8 nicht isoliert werden. Mit 1870 pg mg^{-1} lag die Befallsintensität noch einmal deutlich höher als auf dem Schlag R7 (Abb. 9). *F. poae* war, wie bei der Befallshäufigkeit, die absolut dominierende Art. Auch *F. culmorum* erreichte noch relativ hohe Befallsintensitäten, jedoch auf einem viel geringeren Niveau als *F. poae*. Auf dem Schlag R8 wurde die größte Anzahl verschiedener Mykotoxine detektiert (Tab. 10). Neben einer mittleren DON-Belastung und einer hohen ZEA-Belastung lag die ENNB-Kontamination auf einem ähnlich niedrigen Niveau wie auf dem Feld R7. Die Mykotoxine Nivalenol (NIV) und Monoacetoxyscirpenol (MAS) wurden nur auf dem Schlag R8 nachgewiesen.

Insgesamt war zu erkennen, dass mit zunehmender Nutzungsdauer der Schläge (von R1 zu R8) die Befallsintensität anstieg. Dies war für die Befallshäufigkeit nicht zu erkennen. Weiterhin konnte man sehen, dass sich auf Schlägen mit hohen oder sehr hohen Befallsintensitäten (R6, R7 und R8) eine Art offenbar durchsetzte.

Im Vergleich aller Schläge fiel auf, dass auf allen Schlägen die Mykotoxine DON, ZEA und ENNB nachgewiesen werden konnten. Andere Mykotoxine traten nur vereinzelt auf und dann auch immer nur auf einem Schlag.

3.1.6 Zusammenhang verschiedener Befallsparameter auf regionaler Ebene

3.1.6.1 Befallshäufigkeit und Befallsintensität

Für die Korrelationen der Befallshäufigkeit und der Befallsintensität auf den Feldern auf der Regionalebene zeigte sich für die Jahre 2006 und 2007 ein sehr unterschiedliches Bild (Tab. 11). Während im Jahr 2006 nahezu alle Korrelation negative Koeffizienten aufwiesen, waren die Befallshäufigkeit und die Befallsintensität im Jahr 2007 in nahezu allen Fällen positiv korreliert. Die stärksten Korrelationen für eine Art wurden mit Koeffizienten von 0,686 und 0,983 für *F. poae* beobachtet. Hier wurde im Jahr 2007 auch die einzige signifikante Korrelation beobachtet.

Tab. 11: Korrelation zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität mit *Fusarium* spp. auf Weizenfeldern in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007; n = 8

	FUSSPP	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE
2006	-0,033	-0,568	-0,128	-0,157	0,686
2007	0,749*	0,543	0,422	-0,0287	0,983***

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

3.1.6.2 Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung

In den Proben des Jahres 2007 wurden nur zwei Mykotoxine detektiert, die potenziell von *F. avenaceum* gebildet werden. Für beide Fälle lag eine sehr schwache positive bzw. negative Korrelation mit der Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* vor (Tab. 12). Für die Befallshäufigkeit von *F. culmorum* waren die Korrelationen mit den Belastungen durch verschiedene Mykotoxine teilweise stärker. Auffällig ist eine positive Korrelation von 0,403 mit der 3AcDON-Belastung.

Tab. 12: Korrelation zwischen Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung auf Weizenfeldern in der Region Aldenhoven im Jahr 2007; grauer Hintergrund = Mykotoxin wird von dieser Art nicht produziert; n = 8

	DON	3AcDON	NIV	MAS	ZEA	ENNB	MON
FAVE						0,142	-0,082
FCUL	-0,180	0,403	0,044		-0,179		
FGRA	-0,310	0,019	-0,292		-0,287		
FPOAE			0,989***	0,989***			

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

In keinem Fall jedoch waren die Korrelationen mit der Befallshäufigkeit von *F. culmorum* statistisch signifikant. Ähnlich wie bei *F. culmorum* waren auch die Korrelationen bei *F. graminearum* zwar stärker als bei *F. avenaceum*, aber in keinem Fall statistisch nicht signifikant. Es wurden nur zwei Mykotoxine detektiert, die potenziell von *F. poae* gebildet werden. In beiden Fällen zeigte sich eine sehr starke und hochsignifikante Korrelation ($r = 0,989$) mit der Befallshäufigkeit von *F. poae*.

3.1.6.3 Befallsintensität und Mykotoxinbelastung

Der Zusammenhang zwischen Befallsintensität und Mykotoxinbelastung war in der überwiegenden Zahl der Fälle wesentlich stärker als der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung (Tab. 13).

Tab. 13: Korrelation zwischen Befallsintensität und Mykotoxinbelastung auf Weizenfeldern in der Region Aldenhoven im Jahr 2007; grauer Hintergrund = Mykotoxin wird von dieser Art nicht produziert; $n = 8$

	DON	3AcDON	NIV	MAS	ZEA	ENNB	MON
FAVE						0,745*	0,601
FCUL	0,507	0,974***	0,038		0,079		
FGRA	0,523	-0,115	-0,157		-0,355		
FPOAE			0,997***	0,997***			

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, $p=0,05$; ** $p=0,01$; *** $p=0,001$)

Für die Befallsintensität von *F. avenaceum* und die Belastung mit ENNB bzw. MON wurden mit Koeffizienten von 0,745 und 0,601 starke und mittlere positive Zusammenhänge festgestellt während die Korrelation der Belastung mit diesen Mykotoxinen und der Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* sehr schwach und negativ war.

Für die Befallsintensität von *F. culmorum* und die Belastung mit DON bzw. 3AcDON zeigte sich ein starker bis sehr starker Zusammenhang, der im Fall von 3AcDON auch signifikant war. Für *F. graminearum* war nur der Zusammenhang mit dem Auftreten von DON positiv korreliert. Für die drei anderen, potenziell von *F. graminearum* detektierten Mykotoxine war der Zusammenhang negativ.

3.1.6.4 Koinzidenz des Auftretens verschiedener *Fusarium*-Arten

Befallshäufigkeit

Die Stärke der Korrelation zwischen den Befallshäufigkeiten der verschiedenen *Fusarium*-Arten variierte stark mit Koeffizienten zwischen 0,018 und 0,882 (Tab. 14). Deutlich war in allen Fällen ein Unterschied zwischen den Versuchsjahren zu sehen. Es war jedoch kein klares Muster erkennbar. In manchen Fällen war die Korrelation der Befallshäufigkeiten zweier Arten im Jahr 2006 stärker und in manchen Fällen im Jahr 2007. In einigen Fällen zeigte sich für die Befallshäufigkeit von zwei Arten in einem Jahr ein positiver Zusammenhang und im anderen Jahr ein negativer Zusammenhang.

Tab. 14: Korrelation der Befallshäufigkeit verschiedener *Fusarium*-Arten auf Weizenfeldern in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007; n = 8

	Jahr	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE	FPRO	FTRI
FAVE	2006						
	2007						
FCUL	2006	-0,246					
	2007	0,563					
FGRA	2006	-0,402	0,241				
	2007	0,839**	0,827*				
FPOAE	2006	-0,290	0,767*	0,251			
	2007	-0,608	0,043	-0,274			
FPRO	2006	0,882**	0,103	-0,280	0,182		
	2007	-	-	-	-		
FTRI	2006	0,737*	0,018	-0,564	-0,114	0,635	
	2007	-	-	-	-	-	

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

F. avenaceum, *F. culmorum* und *F. graminearum* zeigten im Jahr 2007 einen deutlichen positiven und signifikanten Zusammenhang. Dasselbe galt für *F. avenaceum*, *F. proliferatum* und *F. tricinctum* im Jahr 2006.

Befallsintensität

Auch für die Korrelation der Befallsintensitäten der verschiedenen *Fusarium*-Arten zeigten sich für einige Fälle stärkere Zusammenhänge, während in anderen Fällen kein Zusammenhang erkennbar war (Tab. 15). Auffällig waren, wie bei der Korrelation der Befallshäufigkeiten, die großen Unterschiede zwischen den Jahren. Der Zusammenhang zwischen den Befallsintensitäten schien mehr vom Versuchsjahr abzuhängen als von den Arten selber. Im Jahr 2006 waren die meisten Korrelationen positiv während im Jahr 2007 die

überwiegende Anzahl negativ war. Die einzige signifikante Korrelation zeigte sich beim Zusammenhang von *F. graminearum* und *F. culmorum* im Jahr 2006.

Tab. 15: Korrelation der Befallsintensität verschiedener *Fusarium*-Arten auf Weizenfeldern in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007; n = 8

	Jahr	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE
FAVE	2006				
	2007				
FCUL	2006	0,102			
	2007	-0,473			
FGRA	2006	0,299	0,931***		
	2007	-0,310	-0,192		
FPOAE	2006	-0,007	0,168	0,295	
	2007	-0,430	0,068	-0,176	

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

3.2 Räumliches Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine auf Bestandesebene

Neben der Charakterisierung des Artenspektrums und der Befallssituation auf regionaler Ebene sollte auf der Bestandesebene das räumliche Auftreten der *Fusarium*-Arten sowie der Mykotoxinbelastung innerhalb von Weizenbeständen untersucht werden.

Für die Untersuchungen wurden in den Jahren 2006 und 2007 in je zwei Schlägen Kornproben in einem Raster von 20 m x 20 m genommen. Die beprobten Flächen waren Teilbereiche der Schläge K5 und M1 (2006) bzw. R1 und R8 (2007). Für jede Kornprobe wurde zunächst die Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. bestimmt. Aufgrund der sehr geringen Befallshäufigkeit in den Rasterproben aus dem Jahr 2006 wurde vermutet, dass die Befallsintensität und die Mykotoxinbelastung dieser Proben ebenfalls nur sehr gering sein würden. Daher wurden von den Schlägen K5 und M1 zunächst nur einige Stichproben auf die Parameter Befallsintensität und Mykotoxinbelastung hin untersucht, wodurch die Vermutung bestätigt werden konnte. Die teuren und aufwendigen Untersuchungen zur Befallsintensität und Mykotoxinbelastung der Proben wurden im Jahr 2006 daher nur an jedem zweiten Messpunkt durchgeführt, woraus sich für diese Parameter in diesem Jahr ein Untersuchungs raster von 40 m x 40 m ergab. Im Jahr 2007 wurden alle drei Parameter in einem 20 m x 20 m-Raster erfasst. Die erhobenen Daten aus den Jahren 2006 und 2007 wurden mittels einer Aggregationsanalyse räumlich analysiert um die Art der Verteilung der jeweiligen Parameter zu charakterisieren. Für die Schläge R1 und R8 wurde weiterhin eine

Erfassung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit durchgeführt, um die Homogenität des Bodensubstrates zu überprüfen.

3.2.1 Überprüfung der Homogenität des Bodensubstrates

Die scheinbare elektrische Leitfähigkeit (ECa) des Bodens wird im wesentlichen durch zwei Parameter beeinflusst: den Tonmineralgehalt des Bodens und die Bodenfeuchte. Bei konstanter Bodenfeuchte innerhalb einer Parzelle kann die ECa als Maß für die Homogenität des Bodensubstrates dieser Parzelle genutzt werden. Für die beiden Versuchsschläge R1 und R8 wurde die ECa erfasst, um zu erkennen ob möglicherweise eine Heterogenität des Bodensubstrates vorlag, die dann einen Einfluss auf den Befall mit *Fusarium* spp. bzw. die Mykotoxinbelastung der Proben hätte haben könnte.

3.2.1.1 Räumliche Verteilung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit

Die Erfassung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit erfolgte während der Überfahrt mit einem Messschlitten. Die ECa wurde dabei an ca. 600 georeferenzierten Messpunkten je Hektar gemessen. Um zu prüfen, ob die Voraussetzung für eine Interpolation mit einem geostatistischen Verfahren wie Kriging gegeben war, wurde zunächst mit einer Variogrammanalyse der ECa-Messwerte für beide Felder überprüft ob eine Autokorrelation vorlag. Dazu wurde das experimentelle Variogramm aus der Variogrammwolke abgeleitet und die Kennzahlen (Sill, Range und Nugget) ermittelt.

Der Schwellenwert (Sill) und damit angenähert die Varianz des gesamten Datensatzes war mit 3,48 auf dem Feld R1 bzw. 2,22 auf dem Feld R8 gering (Abb. 10). Die Aussageweite (Range) lag für die ECa auf dem Feld R1 bei 39,5 m. Auf dem Feld R8 lag die Aussageweite mit 37,4 m auf dem gleichen Niveau. Über diese Distanz hinaus konnte keine Aussage mehr über den räumlichen Zusammenhang der Daten getroffen werden. Für die ECa auf dem Feld R1 wurde kein Nugget Effekt beobachtet. Für das Feld R8 lag der Nugget Effekt bei 0,25 und damit relativ niedrig. Die kleinräumige Varianz bzw. der eventuelle Messfehler waren also relativ gering. Für beide Felder wies die Variogrammwolke (Abb. 10) bzw. das daraus abgeleitete experimentelle Variogramm (nicht dargestellt) darauf hin, dass die Daten bis zu einer Distanz von ca. 40 m autokorreliert waren. Eine Interpolation mit einem geostatistischen Verfahren war damit also zulässig. Daher wurde das theoretische Variogramm konstruiert und zur Interpolation der Daten mittels Ordinary Kriging genutzt.

3.2.1.2 Homogenität des Bodensubstrates auf den Schlägen R1 und R8

Auf dem Feld R1 variierte die ECa von $26,1 \text{ mS m}^{-1}$ bis $38,3 \text{ mS m}^{-1}$ und lag im Mittel bei $32,2 \text{ mS m}^{-1}$ (Abb. 11). Zonen mit niedrigerer ECa sind im Südosten des Feldes zu erkennen, während die ECa im Nordwesten tendenziell höher liegt. Insgesamt scheint eine

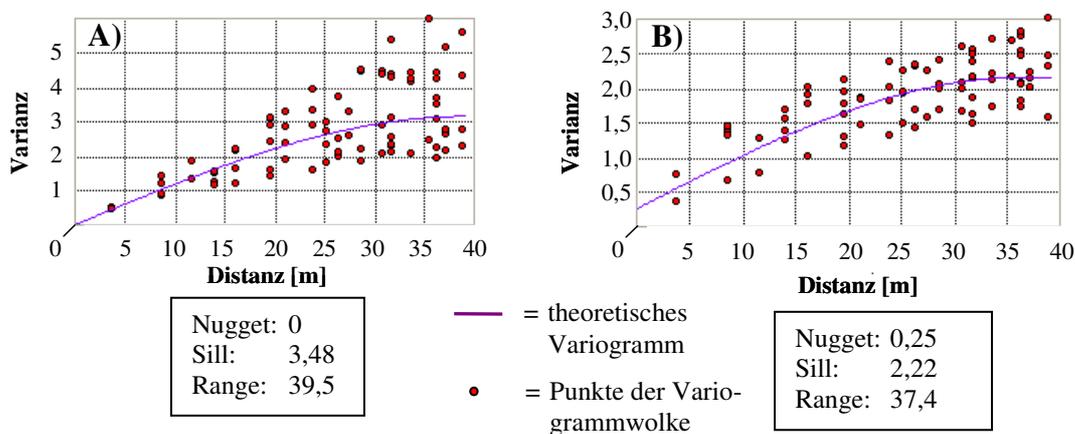


Abb. 10: Variogrammwolken und theoretische Variogramme für die scheinbare elektrische Leitfähigkeit des Bodens der Schläge R1 (A) und R8 (B) aus der Region Aldenhoven

leichte Anisotropie vorzuliegen, die Zonengrenzen verlaufen tendenziell in südwestliche bzw. nordöstliche Richtung.

Auf dem Feld R8 lag die ECa mit einem Mittel von $30,3 \text{ mS m}^{-1}$ geringfügig niedriger als auf dem Feld R1. Die minimale ECa lag mit $26,0 \text{ mS m}^{-1}$ auf dem gleichen Niveau wie auf dem Feld R1, während die maximale ECa mit $34,8 \text{ mS m}^{-1}$ niedriger lag.

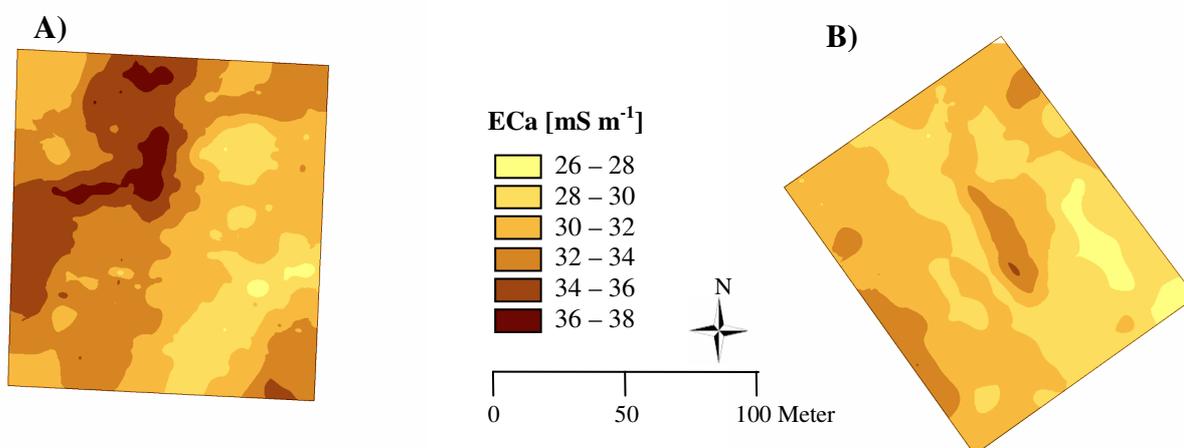


Abb. 11: Räumliche Darstellung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit nach Interpolation mit Ordinary Kriging für die Schläge R1 (A) und R8 (B) aus der Region Aldenhoven

3.2.2 Räumliche Verteilung von Befallsparametern von *Fusarium* spp. an Weizenkörnern

Im folgenden Kapitel sind die Ergebnisse der räumlichen Analyse der Befallsparameter dargestellt. Eine Übersicht aller Aggregationsindizes ist in Tabelle 16 (Seite 76) dargestellt.

3.2.2.1 Befallshäufigkeit im Jahr 2006

Feld K5

Die kumulierte Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. lag im Schlag K5 im Mittel bei 1,3 % (Abb. 12). Im zentralen und im südwestlichen Bereich des Feldes wurden die höchsten Werte für die Befallshäufigkeit festgestellt. Die Aggregationsanalyse wies für den nordöstlichen Teil des Feldes ein Gap-Cluster aus. Der Aggregationsindex ließ mit einem Wert von 1,149 auf eine Tendenz zur Aggregation schließen ($p > 0,814$).

Die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* lag im Durchschnitt bei 1,0 %. Da der Gesamtbefall mit *Fusarium* spp. im Feld K5 zum größten Teil durch den Befall mit *F. avenaceum* zustande kam, war das Verteilungsmuster dem der kumulierten Befallshäufigkeit sehr ähnlich und es wird ebenfalls ein Gap-Cluster für den nordöstlichen Bereich des Feldes abgegeben. Der Aggregationsindex von 1,172 ließ auf eine Tendenz zur Aggregation schließen ($p > 0,823$).

Mit 0,3 % lag die Befallshäufigkeit von *F. graminearum* niedriger als die von *F. avenaceum*. Im westlichen und östlichen Teil des Schlages wurden Gap-Cluster ausgewiesen. Das Gap-Cluster im Osten war nicht deckungsgleich mit dem von *F. avenaceum*. Die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit lies sich nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden, wie der Aggregationsindex von 0,971 zeigte.

Die Arten *F. culmorum* und *F. poae* konnten in den Rasterproben des Feldes K5 nicht isoliert werden.

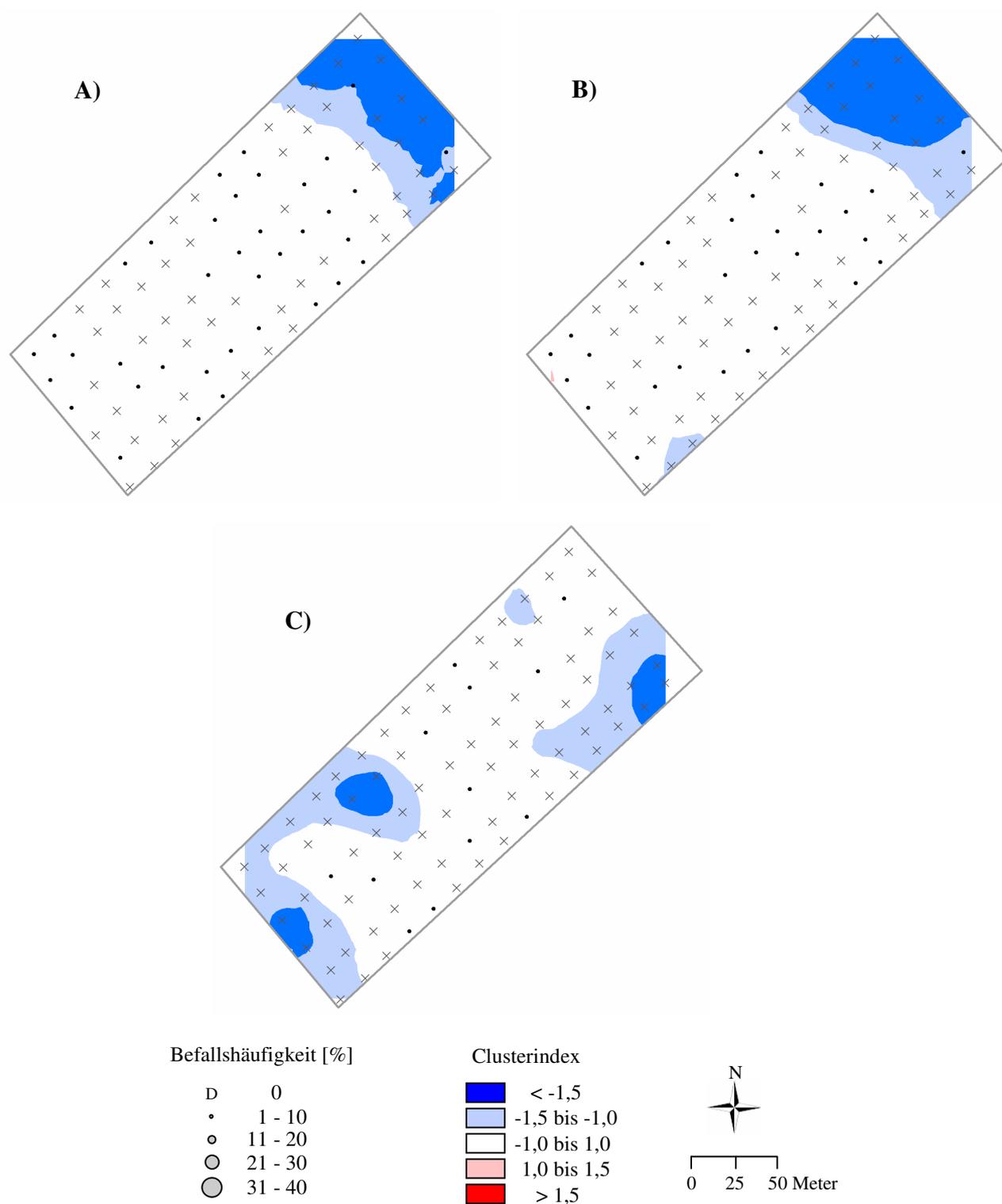


Abb. 12: Räumliche Darstellung der Befallshäufigkeit [%] an 90 Probenahmepunkten und des Clusterindex der Befallshäufigkeit auf dem Schlag K5; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. poae*

Feld M1

Im Schlag M1 lag die kumulierte Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* mit einem Mittelwert von 0,8 % etwas niedriger als im Feld K5 und variierte von 0 % bis 3,6 % (Abb. 13). Befallene Körner wurden hauptsächlich im nordwestlichen und im südöstlichen Teil des Feldes gefunden. Mit einem Aggregationsindex von 1,070 war die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit von einer zufälligen Verteilung nicht zu unterscheiden.

Der Befall mit *F. avenaceum* lag im Mittel bei 0,5 %. Der Befall konzentrierte sich auf den Nordwesten und den Südosten des Feldes. Ein großes Gap-Cluster verlief quer über das Feld zwischen den Befallszonen. Mit einem Aggregationsindex von 1,070 trat die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* im Feld M1 jedoch nicht aggregierter auf, als man dies von einer zufälligen Verteilung erwarten würde.

Mit einer Befallshäufigkeit von 0,4 % lag *F. graminearum* auf demselben Niveau wie *F. avenaceum*, trat jedoch in anderen Teilen des Feldes auf. Das Patch-Cluster im Westen des Feldes liegt in einer Zone, in der kein Kornbefall mit *F. avenaceum* festgestellt wurde, während das größere Gap-Cluster im südöstlichen Teil des Feldes liegt, wo in einem Großteil der Proben *F. avenaceum* von Körnern isoliert werden konnte. Mit einem Aggregationsindex von 1,000 zeigte jedoch auch die Befallshäufigkeit von *F. graminearum* eine zufällige Verteilung.

Ebenso wie im Feld K5 konnten die Arten *F. culmorum* und *F. poae* in den Rasterproben des Feldes M1 nicht isoliert werden.

3.2.2.2 Befallshäufigkeit im Jahr 2007

Feld R1

Im Feld R1 lag die kumulierte Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* mit einem Mittel von 22,2 % wesentlich höher als in den Schlägen des Jahres 2006 (Abb. 14). An jedem Probenahmepunkt konnte *Fusarium spp.* isoliert werden, der Befall variierte von 7,2 % bis 42,9 %. Höhere Befallswerte fanden sich vor allem im westlichen und südöstlichen Teil des Feldes, wohingegen sich im nördlichen Bereich vor allem niedrigere Befallswerte fanden. Insgesamt wurden fünf Cluster ausgewiesen. Von den drei Gap-Cluster erstreckte sich das größte über den gesamten nördlichen Bereich. Zwei kleinere Gap-Cluster befanden sich im südwestlichen und im östlichen Teil des Feldes. Im westlichen Teil des Feldes wurde ein großes Patch-Cluster ausgewiesen. Ein kleineres befand sich im südöstlichen Teil des Feldes.

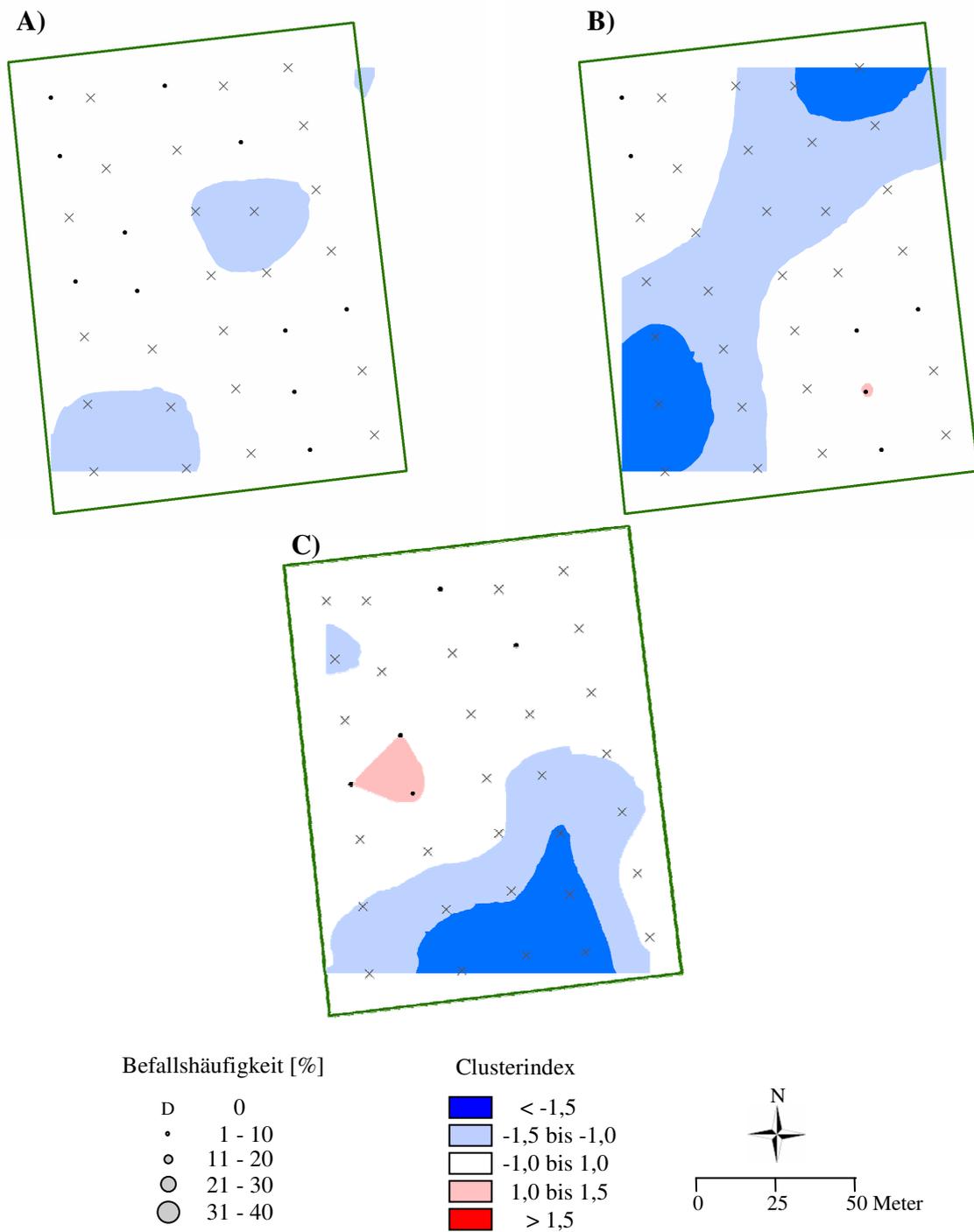


Abb. 13: Befallshäufigkeit an 35 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallshäufigkeit auf dem Schlag M1; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. poae*

Trotz der relativ großen Anzahl von Clustern, lies sich die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. mit einem Aggregationsindex von 1,107 jedoch nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Der durchschnittliche Befall mit *F. avenaceum* lag bei 13,5 %. Damit trat *F. avenaceum* in diesem Feld deutlich häufiger auf als andere *Fusarium*-Arten. Im zentralen bis westlichen Teil des Feldes traten die höchsten Befallshäufigkeiten auf. Im nördlichen und südöstlichen Bereich des Feldes lag die Befallshäufigkeit tendenziell niedriger. Die Aggregationsanalyse wies zwei Patch-Cluster im zentral-westlichen und im südlichen Bereich des Feldes aus. Außerdem wurde ein großes Gap-Cluster im nördlichen und zwei kleinere im östlichen und südöstlichen Bereich des Feldes ausgewiesen. Die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit zeigte mit einem Aggregationsindex von 1,197 eine Tendenz zur Aggregation ($p > 0,872$).

Im Feld R1 wurde an nur einem Probenahmepunkt ein Kornbefall mit *F. culmorum* festgestellt. Die Befallshäufigkeit lag dort bei 8,9 %. An diesem Messpunkt wurde *F. avenaceum* als einzige weitere Art isoliert. *F. graminearum* und *F. poae* konnten dort jedoch nicht nachgewiesen werden. Da nur ein Messwert vorlag, konnte eine Aggregationsanalyse nicht durchgeführt werden.

Die Befallshäufigkeit mit *F. graminearum* lag im Durchschnitt 5,4 %. Höhere Befallshäufigkeiten fand man im zentralen bis nördlichen Teil des Feldes sowie im südöstlichen Teil. Es wurden jedoch keine Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,013 war die Verteilung von einer zufälligen Verteilung nicht zu unterscheiden.

Mit einer Befallshäufigkeit von 2,9 % trat *F. poae* seltener auf als *F. avenaceum* und *F. graminearum*. Ähnlich wie bei *F. avenaceum* herrschten im nördlichen Teil des Feldes niedrige Werte für die Befallshäufigkeit vor. Für beide Arten wurde dort ein Gap-Cluster ausgewiesen. Im westlichen und südöstlichen Teil wies *F. poae* wie *F. avenaceum* höhere Befallshäufigkeiten auf. Für *F. poae* wird im Südosten ein Patch-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,483 wies auf eine starke Aggregation hin, die statistisch signifikant war ($p > 0,986$).

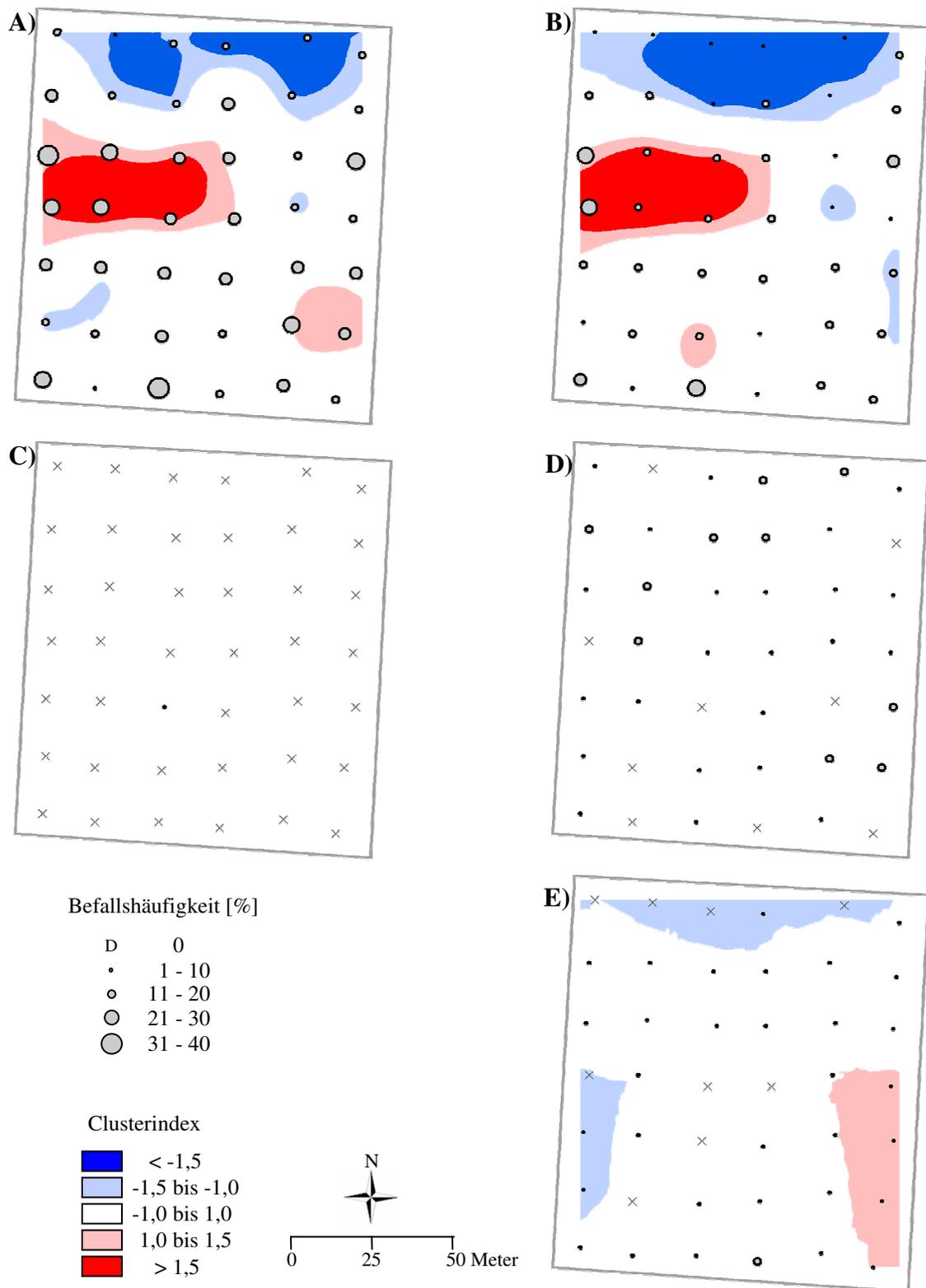


Abb. 14: Befallshäufigkeit an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallshäufigkeit auf dem Schlag R1; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. culmorum*; D) *F. graminearum*; E) *F. poae*

Feld R8

Die höchste durchschnittliche Befallshäufigkeit von *Fusarium spp.* wurde mit 49,7 % im Feld R8 festgestellt (Abb. 15). Auch hier wurde an jedem Probenahmepunkt *Fusarium spp.* nachgewiesen. Die Befallshäufigkeit variierte zwischen 28,6 % und 73,2 %. Die höchsten Werte für die Befallshäufigkeit wurden im nordöstlichen Bereich des Feldes R8 gefunden. Im südlichen Bereich lag die Befallshäufigkeit deutlich niedriger. Im zentralen bis nordöstlichen Teil des Feldes wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen und im südlichen Bereich ein Gap-Cluster. Die Befallshäufigkeit zeigte im Feld R8 mit einem Aggregationsindex von 1,245 eine Aggregation, die statistisch absicherbar war ($p > 0,911$).

Die Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* lag mit Werten zwischen 0 % und 14,3 % deutlich niedriger als im Feld R1. Der durchschnittliche Befall lag bei 4,0 %. Auffällig ist die Zone mit geringem Befall bzw. befallsfreie Zone vom nördlichen bis zum südöstlichen Bereich des Feldes und die Reihe mit Probenahmepunkten mit relativ hoher Befallshäufigkeit die sich vom Südosten zum Nordwesten durch das Feld zieht. Im nordwestlichen Bereich des Feldes wird ein Patch-Cluster ausgewiesen und im Südosten in kleines Gap-Cluster. Zusätzlich wird die gesamte befallsarme Zone vom Norden bis zum Südwesten des Feldes als Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,225 zeigte sich eine Aggregation die sich statistisch absichern ließ ($p > 0,902$).

Auf dem Feld R8 konnte *F. graminearum* in jeder Probe nachgewiesen werden. Die durchschnittliche Befallshäufigkeit lag bei 11,1 %. Eine Anhäufung hoher Befallshäufigkeiten ist im zentralen bis östlichen Teil des Feldes zu beobachten. Dort wies *F. avenaceum* keine oder nur geringe Befallshäufigkeiten auf. Im Süden des Feldes konnte man ein kleines Gap-Cluster erkennen. Mit einem Aggregationsindex von 1,145 zeigte sich eine Tendenz zur Aggregation ($p > 0,822$).

Die Befallshäufigkeit mit *F. poae* mit 34,7 % wesentlich höher als auf dem Feld R1 und variierte von 16,1 % bis 50,0 %. Damit war *F. poae* die mit Abstand häufigste Art auf dem Feld R8. Wie bei *F. graminearum*, häuften sich im nordöstlichen Teil des Feldes höhere Werte für die Befallshäufigkeit, es wurden jedoch keine Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,042 ähnelte die räumliche Verteilung einer zufälligen Verteilung und ließ sich von dieser statistisch nicht unterscheiden.

Die Art *F. culmorum* konnte im Feld R8 nicht isoliert werden.

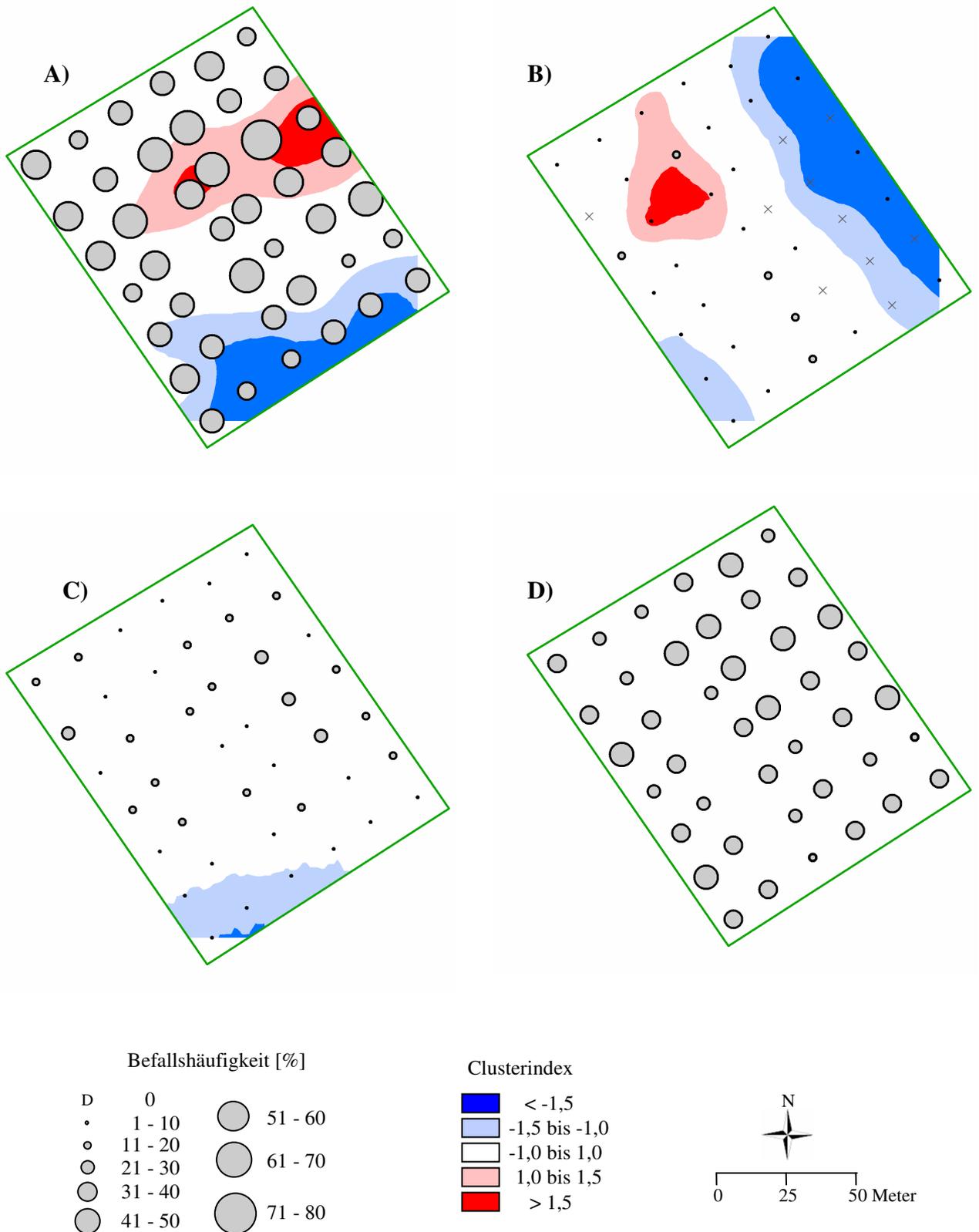


Abb. 15: Befallshäufigkeit an 42 Probenahmeorten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallshäufigkeit auf dem Schlag R8; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. graminearum*; D) *F. poae*

3.2.2.3 Befallsintensität im Jahr 2006

Feld K5

Die durchschnittliche Intensität des Kornbefalls mit *Fusarium spp.* lag bei 13 pg mg^{-1} (Abb. 16). An zwei Probenahmepunkten wurde keine pilzliche Biomasse nachgewiesen. Hohe Befallsintensitäten fanden sich im nordöstlichen und im zentralen Teil des Feldes. Im östlichen Teil des Feldes wurde zwar ein Gap-Cluster ausgewiesen, die räumliche Verteilung der Befallsintensität zeigte jedoch mit einem Aggregationsindex von 0,791 eine deutliche Tendenz zur Gleichverteilung ($p > 0,857$).

Die Befallsintensität von *F. avenaceum* lag im Mittel bei 8 pg mg^{-1} . Höhere Befallsintensitäten wurden im zentralen und im östlichen Bereich des Feldes beobachtet. Die Aggregationsanalyse wies keine Cluster aus und mit einem Aggregationsindex von 0,701 zeigte die Befallsintensität von *F. avenaceum* eine regelmäßige Verteilung ($p > 0,964$).

Die Befallsintensität von *F. culmorum* lag nur an zwei Probenahmepunkten über der Nachweisgrenze. Es wurden Befallsintensitäten von 3 pg mg^{-1} und 5 pg mg^{-1} erreicht. Im nordöstlichen Teil wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex zeigte mit 0,895 eine zufallsähnliche Verteilung an.

Die durchschnittliche Befallsintensität mit *F. graminearum* lag im Schlag K5 bei 3 pg mg^{-1} . Der Befall mit *F. graminearum* war überwiegend auf den westlichen Teil des Feldes konzentriert. Im nordöstlichen Teil des Feldes lag die Befallsintensität an nur zwei Probenahmepunkten über der Nachweisgrenze. Wie bei *F. culmorum* lies sich auch hier ein Gap-Cluster erkennen. Mit einem Aggregationsindex von 0,994 war die räumliche Verteilung der Befallsintensität von *F. graminearum* jedoch auch nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Eine Befallsintensität mit *F. poae* konnte im Schlag K5 nur an zwei Punkten ermittelt werden. Die Befallsintensität lag an diesen beiden Punkten bei 24 pg mg^{-1} bzw. 38 pg mg^{-1} . Daraus ergab sich eine durchschnittliche Befallsintensität aller Proben von 3 pg mg^{-1} . Die beiden Messpunkte lagen im nordöstlichen bzw. im südwestlichen Teil des Feldes. Im zentralen Bereich wurde ein Gap-Cluster ausgegeben. In diesem Bereich wies *F. avenaceum* an vielen Probenahmepunkten eine relativ hohe Befallsintensität auf. Die räumliche Verteilung der Befallsintensität mit *F. poae* wurde mit einem Aggregationsindex von 0,944 als eine zufallsähnliche Verteilung charakterisiert.

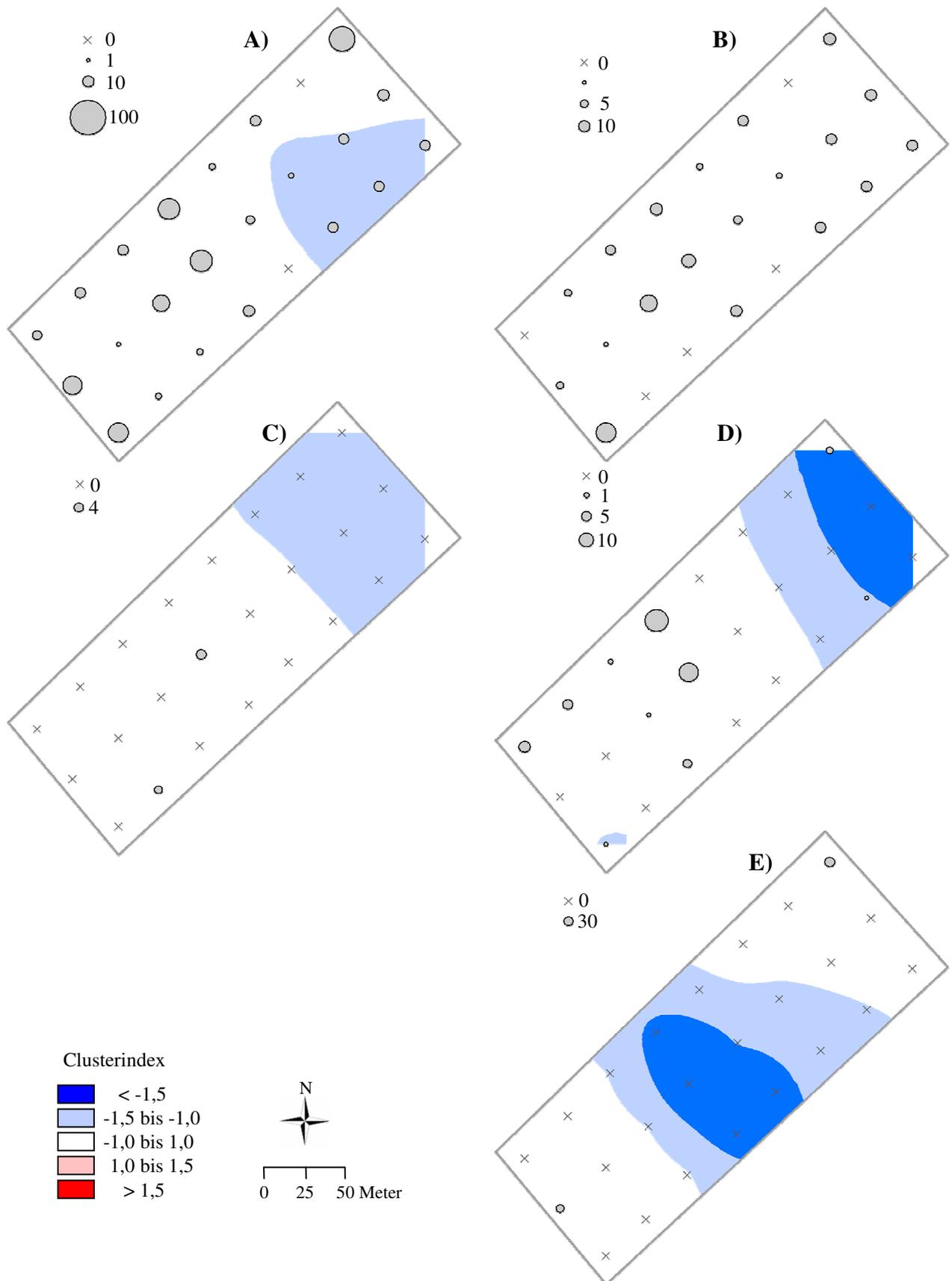


Abb. 16: Befallsintensität [pg mg^{-1}] an 24 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallsintensität auf dem Schlag K5; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. culmorum*; D) *F. graminearum*; E) *F. poae*; Symbolgröße proportional zur Intensität des Kornbefalls

Feld M1

Mit 18 pg mg^{-1} lag die durchschnittliche Befallsintensität im Feld M1 etwas höher als in K5 (Abb. 17). An nur an fünf von zwölf Messpunkten lag die pilzliche Biomasse von *Fusarium spp.* über der Nachweisgrenze. Vier dieser Probenahmepunkte lagen im nordöstlichen Bereich des Feldes. Der gesamte westliche Teil des Feldes bis zum zentral-östlichen Teil wurde als Gap-Cluster ausgewiesen. Im Gegensatz zum Feld K5 ähnelte das Auftreten der Befallshäufigkeit im Feld M1 mit einem Aggregationsindex von 0,998 einer zufälligen Verteilung und ließ sich von dieser statistisch nicht unterscheiden.

An nur drei Probenahmepunkten wurde *F. avenaceum* nachgewiesen. Die Befallsintensität lag im Mittel aller Proben bei 1 pg mg^{-1} . Die drei Probenahmepunkte lagen im südöstlichen und im nordöstlichen Bereich des Feldes. Im nordwestlichen Teil des Feldes wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex zeigte mit einem Wert von 1,010 eine Verteilung ähnlich einer Zufallsverteilung an.

Auch die Befallsintensität von *F. culmorum* lag im Schlag M1 in nur 2 Fällen über der Nachweisgrenze. Mit 8 pg mg^{-1} an beiden Messpunkten lag das Niveau etwas höher als im Schlag K5. Ähnlich wie bei der Befallsintensität von *F. avenaceum* wird im nordwestlichen Teil ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,901 lies sich die räumliche Verteilung jedoch nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Die Befallsintensität für *F. graminearum* lag im Durchschnitt des Feldes bei 1 pg mg^{-1} . An vier Probenahmepunkten im nordöstlichen Teil des Feldes lag die Befallsintensität über der Nachweisgrenze. Die Probenahmepunkte befanden sich in räumlicher Nähe zueinander. Dort wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen und im westlichen und südwestlichen Teil des Feldes ein Gap-Cluster. Mit einem Aggregationsindex von 1,191 ließ sich eine Aggregation feststellen, die sich statistisch absichern ließ ($p > 0,903$).

An nur zwei Messpunkten lag die Befallsintensität von *F. poae* über der Nachweisgrenze. Diese Punkte befanden sich im nordöstlichen und im südlichen Teil des Feldes. Die Befallsintensität lag mit 48 pg mg^{-1} und 124 pg mg^{-1} auf einem wesentlich höherem Niveau als bei den anderen Arten. Im westlichen und zentralen Bereich wurde ein großes Gap-Cluster ausgewiesen. Ähnlich wie in Schlag K5, lag mit einem Aggregationsindex von 0,973 eine zufallsähnliche Verteilung vor.

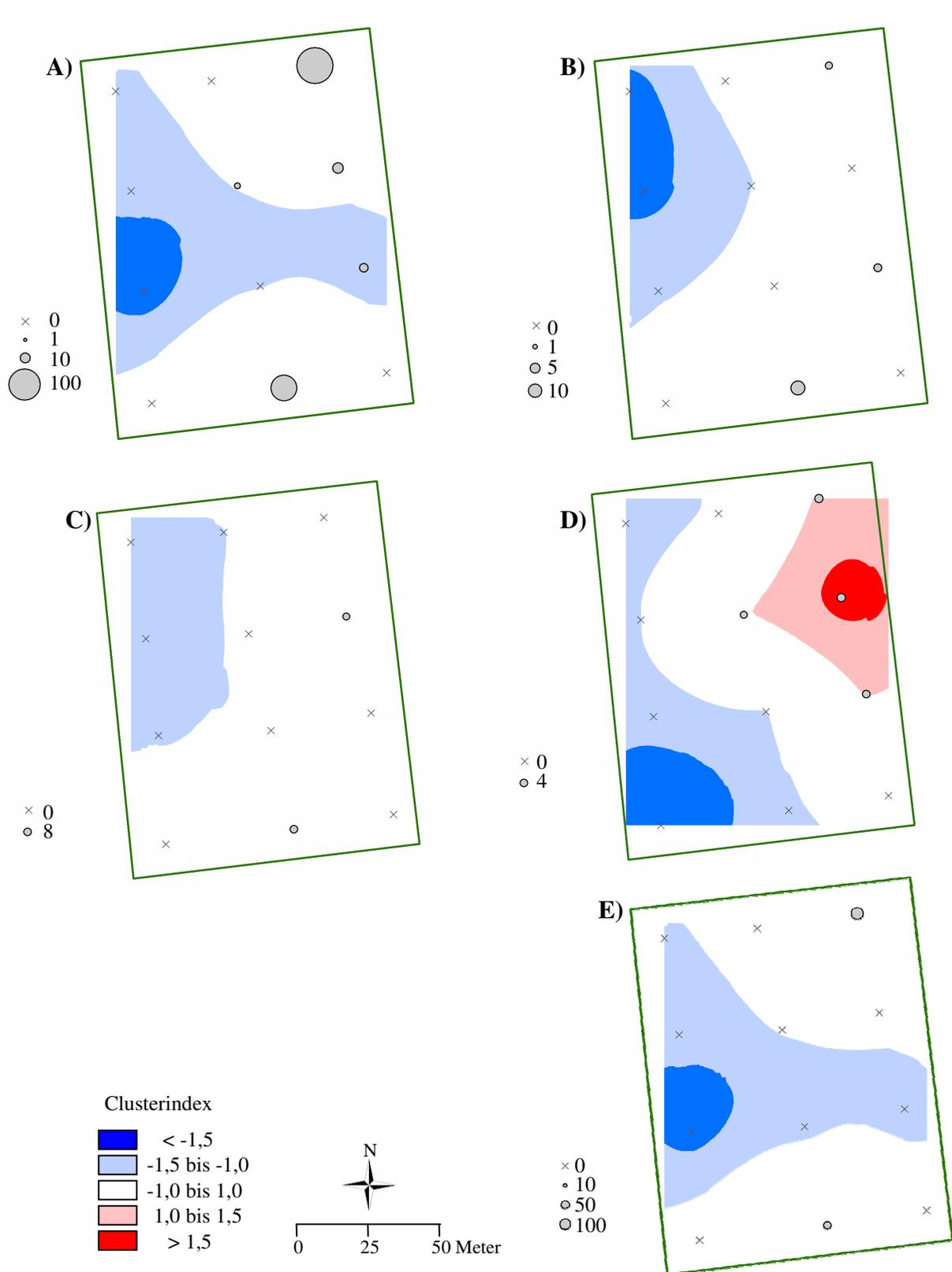


Abb. 17: Befallsintensität [pg mg^{-1}] an 12 Probenahme Punkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallsintensität auf dem Schlag M1; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. culmorum*; D) *F. graminearum*; E) *F. poae*; Symbolgröße proportional zur Intensität des Kornbefalls

3.2.2.4 Befallsintensität im Jahr 2007

Feld R1

Die Befallsintensität aller *Fusarium*-Arten lag im Feld R1, mit einer durchschnittlichen Befallsintensität von 400 pg mg^{-1} , auf einem höherem Niveau als in den Feldern K5 und M1 aus dem Jahr 2006 (Abb. 18). An allen Probenahmepunkten wurde *Fusarium* spp. nachgewiesen. Im Nordwesten des Feldes konnte man einige Messpunkte mit hohen Befallsintensitäten erkennen, ebenso wie im Süden. Ansonsten war kein klares Muster erkennbar und es wurden auch keine Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,853 zeigte die Befallsintensität eine Tendenz zur gleichmäßigen Anordnung ($p > 0,820$).

Die Befallsintensität von *F. avenaceum* lag im Mittel bei 89 pg mg^{-1} und damit deutlich höher als in K5 und M1. Auffällig sind einige Messpunkte im westlichen Teil des Feldes, wo relativ hohe Befallsintensitäten in räumlicher Nähe auftraten. Im südwestlichen um im nördlichen Teil des Feldes wurden durch die Aggregationsanalyse je ein kleines Gap-Cluster ausgewiesen und ein Aggregationsindex von 0,845 errechnet. Damit war die räumliche Anordnung der Befallsintensität regelmäßiger als dies von einer zufällig verteilten Probe erwartet würde ($p > 0,832$).

An zwei Drittel der Messpunkte konnte die Befallsintensität mit *F. culmorum* bestimmt werden. An den restlichen Messpunkten lag die Befallsintensität unter der Nachweisgrenze. Sie variierte in den belasteten Proben zwischen 2 pg mg^{-1} und 329 pg mg^{-1} . Im Mittel aller Proben lag sie bei 17 pg mg^{-1} . Es wurden keine Cluster ermittelt. Der Aggregationsindex lag für die Befallsintensität mit *F. culmorum* im Feld R1 bei 0,976 und wies damit auf eine zufallsähnliche Verteilung hin.

Die Befallsintensität von *F. graminearum* lag im Mittel bei 118 pg mg^{-1} . Höhere Befallsintensitäten konnten besonders in der nördlichen Hälfte des Schlages gefunden werden. Analog zu *F. avenaceum*, befinden sich einige Messpunkte mit hohen Befallsintensitäten von *F. graminearum* im nordwestlichen Teil des Feldes in räumlicher Nähe. Es wurden aber weder Patch- noch Gap-Cluster ausgegeben. Der Aggregationsindex von 0,834 wies auf eine Tendenz zur Gleichverteilung hin ($p > 0,856$).

An gut einem Drittel aller Messpunkte des Schlages R1 konnte die Befallsintensität mit *F. poae* bestimmt werden und variierte dort zwischen 30 pg mg^{-1} und 1044 pg mg^{-1} bei einer mittleren Befallsintensität aller Proben von 176 pg mg^{-1} . Wie bei *F. avenaceum* und *F. graminearum* fand man eine Anhäufung höherer Befallsintensitäten im nordwestlichen Teil des Feldes. Es wurde weder Patch- noch Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem

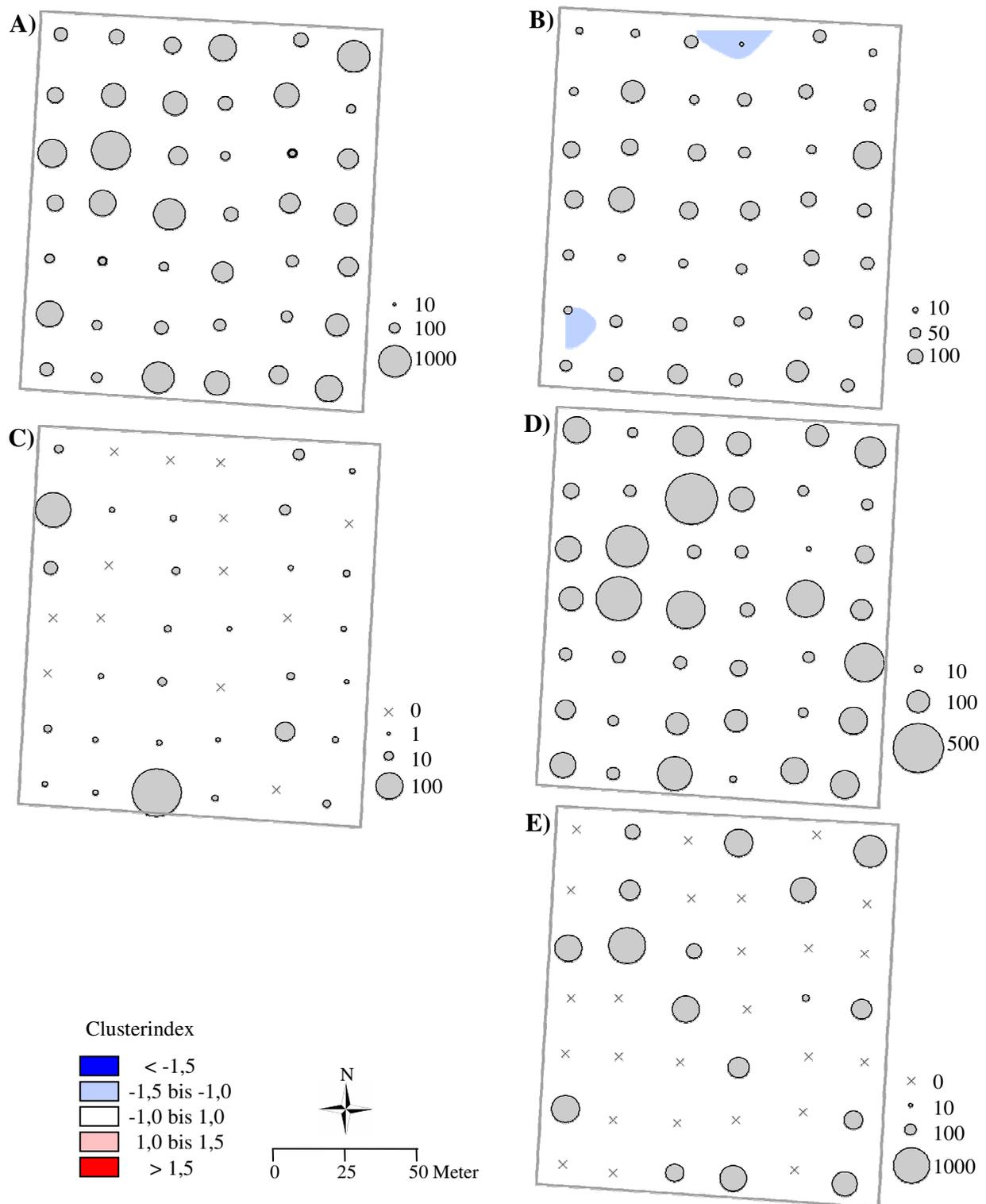


Abb. 18: Befallsintensität [pg mg^{-1}] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallsintensität auf dem Schlag R1; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. culmorum*; D) *F. graminearum*; E) *F. poae*; Symbolgröße proportional zur Intensität des Kornbefalls

Aggregationsindex von 0,831 tendierte die räumliche Verteilung der Befallsintensität in Richtung einer regelmäßigen Verteilung ($p > 0,887$).

Feld R8

Die höchste Befallsintensität mit *Fusarium spp.* wurde im Feld R8 festgestellt (Abb. 19). Sie lag im Mittel bei 1785 pg mg^{-1} und variierte zwischen 149 pg mg^{-1} und 5951 pg mg^{-1} . Im nordöstlichen Teil des Feldes kann man eine Anhäufung von Messpunkten mit hohen Befallsintensitäten erkennen, während im westlichen und im südöstlichen Teil die Befallsintensität tendenziell geringer war. Die Aggregationsanalyse wies auch im westlichen und südöstlichen Teil je ein Gap-Cluster aus und im nordöstlichen Teil ein Patch-Cluster. Der Aggregationsindex von 0,930 weist jedoch auf eine zufallsähnliche Verteilung hin.

Die Befallsintensität von *F. avenaceum* lag mit einer durchschnittlichen Befallsintensität von 12 pg mg^{-1} niedriger als im Feld R1. Einige Messpunkte mit relativ hohen Messwerten lagen im nördlichen Teil des Feldes in räumlicher Nähe während im südöstlichen Bereich niedrigere Befallsintensitäten häufiger zu finden waren. Im südöstlichen Bereich des Feldes wurde ein relativ großes Gap-Cluster ausgewiesen. Ein Aggregationsindex von 1,089 zeigt eine zufallsähnliche Verteilung.

An gut drei Viertel aller Messpunkte wurde *F. culmorum* nachgewiesen wobei die Befallsintensität aller Proben bei durchschnittlich 17 pg mg^{-1} lag. Höhere Befallsintensitäten waren besonders im östlichen und südöstlichen Teil des Feldes zu finden. Im westlichen und zentralen Teil des Feldes wurde ein Gap-Cluster ausgegeben und im östlichen Teil ein Patch-Cluster. Ein zweites, wesentlich kleineres Patch-Cluster befand sich im südlichen Teil des Feldes. Der Aggregationsindex von 1,808 zeigte eine sehr starke Aggregation an, die sich statistisch absichern ließ ($p > 0,999$).

Die Befallsintensität von *F. graminearum* lag mit einem Mittel von 363 pg mg^{-1} tendenziell höher als im Feld R1. Wie im Feld R1 wurden weder Patch- noch Gap-Cluster ausgewiesen. Im Bereich des großen Gap-Clusters von *F. culmorum* wurden für *F. graminearum* jedoch relativ hohe Befallsintensitäten festgestellt. Die Aggregationsanalyse wies mit einem Aggregationsindex von 0,808 auf eine zufallsähnliche Verteilung hin.

An allen Messpunkten im Schlag R8 wurde *F. poae* nachgewiesen. Die Befallsintensität lag im Mittel bei 1394 pg mg^{-1} . Damit wies *F. poae* die mit Abstand höchste Befallsintensität im Schlag R8 auf. Ähnlich wie bei *F. graminearum* wurden im nördlichen Bereich des Feldes tendenziell höhere Befallsintensitäten von *F. poae* festgestellt. Ebenso

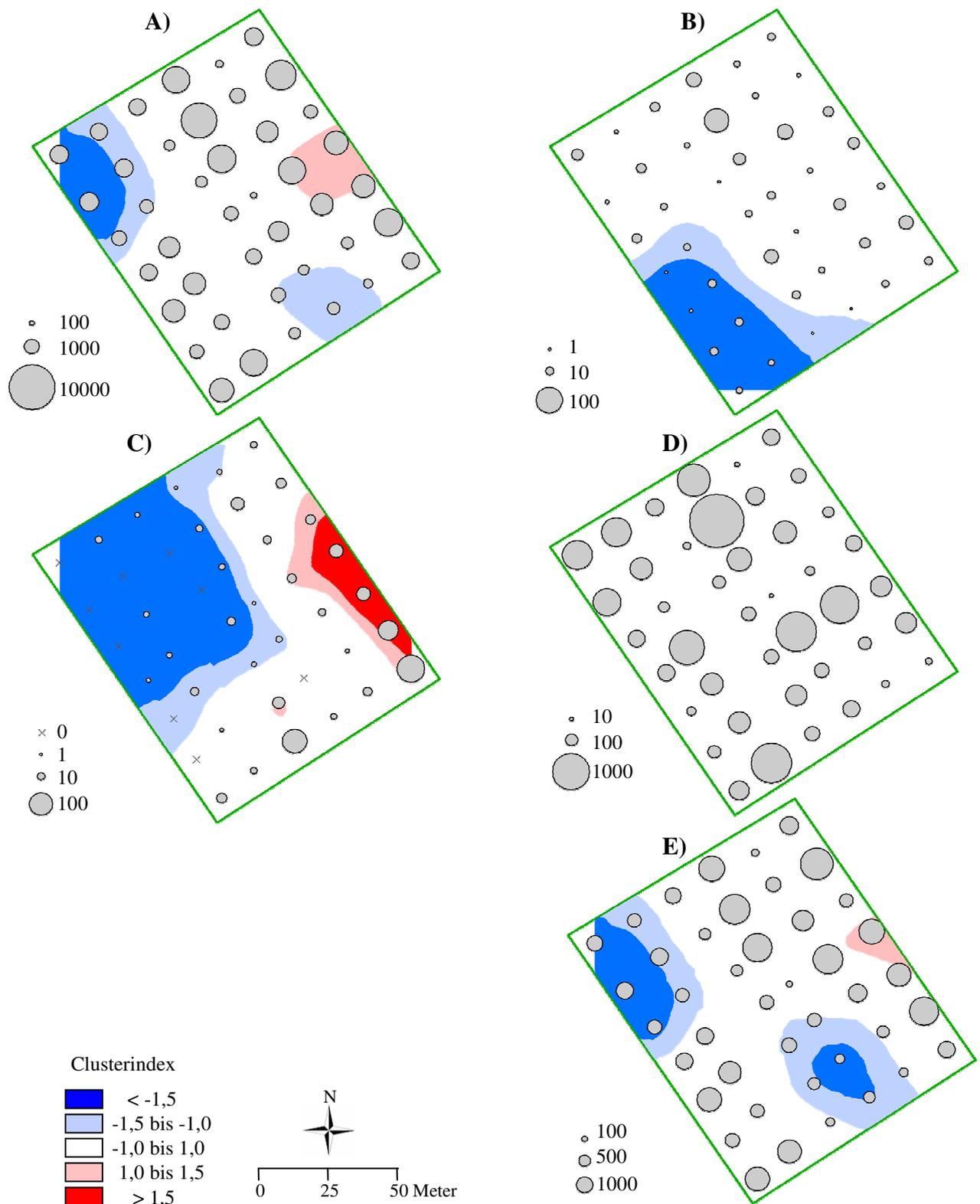


Abb. 19: Befallsintensität [pg mg^{-1}] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Befallsintensität auf dem Schlag R8; A) *Fusarium* spp.; B) *F. avenaceum*; C) *F. culmorum*; D) *F. graminearum*; E) *F. poae*; Symbolgröße proportional zur Intensität des Kornbefalls

wurden im südlichen Teil vermehrt hohe Befallsintensitäten erfasst, in einer Zone in der für *F. avenaceum* ein Gap-Cluster ausgewiesen wurde. Im westlichen Teil und im südöstlichen Teil des Feldes wurde je ein Gap-Cluster, im östlichen Teil ein Patch-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,012 zeigte die Befallsintensität, im Gegensatz zum Feld R1, keine Tendenz zur Gleichverteilung sondern wies auf eine Verteilung ähnlich einer Zufallsverteilung hin.

3.2.2.5 Mykotoxinbelastung im Jahr 2006

Feld K5

Auf dem Schlag K5 konzentrierte sich die Belastung mit **DON** auf den westlichen Teil des Feldes (Abb. 20). Dort wurde an vier Probenahmepunkten eine Belastung mit diesem Mykotoxin festgestellt und ein Patch-Cluster ausgewiesen. Der gesamte nordöstliche Teil des Feldes wurde als Gap-Cluster ausgewiesen. Im Mittel aller Proben lag die Belastung bei 53 ng g^{-1} . Der Aggregationsindex wies mit 0,953 auf eine zufällige Verteilung hin.

An nur einem Punkt wurde eine Belastung mit **3AcDON** in Höhe von 18 ng g^{-1} festgestellt. Dieses war auch der Messpunkt, an dem die höchste DON-Belastung nachgewiesen wurde. Da nur ein Messwert vorlag, konnte für 3AcDON keine räumliche Analyse durchgeführt werden.

Die Belastung mit **MON** lag auf dem Schlag K5 im Durchschnitt aller Proben bei 2 ng g^{-1} . Kontaminierte Proben finden sich tendenziell häufiger im zentralen und nordöstlichen Bereich des Feldes. Es wurden jedoch keine Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,818 lies sich die räumliche Verteilung der MON-Belastung nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

An fast allen Probenahmepunkten konnte eine Belastung mit **ENNB** nachgewiesen werden, die im Durchschnitt bei 16 ng g^{-1} lag. Höhere Belastungen fanden sich besonders an Probenahmepunkten, an denen auch höhere Belastungen mit MON nachgewiesen werden konnten. Die Aggregationsanalyse zeigte, dass die Verteilung von ENNB im Feld wesentlich gleichmäßiger war, als man dies von einer zufälligen Verteilung erwarten würde ($p > 0,995$).

Feld M1

Auf dem Schlag M1 wurde an fast allen Probenahmepunkten **DON** nachgewiesen (Abb. 21). Mit einer mittleren Belastung aller Proben von 6 ng g^{-1} , war die Kontamination geringer als auf dem Feld K5. Im nordöstlichen Teil des Feldes wurde zwar ein Patch-Cluster

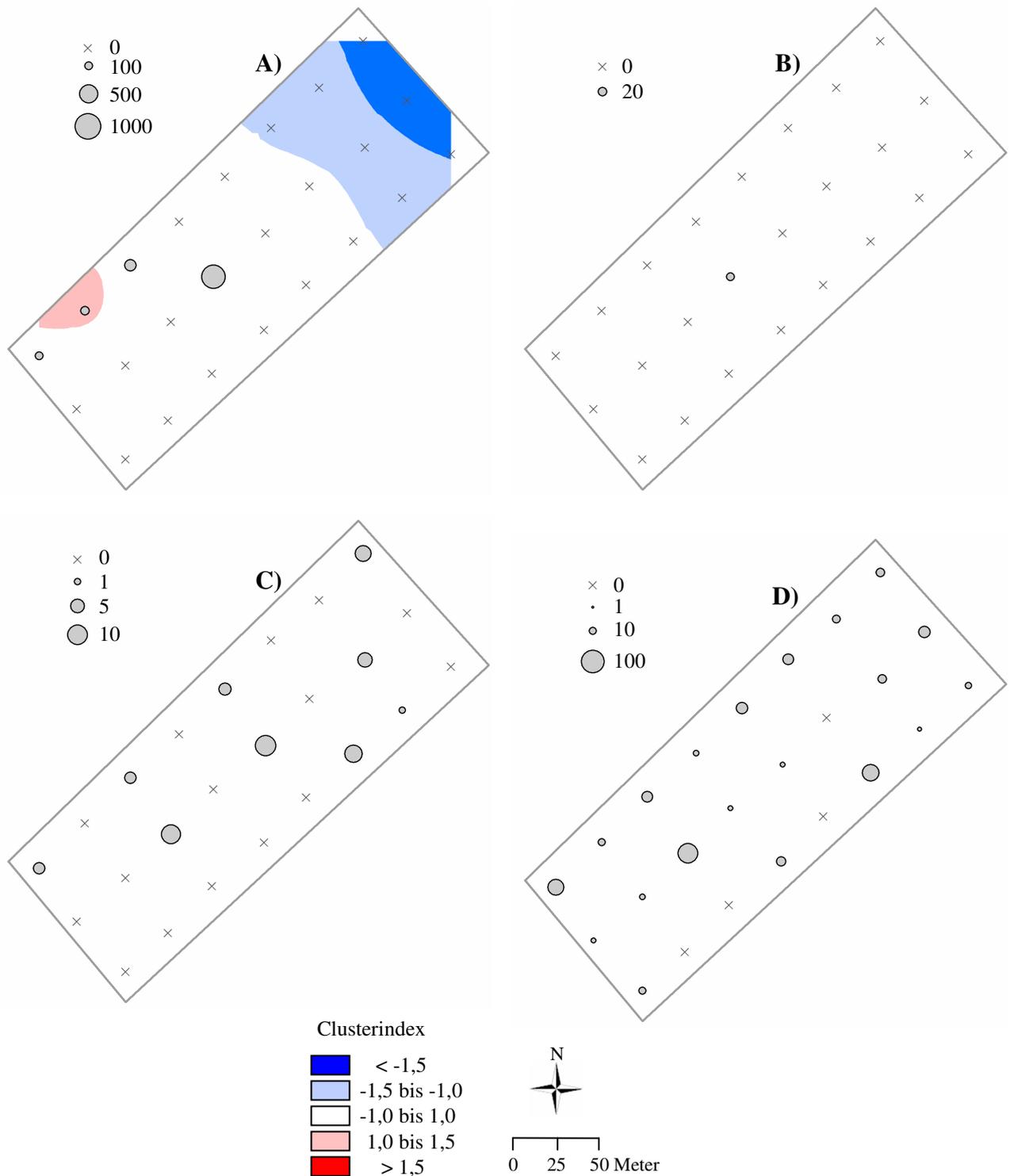


Abb. 20: Mykotoxinbelastung [ng g^{-1}] an 24 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag K5; A) DON; B) 3AcDON; C) MON; D) ENNB; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

ausgewiesen aber mit einem Aggregationsindex von 0,842 tendierte die räumliche Verteilung der DON-Belastung deutlich zu einer regelmäßigen Verteilung ($p > 0,860$).

Eine Belastung der Körner mit **ZEA** konnte an allen Probenahmepunkten festgestellt werden und lag im Mittel bei 84 ng g^{-1} . Ein kleines Patch-Cluster wurde im zentralen Bereich des Feldes und zwei kleine Gap-Cluster im nordöstlichen und nordwestlichen Teil des Feldes ausgewiesen. Die räumliche Verteilung war mit einem Aggregationsindex von 0,998 nicht von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden.

Im Schlag M1 wurde nur an einem einzigen Messpunkt eine Belastung mit **MON** nachgewiesen, die hier bei 12 ng g^{-1} lag. Eine Aggregationsanalyse für das Feld M1 ließ sich mit nur einem Messwert nicht durchführen.

An nur zwei Messpunkten wurde **ENNB** gefunden. Die Belastung an diesen Punkten lag bei 23 ng g^{-1} bzw. 115 ng g^{-1} . Der Probenahmepunkt mit der höheren ENNB-Belastung war auch der, an dem die Belastung mit MON festgestellt wurde. Im nordöstlichen Teil des Schlages M1 wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,856 zeigte die räumliche Verteilung der ENNB-Belastung eine Tendenz zur Gleichverteilung ($p > 0,819$), wenn auch nicht so deutlich wie im Feld K5.

3.2.2.6 Mykotoxinbelastung im Jahr 2007

Feld R1

Auf dem Feld R1 konnte an 30 der 42 Probenahmestellen eine Belastung mit **DON** nachgewiesen werden (Abb. 22a). Der DON-Gehalt variierte hierbei stark zwischen 35 ng g^{-1} und 1752 ng g^{-1} und lagen im Mittel aller Proben bei 338 ng g^{-1} . Im westlichen Teil des Feldes fanden sich höhere Belastungen in unmittelbarer Nachbarschaft. Das gleiche ließ sich im Nordosten für Probenahmepunkte mit geringer oder ohne Belastung feststellen. Dort wurde auch ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,072 zeigte sich eine zufällige Verteilung.

An nur drei Messpunkten wurde **NIV** detektiert. Diese Messpunkte lagen alle im südwestlichen Quadranten des Feldes. Die NIV-Belastung lag zwischen 53 ng g^{-1} und 158 ng g^{-1} und erreichte Mittel aller Proben 6 ng g^{-1} . Der gesamte nördliche und östliche Teil des Feldes wurde als zusammenhängendes Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,340 ließ auf eine Aggregation schließen, die statistisch signifikant war ($p > 0,973$).

Das Mykotoxin **T2** wurde nur im Feld R1 detektiert und auch dort nur an einem Probenahmepunkt. Die Belastung lag hier bei 7 ng g^{-1} . Eine Aggregationsanalyse konnte mit



Abb. 21: Mykotoxinbelastung [ng g^{-1}] an 12 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag M1; A) DON; B) ZEA; C) MON; D) ENNB; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

nur einem Messwert nicht durchgeführt werden.

Auch **HT2** konnte nur auf diesem Schlag nachgewiesen werden. Eine Kontamination der Proben mit HT2 trat jedoch häufiger auf als eine Kontamination mit dem verwandten Mykotoxin T2. Der Befall der belasteten Proben variierte von 5 ng g^{-1} bis 58 ng g^{-1} und lag im Mittel aller Proben bei 4 ng g^{-1} . Der Probenahmepunkt, an dem die höchste Belastung mit HT2 festgestellt wurde, war gleichzeitig der einzige, an dem eine Belastung mit T2 nachgewiesen wurde. Im südwestlichen, westlichen und östlichen Teil des Feldes wurde je ein Gap-Cluster nachgewiesen. Und im südöstlichen Teil ein kleines Patch-Cluster. Mit einem Aggregationsindex von 0,925 ließ sich die räumliche Verteilung der HT2-Belastung jedoch nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Die Belastung mit **ZEA** lag im Mittel bei 2 ng g^{-1} (Abb. 22b). Im westlichen Teil des Feldes war eine Konzentration höherer Werte zu erkennen, während in der östlichen Hälfte nur im südöstlichen Teil eine Belastung mit ZEA festgestellt werden konnte. Der gesamte nordöstliche Teil des Feldes wurde als Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,148 tendierte die räumliche Verteilung der ZEA-Belastung zur Aggregation ($p > 0,845$)

Eine Belastung mit Beauvericin (**BEA**) trat nur im Feld R1 auf und wurde dort in einem Drittel aller Proben festgestellt. Die mittlere Belastung aller Proben lag bei 2 ng g^{-1} . Die meisten belasteten Proben waren im westlichen Teil des Feldes zu finden. Im östlichen Teil des Feldes wurden einige kleine Patch-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,157 zeigte die räumliche Verteilung der BEA-Belastung eine Tendenz zur Aggregation ($p > 0,846$).

Bis auf acht Proben enthielten alle Proben von Feld R1 **MON**. Der Gehalt variierte zwischen 4 ng g^{-1} und 80 ng g^{-1} und lag mit einem Mittel von 19 ng g^{-1} deutlich höher als im Jahr 2006. Höhere Belastungen wurden besonders im nordwestlichen Bereich des Feldes nachgewiesen. Es wurden kleinere lokale Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex wies mit 1,044 auf eine Verteilung hin wie man sie von einer Zufallsverteilung erwarten würde mit einer leichten Tendenz zur Aggregation.

Die Belastung der Kornproben mit **ENNB** im Feld R1 variierte sehr stark mit Werten zwischen 4 ng g^{-1} und 1486 ng g^{-1} bei einer durchschnittlichen Belastung von 313 ng g^{-1} . Besonders in der nördlichen Hälfte des Feldes waren Proben mit einer hohen Belastung zu finden. An Probenahmepunkten mit hohen ENNB-Belastungen wurden oft auch hohe MON-Belastungen nachgewiesen. Im Westen des Feldes wurde ein Patch-Cluster und Südwesten

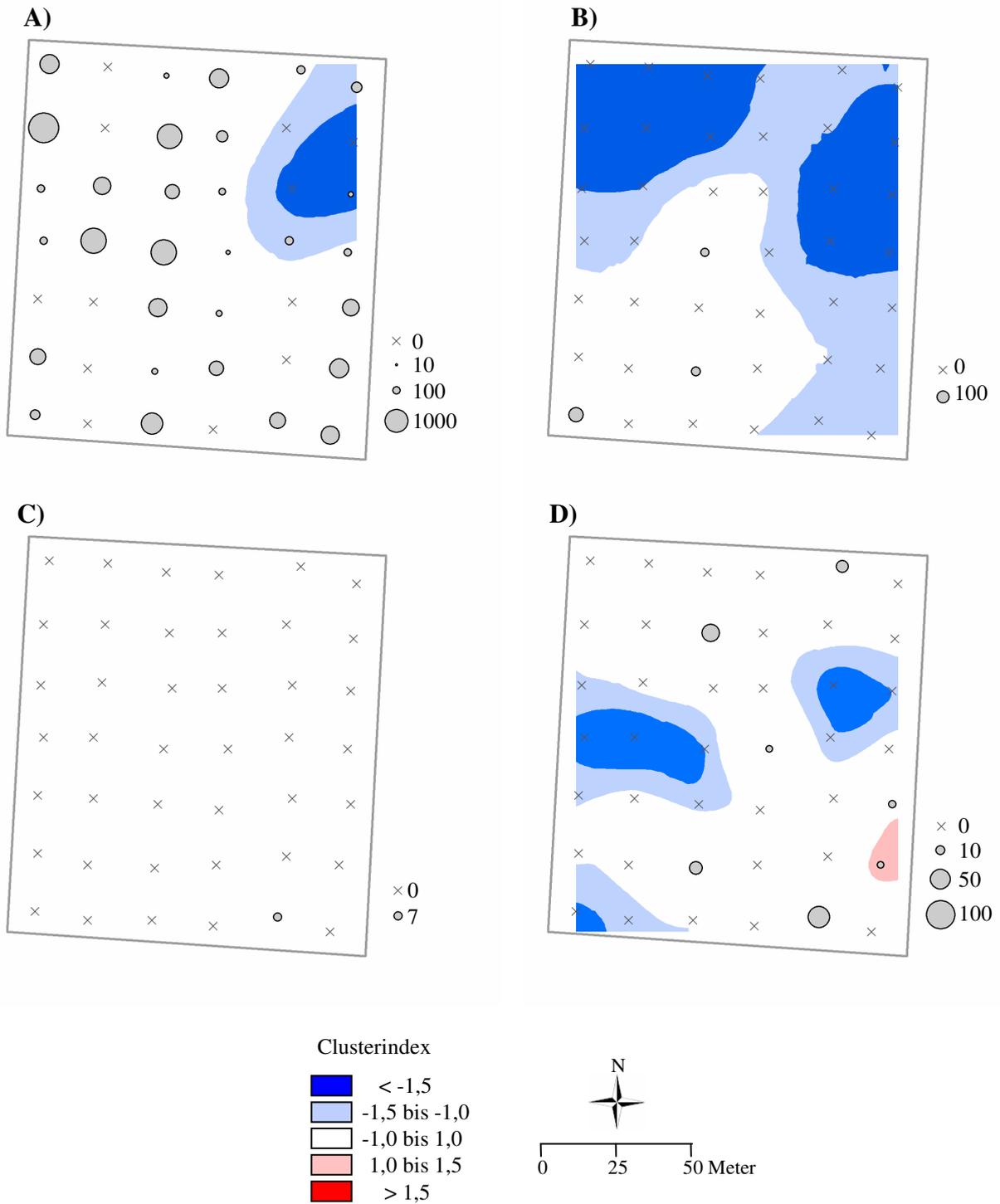


Abb. 22a: Mykotoxinbelastung [ng g⁻¹] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag R1; A) DON; B) NIV; C) T2; D) HT2; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

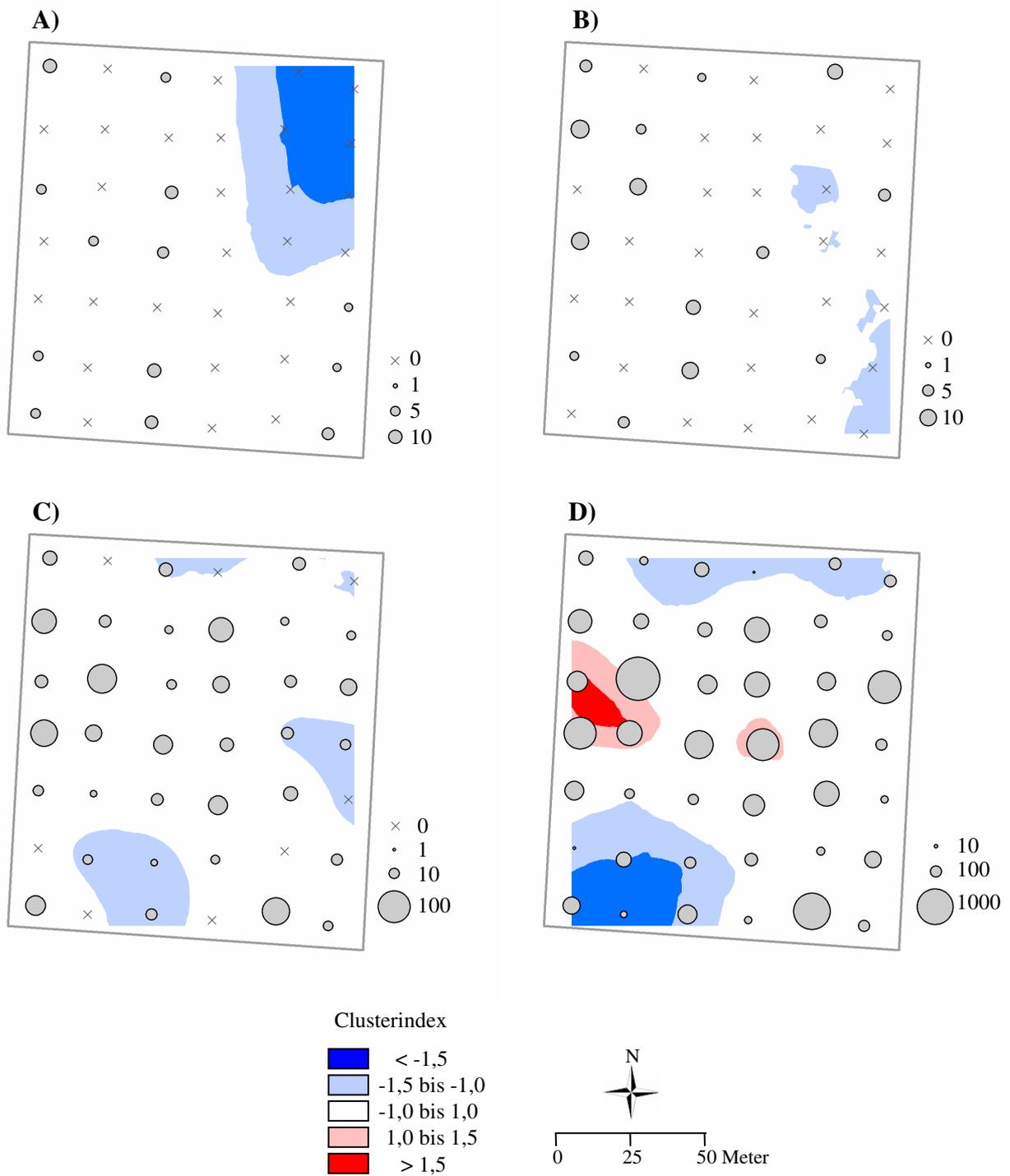


Abb. 22b: Mykotoxinbelastung [ng g^{-1}] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag R1; A) ZEA; B) BEA; C) MON; D) ENNB; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

ein Gap-Cluster ausgewiesen. Die Aggregationsanalyse ergab einen Aggregationsindex von 1,004. Damit ließ sich die Verteilung der Mykotoxinkontamination nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Feld R8

Im Feld R8 konnte nur an zwei Messpunkten kein **DON** nachgewiesen werden (Abb. 23a). An den anderen Messpunkten variierte der DON-Gehalt stark zwischen 45 ng g^{-1} und 1638 ng g^{-1} bei einem mittleren Gehalt im Feld von 512 ng g^{-1} . Im nordöstlichen Teil des Feldes ist ein Gap-Cluster zu erkennen. Die Aggregationsanalyse ergab einen Index von 0,967 was auf eine zufallsähnliche Verteilung schließen lässt.

Im Feld R8 wurde in allen Proben eine Belastung mit **NIV** nachgewiesen. Die mittlere Belastung lag bei 269 ng g^{-1} . Hohe NIV-Belastungen wurden an Punkten gefunden an denen auch die Belastung mit DON relativ hoch lag. Es wurden ein Gap-Cluster im zentralen bis östlichen Bereich des Feldes und je ein Patch-Cluster im westlichen und im südlichen Teil des Feldes ausgewiesen. Wie im Feld R1 wurde eine starke Aggregation mit einem Aggregationsindex von 1,368 beobachtet ($p > 0,964$).

Eine Belastung mit **MAS** konnte nur auf dem Feld R8 festgestellt werden. Hier war jede Kornprobe mit MAS belastet. Der Gehalt in den Proben variierte zwischen 73 ng g^{-1} und 574 ng g^{-1} bei einem mittleren Gehalt von 272 ng g^{-1} . Es waren kleinere, lokale Patch- und Gap-Cluster zu erkennen. Mit einem Aggregationsindex von 0,837 tendierte die räumlich Verteilung der Kontamination mit MAS zur Gleichverteilung ($p > 0,847$).

Auf dem Feld R8 lag die Belastung mit **ZEA** im Mittel bei 29 ng g^{-1} (Abb. 23b). Höhere Belastungen wurden fast ausschließlich im östlichen Bereich des Feldes gefunden. Hier wurde auch ein Patch-Cluster ausgewiesen. Bis auf einen kleinen Bereich im Nordwesten des Feldes wurde der Rest des Feldes als Gap-Cluster ausgewiesen. Es zeigte sich mit einem Aggregationsindex von 1,536 eine starke Aggregation ($p > 0,997$).

Eine Belastung mit **ZOL** wurde nur auf dem Schlag R8 festgestellt und auch dort nur an drei Messpunkten. Dies waren auch die Messpunkte an denen die höchsten Konzentrationen von ZEA nachgewiesen wurden. Die ZOL-Belastung lag dort bei 4 ng g^{-1} , 13 ng g^{-1} und 6 ng g^{-1} . Daraus ergab sich für das gesamte Feld ein Mittel der Belastung von $0,6 \text{ ng g}^{-1}$. Der gesamte zentrale und westliche Teil des Feldes wird als Gap-Cluster ausgewiesen und der östliche Teil als Patch-Cluster. Die Aggregationsanalyse zeigte die sehr starke Aggregation der ZOL-Belastung mit einem Aggregationsindex von 1,710 ($p > 0,999$).

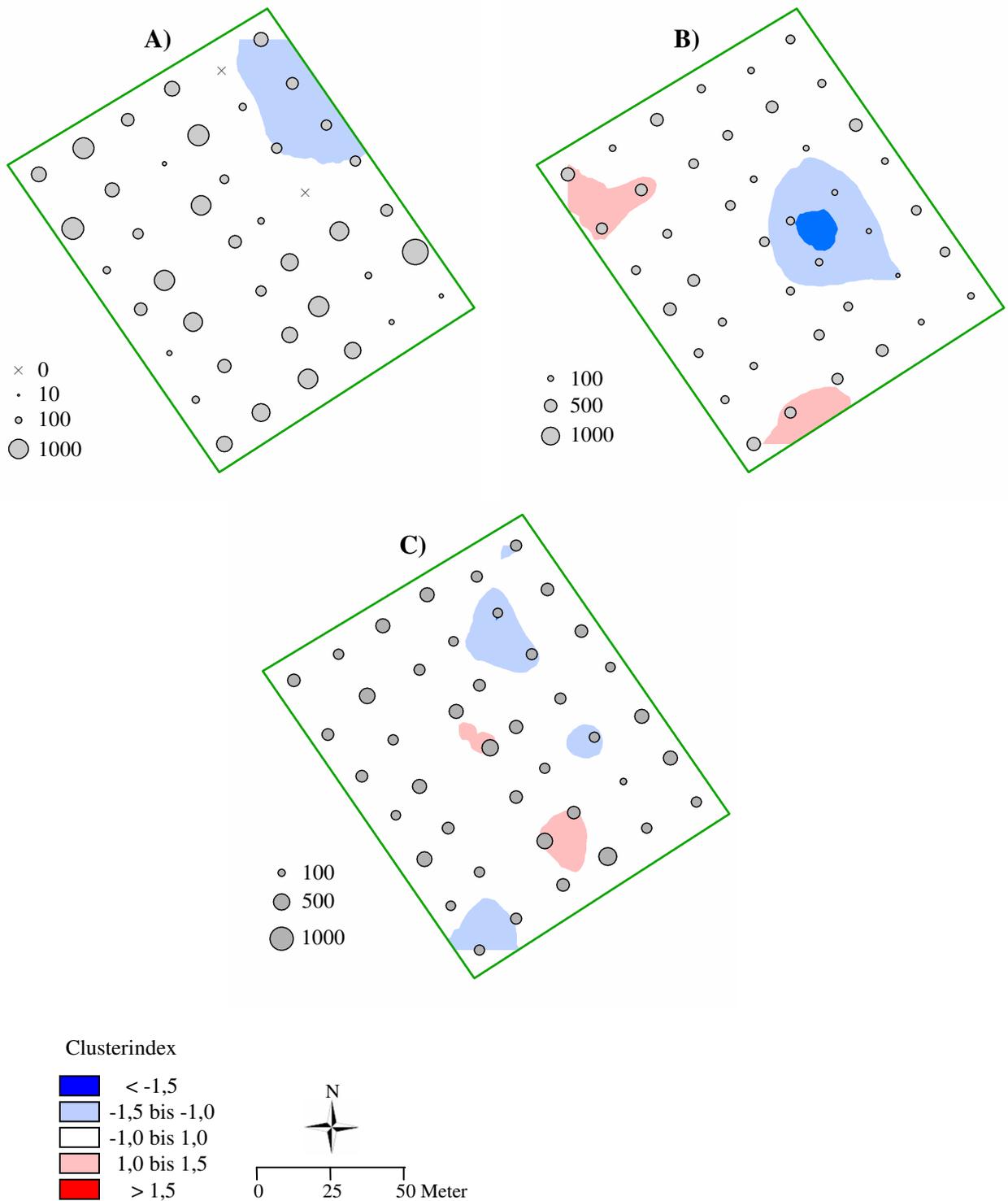


Abb. 23a: Mykotoxinbelastung [ng g^{-1}] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag R8; A) DON; B) NIV; C) MAS; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

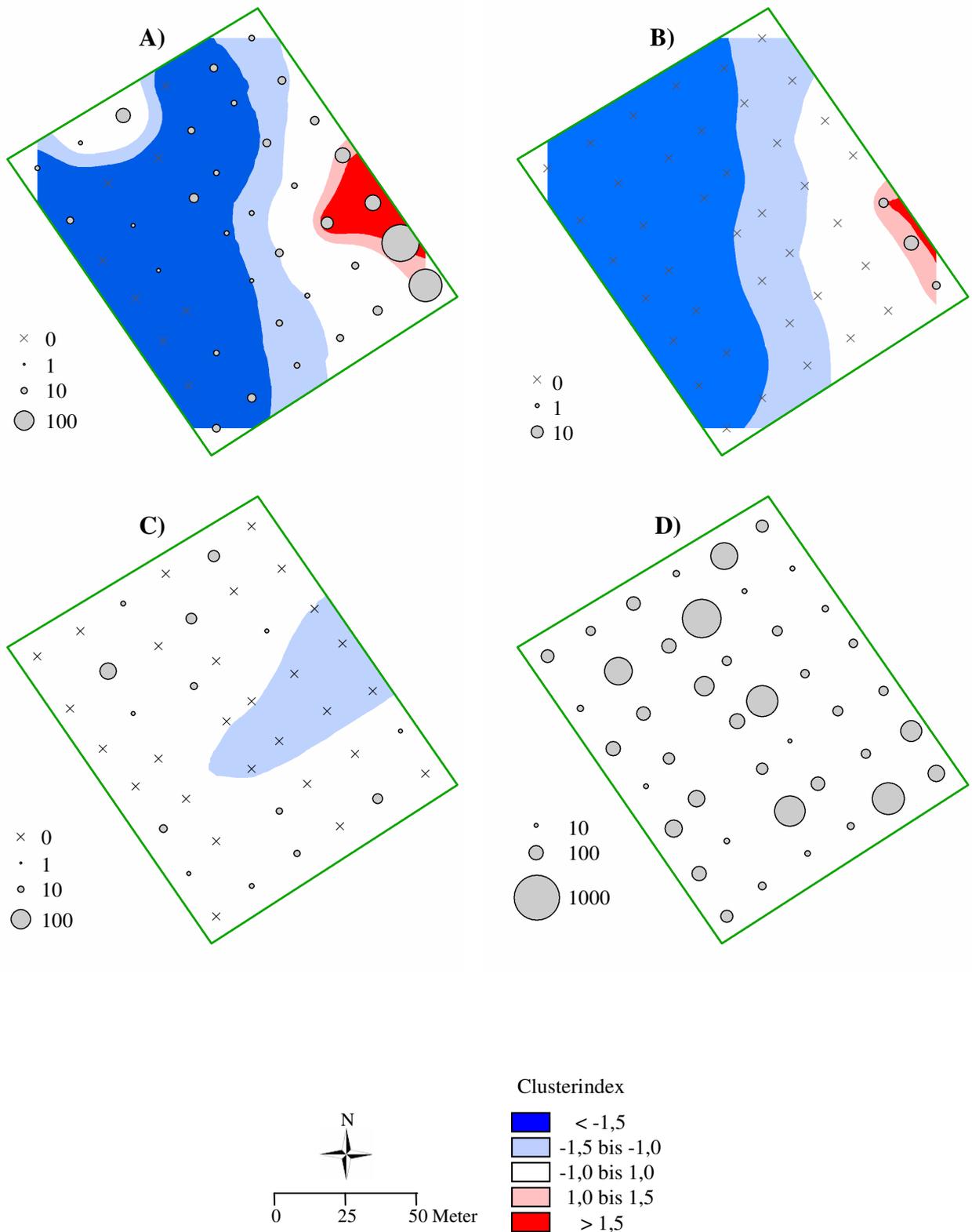


Abb. 23b: Mykotoxinbelastung [ng g^{-1}] an 42 Probenahmepunkten und räumliche Darstellung des Clusterindex der Mykotoxinbelastung auf dem Schlag R1; A) ZEA; B) ZOL; C) MON; D) ENNB; Symbolgröße proportional zur Höhe der Mykotoxinbelastung

Tab. 16: Aggregationsindizes von Befallshäufigkeit und -intensität von *Fusarium* spp. Und Mykotoxinbelastung der Rasterproben aus den Jahren 2006 und 2007 aus der Region Aldenhoven, Deutschland; Hintergrundfarbe: rot = Verteilung aggregierter als Zufallsverteilung ($p > 0,9$), hellrot = Tendenz zur Aggregation ($p > 0,8$), grün = Verteilung regelmäßiger als Zufallsverteilung ($p > 0,9$), hellgrün = Tendenz zur Regelmäßigkeit ($p > 0,8$); MW = Mittelwert

Feld	Befallshäufigkeit							Befallsintensität					Mykotoxinbelastung									
	FUSSPP	FAVE	FCUL	FGRA	FPOA	FPRO	FTRI	FUSSPP	FAVE	FCUL	FGRA	FPOA	DON	NIV	ZEA	ZOL	MAS	HT2	MON	ENNB	BEA	
K5	1,15	1,17	n.d.	0,92	n.d.	n.d.	n.d.	0,79	0,70	0,90	0,99	0,94	0,91	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,82	0,67	n.d.	
M1	1,07	1,07	n.d.	1,00	n.d.	n.d.	n.d.	1,00	1,01	0,90	1,19	0,97	0,84	n.d.	1,00	n.d.	n.d.	n.d.	n.d.	0,86	n.d.	
R1	1,11	1,20	n.d.	1,01	1,48	n.d.	n.d.	0,85	0,85	0,98	0,83	0,83	1,07	1,34	1,15	n.d.	n.d.	0,93	1,04	1,00	1,16	
R8	1,25	1,23	n.d.	1,15	1,04	n.d.	n.d.	0,93	1,09	1,81	0,81	1,01	0,97	1,37	1,54	1,71	0,84	n.d.	0,88	0,80	n.d.	
MW	1,15	1,17	-	1,02	1,26	-	-	0,81	0,91	1,15	0,96	0,94	0,95	1,35	1,23	1,71	0,84	0,93	0,92	0,83	1,16	

In nur 14 von 42 Proben konnte eine Belastung mit **MON** nachgewiesen werden. Der mittlere Gehalt aller Proben im Feld lag bei 6 ng g^{-1} . Die belasteten Proben konzentrierten sich auf den nördlichen bzw. den südlichen Teil des Feldes. Im östlichen Teil wurde ein größeres Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,883 ließ sich die räumliche Verteilung nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden.

Die mittlere Belastung mit **ENNB** lag bei 126 ng g^{-1} . Es wurden weder Patch- noch Gap-Cluster ausgewiesen. Im Bereich des Gap-Clusters von MON wurden auch für die Belastung mit ENNB niedrige Werte festgestellt. Analog dazu fanden sich höhere Belastungen mit ENNB an den Probenahmepunkten, an denen auch eine Belastung mit ENNB nachgewiesen werden konnte. Die Aggregationsanalyse wies mit einem Aggregationsindex von 0,797 auf eine regelmäßigeren Verteilung hin, als man dies von einer zufällig verteilten Probe erwarten würde ($p > 0,934$).

3.2.3 Zusammenhang verschiedener Befalls- und Bestandesparameter auf Bestandesebene

3.2.3.1 Befallshäufigkeit und Befallsintensität

Ähnlich wie für die Felder auf der Regionalebene zeigte sich auch für die Probenahmepunkte der Felder auf der Lokalebene ein deutlicher Unterschied zwischen den Jahren (Tab. 17). Während der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität einer Art im Jahr 2006 für alle Arten negativ war (Felder K5 und M1), war dieser Zusammenhang im Jahr 2007 (Felder R1 und R8) in fast allen Fällen positiv. Signifikante Korrelationen wurden nur im Feld R1 für die Arten *F. avenaceum* und *F. graminearum* sowie für *Fusarium* spp. beobachtet. Im Feld R8 war für die Befallshäufigkeit und die Befallsintensität dieser Arten kein oder nur ein schwacher Zusammenhang zu erkennen. Der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität wurde anscheinend vom Versuchsstandort und dem Versuchsjahr stärker beeinflusst als von der Art.

Tab. 17: Korrelation zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität mit *Fusarium* spp. für Weizenproben auf Bestandesebene in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007

Jahr	Feld	n	FUSSPP	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE
2006	K5	24	-0,071	-0,005	-	-0,132	-
	M1	12	-0,240	-0,029	-	-0,211	-
2007	R1	42	0,323*	0,559***	-0,024	0,444**	0,225
	R8	42	0,132	-0,035	-	0,139	0,033

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, $p=0,05$; ** $p=0,01$; *** $p=0,001$)

3.2.3.2 Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung

In den Rasterproben wurden 2006 und 2007 drei Mykotoxine detektiert, die potenziell von *F. avenaceum* gebildet werden (Tab. 18). Die Korrelationen für das Mykotoxin ENNB und die Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* bzw. für das Mykotoxin MON und die Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* waren innerhalb eines Feldes immer ähnlich, obwohl die Unterschiede zwischen den Feldern durchaus erheblich waren. Signifikante Korrelation mit den drei Mykotoxinen wurden nur auf dem Schlag R1 festgestellt. Auffällig war weiterhin eine signifikante Korrelation zwischen *F. avenaceum* und dem Mykotoxin MAS, das von *F. avenaceum* nicht gebildet werden kann.

Mit *F. culmorum* infizierte Körner wurden nur auf dem Schlag R1 nachgewiesen. Die Korrelation zwischen der Befallshäufigkeit und der Mykotoxinbelastung war in allen Fällen schwach. Positive Beziehungen wurden für DON festgestellt, für die anderen Mykotoxine war die Korrelation mit der Befallshäufigkeit von *F. culmorum* negativ.

Auch die Korrelation zwischen der Befallshäufigkeit von *F. graminearum* und der assoziierten Mykotoxine dieser Art waren überwiegend schwach bis mittel (-0,039 bis 0,480) und zum Teil negativ. Nur die Korrelation mit der DON-Belastung auf dem Feld R1 war statistisch signifikant. Für die Befallshäufigkeit von *F. poae* und den assoziierten Mykotoxine konnten auf allen Feldern, bis auf eine Ausnahme, ausschließlich negative Korrelationen festgestellt werden. Bis auf eine Ausnahme, BEA auf Feld R1, waren diese Korrelationen alle schwach und nicht signifikant. Den stärksten Zusammenhang zeigte die Befallshäufigkeit von *F. poae* mit dem nicht assoziierten Mykotoxin DON (-0,464). Insgesamt zeigte sich auch für den Zusammenhang zwischen der Befallshäufigkeit einer Art und der assoziierten Mykotoxine, dass dieser anscheinend stärker von Standort und Jahr abhängig ist, als von den Korrelationspartnern selber.

Tab. 18: Korrelation von Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. und Mykotoxinbelastung für Weizenproben auf Bestandesebene in den Jahren 2006 (K5 und M1) und 2007 (R1 und R8); graue Hinterlegung: Art produziert Mykotoxin nicht

	Feld	n	DON	3AcDON	NIV	T2	HT2	MAS	ZEA	ZOL	ENNB	MON	BEA
FAVE	K5	24									0,003	0,194	-
	M1	12									-0,151	-0,126	-
	R1	42									0,511***	0,431**	0,161
	R8	42						0,386*			0,053	0,108	-
FCUL	K5	24	-	-	-				-	-			
	M1	12	-	-	-				-	-			
	R1	42	0,116	-	-0,037				-0,097	-			
	R8	42	-	-	-				-	-			
FGRA	K5	24	-0,092	-0,062	-				-	-			
	M1	12	0,044	-	-				-0,039	-			
	R1	42	0,480**	-	0,056				0,057	-			
	R8	42	0,258	-	-0,206				0,089	0,175			
FPOAE	K5	24			-	-	-	-					-
	M1	12			-	-	-	-					-
	R1	42			-0,101	-0,067	-0,106	-					-0,318*
	R8	42	-0,464**		-0,196	-	-	-0,127					-

(Pearson, zweiseitig; * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

3.2.3.3 Befallsintensität und Mykotoxinbelastung

Für den Zusammenhang zwischen der Befallsintensität von *F. avenaceum* und der assoziierten Mykotoxine zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei der Befallshäufigkeit (Tab. 19). Die Korrelation der Mykotoxine ENNB bzw. MON und der Befallsintensität ähnelten sich innerhalb eines Feldes, obwohl zwischen den Feldern große Unterschiede bestanden. Insgesamt waren die Zusammenhänge stärker. Signifikante Korrelationen wurden für *F. avenaceum* und ENNB auf den Feldern R1 und R8 festgestellt, sowie für *F. avenaceum* und MON auf Feld R1. Der Zusammenhang zwischen *F. avenaceum* und ENNB war auch auf Feld K5 relativ stark, konnte aber nicht statistisch abgesichert werden.

Der Zusammenhang zwischen der Befallsintensität von *F. culmorum* und der DON-Belastung war auf allen Feldern positiv. Auf den Feldern K5 und R1 war dieser Zusammenhang stark bis mittelstark und signifikant. Auf Feld K5 wurde auch ein sehr starker positiver Zusammenhang zwischen *F. culmorum* und der Belastung mit 3AcDON gefunden. Auf Feld R8 war die Korrelation zwischen *F. culmorum* und der Belastung mit den untereinander verwandten Mykotoxinen ZEA und ZOL stark und signifikant. Im Gegensatz dazu stand der schwach negative Zusammenhang von *F. culmorum* und ZEA auf dem Feld M1.

Ähnlich wie für *F. culmorum* war auch bei *F. graminearum* der Zusammenhang zwischen Befallsintensität und der Belastung mit DON auf allen Feldern positiv, in drei Fällen auch signifikant. Auch die Korrelation mit 3AcDON war mit einem Koeffizienten von 0,538 signifikant, wenn auch nicht ganz so stark wie bei *F. culmorum*. Die Korrelationen zwischen *F. graminearum* und der Belastung mit den Mykotoxinen NIV, ZEA und ZOL waren eher gering und variierten stark zwischen den Feldern. Auffällig war die signifikante Korrelation zwischen *F. graminearum* und dem nicht assoziierten Mykotoxin HT2. Die Korrelation zwischen der Befallsintensität von *F. poae* und den assoziierten Mykotoxinen war in allen Fällen schwach und negativ.

Tab. 19: Korrelation von Befallsintensität mit *Fusarium* spp. und Mykotoxinbelastung für Weizenproben auf Bestandesebene in den Jahren 2006 (K5 und M1) und 2007 (R1 und R8); graue Hinterlegung: Art produziert Mykotoxin nicht

	Feld	n	DON	3AcDON	NIV	T2	HT2	MAS	ZEA	ZOL	ENNB	MON	BEA
FAVE	K5	24									0,306	0,198	-
	M1	12									0,033	-0,144	-
	R1	42									0,564***	0,338*	0,037
	R8	42									0,452**	0,196	-
FCUL	K5	24	0,784***	0,831***	-				-	-			
	M1	12	0,312	-	-				-0,252	-			
	R1	42	0,404**	-	-0,057				0,240	-			
	R8	42	0,076	-	-0,026				0,714***	0,536***			
FGRA	K5	24	0,539**	0,538**	-				-	-			
	M1	12	0,318	-	-				-0,278	-			
	R1	42	0,582***	-	0,065		0,318*		0,270	-			
	R8	42	0,542***	-	0,061				-0,079	-0,061			
FPOAE	K5	24			-	-	-	-					-
	M1	12			-	-	-	-					-
	R1	42			-0,062	-0,104	-0,207	-					-0,062
	R8	42			-0,117	-	-	-0,039					-

(Pearson, zweiseitig; * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

3.2.3.4 Korrelation des Auftretens verschiedener *Fusarium*-Arten

Befallshäufigkeit

Die Korrelation der Befallshäufigkeit der vier *Fusarium*-Arten innerhalb der Schläge war mit Koeffizienten zwischen 0,010 und -0,321 in allen Fällen schwach und nicht signifikant (Tab. 20). Stärkere Korrelationen waren ausschließlich negativ. Es traten zum Teil deutliche Unterschiede zwischen den Jahren bzw. zwischen den Schlägen auf.

Tab. 20: Korrelation von Befallshäufigkeiten der verschiedenen *Fusarium*-Arten für Weizenproben auf Bestandesebene in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007

	Feld	n	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE
FAVE	K5	24				
	M1	12				
	R1	42				
	R8	42				
FCUL	K5	24	-			
	M1	12	-			
	R1	42	-0,018			
	R8	42	-			
FGRA	K5	24	-0,065	-		
	M1	12	-0,189	-		
	R1	42	0,010	-0,188		
	R8	42	-0,321	-		
FPOAE	K5	24	-	-	-	
	M1	12	-	-	-	
	R1	42	-0,193	-0,176	-0,205	
	R8	42	-0,091	-	0,117	

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, p=0,05; ** p=0,01; *** p=0,001)

Befallsintensität

Große Unterschiede der Koeffizienten zwischen den Jahren bzw. zwischen den Schlägen waren bei der Korrelation der Befallsintensität noch deutlicher zu erkennen als bei der Befallshäufigkeit (Tab. 21). Für die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* wurde für Schlag R8 eine relativ enger Zusammenhang festgestellt. Die Befallsintensitäten dieser Arten waren auf diesem Schlag in allen Fällen positiv signifikant korreliert. Auf Schlag K5 waren die Befallsintensitäten von *F. graminearum* und *F. culmorum* signifikant positiv korreliert. Ähnliches war für die Arten *F. avenaceum* und *F. culmorum* bzw. *F. avenaceum* und *F. poae* auf Schlag M1 zu erkennen. Die Befallsintensitäten von *F. culmorum* und *F. poae* waren dort jedoch nur schwach korreliert.

Tab. 21: Korrelation von Befallshäufigkeiten der verschiedenen *Fusarium*-Arten für Weizenproben auf Bestandesebene in der Region Aldenhoven in den Jahren 2006 und 2007

	Feld	n	FAVE	FCUL	FGRA	FPOAE
FAVE	K5	24				
	M1	12				
	R1	42				
	R8	42				
FCUL	K5	24	0,042			
	M1	12	0,596*			
	R1	42	0,093			
	R8	42	-0,019			
FGRA	K5	24	0,151	0,409*		
	M1	12	0,077	0,175		
	R1	42	0,196	0,063		
	R8	42	0,608**	-0,150		
FPOAE	K5	24	0,038	-0,086	-0,057	
	M1	12	0,503	0,134	0,372	
	R1	42	-0,048	-0,006	0,183	
	R8	42	0,435**	0,083	0,334*	

(Pearson, zweiseitig: * signifikant, $p=0,05$; ** $p=0,01$; *** $p=0,001$)

3.3 Genetische Diversität von *F. graminearum* innerhalb eines Weizenbestandes

Mit diesen Untersuchungen sollte erfasst werden, ob eine intraspezifische genetische Diversität bei *Fusarium* spp. auch im kleinräumigen Bereich auftritt. Dazu wurden auf Schlag R8 an jedem der 42 Probenahmepunkte der Rasterbeprobung je ein Isolat von *F. graminearum* isoliert und hinsichtlich der genetischen Diversität untersucht.

3.3.1 Chemotypen von *F. graminearum*

Zunächst sollte überprüft werden, ob es sich bei allen Isolaten tatsächlich um *F. graminearum* handelte. Die PCR mit den Primersystemen Fg16N und tri5 ergab für alle 42 Isolate ein Produkt der entsprechenden Größe (Tab. 22). Es handelte sich also bei allen Isolaten um die Art *F. graminearum*. Alle Isolate verfügten weiterhin über das tri5-Gen, das zur Trichothecen-Biosynthese benötigt wird.

In einem zweiten Schritt sollte der Chemotyp der Isolate bestimmt werden. Die Analyse mit dem Primersystem TOXP ergab, dass vier der 42 Isolate NIV-Bildner waren. Alle anderen Isolate wurden als DON-Bildner identifiziert. Dies wurde durch die Analysen mit den Primersystemen 3CON und 12CON bestätigt. Mit diesen Primersystemen war es zusätzlich möglich, die DON-Typen hinsichtlich ihrer Metabolite zu unterscheiden.

Tab. 22: PCR-Ergebnisse für 42 *F. graminearum*-Isolate von den Probenahmepunkten aus dem Schlag R8 mit verschiedenen Primersystemen; + = Produkt vorhanden; - = kein Produkt vorhanden; für Primersysteme TOXP, 3CON, 12CON und HiLoDON sind die Ergebnisse der Produktgrößenauswertung angegeben.

Isolat	Fg16N	tri5	TOXP	3CON/12CON	HiLoDON
I-1	+	+	NIV	NIV	-
I-2	+	+	DON	3AcDON	Hi
I-3	+	+	DON	3AcDON	Hi
I-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
I-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
I-6	+	+	DON	15AcDON	Hi
I-7	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-1	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-2	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-3	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-6	+	+	DON	15AcDON	Hi
II-7	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-1	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-2	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-3	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
III-6	+	+	NIV	NIV	-
III-7	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-1	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-2	+	+	NIV	NIV	-
IV-3	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-6	+	+	DON	15AcDON	Hi
IV-7	+	+	NIV	NIV	-
V-1	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-2	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-3	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-6	+	+	DON	15AcDON	Hi
V-7	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-1	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-2	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-3	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-4	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-5	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-6	+	+	DON	15AcDON	Hi
VI-7	+	+	DON	15AcDON	Hi

Von den 38 Isolaten, die dem DON-Typ zugeordnet wurden, waren zwei Isolate vom 3AcDON-Typ und 36 Isolate vom 15AcDON-Typ.

Bei der Untersuchung, ob es sich um einen schwachen oder einen starken DON-Bildner handelte, wurden alle DON-Typen als starke DON-Bildner klassifiziert. Bei den NIV-Typen wurde korrekterweise kein Produkt gebildet.

Bei der räumlichen Zuordnung der Isolate zu den Probenahmepunkten fiel auf, dass die verschiedenen Typen nicht zufällig über das Feld verteilt waren, sondern in einigen Fällen eher aggregiert auftraten (Abb. 24). Besonders auffällig war dies für die 3AcDON-Typen, aber auch für die NIV-Typen im nördlichen Teil des Feldes.

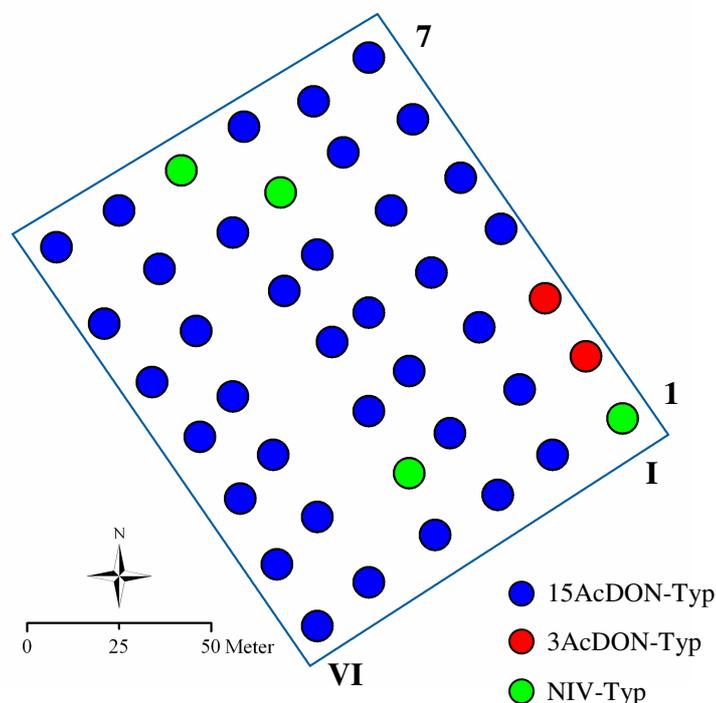


Abb. 24: Räumliche Zuordnung der 42 untersuchten *F. graminearum*-Isolate zu den Probenahmepunkten auf dem Feld R8; I-VI = Reihenbezeichnung; 1-7 = Position in der Reihe

3.3.2 Sequenzvariation beim Primersystem Fg16

Das Primersystem FG16 ergibt mit einem *F. graminearum*-Isolat ein Produkt mit einer Größe zwischen 400 und 580 Basenpaaren. Der Größenvariation liegt eine unterschiedlich häufige Wiederholung eines ca. 30 Nukleotide großen Sequenzmotivs sowie einige Deletionen zugrunde. Insgesamt lassen sich sechs Produktklassen unterscheiden.

Von den 42 untersuchten Isolaten ließen sich 40 Isolate der Produktklasse 1 zuordnen (Produktgröße 420 bp) (Abb. 25). Die Isolate II-7 und IV-7 zeigten kürzere Produkte von ca. 400 bp Länge und wurden damit der Produktklasse 6 zugeordnet. Weitere Produktklassen wurden nicht gefunden.

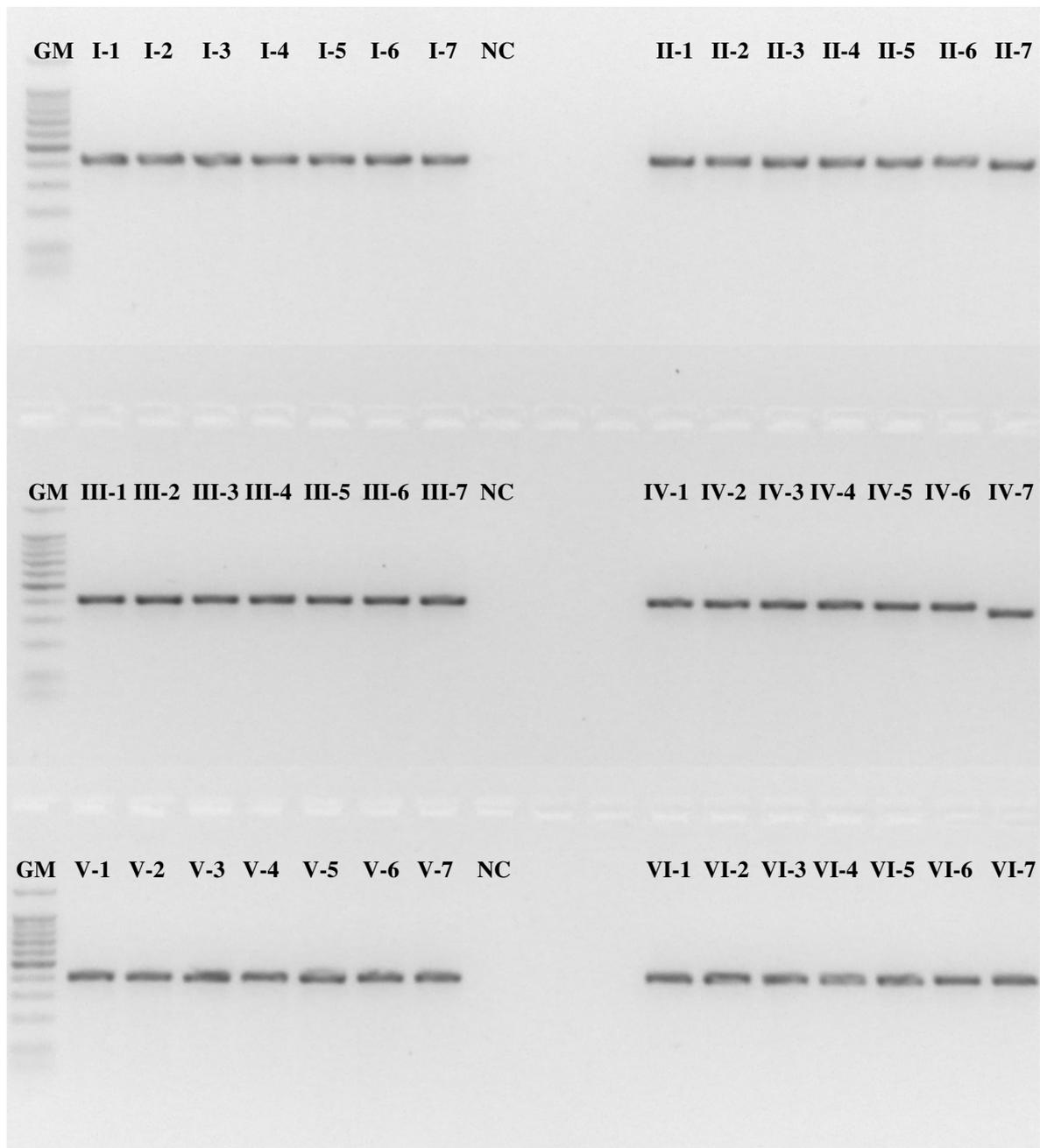


Abb. 25: Elektrophoresegel der PCR-Produkte von 42 *F. graminearum*-Isolaten mit Primersystem Fg16; GM = Größenmarker (100 bp); NC = Negativkontrolle

4 Diskussion

Die partielle Taubährigkeit ist eine der wichtigsten Krankheiten des Weizens weltweit (PARRY *et al.*, 1995; MCMULLEN *et al.*, 1997). Die Bekämpfung der Krankheit zielt nicht in erster Linie auf die Vermeidung der quantitativen Ertragsverluste, sondern vielmehr auf Verminderung der Belastung des Ernteguts mit Mykotoxinen (STRANGE & SCOTT, 2005). Das Fehlen von resistenten Sorten und effektiver chemischer Kontrollmöglichkeit verlangt einen integrierten Ansatz für die Kontrolle der partiellen Taubährigkeit. Dies wird zunehmend schwieriger, da kürzere Fruchtfolgen, vermehrter Anbau von Mais sowie die verstärkte Anwendung reduzierter Bodenbearbeitung das Risiko einer *Fusarium*-Infektion und damit einer Mykotoxinbelastung ansteigen lassen. Ein besseres Verständnis der Epidemiologie der *Fusarium*-Arten und dem Zusammenhang zwischen Befall und Mykotoxinbelastung auf verschiedenen Skalenebenen ist wichtig, um effektive Beprobungsstrategien und evt. Prognosemodelle entwickeln zu können, die eine bessere Kontrolle der Krankheit ermöglichen können.

Ziel der Arbeit war es, das Auftreten von *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine auf der Regionalebene und der Bestandesebene zu untersuchen und räumlich zu analysieren um Verteilungsmuster verschiedener Befallsparameter der *Fusarium*-Arten charakterisieren zu können. Weiterhin wurde untersucht, inwieweit intraspezifische genetische Diversität bei *Fusarium*-Arten innerhalb eines Bestandes vorliegen kann, da diese einen großen Einfluss auf die räumliche Verteilung des *Fusarium*-Befalls und der Belastung mit assoziierten Mykotoxinen haben kann.

Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine auf der Regionalebene

Die Zusammensetzung des Erregerkomplexes wird durch die geografische Lage beeinflusst, wobei der Haupteinflussfaktor das Klima ist (BACKHOUSE *et al.*, 2001; DOOHAN *et al.*, 2003; BOTTALICO & PERRONE, 2002). Während die klimatischen Bedingungen auf kontinentaler und regionaler Ebene hauptsächlich darüber entscheiden, welche *Fusarium*-Arten dort prinzipiell auftreten, spielen die Witterungsbedingungen auf lokaler Ebene eine wichtige Rolle für die aktuelle Befallssituation. Diese lokalen Witterungseinflüsse sowie auch weitere Faktoren wie Fruchtfolge, Bodenbearbeitung und Sortenwahl führen zu Variationen des Auftretens von *Fusarium* spp. auf lokaler und auch regionaler Ebene (OSBORNE & STEIN, 2007).

Auf den Versuchsflächen in der Region Aldenhoven wurden in beiden Jahren hauptsächlich die Arten *Fusarium avenaceum*, *F. culmorum*, *F. graminearum* und *F. poae* nachgewiesen. Dies sind nach PARRY *et al.* (1995) und LOGRIECO *et al.* (2003) die für den Erregerkomplex der partiellen Taubährrigkeit typischen Arten. Im Jahr 2006 konnten auch die Arten *F. tricinctum* und *F. proliferatum* isoliert werden. In gemäßigten Breiten, in denen auch die Art *F. avenaceum* regelmäßig auftritt, findet sich *F. tricinctum* häufiger im Artenkomplex, wohingegen *F. proliferatum* eher selten von Weizen isoliert wird und dann in den meisten Fällen auch nur in Verbindung mit einer Fruchtfolge, die Mais beinhaltet (LOGRIECO *et al.*, 2003; BOTTALICO & PERRONE, 2002).

Das Artenspektrum der Proben aus dem Rheinland unterschied sich deutlich von dem der italienischen Proben. Der durchschnittliche Befall lag mit 3,7 % in den italienischen Proben etwas niedriger. Es wurden zwar in allen Proben *F. avenaceum* und *F. poae* nachgewiesen, *F. culmorum* und *F. graminearum* traten jedoch nicht auf. Mit *F. proliferatum* und *F. verticillioides* wurden zwei Wärme liebende Arten gefunden, die jedoch eigentlich mehr mit der Kolbefäule des Mais assoziiert sind als mit der partiellen Taubährrigkeit des Weizens (BOTTALICO & PERRONE, 2002; LOGRIECO *et al.*, 2003). Trotz des geringen Stichprobenumfangs ließen sich deutlich Unterschiede im Artenspektrum erkennen.

Ein Großteil der eigenen Versuche wurde auf rekultivierten Flächen durchgeführt; einige Versuchsfelder befanden sich zum Vergleich auf langjährig genutzten Flächen. Die vorherrschenden Arten in den eigenen Versuchen waren *F. avenaceum* und *F. poae*, während *F. graminearum* und *F. culmorum* etwas seltener nachgewiesen wurden. Diese Verteilung der Arten ist typisch für das Rheinland wie schon von LIENEMANN (2002), MEYER (2005) und ELLNER (2000 und 2001) beschrieben. Dies weist darauf hin, dass beim Auftreten der *Fusarium*-Arten kein wesentlicher Unterschied zwischen langjährig genutzten und rekultivierten Flächen besteht.

Entscheidender Faktor, der den Befall und damit die Befallshäufigkeit beeinflusst ist, neben dem Vorhandensein von Inokulum und der Wirtsresistenz, die Witterung zur Blüte (PARRY *et al.*, 1995; CHAMPEIL *et al.*, 2004a; LIENEMANN, 2002; MEIER, 2003). Feucht-warme Bedingungen durch ausreichende Temperaturen und regelmäßige Niederschläge ermöglichen und fördern die Infektion der Weizenähren mit *Fusarium* spp. (OBST & FUCHS, 2000; NICHOLSON *et al.*, 2007). In beiden Versuchsjahren lag die Befallshäufigkeit der Weizenproben mit *Fusarium* spp. auf einem ähnlichen Niveau (7,2 % in 2006 und 5,9 % in 2007). Die Witterungsbedingungen zur Weizenblüte von Ende Mai bis Anfang Juni waren in beiden Versuchsjahren ähnlich, wodurch sich die gleiche Größenordnung der

Befallshäufigkeit erklären lässt. Ein Grund für die etwas niedrigere Befallshäufigkeit im Jahr 2007 könnte der trockene April sein, der wahrscheinlich die Entwicklung von Inokulum negativ beeinflusste.

Die höchsten Anteile an der Gesamtbefallshäufigkeit erreichten in beiden Jahren *F. avenaceum* (47 % bzw. 34 %) und *F. poae* (22 % bzw. 49 %). *F. avenaceum* wurde im Jahr 2006 nur auf drei von acht Schlägen nachgewiesen, erreichte dort aber immer hohe Befallshäufigkeiten. Im Jahr 2007 wurde *F. avenaceum* in allen Feldern isoliert und zeigte in vielen Fällen auch die höchste Befallshäufigkeit. Trotz des Auftretens der als aggressiver beschriebenen Arten *F. culmorum* und *F. graminearum* konnte sich *F. avenaceum* offenbar durchsetzen. Ähnliches wurde auch schon von MANKA *et al.* (1985) berichtet.

In beiden Jahren zeigte *F. poae* auf fast allen Feldern eine durchschnittliche Befallshäufigkeit zwischen 1 % und 5,3 %. Nur auf Schlag R8 zeigte sich mit einer Befallshäufigkeit von 16,1 % ein deutlich stärkerer Befall. Als Vorfrucht wurde dort Deutsches Weidelgras angebaut. Gräser sind der wichtigste Wirt für *F. poae*. So fanden INCH & GILBERT (2003) *F. poae* beispielsweise an vielen Wild- und Präriegräsern. Die große Befallshäufigkeit von *F. poae* auf diesem Schlag lässt sich damit durch den Vorfruchteffekt erklären, der z. B. auch für *F. graminearum* und die Vorfrucht Mais ausführlich beschrieben ist (OBST *et al.*, 2000; CHAMPEIL *et al.*, 2004).

F. culmorum und *F. graminearum* wurden in beiden Jahren regelmäßig nachgewiesen. Die Befallshäufigkeiten dieser Arten lagen aber auf einem niedrigerem Niveau als die von *F. avenaceum* und *F. poae*. Dies bestätigt die Ergebnisse von MEYER (2005), der ebenfalls *F. avenaceum* und *F. poae* als häufigste Arten im Rheinland beschreibt und *F. culmorum* und *F. graminearum* zwar regelmäßig, aber weniger häufig isolierte.

Im Jahr 2006 wurde *F. culmorum* nur von Weizenkörnern der Sorte Drifter isoliert. In allen Proben von Drifter wurde *F. culmorum* gefunden. Eine mögliche Erklärung ist eine erhöhte Anfälligkeit der Sorte Drifter für die Art *F. culmorum*. Ein Vorfruchteffekt ist unwahrscheinlich, da unterschiedliche Vorfrüchte angebaut wurden. Auch die Witterung als Erklärung scheidet aus, da sie aufgrund der räumlichen Nähe der Flächen als weitgehend identisch angesehen werden kann.

F. tricinctum trat nur im Jahr 2006 auf. Über die klimatischen Ansprüche von *F. tricinctum* ist wenig bekannt, es wird aber vermutet, dass diese ähnlich den Ansprüchen von *F. avenaceum* sind, da beide Arten als vorherrschend für Nordeuropa beschrieben werden (LANGSETH *et al.*, 1999). Damit lässt sich jedoch nicht erklären, warum *F. tricinctum* gerade im eher warmen und trockenen Jahr 2006 auftrat und nicht häufiger im Jahr 2007, in dem

auch *F. avenaceum* von allen Proben isoliert werden konnte. Eine Konkurrenzsituation mit *F. avenaceum* als Erklärung ist unwahrscheinlich, da *F. tricinctum* im Jahr 2006 in drei von vier Fällen auf Flächen gefunden wurde, in denen auch *F. avenaceum* nachgewiesen wurde.

F. proliferatum bevorzugt warme bis heiße und trockene Bedingungen und kam mit der Witterung im Jahr 2006 offenbar gut zurecht, während das Jahr 2007 wahrscheinlich zu kühl war, um die Entwicklung von *F. proliferatum* besonders zu fördern (LESLIE & SUMMERELL, 2006; BOTTALICO & PERRONE, 2002; LOGRIECO *et al.*, 2003).

Anders als bei der Befallshäufigkeit war bei der Befallsintensität aufgrund unterschiedlicher Witterung zwischen Blüte und Ernte ein erheblicher Unterschied zwischen den Jahren festzustellen. Während die mittlere Befallsintensität von *Fusarium* spp. im Jahr 2006 bei 68 pg mg^{-1} lag, erreichte sie 513 pg mg^{-1} im Jahr 2007.

Die Entwicklung und Ausbreitung des Pilzes innerhalb der Pflanze nach erfolgreicher Infektion ist, neben Wirtsresistenz und Aggressivität des Pathogens, abhängig von Temperatur und Feuchtigkeit. Während die Temperatur im Pflanzengewebe maßgeblich durch die Umgebungstemperatur bestimmt wird, kann die Pflanze ihren Wasserhaushalt in gewissen Grenzen aktiv und unabhängig von der Umgebungsfeuchte des Bodens oder der Luft regeln. Einschränkungen treten in Extrembereichen, wie Dürre, auf (SCHÖNBECK, 1979; DOOHAN *et al.*, 2003). Da Pilze der Gattung *Fusarium* sowohl auf sehr feuchten Substraten, wie Flüssignährmedien, als auch auf relativ trockenen Substraten wie abreifenden Getreidepflanzen wachsen können, kann davon ausgegangen werden, dass die physiologischen Grenzen, innerhalb derer ein Wachstum der Getreidepflanze stattfinden kann, in jedem Fall auch ausreichend für die Entwicklung von *Fusarium* spp. sind (COOK & CHRISTEN, 1976). Als maßgeblicher Umweltfaktor für die Entwicklung von *Fusarium* spp. innerhalb der Pflanze kann daher die Umgebungstemperatur angesehen werden. Die Temperaturansprüche der einzelnen *Fusarium*-Arten unterscheiden sich teilweise deutlich. Während die Wärme liebende Art *F. graminearum* Temperaturen von bis zu 30°C bevorzugt, entwickeln sich *F. culmorum* und *F. poae* am besten bei einer Temperatur von ca. 25°C . Kühlere Bedingungen um 20°C werden von *F. avenaceum* bevorzugt. (BOTTALICO & PERRONE, 2002; PARRY *et al.*, 1995). Ab einer Temperatur von 36°C stellt *F. graminearum* jedoch das Wachstum ein (COOK & CHRISTEN, 1976). Es ist anzunehmen, dass auch für die anderen Arten jenseits von 30°C kaum noch eine Entwicklung zu verzeichnen ist.

Im Juni und Juli des Jahres 2006 herrschten hohe Temperaturen vor. Die Niederschläge in dieser Periode waren zwar nur wenig geringer als im langjährigen Mittel, entscheidender war aber die Niederschlagsverteilung (OBST & FUCHS, 2000). 85 % des

gesamten Niederschlags im Juni und Juli fiel an nur vier Tagen. Es ist anzunehmen, dass die Kombination von hoher Lufttemperatur und seltenen bzw. sehr unregelmäßig auftretenden Niederschlagsereignissen zu hohen Temperaturen im Weizenbestand und damit auch innerhalb der Pflanze führte. Dies hätte dann einen negativen Einfluss auf die Entwicklung von *Fusarium* spp. gehabt. Weiterhin kann eine dauerhaft hohe Temperatur und trockene Bedingungen eine frühere Abreife der Pflanzen und damit eine kürzere Entwicklungszeit für die Pathogene zur Folge haben.

Anders stellte sich die Situation im Jahr 2007 dar. Der Juni war zwar etwas wärmer als 2006, der Juli hingegen wesentlich kühler und feuchter. Von der zweiten Juni-Woche bis Ende Juli wurden nahezu täglich Niederschläge registriert. Die Kombination von kühleren Temperaturen und regelmäßigen Niederschlägen im Jahr 2007 führte zu einer gleichmäßig niedrigeren Temperatur im Weizenbestand, wodurch die Entwicklungsbedingungen für *Fusarium* spp. sich als wesentlich günstiger darstellten als im Jahr 2006. Starkregenereignisse in der ersten Augustwoche führten weiterhin dazu, dass sich die Ernte im Jahr 2007 verzögerte und somit eine längere Entwicklungszeit für die Pathogene gegeben war.

Der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität war bei den meisten *Fusarium*-Arten 2006 wesentlich schwächer als im Jahr 2007. In Jahren mit guten Entwicklungsbedingungen für *Fusarium* spp. nach der Infektion hängt die Befallsintensität eines Weizenbestandes offenbar in höherem Maße von der Anzahl infizierter Pflanzen ab als in Jahren mit schlechteren Bedingungen. Hier haben anscheinend andere Faktoren einen höheren Einfluss auf die Befallsintensität.

F. poae war in beiden Jahren die dominierende Art. Auf allen Feldern, auf den *F. poae* nachgewiesen wurde, zeigte diese Art die höchste oder zumindest zweithöchste Befallsintensität. *F. poae* ist gut an die klimatischen Bedingungen in der Niederrheinischen Bucht angepasst (THRANE, 2000; LANGSETH *et al.*, 1999; LIENEMANN, 2002). Dies führt einerseits zu einer weiten Verbreitung und ermöglicht damit große Befallshäufigkeiten. Andererseits lässt dies auch den Rückschluss zu, dass sich *F. poae* nach erfolgter Infektion unter den Bedingungen in dieser Region besonders gut entwickeln kann, was eine hohe Befallsintensität zur Folge hätte. *F. poae* ist, im Vergleich zu *F. culmorum* und *F. graminearum* eine weniger aggressive Art (FERNANDEZ & CHEN, 2005). Eine Infektion mit *F. poae* schädigt die Wirtspflanze weniger stark als die Infektion mit den aggressiveren Arten (DOOHAN *et al.*, 2003). Dies führt dazu, dass das Pathogen sich in der Pflanze länger entwickeln und stärker ausbreiten kann, bevor das befallene Pflanzengewebe abstirbt. Auch dies ist ein möglicher Erklärungsansatz für die stets hohen Befallsintensitäten von *F. poae*.

Auf den Schlägen R6, R7 und R8 war eine deutlich höhere Befallsintensität zu sehen als auf den anderen Schlägen des Jahres 2007. Die Umweltfaktoren Temperatur und Feuchtigkeit scheiden als Erklärung aus, da sie aufgrund der räumlichen Nähe der Schläge als weitgehend identisch angesehen werden können. Auf den drei Feldern wurde die Sorte Drifter angebaut, während auf den anderen Schlägen Tommi angebaut wurde. Auch im Jahr 2006 zeigten die Schläge, auf denen die Weizensorten Drifter angebaut wurde, die höchsten Befallsintensitäten. Obwohl Drifter als ähnlich gering anfällig wie Tommi beschrieben wird (ANONYM, 2009), könnte dies ein Hinweis auf eine geringere Resistenz der Sorte Drifter gegenüber der Ausbreitung des Pathogens in der Pflanze sein (Typ-II-Resistenz, NICHOLSON *et al.*, 2007; SCHROEDER & CHRISTENSEN, 1963). Die vielen Einflüsse auf die Entwicklung des Befalls und der geringe Stichprobenumfang lassen jedoch nur eingeschränkt Rückschlüsse auf die Resistenzeigenschaften der Sorten zu.

Die Daten zur Befallsintensität weisen darauf hin, dass sich bei Schlägen mit hoher Befallsintensität offenbar eine Art durchsetzt. Im Fall von *F. poae* auf Schlag R8 korrelierte die hohe Befallsintensität mit einer hohen Befallshäufigkeit. Dies kann, wie oben besprochen, durch die guten Entwicklungsbedingungen und die geringere Aggressivität von *F. poae* erklärt werden, die eine längere Entwicklung dieses Pathogens in der Pflanze ermöglicht (DOOHAN *et al.*, 2003). Im Fall der aggressiveren Arten *F. culmorum* und *F. graminearum* war jedoch keine höhere Befallshäufigkeit zu beobachten. Schon wenige, mit Mykotoxinen hochbelastete Körner, können die Mykotoxin-Gesamtbelastung einer Probe deutlich beeinflussen (HART & SCHABENBERGER, 1998). Analog dazu könnten schon einige Körner mit besonders hohen Befallsintensitäten von *F. culmorum* oder *F. graminearum* die Befallsintensität einer Gesamtprobe deutlich beeinflussen, während dies auf die Befallshäufigkeit keinen merklichen Einfluss hätte.

In allen Proben aus dem Jahr 2007 wurden die Mykotoxine Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEA) nachgewiesen. Diese Mykotoxine wurden in vielen Untersuchungen zur partiellen Taubährigkeit sehr häufig gefunden und werden auch als „Leittoxine“ verstanden (NICHOLSON *et al.*, 2007; PARRY *et al.*, 1995; DESJARDINS, 2006). Die Bestätigung dieser Annahme für die eigenen Versuche zeigt, dass hinsichtlich des Mykotoxinspektrums von Weizenbeständen auf rekultivierten Flächen wahrscheinlich keine wesentlichen Unterschiede zu erwarten sind. Zusätzlich zu diesen Leittoxinen wurde auf allen Feldern das Mykotoxin Enniatin B (ENNB) festgestellt, über das hinsichtlich Toxizität und biologischer Aktivität wesentlich weniger bekannt ist (FÖLLMANN, 2009; JESTOI, 2008). Als wichtigster ENNB-Bildner gilt *F. avenaceum*, das auf den Schlägen des Jahres 2007 auf jedem Feld

nachgewiesen wurde. Trotz der relativ geringen Anzahl von Proben und der damit schwierigen Verallgemeinerbarkeit, liegt der Schluss nahe, dass ein Befall mit *F. avenaceum* auch zu einer Belastung mit ENNB führt. Dies wäre besonders für Regionen wie das Rheinland und Nord-Europa von Bedeutung, wo *F. avenaceum* häufig auftritt.

Die Mykotoxine 3-Acetyldeoxinivalenol (3AcDON), Moniliformin (MON), Nivalenol (NIV) und Monoacetoxyscirpenol (MAS) wurden auf nur je einem Schlag detektiert. Dies spricht für ein selteneres Auftreten dieser Mykotoxine bzw. für eine quantitativ geringere Produktion, womit nur in wenigen Fällen die Nachweisgrenze überschritten wird. In allen Fällen war ein Zusammenhang zwischen dem Auftreten dieser Mykotoxine und der Befallsintensität bestimmter *Fusarium*-Arten zu erkennen. Auf dem Schlag R7, auf dem 3AcDON sowie die höchste DON-Belastung festgestellt wurde, fand sich auch die mit Abstand höchste Befallsintensität von *F. culmorum*. Ähnliches galt für Schlag R8, auf dem NIV und MAS nachgewiesen wurden. Hier lag eine sehr hohe Befallsintensität mit dem NIV- und MAS-Bildner *F. poae* vor. Die MON-Belastung auf Schlag R5 hingegen lässt sich durch die relativ hohe Befallsintensität des MON-Bildners *F. avenaceum* erklären. SCOTT *et al.* (1987) haben auch für einige Isolate der Art *F. culmorum* die Fähigkeit zur Bildung von MON nachgewiesen. Diese Ergebnisse wurden aber in anderen Untersuchungen nicht bestätigt. Ob das Auftreten von MON daher mit der höheren Befallsintensität von *F. culmorum* auf Schlag R5 in Zusammenhang steht, ist fraglich.

Der Zusammenhang zwischen der Befallshäufigkeit einer Art und der Belastung mit den assoziierten Mykotoxinen war in den meisten Fällen wesentlich schwächer als der Zusammenhang zwischen Pilzbiomasse und Mykotoxinbelastung. In einigen Fällen, wie z. B. bei NIV, war jedoch kein Unterschied festzustellen. Dies deutet darauf hin, dass die Bildung einiger Mykotoxine stark von der Entwicklung des Pilzes in der Pflanze abhängig ist. Bei anderen Mykotoxinen scheinen dagegen andere Faktoren als die pilzliche Biomasse einen größeren Einfluss auf die Bildung von Mykotoxinen zu haben. Dies zeigt, dass ein enger Zusammenhang wie beispielsweise zwischen der Biomasse von *F. graminearum* und der Belastung mit DON nicht automatisch für alle *Fusarium*-Arten und ihre assoziierten Mykotoxine angenommen werden kann. Es ist im Einzelfall zu prüfen, welche Befallsparameter zur Abschätzung der Mykotoxinbelastung geeignet sind.

Die Befallshäufigkeiten einiger Arten war z. T. sehr stark miteinander korreliert während in anderen Fällen kein Zusammenhang erkennbar war. Ein eindeutiger Einfluss des Jahres war auch nicht zu erkennen. Dies spricht dafür, dass Faktoren wie Vorfrucht und Bodenbearbeitung das Auftreten von *Fusarium* spp. stärker beeinflussen als die Interaktion

zwischen den *Fusarium*-Arten. Bei der Befallsintensität zeigte sich ein ähnliches Bild, allgemein waren die Zusammenhänge hier jedoch noch schwächer. Im Jahr 2007 waren die Zusammenhänge fast ausschließlich negativ, was bedeutet, dass unter guten Entwicklungsbedingungen, die Entwicklung einer Art in einem Schlag die einer anderen negativ beeinflussen kann. Offenbar kann sich dann eine Art besser gegen andere behaupten.

Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine auf Bestandesebene

Kenntnisse über die räumliche Verteilung von Befallsparametern sind, besonders auf Bestandesebene, von entscheidender Bedeutung für die Entwicklung von Beprobungsstrategien für Befalls- und Mykotoxinmonitoring, Versuchsplanung, Entwicklung von Prognosemodellen und auch für die Kontrolle der Krankheit und Mykotoxinkontamination. Der räumlichen Verteilung eines Befallsparameters liegt die räumliche Verteilung der Faktoren zugrunde, die einen Einfluss auf Entstehen und Entwicklung des Befallsparameters haben. Die Ausprägung eines Befallsparameters an einer Probenahmestelle kann also als die Summe der Ausprägungen der Einflussgrößen an diesem Punkt angesehen werden.

Der Boden hat einen entscheidenden direkten und indirekten Einfluss auf die Entwicklung der Pflanze und damit auch auf die Pflanzengesundheit, die Prädisposition der Pflanze gegenüber Krankheiten und Schädlingen und die Entwicklung von Pathogenen an und besonders in der Pflanze (HOFFMANN *et al.*, 1976). Im Fall der partiellen Taubährigkeit ist beispielsweise die Inokulumverfügbarkeit von der Beschaffenheit des Bodens abhängig. *Fusarium* spp. überdauert saprophytisch auf Ernteresten an der Bodenoberfläche und infiziert von dort den nachfolgenden Getreidebestand (PARRY *et al.*, 1995; DILL-MACKY & JONES, 2000; NICHOLSON *et al.* 2007). Die Abbaugeschwindigkeit der Erntereste hängt dabei, neben Witterungsbedingungen und Beschaffenheit der Erntereste, vor allem von der biologischen Aktivität des Bodens ab. Je schneller die Erntereste abgebaut werden, desto weniger Inokulum steht für die Infektion der nachfolgenden Kultur zur Verfügung. Für Fragestellungen mit räumlichen Bezug besteht daher, besonders auf der Bestandesebene, ein Interesse, den Einfluss des Faktors Bodens zu minimieren oder sogar weitestgehend auszuschließen, ohne jedoch die anderen Versuchsbedingungen zu beeinflussen. In der vorliegenden Arbeit sollte daher der Einfluss des Bodens durch die Nutzung von rekultivierten Ackerflächen minimiert werden. Diese Flächen bestehen aus einem relativ homogenen Bodensubstrat (Lösslehm). Es wurde davon ausgegangen, dass die gleichmäßige Ausbringung dieses Bodensubstrates während der Rekultivierung zu homogenen

Ackerflächen führt, auf denen der Faktor Boden im Subhektar-Bereich nur minimal variiert. Dies wurde durch die Messung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit (ECa) bestätigt.

Die ECa wird maßgeblich durch drei Faktoren beeinflusst: den Salzgehalt, die aktuelle Feuchte und den Tongehalt des Bodens (FRIEDMANN, 2005). Die Salzkonzentration in den Böden Mittel- und Westeuropas ist im Allgemeinen vernachlässigbar gering (RHOADES *et al.*, 1989). Bei einheitlicher Bodenfeuchte wird die ECa daher hauptsächlich vom Tongehalt des Bodens beeinflusst (MERTENS, 2008). Variationen der ECa können folglich auf Variationen des Bodensubstrates, sei es hinsichtlich der Zusammensetzung oder der Dichte, zurückgeführt werden. Damit lässt die engmaschige Erfassung der ECa einen Rückschluss auf die Homogenität des Bodensubstrates zu.

Die ECa zeigte auf R1 eine Variationsbreite von $12,2 \text{ mS m}^{-1}$. Auf R8 war die Variationsbreite mit $8,8 \text{ mS m}^{-1}$ etwas geringer. Die erfasste Fläche war in beiden Fällen ca. 2 ha groß. Im Vergleich dazu stellte MERTENS (2008) auf einer 4,9 ha großen Fläche einen Variationsbereich der ECa von $38,5 \text{ mS m}^{-1}$ fest. Auch JUNG *et al.* (2005) erfassten eine ähnliche Variationsbreite mit 45 mS m^{-1} auf eine Fläche von 4 ha. Wesentlich stärker variierte die ECa in Versuchen von AIMRUN *et al.* (2009), die einen Variationsbereich der Leitfähigkeitswerte von $136,4 \text{ mS m}^{-1}$ feststellten. Allerdings wurden diese Untersuchungen auf einer 136 ha großen Fläche durchgeführt. Im Vergleich zu den genannten Untersuchungen stellen sich die rekultivierten Flächen R1 und R8 aus den eigenen Versuchen als wesentlich homogener dar. Die Annahme, dass der Faktor Boden auf rekultivierten Flächen als Ursache von Variationen auf der Bestandesebene weitestgehend auszuschließen ist, da auf dieser Ebene uniform, konnte damit bestätigt werden.

Räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit

Die Aggregationsindizes der Befallshäufigkeiten für die *Fusarium*-Arten wiesen auf eine zufällige oder aggregierte Verteilung hin. In keinem Fall konnte eine regelmäßige Verteilung oder eine Tendenz dazu beobachtet werden.

Die partielle Taubährigkeit verhält sich weitgehend wie eine monozyklische Krankheit (SUTTON, 1982). Das Auftreten der Krankheit steht in enger Beziehung zur Menge und räumlichen Verteilung des Primärinokulums (ZADOKS & SCHEIN, 1979). Primärinokulum von *Fusarium* spp. wird hauptsächlich auf oberflächennahen Ernteresten der Vorfrüchte gebildet und kann sowohl wind- als auch bodenbürtig sein (SUTTON, 1982; PARRY *et al.*, 1995; BATEMAN, 2005). Das windbürtige Inokulum setzt sich aus Ascosporen von *F. graminearum* und vermutlich aus Mikrokonidien von *F. poae* zusammen und kann über Distanzen von

einigen Metern bis zu mehreren hundert Metern bei anhaltend starkem Wind transportiert werden (JENKINSON & PARRY, 1994; PARRY *et al.*, 1995; MARKELL & FRANCL, 2003). Damit ist neben der Infektion von Pflanzen innerhalb des Feldes auch eine Infektion von Pflanzen in benachbarten Feldern möglich. Bodenbürtiges Inokulum kann als Konidiosporen aller *Fusarium*-Arten aus dem Artenkomplex auftreten. Verbreitet werden die Konidiosporen über Regenspritzer, die die Sporen sukzessive über die Blätteragen oder direkt zur Ähre transportieren. Die Reichweite dieser Art des Sporentportes ist begrenzt und reicht von ca. 60 cm bis 100 cm. Dies ist aber als ausreichend für die Infektion benachbarter Pflanzen anzusehen (ADOLF, 1998; HÖRBERG, 2002; JENKINSON & PARRY, 1994). Verlagerungen durch Wind oder Wasserfluss auf der Bodenoberfläche können die räumliche Verteilung der Erntereste auf dem Feld verändern. So führten WILHELM & JONES (2005) die Aggregation der Partiiellen Taubähigkeit in einigen Weizenbeständen auf das aggregierte Vorliegen von Maisstoppeln zurück, die während des Winters durch oberirdischen Wasserabfluss in Bodenrillen zusammengeschoben wurden. Die räumliche Verteilung der Erntereste des Vorjahres hat also einen hohen Einfluss auf die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit, wobei im Fall von bodenbürtigem Inokulum, aufgrund der kürzeren Transportdistanzen, das Verteilungsmuster der Befallshäufigkeit dem Verteilungsmuster der Erntereste wesentlich ähnlicher ist als im Fall von windbürtigem Inokulum.

Neben dem Primärinokulum haben noch weitere Faktoren einen Einfluss auf die Ausprägung der Befallshäufigkeit. So sind Niederschlag und Temperatur vor der Blüte wichtig für die Entwicklung und Reifung des Inokulums auf den Ernteresten der Vorfrucht (SUNG & COOK, 1980; XU, 2003). Während der Blüte sind Niederschlagsmenge und -verteilung von großer Bedeutung für eine erfolgreiche Infektion, da Konidien durch Regenspritzer von der Bodenoberfläche auf die Pflanze transportiert werden (LIENEMANN, 2002; OBST & FUCHS, 2000). Weiterhin ist zur Keimung von Konidien und Ascosporen auf der Ähre eine hohe Luftfeuchtigkeit bzw. flüssiges Wasser vonnöten (HÖRBERG, 2002; ROSSI *et al.*, 2000). Die Witterung in Form von Niederschlag, Temperatur und Lichteinstrahlung hat auch einen Einfluss auf das Bestandesklima und damit indirekt auf die Entwicklung von Inokulum und die Prädisposition der Pflanze für eine Infektion (HOFFMANN *et al.*, 1976). Es kann aber davon ausgegangen werden, dass, aufgrund der geringen Größe der Versuchsflächen, ihrer Lage innerhalb von großen Schlägen sowie der homogenen Böden der direkte und indirekte Einfluss der Witterung als weitgehend uniform angesehen werden kann und daher das Auftreten von Aggregationen nicht erklären kann. Leichte Variation der

direkten und indirekten Witterungseinflüsse könnten aber durchaus das Auftreten zufälliger Verteilungen fördern.

Die Resistenz der Wirtspflanze gegenüber einer Primärinfektion durch *Fusarium* spp. (Typ-I-Resistenz) und gegenüber der Ausbreitung des Pathogens über die Ährenspindel mit möglicher Sekundärinfektion von Körnern (Typ-II-Resistenz) ist vom Genotyp der Pflanze und damit von der Sorte abhängig (AGRIOS, 2005; SCHROEDER & CHRISTENSEN, 1963). Sie ist folglich für alle Pflanzen eines Bestandes als identisch anzusehen. In gewissen Grenzen kann die Ausprägung der Resistenz jedoch variieren. Dies hängt von der Prädisposition der Pflanze ab, welche hauptsächlich durch die Wasser- bzw. Nährstoffversorgung und das Bestandesklima beeinflusst wird (HOFFMANN *et al.*, 1976; BAI & SHANER, 2004).

Auch die Aggressivität eines Isolats ist ein wichtiger Faktor für die Infektion der Pflanzen. Es ist bekannt, dass sich Isolate einer Art hinsichtlich ihrer Aggressivität unterscheiden können (GANG *et al.*, 1998; MIEDANER *et al.*, 2001; CARTER *et al.*, 2002; CUMAGUN & MIEDANER, 2004; CUMAGUN *et al.*, 2004). Treten Isolate unterschiedlicher Aggressivität innerhalb eines Bestandes auf, kann dies, unter sonst gleichen Ausgangsbedingungen, zur räumlichen Variation der Befallshäufigkeit führen.

Die Befallshäufigkeit an einem Messpunkt bzw. in einer Pflanze kann durch die Interaktion einer *Fusarium*-Art mit anderen beeinflusst werden. MORADI (2008) fand in seinen Untersuchungen sowohl Konkurrenz zwischen Arten als auch Amensalismus (Entwicklung einer Art auf Kosten einer anderen). So reduzierte sich die Befallshäufigkeit von Weizenpflanzen bei Mischinokulation im Vergleich zu Einzelinokulation. Eine Interaktion zwischen den *Fusarium*-Arten findet jedoch wahrscheinlich nicht erst bei der Infektion statt, sondern schon während der Entwicklung von *Fusarium* spp. auf den Ernteresten der Vorfrucht. Dadurch kann die Konzentration des Inokulums, auch in Abhängigkeit der Menge an Ernteresten, räumlich variieren und somit einen Einfluss auf das Verteilungsmuster der Befallshäufigkeit haben. In den eigenen Versuchen zeigten sich jedoch für die Befallshäufigkeiten der verschiedenen *Fusarium*-Arten in beiden Jahren keine signifikanten Zusammenhänge. In den meisten Fällen waren die Korrelationen zwar leicht negativ, aber nie signifikant. Das spricht dafür, dass das Auftreten einer Art an einem Punkt des Feldes kaum vom Auftreten anderer Arten beeinflusst wird. Es ist daher unwahrscheinlich, dass die Interaktion zwischen verschiedenen *Fusarium*-Arten zu Aggregationen aufgrund von Konkurrenzvorteilen einer Art führt. Ein Entstehen zufälliger Verteilungen könnte durch die Interaktion aber gefördert werden.

Das aggregierte Auftreten der Befallshäufigkeit lässt sich am besten durch eine Aggregation der Erntereste und eine hohe Bedeutung bodenbürtigen Inokulums erklären. Eine zufällige Verteilung der Befallshäufigkeit kann einerseits bedeuten, dass das Inokulum windbürtig war und möglicherweise aus externen Quellen stammte, was nach DEL PONTE *et al.* (2003) zu einer guten Durchmischung des Inokulums in der Luft und damit zu zufälligen Verteilungen führt. Andererseits könnte eine zufällige Verteilung auch darauf hindeuten, dass bereits die Erntereste der Vorfrucht zufällig verteilt waren. Auch ein Zusammenwirken verschiedener weiterer Faktoren kann einen Einfluss auf das Verteilungsmuster der Befallshäufigkeit haben. Das Entstehen einer zufälligen Verteilung ist hierbei wahrscheinlich.

Eine regelmäßige Verteilung der Befallshäufigkeit würde für eine Windverbreitung des Inokulums bei gleichzeitig hohem Angebot an Sporen vorrangig aus Quellen außerhalb des Feldes sprechen (HOFFMANN *et al.*, 1979). Eine solche Verteilung wurde jedoch nicht beobachtet, was dafür spricht, dass das windbürtige Sporenangebot als eher gering anzusehen ist.

Für *F. avenaceum* wurde in drei von vier Fällen ein aggregiertes Auftreten bzw. eine Tendenz zur Aggregation festgestellt. Dies unterstützt die Aussagen von LESLIE & SUMMERELL (2006) und MEYER (2005), dass eine Infektion der Weizenpflanze mit *F. avenaceum* ausschließlich von bodenbürtigen Inokulum ausgeht. Für diese Art fällt auf Schlag R8 auf, dass sowohl das große Gap-Cluster als auch die Reihe von Probenahmepunkten mit höherer Befallshäufigkeit, entsprechend der Bearbeitungsrichtung, von Südosten nach Nordwesten verläuft. Es ist daher zu vermuten, dass *F. avenaceum* über Bodenpartikel bei der Bodenbearbeitung oder Bestandespflege in den Bestand eingeschleppt wurde. Auch dies spricht für die Bedeutung von bodenbürtigem Inokulum bei *F. avenaceum*.

Die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit von *F. graminearum* war in drei von vier Fällen zufällig. *F. graminearum* wird durch windbürtige Ascosporen und durch bodenbürtige Konidiosporen verbreitet. Das häufige Auftreten von zufälligen Verteilungen ist nach SHAH & BERGSTROM (2001) ein Indiz für die Bedeutung der windverbreiteten Ascosporen als Primärinokulum von *F. graminearum*.

Die Befallshäufigkeit mit *F. poae* konnte auf zwei Schlägen räumlich analysiert werden und war in einem Fall zufällig und im anderen signifikant aggregiert. Die Vorfrucht kann einen wichtigen Einfluss auf die räumliche Verteilung der partiellen Taubährigkeit haben (DILL-MACKY & JONES, 2000; WILHELM & JONES, 2005). Als Vorfrucht wurde im ersten Fall Deutsches Weidelgras angebaut, ein wichtiger Wirt für *F. poae* (INCH & GILBERT, 2003). Hierdurch könnten schon während der Vegetationsperiode des Grasanbaus hohe

Mengen an Inokulum von *F. poae* gebildet worden sein. Es ist zwar zu erwarten, dass die feinen Erntereste des Grases nach der Ernte relativ schnell abgebaut werden können, aber die Biomasse der Erntereste ist als relativ hoch einzuschätzen (KHONGA & SUTTON, 1988; BATEMAN *et al.*, 1998; DILL-MACKY & JONES, 2000). Dies würde auch nach der Ernte gute Entwicklungsbedingungen für *F. poae* und ein hohes Inokulumreservoir im nächsten Jahr bedeuten. Bei Vorfrucht Weizen fanden WILHELM & JONES (2005) ein aggregiertes Auftreten von *Fusarium* spp. im folgenden Jahr. Als Ursache der Aggregation wurde ein Zusammenschieben der Erntereste durch oberirdischen Wasserabfluss vermutet. Trotz der ähnlichen Struktur der Erntereste von Gras und Weizen könnte sich die Situation der Umverteilung des Inokulums anders darstellen. Die feinen Erntereste von Gras können auch leicht durch Wind aufgewirbelt werden und sich so über den Schlag verteilen, was einen ähnlichen Effekt wie bei windbürtigem Inokulum hätte und die zufällige Verteilung erklären könnte. Für *F. poae* wird eine gewisse Bedeutung windbürtigen Inokulums in Form von Mikrokonidien vermutet (MARKELL & FRANCL, 2003). Einen Einfluss dieses potenziell windbürtigen Inokulums auf die räumliche Verteilung kann daher auch nicht ausgeschlossen werden. Dies würde die Ausprägung einer zufälligen Verteilung wahrscheinlich verstärken.

Im zweiten Fall war die Befallshäufigkeit von *F. poae* stark aggregiert. Als Vorfrucht wurde Luzerne angebaut. In Zusammenhang mit Wurzelfäulen an Luzerne, wurde diese Pflanze als möglicher Wirt für *F. poae* beschrieben (HAWN & CORMACK, 1952; SALAS & STACK, 1992; UDDIN & KNOUS, 1991). Wurzelkrankheiten, besonders an mehrjährigen Kulturen, sind im Vergleich zu Blatt- oder Ährenkrankheiten wesentlich ortstreuer, da das Inokulum bodenbürtig ist (AGRIOS, 2005). Sporen von *F. poae* könnten, beispielsweise durch Verschleppung im Rahmen der Bodenbearbeitung, vor der Aussaat auf den Schlag gebracht worden sein und dort Wurzeln von Luzernepflanzen infiziert haben. Bei Einschleppung in vorher befallsfreie Gebiete ist oft eine Aggregation zu erkennen (HOFFMANN *et al.*, 1976). Eine Ausbreitung der Pathogene im Bestand ist zwar möglich, geht aber relativ langsam vonstatten. Nach 3 Jahren werden die Luzerneflächen umgebrochen und Weizen ausgesät. Während der Blüte konnte dann der Weizen durch Inokulum von den Ernteresten der Luzerne infiziert werden. Dadurch würde sich ein ähnliches Verteilungsmuster ergeben wie das der Wurzelfäule der Luzerne, was höchstwahrscheinlich aggregiert war.

Räumliche Verteilung der Befallsintensität

Für die räumliche Verteilung der Befallsstärke zeigte sich ein deutlich anderes Bild als für die Befallshäufigkeit. In zwölf Fällen war die Befallsintensität zufällig verteilt. In sechs

Fällen zeigte sie eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung und in nur zwei Fällen lag eine aggregierte Verteilung vor.

Es wurde angenommen, dass die räumliche Verteilung der Häufigkeit *Fusarium*-befallener Körner zu einem großen Teil durch die räumliche Verteilung des Primärinokulums bestimmt ist. Dieses hat aber anscheinend keinen größeren Einfluss auf die räumliche Verteilung der Befallsintensität, da die Verteilungsmuster von Befallshäufigkeit und Befallsintensität einer Art nicht deckungsgleich waren und in den meisten Fällen auch keine Korrelation zwischen diesen Befallsparametern zu erkennen war.

Die Witterung hat einen großen Einfluss auf die Entwicklung von *Fusarium* spp. innerhalb der Pflanze (SCHÖNBECK *et al.*, 1979; DOOHAN *et al.*, 2003; XU *et al.*, 2007). Dieser Einfluss stellt sich zwar anders dar als der Einfluss auf die Befallshäufigkeit, die Folgen für die räumliche Verteilung sind aber ähnlich, da die Witterung für einen Schlag in beiden Fällen als weitgehend identisch angesehen werden kann. Eine Variation aufgrund von Unterschieden im Bestandesklima, besonders bei unregelmäßigen Beständen, kann aber auch für die Befallsintensität nicht ausgeschlossen werden.

Interaktionen zwischen den *Fusarium*-Arten können zu einer Reduktion der Biomasse einzelner Arten führen. Dieser Effekt ist besonders bei weniger aggressiven Arten wie *F. poae* zu beobachten, während die Biomasse von *F. graminearum* kaum beeinflusst wird (MORADI, 2008; VELLUTI *et al.*, 2000; XU *et al.*, 2007). Ebenso hat die Aggressivität eines Isolates einen Einfluss auf die Schwere einer Infektion und die Menge pilzlicher Biomasse (GANG *et al.*, 1998; MORADI, 2008; MUTHOMI *et al.* 2000).

Im Gegensatz zur Befallshäufigkeit, bei der ein relativ prominenter Faktor wie die Verteilung des Inokulums die räumliche Verteilung stark beeinflussen kann, ließ sich ein solcher Faktor für die Befallsintensität nicht erkennen. Es kann davon ausgegangen werden, dass Interaktionen zwischen den Arten und Heterogenität der Isolate hinsichtlich ihrer Aggressivität, neben anderen Faktoren, einen maßgeblichen Einfluss auf die Bildung pilzlicher Biomasse haben. Die Ausprägung der Befallsintensität an einer Stelle des Feldes ist also noch stärker als die Befallshäufigkeit von einem komplexen Zusammenwirken vieler Faktoren bestimmt und wahrscheinlich relativ unabhängig von der Ausprägung der Befallsintensität an anderen Stellen. Dies kann das deutlich häufigere Auftreten von zufälligen Verteilungen erklären.

Auf dem jüngsten Schlag wurde für drei der vier *Fusarium*-Arten eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung festgestellt. Wahrscheinlich ist die Biodiversität auf einem solchen Schlag noch geringer als auf langjährig bewirtschafteten Flächen. Es ist anzunehmen, dass

dadurch der Einfluss von Interaktion zwischen den *Fusarium*-Arten geringer und weniger komplex ist als auf langjährig bewirtschafteten Flächen. Dies hätte relativ gleichmäßige Entwicklungsbedingungen für die Arten zur Folge, wodurch sich die Befallsintensität wahrscheinlich während der Entwicklung nivellieren konnte.

Die Befallsintensität von *F. culmorum* auf Schlag R8 und *F. graminearum* auf Schlag M1 wies Aggregationszonen auf. In keinem Fall wurde in den Zonen mit niedriger Befallsintensität eine höhere Befallsstärke anderer Arten festgestellt. Ebenso waren die Arten in keinem Fall signifikant negativ mit einer anderen Art korreliert. Eine etwaige Interaktion mit anderen Arten in den Bereichen geringerer Befallsintensität und daraus folgende reduzierte Biomasse ist also keine Erklärung für die Aggregation. *F. graminearum* und *F. culmorum* sind als aggressive Arten beschrieben (FERNANDEZ & CHEN, 2005). Ebenso ist bekannt, dass die Aggressivität innerartlich stark variieren kann (CUMAGUN & MIEDANER, 2004; CUMAGUN *et al.*, 2004; MIEDANER *et al.*, 2001 & 2004). Möglicherweise befanden sich in den Zonen mit höherer Befallsintensität verstärkt aggressive Isolate, die besonders hohe Befallsintensitäten verursachten. Dies könnte die Aggregation der Befallsintensität erklären. Ebenso ist es allerdings möglich, dass sich in den Zonen mit geringer Befallsintensität nur sehr wenig Inokulum befand, wodurch nur wenige Pflanzen infiziert wurden, was dann im Mittel zu einer sehr geringen oder nicht nachweisbaren Befallsintensität geführt hätte.

Räumliche Verteilung der Mykotoxinbelastung

Für die Mykotoxinbelastung wurden alle Verteilungsmuster von Aggregation über zufällige Verteilung bis hin zur regelmäßigen Verteilung beobachtet. In keinem Fall wurde aber für ein Mykotoxin in einem Feld eine regelmäßige Verteilung beobachtet und in einem anderen Feld eine Aggregation.

Besonders häufig traten zufällige Verteilungen bei DON, HT2-Toxin (HT2) und MON auf. Die Faktoren, die die Entwicklung des Pilzes innerhalb der Pflanze beeinflussen, haben auch einen direkten oder indirekten Einfluss auf die Mykotoxinbiosynthese. Weiterhin stellten XU *et al.* (2007) fest, dass sich die Mykotoxinproduktion bei Mischinokulation mit verschiedenen *Fusarium*-Arten deutlich erhöht. Moradi (2008) beschrieb, dass eine Interaktion verschiedener *Fusarium*-Arten zu überproportionaler Mykotoxinbildung führen kann, da das Mykotoxin entweder die Besiedlung der Pflanze für den Pilz erleichtert und ihm so einem Vorteil vor Konkurrenten verschafft, oder andererseits aktiv gegen den Konkurrenten wirksam ist und dessen Entwicklung so unterdrücken kann. Weiterhin besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Aggressivität eines Isolates und der

Mykotoxinproduktion. Aggressivere Isolate von *F. culmorum* und *F. graminearum* produzieren mehr Deoxynivalenol (GANG *et al.*, 1998; MUTHOMI *et al.*, 2000; MESTERHAZY, 2002). Ähnlich wie für die Befallsintensität kann angenommen werden, dass auch die Mykotoxinproduktion von einem komplexen Zusammenspiel vieler Faktoren, wie Interaktion und Aggressivität der Isolate sowie zusätzlich etwaigen Abbau- oder Verlagerungsprozessen abhängt, was das Auftreten zufälliger Verteilung erklären kann.

Die Belastung mit DON war in drei von vier Fällen zufällig verteilt, in einem Fall eher regelmäßig. Es ist also anzunehmen, dass die Höhe der DON-Belastung vom Einfluss vieler Faktoren abhängig ist und von der Höhe der Belastung an benachbarten Messpunkten relativ wenig beeinflusst wird. Es ist bekannt, dass DON ein Pathogenitätsfaktor ist und zur Ausbreitung des Pilzes innerhalb der Pflanze benötigt wird (BAI *et al.*, 2002). Die Intensität des Befalls mit den DON-Bildnern *F. culmorum* und *F. graminearum* sollte daher in einem engen Zusammenhang mit der Höhe der DON-Belastung stehen. So fanden Schneider *et al.* (2009) einen engen Zusammenhang zwischen der pilzlichen Biomasse von *F. graminearum* und dem DON-Gehalt im Erntegut. Die eigenen Untersuchungen stützen diese Ergebnisse. In fünf von acht Fällen lag zwischen der Befallsintensität von *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* und der Belastung mit DON eine hochsignifikante positive Beziehung vor, in zwei Fällen war die Beziehung zwar positiv, aber nicht signifikant. Bis auf zwei Fälle war auch die Befallsintensität von *F. culmorum* und *F. graminearum* zufällig verteilt bzw. in einem Fall eher regelmäßig. Eine Abschätzung der räumlichen Verteilung der DON-Belastung durch das Erfassen der räumlichen Verteilung der Befallsintensität von *F. culmorum* und *F. graminearum* scheint also prinzipiell möglich zu sein.

Auch das Mykotoxin MON trat, ähnlich wie DON, in drei Fällen zufällig verteilt auf. Über die Funktion von MON in der Pflanze ist wenig bekannt, es ist aber vermutlich phytotoxisch (DESJARDINS, 2006). Wichtigster MON-Bildner ist *F. avenaceum*. Der Zusammenhang zwischen der Befallsintensität dieser Art und der MON-Belastung war nur in einem Fall schwach positiv. Es besteht anscheinend also kein direkter Zusammenhang zwischen der Ausbreitung von *F. avenaceum* im Pflanzengewebe und der Produktion von MON. Dies deutet daraufhin, dass MON kein Pathogenitätsfaktor für *F. avenaceum* ist. Dies kann zumindest für das Pathosystem *F. avenaceum*-Weizen angenommen werden.

Auffallend waren starke Aggregationen von NIV sowie Aggregation und Tendenz zur Aggregation für ZEA und α -Zearalenol (ZOL). Wichtige NIV-Bildner sind *F. culmorum* und *F. graminearum*, die je nach Chemotyp entweder NIV oder DON produzieren (DESJARDINS, 2006; MURPHY *et al.*, 2006). Das Auftreten von NIV neben DON im selben Feld weist auf das

Auftreten beider Chemotypen von *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* hin, was die Bedeutung der genetischen Diversität innerhalb der *Fusarium*-Arten für die räumliche Verteilung der Mykotoxine unterstreicht. Der Anteil von NIV-Bildnern an *F. graminearum*- oder *F. culmorum*-Populationen ist in vielen Fällen geringer als der Anteil der DON-Bildner (GANG *et al.*, 1998). In den eigenen Untersuchungen wurde kein Zusammenhang zwischen der Befallsintensität von *F. culmorum* bzw. *F. graminearum* und der NIV-Kontamination festgestellt, was ebenfalls darauf hindeutet, dass der Anteil an NIV-Bildnern eher gering ist. Auf den jüngst rekultivierten Schlag wurde NIV an weniger Probenahmestellen nachgewiesen und die NIV-Belastung war im Durchschnitt wesentlich geringer als auf dem schon länger bewirtschafteten Schlag. Es kann angenommen werden, dass bei der Besiedlung der Fläche durch *Fusarium* spp. die NIV-Chemotypen vereinzelt an einigen Stellen auftraten und daher dort aggregiert vorlagen (Situation auf Schlag R1). Im weiteren Verlauf konnten sich die Isolate von diesen Primärinfektionsgebieten ausbreiten, wodurch an weiteren Probenahmestellen NIV-Bildner nachgewiesen werden konnte, diese jedoch weiterhin verstärkt an einigen Stellen auftraten (Situation auf Schlag R8). Auch *F. poae* ist als NIV-Bildner bekannt. Das verbreitete und starke Auftreten von *F. poae* auf R8 ist ein weiterer Punkt, der die stärkere Verbreitung der NIV-Kontamination sowie die höhere Belastung auf R8 im Gegensatz zu R1 erklären kann.

ZEA und ZOL traten auf Schlag R8 stark aggregiert auf. Diese Mykotoxine können ebenfalls von *F. graminearum* und *F. culmorum* gebildet werden (DESJARDINS, 2006; MURPHY *et al.* 2006). Zentrum der Aggregation war die südöstliche Ecke des Schlages. Dort war ebenfalls das Zentrum der starken Aggregation von *F. culmorum*. Die Belastung mit ZEA und ZOL ist auf diesem Schlag zum größten Teil auf *F. culmorum* zurückzuführen, wie dies auch durch die starken positiven Korrelation zwischen der Befallsintensität von *F. culmorum* und der ZEA- bzw. ZOL-Belastung angedeutet wurde. Ein aggregiertes Auftreten von Mykotoxinbelastungen lässt sich also auf das aggregierte Auftreten der mykotoxinbildenden Arten bzw. der Chemotypen zurückführen.

In drei von vier Fällen wies ENNB eine zumindest tendenziell regelmäßige Verteilung auf. Als wichtigster ENNB-Produzent gilt *F. avenaceum* (HERMANN *et al.*, 1996; NICHOLSON *et al.*, 2007, JESTOI, 2008). Die Befallsintensität von *F. avenaceum* war ebenfalls zufällig oder regelmäßig verteilt. Die Korrelation zwischen Befallsintensität von *F. avenaceum* und der ENNB-Belastung zeigte aber auch, dass der Zusammenhang zwischen den Jahren variiert, also nicht nur von der Höhe der Befallsintensität abhängt. Über die Funktion von ENNB für den Pilz ist wenig bekannt. Versuche mit Mutanten von *F. avenaceum*, die kein ENNB

produzieren können, zeigten, dass diese an Kartoffelknollen weniger pathogen waren. Bei Versuchen mit Roggen konnte dieser Effekt aber nicht festgestellt werden (HERMANN *et al.*, 1996; DESJARDINS, 2006). NICHOLSON *et al.* (2007) gehen davon aus, dass die Wirkung der Mykotoxine nicht unbedingt unspezifisch ist, sondern es sich um sehr komplexe Beziehungen zur Wirtspflanze handeln kann. ENNB scheint also für gewisse Pathogen-Wirt-Beziehungen eine Rolle als Pathogenitätsfaktor zu spielen, für andere nicht. Ob dies für Weizen der Fall ist, ist nicht bekannt. Die unterschiedlich starken Korrelationen zwischen Biomasse von *F. avenaceum* und der ENNB-Belastung sprechen dafür, dass ENNB für *F. avenaceum* nicht unbedingt notwendig für die Besiedlung von Weizenpflanzen ist. Weiterhin ist auch zu beachten, dass THRANE *et al.* (2004) und JESTOI *et al.* (2004) *F. poae* als ENNB-Bildner beschrieben. Sie fanden allerdings nur sehr wenige Isolate mit dieser Fähigkeit. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass *F. poae* als Mitverursacher der ENNB-Belastung in den eigenen Versuchen angesehen werden sollte. Die regelmäßige Verteilung der ENNB-Belastung lässt sich wahrscheinlich durch die Verteilung der Befallsintensität von *F. avenaceum* sowie ähnliche Bedingungen für die ENNB-Biosynthese auf dem gesamten Schlag erklären.

Die Korrelation zwischen der Befallshäufigkeit einer Art und der Belastung mit assoziierten Mykotoxinen war in den meisten Fällen schwächer als der Zusammenhang zwischen Befallsintensität und der Mykotoxinbelastung. Dies ist darauf zurückzuführen, dass mit der Befallsintensität die pilzliche Biomasse abgebildet wird, während bei der Befallshäufigkeit nichts über die Pilzmenge ausgesagt werden kann. Ein befallenes Korn kann mit einigen Sporen von *Fusarium* spp. infiziert oder völlig vom Pilz kolonisiert sein. Die pilzliche Biomasse hat aber einen wesentlich höheren Einfluss auf die mögliche Mykotoxinmenge als die reine Anwesenheit des Pilzes in einem Korn. Für viele *Fusarium*-Arten zeigte sich aber auch bei der Befallsintensität kein Zusammenhang mit der Mykotoxinbildung. Eine Abschätzung der Mykotoxinbelastung über die Erfassung der Befallsintensität ist also für einige *Fusarium*-Arten und ihre assoziierten Mykotoxine anscheinend möglich, für andere nicht.

Genetische Diversität im Bestand

Arten der Gattung *Fusarium* können eine intraspezifische genetische Diversität aufweisen. Diese Diversität kann sich auf die Physiologie des Pathogens und damit beispielsweise auf Aggressivität und Mykotoxinbildung auswirken (MIEDANER *et al.*, 2001; CARTER *et al.*, 2002; ZELLER *et al.*, 2003; YLI-MATTILA, 2004; NICHOLSON *et al.*, 2007; YANG *et al.*, 2008). Eine weit verbreitete Variation hinsichtlich der Mykotoxinproduktion ist das

Auftreten von sogenannten Chemotypen. Prominentestes Beispiel für die Gattung *Fusarium* sind die DON- bzw. NIV-Chemotypen von *F. graminearum* und *F. culmorum* (PARRY *et al.*, 1995; DESJARDINS, 2006). DON ist für die Ausbreitung von *Fusarium* spp. in der Weizenpflanze notwendig (DESJARDINS *et al.*, 1996, BAI *et al.*, 2002) wohingegen NIV für die Infektion von Mais wichtiger zu sein scheint und eine höhere Toxizität für Tiere aufweist.

Auf Schlag R8 wurden 38 *F. graminearum*-Isolate als DON-Bildner identifiziert, vier als NIV-Bildner. GANG *et al.* (1998) untersuchten 42 Isolate von *F. culmorum* aus neun europäischen Ländern und identifizierten dabei 34 DON-Bildner und sieben NIV-Bildner. Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass auch innerhalb eines Schlages eine ähnliche Variabilität der Chemotypen vorliegt wie auf größeren Skalenebenen. Wie schon beschrieben hat der Chemotyp einen Einfluss auf die Aggressivität des Pathogens. Das Auftreten verschiedener Chemotypen einer Art in einem Feld hat daher große Bedeutung für die räumliche Verteilung der Befallsintensität dieser Art. Ebenso kann dies erklären, warum der Zusammenhang zwischen der Befallsintensität von *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* und dem DON-Gehalt zwar in einigen Fällen sehr eng ist, in anderen Fällen aber nur schwache Zusammenhänge nachgewiesen werden konnten.

Die DON-Chemotypen lassen sich weiter unterteilen in den 15AcDON-Chemotyp und den 3AcDON-Chemotyp (DESJARDINS, 2006, KRŠKA *et al.*, 2007; PESTKA, 2007). Auf Schlag R8 wurden von den 38 DON-Chemotypen 36 als 15AcDON-Bildner identifiziert. Die räumliche Verteilung der 3AcDON-Typen scheint auf diesem Schlag nicht zufällig zu sein, da die beiden Probenahmepunkte, an denen diese Chemotypen gefunden wurden, in direkter Nachbarschaft liegen. Interessanterweise war dies auch der Bereich des Feldes, in dem die höchsten Befallsintensitäten mit *F. culmorum* sowie die höchste Belastung mit den Mykotoxinen ZEA und ZOL nachgewiesen wurden.

Die Art *F. graminearum* wurde vor einiger Zeit in verschiedene Gruppen oder Linien (Lineages) unterteilt. Diesen Linien wurde von einigen Forschern auch Spezies-Status zuerkannt (CARTER *et al.*, 2000 & 2002; O'DONNELL *et al.*, 1999). Zhang *et al.* (2007) untersuchten 299 Isolate aus zwölf chinesischen Provinzen. Hiervon wurden 231 Isolate der Linie 6 zugewiesen und traten vorwiegend in wärmeren Regionen auf. Unter ihnen dominierte der 3AcDON-Chemotyp, es wurden aber auch 15AcDON- und NIV-Chemotypen gefunden. Die restlichen 69 Isolate konnten als Vertreter der Linie 7 identifiziert werden und wurden vermehrt in kühleren Regionen gefunden. Sie waren ausschließlich vom 15AcDON-Typ. Dies zeigt den Zusammenhang zwischen klimatischen Bedingungen und dem Auftreten von Chemotypen. In den eigenen Versuchen wurde der 15AcDON-Typ wesentlich häufiger

nachgewiesen als der 3AcDON-Typ. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von Zhang *et al.* (2007).

Das Primerpaar Fg16F/R ergibt für *F. graminearum*-Isolate ein Produkt mit einer Größe zwischen 400 und 580 Basenpaaren. Der Variation liegt eine unterschiedlich häufige Wiederholung eines ca. 30 Nukleotide großen Sequenzmotivs sowie einige Deletionen zugrunde (NICHOLSON *et al.*, 1998). Die Produkte lassen sich sechs Produktklassen zuordnen. CARTER *et al.* (2002) vermuten, dass diese Variation diagnostisch für einige Linien von *F. graminearum* sein könnten. In den eigenen Versuchen konnten 40 der 42 Isolate als Vertreter der Produktklasse 1 identifiziert werden, während zwei Isolate zur Produktklasse 6 gehörten. CARTER *et al.* (2002) konnten von 25 Isolaten aus ganz Europa 24 der Produktklasse 1 zuordnen und ein Isolat der Produktklasse 6. Isolate aus Nepal wiesen eine wesentlich höhere Variation auf und ließen sich 5 verschiedenen Produktklassen zuordnen. Analog zu den Untersuchungen für die europäischen Isolate zeigten die eigenen Untersuchungen, dass sich die Variation, die in den Isolaten aus ganz Europa nachgewiesen wurde, auch innerhalb eines Schlages wiederfindet.

Ausblick

In der vorliegenden Arbeit wurde gezeigt, dass die Untersuchung der räumlichen Verteilung verschiedener Befallsparameter wie Befallshäufigkeit, Befallsintensität und Mykotoxinbelastung Einblicke in die Zusammenhänge der Befallsparameter untereinander aber auch in die Epidemiologie der beteiligten Arten sowie die Charakteristika verschiedener Mykotoxine geben kann. Dies sind wichtige Informationen für die Entwicklung effizienter Beprobungsstrategien zur Durchführung von Krankheits- und Mykotoxinmonitoring und zur Bewertung von Versuchsergebnissen. Für die Parameter Befallshäufigkeit, Befallsintensität und Mykotoxinbelastung wurde zum Teil ein aggregiertes Auftreten innerhalb von Weizenbeständen nachgewiesen. Besonders häufig war dies bei der Befallshäufigkeit der Fall. Bei aggregiertem Auftreten eines Parameters muss der Probenansatz wesentlich höher sein als bei zufälligem oder sogar regelmäßigem Auftreten, um die Befallssituation adäquat abbilden zu können (HOFFMANN *et al.*, 1976). Für die Befallshäufigkeit ist daher eine Beprobungsstrategie einzusetzen, die das besonders häufige Auftreten von Aggregationen berücksichtigt. Es wurde gezeigt, dass die Verteilung des Primärinokulums von hoher Wichtigkeit für die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit ist. Die Anwendung fernerkundlicher Methoden, wie Hyperspektralaufnahmen, ist daher ein möglicher Ansatz, um

beispielsweise Erntereste zu erfassen bzw. zu quantifizieren und somit die Inokulumverfügbarkeit in einer Region abzuschätzen.

Für die Befallsintensität und die Mykotoxinbelastung wurden neben zufälligen Verteilungen und aggregiertem Auftreten auch regelmäßige Verteilungen festgestellt. Das aggregierte Auftreten wurde durch Aggregation von aggressiven Isolaten bzw. Chemotypen erklärt. Auch das Fehlen von Inokulum in Teilen der Felder ist eine mögliche Erklärung. Für die Beprobungsstrategien lässt sich keine generelle Aussage machen. Während für häufig auftretende Mykotoxine wie DON und ENNB Beprobungsstrategien, die auf einer zufälligen Verteilung basieren, praktikabel erscheinen, ist dies für NIV offenbar nicht möglich, da hier von einem aggregierten Auftreten ausgegangen werden muss. Hinsichtlich des Verschneidungsverbotes von mykotoxinbelastetem Erntegut ist anzumerken, dass bei aggregiertem Auftreten von Mykotoxinen bereits während der Ernte eine Verschneidung von belastetem und nicht belastetem Erntegut stattfindet, so fern nicht selektiv beerntet wird. Stehen in Zukunft vermehrt kostengünstigere und schnellere Nachweisverfahren für Mykotoxine zur Verfügung, könnte das selektive Beernten von Weizenbeständen eine Rolle spielen, um die Mykotoxinbelastung des Ernteguts zu minimieren.

Meist werden im Zusammenhang mit der partiellen Taubährigkeit nur die Mykotoxine DON und ZEA sowie NIV behandelt. Dies sind jedoch bei weitem nicht die einzigen Mykotoxine des Pathosystems. Der häufige Nachweis verschiedener *Fusarium*-Arten und ihrer assoziierten Mykotoxine zeigte, dass sich das Problem der partiellen Taubährigkeit nicht auf *F. graminearum* und die Mykotoxine DON, NIV und ZEA reduzieren lässt. Methoden zur simultanen Detektion einer größeren Anzahl verschiedener Mykotoxine von *Fusarium* spp. eröffnen viele Möglichkeiten in der Erforschung des Pathosystems. So kann z. B. die Rolle der verschiedenen Mykotoxine während der Infektion und der Besiedlung der Pflanze analysiert werden. Diese Informationen unterstützen auch eine bessere Einschätzung des Risikos durch multiple Mykotoxinbelastungen. Daneben lassen sich Verschiebungen im Mykotoxinspektrum abhängig von Witterung, Standort oder anderen Einflüssen beschreiben. Als dies führt zu einem tieferen Verständnis des komplexen Pathosystems der partiellen Taubährigkeit und eröffnet Perspektiven für züchterische und agronomische Eingriffe zur Reduktion der Mykotoxinbelastung.

In den letzten Jahren haben molekularbiologische Methoden für die Phytomedizin an Bedeutung gewonnen und neue Möglichkeiten in der Forschung eröffnet. Für die partielle Taubährigkeit wurden Untersuchungen bis vor einigen Jahre fast ausschließlich anhand der Symptome an der Pflanze oder durch Isolierung der Erreger von Pflanzenteilen und

nachfolgender morphologischer Identifikation durchgeführt. Durch die Entwicklung von Nachweismethoden mittels quantitativer PCR für die wichtigsten *Fusarium*-Arten wurde es möglich, die Erreger nicht nur zu identifizieren sondern auch zu quantifizieren (WAALWIJK *et al.*, 2004). Dies ermöglichte unter anderem die Formulierung verbesserter Befall-Verlust-Relationen. Für viele Fälle ist der Zusammenhang zwischen der Befallsintensität einer *Fusarium*-Art und der Belastung mit den assoziierten Mykotoxinen wesentlich stärker als der Zusammenhang zwischen der Befallshäufigkeit und der Mykotoxinbelastung. Damit erlauben die neuen Techniken einerseits eine genauere Abschätzung der Mykotoxinbelastung über die Bestimmung der Befallsintensität, andererseits eröffnen Zusammenhänge zwischen Befallsintensität und Mykotoxinbelastung tiefere Einblicke in die Rolle verschiedener Mykotoxine in der Pathogenese und die Wechselwirkungen Wirt-Pathogen-Mykotoxin. Weitere Einsatzmöglichkeiten sind die Erforschung der Interaktion zwischen verschiedenen *Fusarium*-Arten. Quantitative molekularbiologische Methoden sind also für epidemiologische Fragestellungen äußerst wertvoll und werden in Zukunft verstärkt eingesetzt.

Der Einsatz von geografischen Informationssystemen und entsprechenden Analysetools wie SADIE, auch auf kleineren Skalenebenen, eröffnet völlig neue Möglichkeiten. Komplexe Zusammenhänge können wesentlich einfacher dargestellt, analysiert und später auch modelliert werden. Durch den Einsatz geostatistischer Verfahren können räumliche Verteilungen analysiert werden, was mit klassischer Statistik nur eingeschränkt möglich ist. Dadurch eröffnen sich neue Ansätze in der phytopathologischen Forschung, da nicht nur festgestellt werden kann, ob ein bestimmtes Verteilungsmuster vorliegt, sondern auch wie dieses sich räumlich darstellt. Weiterhin können räumliche Verteilungsmuster verschiedener Parameter miteinander verglichen werden und räumliche Assoziationen bzw. Dissoziation festgestellt werden.

Aus den eigenen Untersuchungen wurde ersichtlich, dass man, je nach Fragestellung, das Pathosystem der partiellen Taubährigkeit auf verschiedenen Skalenebenen betrachten muss. So eignet sich die Regionalebene beispielsweise zur Analyse des Artenspektrums von *Fusarium* spp., dem Einfluss des Klimas auf Auftreten der verschiedenen Arten und zu Fragen wie Einfluss von Vorfrucht und Bodenbearbeitung. Der Zusammenhang zwischen Befall und Mykotoxinbelastung, sowie der Einfluss verschiedenster Faktoren auf die räumliche Verteilung lassen sich auf der Bestandesebene gut untersuchen. Für weitere Untersuchungen ist es interessant auch andere Skalenebenen zu betrachten. Auf der größeren Kontinentalebene werden ähnliche Fragestellungen wie auf der Regionalebene behandelt. Kleinere Skalenebenen wie z. B. im Quadratmeterbereich werden in jüngerer Zeit auch für

epidemiologische Untersuchungen genutzt. So untersuchen zum Beispiel SOMMER *et al.* (2008) die Heterogenität des Auftretens von *Fusarium*-Arten und der Mykotoxinproduktion an einzelnen, benachbarten Weizenähren.

Für zukünftige Untersuchungen ist es interessant zu untersuchen, ob sich die Ergebnisse wie die Art der Verteilungsmuster der verschiedenen Befallsparameter auch unter anderen Bedingungen, evt. auch auf anderen Skalenebenen, bestätigen lassen. Davon abhängig ist zum Beispiel die benötigte Probenanzahl, um die Befallssituation für einen Schlag beschreiben zu können. Von hohem Interesse ist auch die Frage, ob sich Befallsparameter wie z. B. die Mykotoxinbelastung durch Erfassung und Modellierung anderer Befallsparameter abschätzen lassen. Der für einige Fälle enge Zusammenhang von Befallsintensität und Mykotoxinbildung ist in diesem Zusammenhang vielversprechend.

Die intraspezifische genetische Diversität von *Fusarium* spp. wurde am Beispiel von *F. graminearum* gezeigt. Aufbauend auf die Ergebnisse dieser Arbeit wurde ein gemeinsames Forschungsprojekt zwischen der Universität Bonn und dem International Maize and Wheat Improvement Center (CIMMYT, Mexiko) initiiert. Im Rahmen dieses Projektes soll unter anderem das Ausmaß der genetischen Diversität von *Fusarium* spp. auf verschiedenen Skalenebenen sowie die Auswirkungen genetischer Diversität von Pathogenen für die Resistenzzüchtung untersucht werden.

5 Zusammenfassung

Die partielle Taubährrigkeit des Weizens wird durch verschiedene Arten der Gattung *Fusarium* spp. hervorgerufen. Neben den quantitativen Verlusten, die durch diese Krankheit verursacht werden, sind besonders die qualitativen Verluste durch eine Kontamination mit Mykotoxinen von hohem Interesse. Ein besseres Verständnis der räumlichen Verteilung verschiedener Befallsparameter und der Mykotoxine auf Bestandesebene ist nötig um Monitoringstrategien und später auch Prognosemodelle entwickeln zu können. In der vorliegenden Arbeit wurde die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine auf der Bestandesebene untersucht. Weizenschläge wurden hierbei in einem 20 m x 20 m-Raster beprobt. Untersuchungen auf der Regionalebene sollten Aufschluss geben über die aktuelle Befallsituation und die Eignung von rekultivierten Flächen für epidemiologische Untersuchungen überprüfen. Die Versuchsflächen auf der Regionalebene lagen in einem Abstand von 100 m bis zu 10 km zueinander.

- In den Untersuchungen auf der **Regionalebene** wurden in beiden Jahren die Arten *Fusarium avenaceum*, *F. culmorum*, *F. graminearum* und *F. poae* nachgewiesen, im Jahr 2006 zusätzlich *F. proliferatum* und *F. tricinctum*. Vorherrschende Arten waren in beiden Jahren *F. avenaceum* und *F. poae*. Damit wurde gezeigt, dass sich das Artenspektrum von *Fusarium* spp. auf rekultivierten Flächen nicht wesentlich von dem auf langjährig genutzten Flächen unterscheidet.
- Die Befallshäufigkeit lag mit 7,2 % im Jahr 2006 und 5,9 % im Jahr 2007 auf einem ähnlichen Niveau. Dies war auf die ähnlichen Witterungsbedingungen zum Zeitpunkt der Blüte in beiden Jahren zurückzuführen. Unterschiedliche Witterungsbedingungen in der Zeit nach der Blüte bis zur Ernte führten jedoch zu erheblichen Unterschieden bei der Befallsintensität (68 pg mg⁻¹ im Jahr 2006 und 513 pg mg⁻¹ im Jahr 2007).
- In allen Proben wurden die „Leittoxine“ Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEA) nachgewiesen. Auch hinsichtlich des Mykotoxinspektrums besteht kein größerer Unterschied zwischen rekultivierten und langjährig genutzten Flächen. Auch Enniatin B (ENNB) wurde in allen Proben von der Regionalebene detektiert. Ein Befall mit *F. avenaceum* führte in allen Fällen auch zu einer Belastung mit ENNB. Das ist besonders für Regionen wie Rheinland und Nord-Europa von Bedeutung ist, wo *F. avenaceum*

häufig auftritt. Belastungen mit den Mykotoxinen 3-Acetyldeoxynivalenol (3AcDON), Moniliformin (MON), Nivalenol (NIV) und Monoacetoxyscirpenol (MAS) traten seltener auf.

- Der Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung war in nahezu allen Fällen schwächer als der Zusammenhang zwischen Pilzbiomasse und Mykotoxinbelastung. Das Auftreten und Entwicklung einer Art an einem Ort war weitestgehend unabhängig von Auftreten anderer Arten.
- Die Untersuchung der scheinbaren elektrischen Leitfähigkeit für die rekultivierten Schläge auf der **Bestandesebene** wies auf ein homogenes Bodensubstrat hin. Dies in Verbindung mit dem Artenspektrum von *Fusarium* spp. und der Mykotoxinkontamination, die sich nicht wesentlich von denen langjährig genutzter Schläge unterschieden, zeigte, dass sich rekultivierte Flächen gut für räumliche Untersuchungen eignen.
- Die Befallshäufigkeit trat häufig aggregiert oder zufällig verteilt auf, nie aber regelmäßig. *F. avenaceum* trat in drei von vier Fällen aggregiert auf, was die hohe Bedeutung bodenbürtigen Inokulums für diese Art unterstrich. Für *F. graminearum* zeigte das Auftreten von zufälligen Verteilungen in drei von vier Fällen, dass für diese Art das windbürtige Inokulum eine höhere Rolle spielt als das bodenbürtige. Für *F. poae* wurden beide Verteilungsarten festgestellt und durch die räumliche Verteilung der Erntereste der jeweiligen Vorfrucht erklärt. Eine Beprobungsstrategie für die Befallshäufigkeit muss das häufige Auftreten von Aggregationen beachten.
- Bei der Befallsintensität traten wesentlich häufiger zufällige und regelmäßige Verteilungen auf und nur in zwei Fällen Aggregationen. Die Befallsintensität an einem Punkt des Feldes wird durch ein komplexes Zusammenspiel vieler Faktoren bestimmt, wie z. B. Interaktionen oder Aggressivität der Isolate. Hinsichtlich einer Beprobungsstrategie kann gesagt werden, dass eine repräsentative Mischprobe im Normalfall eine gute Aussage über die Befallsintensität ermöglicht. Aggregiertes Auftreten von Inokulum kann aber auch zu Aggregationen der Befallsintensität führen.
- Für die Mykotoxinbelastung wurden alle Verteilungsmuster von Aggregation über zufällige Verteilung bis hin zu regelmäßigen Verteilung festgestellt. Für kein Mykotoxin wurde jedoch in einem Feld ein aggregiertes Auftreten beobachtet und in einem anderen

eine regelmäßige Verteilung. Die Mykotoxine DON und MON traten vorwiegend zufällig verteilt auf, während NIV, ZEA und ZOL Aggregation zeigten. ENNB zeigte in drei von vier Fällen eine regelmäßige Verteilung oder eine Tendenz dazu. Beprobungsstrategien müssen auf die räumliche Verteilung der jeweiligen Mykotoxins abgestimmt sein. Während für DON, MON und ENNB eine repräsentative Mischprobe einen guten Rückschluss auf die Mykotoxinbelastung des gesamten Bestandes zulässt, ist für NIV, ZEA und ZOL eine größere Anzahl an Proben in einem engeren Probenraster nötig um die Mykotoxinbelastung adäquat abbilden zu können.

- Wie auf der Regionalebene war die Korrelation zwischen Befallsintensität und Mykotoxinbelastung in nahezu allen Fällen stärker als zwischen Befallshäufigkeit und Mykotoxinbelastung. Eine Abschätzung der Mykotoxinkontamination über die Befallsintensität ist für einige Arten und Mykotoxine möglich, für andere nicht. Das Auftreten einer Art an einem Probenahmepunkt wurde nicht vom Auftreten einer anderen Art beeinflusst.
- Für die Art *F. graminearum* wurde eine bedeutende genetische Diversität innerhalb eines Schlages festgestellt. Es wurden sowohl DON- als auch NIV-Chemotypen nachgewiesen. Die innerartliche genetische Diversität wies eine ähnliche Größenordnung auf wie bei Populationen auf wesentlich größeren Skalenebenen.

6 Literaturverzeichnis

- ABILDGREN, M.P., LUND, F., THRANE, U., ELMHOLT, S. (1987): Czapek-Dox agar containing iprodione as a selective medium for the isolation of *Fusarium* species. Letters in Applied Microbiology **5**:83-86.
- ADOLF, B. (1998): Epidemiologie und Nachweis von Getreidefusariosen: Untersuchungen an Weizen und Gerste. Herbert Utz Verlag, Wissenschaft, München.
- AGRIOS, G.N. (2005): Plant Pathology. 5. Auflage. Elsevier Academic Press, Amsterdam, Niederlande.
- AIMRUN, W., AMIN, M.S.M., EZRIN, M.H. (2009): Small scale spatial variability of apparent electrical conductivity within a paddy field. Applied and Environmental Soil Science, Article ID 267378, doi:10.1155/2009/267378.
- ANONYM (2001): Verordnung (EG) Nr. 466/2001 der Kommission vom 8. März 2001 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. Amtsblatt der Europäischen Gemeinschaften **L77**:1-13.
- ANONYM (2005): Verordnung (EG) Nr. 856/2005 der Kommission vom 6. Juni 2005 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 466/2001 in Bezug auf Fusariantoxine. Amtsblatt der Europäischen Union **L143**:3-8.
- ANONYM (2009): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln) 2009. Bundessortenamt, Hannover.
- BACKHOUSE, D., BURGESS, L.W., SUMMERELL, B.A. (2001): Biogeography of *Fusarium*. *Fusarium* - Paul E. Nelson Memorial Symposium, ed. by SUMMERELL B.A., LESLIE J.F., BACKHOUSE D., BRYDEN W.L., BURGESS L.W., APS Press, St. Paul, Minnesota 2001, 122-137.

- BAI, G.H., DESJARDINS, A., PLATTNER, R. (2002): Deoxynivalenol-nonproducing *Fusarium graminearum* causes initial infection but does not cause disease spread in wheat spikes. *Mycopathologia* **153**:91-98.
- BAI, G.H., SHANER, G. (1994): Scab of wheat: Prospects for control. *Plant Disease* **78**:760-766.
- BAI, G.H., SHANER, G. (1996): Variation in *Fusarium graminearum* and cultivar resistance to wheat scab. *Plant Disease* **80**:975-979.
- BAI, G.H., SHANER, G. (2004): Management and resistance in wheat and barley to *Fusarium* head blight. *Annual Review of Phytopathology* **42**:135-161.
- BAKAN, B., GIRAUD-DELVILLE, C., PINSON, L., RICHARD-MOLARD, D., FOURNIER, E., BRYGOO, Y. (2002): Identification by PCR of *Fusarium culmorum* strains producing large and small amounts of deoxynivalenol. *Applied and Environmental Microbiology* **68**: 5472-5479.
- BATEMAN, G.L. (2005): The contribution of ground-level inoculum of *Fusarium culmorum* to ear blight of winter wheat. *Plant Pathology* **54**:299-307.
- BATEMAN, G.L., MURRAY, G., GUTTERRIDGE, R.J., COŞKUN, H. (1998): Effects of methods of straw dispersal and depth of cultivation on populations of *Fusarium* spp. in soil and on brown foot rot in continuous winter wheat. *Annals of Applied Biology* **132**:35-47.
- BLUHM, B.H., FLAHERTY, J.E., COUSIN, M.A., WOLOSHUK, C.P. (2002): Multiplex polymerase chain reaction assay for the differential detection of trichothecene- and fumonisin-producing species of *Fusarium* in cornmeal. *Journal of Food Protection* **65**:1955–1961.
- BOTTALICO, A., PERRONE, G. (2002): Toxigenic *Fusarium* species and mycotoxins associated with head blight in small-grain cereals in Europe. *European Journal of Plant Pathology* **108**:611-624.

- BUCHENAUER, H., KANG, Z. (2002): Cytologische Studien zur Infektion und Ausbreitung von Fusarien in Weizenähren sowie zur Abwehrreaktion in der Ähre resistenter und anfälliger Weizensorten. Tagungsband der 13. und 14. Wissenschaftlichen Fachtagung: *Fusarium*-Befall und Mykotoxinbelastung von Getreide und Schadverdichtung in Ackerböden. Universität Bonn, 5. Dezember 2001. 45-54.
- CARTER, J.P., REZANOOR, H.N., DESJARDINS, A.E., NICHOLSON, P. (2000): Variation in *Fusarium graminearum* isolates from Nepal associated with their host of origin. *Plant Pathology* **49**:452-460.
- CARTER, J.P., REZANOOR, H.N., HOLDEN, D., DESJARDINS, A.E., PLATTNER, R.D., NICHOLSON, P. (2002): Variation in pathogenicity associated with the genetic diversity of *Fusarium graminearum*. *European Journal of Plant Pathology* **108**: 573-583.
- CHAMPEIL, A., DORÉ, T., FOURBET, J.F. (2004a): *Fusarium* head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* in wheat grains. *Plant Science* **166**:1389-1415.
- CHAMPEIL, A., FOURBET, J.F., DORÉ, T. (2004b): Influence of cropping system on *Fusarium* head blight and mycotoxin levels in winter wheat. *Crop Protection* **23**:531-537.
- COOK R.J., CHRISTEN, A.A. (1976): Growth of cereal root rot fungi as affected by temperature-water potential interactions. *Phytopathology* **66**: 193-197.
- CROMEY, M.G., SHORTER, S.C., LAUREN, D.R., SINCLAIR, K.I. (2002): Cultivar and crop management influences on *Fusarium* head blight and mycotoxins in spring wheat. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural science* **30**:301-308.
- CUMAGUN, C.J.R., BOWDEN, R.L., JURGENSON, J.E., LESLIE, J.F., MIEDANER, T. (2004): Genetic mapping of pathogenicity and aggressiveness of *Gibberella zeae* (*Fusarium graminearum*) toward wheat. *Phytopathology* **94**:520-526.

- CUMAGUN, C.J.R., MIEDANER, T. (2004): Segregation for aggressiveness and deoxynivalenol production of a population of *Gibberella zeae* causing head blight of wheat. *European Journal of Plant Pathology* **110**:789-799.
- DEL PONTE, E.M., SHAH, D.A., BERGSTROM, G.C. (2003): Spatial patterns of *Fusarium* head blight in New York wheat fields suggest role of airborne inoculum. *Plant Health Progress*, Online, doi: 10.1094/PHP-2003-0418-01-RS.
- DEWOLF, E.D., MADDEN, L.V., LIPPS, P.E. (2003): Risk assessment models for wheat *Fusarium* head blight epidemics based on within-season weather data. *Phytopathology* **93**:428-435.
- DESJARDINS, A.E. (2006): *Fusarium* Mycotoxins: Chemistry, Genetics, and Biology. 1. Auflage. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA.
- DESJARDINS, A.E., PROCTOR, R.H., BAI, G.H., MCCORMICK, S.P., SHANER, G., BUECHLEY, G., HOHN, T.M. (1996): Reduced virulence of trichothecene-nonproducing *Gibberella zeae* in wheat field test. *Molecular Plant-Microbe Interaction* **9**:775-781.
- DEXTER, J.E., CLEAR, R.M., PRESTON, K.R. (1996): *Fusarium* head blight: Effect on the milling and baking of some canadian wheats. *Cereal Chemistry* **73**:695-701.
- 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.
- D'MELLO, J.P.F., MACDONALD, A.M.C., POSTEL, D., DIKSMA, W.T.P., DESJARDINS, A.E., PLACINTA, C.M. (1998): Pesticide use and mycotoxin production in *Fusarium* and *Aspergillus* phytopathogens. *European Journal of Plant Pathology* **104**:741-751.
- DOOHAN, F.M., BRENNAN, J., COOKE, B.M. (2003): Influence of climatic factors on *Fusarium* species pathogenic to cereals. *European Journal of Plant Pathology* **109**: 755-768.

- DOOHAN, F.M., PARRY, D.W., JENKINSON, P., NICHOLSON, P. (1998): The use of species-specific PCR-based assays to analyse *Fusarium* ear blight of wheat. *Plant Pathology* **47**:197–205.
- ELLNER, F.M. (2000): Occurrence of *Fusarium* toxins in the 1999`s harvest. Proceedings of the 22rd Mykotoxin-Workshop Bonn 2000, *Mycotoxin Research*, **16A**:21-26.
- ELLNER, F.M. (2001): *Fusarium* toxins in cereals – results form eight German Federals States in 2000. Proceedings of the 23rd Mykotoxin-Workshop Wien 2001, *Mycotoxin Research*, **17A**:41-45.
- ESKOLA, M., PARIKKA, P., RIZZO, A. (2001): Trichothecenes, ochratoxin A and zearalenone contamination and *Fusarium* infection in Finnish cereal samples in 1998. *Food Additives and Contaminants* **18**:707-718.
- FERNANDEZ, M.R., CHEN, Y. (2005): Pathogenicity of *Fusarium* species on different plant parts of spring wheat under controlled conditions. *Plant Disease* **89**:164-169.
- FISHER, N.L., BURGESS, L.W., TOUSSOUN, T.A., NELSON, P.E. (1982): Carnation leaves as a substrate and for preserving cultures of *Fusarium* species. *Phytopathology* **72**:151-153.
- FITZPATRICK, D.W., PICKEN, C.A., MURPHY, L.C., BUHR, M.M. (1989): Measurement of the relative binding affinity of zearalenone, alpha-zearalenol and beta-zearalenol for uterine and oviduct estrogen receptors in swine, rats and chickens: an indicator of estrogenic potencies. *Comparative Biochemistry and Physiology* **C94**:691–694.
- FÖLLMANN, W., BEHM, C., DEGEN, G.H. (2009): The emerging *Fusarium* mycotoxin enniatin B: in-vitro studies on its genotoxic potential and cytotoxicity in V79 cells in relation to other mycotoxins. *Mycotoxin Research* **25**:11-19.
- FRIEDMAN S. P. (2005): Soil properties influencing apparent electrical conductivity: a review. *Computers and Electronics in Agriculture* **46**:45-70.

- GANG, G., MIEDANER, T., SCHUHMACHER, U., SCHOLLENBERGER, M., GEIGER, H.H. (1998): Deoxynivalenol and nivalenol production by *Fusarium culmorum* isolates differing in aggressiveness toward winter rye. *Phytopathology* **88**:879-884.
- GÄUMANN, E., NAEF-ROTH, S., ETTLINGER, L., PLATTNER, P.A., NAGER, U. (1947): Enniatin, ein neues gegen Mykobakterien wirksames Antibiotikum. *Experientia* **3**:202-203.
- GILBERT, J., FERNANDO, W.G.D. (2004): Epidemiology and biological control of *Gibberella zeae*/*Fusarium graminearum*. *Canadian Journal of Plant Pathology* **26**:464-472.
- GILBERT, J., TEKAUZ, A. (2000): Recent developments in research on *Fusarium* head blight of wheat in Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology* **22**:1-8.
- GLENN, A.E. (2007): Mycotoxigenic *Fusarium* species in animal feed. *Animal Feed Science and Technology* **137**:213-240.
- GOLINSKI, P., KIEKANA, I., KACZMAREK, Z., KOSTECKI, M., KAPTUR, P., WISNIEWSKA, H., CHELKOWSKI, J. (1999): Scab response of selected winter wheat cultivars after inoculation with *Fusarium avenaceum* (Fr.) Sacc. *Journal of Plantpathology* **147**:717-723.
- GORDON, W.L. (1959): The occurrence of *Fusarium* species in Canada. VI. Taxonomy and geographic distribution of *Fusarium* species on plants, insects and fungi. *Canadian Journal of Botany* **37**:257-290.
- HAMILL, R.L., HIGGINS, C.E., BOAZ, H.E., GORMAN, M. (1969): The structure of beauvericin, a new depsipeptide antibiotic toxic to *Artemia salina*. *Tetrahedron Letters* **49**:4255-4258.
- HART, L.P., SCHABENBERGER, O. (1998): Variability of vomitoxin in truckloads of wheat in a wheat scab epidemic year. *Plant Disease* **82**:625-630.
- HAWN, E.J., CORMACK, M.W. (1952): Crown bud rot of alfalfa. *Phytopathology* **42**:510-511.

- HEREBIAN, D., ZÜHLKE, S., LAMSHÖFT, M., SPITELLER, M. (2009): Multi-mycotoxin analysis in complex biological matrices using LC-ESI/MS: Experimental study using triple stage quadrupole and linear ion trap-Orbitrap. *Journal of Separation Science* **32**:939-948.
- HERMANN, M., ZOCHER, R., HAESE, A. (1996): Enniatin production by *Fusarium* strains and its effect on potato tuber tissue. *Applied and Environmental Microbiology* **62**:393-398.
- HOFFMANN C. (2004): Software: EM38 GPS. INRES - Bodenwissenschaften, Universität Bonn.
- HOFFMANN, G.M., NIENHAUS, F., SCHÖNBECK, F., WELTZIEN, H.C., WILBERT, H. (1976): *Lehrbuch der Phytomedizin*. 1. Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- HOOKE, D.C., SCHAAFSMA, A.W., TAMBURIC-ILINCIC, L. (2002): Using weather variables pre- and post-heading to predict deoxynivalenol content in winter wheat. *Plant Disease* **86**:611–619.
- HÖRBERG, H.M. (2002): Patterns of splash dispersed conidia of *Fusarium poae* and *Fusarium culmorum*. *European Journal of Plant Pathology* **108**:73-80.
- INCH, S., GILBERT, J. (2003): The incidence of *Fusarium* species recovered from inflorescences of wild grasses in southern Manitoba. *Canadian Journal of Plant Pathology* **25**:379-383.
- JELINEK, C.F., POHLAND, A.E., WOOD, G.E. (1989): Worldwide occurrence of Mycotoxins in foods and feeds - an update -. *Journal of AOAC International* **72**:223-230.
- JENKINSON, P., PARRY, D.W. (1994): Splash dispersal of conidia of *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*. *Mycological Research* **98**:505-510.
- JESTOI, M. (2008): Emerging *Fusarium*-Mycotoxins Fusaproliferin, Beauvericin, Enniatins and Moniliformin – A review. *Critical Reviews in Food Science and Nutrition* **48**:21-49.

- JESTOI, M., PAAVANEN-HUHTALA, S., UHLIG, S., RIZZO, A., YLI-MATTILA, T. (2004): Mycotoxins and cytotoxicity of Finish *Fusarium*-strains on rice cultures. Proceedings of the 2nd International Symposium on *Fusarium* head blight incorporating the 8th European *Fusarium* Seminar 2004: 405-409. ed. by CANTY, S.M., BORING, T., WARDWELL, J., WARD, R.W, Michigan State University, East Lansing, MI, USA.
- JOFFE, A.Z. (1986): *Fusarium* species: their biology and toxicology. Wiley & Sons, New York.
- JUNG, W.K., KITCHEN, N.R., SUDDUTH, K.A., KREMER, R.J., MOTAVALLI P.P. (2005): Relationship of Apparent Soil Electrical Conductivity to Claypan Soil Properties. Soil Science Society of America Journal **69**: 883–892.
- KHONGA, E.B., SUTTON, J.C. (1988): Inoculum production and survival of *Gibberella zeae* in maize and wheat residues. Canadian Journal of Plant Pathology **10**:232-239.
- KRSKA, R., WELZIG, E., BOUDRA, H. (2007): Analysis of *Fusarium* toxins in feed. Animal Feed Science and Technology **137**:241-264.
- LACEY, J., BATEMAN, G.L., MIROCHA, C.J. (1999): Effects of infection time and moisture on development of ear blight and deoxynivalenol production by *Fusarium* spp. in wheat. Annals of Applied Biology **134**:277-283.
- LANGSETH, W., BERNHOFT, A., RUNDBERGET, T., KOSIAK, B., GAREIS, M. (1999): Mycotoxin production and cytotoxicity of *Fusarium* strains isolated from Norwegian cereals. Mycopathologia **144**:103-113.
- LEPSCHY V. GEISSENTHAL, J. (1992): Fusarientoxine in Getreide - ihre Entstehung und Vorbeugungsmaßnahmen. Gesunde Pflanze **44**:35-39.
- LESLIE, J.F., SUMMERELL, B.A. (2006): The *Fusarium* Laboratory Manual. 1. Ausgabe, Blackwell publishing, Ames, Iowa, USA.

- LI, H.P., WU, A.B., ZHAO, C.S., SCHOLTEN, O., LOFFLER, H., LIAO, Y.C. (2005): Development of a generic PCR detection of deoxynivalenol- and nivalenol-chemotypes of *Fusarium graminearum*. *FEMS Microbiology Letters* **243**:505-511.
- LIENEMANN, K. (2002): Auftreten von *Fusarium*-Arten an Winterweizen im Rheinland und Möglichkeiten der Befallskontrolle unter besonderer Berücksichtigung der Weizensorte. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2002.
- LINK, H.F. (1809): *Observationes in ordines plantarum naturales*, Dissertatio I. Der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin Magazin für die neuesten Entdeckungen in der gesammten Naturkunde **3**:3–42.
- LOGRIECO, A., BOTTALICO, A., MULÈ, G., MORETTI, A., PERRONE, G. (2003): Epidemiology of toxigenic fungi and their associated mycotoxins for some Mediterranean crops. *European Journal of Plant Pathology* **109**:645–667.
- LOGRIECO, A., MORETTI, A., FORNELLI, F., FODLIANO, V., RITIENI, A., CARAFFA, M.F., RANDAZZO, G. BOTTALICO, A., MACCHIA, L. (1996): Fusaproliferin production by *Fusarium subglutinans* and its toxicity to *Artemia salina* SF-9 insect cells and IARC/LCL 171 human B lymphocytes. *Applied and Environmental Microbiology* **62**:3378-3384.
- MANKA, M., VISCONTI, A., CHELKOWSKI, J., BOTTALICO, A. (1985): Pathogenicity of *Fusarium* isolates from wheat, rye and triticale toward seedlings and their ability to produce trichothecenes and zearalenone. *Phytopathologische Zeitung* **113**:24-29.
- MARKELL, S.G., FRANCL, L.J. (2003): *Fusarium* head blight inoculum: Species prevalence and *Gibberella* spore type. *Plant Disease* **97**:814-820.
- MATTHIASCHK, G., SPOTT, H.J., WEBER, R. (1999): Fumonisine in Lebensmitteln des deutschen Marktes. *Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz* **42**:161-164.

- MCMULLEN, M., JONES, R., GALLENBERG, D. (1997): Scab of wheat and barley: A re-emerging disease of devastating impact. *Plant Disease* **81**:1340-1348.
- MEIER, A. (2003): Zur Bedeutung von Umweltbedingungen und pflanzenbaulichen Maßnahmen auf den Fusarium-Befall und die Mykotoxinbelastung von Weizen. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2003.
- MERTENS, F.M. (2008): Räumliche Variabilität von Bodeneigenschaften mit Relevanz für das Verhalten von Herbiziden – ein Optimierungsansatz für den Präzisionspflanzenschutz. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- MESTERHAZY, A. (2002): Role of deoxynivalenol in aggressiveness of *Fusarium graminearum* and *F. culmorum* and in Resistance to *Fusarium* Head Blight. *European Journal of Plant Pathology* **108**:675-684.
- MEYER, G.H. (2005): Kornbefall durch *Fusarium*-Arten an Winterweizen in Nordrhein-Westfalen in den Jahren 2001 – 2003 unter besonderer Berücksichtigung Moniliformin-bildender Arten. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2005.
- MIEDANER, T., SCHILLING, A.G., GEIGER, H.H. (2001): Molecular genetic diversity and variation for aggressiveness in populations of *Fusarium graminearum* and *Fusarium culmorum* sampled from wheat fields in different countries. *Journal of Phytopathology* **149**:641-648.
- MIEDANER, T., SCHILLING, A.G., GEIGER, H.H. (2004): Competition effects among isolates of *Fusarium culmorum* differing in aggressiveness and mycotoxin production on heads of winter rye. *European Journal of Plant Pathology* **110**:63-70.
- MIELKE, H., MEYER, D. (1990): Neuere Untersuchungen zur Bekämpfung der Auswirkungen des Fungizideinsatzes auf Ertragsleistung und Backqualität beim Weizen. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **42**:161-170.

- MIELKE, H., WEINERT, J. (1996): Untersuchungen zur Wirkung verschiedener Fungizide gegenüber dem Erreger der Partiellen Taubährigkeit (*Fusarium culmorum* (W. G. Sm.) Sacc.) Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes **48**:93-95.
- MÖLLER, E.M., CHELKOWSKI, J., GEIGER, H.H. (1999): Species-specific PCR assays for the fungal pathogens *Fusarium moniliforme* and *Fusarium subglutinans* and their application to diagnose maize ear rot disease. Journal of Phytopathology-Phytopathologische Zeitschrift **147**:497-508.
- MORADI, M.G. (2008): Microbiological and molecular assessment of interactions among the major *Fusarium* head blight pathogens on wheat ears. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn, 2008.
- MULE, G., SUSCA, A., STEA, G., MORETTI, A. (2004): A species-specific PCR assay based on the calmodulin partial gene for identification of *Fusarium verticillioides*, *F. proliferatum* and *F. subglutinans*. European Journal of Plant Pathology **110**:495–502.
- MURPHY, P.A., HENDRICH, S.; LANDGREN, C., BRYANT, C.M. (2006): Food Mycotoxins: An update. Journal of Food Science **71**:R51-R65.
- MUTHOMI, J.W., SCHÜTZE, A., DEHNE, H.-W., MUTITU, E.W., OERKE, E.-C. (2000): Characterization of *Fusarium culmorum* isolates by mycotoxin production and aggressiveness to winter wheat. Journal of Plant Diseases and Protection **107**:113-123.
- NADUBINSKA, M., RITIENI, A., MORETTI, A., SROBAROVA, A. (2003): Chorophyll content in maize plants after treatment with fusariotoxins. Biologia Bratislava **58**:115-119.
- NICHOLSON, P., GOSMAN, N., DRAEGER, R., THOMSETT, M., CHANDLER, E., STEED, A. (2007): The *Fusarium* head blight pathosystem – Status and knowledge of its components. Wheat production in stressed environments. Proceedings of International Wheat Conference, Mar de Plata, Argentinien. ed. by BUCK, H.T., NISI, J.E, SALOMON, N., Springer, Dordrecht, Niederlande.

- NICHOLSON, P., SIMPSON, D.R., WESTON, G., REZANOOR, H.N., LEES, A.K., PARRY, D.W., JOYCE, D. (1998): Detection and quantification of *Fusarium culmorum* and *Fusarium graminearum* in cereals using PCR assays. *Physiological and Molecular Plant Pathology* **53**:17-37.
- NIESSEN, M.L., VOGEL, R.F. (1998): Group specific PCR detection of potential trichothecene-producing *Fusarium* species in pure cultures and cereal samples. *Systematic and Applied Microbiology* **21**:618–631.
- NIGHTINGALE, M.J., MARCHYLO, B.A., CLEAR, R.M., DEXTER, J.E., PRESTON, K.R. (1999): *Fusarium* head blight: Effect of fungal proteases on wheat storage proteins. *Cereal Chemistry* **76**:150-158.
- NIRENBERG, H.I. (1976): Untersuchungen über die morphologische und biologische Differenzierung in der *Fusarium*-Sektion *Liseola*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* **169**:1-117.
- OBST, A., FUCHS, H. (2000): Der *Fusarium*-Besatz bei Winter- und Sommergetreide – Untersuchungsergebnisse von Saatgetreidestichproben aus Bayern 1987-1999. *Bodenkultur und Pflanzenbau* **4**:21-26.
- OBST, A., LEPSCHY V. GEISSENTHAL, J., BECK, R. (1997): On the etiology of *Fusarium* head blight of wheat in South Germany-preceding crops, weather conditions for inoculum production and head infection, proneness of the crop to onfection and mycotoxin production. *Cereal Research Communications* **25**:699–703.
- OBST, A., OBST, L., STRECKERT, G. (2000): Zusammenfassende Bewertung der Ergebnisse des LBP-Forschungsverbundes *Fusarium*. *Bodenkultur und Pflanzenbau* **4**:105-107.
- O'DONNELL, K., KISTLER, H.C., TACKE, B.K., CASPER, H.H. (1999): Gene genealogies reveal global phylogeographic structures and reproductive isolation among lineages of *Fusarium graminearum* the fungus causing wheat scab. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **97**:7905-7910.

- OSBORNE, L.E., STEIN, J.M. (2007): Epidemiology of *Fusarium* head blight on small-grain cereals. *International Journal of Food Microbiology* **119**:103-108.
- PARRY, D.W. (1990): The incidence of *Fusarium* spp. In stem bases of elected crops of winter wheat in the Midlands, UK. *Plant Pathology* **39**:619-622.
- PARRY, D.W., JENKINSON P., MCLEOD, L. (1995): *Fusarium* ear blight (scab) in small grain cereals - A review. *Plant Pathology* **44**:207-238.
- PARRY, D.W., NICHOLSON, P. (1996): Development of a PCR assay to detect *Fusarium poae* in wheat. *Plant Pathology* **45**:383–391.
- PERRY, J.N. (1995): Spatial analysis by distance indices. *Journal of Animal Ecology* **64**:303-314.
- PERRY, J.N., BELL, E.D., SMITH, R.H., WOIWOD, I.P. (1996): SADIE: software to measure and model spatial pattern. *Aspects of Applied Biology* **46**:95 - 102.
- PERRY, J.N., WINDER, L., HOLLAND, J.M., ALSTON, R.D. (1999): Red-blue plots for detecting clusters in count data. *Ecology Letters* **2**:106-113.
- PESTKA, J.J. (2007): Deoxynivalenol: Toxicity, mechanisms and animal health risks. *Animal Feed Science and Technology* **137**:283-293.
- PIRGOZLIEV, S.R., EDWARDS, S.G., HARE, M.C., JENKINSON, P. (2003): Strategies for the control of *Fusarium* head blight in cereals. *European Journal of Plant Pathology* **109**:731–742.
- POOLE, R.W. (1979): *An introduction to quantitative ecology*. McGraw-Hill, New York, USA.

- PRITSCH, C., MUEHLBAUER, G.J., BUSHNELL, W.R., SOMERS, D.A., VANCE, C.P. (2000): Fungal Development and induction of defense response genes during early infection of wheat spikes by *Fusarium graminearum*. *Molecular Plant-Microbe Interactions* **13**:159-169.
- RAISBECK, M.F., ROTTINGHAUS, G.E., KENDALL, J.D. (1991): Effects of naturally occurring mycotoxins on ruminants. *Mycotoxins and Animal Foods*: 647–677. ed. by SMITH, J.E., HENDERSON, R.S.. CRC Press, Boca Raton.
- RANDAZZO, G., FOGLIANO, V., RITIENI, A., MANNINA, L., ROSSI, E., SCARALLO, A. (1993): Proliferin, a new sesterterpene from *Fusarium proliferatum*. *Tetrahedron* **49**:10883-10896.
- RHOADES, J. D., MANTEGHI, N. A., SHOUSE, P. J., ALVES, W. J. (1989): Soil electrical-conductivity and soil-salinity - new formulations and calibrations. *Soil Science Society of America Journal* **53**:433-439.
- RILEY, R.T., VOSS, K.A., NORRED, W.P., SHARMA, R.P., WANG, E., MERRILL, A.H. (1998): Fumonisin: mechanism of mycotoxicity. *Revue de Médecine Vétérinaire* **149**:617-626.
- RODEMANN, B. (1999): Mykotoxine im Getreide. Forschungsreport Ernährung-Landwirtschaft-Forsten **2/1999**: 6-9.
- RODEMANN, B. (2004): Ährenfusarium- Biologie, Epidemiologie und Sortenleistung. *GetreideMagazin* **4**:203-207.
- ROSSI, V., PATTORI, E., LANGUASCO, L., GIOSUÈ, S. (2000): Dispersal of *Fusarium* species causing head blight of wheat under field conditions. *Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft*, **377**:45-46.
- ROTH, L., FRANK, H., KORMANN, K. (1990): Giftpilze - Pilzgifte. Ecomed Verlagsgesellschaft mbH, Landsberg/Lech.

- ROTTER, B.A., PRELSUKY, D.B. (1996): Toxicology of deoxynivalenol (vomitoxin). *Journal of Toxicology and Environmental Health* **48**:1-34.
- SALAS, B. und STACK, R.W. (1987): Incidence of fungi associated with roots and crowns of declining alfalfa in North Dakota. *Phytopathology* **77**:1759.
- SCHMIDT, R. (1989): The application of *Artemia salina* L. bioassay for screening of *Fusaria* toxins. *Fusarium: mycotoxins, taxonomy and pathogenicity*. ed. by CHELKOWSKI, J., Elsevier, Amsterdam, Niederlande.
- SCHNEIDER, N., GUO, J.-R., VERREET, J.-A., BEYER, M. (2009): Assessing the intensity of *Fusarium*-damage in wheat: A comparison of selected disease parameters during diseases development and the role of fungicides. *Journal of Plant Diseases and Protection* **116**:118-123.
- SCHÖNBECK, F. (1979): *Pflanzenkrankheiten – Einführung in die Phytopathologie*, 1. Auflage. Teubner Verlag, Wiesbaden.
- SCHROEDER, H.W., CHRISTENSEN, J.J. (1963): Factors affecting the resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology* **53**:831-838.
- SCOTT, P.M., ABBAS, H.K., MIROCHA, C.J., LAWRENCE, G.A., WEBER, D. (1987): Formation of moniliformin by *Fusarium sporotrichioides* and *Fusarium culmorum*. *Applied and environmental Microbiology* **53**:196-197.
- SHAH, D.A., BERGSTROM, G.C. (2001): Spatial patterns of *Fusarium* head blight in New York wheat fields in 2000 and 2001. *Proceedings of the 2001 National Fusarium head blight forum*: 154-155.
- SIMPSON, D.R., WESTON, G.E., TURNER, J.A., JENNINGS, P., NICHOLSON, P. (2001): Differential control of head blight pathogens of wheat by fungicides and consequences for mycotoxin contamination of grain. *European Journal of Plant Pathology* **107**:421-431.

- SMITH, W.G. (1884): Diseases of field and garden crops. MacMillan & Co., London.
- SNIJEDERS, C.H.A., KRECHTING, C.H. (1992): Inhibition of deoxynivalenol translocation and fungal colonization in *Fusarium* head blight resistant wheat. Canadian Journal of Botany **70**:1570-1576.
- SOMMER, C., STEINER, U., OERKE, E.-C., DEHNE, H.-W. (2008): Heterogeneity in the occurrence of *Fusarium* spp. in wheat. Cereal Research Communications **36** (Supplement 6):643-644.
- STARKEY, D.E., WARD, T.J., AOKI, T., GALE, L.R., KISTLER, H.C., GEISER, D.M., SUGA, H., TOTH, B., VARGA, J., O'DONNELL, K. (2007): Global molecular surveillance reveals novel *Fusarium* head blight species and trichothecene toxin diversity. Fungal Genetics and Biology **44**:1191-1204.
- STRANGE, R.N., SCOTT, P.R. (2005): Plant disease: A threat to global food security. Annual Review of Phytopathology **43**:83-116.
- STRANGE, R.N., SMITH, H. (1978): Effects of choline, betaine and wheat-germ extract on growth of cereal pathogens. Transactions of the British Mycological Society **70**:193-199.
- SUNG, J.M., COOK, R.J. (1980): Effects of water potential on reproduction and spore germination of *Fusarium graminearum*, *F. culmorum* and *F. avenaceum*. Phytopathology **71**:499-504.
- 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.
- TANAKA, T., HASEGAWA, A., YAMAMOTO, S., LEE, U., SUGIURA, Y., UENO, Y. (1988): Worldwide contamination of cereals by *Fusarium* mycotoxins nivalenol, deoxynivalenol and zearalenone. 1. Survey of 19 countries. Journal of Agricultural and Food Chemistry **36**:979-983.

- THRANE, U. (2000): Mycotoxin producing *Fusarium* species occurring in Danish cereals. Proceedings of the 17th Danish Plant Protection Conference II, DJF-rapport **24**:165-169.
- THRANE, U., ADLER, A. CLASEN, P.-E., GALVANO, F., LANGSETH, W., LEW, H., LOGRIECO, A., FOG NIELSEN, K., RITIENI, A. (2004): Diversity in metabolite production by *Fusarium langsethiae*, *Fusarium poae* and *Fusarium sporotrichioides*. International Journal of Food Microbiology **95**:257-266.
- UDDIN, W., KNOUS, T.R. (1991): *Fusarium* species associated with crown rot of alfalfa in Nevada. Plant Disease **75**:51-56.
- VELLUTI, A., MARIN, S., BETTUCCI, L., RAMOS, A.J., SANCHIS, V. (2000) The effect of fungal competition on colonization of maize grain by *Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum* and *F. graminearum* and on fumonisin B1 and zearalenone formation. International Journal of Food Microbiology **59**:59-66.
- VIGIER, B., REID, L.M., SEIFERT, K.A., STEWART, D.W., HAMILTON, R.I. (1997): Distribution and prediction of *Fusarium* species associated with maize ear rot in Ontario. Canadian Journal of Plant Pathology **19**:60–65.
- WAALWIJK, C., VAN DER HEIDE, R., DE VRIES, I., VAN DER LEE, T., SCHOEN, C., COSTREL-DE CORAINVILLE, G., HÄUSER-HAHN, I., KASTELEIN, P., KÖHL, J., LONNET, P., DEMARQUET, T., KEMA, G.H.J. (2004): Quantitative detection of *Fusarium* species in wheat using TaqMan. European Journal of Plant Pathology **110**:481-494
- WAALWIJK, C., KASTELEIN, P., DEVRIES, I., KERENYI, Z., VAN DER LEE, T., HESSELINK, T., KÖHL, J., KEMA, G.H.J. (2003): Major changes in *Fusarium* spp. in wheat in the Netherlands. European Journal of Plant Pathology **109**:743–754.
- WEINERT, J., WOLF, G.A. (1994): Ursachen unterschiedlicher Sortenanfälligkeit gegenüber der Partiellen Taubährigkeit (*Fusarium* spp.). Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt **301**.

- WILHELM, K.P., JONES, R.K. (2005): Meso- and microscale patterns of *Fusarium* head blight in spring wheat fields in Minnesota. *Plant Disease* **89**:474-479.
- WILLIAMS, K.J., DENNIS, J.I., SMYL, C., WALLWORK, H. (2002): The application of species-specific assays based on the polymerase chain reaction to analyse *Fusarium* crown rot of durum wheat. *Australasian Plant Pathology* **31**:119–127.
- XU, X. (2003): Effects of environmental conditions on the development of *Fusarium* ear blight. *European Journal of Plant Pathology* **109**:683-689.
- XU, X.-M., MONGER, W., RITIENI, A., NICHOLSON P. (2007) Effect of temperature and duration of wetness during initial infection periods on disease development, fungal biomass and mycotoxin concentrations on wheat inoculated with single, or combinations of, *Fusarium* species. *Plant Pathology* **56**:943–956.
- XU, X.-M., PARRY, D.W., NICHOLSON, P., THOMSETT, M.A., SIMPSON, D., EDWARDS, S.G., COOKE, B.M., DOOHAN, F.M., MONAGHAN, S., MORETTI, A, TOCCO, G., MULE, G., HORNOK, L., BÉKI, E., TATNELL, J., RITIENI, A. (2008): Within-field variability of *Fusarium* head blight pathogens and their associated mycotoxins. *European Journal of Plant Pathology* **120**:21-34.
- YANG, L., VAN DER LEE, T., YANG, X., YU, D., WAALWIJK, C. (2008): *Fusarium* populations on chinese barley show a dramatic gradient in mycotoxin profiles. *Phytopathology* **98**:719-727.
- YLI-MATTILA, T., PAAVANEN-HUHTALA, S., PARIKKA, P., KONSTANTINOVA, P., GAGKAEVA, T.Y. (2004): Molecular and morphological diversity of *Fusarium* species in Finland and north-western Russia. *European Journal of Plant Pathology* **110**:573-585.
- YODER, W.T., CHRISTIANSON, L.M. (1998): Species-specific primers resolve members of *Fusarium* section *Fusarium* – Taxonomic status of the edible “Quorn” fungus reevaluated. *Fungal Genetics and Biology* **23**:68–80.

- YU., S.R., LIU., X.J., WANG., Y.H., LIU., J. (1995): A survey of moniliformin contamination in rice and corn from Keshan disease and non-Keshan disease areas in China. *Biomedical and Environmental Sciences* **8**:330-334.
- ZADOKS, J.C., SCHEIN, R.D (1979): *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press, New York.
- ZELLER, K.A., BOWDEN, R.L., LESLIE, J.F. (2003): Diversity of epidemic populations of *Gibberella zeae* from small quadrats in Kansas and north Dakota. *Phytopathology* **93**:874-880.
- ZHANG, J.B., LI, H.P., DANG, F.J., QU, B., XU, Y.B., ZHAO, C.S., LIAO, Y.C. (2007): Determination of the trichothecene mycotoxin chemotypes and associated geographical distribution and phylogenetic species of the *Fusarium graminearum* clade from China. *Mycological Research* **111**:967-975.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich mich bei all denjenigen bedanken, die mich bei der Durchführung der Arbeit unterstützt haben und so zum Gelingen beigetragen haben.

Herrn Prof. Dr. H.-W. Dehne danke ich für die Überlassung des Themas, das ständige Interesse an meiner Arbeit, das mir entgegengebrachte Vertrauen sowie die vielen anregenden Diskussionen. Ganz besonders herzlich möchte ich mich aber bedanken für Ermöglichung meines Aufenthalts am CIMMYT in Mexiko und seine Unterstützung, die mir während meiner Zeit in Bonn immer gewährt wurde.

Herrn Prof. Dr. J. Leon gilt mein Dank für sein Interesse an meiner Arbeit, die Übernahme des Koreferats und die Ermöglichung der Durchführung molekularbiologischer Arbeiten in seiner Abteilung.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. E.-C. Oerke für die Aufnahme ins DFG-Graduiertenkolleg 722, für die zahllosen Gespräche und freundschaftlichen Diskussionen sowie das stets offene Ohr für neue Ideen und Probleme. Dank aber auch für die kritischen Anmerkungen zu meiner Arbeit, die mich oftmals den entscheidenden Schritt weiterbrachten.

Herrn Dr. G. Dumbeck und Herrn E.-M. Ortmann von der RWE Power AG, Abteilung Landwirtschaftliche Rekultivierung, für die Bereitstellung von Versuchsflächen, die Unterstützung bei der Versuchsplanung und -durchführung und für viele konstruktive Gespräche und Diskussionen.

Meinen Kollegen aus dem Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz und dem Graduiertenkolleg 722 danke ich für die kollegiale und freundschaftliche Atmosphäre sowie ihre Unterstützung, die nicht unwesentlich zum Gelingen der Arbeit beigetragen hat. Besonders erwähnen möchte ich Ingrid Sikora, Kerstin Lange, Stefan Neumann, Andreas Görtz, Constanze Sommer, Mohammad Moradi, Wagacha Maina, und Franz-Michael Mertens.

Herrn Dr. C. Waalwijk und Frau I. deVries vom Plant Research International (Wageningen, Niederlande) für das Training in quantitativer PCR.

Herrn Dr. H. J. Braun, Herrn Dr. E. Duveiller, Herrn Dr. J. Murakami und Frau Dr. M. Mezzalama vom CIMMYT (Mexiko) für die sehr freundliche Aufnahme und angenehme Arbeitsatmosphäre.

Mein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meiner Freundin für ihre immerwährende Unterstützung und Hilfe auch in schwierigen Zeiten.