

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

**Mikroskalige Variabilität des *Fusarium*-Befalls und der
Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern**

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

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

vorgelegt am 20. Dezember 2011

von
Dipl.-Ing. agr. Constanze Maria Elisabeth Sommer
aus Soest

Referent:	Prof. Dr. H.-W. Dehne
Koreferenten:	Prof. Dr. J. Léon Prof. Dr. Dr. h.c. M. Spittler
Tag der mündlichen Prüfung:	02.07.2012
Erscheinungsjahr	2012

Meinen Eltern

„Groß sind die Werke des HERRN; wer sie erforscht, der hat Freude daran.“
(Psalm 111, Vers 2)

Constanze Sommer

Mikroskalige Variabilität des *Fusarium*-Befalls und der Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern

In den Jahren 2007 bis 2009 wurde das Auftreten der partiellen Taubährigkeit in Weizenbeständen auf unterschiedlichen Skalenebenen untersucht und räumlich analysiert. Auf der größten Skalenebene wurde die Variabilität des Auftretens von *Fusarium* spp. in Mischproben unterschiedlicher Weizensorten in Abhängigkeit von Stickstoffgaben und Fungizidapplikation bestimmt. Zur Ermittlung des räumlichen Auftretens von *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine wurden auf der zweiten Skalenebene Rasterbeprobungen auf einer Fläche von 1 x 1 m durchgeführt. Auf der kleinsten Skalenebene wurde das Auftreten von *Fusarium* spp. und die Mykotoxinbelastung an Einzelpflanzen auf einer Fläche von 20 x 20 cm untersucht. Die Bestimmung des *Fusarium*-Befalls erfolgte mikrobiologisch und mittels TaqMan® real-time PCR. Die Mykotoxinanalyse wurde mit einer LC-ESI/MS-Methode zum simultanen Nachweis von 32 Mykotoxinen durchgeführt. Nach einer Clustering-Analyse mittels SADIE® wurden die Ergebnisse unter Zuhilfenahme eines Geographischen Informationssystems räumlich zugeordnet. Zur Beurteilung der Variabilität der Daten diente der Dispersionsindex.

In den Jahren 2007 und 2008 wurden mit *F. graminearum*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *F. culmorum*, *F. tricinctum* und *F. proliferatum* sechs Erreger der partiellen Taubährigkeit von Weizenkörnern aus Misch- und Rasterproben isoliert. Vorherrschende Art war in allen Versuchsjahren *F. graminearum*. Im Jahr 2007 variierte die Befallshäufigkeit auf den beiden untersuchten Standorten zwischen 12,6 % und 40,4 %. Im Jahr 2008 lag die *Fusarium*-Befallshäufigkeit bei den Sorten Drifter und Dekan in etwa auf einem Niveau, wohingegen die Sorte Tommi die doppelte Anzahl *Fusarium*-infizierter Körner aufwies.

Die molekularbiologische Quantifizierung der *Fusarium*-Arten bestätigte *F. graminearum* als vorherrschenden Erreger der partiellen Taubährigkeit in den Versuchsjahren 2007 und 2009. Die Mykotoxine DON und ENNB wurden in allen Proben nachgewiesen, im Jahr 2007 zusätzlich hohe Belastungen durch ZEA. Des Weiteren traten 3Ac-DON, NIV und MON auf. Für die Rasterproben konnte in keinem Fall ein Zusammenhang zwischen *Fusarium*-Befallshäufigkeit und Mykotoxingehalt nachgewiesen werden, dagegen bestand in zwei Rasterproben eine positive Korrelation zwischen *Fusarium*-spezifischer DNA und Mykotoxinbelastung. Bei Untersuchung der Einzelähre korrelierte der untere Ährenabschnitt signifikant mit Befallsintensität und Mykotoxinkontamination.

Die *Fusarium*-Befallshäufigkeit trat in 28 Fällen räumlich zufällig oder aggregiert auf, was auf eine windbürtige Verteilung des Inokulums oder auf die heterogene Verteilung von Ernteresten der Vorfrucht im Bestand zurückzuführen war. In drei Fällen lag für die Befallshäufigkeit eine Gleichverteilung oder eine Tendenz dazu vor. In den Rasterproben mit geringer N-Gabe und ohne Fungizidapplikation trat eine *Fusarium*-Art aggregiert auf, eine Fungizidbehandlung führte zu einer räumlich zufälligen Verteilung dieser Art. In den Rasterproben mit hoher N-Gabe und ohne Fungizidapplikation traten zwei Arten zufällig verteilt auf und bei Fungizidbehandlung lag eine signifikant aggregierte Verteilung dieser Arten vor.

Die Befallsintensität trat in vier von sechs Fällen aggregiert und in zwei Fällen zufällig verteilt auf, was auf die räumliche Verteilung des Primärinokulums zurückzuführen war.

Die räumliche Verteilung der Mykotoxinbelastungen war abhängig vom Mykotoxin. So traten DON, 3Ac-DON und ZEA aggregiert auf, ENNB, MON und NIV zeigten eine räumlich zufallsbedingte Verteilung. In keinem Fall wurde eine gleichmäßige Verteilung festgestellt.

Die unterschiedlichen Verteilungsmuster der *Fusarium*-Befallsparameter zeigten die Notwendigkeit angepasster Beprobungsstrategien auf, um die Befallssituation einzelner Bestände zuverlässig charakterisieren zu können.

Constanze Sommer

Micro-scale variability of *Fusarium* infection and mycotoxin contamination of wheat ears

Investigations on the incidence of *Fusarium* head blight pathogens were carried out in the period 2007 to 2009 on different scales. On the first scale the variability of *Fusarium* species on kernels depending on cultivar and production intensity was analyzed in mixed samples. On the second scale the spatial distribution of *Fusarium* head blight and associated mycotoxins was identified in 25 samples from a grid of 1 x 1 m. On the lowest scale ears were sampled from an area of 20 x 20 cm to determine the presence of *Fusarium* species and mycotoxin contamination on individual plants. Infection with *Fusarium* spp. was analyzed both microbiologically and using TaqMan® real-time PCR. Mycotoxin contamination was determined using a LC-ESI/MS method. Data on frequency and severity of *Fusarium* infected kernels as well as on mycotoxin contamination were statistically analyzed with SADIE® and displayed in a geographic information system. The variance-to-mean-ratio indicated the variability of *Fusarium*-infected kernels.

A total of six *Fusarium* species- *F. graminearum*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *F. culmorum*, *F. tricinctum* and *F. proliferatum* were isolated in 2007 and 2008 from both grid samples and mixed samples. *Fusarium graminearum* was the predominant species in all years. In 2007 the frequency of infected kernels varied from 12.6 % to 40.4 % in different habitats.

In 2008 the levels of infection in the cultivars Drifter and Dekan were similar, whereas cultivar Tommi had twice the amount of *Fusarium* infested kernels.

Molecular quantification of *Fusarium* biomass confirmed *F. graminearum* as the predominant *Fusarium* head blight pathogen in 2007 and 2009. In all samples the mycotoxins deoxynivalenol and enniatin B were detected. In 2007, kernels had high contents of zearalenone as well. In addition, 3Ac-DON, NIV and MON were present. On the second scale there was no correlation between the frequency of infected kernels and mycotoxin contamination whereas in two samples fungal biomass and mycotoxin contents were positively correlated. Investigations on individual ears demonstrated a significant link between the bottom section of the ears and fungal biomass as well as mycotoxin contamination.

The frequency of infected kernels showed in 28 cases random or aggregated patterns, which was explained by airborne distribution of inoculum or aggregated residues from the previous crop providing primary inoculum. Homogenous distributions and tendency to regular patterns were rare. The spatial distribution of fungal biomass showed once random, in the other case aggregated patterns due to the distribution of primary inoculum.

The frequency of one *Fusarium* species showed aggregated patterns in samples with low nitrogen dosage and no fungicide treatment, whereas with fungicide application the species was randomly distributed. In samples with high fertilization and no fungicide treatment two species showed random patterns, thus the spatial distribution in case of fungicide application was aggregated.

The spatial distribution of mycotoxin contamination depended on the mycotoxin. Deoxynivalenol, 3Ac-DON and ZEA showed aggregated patterns. Enniatin B, MON and NIV showed predominantly random pattern. A regular distribution was not observed.

Hence, different patterns of *Fusarium* head blight disease parameters emphasized the necessity to adapt sampling strategies for reliable characterizations of disease situations in fields.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis.....	I
Abbildungsverzeichnis.....	III
Tabellenverzeichnis.....	VI
Abkürzungen.....	IX
1 Einleitung	1
2 Material und Methoden	13
2.1 Versuchsorganismen	13
2.1.1 Pflanzen	13
2.1.2 Mikroorganismen	13
2.2 Chemikalien und Verbrauchsmaterialien	14
2.3 Freilanduntersuchungen	15
2.3.1 Versuchsstandorte.....	15
2.3.2 Versuchsdurchführung.....	15
2.3.3 Ausbringung von Inokulum	17
2.4 Probenahme.....	17
2.4.1 Mischproben	18
2.4.2 Rasterproben.....	18
2.4.3 Einzelähren-Proben	18
2.5 Aufbereitung des Probenmaterials	19
2.6 Erfassung der Standortfaktoren	19
2.6.1 Wetterdaten.....	19
2.6.2 Erfassung des Ascosporenflugs von <i>Gibberella zeae</i>	20
2.7 Erfassung der Blühzeitpunkte.....	20
2.8 Mikrobiologische Untersuchungen	20
2.8.1 Nährmedien	20
2.8.2 Erfassung des <i>Fusarium</i> -Befalls.....	22
2.8.3 Identifizierung von <i>Fusarium</i> spp.	22
2.8.4 Anzucht von <i>Fusarium</i> -Arten.....	22
2.9 Molekularbiologische Untersuchungen.....	23
2.9.1 DNA-Extraktion aus Weizenkörnern.....	23
2.9.1.1 DNA-Extraktion aus Pilzmyzel.....	24
2.9.2 Bestimmung der DNA-Konzentration.....	25
2.9.2.1 Spektrophotometrie.....	25
2.9.2.2 Agarose-Gelelektrophorese	25
2.9.3 Quantitative PCR mit TaqMan®	25
2.10 Bestimmung der Mykotoxine.....	27
2.11 Statistische Auswertung.....	29
2.11.1 Räumliche Datenanalyse	29

2.11.2	Darstellung in einem Geographischen Informationssystem (GIS)	30
2.11.3	SPSS-Datenanalyse.....	30
3	Ergebnisse	31
3.1	Variabilität der Belastung von Weizenkörnern mit <i>Fusarium</i> spp. in Mischproben.....	31
3.1.1	Witterung am Standort Klein-Altendorf im Jahr 2008	31
3.1.2	Häufigkeit und Spektrum des <i>Fusarium</i> -Befalls.....	32
3.2	Variabilität der Belastung von Weizenkörnern mit <i>Fusarium</i> spp. in Rasterproben.....	35
3.2.2	Variabilität des <i>Fusarium</i> -Befalls in einem Bestand.....	51
3.2.2.1	Witterung am Standort Wiesengut im Jahr 2007.....	51
3.2.2.2	Räumliche Verteilung der Befallsparameter von <i>Fusarium</i> spp.	52
3.2.3	Kleinräumiges Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. bei hoher Befallswahrscheinlichkeit ...	65
3.2.3.1	Witterung am Standort Poppelsdorf 2007	65
3.2.3.2	Räumliche Verteilung der Befallsparameter von <i>Fusarium</i> spp.	67
3.3	Verteilung von <i>Fusarium</i> spp. und assoziierter Mykotoxine an Einzelähren.....	76
3.3.1	Witterung und Ascosporenflug von <i>Gibberella zeae</i>	76
3.3.2	Befallsintensitäten und Mykotoxinbelastung.....	77
3.3.3	Einfluss des Ährenabschnitts und Zeitpunkt der Blüte auf Befall und Mykotoxinbelastung.....	84
4	Diskussion	86
5	Zusammenfassung	100
6	Literaturverzeichnis.....	103
	Danksagung.....	128

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1:	Versuchsanlage des Sortenversuchs mit Stickstoff- und Fungizid-Varianten (Klein-Altendorf, 2008)	16
Abb. 2:	Raster zur Probenahme im reifen Weizenbestand (A); zwei Rasterbeprobungen in einem Weizenbestand (Abstand 25 m) am Standort Wiesengut im Jahr 2007 (B)...	18
Abb. 3:	Aufbereitung der Proben für die unterschiedlichen Untersuchungen	19
Abb. 4:	Tagesniederschlagssumme und Tagesdurchschnittstemperatur der Monate Mai und Juni (Klein-Altendorf; 2008) Angabe der Niederschlagssumme und Durchschnittswerte je Monat im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1957 bis 1983) in Klammern; Weizenblüte vom 27.05.-15.06.	32
Abb. 5:	Häufigkeit des <i>Fusarium</i> -Befalls in Mischproben der WW-Sorten Drifter, Dekan und Tommi; (Klein-Altendorf; 2008); Säulen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant; MW \pm SD; Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig; $p \leq 0,05$; n = 4.....	33
Abb. 6:	Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Weizenkörner in Rasterproben bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	37
Abb. 7:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen <i>Fusarium</i> -Arten bei 150 kg N/ha und ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	38
Abb. 8:	Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Weizenkörner in Rasterproben bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	39
Abb. 9:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen <i>Fusarium</i> -Arten bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	41
Abb. 10:	Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Weizenkörner bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)	42
Abb. 11:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen <i>Fusarium</i> -Arten bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und ohne Fungizidbehandlung (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	44
Abb. 12:	Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Weizenkörner bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)	45
Abb. 13:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen <i>Fusarium</i> -Arten bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008).....	47

Abb. 14:	Häufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Körner in Rasterproben mit unterschiedlichen Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008), n = 4; die Standardabweichung ist dargestellt.....	48
Abb. 15:	Gegenüberstellung der <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeiten von Körnern aus Misch- und Rasterproben mit unterschiedlichen Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen (Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008), die Standardabweichung ist dargestellt.....	50
Abb. 16:	Verteilung von Niederschlag und Tagestemperaturen in den Monaten Mai bis Juli (Wiesengut, 2007), Monatswerte im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1961 bis 1990) in Klammern, Weizenblüte vom 02.06.-17.06.	51
Abb. 17:	Räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit mit <i>Fusarium</i> spp. befallener Weizenkörner auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut 2007) ..	52
Abb. 18:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von <i>F. avenaceum</i> , <i>F. graminearum</i> und <i>F. poae</i> auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	53
Abb. 19:	Räumliche Verteilung der <i>Fusarium</i> -Befallsintensität in Weizenkörnern auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007) LOQ: 9 pg/µl TM 54	
Abb. 20:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallsintensitäten von <i>F. avenaceum</i> und <i>F. graminearum</i> auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007).....	55
Abb. 21:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON, 3Ac-DON und ZEA auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	58
Abb. 22:	Räumliche Verteilung der <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeit auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	59
Abb. 23:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von <i>F. avenaceum</i> , <i>F. graminearum</i> und <i>F. poae</i> auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	60
Abb. 24:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON, 3Ac-DON und ZEA auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	63
Abb. 25:	Tagesniederschlagssumme und Tagesdurchschnittstemperatur der Monate Mai bis Juli (Poppelsdorf; 2007) Monatsniederschlagssumme und Monatsdurchschnittstemperatur im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1961 bis 1990) in Klammern, Weizenblüte vom 09.06.-27.06.	66
Abb. 26:	Räumliche Verteilung der <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeit von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007).....	67
Abb. 27:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von <i>F. avenaceum</i> , <i>F. graminearum</i> und <i>F. poae</i> (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	68
Abb. 28:	Räumliche Verteilung der <i>Fusarium</i> -Befallsintensität in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007), LOQ: 9 pg/µl.....	70
Abb. 29:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallsintensitäten von <i>F. avenaceum</i> , <i>F. graminearum</i> und <i>F. poae</i> (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007).....	71

Abb. 30:	Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON und 3Ac-DON (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007).....	74
Abb. 31:	Witterungsverlauf und Sporenfänge von <i>Gibberella zea</i> mittels Sporenfalle; Ansaughöhe: 50 cm über der Erdoberfläche; Ansaugvolumen: 10 l/min; Zeitraum: 27.05. bis 24.06.2009; Schattierung: Zeitraum der Weizenblüte (Poppelsdorf; 2009)	77
Abb. 32:	Räumliche Verteilung der Befallsintensität von <i>Fusarium</i> spp. in Weizenkörnern von Einzelähren auf Beprobungsfläche 1; die Blühzeitpunkte sind angegeben: f = früh: Blühbeginn vor dem 12.06.2009 eingesetzt, s = spät: Blühbeginn nach dem 12.06.2009 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)	78
Abb. 33:	Räumliche Verteilung der Befallsintensität von <i>Fusarium</i> spp. in Weizenkörnern von Einzelähren auf Beprobungsfläche 2; die Blühzeitpunkte sind angegeben: f = früh: Blühbeginn vor dem 12.06.2009 eingesetzt; s = spät: Blühbeginn nach dem 12.06.2009 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)	79
Abb. 34:	Räumliche Verteilung der <i>Fusarium</i> -Befallsintensitäten in Weizenkörnern aus Ährenabschnitten: o = oben; M = Mitte; u = unten; auf den Beprobungsflächen 1 (A) und 2 (B); die Blühzeitpunkte sind angegeben: f = früh: Blühbeginn vor dem 12.06.2009 eingesetzt; s = spät: Blühbeginn ab dem 12.06.2009 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009).....	81
Abb. 35:	Einfluss von Abschnitt der Ähre auf die <i>Fusarium</i> -Befallsintensität und die Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern (Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009), dargestellt ist der Standardfehler des Mittelwerts (SEM)	85

Tabellenverzeichnis

Tab. 1:	Weltweit wichtigste an Getreidekörnern nachgewiesene <i>Fusarium</i> -Arten als Erreger der partiellen Taubährigkeit mit Hauptfruchtformen (BACKHOUSE <i>et al.</i> , 2001; BOTTALICO und PERRONE, 2002; PARRY <i>et al.</i> , 1995; THRANE, 2000)2
Tab. 2:	Hauptgruppen der Mykotoxine und deren chemische Struktur (BALTES und MATISSEK, 2011)4
Tab. 3:	Die wichtigsten von <i>Fusarium</i> spp. synthetisierten Mykotoxine (nach DESJARDINS, 2006; LESLIE und SUMMERELL, 2006).....8
Tab. 4:	Höchstgehalte für die <i>Fusarium</i> -Toxine DON, ZEA und Fumonisin B1 bzw. B2 in Lebensmitteln, Auszug aus der EG-Verordnung Nr. 1126/2007 (nach ANONYM, 2007b)9
Tab. 5:	Charakterisierung der verwendeten Winterweizensorten bezüglich ihrer Anfälligkeit für <i>Fusarium</i> spp. nach der BSL (Bundessortenamt 2003, 2007c, 2009 und 2011b)...13
Tab. 6:	Von Weizenkörnern isolierte <i>Fusarium</i> -Arten sowie deren Hauptfruchtformen.....13
Tab. 7:	Referenz-Isolate für die molekularbiologischen Untersuchungen.....14
Tab. 8:	Beschreibung der Versuchsstandorte Wiesengut, Klein-Altendorf und Poppelsdorf15
Tab. 9:	Versuchsdurchführung an den Standorten Wiesengut, Klein-Altendorf und Poppelsdorf.....17
Tab. 10:	Verwendete Primer und Sonden für die TaqMan [®] -Real-time PCR (nach WAALWIJK <i>et al.</i> , 2004).....26
Tab. 11:	Mit der Multimykotoxin-Analyse nachweisbare Mykotoxine sowie deren Nachweisgrenzen (nach HEREBIAN <i>et al.</i> , 2009)28
Tab. 12:	Abhängigkeit der Befallshäufigkeit von <i>Fusarium</i> spp. in Weizenkörnern aus Mischproben von Stickstoffgaben und Fungizidapplikation (Klein-Altendorf; 2008) 34
Tab. 13:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. in Mischproben der Sorten Drifter, Dekan und Tommi bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (Klein-Altendorf; 2008).....35
Tab. 14:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. bei 150 kg N/ha, ohne Fungizidapplikation; (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)37
Tab. 15:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. bei 150 kg N/ha und Fungizidapplikation; (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)40
Tab. 16:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)43
Tab. 17:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)46

Tab. 18:	Abhängigkeit der <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeit von Fungizidapplikation und Stickstoffgaben (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)	48
Tab. 19:	Einfluss von Stickstoffgaben und Fungizidbehandlung auf die <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeit von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)	49
Tab. 20:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. auf der 1. Beprobungsfläche (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	53
Tab. 21:	Dispersionsindizes für die Befallsintensität von <i>F. avenaceum</i> und <i>F. graminearum</i> auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	55
Tab. 22:	Mykotoxingehalte der Weizenkörner auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007), Minima und Maxima sind hervorgehoben	56
Tab. 23:	Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut 2007)	57
Tab. 24:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	60
Tab. 25:	Mykotoxingehalte von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007), Minima und Maxima sind hervorgehoben	61
Tab. 26:	Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	62
Tab. 27:	Aggregationsindizes für die <i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeiten und Mykotoxingehalte auf den Beprobungsflächen 1 und 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	63
Tab. 28:	Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Wiesengut; 2007)	64
Tab. 29:	Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	64
Tab. 30:	Korrelation zwischen Befallsintensität von <i>F. graminearum</i> , <i>F. avenaceum</i> bzw. <i>F. poae</i> und Mykotoxingehalt in Kornproben der Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)	65
Tab. 31:	Dispersionsindizes für das Auftreten von <i>Fusarium</i> spp. (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	68
Tab. 32:	Aggregationsindizes für die Häufigkeit des <i>Fusarium</i> -Befalls von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	69
Tab. 33:	Dispersionsindizes für die <i>Fusarium</i> -Befallsintensität (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	71
Tab. 34:	Mykotoxingehalte von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007) Minima und Maxima sind hervorgehoben	73
Tab. 35:	Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	74
Tab. 36:	Aggregationsindizes für Mykotoxingehalte in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	75

Tab. 37:	Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007).....	75
Tab. 38:	Korrelation zwischen Befallsintensität von <i>F. graminearum</i> , <i>F. avenaceum</i> bzw. <i>F. poae</i> und Mykotoxingehalten in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)	76
Tab. 39:	Verteilung der Mykotoxingehalte in Weizenkörnern aus Ährenabschnitten der Beprobungsflächen 1 und 2 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)	83
Tab. 40:	Einfluss des Ährenabschnitts und Blühzeitpunkts auf die Befallsintensität mit <i>Fusarium</i> spp. und Mykotoxinkontamination von Weizenkörnern in Einzelähren	84
Tab. 41:	Zusammenhang zwischen Ährenabschnitt bzw. Blühzeitpunkt und <i>Fusarium</i> -Befallsintensität bzw. Mykotoxingehalt	84

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
3-AcDON	3- Acetyldeoxynivalenol
15-AcDON	15-Acetyldeoxynivalenol
µl	Mikroliter
α-ZOL	α-Zearalenol
Abb.	Abbildung
<i>Aqua demin.</i>	demineralisiertes Wasser
<i>Aqua dest.</i>	destilliertes Wasser
BEA	Beauvericin
bp	Basenpaare
BBCH	morphologisches Entwicklungsstadium einer Pflanze
BSL	Beschreibende Sortenliste
CLA	Carnation-Leaf-Agar
cm	Zentimeter
CZID-Agar	Czapek-Dox-Iprodione-Dichloran-Agar
DNA	Desoxyribonukleinsäure
DON	Deoxynivalenol
ENN	Enniatine
ENNB	Enniatin B
FAVE	<i>Fusarium avenaceum</i>
FCUL	<i>Fusarium culmorum</i>
FGRA	<i>Fusarium graminearum</i>
FPOA	<i>Fusarium poae</i>
FPRO	<i>Fusarium proliferatum</i>
FTRI	<i>Fusarium tricinctum</i>
g	Gramm
h	Stunde
ha	Hektar
HT-2	HT-2-Toxin
I _a	Aggregationsindex
kg	Kilogramm
l	Liter
LC/MS-MS	Flüssigkeitschromatograph mit Tandem-Massenspektrometrie
LOQ	Quantifizierungslimit
M	Meter
m ²	Quadratmeter
MAS	Monoacetoxyscirpenol

mg	Milligramm
ml	Milliliter
MGB	Minor Groove Binder
min	Minute
mm	Millimeter
MON	Moniliformin
NIV	Nivalenol
p	propability (Fehler-Wahrscheinlichkeit)
PCR	Polymerase-Chain-Reaction
PDA	Potato-Dextrose-Agar
pg	Pikogramm
qPCR	TaqMan [®] real-time Polymerase-Chain-Reaction
rpm	Umdrehungen pro Minute
sek	Sekunde
spp.	species
T-2	T-2 Toxin
Tab.	Tabelle
Taq	Thermus aquaticus
VF	Vorfrucht
z.B.	zum Beispiel
ZON	Zearalenon

1 Einleitung

Vor etwa 12.000 Jahren begann der Mensch im Nahen Osten Getreide zu domestizieren (WILLCOX, 2000), heute gehört es mit einer Anbaufläche von rund 7 Millionen Hektar zu einer der bedeutendsten Kulturpflanzen in Deutschland. Weizen (*Triticum aestivum* L.) zählt zu den dominierenden Kulturarten im Getreideanbau und erfährt seit Mitte der siebziger Jahre eine ständige Intensivierung sowohl bezüglich des Fruchtfolgeanteils als auch bezüglich der Steigerung der Anbauproduktivität (KIRCH, 2006). Für das Erntejahr 2011 wurde auf rund 3,26 Millionen Hektar der gesamten Aussaatfläche Deutschlands Weizen ausgesät (ANONYM, 2010).

Das Wachstum der Weizenpflanze wird durch die abiotischen und biotischen Faktoren des umgebenen ökologischen Systems bestimmt. Ein wichtiger Faktor ist der mikrobielle Befall des Weizens, zu dem auch die pilzliche Mikroflora zählt (LACEY, 1989). Erstmals durch LINK (1809) beschrieben, gehören Pilze der Gattung *Fusarium* weltweit zu den bedeutendsten Schaderregern im Getreideanbau. Neben Gerste, Roggen, Triticale, Hafer und Mais ist der Weizen besonders anfällig gegenüber dem ubiquitär auftretenden Erreger der Gattung *Fusarium* (LEPSCHY, 1992; TANAKA *et al.*, 1988). Unter partieller Taubährigkeit, *Fusarium* Head Blight (FHB), Scab (USA) oder Weissährigkeit, versteht man eine Krankheit, die wie die Stängel- und Wurzelfäule (*Fusarium* crown rot) von verschiedenen *Fusarium*-Arten ausgelöst wird (SUTTON, 1982; PARRY *et al.* 1995; PAULITZ, 1999). In nahezu allen Weizenanbaugebieten weltweit stellt der Ährenbefall mit *Fusarium* spp. ein ernsthaftes Problem dar und seit Beginn der achtziger Jahre führte ein starker Anstieg der Krankheit zu beträchtlichen wirtschaftlichen Schäden. So löste das Auftreten von Ährenfusariosen insbesondere in klassischen Weizenanbauregionen der USA, Kanadas, Chinas, Südafrikas, Teilen Südamerikas und Europas immer wieder *Fusarium*-Epidemien aus (FENG *et al.*, 2002; STACK, 2003; PARRY *et al.*, 1995). Häufige Regenfälle und hohe Luftfeuchtigkeit in Verbindung mit starker Taubildung spielen eine wichtige Rolle in der Epidemiologie der partiellen Taubährigkeit (McMULLEN *et al.*, 1997). Eben diese Witterungsbedingungen in den Sommermonaten sorgten 1981, 1987, 1991, 1992 und 1998 in Deutschland für sogenannte *Fusarium*-Jahre (AHRENS und FEHRMANN 1984; MATTHIES *et al.*, 2000; MÜLLER *et al.*, 1997; OBST *et al.*, 1990). Des Weiteren begünstigt die Ausweitung des Maisanbaus die Epidemiologie der *Fusarium*-Pilze, die sowohl an Mais als auch an Weizen parasitieren (ALBRECHT *et al.*, 2009). Nach KLÖHN *et al.* (2010) führt der zunehmende Maisanbau im Rahmen der Bioenergieerzeugung unweigerlich zu einer deutlichen Erhöhung des Infektionspotenzials.

Zahlreiche *Fusarium*-Arten (Tab. 1) können das keimende Korn, die Halmbasis, die Blätter, aber vor allem die Ähre befallen. Bei der Besiedlung der Ähre zerstört der Pilz Zellwände, Proteine und die Stärkekörner der Weizenpflanze (BECHTEL *et al.*, 1985; MEYER *et al.*, 1986). Die Infektionsquelle stellt das am Boden vorhandene Primärinokulum dar, denn durch die saprophytische Natur von *Fusarium*-Arten können sie als Myzel oder dickwandige Dauerspore (Chlamydospore) über mehrere Vegetationsperioden auf infizierten Körnern, Weizen- und

Maisstoppelresten bzw. anderen befallenen Pflanzenrückständen in der Ackerkrume überdauern (RODEMANN und BARTELS, 2006). Nach SCHLÜTER und KROPF (2006) baut sich auf diese Weise ein Befallspotenzial auf und sorgt für einen erheblichen Befallsdruck im Bereich der Pflanzenbasis. Bei ausreichend Niederschlag und einer Temperatur zwischen 15 und 32 °C liegt die größte Anfälligkeit für eine Infektion der Weizenähre zur Blüte vor, dennoch kann sie auch während des Ährenschiebens oder erst nach der Blüte erfolgen (LACEY *et al.*, 1999; SUTY und MAULER-MACHNIK, 1998).

Tab. 1: Weltweit wichtigste an Getreidekörnern nachgewiesene *Fusarium*-Arten als Erreger der partiellen Taubährigkeit mit Hauptfruchtformen (BACKHOUSE *et al.*, 2001; BOTTALICO und PERRONE, 2002; PARRY *et al.*, 1995; THRANE, 2000)

Anamorph	Teleomorph
<i>Fusarium avenaceum</i> (Corda ex Fr.) Sacc.	<i>Gibberella avenacea</i> R.J. Cook
<i>Fusarium culmorum</i> (Cooke) Sacc.	Unbekannt
<i>Fusarium cerealis</i> (Cooke) Sacc.	Unbekannt
<i>Fusarium equiseti</i> (Corda) Sacc.	<i>Gibberella intricans</i> Wollenw.
<i>Fusarium graminearum</i> Schwabe	<i>Gibberella zeae</i> (Schwabe) Petch
<i>Fusarium poae</i> (Peck) Wollenw.	Unbekannt
<i>Fusarium sporotrichioides</i> Sherb.	Unbekannt
<i>Fusarium tricinctum</i> (Corda) Sacc.	<i>Gibberella tricincta</i> El-Gholl, McRit, Schoult. & Rid.
<i>Fusarium oxysporum</i> Schlecht. ex Fr.	Unbekannt
<i>Microdochium nivale</i> (Fr.) Samuels & Hallett	<i>Monographella nivalis</i> (Schaffn.) E. Müller

Die unterschiedlichen *Fusarium*-Arten werden nach Sporen- und Kulturmerkmalen eingeteilt. Die Sporen können unseptiert bzw. einmal septiert und oval (Mikrokonidien) oder mehrfach septiert und sichelförmig (Makrokonidien) sein. In erster Linie erfolgt die Infektion über die vegetativ gebildeten Makro- und Mikrokonidien und bei *F. graminearum* zusätzlich über Ascosporen (MAULER-MACHNIK und SUTY, 1997; OBST und BECHTEL, 2000; SUTTON, 1982). Voraussetzung für ein Ascosporeninokulum ist die Bildung von Perithezien und die Infektion ist auf die Narbe beschränkt, von der aus ein Keimschlauch bis zu den Ovarien wächst und an die Leitbündel der Pflanze anschließt. Insbesondere nach Regenfällen, wenn die Perithezien und Pflanzenteile abtrocknen, werden Ascosporen bei einer relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 60 und 95 % und Temperaturen von 11 bis 30 °C aus den Perithezien aktiv ausgeschleudert und über weite Strecken durch Anemochorie transportiert (MAULER-MACHNIK und SUTY, 1997; OBST und BECHTEL, 2000) Die Ascosporen können entweder Blätter infizieren, auf denen dann neue Konidien entstehen, oder sie infizieren die blühenden Ährchen direkt.

Die Primärinfektion erfolgt dann über die Keimung der Konidio- und Ascosporen auf der Wirtsoberfläche, den Deckspelzen der Ährchen und den heraushängenden Antheren, die ein geeignetes Nährsubstrat bilden (DICKSON, 1922; OBST *et al.*, 1997). Den von *Gibberella zeae* gebildeten Ascosporen wird eine besondere Bedeutung für die Ähreninfektion von Weizen als windbürtiges Primärinokulum für den Ausgangsbefall zugesprochen (MARKELL und FRANCEL, 2003). Bei den meisten *Fusarium*-Arten geht der Befall jedoch von vegetativ gebildeten Konidiosporen aus. Dieser verläuft sukzessive durch Regenspritzer vom Boden, über die Blattetagen auf die Ähre (SCHLEGEL, 1992; LEONARD und BUSHNELL, 2003; SUTTON, 1982; MAULER-MACHNIK und ZAHN 1994; PARRY *et al.*, 1995; ADOLF, 1998). Makrokonidien können durch Regentropfen bis zu 100 cm horizontal und bis zu 60 cm vertikal verbreitet werden (ROSSI *et al.*, 2002; JENKINSON und PARRY, 1994).

Nach Infektion der Blüte wandern die Pilzhyphen entlang des Exokarps zwischen Deck- und Hüllspelze und gelangen in das sich entwickelnde Korn (JANSEN *et al.*, 2005). Es kommt zur Zerstörung der Schichten der Fruchtschale und des Endosperms. Die Hyphen breiten sich weiter inter- und intrazellulär bis zur Ährenspindel aus, indem sie zellwandabbauende Enzyme wie Cellulasen, Pektinasen und Xylanasen abgeben. Nachfolgend dehnt sich der Erreger basipetal aus, um darunterliegende Ährchen zu besiedeln, es kommt zur Sekundärinfektion (KANG und BUCHENAUER, 2002). Eine Ausweitung des Hyphenwachstums bis in die Leitbündelgefäße der Spindel führt zu einer Reduktion der Nährstoffzufuhr und des Wassertransportes in der Ähre. Diese unzureichende Versorgung zur Kornfüllungsphase bedingt Kümmerkornbildung und die Ährchen bzw. Ährenstufen, die sich oberhalb des infizierten Ährchens befinden, bleichen aus und erscheinen weiß. Daher wird dieses Symptom der Krankheit auch als Partielle Weissährigkeit bzw. Partielle Taubährigkeit bezeichnet (SNIJDERS und KRECHTING, 1992).

Im weiteren Befallsverlauf werden an der Weizenspindel bräunlich bis violette Verfärbungen erkennbar und in Abhängigkeit von hoher Luftfeuchte bilden sich später an der Basis des Ährchens und auf den Deckspelzen rosa- bis orangerote Sporenlager. Besonders lang anhaltend feucht-warme Witterung oder eine durch Nässe verzögerte Ernte begünstigen zusätzlich eine hohe Befallsstärke (ANONYM, 2011). Aufgrund schlechterer Abtrocknung lagernder Bestände eines Feldes kommt es zur Veränderung des Mikroklimas und somit zur Ausbildung günstiger Bedingungen für Ährenfusariosen (ELLNER, 2007).

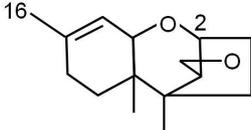
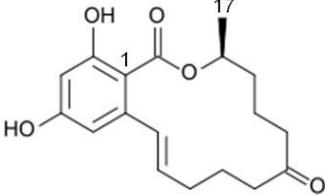
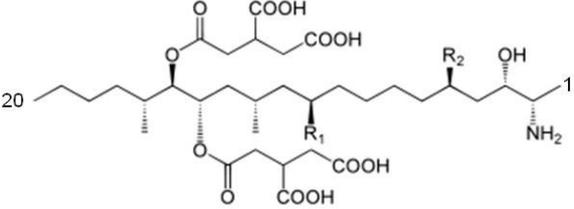
Die Folge sind erhebliche Ertrags- und Qualitätsminderungen durch höhere Schmachtkornanteile, sowie niedrige Tausendkornmasse, Fallzahlen oder Sedimentationswerte (DEXTER *et al.*, 1996; NIGHTINGALE *et al.*, 1999). So bedingten in Deutschland die Befallsjahre 1987 und 1998 bei der Weizenernte Ertragsverluste von bis zu 40% (KIECANA *et al.*, 1987, MÜLLER *et al.*, 1997, BARTELS 1998, MASTEL und MICHELS, 2000).

Neben den quantitativen Verlusten stellt die Kontamination des Ernteguts mit giftigen Stoffwechselprodukten, den sogenannten Mykotoxinen, ein Gesundheitsrisiko für Mensch und Tier dar (TANAKA *et al.*, 1988; LEPSCHY, 1992). Mykotoxine gehören zu einer Gruppe von natürlichen, strukturell sehr unterschiedlichen Giftstoffen, die als Metabolite aus dem Sekundärstoffwechsel von Schimmelpilzen hervorgehen. Sie sind hitzestabil, werden in der

Nahrungs- und Verarbeitungskette nicht abgebaut und haben teilweise sogar kanzerogene Eigenschaften (ENGELHARDT und BERGER, 2008). Hauptproduzenten dieser toxischen Verbindungen sind neben *Aspergillus*, *Penicillium*, *Alternaria* und *Claviceps* die *Fusarium*-Pilze. Es sind mehr als 400 Pilzgifte bekannt, wobei einzelne Pilze ein bestimmtes Spektrum an Toxinen synthetisieren (Tab. 3), es gibt jedoch zahlreiche Mykotoxine, die von mehreren Arten gebildet werden können (ZÜHLKE *et al.*, 2008). Im deutschen Getreideanbau gelten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. culmorum*, *F. poae* und *F. sporotrichioides* als die häufigsten Mykotoxinproduzenten. *F. culmorum* und *F. graminearum* zählen zu den aggressivsten heimischen *Fusarium*-Arten (VERREET und AUMANN, 2002).

Aufzeichnungen belegen, dass es bereits im Mittelalter Hinweise auf gesundheitliche Schädigungen durch Mykotoxine gab. Unter dem Namen Sankt Antonius-Feuer (Kribbelkrankheit, Brandseuche, Ergotismus) wurden die neurotoxischen Symptome einer Krankheit erstmals beschrieben, die offensichtlich mit dem Verzehr von Mutterkorn-haltigen (*Claviceps purpurea*) Roggen zusammenhing und wahre Epidemien auslöste (VAN RENSBURG, 1977; GEDEK, 1980, WOLFF *et al.*, 1988). Die bedeutendsten Mykotoxine des Getreides werden heute drei Hauptgruppen zugeordnet: Trichothecene, Zearalenone und Fumonisine (Tab. 2).

Tab. 2: Hauptgruppen der Mykotoxine und deren chemische Struktur (BALTES und MATISSEK, 2011)

Trichothecene	
Zearalenone	
Fumonisine	

Trichothecene wurden erstmals 1948 von FREEMAN und MORRISON (1949) aus dem Pilz *Trichothecium roseum* isoliert. Sie werden ihrer chemischen Struktur nach in vier Untergruppen eingeteilt, wobei Typ A und Typ B die bedeutendsten sind. Wichtige Vertreter der Typ A-Toxine

sind Mono- und Diacetyoxyscirpenol (MAS und DAS) sowie T-2 und HT-2 Toxin. Berichtet wird über das Vorkommen von HT-2 Toxin und T-2 Toxin in Weizen, Gerste, Mais, Hafer, Reis, Soja und Bohnen (JECFA, 2001). Die von *F. sporotrichioides*, *F. equiseti* und *F. poae* gebildeten Typ A-Toxine waren Mitte des letzten Jahrhunderts dafür verantwortlich, dass in Russland Tausende an der sogenannten Alimentären Toxischen Aleuki (ATA), die durch Knochenmarkschädigung eine Blutarmut hervorruft, erkrankten. Ausgelöst wurde die Krankheit durch den Verzehr von Getreide, das vor dem Winter nicht abgeerntet wurde und im darauffolgenden Frühjahr stark verpilzt war (DESJARDINS, 2006; LESLIE und SUMMERELL, 2006; UENO, 1980; YAGEN und JOFFE, 1976). Während des zweiten Weltkriegs konnten bei Pferden, die mit getrockneten Bohnenhülsen gefüttert wurden, schwere Störungen des Zentralen Nervensystems und Leberstörungen beobachtet werden (UENO, 1980).

Neben Nivalenol (NIV) und Fusarenon-X zählt Deoxynivalenol (DON) und die acetylierten Derivate 3Ac-DON bzw. 15Ac-DON zu den Typ B-Trichothecenen (DESJARDINS, 2006). Untersuchungen haben gezeigt, dass ein Isolat beide acetylierten DON-Derivate synthetisieren kann und somit die Bildung von 3Ac-DON und 15Ac-DON chemotaxonomisch nicht festgelegt sein muss (MAINA, 2008; MUTHOMI *et al.*, 2002; PERKOWSKI *et al.*, 1995; SUGIURA *et al.*, 1990; SZÉCSI *et al.*, 2005; TÓTH *et al.*, 2005). DON ist der wichtigste Vertreter der Trichothecene und wird von *F. graminearum* (MILLER *et al.*, 1983) und *F. culmorum* produziert (GREENHALGH *et al.*, 1986, MUTHOMI *et al.*, 2000; BAKAN *et al.*, 2002). Für diese beiden *Fusarium*-Arten sind auch Chemotypen beschrieben, die entweder NIV oder DON bzw. beide Typ B-Toxine synthetisieren (DESJARDINS, 2006; NICHOLSON *et al.*, 2007). Für die Aggressivität von *F. graminearum* und *F. culmorum* scheint DON eine entscheidende Rolle zu spielen (HESTBJERG *et al.*, 2002; LUDEWIG *et al.*, 2005), denn beim Fehlen von pilzlichen Trichothecenen konnten EUDES *et al.* (2001) eine Verlangsamung und teilweise auch einen Stopp des Pilzwachstums beobachten. Außerdem zeigten sie einen Zusammenhang zwischen der Produktion von Trichothecenen und dem Eindringen von *Fusarium* spp. in die Wirtspflanze. Der Wirkmechanismus von DON beruht auf der Inhibierung der Proteinsynthese und einer Schädigung der Zellmembran. Durch die Schwächung des Pflanzengewebes wird die Ausbreitung des Pilzes in der Pflanze erleichtert und die Pathogenabwehr scheint dadurch geschwächt und verlangsamt (LUDEWIG *et al.*, 2005; CUMAGUN *et al.*, 2004; MILLER und EWEN, 1997).

Gesundheitliche Beeinträchtigungen sind die Folge bei der Verwendung von kontaminiertem Getreide in der menschlichen- bzw. tierischen Ernährung (FINK-GREMMELS, 2005). DON gilt als Vomitoxin und erwirkt akut bei Tieren eine verminderte Nahrungsaufnahme und Erbrechen. Bei längerer Exposition und hohen Kontaminationen sind Durchfall, Lethargie, Hautirritationen, reduziertes Wachstum, Schäden an Herz, Thymus, Leber und Milz die Folge (PRELUSKY *et al.*, 1994). Eine dauerhafte Aufnahme von DON kann beim Menschen zu schweren Nierenschäden führen (RODEMANN, 1999). Trichothecene haben eine suppressive Wirkung auf das Immunsystem und hemmen die Proteinbiosynthese (MC LAUGHLIN *et al.*, 1977). In der Tierernährung hängt die Empfindlichkeit gegenüber Trichothecenen stark von der Tierart ab. Monogastrier, insbesondere Schweine, sind sehr sensibel gegenüber den genannten Toxinen,

während Geflügel und ruminierende Tiere eine höhere Toleranz gegenüber Trichothecenen zeigen (TRENHOLM *et al.*, 1984). Dennoch beschreiben PRELUSKY *et al.* (1989, 1994) eine beeinträchtigte Eiqualität und verminderte Größe bei Geflügel und eine verringerte Milchmenge, Haarausfall, verzögerte Blutgerinnung und blutigen Durchfall bei Rindern. Nach Einschätzungen von JOFFE (1986) wirkt NIV zwar im Vergleich zu DON geringer phytotoxisch, doch scheint die Toxizität gegenüber Warmblütern um das Zehnfache höher zu sein. Versuchsreihen mit unterschiedlichen Getreidearten von LANGEVIN *et al.* (2004) ergaben, dass Weizen zu den Trichothecen-empfindlicheren Getreidearten zählt.

Das östrogen wirksame Zearalenon (ZEA) wird von *F. graminearum*, *F. culmorum* und *F. crookwellense* synthetisiert und tritt vor allem bei Getreide, Mais, Früchten und Gemüse auf (KUIPER-GOODMAN *et al.*, 1987; JELINEK *et al.*, 1989; PATEL *et al.*, 1996). Das Toxin konkurriert mit dem Hormon Östrogen um den Östrogen-Rezeptor und kann bei Warmblütern zu Reproduktivitäts- und Fertilitätsproblemen und Hyper-Östrogenismus führen. Besonders beim Schwein wurden Scham- und Gesäugeschwellungen, Scheiden- und Enddarmvorfälle, Scheinträchtigkeit und Dauerbrunst diagnostiziert (PRELUSKY *et al.*, 1994). Die östrogene Wirkung des Derivats α -Zearalenol (ZOL) ist dreifach höher als die von ZEA (FITZPATRICK, 1989). Die Auswirkungen von Zearalenon auf den menschlichen Organismus sind nicht vollständig geklärt. Mitte der achtziger Jahre konnte verstärkt bei jungen Mädchen in Puerto Rico ein verfrühter Pubertätsbeginn beobachtet werden. Analysen wiesen bei einem Teil der Patientinnen Zearalenon und dessen Derivate im Blut nach. Es wurden endometriale Hyperplasie, endometrialer Drüsenkrebs und proliferative Endometrien diagnostiziert (TOMASZEWSKI *et al.*, 1998).

Fumonisine sind weltweit verbreitet und die Bildung durch *F. proliferatum* und *F. sporotrichioides* von DESJARDINS (2006) und LESLIE und SUMMERELL (2006) nachgewiesen. Insgesamt sind acht Fumonisine bekannt: Fumonisin B1, Fumonisin B2, Fumonisin B3, Fumonisin B4, Fumonisin A1, Fumonisin A2, Fumonisin C1, Fumonisin C3, wobei ausschließlich die B- und C-Gruppen Naturprodukte sind und Fumonisin B1 (FB1) am häufigsten vorkommt (MARASAS 1996, SEO-JEONG *et al.*, 1996). FB1 inhibiert die Biosynthese der Bestandteile von Gehirnzellmembranen (MERRILL *et al.*, 1993), was auch seine kanzerogenen Eigenschaften erklären könnte (RILEY *et al.*, 1996). Vermutet wird der Einfluss des Toxins auf den Ausbruch der Equinen Leukoencephalomalazie (ELEM) beim Pferd (DIAZ und BOERMANS, 1994) und des Pulmonalen Ödems beim Schwein (MATTHIASCHK *et al.*, 1999). Auch beim Menschen sind toxische Wirkungen zu beobachten: Bei einer Untersuchung in Indien 1995 klagten Personen nach dem Verzehr von Mais und Hirse über Durchfall. BHAT *et al.* (1997) zeigten, dass in den betroffenen Haushalten deutlich höhere Konzentrationen von Fumonisin B gefunden wurden als in Kontrollhaushalten.

Moniliformin (MON) ist ein Cyclobutenderivat, ähnelt chemisch der Quadratsäure und seine wichtigsten Produzenten sind *F. subglutinans* und *F. avenaceum* (MÜCKE und LEMMEN, 2004). Möglicherweise ist die in China chronisch auftretende Kaschin-Beck-Krankheit, eine Gelenks- und Knochenkrankung, nicht, wie bisher angenommen, eine Selenmangelkrankung, sondern

auf mit *F. subglutinans* kontaminierten Mais zurückzuführen (LEPSCHY, 1992). Chronisch verabreicht kann MON zur Herzinsuffizienz führen (VOSS, 1990). MON wirkt zytotoxisch und ist im Vergleich zu DON in wesentlich geringeren Dosen akut toxisch (DESJARDINS, 2006).

Eine weitere Gruppe der Mykotoxine, die durch *Fusarium*-Arten synthetisiert werden können, sind Beauvericin (BEA) und Enniatine (ENN). Die molekulare Struktur dieser Toxine ermöglicht Komplexbildungen mit ein- oder zweiwertigen Kationen, die so durch die Zellmembran von Gewebezellen geschleust werden können. Durch diese ionophore Eigenschaft wirken BEA und Enniatine zytotoxisch (NOSER *et al.*, 2007). Im Jahr 1969 gelang es HAMILL *et al.* (1969) erstmals BEA aus *Beauveria bassiana* und *Paecilomyces fumosoroseus* zu isolieren und auf seine insektizide und antibiotische Wirkung zu untersuchen. Prince *et al.* (1974) führten sowohl die insektiziden und antibiotischen als auch phytotoxischen und zytotoxischen Eigenschaften auf den ionophoren Charakter des Toxins zurück. Vermutlich kann BEA aufgrund der ionophoren Eigenschaft die Synthese von Cholesterylestern und Triglycerol sowie die Acetyl-CoA-Cholesterol-Acyltransferase, die eine wichtige Rolle im Cholesterinstoffwechsel hat, hemmen (TOMODA *et al.*, 1992; NAMATAME *et al.*, 2004; OSHIRO *et al.*, 2007). BEA löst außerdem Apoptose in menschlichen Zelllinien aus (CHEN *et al.*, 2006). Untersuchungen von ZHAN *et al.* (2007) zeigten eine selektive Toxizität von BEA gegenüber unterschiedlichen Krebsarten.

Enniatin gehört wie BEA zu den zyklischen Hexadepsipeptiden. Die Enniatine werden in Enniatin A, Enniatin 1, Enniatin B und Enniatin B1 unterteilt. Sowohl Enniatin als auch BEA werden von *F. avenaceum* und *F. tricinctum* gebildet (JESTOI, 2008). Ähnlich wie BEA konnte Enniatin eine antibiotische, insektizide und zytotoxische Wirkung nachgewiesen werden (TOMODA *et al.*, 1992; IVANOVA *et al.*, 2006). GÄUMANN *et al.* (1947) isolierten Enniatin erstmals aus einer Kultur von *Fusarium orthoceras* var. *enniatum*.

Das Mykotoxin Fusaproliferin, gebildet von den Arten *F. subglutinans* und *F. proliferatum*, wurde 1995 durch LOGRIECO *et al.* (1996) nebst Fumonisin, MON und BEA in Maisproben nachgewiesen. Fusaproliferin ist ein Sesquiterpen, eine aus drei Isopreneinheiten aufgebaute Verbindung mit ringförmigem Gerüst, das vermehrt in Verbindung mit der Kolbenfäule beim Mais nachgewiesen wurde (RANDAZZO *et al.*, 1993).

Tab. 3: Die wichtigsten von *Fusarium* spp. synthetisierten Mykotoxine (nach DESJARDINS, 2006; LESLIE und SUMMERELL, 2006)

<i>Fusarium</i> spp.	Mykotoxine							
	A-Tri.	B-Tri.	ZEA	FUM	MON	ENN	BEA	FUP
<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>	-	-			+	+		

- Produktion nicht nachgewiesen; + Produktion nachgewiesen; (+) Produktion durch einzelne Isolate. A-Tri. = A-Trichothecene; B-Tri. = B-Trichothecene; ZEA = Zearalenon; FUM = Fumonisine; MON = Moniliformin; ENN = Enniatine; BEA = Beauvericin; FUP = Fusaproliferin

Weltweit stellt die Mykotoxin-Kontamination von Lebens- und Futtermitteln ein großes Problem dar. Die Food and Agriculture Organization (FAO) schätzt, dass bis zu 25 % der Weltproduktion von Nahrungsmitteln mit Mykotoxinen kontaminiert sind (ENGELHARDT und BERGER, 2008). Im Jahr 2005 wurden für die Mykotoxine DON, ZEA und die Summe aus Fumonisin B1 und B2 Höchstgehalte in Getreide- und Maiseerzeugnissen durch die Europäische Gemeinschaft festgelegt. Jedoch waren zu dem Zeitpunkt in Bezug auf Mais noch nicht alle Faktoren, die an der Bildung von *Fusarium*-Toxinen, insbesondere ZEA, FB1 und FB2 beteiligt sind, klar. Aufgrund der Witterungsbedingungen wurden zu den Maiseernten 2005 und 2006 im Vergleich zu den Erntejahren 2003 und 2004 höhere Gehalte, vor allem an ZEA und Fumonisinen sowie auch im geringeren Umfang DON, gemessen. Die 2005 vorgesehenen Höchstgehalte für ZEA und Fumonisin konnten somit bei bestimmten Wetterbedingungen trotz möglicher Präventivmaßnahmen nicht eingehalten werden. Um Marktstörungen zu vermeiden, aber dennoch ein hohes Schutzniveau für die öffentliche Gesundheit aufrechtzuerhalten, mussten die Höchstgehalte modifiziert werden (Tab. 4). Der Geltungsbeginn der Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln hinsichtlich *Fusarium*-Toxinen in Mais und Maiseerzeugnissen trat in Europa zum 1. Oktober 2007 in Kraft (ANONYM, 2007a). Die Grenzwerte sind ein Instrument zur Risikominimierung und zum Schutz von Mensch und Tier vor schädlichen Einwirkungen (RODEMANN und BARTELS, 2006).

Tab. 4: Höchstgehalte für die *Fusarium*-Toxine DON, ZEA und Fumonisin B1 bzw. B2 in Lebensmitteln, Auszug aus der EG-Verordnung Nr. 1126/2007 (nach ANONYM, 2007b)

Mykotoxin	Erzeugnis	Höchstgehalt [ng g ⁻¹]
Deoxynivalenol	Unverarbeitetes Getreide außer Hartweizen, Hafer u. Mais	1250
	Unverarbeiteter Hartweizen und Hafer	1750
	Unverarbeiteter Mais	1750
	Zum unmittelbaren menschlichen Verzehr bestimmtes Getreide, Getreidemehl, Kleie und Keime	750
	Teigwaren (trocken)	750
	Brot, Kleingebäck, feine Backwaren, Kekse, Getreidesnacks und Frühstückscerealien	500
	Getreidebeikost u. andere Beikost für Säuglinge/Kleinkinder	200
Zearalenon	Unverarbeitetes Getreide außer Mais	100
	Unverarbeiteter Mais	350
	Zum unmittelbaren menschlichen Verzehr bestimmtes Getreide, Getreidemehl, Kleie und Keime	75
	Raffiniertes Maisöl	400
	Brot, Kleingebäck, feine Backwaren, Kekse, Getreidesnacks und Frühstückscerealien, außer Maissnacks u. Frühstückscerealien auf Maisbasis	50
	Für den unmittelbaren menschlichen Verzehr bestimmter Mais, Snacks und Frühstückscerealien auf Maisbasis	100
	Getreidebeikost (außer Getreidebeikost auf Maisbasis) und andere Beikost für Säuglinge / Kleinkinder	20
Verarbeitete Lebensmittel auf Maisbasis für Säuglinge / Kleinkinder	20	
Fumonisine (B1 und B2)	Unverarbeiteter Mais	4000
	Zum unmittelbaren menschlichen Verzehr bestimmter Mais, Lebensmittel auf Maisbasis,	1000
	Frühstückscerealien und Snacks auf Maisbasis	800
	Getreidebeikost und andere Beikost auf Maisbasis für Säuglinge / Kleinkinder	200

Zur Kontrolle der partiellen Taubährgigkeit und der Reduktion von Mykotoxinbelastungen stellen die Züchtung und der Anbau resistenter Weizensorten eine wichtige Maßnahme dar. Einer Abwehr der Pathogen-Entwicklung in der Pflanze liegen verschiedene Resistenzkomponenten

zugrunde. Von der Eindringungsresistenz eines Wirtsgenotyps unterschieden SCHRÖDER und CHRISTENSEN (1963) die Ausbreitungsresistenz, die eingedrungene Hyphen des Pilzes an der weiteren Ausbreitung im Wirtsgewebe hindert. Einige Wirtsgenotypen verfügen über die Fähigkeit, Mykotoxine im Verlauf der Krankheitsentwicklung abzubauen (MILLER *et al.*, 1985). MESTERHÁZY (1995) fügte die Resistenz gegen Infektion der Körner und die Toleranz als weitere Resistenzfaktoren hinzu. Des Weiteren nehmen morphologische Merkmale, wie Pflanzenlänge (HILTON *et al.*, 1999), Begrannung (BAN und SUENAGA, 2000) und die Kompaktheit der Ähre (MESTERHÁZY, 1995) Einfluss auf den *Fusarium*-Befall.

Mittels molekularer Markeranalysen können Aussagen über die Resistenzen unterschiedlicher Genotypen getroffen werden. So sind die Effekte von Resistenz-QTL verschiedener Weizensorten sowie die Auswirkungen des Kurzstrohgens *Rht-D1b* auf die Wirtsresistenz (HÄBERLE, 2008) und die Untersuchung der Aufspaltungsvarianz für *Fusarium*-Resistenz sowie Kartierungsstudien zur Identifizierung diverser Resistenz-Loci (VOSS, 2010) Gegenstand der aktuellen Forschung. Jedoch reicht nach ZIMMERMANN (1997) bei befallsfördernden Witterungsverhältnissen in Kombination mit pflugloser Bodenbearbeitung, Maisvorfrucht und feuchtwarmen Bedingungen zur Blüte die Sortenresistenz allein nicht aus, um die Pflanze vor einer *Fusarium*-Infektion zu schützen. Des Weiteren bietet die Erweiterung der Fruchtfolge die Möglichkeit das Befallsrisiko zu senken. Nach PEREYRA *et al.* (2008) und INCH und GILBERT (2003) sollte die Anbaupause zwischen Weizen- und Maisanbau mindestens zwei Jahre betragen, da Konidiosporen von *Fusarium* spp. mehrere Jahre auf Ernterückständen, Ausfallgetreide, Stroh- und Stoppelresten überdauern können. Doch aus ökonomischer Sicht ist das für die fachliche Praxis kaum durchführbar. Als direkte Bekämpfung der partiellen Taubährigkeit wird die Applikation von Azolen zum Zeitpunkt der Blüte empfohlen (JENNINGS *et al.*, 2000; EDWARDS *et al.*, 2001; ZHANG *et al.*, 2009). Die Effizienz einer solchen Behandlung hängt im größten Maße von einer termingerechten Ausbringung in einem Zeitfenster von etwa zwei vor bis zwei Tage nach der Infektion ab (OERKE und STEINER, 2002).

Mit Hilfe von zahlreichen Prognosemodellen besteht die Möglichkeit, bereits vor der Ernte das Risiko einer *Fusarium*-Infektion abzuschätzen. In den USA wird für die östlichen Bundesstaaten mit dem 'Fusarium Head Blight Risk Assessment Tool' eine Risikoprognose unter Berücksichtigung von Wetterdaten angeboten und je nach Risikostufe eine Empfehlung für den Fungizideinsatz gegeben (http://www.wheatcab.psu.edu/riskTool_2011.html). In Frankreich bietet Syngenta das Programm 'Qualimetre' an, das dem Benutzer die Möglichkeit gibt, den DON-Gehalt für Weizen und Mais einzuschätzen (http://www.syngenta-agro.fr/synweb/culture_309_13_2444_Qualimetre-2010---7eme-annee-de-prevision--.aspx). Das in Kanada entwickelte Modell 'DONcast' prognostiziert auf Grundlage von Wetter- und bestandesspezifischen Daten den DON-Gehalt und in Kombination mit dem Programm 'SPRAYcast' werden Empfehlungen und optimale Applikationszeitpunkte von Fungiziden gegeben (<http://www.weathercentral.ca/>). In der Schweiz kann mit Hilfe von 'FusaProg' das *Fusarium*-Risiko in Abhängigkeit von Sorte, Standort- und Witterungsbedingungen abgewägt werden (<http://www.fusaprog.ch/>).

In Deutschland gibt es unterschiedliche Ansätze. So entwickelte eine Arbeitsgruppe der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL) ein Verfahren zur Abschätzung von DON-Gehalten im Erntegut. Hierzu wird die Anzahl rötlicher Kümmerkörner als Orientierung für den Toxin-Gehalt ausgezählt (LEPSCHY und MUNZERT, 2004). Des Weiteren bietet die LfL online eine schlagspezifische Risikobeurteilung unter Berücksichtigung von Vorfrucht, Sorte, Fungizidbehandlung und Bodenbearbeitung an (<http://www.lfl.bayern.de/ips/pflanzenschutzhinweise/12410/index.php>). Im Rahmen des IPS-Modells Weizen für das Land Schleswig-Holstein kann der Nutzer durch die Angabe von Längen- und Breitengrad den Standort seines Feldes genau definieren und erhält nach weiteren Eingaben wie z.B. Sorte, Bodenbearbeitung usw. den zu erwartenden DON-Gehalt seines Getreides (<http://www.ips-weizen.de/>). Die genannten Modelle sind wichtige und hilfreiche Tools um den *Fusarium*-Befall und mögliche Mykotoxinbelastungen einzelner Regionen abschätzen zu können, jedoch zielen diese nicht auf einzelne Flächen oder Teilflächen ab. Nach SCHLANG (2010) ist für die Entwicklung von Prognosemodellen auf Ebene des Bestandes daher notwendig, mehr Kenntnis über die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine in Weizenbeständen zu haben.

Die Art der Verteilung von Pathogenen hat einen starken Einfluss auf das Ausbreitungsmuster einer Krankheit (KOT *et al.*, 1996; CLARK *et al.*, 2001; HASTINGS *et al.*, 2005). Schon POOLE (1974) definierte für das Auftreten von Pflanzenpathogenen drei grundsätzliche Verteilungsmuster: regelmäßige, zufällige und aggregierte Verteilungen.

Die Verteilung vieler pilzlicher Erreger erfolgt durch den windbürtigen Sporenttransport, welcher über Distanzen von einigen Metern bis zu mehreren hundert Metern möglich ist (BROWN und HOVMØLLER, 2002). So ergeben sich regelmäßige Verteilungen von Krankheiten beispielsweise durch die Windverbreitung des Inokulums bei gleichzeitig hohem Sporenangebot vorrangig aus Quellen außerhalb des Feldes (SCHLANG, 2010). In den meisten Fällen entstehen aber zufallsbedingte Verteilungen durch die Windverbreitung der Pathogene (DEL PONTE *et al.*, 2003). Zufallsverteilungen treten auch dann auf, wenn sich Pathogene im Pflanz- oder Saatgut befinden und kein Sekundärbefall stattfindet. Hier sind z.B. die Streifenkrankheit der Gerste (*Drechslera graminea*) oder Brandkrankheiten durch die Arten der Gattungen *Tilletia* und *Ustilago* zu nennen (HOFFMANN *et al.*, 1976). Nach WAGGONER und AYLOR (2000) beginnen Infektionen meist punktuell, da die Pathogene nesterweise überwintern oder die die Entwicklung von Erregern begünstigenden Einflussfaktoren innerhalb von Beständen variieren. HOFFMANN *et al.* (1976) nannten die unterschiedliche Wirtseignung von Pflanzen bedingt durch Standort, Resistenz oder Anfälligkeit sowie die lokale Vermehrung um primär befallene Stellen herum, als die wichtigste Ursache für das aggregierte Auftreten von Pathogenen. Aggregationen finden sich besonders bei Krankheiten bei denen Sekundärinfektionen erfolgen wie z.B. bei Rosten der Gattungen *Uromyces* und *Puccinia* (HOFFMANN *et al.*, 1976; AGRIOS, 2005). Bei monozyklischen Krankheiten liegt das aggregierte Auftreten einer aggregierten Verteilung des Primärinokulums zugrunde (SHAH und BERGSTROM, 2001; WILHELM und JONES, 2005).

Die partielle Taubährrigkeit verhält sich nach SUTTON (1982) wie eine monozyklische Krankheit. Das Auftreten der Erreger steht in enger Beziehung zur Menge und räumlichen Verteilung des Primärinokulums (ZADOKS und SCHEIN, 1979). Das Primärinokulum von *Fusarium* spp. kann sowohl wind- als auch bodenbürtig sein und wird hauptsächlich auf oberflächennahen Ernteresten der Vorfrüchte gebildet (SUTTON, 1982; PARRY *et al.*, 1995; BATEMAN, 2005). Das windbürtige Inokulum setzt sich aus Ascosporen von *F. graminearum* und aus Mikrokonidien von *F. poae* zusammen (PARRY *et al.*, 1995; MARKELL und FRANCL, 2003). Das bodenbürtige Inokulum wird in Form von Konidiosporen aller *Fusarium*-Arten über Regenspritzer sukzessive über die Blattetagen oder direkt zur Ähre transportiert (JENKINSON und PARRY, 1994).

Vorangegangene Untersuchungen zielten bereits auf das räumliche Auftreten der partiellen Taubährrigkeit auf unterschiedlichen Skalenebenen ab. So fanden MÜLLER *et al.* (2010) einen Einfluss der topographischen Lage auf den Mykotoxingehalt und wiesen signifikant höhere DON-Gehalte in Tälern mit hohem Topographischem Index (TWI = topographic wetness index) im Vergleich zu Hochlagen mit niedrigem TWI nach. KLÖHN *et al.* (2010) wiesen einen signifikanten Zusammenhang von Witterung, der räumlichen Verteilung von DON-Belastungen und der Hygrischen Ozeanität nach. SCHLANG (2010) untersuchte das räumliche Auftreten der partiellen Taubährrigkeit auf Regional- und Bestandesebene und wies ebenfalls eine hohe Variabilität von *Fusarium*-Befallsparametern nach. Untersuchungen zur Befallssituation benachbarter Felder durch WILHELM und JONES (2005) zeigten, dass diese völlig unterschiedlichen Befall aufwiesen und sich kaum gegenseitig beeinflussten. XU *et al.* (2008) dokumentierten selbst innerhalb eines Schrages eine große Variabilität des Auftretens von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine im kleinräumigen Bereich zu erfassen. In Bezug auf die Ergebnisse vorangegangener Untersuchungen durch andere Arbeitsgruppen zur räumlichen Verteilung von *Fusarium* spp. wurde vermutet, dass die partielle Taubährrigkeit und deren Befallsparameter auch auf kleinerer Skalenebene unterschiedliche Verteilungsmuster aufweisen würden. Hierzu wurden in Weizenbeständen Rasterproben auf einer Fläche von 1 x 1 m, Einzelähren auf einer Fläche von 20 x 20 cm und deren Ährenabschnitte untersucht und der Befall mit *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine räumlich bestimmt. Des Weiteren wurden Misch- und Rasterproben eines Bestandes hinsichtlich des *Fusarium*-Artenspektrums und der Befallshäufigkeit miteinander verglichen. Zur Ermittlung der *Fusarium*-Befallshäufigkeit wurde die klassische mikrobiologische Isolierung der Pilze von Weizenkörnern herangezogen, während die Befallsintensität aus gemahlene Körnern mittels TaqMan-PCR quantifiziert wurde. Weiterhin wurde mit einer Multimykotoxinanalyse die Belastung der Körner bestimmt. Die Versuche wurden auf verschiedenen Flächen unterschiedlicher Anbauintensität und Befallswahrscheinlichkeit durchgeführt.

2 Material und Methoden

2.1 Versuchsorganismen

2.1.1 Pflanzen

Als Pflanzenmaterial dienten verschiedene Sorten von Winterweizen (*Triticum aestivum* L.), die sich hinsichtlich ihrer Anfälligkeit gegenüber *Fusarium* spp. unterscheiden (Tab. 5).

Tab. 5: Charakterisierung der verwendeten Winterweizensorten bezüglich ihrer Anfälligkeit für *Fusarium* spp. nach der BSL (Bundessortenamt 2003, 2007c, 2009 und 2011b)

Sorte	Anfälligkeit für Ährenfusariosen*
Aristos ²	5
Dekan ⁴	5
Drifter ⁴	5
Kris ¹	7
Ritmo ³	7
Tommi ⁴	5

* Ausprägung der Eigenschaft ¹ = BSL 2003; ² = BSL 2007; ³ = BSL 2009; ⁴ = BSL 2011

2.1.2 Mikroorganismen

Die in Tab. 6 zusammengefassten *Fusarium*-Arten wurden in den Versuchsjahren 2007 bis 2009 von Weizenkörnern isoliert und sowohl mikro- als auch molekularbiologisch identifiziert (Tab. 6). Die Referenz-Isolate für die molekularbiologischen Untersuchungen stammten aus der Pathogensammlung des INRES-Phytomedizin, Universität Bonn (Tab. 7).

Tab. 6: Von Weizenkörnern isolierte *Fusarium*-Arten sowie deren Hauptfruchtformen

Anamorph	Teleomorph
<i>F. avenaceum</i> (Corda ex Fr.) Sacc.	<i>Gibberella avenacea</i> R. J. Cook
<i>F. culmorum</i> (Cooke) Sacc.	unbekannt
<i>F. graminearum</i> Schwabe	<i>Gibberella zeae</i> (Schw.) Petch
<i>F. poae</i> (Peck) Wollenw.	unbekannt
<i>F. proliferatum</i> (Mats.) Nirenberg	<i>Gibberella intermedia</i> (Kuhlmann) Samuels, Nirenberg & Seifert
<i>F. tricinctum</i> (Corda) Sacc.	<i>Gibberella tricincta</i> El-Gholl, Mc Rit, Schoult. & Rid.

Tab. 7: Referenz-Isolate für die molekularbiologischen Untersuchungen

<i>Fusarium</i> -Art	Isolat-Bezeichnung
<i>F. avenaceum</i>	AG30f
<i>F. graminearum</i>	AG23d
<i>F. poae</i>	7.17

2.2 Chemikalien und Verbrauchsmaterialien

Applied Biosystems™, Life Technologies Corporation (Carlsbad, USA)

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

AppliChem GmbH (Darmstadt, Deutschland)

Ampicillin, Chloramphenicol, Chlortetracyclin, Ethanol, Ethidiumbromid, Isopropanol, Natriumhypochlorid, Streptomycin, TAE-Puffer

Biologie-Bedarf Thorns (Göttingen, Deutschland)

Safranin-Lösung

CTZ GmbH (Kriftel, Deutschland)

1,5 ml Autosampler Vials mit Schraubdeckel

Eppendorf AG (Hamburg, Deutschland)

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

Greiner Bio-One GmbH (Frickenhausen, Deutschland)

Petrischalen (60 mm bzw. 94 mm Durchmesser)

Merck KGaA (Darmstadt, Deutschland)

Czapek-Dox Agar (CZID), Potato dextrose Agar (PDA), Potato Dextrose Broth (PDB), Dicloran, Kupfersulfat (CuSO₄), Zinksulfat (ZnSO₄), Kaliumhydrogenphosphat (KH₂PO₄)

Promega GmbH (Mannheim, Deutschland)

Wizard® magnetic DNA purification system for food (Inhalt: Lyse Puffer A, Lyse Puffer B, Ribonuklease A, Lösung zur Ausfällung, MagneSil®, magnetischer Stand)

Qiagen GmbH (Hilden, Deutschland)

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

Roth GmbH (Karlsruhe, Deutschland)

Agar-Agar

Takara Bio Inc. (Shiga, Japan)

Premix Ex Taq™

2.3 Freilanduntersuchungen

2.3.1 Versuchsstandorte

Die untersuchten Weizenkörner stammten aus Feldversuchen, die an den Standorten Hennef (Versuchsbetrieb für organischen Landbau Wiesengut), Rheinbach (Campus Klein-Altendorf) und Bonn-Poppelsdorf durchgeführt wurden (Tab. 8).

Tab. 8: Beschreibung der Versuchsstandorte Wiesengut, Klein-Altendorf und Poppelsdorf

	Standorte		
	Wiesengut	Klein-Altendorf	Poppelsdorf
Erntejahr	2007	2008	2007/2009
Ø Temp. [°C]*	10,3	9,2	10,9
Jahresniederschlag [mm]*	840	596	634
Bodenart	sandig-schluffig	lehmiger Schluff	sandiger Lehm
Ackerzahl	55	93	82
Wirtschaftsweise	organisch	konventionell	konventionell

* langjähriges Mittel (1976 bis 1990)

2.3.2 Versuchsdurchführung

Im Erntejahr 2007 wurde ein Winterweizenschlag mit der Sorte Aristos am Standort Wiesengut untersucht. Gemäß der Bewirtschaftungsweise des organischen Landbaus wurde auf den Einsatz synthetischer Pflanzenschutzmittel und mineralischer Dünger verzichtet. Durch eine gute Vorfruchtwirkung der Körnererbse (*Pisum sativum*) stand dem Weizen aus den Ernterückständen mineralisierter Stickstoff als N-Quelle zur Verfügung. Zur Ernte 2007 wurde eine Versuchsfläche

des konventionellen Anbaus mit der Winterweizen-Sorte Kris am Standort Poppelsdorf untersucht. Um den Effekt der Vorfrucht Mais auf die *Fusarium*-Befallshäufigkeit zu erfassen, wurde auf Fungizidmaßnahmen verzichtet. Zum BBCH-Stadium 22 (WITZENBERGER *et al.*, 1989; LANCASHIRE *et al.*, 1991) erfolgte eine Herbizidmaßnahme mit Fenikan[®] (500 g/l Isoproturon, 62,5 g/l Diflufenican; Bayer CropScience, Langenfeld) und zum BBCH-Stadium 61 eine Insektizidmaßnahme mit Biscaya[®] (240 g/l Thiacloprid; Bayer CropScience, Langenfeld).

Am Standort Klein-Altendorf wurde für das Erntejahr 2008 ein Streifenversuch mit drei Winterweizen-Sorten angelegt. Es sollte untersucht werden, welche Effekte eine differenzierte Stickstoffdüngung auf die *Fusarium*-Befallshäufigkeit aufweist. Dazu wurde die Versuchsfläche auf einer Hälfte mit 75 kg N/ha je Gabe und auf der anderen Hälfte mit 50 kg N/ha je Gabe gedüngt. Insgesamt erfolgten drei Stickstoffgaben: zu Vegetationsbeginn (20.02.2008), zum BBCH-Stadium 33 und zum BBCH-Stadium 55. Weiterhin fand auf der Hälfte des Streifenversuchs eine Fungizidapplikation mit Input[®] (160 g/l Prothioconazole, 300 g/l Spiroxamine; Bayer CropScience, Langenfeld) und Fandango[®] (100 g/l Prothioconazole, 100 g/l Fluoxastrobin; Bayer CropScience, Langenfeld) zum BBCH-Stadium 61 statt. Auf der zweiten Hälfte wurden keine Fungizide ausgebracht. Zum BBCH-Stadium 10 wurde im Vorjahr nach Auflauf der Kultur auf der gesamten Versuchsfläche eine Herbizidbehandlung mit Malibu[®] (300 g/l Pendimethalin, 60 g/l Flufenacet; BASF, Limburgerhof) durchgeführt.

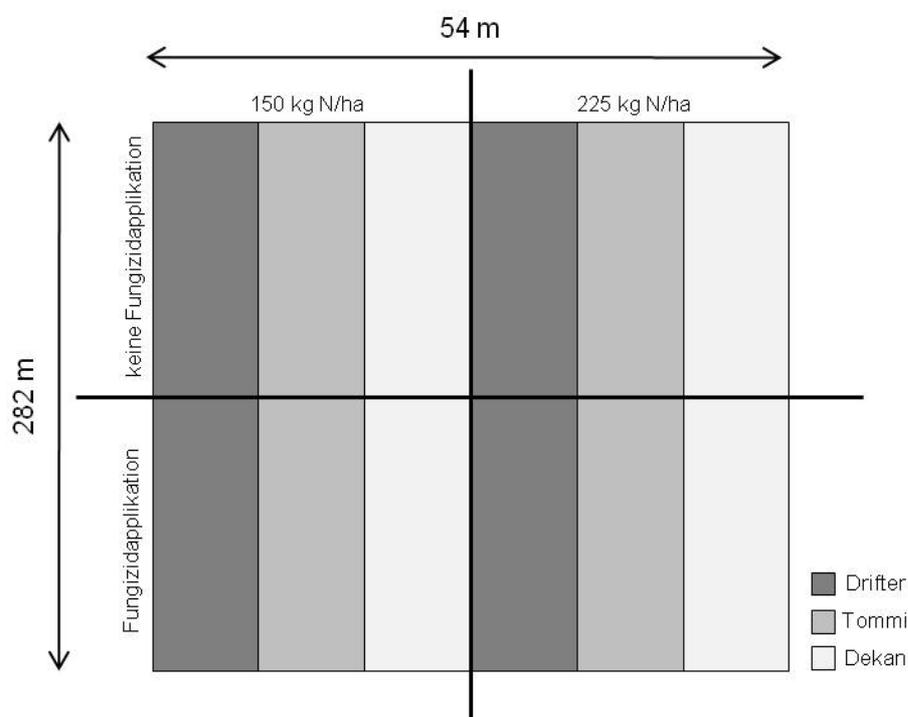


Abb. 1: Versuchsanlage des Sortenversuchs mit Stickstoff- und Fungizid-Varianten (Klein-Altendorf, 2008)

Für das Erntejahr 2009 wurde auf dem Standort Poppelsdorf innerhalb einer Parzelle mit der Winterweizen-Sorte Ritmo viermal eine Fläche von 20 x 20 cm abgesteckt und der Standort und

der Blühzeitpunkt aller Einzelähren auf der 0,04 m² großen Fläche dokumentiert. Eine Fungizidapplikation wurde nicht durchgeführt. Zum BBCH-Stadium 59 erfolgte eine Insektizidmaßnahme mit Biscaya® (240 g/l Thiacloprid) gegen Getreidehähnchen (*Lema* sp.).

Tab. 9: Versuchsdurchführung an den Standorten Wiesengut, Klein-Altendorf und Poppelsdorf

	Standorte		
	Wiesengut	Klein-Altendorf	Poppelsdorf
Winterweizen-Sorte	Aristos	Tommi, Dekan, Drifter	Kris/Ritmo
Vorfrucht	Körnererbse	Winterweizen	Mais/Winterweizen
N-Düngung	-	150 kg N/ha /225 kg N/ha	betriebsüblich
Fungizidapplikation	-	variabel	erfolgt
Inokulumpotenzial	natürlich	natürlich	natürlich/inokuliert
Zählung Ascosporen	-	-	- / erfolgt
Beprobungsfläche	1 m ²	1 m ² /0,25 m ²	1 m ² /0,04 m ²
Art der Probe	Rasterprobe	Rasterprobe /Mischprobe	Rasterprobe/Einzelähre
Ernte	12.07.2007	31.07.2008	20.07.2007/05.08.2009

2.3.3 Ausbringung von Inokulum

Neben den natürlich auf der Versuchsfläche vorkommenden Pflanzenrückständen wurde 2009 in die Versuchspartellen zum BBCH-Stadium 29 vor dem Schossen des Weizens eine Maisstoppel pro 1 m² zwischen die Weizenreihen ausgelegt. Diese Reststängel wurden bei einer Länge von 20 bis 25 cm im Erntejahr 2008 nach der Maisernte von einer Fläche des Dikopshofs, Wesseling gesammelt.

2.4 Probenahme

Zur Untersuchung des Auftretens von *Fusarium* spp. wurden an den Versuchsstandorten Beprobungen der Weizenflächen auf unterschiedlichen Skalenebenen durchgeführt. Die Probenahme fand jeweils zum BBCH-Stadium 89, dem Zeitpunkt der Vollreife statt. Zur Bestimmung des optimalen Erntezeitpunkts wurde der Feuchtegehalt der Weizenkörner mit Hilfe eines HE lite Getreide-Feuchtemessers (PFEUFFER, Deutschland) jeweils vor der Probenahme ermittelt.

2.4.1 Mischproben

Im Erntejahr 2008 wurde auf dem Standort Klein-Altendorf eine Mischbeprobung der einzelnen Varianten durchgeführt. Im Abstand von 7,50 m wurden an 16 Probenahmepunkten auf 0,25 m² die Ähren abgeschnitten und in einer Papiertüte gesammelt. Die Einzelproben einer Stickstoff-/Fungizid-Variante wurden direkt nach der Beprobung zu vier Mischproben zusammengeführt und aufbereitet.

2.4.2 Rasterproben

In den Jahren 2007 und 2008 wurden an den Standorten Poppelsdorf, Wiesengut und Klein-Altendorf Rasterbeprobungen durchgeführt. Das Raster mit einer Größe von 1 m x 1 m wurde zufällig in den reifen Weizenbestand installiert und 5 x 5 Proben in einem Raster von 20 cm x 20 cm gezogen (Abb. 2). Hierzu wurden alle Ähren der jeweils 0,04 m² großen Flächen abgeschnitten und in Papiertüten gesammelt.

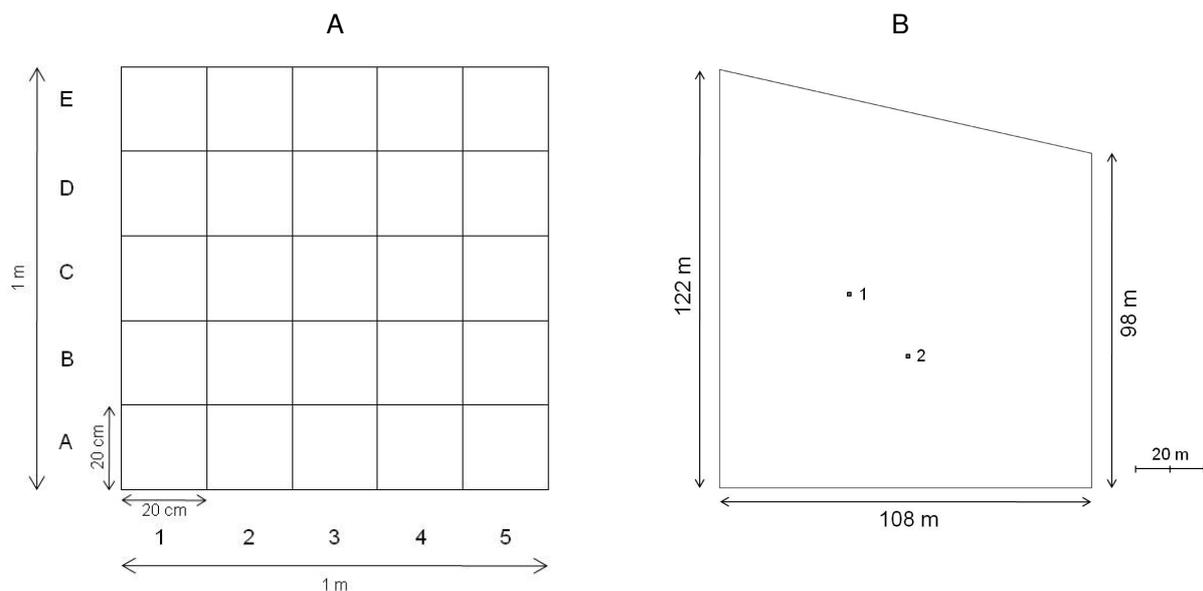


Abb. 2: Raster zur Probenahme im reifen Weizenbestand (A); zwei Rasterbeprobungen in einem Weizenbestand im Abstand von 25 m (B); (Wiesengut; 2007)

2.4.3 Einzelähren-Proben

Im Jahr 2009 wurden die Weizenähren auf der kleinsten Skalenebene von 20 x 20 cm einzeln geerntet. Anschließend wurden die Ähren in drei Ährenabschnitte geteilt (oben, Mitte, unten), gedroschen und separat gelagert.

2.5 Aufbereitung des Probenmaterials

Die geernteten Weizenähren und Ährenabschnitte wurden nach der Probenahme mit einem Minibatt Probendrescher (Reichardt, Hungen) ausgedroschen. Anschließend wurden die einzelnen Weizenkornproben für zwei Minuten in einer 1,3 %igen Natriumhypochloridlösung oberflächlich desinfiziert, zweimal für je zwei Minuten in sterilem *Aqua demin.* gespült und auf sterilem Filterpapier getrocknet.

Aus der Rasterbeprobung wurden alle Weizenkörner der jeweils 0,04 m² großen Flächen zu 25 Mischproben zusammengeführt. Für die mikroskopische Bestimmung der *Fusarium*-Befallshäufigkeit wurden 120 Körner je Rasterprobe auf einem Nährmedium (siehe 2.9.1) ausgelegt. Die übrigen Weizenkörner wurden in einer Zentrifugalmühle (ZM1, Retsch, Haan) mehlfein vermahlen und für die molekularbiologische Bestimmung der *Fusarium*-Befallsintensität (je Probe 20 mg Weizenkornmehl) sowie für die Mykotoxin-Analyse (je Probe 2 x 250 mg Weizenkornmehl) verwendet (Abb. 3).

Die einzelnen Ährenabschnitte (oben, Mitte, unten) wurden separat ausgedroschen und jeweils für die molekularbiologische Untersuchung (je Ährenabschnitt 20 mg Weizenkornmehl) und für die Mykotoxin-Analyse (je Ährenabschnitt zweifach 100 mg) mehlfein vermahlen (Abb. 3). Bis zur Analyse wurde das Probenmaterial in einem Kunststoffbeutel unter Vakuum bei -20 °C gelagert.

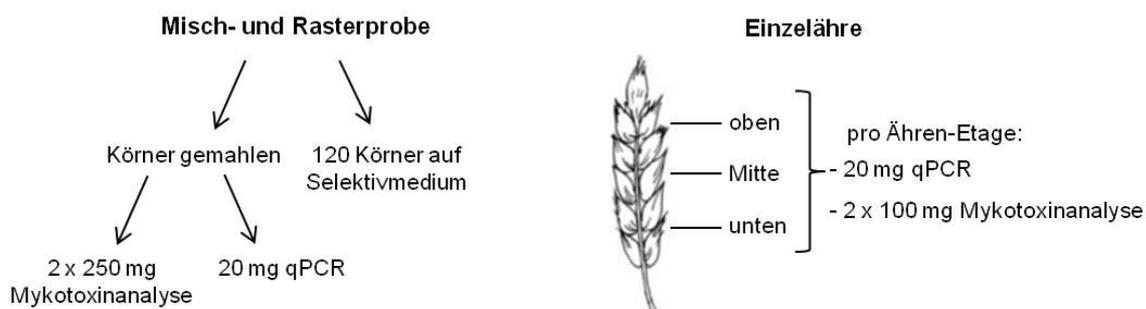


Abb. 3: Aufbereitung der Proben für die unterschiedlichen Untersuchungen

2.6 Erfassung der Standortfaktoren

2.6.1 Wetterdaten

Die Witterungsdaten stammten von Wetterstationen der Versuchsgüter der Universität Bonn. Die Klimadiagramme wurden aus den erfassten Tagesmitteln der Temperatur und der

Niederschlagsmenge für die Jahre 2007, 2008 und 2009 erstellt und mit dem langjährigen Mittel des Standorts verglichen.

2.6.2 Erfassung des Ascosporenflugs von *Gibberella zeae*

Die Aufzeichnung des Ascosporenflugs von *Gibberella zeae* erfolgte vom 27.05. bis 24.06.2009 an dem Standort Poppelsdorf mit Hilfe einer Burkard-Sporenfalle (Thermo-Dux, Wertheim). Hierbei handelt es sich um ein volumetrisches Aktivgerät nach HIRST (1958), welches einen konstanten Volumenstrom an Luft einsaugt. Der waagrecht angeordnete Ansaugstutzen wurde über eine Windfahne ausgerichtet. Die Ansaugfläche mit einem Ansaugvolumen von 10 l/min befand sich auf Ährenhöhe und die Entfernung zu den Versuchspartikeln betrug 2,5 m. Auf dem Rad der Sporenfalle befand sich ein mit Laborfett bestrichenes, durchsichtiges Auswertungsband, auf dem die Aerosolpartikel gesammelt wurden. Spätestens nach sieben Tagen wurde das Auswertungsband gewechselt, in Tagesabschnitte getrennt und für fünf Minuten in Safranin-Lösung angefärbt. Unter dem Lichtmikroskop wurde das tägliche Ascosporenaufkommen bei 100-facher Vergrößerung quantitativ nach PUNITHALINGHAM und HOLLIDAY (1972) erfasst.

2.7 Erfassung der Blühzeitpunkte

Im Erntejahr 2009 wurde die Blüte jeder einzelnen Ähre auf den 20 x 20 cm großen Beprobungsflächen dokumentiert. Im Anschluss erfolgte die Einteilung in „früher“ und „später“ Blühzeitpunkt.

2.8 Mikrobiologische Untersuchungen

2.8.1 Nährmedien

Die aufgeführten Nährmedien wurden bei einer Temperatur von 121 °C und 1 bar für 20 Minuten autoklaviert und nach dem Abkühlen auf ca. 55 °C in Petrischalen mit 60 bzw. 94 mm Durchmesser gegossen.

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

CZID-Agar ist ein Selektivmedium für die Isolation von *Fusarium* spp. Nach dem Autoklavieren wurde der Agar im Wasserbad auf 55 °C abgekühlt und Antibiotika und Iprodion (Rovral®; BASF AG, Deutschland) zugegeben, welche zuvor separat in handwarmem sterilem Aqua demin. gelöst wurden. Die Zugabe von Antibiotika und Iprodion bedingte ein gehemmtes Wachstum saprophytischer Pilze und Bakterien der Kornoberfläche, sodass auch langsam wachsende *Fusarium*-Arten isoliert werden konnten.

Zusammensetzung:

CZAPEK-Dox Agar	26,25 g
Agar-Agar	7,5 g
CZID-Stammlösung	1,5 ml
CuSO ₄	5 mg
ZnSO ₄	10 mg
Chloramphenicol	37,5 mg
Dichloran (0,2 % in ETOH)	0,75 ml
Aqua dest.	750 ml
Penicillin	37,5 mg
Streptomycin	37,5 mg
Tetracyclin	37,5 mg
Rovral®-Lösung	6 µg/ml

Potato Dextrose Agar (PDA)Zusammensetzung:

Potato Dextrose Agar	29,25 g
Aqua dest.	750 ml

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

Für den CL-Agar wurden junge Blätter von Landnelken (*Dianthus caryophyllus* L.) geerntet, in 2-5 cm lange Stücke zerschnitten, in Alufolie gewickelt und für 8-10 Stunden bei 45 °C im Trockenschrank getrocknet. Anschließend wurde das getrocknete Blattmaterial autoklaviert (121 °C, 1 bar, 20 Minuten) und auf sterilem Filterpapier unter der Sterilbank getrocknet. Je Petrischale wurden zwei bis drei Nelkenblattstücke auf der Oberfläche des Agars zufällig ausgelegt.

Zusammensetzung:

Agar-Agar	20 g
Aqua dest.	750 ml
Nelkenblattstücke	2-3 Stücke

Potato Dextrose Broth (PDB)Zusammensetzung:

Potato Dextrose Broth	6 g
Aqua dest.	200 ml

2.8.2 Erfassung des *Fusarium*-Befalls

Zur Erfassung der *Fusarium*-Befallshäufigkeit wurden je Petrischale fünf Körner auf CZID-Agar ausgelegt und anschließend für mindestens zehn Tage bei 21 bis 23 °C inkubiert.

2.8.3 Identifizierung von *Fusarium* spp.

Die auf CZID-Agar gewachsenen *Fusarium*-Kolonien wurden durch die Präparation von Einzelhyphen-Isolaten auf CLA und PDA überimpft und erneut für 21 Tage in der Klimakammer bei 21 bis 23 °C unter langwelligem UV-Licht inkubiert. Das Licht und der nährstoffarme CLA förderten die Sporenproduktion und es kam zur Bildung artspezifischer Konidien- und Myzelstrukturen. Anhand dieser Strukturen erfolgte eine mikrobiologische Differenzierung der aufgetretenen *Fusarium*-Arten mit dem Lichtmikroskop. PDA diente zur Beobachtung makroskopisch differenzierbarer Merkmale wie z.B. Agar-Pigmentierung oder Myzelfarbe eines Isolats.

2.8.4 Anzucht von *Fusarium*-Arten

Myzel aus Reinkulturen der Isolate AG 23d (*F. graminearum*), AG 30f (*F. avenaceum*) und 7.17 (*F. poae*) wurde jeweils in 200 ml PDB überführt und für eine Woche bei 21 bis 23 °C, in Abwesenheit von Licht, auf dem Schüttler inkubiert. Im Folgenden wurde das abfiltrierte Myzel mit einem Mörser unter Zugabe von Flüssigstickstoff fein zermahlen.

2.9 Molekularbiologische Untersuchungen

2.9.1 DNA-Extraktion aus Weizenkörnern

Die DNA-Extraktion aus Weizenkornmehl erfolgte mit dem Wizard magnetic DNA purification system for food. Für den Ablauf der DNA-Extraktion lag ein modifiziertes Protokoll vor:

1. Einwaage von 20 mg Weizenkornmehl in ein 2 ml Reaktionsgefäß
2. Zugabe von 400 µl Lysis Buffer A und 4 µl RNase A zur Lösung des Ausgangsmaterials
3. Zugabe von 200 µl Lysis Buffer B und für 15 sek vortexen
4. Inkubation bei Raumtemperatur für 10 min
5. Zugabe von 600 µl Precipitation Solution und vortexen
6. Zentrifugieren für 10 min bei 14000 U/min
7. Überstand (flüssige Phase) in ein neues Reaktionsgefäß pipettieren, Pellet verwerfen
8. MagneSil[®] PMPs schütteln, um die Lösung völlig zu resuspendieren.
9. Zugabe von 50 µl MagneSil[®] PMPs zur flüssigen Phase und schütteln
10. Zugabe von 1000 µl Isopropanol und das Reaktionsgefäß 15-mal über Kopf drehen, um den Inhalt zu homogenisieren.
11. Inkubation bei Raumtemperatur für 5 min, dabei gelegentlich das Reaktionsgefäß über Kopf drehen
12. Reaktionsgefäß für 1 min in den MagneSphere[®]-Ständer stellen, um eine vollständige Anlagerung der MagneSil[®] PMPs an der Außenwand zu ermöglichen, anschließend die Flüssigkeit aus dem Reaktionsgefäß (im Ständer verbleibend) schütten.
13. Reaktionsgefäß aus dem MagneSphere[®]-Ständer nehmen und 250 µl Lysis Buffer B hinzugeben, vermischen, zurück in den MagneSphere[®]-Ständer stellen und nach 1 min die Flüssigkeit aus dem Reaktionsgefäß (im Ständer verbleibend) schütten.
14. Zugabe von 1000 µl Ethanol (70 %), das Reaktionsgefäß mehrfach im MagneSphere[®]-Ständer drehen und anschließend die Flüssigkeit aus dem Reaktionsgefäß schütten. Diesen Waschvorgang zweimal wiederholen. Das Reaktionsgefäß verbleibt stets im MagneSphere[®]-Ständer.
15. Ethanol-Reste abpipettieren, dabei das MagneSil[®]-Pellet an der Außenwand des Reaktionsgefäßes nicht berühren
16. Geöffnetes Reaktionsgefäß im MagneSphere[®]-Ständer für 15 min bei 65 °C im Trockenschrank trocknen
17. Reaktionsgefäß dem MagneSphere[®]-Ständer entnehmen, Zugabe von 200 µl autoklaviertem Milli-Q-Reinstwasser (Billerica, USA) und zur Lösung des MagneSil[®]-Pellets für 5 min bei 65 °C inkubieren

18. Reaktionsgefäß für 1 min in den MagneSphere®-Ständer stellen und dann Flüssigkeit (enthält die DNA), ohne das MagneSil®-Pellet zu berühren, mit der Pipette in ein neues Reaktionsgefäß überführen.

2.9.1.1 DNA-Extraktion aus Pilzmyzel

Die DNA-Extraktion aus Pilzmyzel wurde mit einem DNeasy Plant Mini Kit durchgeführt. Für den Extraktionsablauf lag ein modifiziertes Protokoll vor:

1. Einwaage von 20 mg gemahlenem Pilzmyzel in ein 2 ml Reaktionsgefäß
2. Zugabe von 400 µl Buffer AP1 und 4 µl RNase A und vortexen
3. Inkubation für 60 min bei 65 °C, zwischendurch mehrfach aufschütteln
4. Zugabe von 130 µl Buffer AP2, gut vermischen und für 5 min auf Eis inkubieren
5. Zentrifugieren für 10 min bei 14000 U/min
6. Lysat in ein QIAshredder Mini spin column (in 2 ml Reaktionsgefäß) pipettieren und für 2 min bei 14000 U/min zentrifugieren
7. Durchfluss in ein neues 2 ml Reaktionsgefäß pipettieren
8. 1,5-faches Volumen von Buffer AP3/E hinzufügen und durch Pipettieren mischen
9. Zugabe von 650 µl der Lösung in DNeasy Mini spin column (in 2 ml Reaktionsgefäß), für 1 min bei 8000 U/min zentrifugieren, Durchfluss verwerfen
10. Wiederholung Schritt 9 für die restliche Lösung
11. DNeasy Mini spin column in ein neues 2 ml Reaktionsgefäß geben, Zugabe von 500 µl Buffer AW und für 1 min bei 8000 U/min zentrifugieren, Durchfluss verwerfen
12. Zugabe von 500 µl Buffer AW und für 1 min bei 14000 U/min zentrifugieren, Durchfluss verwerfen
13. DNeasy Mini spin column in ein neues 1,5 ml Reaktionsgefäß geben
14. Zugabe von 100 µl Buffer AE auf die Membran, für 5 min bei Raumtemperatur inkubieren und für 1 min bei 8000 U/min zentrifugieren
15. Wiederholung Schritt 14

2.9.2 Bestimmung der DNA-Konzentration

2.9.2.1 Spektrophotometrie

Über die Messung der optischen Dichte mit Hilfe eines NanoDrop 1000 Spektrophotometers (NanoDrop, USA) wurden je 2 µl der extrahierten DNA-Lösung in dreifacher Wiederholung gemessen und aus den ermittelten Werten das arithmetische Mittel gebildet.

2.9.2.2 Agarose-Gelelektrophorese

Je 10 µl der extrahierten DNA-Lösung wurden mit 2 µl Beladungspuffer versetzt und auf einem 2 %igen Agarose-Gel bei 100 Volt für eine Stunde in der Sub-Cell GT Gelelektrophoresekammer (Bio Rad Laboratories, München) laufen gelassen. Die Visualisierung der DNA erfolgte durch Verwendung von Ethidiumbromid (3 µl/150 ml Gel). Dieser Farbstoff lagerte sich in die Doppelhelix der DNA ein und wurde durch UV-Bestrahlung zur Fluoreszenz angeregt.

2.9.3 Quantitative PCR mit TaqMan®

Die Quantifizierung der *Fusarium*-Befallsintensität erfolgte unter Verwendung von MicroAmp™ Fast Optical 96 Well-Kammer-Mikroplatten in einem Applied Biosystems (ABI) 7500 Fast Real-Time PCR System (ABI, USA) im Standard Modus. Zunächst wurden DNA-Standard-Eichreihen (90000 pg/µl, 9000 pg/µl, 900 pg/µl, 90 pg/µl, 9 pg/µl) für *F. graminearum*, *F. avenaceum* und *F. poae* hergestellt, die zuvor aus Pilzmyzel extrahiert wurden (siehe 2.10.2). In jedem PCR-Lauf wurden 2 µl je Mengenstandard für die jeweilige Target-DNA dreifach mitgeführt. Die Proben und Negativkontrollen wurden mindestens zweifach gemessen. Nach WAALWIJK *et al.* (2004) wurden die Real-time PCR-Reaktionen für die Targets *F. graminearum* und *F. avenaceum* in 30 µl Gesamtvolumen durchgeführt: 2 µl Proben-DNA, 15 µl TaqMan® Universal Master Mix, 1 µl je Primer (Forward/Reverse), 0,5 µl der Target-Sonde (Tab. 10) und 10,5 µl H₂O. Das Temperaturprofil der qPCR enthielt eine Phase von zwei Minuten bei 50 °C zum Verdau Uracil haltiger DNA, gefolgt von dem Initialschritt von 10 min bei 95 °C, zur Denaturierung der DNA. Anschließend folgten 40 Zyklen bei 95 °C für 15 sek und 60 °C für 1 min (Anlagerung und Verlängerung). Die qPCR-Reaktionen für das Target *F. poae* erfolgten in einem Gesamtvolumen von 20 µl: 2 µl Proben-DNA, 10 µl Premix Ex Taq™ Takara, 0,8 µl je Primer (Forward/Reverse), 0,05 µl der Target-Sonde, 0,4 µl ROX reference dyes II und 5,95 µl H₂O. Das Temperaturprofil umfasste eine Initialdenaturierung von 1 min bei 95 °C, 40 Zyklen bei 95 °C für 5 sek und 60 °C für 34 sek.

Tab. 10: Verwendete Primer und Sonden für die TaqMan®-Real-time PCR (nach WAALWIJK *et al.*, 2004)

<i>Fusarium</i> -Art	Primer/Sonde ¹	Sequenz (5'→3')	Größe
<i>F. avenaceum</i>	<i>avenaceum</i> MGB-F	CCATCGCCGTGGCTTTC	58 bp
	<i>avenaceum</i> MGB-R	CAAGCCCACAGACACGTTGT	
	<i>avenaceum</i> MGB Sonde	ACGCAATTGACTATTGC	
<i>F. graminearum</i>	<i>graminearum</i> MGB-F	GGCGCTTCTCGTGAACACA	94 bp
	<i>graminearum</i> MGB-R	TGGCTAAACAGCACGAATGC	
	<i>graminearum</i> MGB Sonde	AGATATGTCTCTTCAAGTCT	
<i>F. poae</i>	<i>poae</i> 1-F	AAATCGGCGTATAGGGTTGAGATA	220 bp
	<i>poae</i> 1-R	GCTCACACAGAGTAACCGAAACCT	
	<i>poae</i> Sonde	CAAATCACCCAACCGACCCTTTC	

¹Jede Sonde ist am 5'-Ende FAM-markiert. Der Quencher am 3'-Ende ist ein Blackhole-Quencher.

Nach dem PCR-Lauf erfolgte die Auswertung mit Hilfe des geräteinternen SDS-Programms (ABI Foster City, USA). Um die in einer Probe enthaltene Ausgangsmenge an Target-DNA absolut quantifizieren zu können, wurde bei jedem Lauf eine Standardkurve erstellt. Diese bestand aus vier bzw. fünf aufeinander folgenden Konzentrationen und wurde, mittels Auftragen der ermittelten Threshold-Cycle-Werte der Eichstandards, gegen ihre logarithmische Konzentration als Regressionsgerade gebildet (GÖRTZ, 2009). Für eine verwertbare qPCR musste die Effizienz der Amplifikation zwischen 90 % und 110 % liegen, welches einer Steigung der Standardkurve zwischen -3,1 und -3,58 entsprach (100 % = -3,321928). Das Bestimmtheitsmaß R^2 der Standardkurve musste größer 0,99 sein. Aus den ermittelten DNA-Mengen aller Wiederholungen einer Probe innerhalb eines PCR-Laufs wurde das arithmetische Mittel (\bar{x}_{arithm}) gebildet, um die endliche Ausgangsmenge an Target-DNA berechnen zu können. Aus der in der PCR-Reaktion verwendeten DNA-Menge einer Probe (2 μ l), dem zur DNA-Extraktion eingewogenen Ausgangsmaterial (\pm 20 mg, exakter Einwaage-Wert schriftlich festgehalten) und dem in der DNA-Extraktion eingesetzten Endvolumen (200 μ l H₂O) wurde die Ausgangsmenge der Target-DNA einer Probe berechnet:

$$[(\bar{x}_{\text{arithm}}/2)/20]*200 = \text{DNA-Menge [pg/mg Trockenmasse]}$$

Das Limit der Quantifizierung (LOQ) für die Targets *F. graminearum*, *F. avenaceum* und *F. poae* lag bei 9 pg/ μ l.

2.10 Bestimmung der Mykotoxine

Ausgehend von dem Probenmaterial (siehe 2.5) wurden je 250 mg Weizenkornmehl der Rasterproben bzw. 100 mg Weizenkornmehl der Einzelährenproben als Doppelbestimmung in 1,5 ml Chromatographie-Vials eingewogen. Die Analyse der Mykotoxine wurde von der Arbeitsgruppe M. Spittler am Institut für Umweltforschung (INFU) der TU Dortmund, nach einer Multimethode, basierend auf der Kopplung von Flüssigchromatographie und Tandemmassenspektrometrie (LC-ESI/MS-Methode), nach HEREBIAN *et al.* (2009) durchgeführt. Das homogenisierte Weizenkornmehl wurde mit der nach SULYOK *et al.* (2006) zusammengesetzten Acetonitril/Wasser/Essigsäure-Lösung (79:20:1, v/v/v) und einer internen Standardlösung versetzt und für 90 Minuten auf einem Rotationsschüttler extrahiert. Nach dreiminütiger Zentrifugation (1000 U/min) wurde der Überstand in ein neues Vial überführt und direkt für die Messung eingesetzt. Für das chromatographische Trennverfahren wurde Methanol/Wasser/Essigsäure (10:89:1, v/v/v) sowie Methanol/Wasser/Essigsäure (97:2:1, v/v/v) und eine C18-Säule (150 mm x 0,3 mm x 3 µm; Macherey-Nagel, Deutschland) verwendet. Die Messung erfolgte mit einem TSQ Quantum Ultra AM-Massenspektrometer (Thermo Scientific, USA). Für jeden Analyten und internen Referenzstandard wurden zwei charakteristische Massenübergänge (SRM) aufgezeichnet. Die Wiederfindungsrate der Analyten (nicht kontaminierte Proben versetzt mit bekannter Standardmenge) lag zwischen 87 und 131 %. Sämtliche Bestimmungen wurden im Doppelansatz durchgeführt, die Ergebnisse der Doppelbestimmung wiesen aufgrund der relativen Standardabweichung von < 12,4 % nur eine geringe Variation auf. Mit Hilfe dieser Multikomponentenbestimmung war der Nachweis von 32 Mykotoxinen möglich (Tab. 11).

Tab. 11: Mit der Multimykotoxin-Analyse nachweisbare Mykotoxine sowie deren Nachweisgrenzen (nach HEREBIAN *et al.*, 2009)

Mykotoxin	Nachweisgrenze [ng g ⁻¹]
3-Acetyldeoxynivalenol	10
15-Acetyldeoxynivalenol	10
Aflatoxin B1	0,5
Aflatoxin B2	30
Aflatoxin G1	1
Aflatoxin G2	10
Altenuen	1
Alternariol	1
Alternariolmethylether	1
Beauvericin	0,5
Citrinin	10
Deoxynivalenol	4
Diacetoxyscirpenol	10
Enniatin B	0,5
Ergocornin	0,5
Ergotamin	1
Fumonisin B1	35
Fumonisin B2	30
Fusarenon-X	10
Gibberillinsäure	10
HT2-Toxin	8
Moniliformin	1
Monoacetoxyscirpenol	10
Neosolaniol	15
Nivalenol	4
Ochratoxin A	4
Ochratoxin B	1
Patulin	800
T2-Toxin	1
Verrucarin	1
α -Zearalenol	4
Zearalenon	4

2.11 Statistische Auswertung

2.11.1 Räumliche Datenanalyse

Dispersionsindex

Zur Beurteilung der Variabilität der Daten diente der Dispersionsindex, welcher sich aus dem Verhältnis von Varianz zum Mittelwert ergibt ($VMR = s^2 / \bar{x}$). Es wird zwischen drei prinzipiell unterschiedlichen Verteilungsmustern (Dispersion) unterschieden:

geringe Variabilität: $s^2 / \bar{x} < 1$

mittlere Variabilität: $s^2 / \bar{x} \cong 1$

hohe Variabilität: $s^2 / \bar{x} > 1$.

Die Mittelwerte und Varianzen wurden mit dem Programm Microsoft Excel® 2002 berechnet.

Aggregationsindex

Zur Auswertung der räumlichen Verteilung von Daten wurde mit Hilfe des Softwaretools SADIE (**S**patial **A**nalysis by **D**istance **I**ndic**E**s) eine Aggregationsanalyse durchgeführt, eine Methode zur Analyse von Distanzmaßen zweidimensional georeferenzierter Daten (PERRY, 1995; PERRY *et al.*, 1996; PERRY *et al.*, 1999). Die Auswertung erfolgte mit dem SADIE-Programm RBRELV13.EXE®. Mittels Transportalgorithmus wurde zunächst die minimale Distanz berechnet, die nötig wäre, um eine regelmäßige Verteilung der Messwerte zu erreichen (Distanz zur regelmäßigen Verteilung D_{obs}). Nachdem mit dem Versuchsdatensatz mehrere tausend Permutationen ($n = 4723$) durchgeführt wurden, konnte die Distanz zur regelmäßigen Verteilung einer jeden Permutation errechnet und gemittelt (D_{exp}) werden. Der sogenannte Aggregationsindex (I_a) ist dimensionslos und ergibt sich aus dem Verhältnis von D_{obs} und D_{exp} . Mittels SADIE wurde die Wahrscheinlichkeit (p_a) errechnet, mit der die gegebene Verteilung von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden war. Mit I_a wurde ein Indexwert für den gesamten Datensatz berechnet und verschiedene Datensätze ließen sich direkt miteinander vergleichen:

$I_a = 1$ Verteilung ist zufällig verteilt.

$I_a < 1$ Verteilung ist regelmäßiger als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten.

$I_a > 1$ Verteilung zeigt größere Aggregation als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten.

Clusterindex

Der sogenannte Clusterindex beschrieb die Zugehörigkeit eines Messpunkts zu einem Cluster. Als Cluster wurden Aggregationen von Messwerten ähnlicher Größe verstanden. SADIE unterschied zwischen zwei verschiedenen Cluster-Typen: Ein Patch-Cluster umfasste alle großen Messwerte, ein Gap-Cluster beinhaltete Nullwerte und kleine Messwerte. Je ähnlicher die Messwerte waren, die den zu untersuchenden Messpunkt umgaben, desto höher war sein Clusterindex. War ein Messpunkt Teil eines Patch-Clusters, so hatte er einen Clusterindex > 1 . Messwerte, die zu einem Gap-Cluster gehörten, wiesen einen Clusterindex < -1 auf. Messwerte

mit Clusterindizes zwischen 1 und -1 wurden keinem Cluster zugeordnet. Die Zugehörigkeit eines Messwerts zu einem Cluster implizierte nicht, dass eine statistisch signifikante Aggregation vorlag. Erreichte der Aggregationsindex Werte größer 1, so konnten die Aggregationszonen anhand des Clusterindex erkannt werden. Sie wurden entweder rot (Patch-Cluster) oder blau (Gap-Cluster) dargestellt.

2.11.2 Darstellung in einem Geographischen Informationssystem (GIS)

Die Daten der SADIE-Analyse wurden unter Zuhilfenahme des Geoinformationssystems ArcGIS Editor 9.2 (ESRI Deutschland GmbH, Kranzberg) geostatistisch verarbeitet. Das Kriging wurde mit dem ESRI-Zusatzprogramm 'Geostatistical Analyst' durchgeführt.

2.11.3 SPSS-Datenanalyse

Die gewonnene Datenstruktur wies viele Ausreißer, Null- und Extremwerte auf und war nicht normalverteilt. Zur statistischen Auswertung der Ergebnisse wurden nicht-parametrische Tests durchgeführt. Die Stärke einer Beziehung zweier Variablen wurde mit dem Rangkorrelationskoeffizienten nach Kendall und der Spearman-Rangkorrelation berechnet. Zur Ermittlung von Unterschieden zwischen zwei Mittelwerten wurde der Mann-Whitney-U-Test durchgeführt. Zur Analyse der Varianz wurden ANOVAs durchgeführt, die den Einfluss einer oder mehrerer Einflussvariablen erklärten. Die Irrtumswahrscheinlichkeiten betragen in den Testverfahren $p = 0,05$; $p = 0,01$ und $p = 0,001$. Die statistischen Auswertungen erfolgten mit dem Programm SPSS Version 19.0 (SPSS Inc., Chicago, USA).

3 Ergebnisse

Da Getreideähren mit partieller Taubährigkeit in Praxisbeständen oft von befallsfreien Ähren umgeben sind, wurden in der vorliegenden Arbeit das Auftreten und die räumliche Verteilung von *Fusarium*-Arten sowie der mit ihnen assoziierten Mykotoxine an Weizenkörnern auf verschiedenen Skalenebenen untersucht. Auf der größten Skalenebene wurden Mischproben von Schlägen gezogen, auf der zweiten Skalenebene Rasterproben und auf der kleinsten Ebene das Auftreten von *Fusarium* spp. an Einzelähren erfasst. Hierzu wurden in den Jahren 2007, 2008 und 2009 Freilanduntersuchungen an vier Standorten durchgeführt.

3.1 Variabilität der Belastung von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. in Mischproben

Diese Untersuchungen wurden durchgeführt, um die Variabilität des Artenspektrums von *Fusarium* spp. und der Häufigkeit befallener Körner innerhalb von Weizenbeständen durch Mischproben zu überprüfen. Dazu wurden im Jahr 2008 am Standort Klein-Altendorf Kornproben der Weizensorten Drifter, Dekan und Tommi gezogen. In dem angelegten Streifenversuch erfolgte die Stickstoffdüngung in zwei Intensitäten, mit 150 kg N/ha bzw. 225 kg N/ha. Eine Fungizidapplikation wurde auf einer Hälfte der Fläche durchgeführt, die andere Hälfte blieb unbehandelt. Aus jeder Stickstoff-/Fungizid-Kombination der Sorten wurden je vier Kornproben genommen und auf die Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. untersucht.

3.1.1 Witterung am Standort Klein-Altendorf im Jahr 2008

Die Summe der Tagesniederschläge und das Tagesmittel der Temperaturen wurden am Standort Klein-Altendorf in der für die *Fusarium*-Infektion und Krankheitsentwicklung wichtigen Phase von Mai bis Juni ausgewertet (Abb. 4). Der Mai war überdurchschnittlich warm und trocken, nur Mitte und Ende des Monats gab es zwei Regenereignisse mit anschließendem Temperaturabfall. Die Blüte der drei Weizensorten erstreckte sich vom 27.05. bis zum 15.06. Zu Beginn der Blüte fiel am 31.05. Niederschlag von 17,4 mm und im Folgezeitraum gab es fast täglich Niederschläge bei Tagesdurchschnittstemperaturen um 19 °C. Zum Ende der Blüte fiel die durchschnittliche Temperatur bis auf 11,2 °C ab, stieg aber bis Ende des Monats wieder auf 17,8 °C an. Am 25.06. fiel die höchste Niederschlagsmenge des untersuchten Zeitraums. Die durchschnittlichen Niederschlagssummen der Monate Mai und Juni lagen unter den Werten des langjährigen Mittels, die Summe der durchschnittlichen Tagestemperaturen lag in beiden Monaten hingegen über dem langjährigen Mittel.

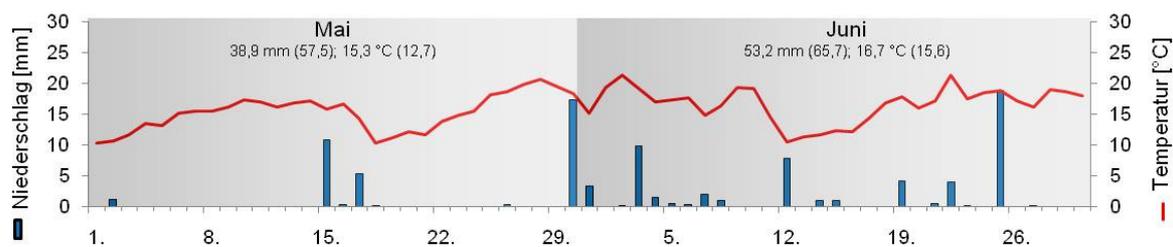


Abb. 4: Tagesniederschlagssumme und Tagesdurchschnittstemperatur der Monate Mai und Juni (Klein-Altendorf; 2008) Angabe der Niederschlagssumme und Durchschnittswerte je Monat im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1957 bis 1983) in Klammern; Weizenblüte vom 27.05.-15.06.

3.1.2 Häufigkeit und Spektrum des *Fusarium*-Befalls

Am Standort Klein-Altendorf wurden mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* fünf *Fusarium*-Arten als Erreger der partiellen Taubährigkeit identifiziert (Abb. 5).

Mischproben von Weizenkörnern mit 150 kg N/ha Düngung und ohne Fungizidbehandlung wiesen mit durchschnittlich 64,9 % die höchste Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. auf. Der Anteil mit *Fusarium* spp. infizierter Körner teilte sich in den Mischproben der drei Weizensorten unterschiedlich auf. Bei Drifter wurde eine Befallshäufigkeit von 38,33 % durch *F. graminearum* und *F. poae* verursacht. Die Mischprobe der Sorte Dekan ergab eine Häufigkeit befallener Körner von 60,9 %, welche durch die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* verursacht wurde. Die Proben der Sorte Tommi wiesen mit 95,8 % die höchste Befallshäufigkeit auf. Etwa die Hälfte wurde durch *F. graminearum* verursacht, gefolgt von *F. avenaceum*, *F. tricinctum*, *F. poae* und *F. culmorum*.

Die Häufigkeit von *Fusarium* spp. in Proben mit einer Düngung von 150 kg N/ha und Fungizidapplikation fiel mit einem mittleren Kornbefall von 22,5 % am geringsten aus, wie auch die Anzahl der nachgewiesenen *Fusarium*-Arten. Der Befall wurde bei allen drei Sorten durch jeweils zwei *Fusarium*-Arten verursacht. Bei der Sorte Drifter lag die Häufigkeit befallener Körner bei 20,8 %, nachgewiesen wurden *F. graminearum* und *F. tricinctum*. Körner der Dekan-Proben waren zu 13,3 % infiziert, es traten die Arten *F. avenaceum* und *F. graminearum* auf. Die höchste Befallshäufigkeit von 33,3 % wurde in Mischproben der Sorte Tommi durch die Arten *F. graminearum* und *F. tricinctum* verursacht.

Unbehandelte Körner mit 225 kg N/ha Düngung wiesen eine durchschnittliche Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. von 38,6 % auf. Bei der Sorte Drifter waren insgesamt 21,7 % der Weizenkörner mit *Fusarium* spp. infiziert. Dominierend war die Art *F. graminearum*, gefolgt von *F. avenaceum* und *F. poae*. Die Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Körner in Mischproben der Sorte Dekan lag bei 24,2 % und wurde durch vier Arten verursacht. Der Anteil mit *F. graminearum* infizierter Körner war am größten. Mischproben der Sorte Tommi wiesen mit 70,0 % den

höchsten Befall durch *Fusarium* spp. auf. Neben der dominierenden Art *F. tricinctum* wurden vier weitere Arten als Erreger der partiellen Taubährrigkeit identifiziert.

Körner aus Weizenpflanzen mit einer Düngung von 225 kg N/ha und Fungizidapplikation wiesen eine durchschnittliche Befallshäufigkeit von 25,3 % auf. In Drifter-Proben lag die Häufigkeit befallener Körner mit *Fusarium* spp. bei 15,0 %. Es wurden drei *Fusarium*-Arten nachgewiesen. Die Probenahme der Sorte Dekan ergab einen Gesamtbefall von 17,5 %. Bei beiden Weizensorten war die dominierende Art *F. graminearum*, gefolgt von *F. tricinctum* und *F. avenaceum*. Die Häufigkeit befallener Körner mit *Fusarium* spp. in der Mischprobe der Sorte Tommi lag bei 43,3 %. Mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae* und *F. tricinctum* wurden vier Arten isoliert.

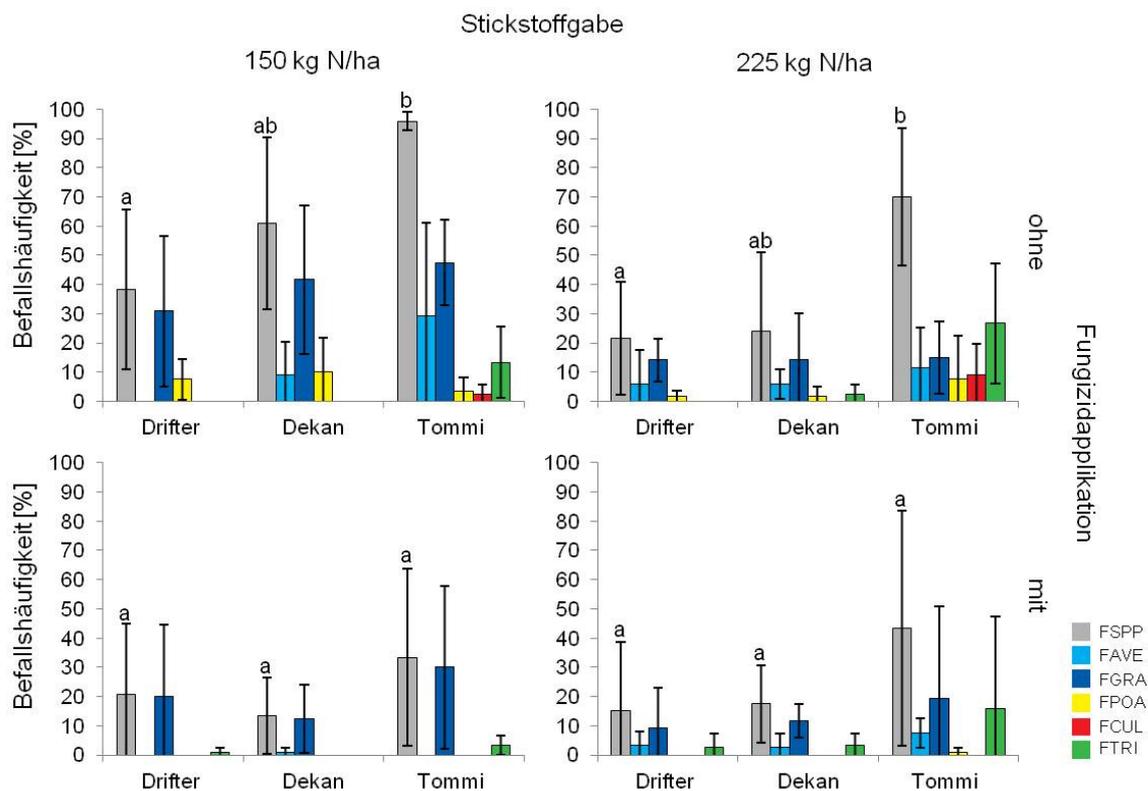


Abb. 5: Häufigkeit des *Fusarium*-Befalls in Mischproben der WW-Sorten Drifter, Dekan und Tommi; (Klein-Altendorf; 2008); Säulen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant; MW \pm SD; Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig: $p \leq 0,05$; $n = 4$

Insgesamt war zu erkennen, dass mit steigender Häufigkeit infizierter Körner die Anzahl der nachgewiesenen *Fusarium*-Arten stieg. Bei der Sorte Tommi wurden in Mischproben mit unbehandelten Körnern die höchsten Befallshäufigkeiten zwischen 70 und 96 % ermittelt, dabei wurden fünf Arten als Erreger der partiellen Taubährrigkeit identifiziert. Die Mischbeprobungen von Drifter und Dekan lagen in etwa auf einem Niveau um 12 und 46 % unter dem Befall von Tommi. Dieser Unterschied wurde zwischen den Sorten Drifter und Tommi in den

unbehandelten Varianten statistisch abgesichert (Abb. 5). Die geringste Häufigkeit befallener Körner war in behandelten Proben mit geringer N-Gabe zu finden. Hier wurde der Befall mit *Fusarium* spp. bei allen Sorten durch zwei Arten verursacht. Ein Einfluss von Stickstoff wurde nur bei der Sorte Tommi statistisch bestätigt. In unbehandelten Proben führte eine gesteigerte N-Gabe zu einer Verringerung des Auftretens von *F. graminearum*, wohingegen in behandelten Proben das Auftreten von *F. avenaceum* durch die erhöhte Stickstoffgabe gefördert wurde (Tab. 12). Die Fungizidapplikation hatte nur in Proben mit niedriger Stickstoffgabe einen statistisch belegbaren Einfluss. Der *Fusarium*-Gesamtbefall wurde bei den Sorten Dekan und Tommi signifikant verringert. Die Bekämpfung einzelner Arten war an Körnern der Sorten Drifter und Dekan für *F. poae* sowie an denen der Sorte Tommi für *F. avenaceum* signifikant. Die hohen Standardabweichungen zeigten bei allen Sorten innerhalb der Mischproben eine große Variabilität der Häufigkeit und des Spektrums von *Fusarium* spp.

Tab. 12: Abhängigkeit der Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. in Weizenkörnern aus Mischproben von Stickstoffgaben und Fungizidapplikation (Klein-Altendorf; 2008)

Sorte	Einfluss		FSPP	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
Drifter	F	150 kg N	0,146	1,000	0,375	0,046*	1,000	0,317
		225 kg N	0,243	0,741	0,245	0,127	1,000	0,317
	N	ohne Fungizid	0,309	0,317	0,309	0,134	1,000	1,000
		Fungizid	0,189	0,131	0,144	1,000	1,000	0,850
Dekan	F	150 kg N	0,021*	0,321	0,059	0,047*	1,000	1,000
		225 kg N	1,000	0,129	0,766	0,317	1,000	0,752
	N	ohne Fungizid	0,083	0,881	0,083	0,166	1,000	0,131
		Fungizid	0,554	0,850	1,000	1,000	1,000	0,127
Tommi	F	150 kg N	0,020*	0,046*	0,248	0,131	0,131	0,297
		225 kg N	0,191	0,760	0,559	0,850	0,131	0,442
	N	ohne Fungizid	0,189	0,369	0,021*	0,741	0,538	0,243
		Fungizid	0,663	0,040*	0,381	0,317	1,000	0,439

Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig: * $p \leq 0,05$; ** $p \leq 0,01$; *** $p \leq 0,001$; N = Stickstoff; F = Fungizid

Statistische Bewertung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Bei Betrachtung der **Dispersionsindizes** war die Verteilung der *Fusarium*-Befallshäufigkeiten in allen Mischproben der unterschiedlichen Stickstoff- und Fungizid-Kombinationen variabel, die VMR-Werte lagen zwischen 0,03 und 19,00 (Tab. 13). Die geringste Variabilität wurde für die Verteilung des *Fusarium*-Gesamtbefalls an unbehandelten Körnern mit geringer N-Gabe der Sorte Tommi ermittelt. Hier lag der durchschnittliche Befall der vier untersuchten Proben bei 96 %. In sechs Fällen wiesen die Dispersionsindizes auf eine mittlere Variabilität der Verteilung hin. Für alle anderen Proben wurde eine hohe Variabilität der Verteilung ausgewiesen.

Tab. 13: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. in Mischproben der Sorten Drifter, Dekan und Tommi bei unterschiedlicher Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (Klein-Altendorf; 2008)

Variante	Sorte		FSPP	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
-N-F	Drifter	MW ¹	11,5 ± 8,2	-	9,25 ± 7,72	2,3 ± 2,06	-	-
		VMR ²	5,88	-	6,44	1,89	-	-
	Dekan	MW	18,3 ± 8,81	2,8 ± 3,4	12,5 ± 7,6	3,0 ± 3,56	-	-
		VMR	4,25	4,21	4,61	4,22	-	-
	Tommi	MW	28,8 ± 0,96	8,8 ± 9,5	14,3 ± 4,43	1,0 ± 1,4	0,8 ± 1,0	4,0 ± 3,7
		VMR	0,03	10,39	1,37	2,00	1,22	3,33
-N+F	Drifter	MW	6,3 ± 7,2	-	6,0 ± 7,35	-	-	0,25 ± 0,5
		VMR	8,25	-	9,00	-	-	1,00
	Dekan	MW	4,0 ± 3,9	0,3 ± 0,5	3,8 ± 3,5	-	-	-
		VMR	3,83	1,00	3,27	-	-	-
	Tommi	MW	9,3 ± 9,1	-	8,0 ± 8,4	-	-	1,3 ± 1,0
		VMR	8,96	-	8,75	-	-	0,73
+N-F	Drifter	MW	6,5 ± 5,8	1,8 ± 3,5	4,3 ± 2,2	0,5 ± 0,6	-	-
		VMR	5,18	7,00	1,16	0,67	-	-
	Dekan	MW	7,3 ± 8,0	1,8 ± 1,5	4,3 ± 4,8	0,5 ± 1,0	-	0,75 ± 0,96
		VMR	8,86	1,29	5,39	2,00	-	1,22
	Tommi	MW	21,0 ± 7,1	3,5 ± 4,0	4,5 ± 3,7	2,3 ± 4,5	2,8 ± 3,2	8,0 ± 6,2
		VMR	2,38	4,67	3,04	9,00	3,73	4,75
+N+F	Drifter	MW	4,5 ± 7,1	1,0 ± 1,41	2,8 ± 4,2	-	-	0,8 ± 1,5
		VMR	11,04	2,00	6,39	-	-	3,00
	Dekan	MW	5,3 ± 4,0	0,8 ± 1,5	3,5 ± 1,7	-	-	1,0 ± 1,2
		VMR	2,97	3,00	0,86	-	-	1,33
	Tommi	MW	13,0 ± 12,0	2,3 ± 1,5	5,8 ± 9,5	0,3 ± 0,5	-	4,8 ± 9,5
		VMR	11,13	1,00	15,81	1,00	-	19,00

¹ MW (befallene Körner absolut) ± SD; ² Varianz-Mittelwert-Verhältnis; - N = 150 kg N/ha; + N = 225 kg N/ha; F = keine Fungizidbehandlung; F= Fungizidbehandlung; VMR-Maximum und -Minimum sind hervorgehoben

3.2 Variabilität der Belastung von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. in Rasterproben

Die Ergebnisse der Mischbeprobung zeigten, dass innerhalb der Proben eine große Variabilität des *Fusarium*-Artenspektrums und der Häufigkeit befallener Körner vorlag. Die Untersuchung von Proben einer kleineren Skalenebene sollte Aufschluss darüber geben, ob diese große Variabilität von *Fusarium* spp. auch im kleinräumigen Bereich auftritt. Dazu wurden in den Jahren 2007 und 2008 an drei Standorten Kornproben von unterschiedlichen Weizensorten auf einer Fläche von 1 x 1 m in einem Raster von 20 x 20 cm gezogen und hinsichtlich des Artenspektrums und der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. untersucht. Für die Rasterproben aus dem Jahr 2007 wurde zusätzlich die Intensität des Kornbefalls mit *Fusarium* spp. und die Mykotoxinbelastung von Körnern erfasst. Des Weiteren wurde für die Proben aus dem Jahr 2008 der Einfluss von Düngung und Fungizidbehandlung auf das Auftreten von *Fusarium* spp. analysiert. Die einzelnen Standorte, an denen Rasterbeprobungen durchgeführt wurden, unterschieden sich hinsichtlich ihrer Anbauintensität und den ackerbaulichen Produktionsverfahren.

3.2.1 Einfluss von Düngung und Fungizidbehandlung auf das kleinräumige Auftreten von *Fusarium*-Arten

Am Standort Klein-Altendorf wurde je eine Rasterbeprobung in einem Schlag der Sorte Tommi mit verschiedenen Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen durchgeführt. Die Abbildungen 6 bis 13 zeigen die räumliche Verteilung des *Fusarium*-Befalls auf den 1 x 1 m Beprobungsflächen. Dargestellt ist jeweils die Häufigkeit des Befalls von Weizenkörnern mit *Fusarium* spp. auf den 25 Teilflächen.

Geringe Stickstoffdüngung, ohne Fungizidbehandlung

Auf der Beprobungsfläche mit niedriger Stickstoffgabe und ohne Fungizidapplikation traten die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* auf (Abb. 6). Die durchschnittliche Befallshäufigkeit von Körnern mit *Fusarium* spp. war auf dieser Fläche mit 55,9 % am höchsten. Es wurde auf allen Teilflächen ein Befall mit *Fusarium* spp. nachgewiesen. Mit einer mittleren Häufigkeit von 32,6 % infizierter Körner war *F. graminearum* die dominante Art und trat auf allen Teilflächen auf. Mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 17,0 % wurde *F. avenaceum* von Körnern aus 24 Rasterproben isoliert. Im Durchschnitt wurde an 2,7 % aller untersuchten Körner *F. poae* nachgewiesen. Diese Art trat in zehn Proben auf. Ein Befall mit *F. tricinctum* lag im Mittel bei 3,3 % und wurde an Körnern von 13 Teilflächen detektiert. Die durchschnittliche Befallshäufigkeit von *F. culmorum* fiel mit 0,3 % gering aus. *F. culmorum* wurde in fünf Proben nachgewiesen.

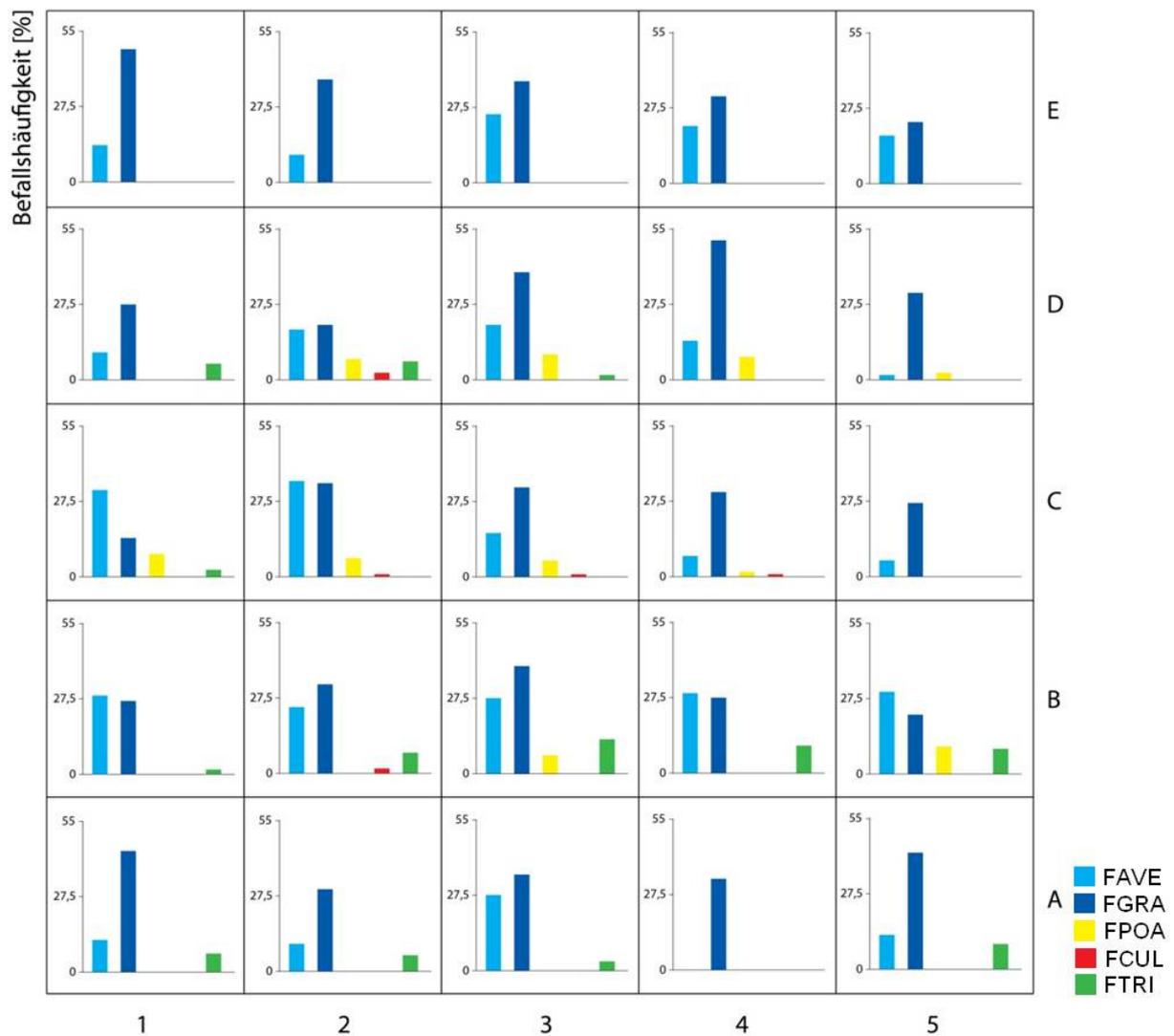


Abb. 6: Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Weizenkörner in Rasterproben bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Die Verteilung von *Fusarium* spp. war mit einem **Dispersionsindex** von 4,83 variabel (Tab. 14). Die Arten *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. tricinctum* wiesen in diesen Rasterproben die höchsten Dispersionsindizes (> 6) auf, was auf eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte hinwies. Die VMR-Werte von *F. graminearum* und *F. culmorum* waren im Verhältnis kleiner und wiesen auf eine mittlere Variabilität hin.

Tab. 14: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. bei 150 kg N/ha, ohne Fungizidapplikation; (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

	FSPP	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
MW ¹	67,0 ± 18,0	20,4 ± 11,7	39,1 ± 10,4	3,2 ± 4,5	0,3 ± 0,7	4,0 ± 4,9
VMR ²	4,83	6,70	2,74	6,25	1,75	6,06

¹ MW (befallene Körner absolut) ± SD; ² Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Die Befallshäufigkeit von Körnern mit *Fusarium* spp. variierte auf den Teilflächen zwischen 32,5 und 86,7 %. Es wurden keine Cluster ausgewiesen und mit einem **Aggregationsindex** von 0,910 ließ sich die räumliche Verteilung von *Fusarium* spp. nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden (Abb. 7). Die Häufigkeit mit *F. avenaceum* befallener Körner lag zwischen 0 und 25,0 %. Es wurden keine Cluster ausgewiesen und die räumliche Verteilung dieser Art wurde mit einem Aggregationsindex von 0,953 als zufallsähnlich charakterisiert. Der Anteil infizierter Körner mit *F. graminearum* variierte zwischen 14,2 und 50,8 %. Hier wurden ebenfalls keine Cluster ausgewiesen, doch mit einem Aggregationsindex von 0,845 lag eine Tendenz zur Gleichverteilung vor. Eine Infektion mit *F. poae* lag auf den 25 Teilflächen zwischen 0 und 10 %. Es wurden ein Patch-Cluster im Bereich der höheren Befallshäufigkeiten und drei Gap-Cluster in Bereichen mit geringem bzw. keinem Befall ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,906 ließ sich die räumliche Verteilung dieser Art jedoch nicht von einer zufälligen Verteilung unterscheiden. Die Aggregationsanalyse ergab für *F. culmorum* einen Index von 0,948, was trotz eines schwach ausgewiesenen Patch-Clusters im mittleren Bereich auf eine zufällige Verteilung schließen ließ. Die Befallshäufigkeit dieser Art variierte zwischen 0 und 2,5 %. Die Häufigkeit mit *F. tricinctum* befallener Körner lag zwischen 0 % und 13,3 %. Es wurden ein Patch-Cluster und ein Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,362 zeigte eine Aggregation, die sich statistisch absichern ließ.

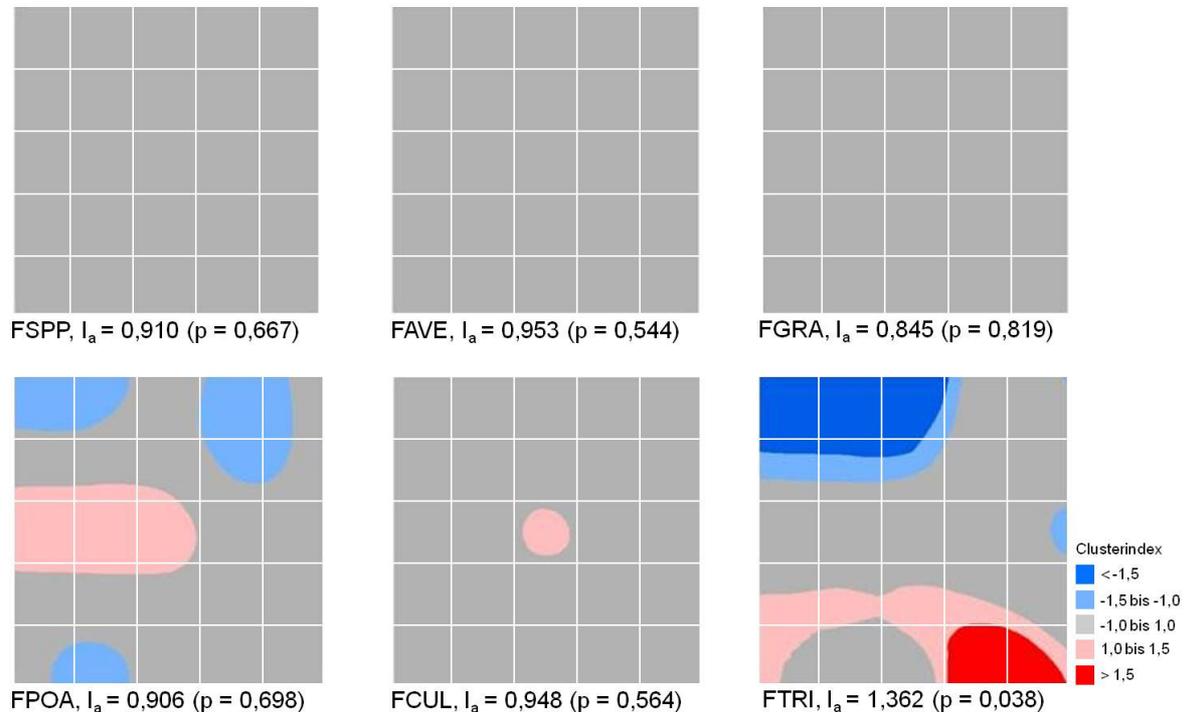


Abb. 7: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen *Fusarium*-Arten bei 150 kg N/ha und ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Geringe Stickstoffdüngung, mit Fungizidbehandlung

Auf den Teilflächen dieser Behandlung wurden mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae* und *F. tricinctum* vier *Fusarium*-Arten isoliert. Die Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. lag im Durchschnitt bei 11,7 % (Abb. 8). In einer Rasterprobe wurde kein *Fusarium*-Befall nachgewiesen. *Fusarium graminearum* war mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 9,9 % die dominante Art und wurde auf 22 Teilflächen detektiert. Die mittlere Häufigkeit befallener Körner mit *F. avenaceum* entsprach 1,1 %. Diese Art wurde von Körnern aus neun Rasterproben isoliert. Auf elf Teilflächen wurde *F. tricinctum* mit einer mittleren Befallshäufigkeit von 3,3 % nachgewiesen. Die Art *F. poae* wurde von Körnern einer Rasterprobe isoliert.

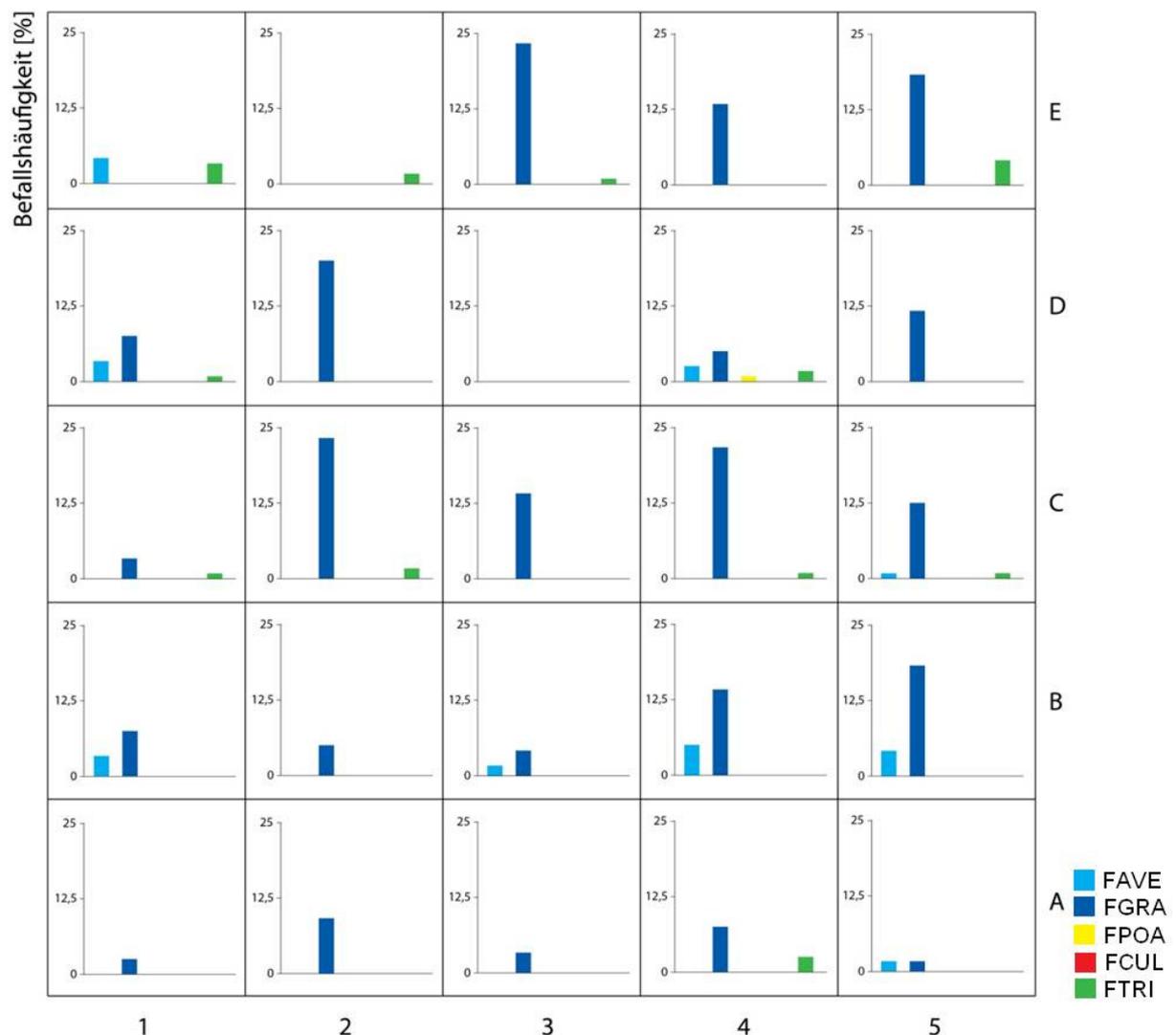


Abb. 8: Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Weizenkörner in Rasterproben bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Die Verteilung des *Fusarium*-Befalls war mit einem **Dispersionsindex** von 6,16 sehr variabel (Tab. 15). Mit dem höchsten VMR-Wert lag eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte für die dominante Art *F. graminearum* vor. Für die Arten *F. avenaceum* und *F. tricinctum* war das jeweils errechnete Verhältnis von Varianz zum Mittelwert niedriger, dennoch war auch ihre Verteilung variabel.

Tab. 15: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. bei 150 kg N/ha und Fungizidapplikation; (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

	FSPP	FAVE	FGRA	FTRI
MW ¹	14,1 ± 9,3	1,3 ± 2,0	11,9 ± 9,2	0,9 ± 1,4
VM ²	6,16	3,09	7,09	2,08

¹MW (befallener Körner absolut) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Auf dieser Beprobungsfläche lag die Befallshäufigkeit aller untersuchten Körner mit *Fusarium* spp. zwischen 0 und 25,0 %. Es wurden ein Gap- und vier Patch-Cluster ausgewiesen, doch der **Aggregationsindex** von 1,096 wies auf eine zufällige Verteilung hin (Abb. 9). Der Befall mit *F. avenaceum* variierte zwischen 0 und 5,0 %. Es wurde oben rechts ein kleines Gap-Cluster ausgewiesen. Die räumliche Verteilung war mit einem Aggregationsindex von 0,998 statistisch nicht von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden. Die Befallshäufigkeit mit *F. graminearum* variierte auf den Teilflächen zwischen 0 % und 23,3 %. Es wurde oben links ein Gap-Cluster ausgewiesen und am mittleren rechten Rand ein Patch-Cluster. Mit einem Aggregationsindex von 1,073 zeigte sich eine zufällige Verteilung dieser Art. Infizierte Körner mit *F. poae* wurden auf einer Teilfläche nachgewiesen, eine Aggregationsanalyse wurde nicht durchgeführt. *F. tricinctum* wies eine geringe Befallshäufigkeit auf. Sie variierte zwischen 0 und 3,3 %. Es wurde unten links ein Gap-Cluster und oben links ein Patch-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,272 zeigte eine Tendenz zur Aggregation für die Verteilung dieser Art.

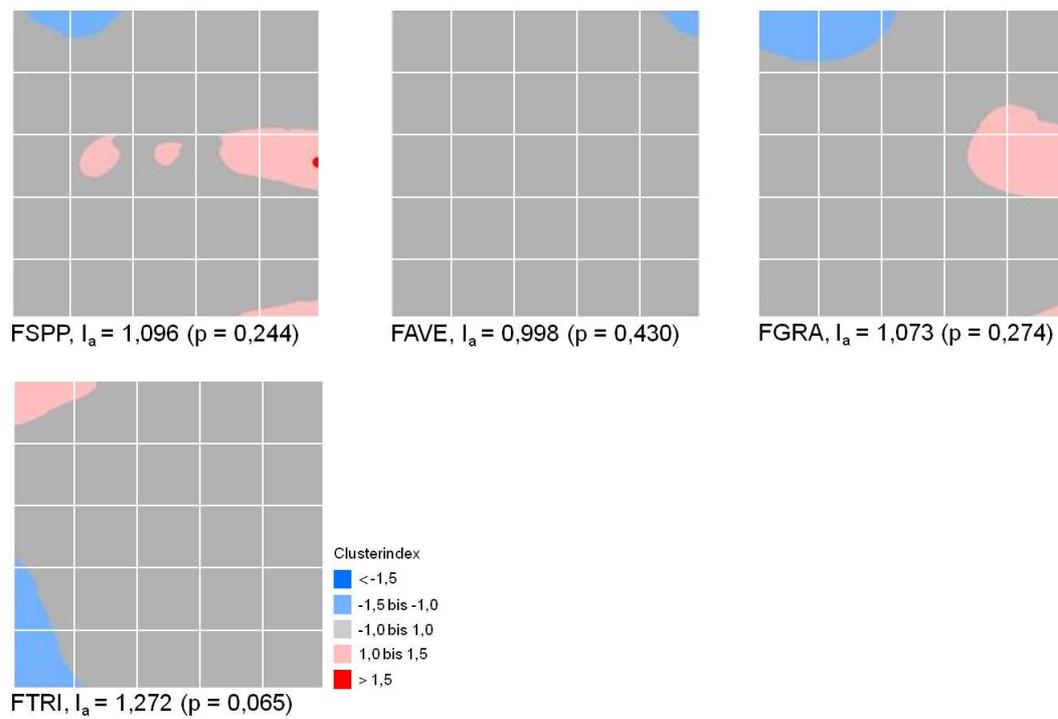


Abb. 9: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen *Fusarium*-Arten bei 150 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf, 2008)

Hohe Stickstoffdüngung, ohne Fungizidbehandlung

In den Rasterproben dieser Behandlung wurden die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* von Weizenkörnern isoliert (Abb. 10). Die durchschnittliche Befallshäufigkeit lag bei 34,2 %. Die dominante Art *F. graminearum* trat in 24 Rasterproben mit einer mittleren Häufigkeit von 16,7 % befallener Körner auf. Ein mittlerer Befall von 9,6 % der Körner mit *F. tricinctum* wurde auf 19 Teilflächen detektiert. *Fusarium avenaceum* wurde mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 5,1 % von Körnern auf 14 Teilflächen isoliert. Der Befall mit *F. poae* lag im Mittel bei 1,9 % und trat in 15 Rasterproben auf. Die Häufigkeit befallener Körner mit *F. culmorum* lag im Durchschnitt bei 1,0 %. Diese Art wurde auf vier Teilflächen nachgewiesen.

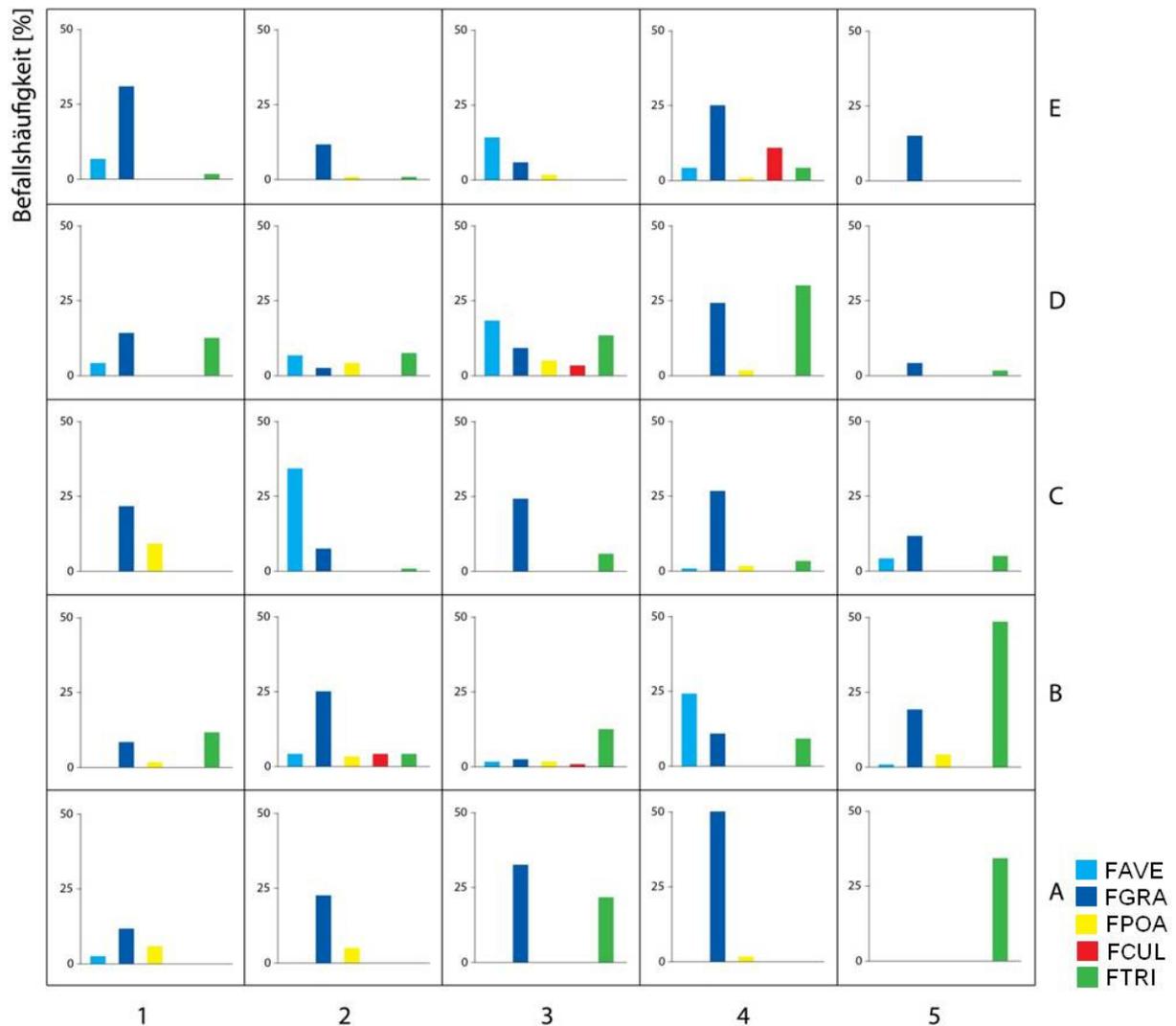


Abb. 10: Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Weizenkörner bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Der **Dispersionsindex** von 6,81 wies darauf hin, dass die Verteilung von *Fusarium* spp. variabel war (Tab. 16). Die höchsten Dispersionsindizes wurden für *F. avenaceum* und *F. tricinctum* ermittelt, hier lag bei beiden Arten eine hohe Variabilität der Verteilung vor. Auch bei *F. poae*, *F. culmorum* und *F. graminearum* war das Varianz-Mittelwert-Verhältnis > 1 und die Verteilung dieser Arten variabel.

Tab. 16: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung, ohne Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

	FSP	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
MW ¹	41,1 ± 16,7	6,1 ± 10,4	20,0 ± 14,0	2,3 ± 2,9	1,2 ± 2,9	11,5 ± 14,7
VMR ²	6,81	17,9	9,78	3,58	7,08	18,9

¹ MW (befallene Körner absolut) ± SD; ² Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Auf der 1 x 1 m großen Beprobungsfläche variierte die *Fusarium* spp.-Befallshäufigkeit zwischen 13,3 und 72,5 %. Höhere Befallshäufigkeiten wurden im unteren rechten Teil detektiert, hier wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen und der **Aggregationsindex** von 1,458 wies auf eine starke Aggregation hin, die statistisch hoch signifikant war (Abb. 11). Die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* variierte auf den 25 untersuchten Teilflächen zwischen 0 und 34,2 %. Es wurden keine Cluster ausgewiesen und der Aggregationsindex von 0,821 wies auf eine Gleichverteilung hin. Der Anteil *F. graminearum* infizierter Körner variierte zwischen 0 und 50,0 %. Auch für die Verteilung dieser Art wurden keine Cluster ausgewiesen und bei einem Aggregationsindex von 0,868 war die räumliche Anordnung der Befallshäufigkeit dieser Art regelmäßiger als dies von einer zufällig verteilten Gesamtprobe erwartet würde. Der Anteil mit *F. poae* infizierter Körner variierte auf den Teilflächen zwischen 0 und 9,2 %. Im oberen rechten Teil der Beprobungsfläche wurde ein schwaches Gap-Cluster ausgewiesen, hier wurde kein *F. poae* von Körnern isoliert. Mit einem Aggregationsindex von 1,249 zeigte sich eine Tendenz zur Aggregation. Die Befallshäufigkeit von *F. culmorum* variierte auf der untersuchten Fläche zwischen 0 und 10,8 %. Es wurden zwei schwache Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,057 ähnelte die räumliche Verteilung einer zufälligen Verteilung und ließ sich von dieser statistisch nicht unterscheiden. Die Häufigkeit mit *F. tricinctum* befallener Körner variierte auf den Teilflächen zwischen 0 und 48,3 %. Auf der linken Hälfte des Probenrasters wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen, hier war eine Anhäufung geringer Befallshäufigkeiten zu beobachten. Der Aggregationsindex von 1,385 zeigte eine Aggregation, die sich statistisch bestätigen ließ.

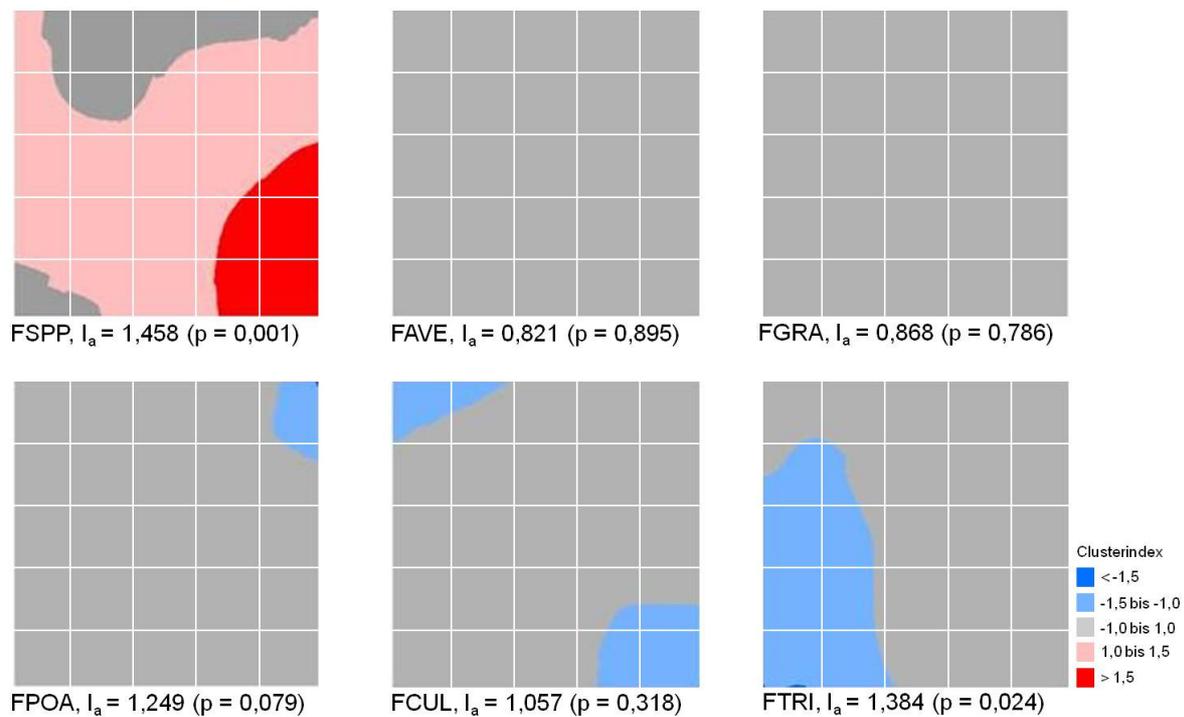


Abb. 11: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen *Fusarium*-Arten bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und ohne Fungizidbehandlung (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Hohe Stickstoffdüngung, mit Fungizidbehandlung

Die Rasterbeprobung der 1 x 1 m großen Untersuchungsfläche mit hoher Stickstoffgabe und Fungizidapplikation ergab einen Befall der Weizenkörner mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* (Abb. 12). Mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 17,7 % wurde auf 23 Teilflächen *Fusarium* spp. nachgewiesen. Die dominante Art *F. graminearum* trat in 18 Rasterproben auf und wies eine mittlere Befallshäufigkeit von 11,2 % auf. Mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 3,3 % wurde *F. tricinctum* von Körnern auf neun Teilflächen isoliert. Die Häufigkeit mit *F. avenaceum* befallener Körner lag im Mittel bei 2,6 % und wurde auf zehn Teilflächen nachgewiesen. Der Anteil mit *F. culmorum* infizierter Körner war mit 0,5 % im Durchschnitt gering. Diese Art wurde in vier Rasterproben nachgewiesen.

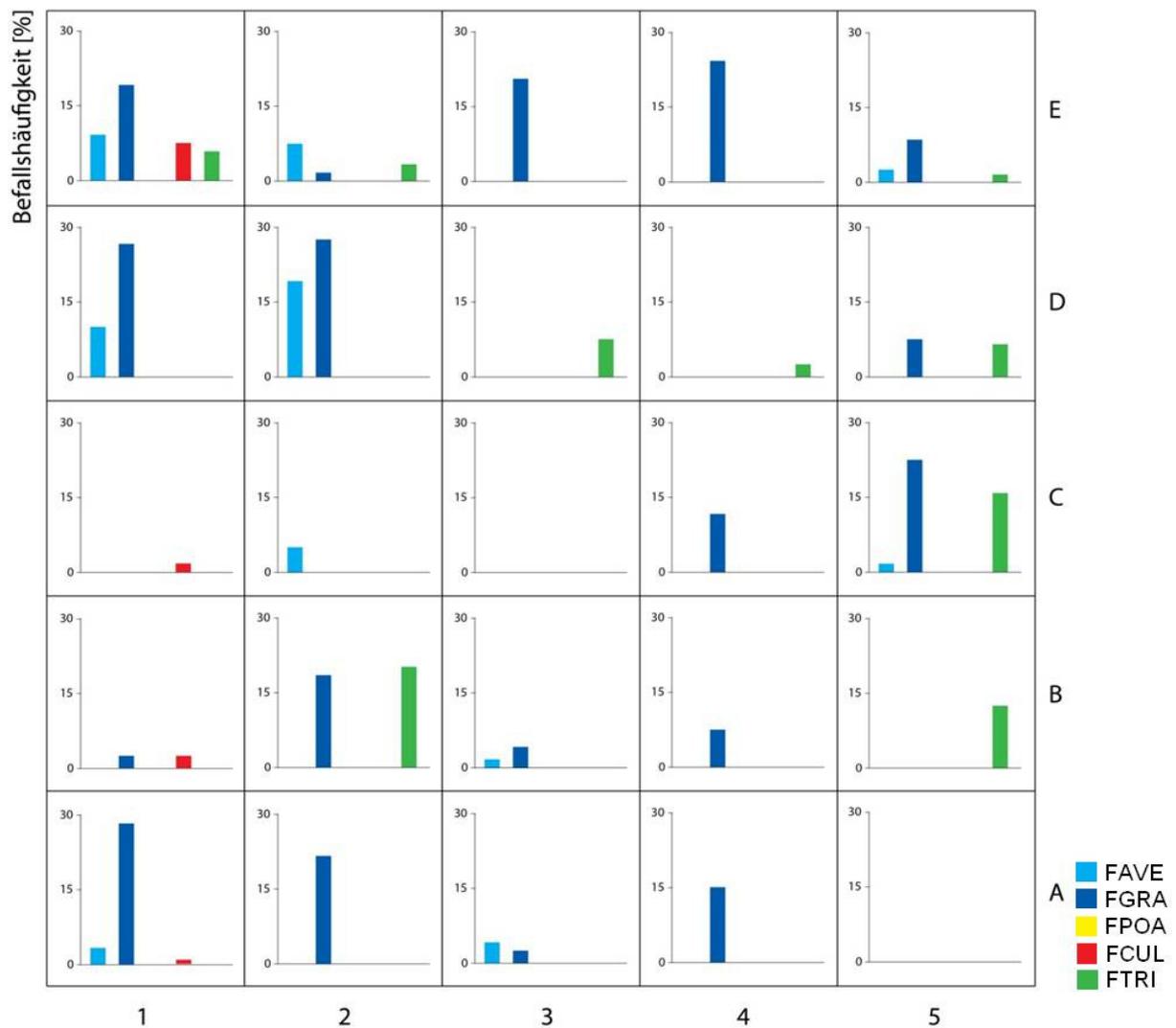


Abb. 12: Räumliche Verteilung der Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Weizenkörner bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidbehandlung (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Bei dieser Rasterbeprobung wurde der höchste **Dispersionsindex** für die Verteilung von *Fusarium* spp. errechnet (Tab. 17). Mit 14,1 lag eine hohe Variabilität der Verteilung von *Fusarium* spp. vor. Die beiden häufigsten Arten *F. graminearum* und *F. tricinctum* wiesen hohe VMR-Werte auf. Mit 5,97 lag für *F. culmorum* zwar der niedrigste Dispersionsindex vor, dennoch wies das Varianz-Mittelwert-Verhältnis auf eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte hin.

Tab. 17: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

	FSPP	FAVE	FGRA	FCUL	FTRI
MW ¹	21,3 ± 17,3	3,2 ± 5,5	13,5 ± 12,5	0,6 ± 1,9	4,0 ± 6,8
VMR ²	14,1	9,7	11,7	5,97	11,8

¹MW (befallene Körner absolut) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Auf der Beprobungsfläche mit Fungizidbehandlung und hoher Stickstoffgabe variierte die Häufigkeit befallener Körner mit *Fusarium* spp. auf den 25 Teilflächen zwischen 0 und 46,7 %. Die Analyse der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit von *Fusarium* spp. ergab einen **Aggregationsindex** von 1,592 und zeigte hoch signifikante Aggregationen. Im oberen linken Bereich wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen (Abb. 13). Die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* variierte zwischen 0 und 19,2 % infizierter Körner. Im oberen linken Bereich wurde ein Patch-Cluster, im unteren Bereich ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,409 konnten diese Aggregationen statistisch abgesichert werden. Die Häufigkeit des Befalls mit *F. graminearum* variierte zwischen 0 und 28,3 %. Im unteren linken Bereich wurde ein kleines Patch-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 0,961 war die räumliche Verteilung von *F. graminearum* jedoch zufallsähnlich. Die Befallshäufigkeit von *F. culmorum* variierte auf den Teilflächen zwischen 0 und 7,5 %. Auf der rechten Hälfte der Beprobungsfläche wurde *F. culmorum* nicht detektiert, hier wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen. Auf der linken Hälfte der 1 x 1 m großen Fläche wurde ein kleines Patch-Cluster ausgewiesen, es wurde bei einem Aggregationsindex von 1,345 eine starke Aggregation beobachtet, die statistisch signifikant war. Der Anteil infizierter Körner mit *F. tricinctum* variierte auf der gesamten Fläche zwischen 0 und 20 %. Es wurden drei schwache Gap-Cluster ausgewiesen. Die räumliche Verteilung war mit einem Aggregationsindex von 0,903 nicht von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden.

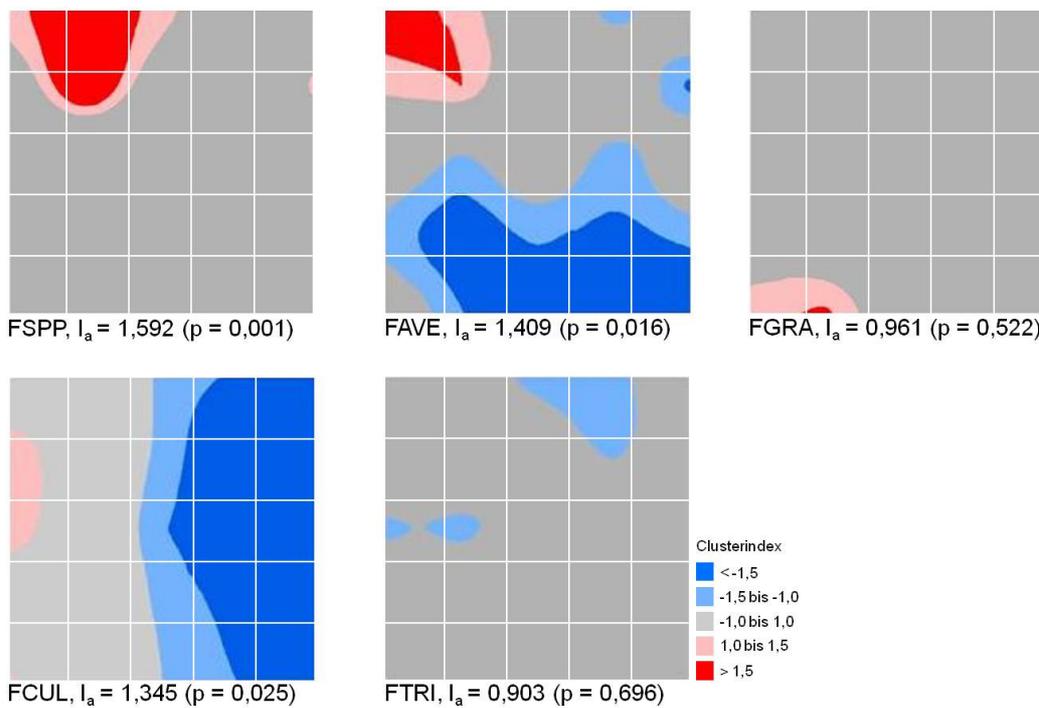


Abb. 13: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeit mit verschiedenen *Fusarium*-Arten bei 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und Fungizidapplikation (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Gegenüberstellung der Anbauintensitäten

In den Rasterproben von Weizenpflanzen ohne Fungizidbehandlung wurden mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* fünf Arten nachgewiesen (Abb. 14). Mit 55,9 % infizierter Körner lag in Proben von Weizenpflanzen mit niedriger Stickstoffgabe und ohne Fungizidapplikation die höchste Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. vor. Die zweithöchste Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Körner von 34,3 % wurde in Proben mit 225 kg N/ha Stickstoffdüngung und ohne Fungizidbehandlung nachgewiesen. In beiden Rasterbeprobungen von Weizenpflanzen ohne Fungizidbehandlung war *F. graminearum* die dominierende Art, gefolgt von *F. avenaceum*, *F. tricinctum*, *F. poae* und *F. culmorum*. Die Rasterproben der behandelten Pflanzen wiesen jeweils vier *Fusarium*-Arten auf. Die Häufigkeit des Befalls mit *Fusarium* spp. war im Vergleich zu den Varianten ohne Fungizidapplikation wesentlich geringer und ergab bei der Untersuchung von Weizenkörnern mit niedriger Stickstoffgabe 11,8 % und mit erhöhter Stickstoffversorgung 17,7 %. *Fusarium graminearum* war sowohl in Kornproben mit niedriger Stickstoffgabe als auch in denen mit erhöhter Stickstoffgabe die dominierende Art. In Kornproben der Variante mit 150 kg N/ha konnten zusätzlich die Arten *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. tricinctum* nachgewiesen werden. Weizenkörner der Variante mit 225 kg N/ha wiesen Infektionen mit *F. avenaceum*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* auf. *Fusarium avenaceum* wurde auf allen vier Beprobungsflächen von Körnern isoliert. Die Befallshäufigkeit variierte zwischen 1,1 und 17,0 %.

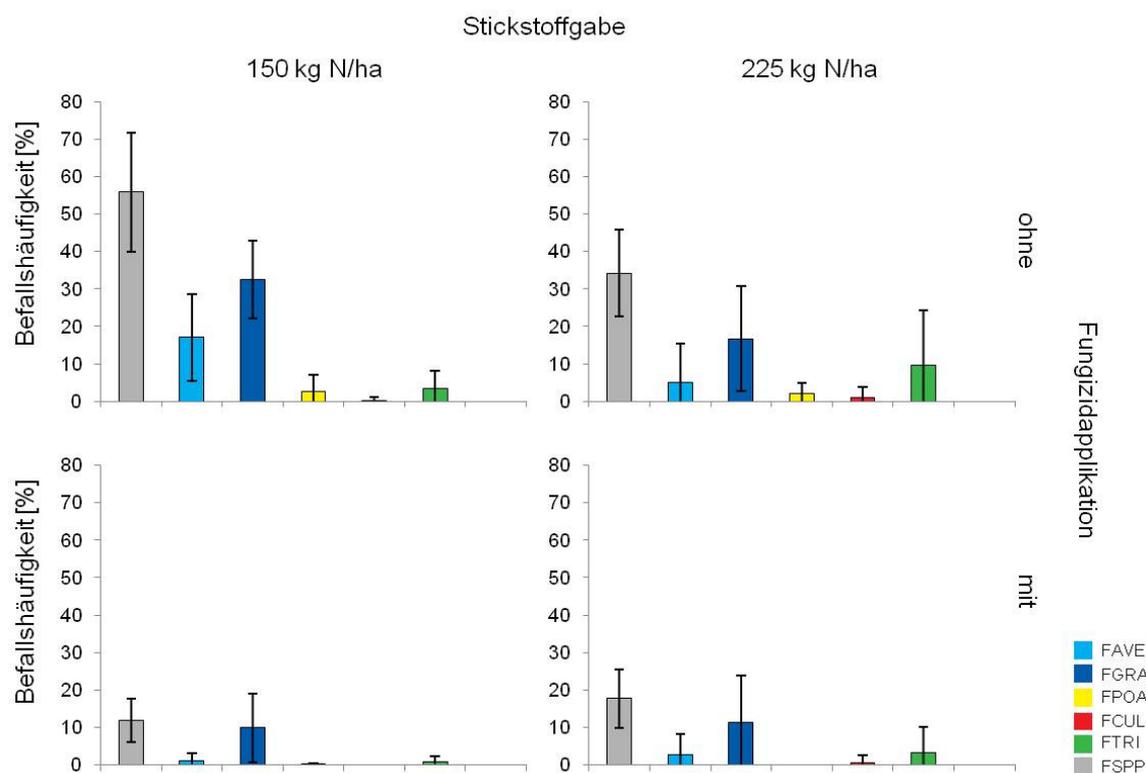


Abb. 14: Häufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Körner in Rasterproben mit unterschiedlichen Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008), n = 4; die Standardabweichung ist dargestellt

In Proben mit geringer Stickstoffgabe wurde durch eine Fungizidapplikation der Gesamtbefall und das Auftreten der Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae* und *F. culmorum* signifikant verringert (Tab. 18). Im Falle einer erhöhten Stickstoffgabe hatte die Behandlung der Körner einen signifikanten Einfluss auf den Gesamtbefall und die Arten *F. poae* und *F. tricinctum*. In den unbehandelten Proben führte eine erhöhte N-Gabe zu signifikanten Reduktionen des Gesamtbefalls sowie der dominierenden Arten *F. avenaceum* und *F. graminearum*, entgegen der Befallshäufigkeit von *F. tricinctum*, die signifikant erhöht wurde. Eine gesteigerte N-Gabe in behandelten Proben förderte das Auftreten von *F. culmorum*.

Tab. 18: Abhängigkeit der *Fusarium*-Befallshäufigkeit von Fungizidapplikation und Stickstoffgaben (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

Einfluss		FSPP	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
F	150 kg N	0,000***	0,000***	0,000***	0,002**	0,020*	0,080
	225 kg N	0,000***	0,305	0,089	0,000***	0,437	0,008**
N	kein Fungizid	0,000***	0,000***	0,000***	0,811	0,547	0,039*
	Fungizid	0,248	0,436	0,922	0,317	0,039*	0,661

Mann-Whitney-U-Test, zweiseitig: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001; N = Stickstoff; F = Fungizid

Zur Erklärung des Auftretens einzelner *Fusarium*-Arten wurden die zwei Faktoren Stickstoffgabe (N) und Fungizidapplikation (F) in einer zweifaktoriellen ANOVA berücksichtigt. Die Ergebnisse des Rangsummentests (vgl. Tab. 18) für den isolierten Einfluss jedes Faktors wurden durch die Varianzanalyse bestätigt. Der Einfluss von Stickstoffgabe und Fungizidapplikation auf das Auftreten von *F. avenaceum* wurde statistisch belegt und auch der kombinierte Einfluss beider Faktoren auf das Auftreten dieser Art war hoch signifikant (Tab. 19). Das Auftreten von *F. graminearum* wurde sowohl hoch signifikant von N und F als isolierte Faktoren beeinflusst als auch durch die Kombination. Ein kombinierter Einfluss von N und F auf die Variablen *F. poae*, *F. culmorum* und *F. tricinctum* war statistisch nicht signifikant. Der Effekt von N und F war allein und kombiniert hoch signifikant für das Auftreten von *Fusarium* spp.

Tab. 19: Einfluss von Stickstoffgaben und Fungizidbehandlung auf die *Fusarium*-Befallshäufigkeit von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008)

		SQ	FG	MQ	F-Wert	p
FSPP	komb.	35351	2	17675	71,46	0,000 ^{***}
	N	2227	1	2227	9,0	0,003 ^{**}
	F	33124	1	33124	133	0,000 ^{***}
	N*F	6822	1	6822	27,6	0,000^{***}
FAVE	komb.	4020	2	2010	28,7	0,000 ^{***}
	N	973	1	973	13,9	0,000 ^{***}
	F	3047	1	3047	43,5	0,000 ^{***}
	N*F	1648	1	1648	23,5	0,000^{***}
FGRA	komb.	9016	2	4508	33,1	0,000 ^{***}
	N	1909	1	1909	14,0	0,000 ^{***}
	F	7106	1	7106	52,2	0,000 ^{***}
	N*F	2672	1	2672	19,6	0,000^{***}
FPOA	komb.	192	2	96	13,6	0,000 ^{***}
	N	5,29	1	5,29	0,74	0,390
	F	187	1	187	26,5	0,000 ^{***}
	N*F	4,41	1	4,41	0,62	0,432
FCUL	komb.	18,9	2	9,49	3,0	0,054
	N	13,6	1	13,6	4,3	0,040 [*]
	F	5,29	1	5,29	1,7	0,199
	N*F	0,49	1	0,49	0,15	0,695
FTRI	komb.	1393	2	696	9,62	0,000 ^{***}
	N	691	1	691	9,54	0,003 ^{**}
	F	702	1	702	9,69	0,002 ^{**}
	N*F	123	1	123	1,70	0,195

ANOVA, zweifaktoriell; SQ = Summe der Quadrate; FG = Freiheitsgrade; MQ = Mittel der Quadrate; N = Stickstoff; F = Fungizid; p = Irrtumswahrscheinlichkeit: * p ≤ 0,05; ** p ≤ 0,01; *** p ≤ 0,001

Gegenüberstellung von Misch- und Rasterproben der Sorte Tommi

Der *Fusarium*-Gesamtbefall lag in Mischproben durchschnittlich um 30,74 % (SD 8,6) höher als in Rasterproben. In vier Fällen trat an Körnern aus Rasterproben ein höherer Befall durch einzelne *Fusarium*-Arten auf, sonst war das Befallsniveau aller Arten in Mischproben höher (Abb. 15). Der aus den Mischproben hervorgehende geringe Einfluss der N-Gaben auf den Gesamtbefall konnte in Rasterproben nur in Kombination mit einer Behandlung der Körner belegt werden. Im Gegensatz dazu wurde der Einfluss unterschiedlicher Stickstoffgaben bei unbehandelten Körnern sowohl auf den Gesamtbefall als auch auf drei einzelne Arten statistisch nachgewiesen. Die Fungizid-Behandlung hatte in Kombination mit verringerter Stickstoffgabe in beiden Beprobungen einen Einfluss auf den Gesamtbefall mit *Fusarium* spp. und *F. avenaceum*. In den Rasterproben wurde statistisch belegt, dass das Auftreten von drei weiteren Arten durch die Applikation von Fungiziden beeinflusst wurde (Tab. 18). Sowohl in Misch- als auch in Rasterproben ging mit sinkender Anzahl *Fusarium* befallener Körner eine Reduktion des Artenspektrums einher. Beide Beprobungsarten wiesen bei niedriger Stickstoffgabe und Fungizidverzicht die größte Befallshäufigkeit auf. Im Gegensatz dazu trat bei niedriger N-Gabe und einer Fungizidapplikation der geringste Anteil mit *Fusarium* spp. infizierter Körner in beiden Probenahmen auf.

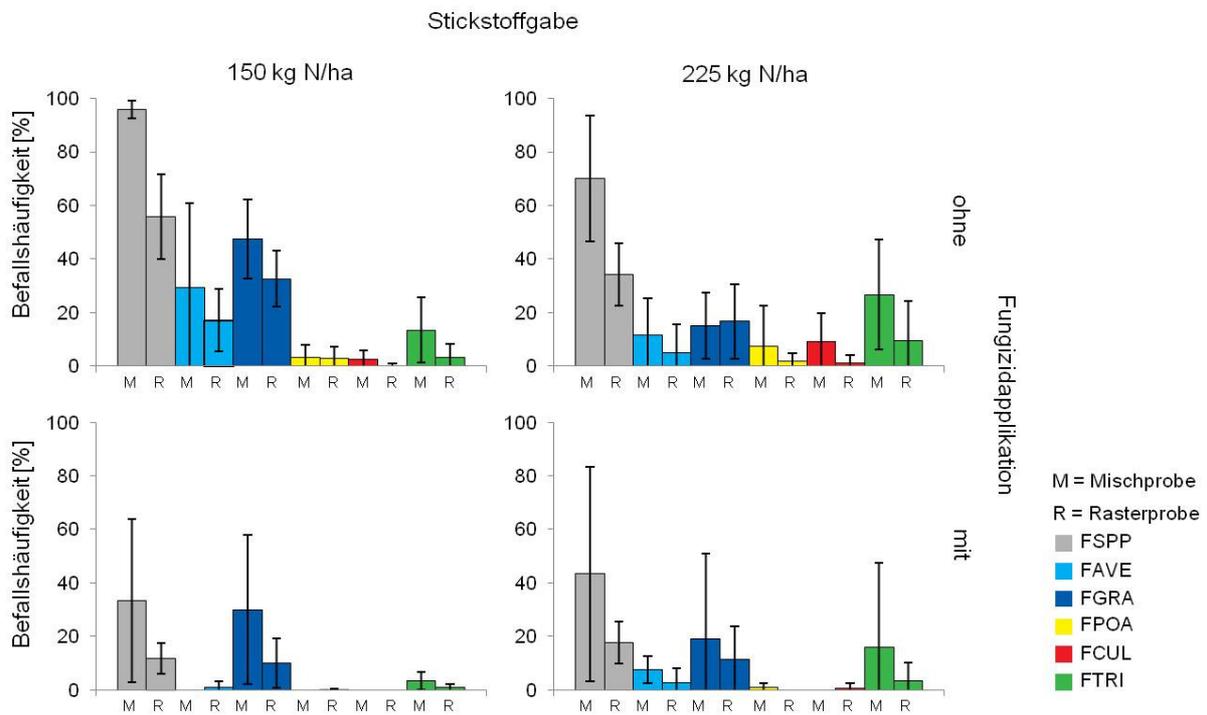


Abb. 15: Gegenüberstellung der *Fusarium*-Befallshäufigkeiten von Körnern aus Misch- und Rasterproben mit unterschiedlichen Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen (Sorte Tommi; Klein-Altendorf; 2008), die Standardabweichung ist dargestellt

3.2.2 Variabilität des *Fusarium*-Befalls in einem Bestand

Am Standort Wiesengut wurden an zwei Standorten eines Weizenschlags der Sorte Aristos Rasterbeprobungen durchgeführt. Die untersuchten Flächen wurden nach Kriterien des organischen Anbaus bewirtschaftet. Die Kornproben wurden hinsichtlich der Befallshäufigkeit und -intensität von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine untersucht. Auf beiden 1 x 1 m Beprobungsflächen wurden die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum*, *F. tricinctum* und *F. proliferatum* als Erreger der partiellen Taubährigkeit nachgewiesen. Die Abbildungen 17 bis 24 zeigen die räumliche Verteilung der Befallsparemeter von *Fusarium* spp. auf den 25 untersuchten Teilflächen.

3.2.2.1 Witterung am Standort Wiesengut im Jahr 2007

Die Summe der Tagesniederschläge und das Tagesmittel der Temperaturen wurden am Standort Wiesengut im Erntejahr 2007 in der für die *Fusarium* spp.-Infektion wichtigen Phase der Weizenblüte von Mai bis Juli ausgewertet (Abb. 16). Ab der zweiten Maiwoche fielen in diesem Monat regelmäßige Niederschläge weit über dem langjährigen Mittel. Im Zeitraum der Weizenblüte vom 02.06. bis 17.06. war es bis zum 10.06. warm und niederschlagsfrei. Zum Ende der Blüte gab es einige geringe Niederschläge und am 15.06. ein größeres Regenereignis (14,2 mm). Ab der zweiten Junihälfte bis Mitte Juli fiel fast täglich Niederschlag. Es folgten zwei warme und trockene Juliwochen und gegen Ende des Monats fielen mit der Temperatur auch wieder regelmäßige Niederschläge. Sowohl die Niederschlagssummen als auch die Temperaturen lagen in den Monaten Mai bis Juli über den Werten des langjährigen Mittels.

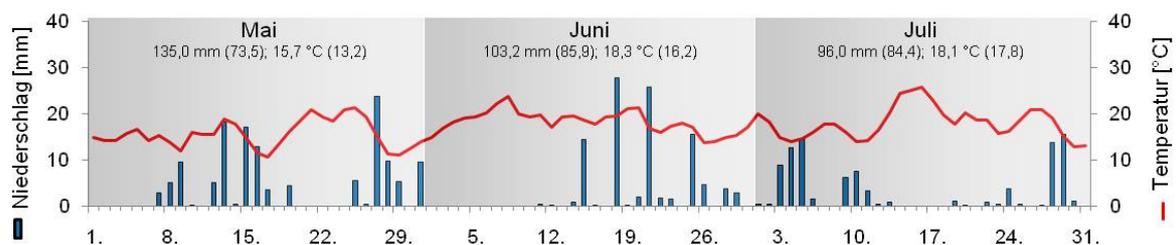


Abb. 16: Verteilung von Niederschlag und Tagestemperaturen in den Monaten Mai bis Juli (Wiesengut, 2007), Monatswerte im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1961 bis 1990) in Klammern, Weizenblüte vom 02.06.-17.06.

3.2.2.2 Räumliche Verteilung der Befallsparameter von *Fusarium* spp.

Befallshäufigkeit mit *Fusarium*-Arten auf Beprobungsfläche 1

Auf Fläche 1 wurde auf allen 25 Teilflächen ein Kornbefall mit *Fusarium* spp. identifiziert und die durchschnittliche Befallshäufigkeit lag bei 14,6 % (Abb. 17). Dominierende Art war *F. avenaceum* mit 8,7 % infizierter Körner im Mittel. Diese Art wurde in 24 Rasterproben nachgewiesen. Ein Befall von *F. poae* wurde an durchschnittlich 3,7 % der Körner detektiert und trat auf 14 Teilflächen auf. *Fusarium graminearum* wurde in sechs Rasterproben identifiziert, der mittlere Befall lag bei 1,1 %. Mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 0,9 % wurde das Auftreten von *F. tricinctum* in acht Rasterproben nachgewiesen. Das mittlere Auftreten der Arten *F. culmorum* und *F. proliferatum* fiel mit jeweils 0,1 % infizierter Körner gering aus. Beide Arten traten jeweils auf zwei Teilflächen auf.

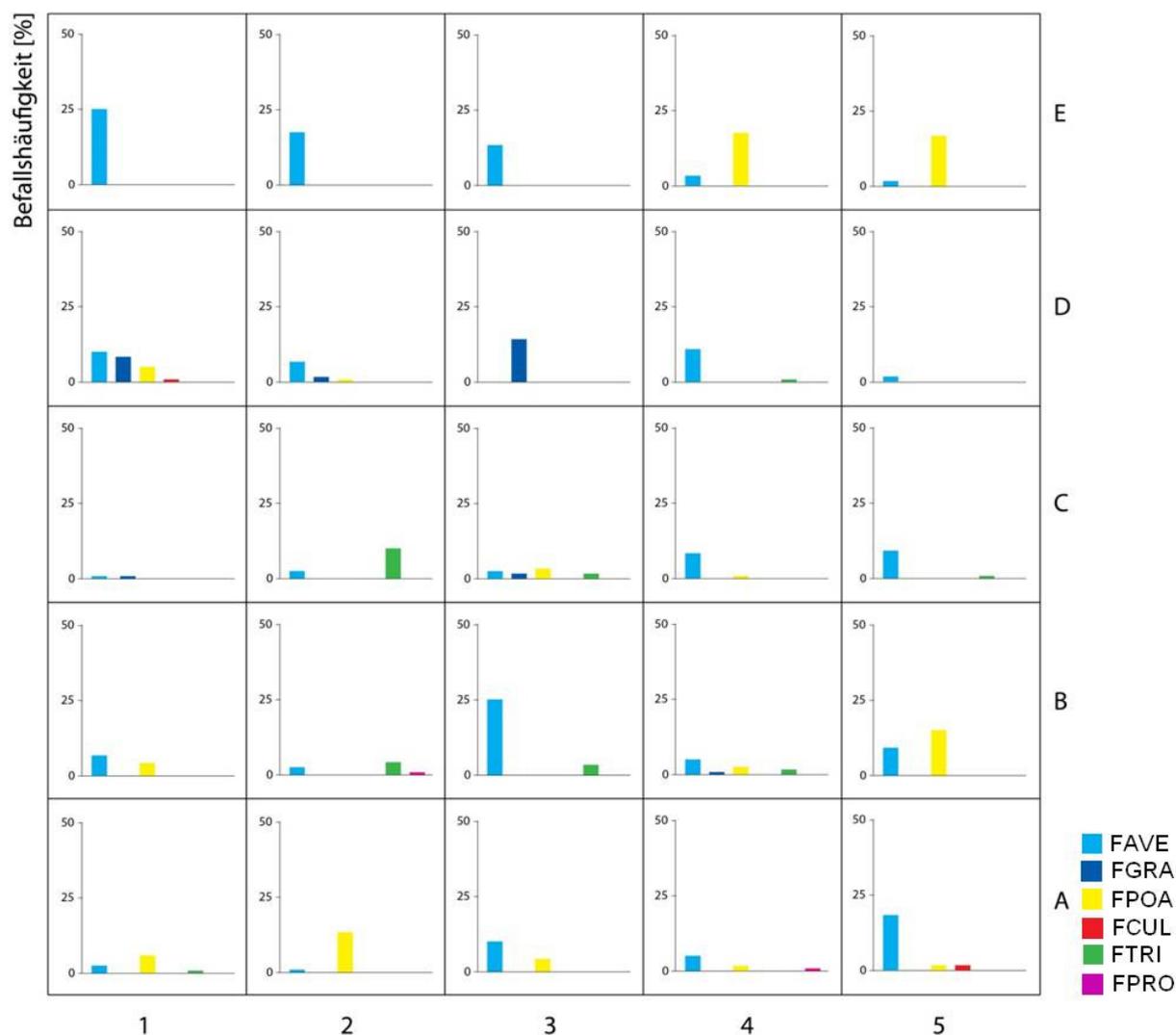


Abb. 17: Räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. befallener Weizenkörner auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut 2007)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Die höchsten **Dispersionsindizes** wurden für *F. graminearum* und *F. poae* errechnet und zeigten, dass die Verteilung dieser Arten sehr variabel war (Tab. 20). Auch für *F. culmorum* und *F. tricinctum* zeigte nach Berechnung des Varianz-Mittelwert-Verhältnisses ihrer Verteilung, dass eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte dieser Arten vorlag.

Tab. 20: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. auf der 1. Beprobungsfläche (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	FAVE	FGRA	FPOA	FTRI
MW ¹	10,4 ± 9,1	1,3 ± 3,8	4,4 ± 6,8	1,1 ± 2,6
VMR ²	7,85	11,2	10,3	6,13

¹MW (befallene Körner absolut) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Die Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* variierte auf der 1 x 1 m Fläche zwischen 0 und 25,0 %. Die beiden Gap-Cluster lagen in Bereichen, in denen geringer Kornbefall durch diese Art detektiert wurde (Abb. 18). Ein schwaches Patch-Cluster wurde in dem Bereich ausgewiesen, in dem ein höherer Befall mit *F. avenaceum* identifiziert wurde. Die räumliche Verteilung dieser Art zeigte mit einem **Aggregationsindex** von 1,129 eine Tendenz zur Aggregation. Die Häufigkeit befallener Körner mit *F. graminearum* lag zwischen 0 und 14,2 %. Es wurde ein Gap-Cluster auf den Teilflächen ausgewiesen, wo kein Kornbefall durch diese Art nachgewiesen wurde. Im mittleren Bereich wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen. Hier wurde in zwei Rastern ein Befall durch *F. graminearum* identifiziert. Trotz der ausgewiesenen Cluster lag mit einem Aggregationsindex von 1,002 eine zufällige Verteilung dieser Art vor. Der Befall mit *F. poae* variierte zwischen 0 und 17,5 %. Es wurden ein Gap-Cluster und zwei Patch-Cluster ausgewiesen. Die Aggregationsanalyse ergab einen Index von 1,082, was auf eine zufällige Verteilung schließen ließ.

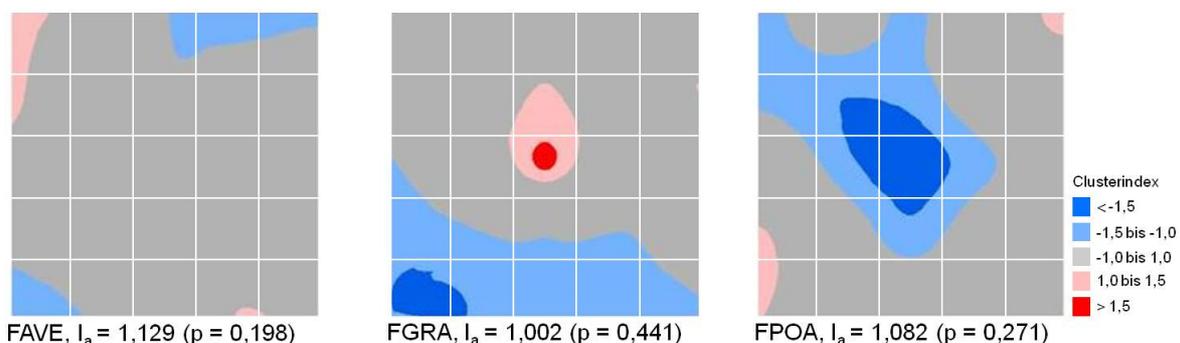


Abb. 18: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Befallsintensität der *Fusarium*-Arten auf Fläche 1

Die molekularbiologische Quantifizierung der Befallsintensität von *F. avenaceum* war in drei der 25 Rasterproben positiv. Die mittlere Befallsintensität lag bei 8 pg DNA/mg TM, das Minimum bei 1,4 pg DNA/mg TM und das Maximum bei 42 pg DNA/mg TM (Abb. 19). Der Befall von *F. graminearum* führte in 18 Rasterproben zu quantifizierbaren Befallsintensitäten. Die mittlere Befallsintensität lag bei 111 pg DNA/mg TM, das Minimum bei 12 pg DNA/mg TM und das Maximum bei 820 pg DNA/mg TM. Art spezifische DNA von *F. poae* konnte in einer Rasterprobe detektiert werden, sie lag bei 175 pg DNA/mg TM.

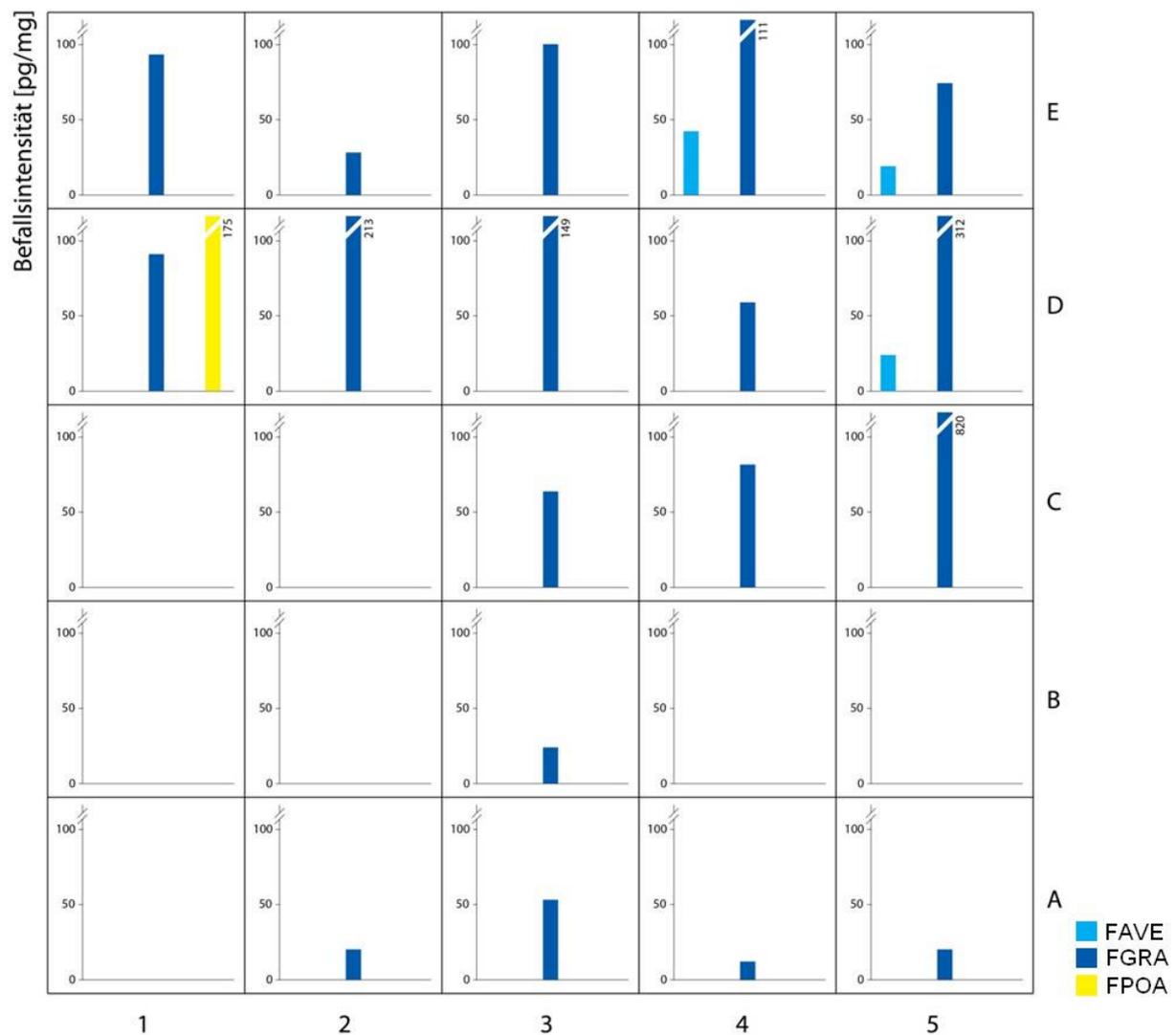


Abb. 19: Räumliche Verteilung der *Fusarium*-Befallsintensität in Weizenkörnern auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007) LOQ: 9 pg/µl TM

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Intensität des *Fusarium*-Befalls

Die hohen **Dispersionsindizes** zeigten, dass die Verteilung der Befallsintensitäten von *F. avenaceum* und *F. graminearum* sehr variabel war (Tab. 21). Für die Intensität der dominanten Art *F. graminearum* wurde der höchste Dispersionsindex von 305 in dieser Rasterbeprobung errechnet. DNA von *F. poae* wurde nur auf einer Teilfläche detektiert.

Tab. 21: Dispersionsindizes für die Befallsintensität von *F. avenaceum* und *F. graminearum* auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	FAVE	FGRA
MW ¹	3,7 ± 9,9	93,2 ± 168,7
VMR ²	26,0	305

¹MW (pg DNA/mg TM) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Der Befall mit *F. avenaceum* führte in drei Rasterproben zu quantifizierbaren Befallsintensitäten, hier wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen (Abb. 20). Auf Teilflächen, wo kein Befall nachgewiesen werden konnte, wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen. Der **Aggregationsindex** von 1,457 zeigte eine starke Aggregation, die sich statistisch absichern ließ. In Bereichen mit einer Anhäufung hoher Befallsintensitäten durch *F. graminearum* wurde ein Patch-Cluster, auf Teilflächen mit geringer bzw. keiner Quantifizierung dieser Art ein Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,219 wies auf eine Aggregation hin. Da für die Befallsintensität von *F. poae* nur ein Messwert vorlag, wurde keine Aggregationsanalyse durchgeführt.

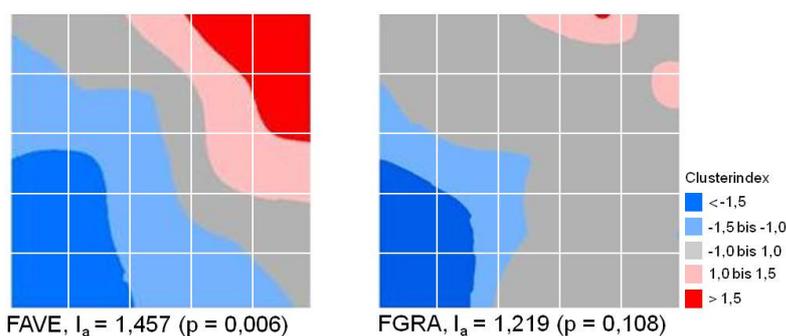


Abb. 20: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallsintensitäten von *F. avenaceum* und *F. graminearum* auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Mykotoxinbelastung der Weizenkörner auf Fläche 1

In allen Rasterproben wurde eine Kontamination der Körner mit DON detektiert (Tab. 22). Die durchschnittliche Belastung lag bei 329 ng/g, das Minimum bei 26 ng/g, der Höchstgehalt bei 1427 ng/g. Die Belastung von Körnern mit 3Ac-DON lag auf der 1 x 1 m Fläche im

Durchschnitt bei 16,6 ng/g. Das Mykotoxin wurde auf 15 Teilflächen nachgewiesen. Kontaminationen mit dem Typ-B Trichothecen NIV wurden in vier Rasterproben detektiert und lagen zwischen 120 und 326 ng /g. Zearalenon wurde in allen Rasterproben nachgewiesen und der durchschnittliche Gehalt lag bei 3351 ng/g, das Minimum bei 754 ng/g und der Höchstgehalt bei 12521 ng/g. Moniliformin wurde in einer Probe nachgewiesen. Belastungen durch ENNB lagen im Mittel bei 38 ng/g und wurden in Körnern von 16 Teilflächen quantifiziert.

Tab. 22: Mykotoxingehalte der Weizenkörner auf Beprobungsfläche 1(1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007), Minima und Maxima sind hervorgehoben

Rasterprobe	Mykotoxin-Konzentration [ng/g]					
	DON (20) ¹	3Ac-DON (10)	NIV (80)	ZEA (4)	MON (20)	ENNB (2)
A1	62	-	-	1180	-	-
A2	44	-	-	1144	-	5
A3	57	-	-	1321	-	4
A4	26	39	-	7089	-	2
A5	112	78	-	12521	-	2
B1	336	13	-	5953	-	47
B2	309	20	-	3875	-	7
B3	487	26	-	1606	-	-
B4	207	46	-	6469	-	-
B5	107	79	-	6022	-	-
C1	142	-	-	2605	-	-
C2	259	-	169	4306	-	13
C3	113	-	120	1851	-	27
C4	651	21	-	5168	-	6
C5	1427	15	-	1792	-	12
D1	50	-	326	1214	-	-
D2	103	-	-	4014	-	6
D3	50	23	-	3920	-	10
D4	719	-	-	754	-	-
D5	557	21	-	4684	-	8
E1	46	-	-	888	-	-
E2	54	-	-	1086	-	5
E3	73	10	-	1665	-	-
E4	962	14	-	897	101	791
E5	1284	10	253	1743	-	8
MW ²	329	16,6	35	3351	4,0	38

¹ Quantifizierungslimit; ² MW= Mittelwert; - = < LOQ

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Mykotoxingehalte

Bei Betrachtung der **Dispersionsindizes** wurde der höchste Wert für das Verhältnis von Varianz zum Mittelwert für die ZEA-Gehalte ermittelt, es lag eine starke Variabilität der Verteilung vor (Tab. 23). Für Kontaminationen durch 3Ac-DON, NIV und ENNB wurden ebenfalls hohe VMR-Werte errechnet. Der Dispersionsindex für DON war im Verhältnis mit 22,39 relativ klein, dennoch lag auch für dieses Toxin eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte vor. Moniliformin-Gehalte wurden nur auf einer Teilfläche nachgewiesen.

Tab. 23: Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut 2007)

	DON	3Ac-DON	NIV	ZEA	ENNB
MW ¹	347 ± 397	17,5 ± 22,4	34,7 ± 87,3	3350 ± 2774	38,1 ± 157,2
VMR ²	454	22,4	219	2361	648

¹ MW (ng/g) ± SD; ² Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Eine Belastung der Körner mit NIV konnte in vier der 25 Rasterproben detektiert werden. Die Aggregationsanalyse ergab einen **Aggregationsindex** von 0,967, welcher auf eine zufallsähnliche Verteilung schließen ließ. Auf der 1 x 1 m Beprobungsfläche lag eine Kontamination mit dem Mykotoxin DON in allen Proben vor und variierte zwischen 26 und 1427 ng/g. Es wurden zwei Patch-Cluster und ein großes Gap-Cluster ausgewiesen (Abb. 21). Der Aggregationsindex von 1,612 wies auf eine starke Aggregation hin, die statistisch belegbar war (Tab. 27). Gehalte des acetylierten Derivats 3Ac-DON wurden in 15 Rasterproben nachgewiesen. Ein Gap-Cluster wurde im Bereich niedriger 3Ac-DON-Belastungen der Körner ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,749 war die starke Aggregation statistisch höchst signifikant. Die ZEA-Belastung der Körner war auf dieser Fläche am höchsten, wurde in allen Rasterproben nachgewiesen und variierte zwischen 754 und 12521 ng/g. Es wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen und die Aggregationsanalyse ergab einen Index von 1,478. Die Verteilung der ZEA-Gehalte war hoch signifikant aggregiert. In 16 Rasterproben wurde eine Kontamination der Körner mit ENNB nachgewiesen. Der Höchstgehalt lag bei 791 ng/g und der Aggregationsindex wies mit 1,056 auf eine Verteilung hin, wie man sie von einer Zufallsverteilung erwarten würde, mit einer leichten Tendenz zur Aggregation. MON wurde in einer Probe nachgewiesen. Eine Aggregationsanalyse mit einem Messwert war nicht möglich.

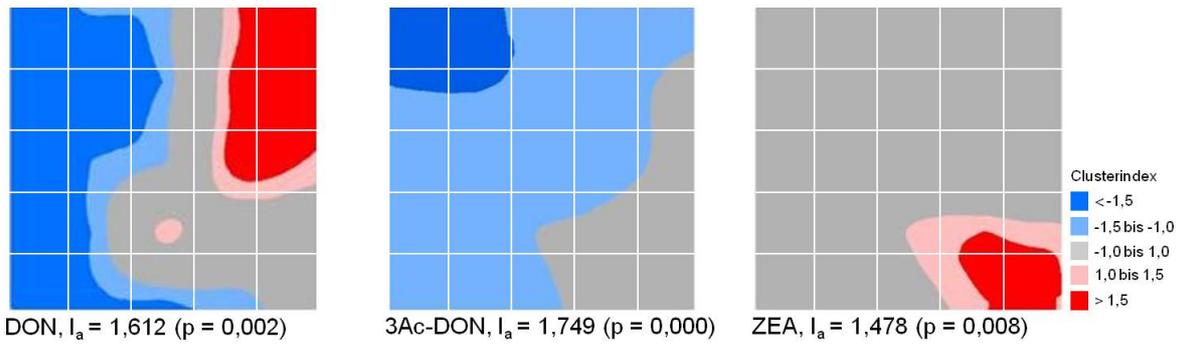


Abb. 21: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON, 3Ac-DON und ZEA auf Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Befallshäufigkeit mit *Fusarium*-Arten Beprobungsfläche 2

Die zweite Rasterbeprobung ergab, dass 10,5 % der Weizenkörner mit *Fusarium* spp. infiziert waren und ein Befall mit *Fusarium* spp. auf allen Teilflächen vorhanden war (Abb. 22). Im Gegensatz zur ersten Rasterbeprobung war *F. graminearum* mit durchschnittlich 4,9 % infizierter Körner die dominante Art und wurde auf 15 Teilflächen nachgewiesen. Die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* lag im Mittel bei 3,2 %. Diese Art wurde von Körnern aus 18 Rasterproben isoliert. Die Häufigkeit befallener Körner mit *F. culmorum* lag im Durchschnitt bei 1,4 % und trat auf vier Teilflächen auf. Mit einer durchschnittlichen Befallshäufigkeit von 0,7 % trat in Proben von zehn Teilflächen *F. poae* auf. Die mittlere Befallshäufigkeit mit *F. tricinctum* lag bei 0,1 % und wurde in drei Rasterproben nachgewiesen. *F. proliferatum* trat nur auf einer Teilfläche auf.

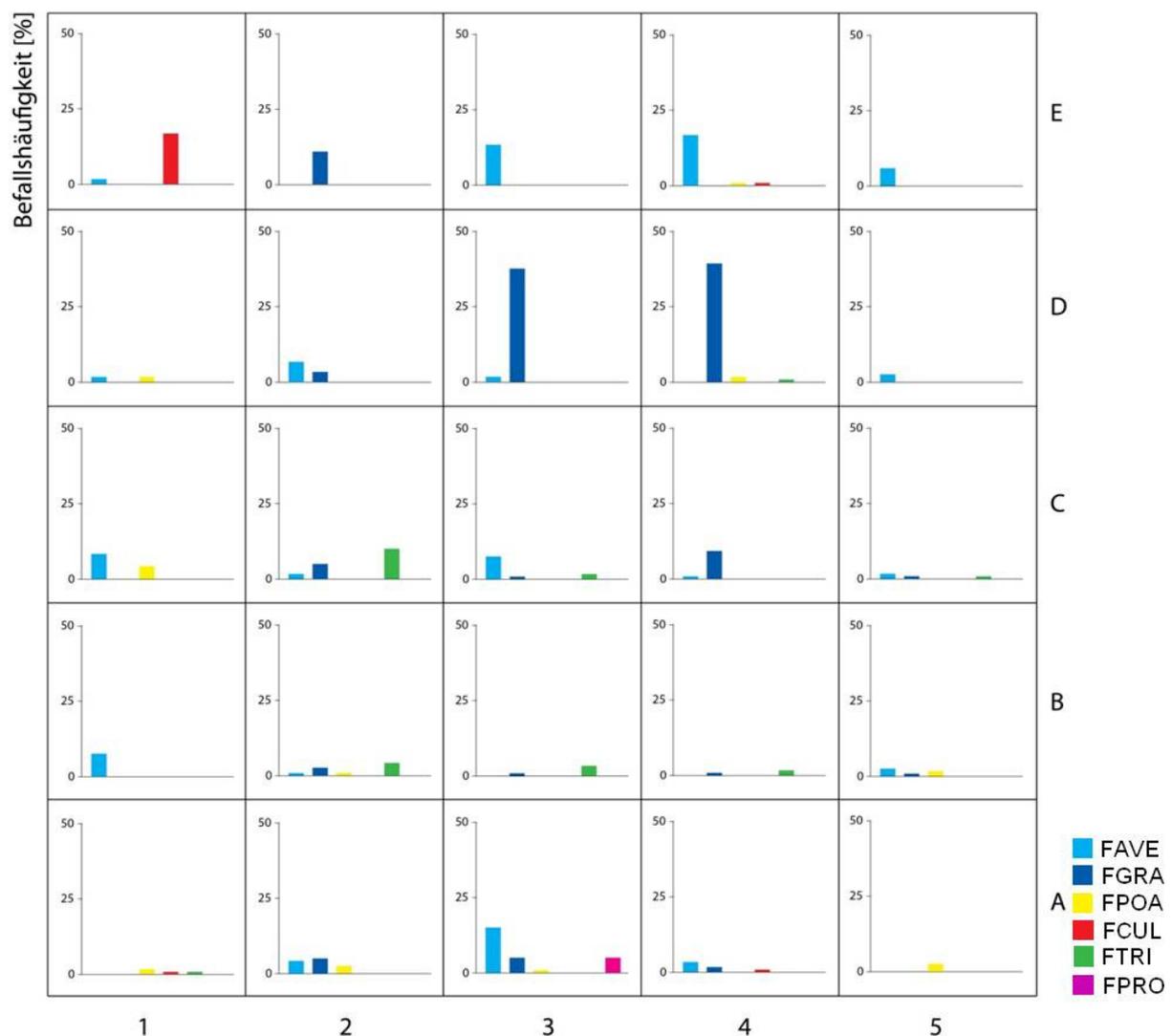


Abb. 22: Räumliche Verteilung der *Fusarium*-Befallshäufigkeit auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Der **Dispersionsindex** für die dominante Art *F. graminearum* war bei dieser Rasterbeprobung mit 26,67 am höchsten, es lag eine sehr variable Verteilung vor (Tab. 24). Für *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. culmorum* lag ebenfalls ein Varianz-Mittelwert-Verhältnis >1 vor und zeigte, dass eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte dieser Arten vorlag. Der VMR-Wert 0,92 für die Verteilung von *F. tricinctum* entsprach nahezu einer Poisson-Verteilung. *F. proliferatum* wurde nur in Körnern einer Teilfläche detektiert.

Tab. 24: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	FAVE	FGRA	FPOA	FCUL	FTRI
MW ¹	3,8 ± 4,5	5,9 ± 12,6	0,9 ± 1,3	1,6 ± 5,2	0,1 ± 0,3
VMR ²	5,16	26,67	2,02	16,67	0,92

¹MW (befallene Körner absolut) ± Standardabweichung; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Die Befallshäufigkeit mit *F. avenaceum* variierte auf den Teilflächen zwischen 0 und 15,0 %. Es wurden zwei Gap-Cluster in Zonen mit geringem Kornbefall durch diese Art ausgewiesen (Abb. 23). Mit einem **Aggregationsindex** von 0,852 wies die Verteilung der Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* auf eine zufällig Verteilung hin (Tab. 27). Der Anteil infizierter Körner mit *F. graminearum* variierte zwischen 0 und 39,2 %. Es wurde ein kleines Gap-Cluster ausgewiesen und mit einem errechneten Aggregationsindex von 0,971 lag eine zufallsähnliche Verteilung vor. Der Befall mit *F. poae* variierte auf den Teilflächen zwischen 0 und 4,2 %. Es wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen, wo kein Befall nachgewiesen wurde. Ein Aggregationsindex von 1,096 zeigte, dass diese Art zufallsähnlich verteilt war. Für die Art *F. proliferatum* lag nur ein Messwert vor, es wurde keine Aggregationsanalyse durchgeführt.

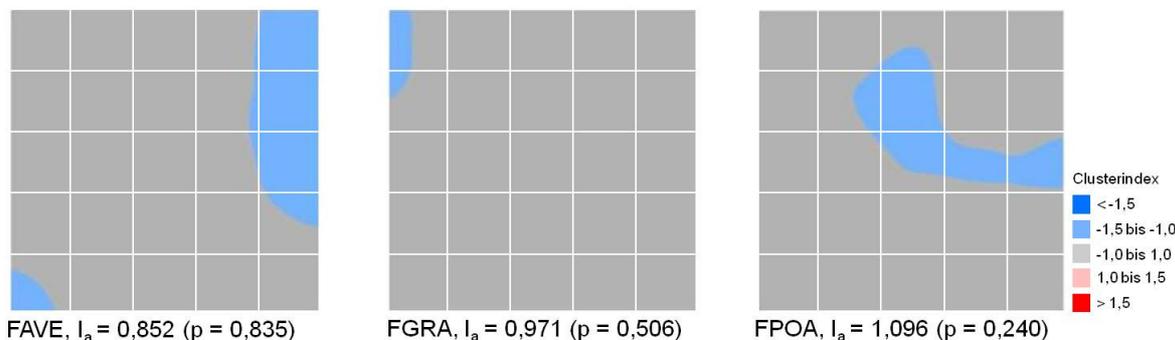


Abb. 23: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Mykotoxinbelastung der Weizenkörner auf Fläche 2

Auf dieser Fläche lag die durchschnittliche DON-Belastung bei 256 ng/g. In 18 von 25 Rasterproben wurden DON-Gehalte detektiert, wobei das Maximum bei 2349 ng/g und das Minimum bei 24 ng/g lag (Tab. 25). Eine Kontamination der 1 x 1 m Fläche mit 3Ac-DON wurde auf fünf Teilflächen nachgewiesen und lag im Durchschnitt bei 6 ng/g. Für ZEA wurden die höchsten Konzentrationen gemessen. Mit einer durchschnittlichen Kontamination von 3576 ng/g wurden ZEA-Gehalte in allen Rasterproben detektiert. Geringere Mengen von ENNB wurden in 16 Proben quantifiziert. In einer Probe lag der Gehalt bei 1650 ng/g.

Tab. 25: Mykotoxingehalte von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007), Minima und Maxima sind hervorgehoben

Rasterprobe	Mykotoxin-Konzentration [ng/g]					
	DON (20) ¹	3Ac-DON (10)	NIV (80)	ZEA (4)	MON (20)	ENNB (2)
A1	102	25	-	4514	0	-
A2	407	38	-	8263	0	109
A3	441	11	-	9476	0	7
A4	2349	36	-	2728	0	4
A5	498	43	-	3918	0	-
B1	191	-	-	3466	0	4
B2	70	-	-	4576	0	-
B3	148	-	-	6214	0	4
B4	78	-	-	4834	0	3
B5	25	-	-	3560	0	-
C1	-	-	-	3161	0	-
C2	-	-	-	2974	0	-
C3	-	-	-	2916	0	-
C4	33	-	-	3080	0	3
C5	795	-	-	2008	0	2
D1	207	-	-	5854	0	20
D2	30	-	-	3700	0	2
D3	575	-	-	2788	0	118
D4	-	-	98	1058	0	3
D5	166	-	-	3694	0	32
E1	-	-	-	1470	0	6
E2	-	-	-	1392	0	-
E3	24	-	-	2041	0	2
E4	-	-	-	965	0	1650
E5	272	-	-	753	0	26
MW ²	256	6	4	3576	-	80

¹ Quantifizierungslimit; ² MW= Mittelwert; - = < LOQ

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Mykotoxingehalte

Die **Dispersionsindizes** für DON, ZEA und ENNB zeigten, dass die Verteilung der Toxin-Gehalte variabel war (Tab. 26). Der VMR-Wert für 3Ac-DON war im Vergleich mit denen der anderen Mykotoxine sehr klein, dennoch zeigte er, dass eine variable Verteilung dieses Toxins vorlag. Gehalte von NIV wurden nur in Körnern einer Teilfläche nachgewiesen.

Tab. 26: Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
MW ¹	256 ± 486	6,1 ± 13,5	3576 ± 2143	79,8 ± 329
VMR ²	921	30,0	1285	1353

¹MW (ng/g) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Auf dieser 1 x 1 m Beprobungsfläche wurde in nur einer Probe eine Belastung der Körner durch NIV nachgewiesen. Eine Aggregationsanalyse wurde nicht durchgeführt. In sieben von 25 Rasterproben wurden DON-Gehalte nachgewiesen, sie variierten zwischen 24 und 2349 ng/g. Es wurde ein Patch-Cluster in Zonen höherer DON-Kontaminationen ausgewiesen und der errechnete **Aggregationsindex** von 1,266 zeigte, dass die räumliche Verteilung von DON aggregiert war (Tab. 27). Eine Belastung mit 3Ac-DON wurde in Körner von fünf Rasterproben detektiert, hier wurde ein Patch-Cluster ausgewiesen (Abb. 24). Auf Teilflächen, auf denen keine 3Ac-DON-Gehalte nachgewiesen wurden, wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen. Der errechnete Aggregationsindex von 1,554 zeigte eine starke Aggregation, die statistisch abgesichert werden konnte. Wie auch auf der ersten Beprobungsfläche wurden in Proben dieser Fläche die höchsten Gehalte des Mykotoxins ZEA detektiert. In den Proben variierte die Belastung zwischen 753 und 9476 ng/g. Es wurden zwei Patch-Cluster und ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,763 war die starke Aggregation von ZEA-Gehalten statistisch hoch signifikant. Eine Kontamination der Körner mit ENNB wurde in 17 Rasterproben nachgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,081 zeigte die ENNB-Belastung eine Verteilung ähnlich einer Zufallsverteilung. Der hohe Einzelmesswert von 1650 ng/g in einer Rasterprobe wurde von dem Programm SADIE als zufällig gewertet.

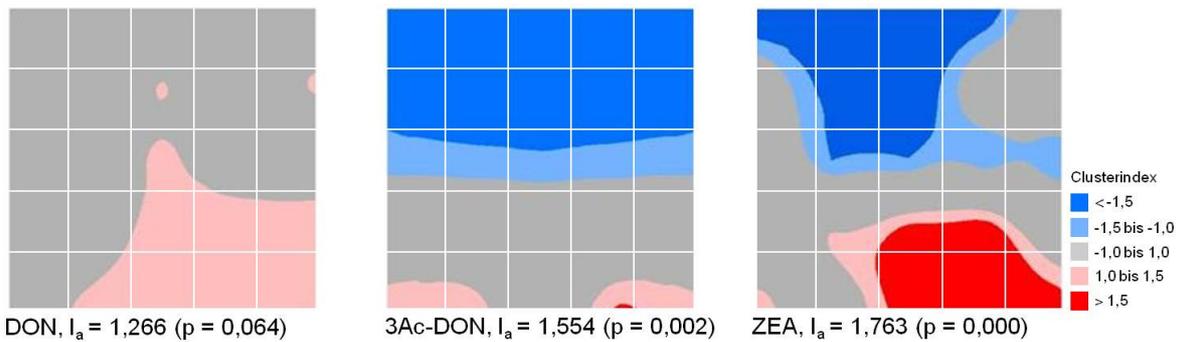


Abb. 24: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON, 3Ac-DON und ZEA auf Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Die räumliche Analyse der Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern der Sorte Aristos ergab, dass die Verteilung von DON, 3Ac-DON und ZEA auf beiden Beprobungsflächen aggregiert war. NIV-Gehalte wurden nur auf Beprobungsfläche 1 nachgewiesen und waren zufällig verteilt. Belastungen der Körner mit ENNB waren auf beiden Beprobungsflächen zufällig verteilt.

Die folgende Tabelle 27 gibt eine Zusammenfassung der Aggregationsindizes des Befalls mit *Fusarium*-Arten und Mykotoxingehalten auf den Beprobungsflächen 1 und 2.

Tab. 27: Aggregationsindizes für die *Fusarium*-Befallshäufigkeiten und Mykotoxingehalte auf den Beprobungsflächen 1 und 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

Fläche		Befallshäufigkeit				Mykotoxingehalt				
		FAVE	FGRA	FPOA	FTRI	NIV	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
1	I_a^1	1,129	1,002	1,082	1,048	0,967	1,612	1,749	1,478	1,056
	P^2	0,198	0,441	0,271	0,330	0,521	0,002	0,000	0,008	0,359
2	I_a	0,852	0,971	1,096	1,103	-	1,266	1,554	1,763	1,081
	p	0,835	0,506	0,240	0,220	-	0,064	0,002	0,000	0,278

¹ Aggregationsindex nach SADIE, $I_a = 1$: Verteilung zufällig; $I_a < 1$: Verteilung ist regelmäßiger, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; $I_a > 1$: Verteilung zeigt größere Aggregation, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; ² Irrtumswahrscheinlichkeit $p =$ signifikant: $p \leq 0,05$; hoch signifikant: $p \leq 0,01$; höchst signifikant: $p \leq 0,001$; - = > LOQ

Korrelationen der Befallsparameter von *Fusarium* spp. am Standort Wiesengut

Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und -intensität der *Fusarium*-Arten

Für einen möglichen Zusammenhang von Befallshäufigkeit und -intensität auf der Beprobungsfläche 1 zeigte sich, dass die Korrelation für *F. graminearum* einen positiven Koeffizienten aufwies ($r = 0,145$), während Befallshäufigkeit und Befallsintensität für *F. avenaceum* ($r = -0,043$) und für *F. poae* ($r = -0,122$) negativ korreliert waren. Keine Korrelation konnte

statistisch abgesichert werden. Für die Beprobungsfläche 2 wurde die Befallsintensität von *Fusarium* spp. nicht quantifiziert.

Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Mykotoxine

In Rasterproben der Beprobungsfläche 1 wurden zwischen den Kontaminationen mit DON und 3Ac-DON sowie DON und ZEA höchst signifikante Zusammenhänge nachgewiesen (Tab. 28). Zusätzlich korrelierten die 3Ac-DON-Gehalte höchst signifikant mit ZEA. Für NIV-Belastungen wurde ein signifikanter Zusammenhang mit ZEA festgestellt.

Tab. 28: Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Wiesengut; 2007)

	MON	NIV	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
Korrelationskoeffizient ¹						
MON		-0,086	-0,283	-0,192	-0,236	0,304
NIV	0,664		0,280	0,245	0,329	0,288
DON	0,096	0,090		0,731	0,745	0,158
3Ac-DON	0,282	0,159	0,000		0,759	0,078
ZEA	0,166	0,047	0,000	0,000		0,150
ENNB	0,088	0,097	0,291	0,619	0,150	

Kendalls Tau, zweiseitig; ¹ Korrelationskoeffizient nach Kendall; ² Irrtumswahrscheinlichkeit = signifikant: $p \leq 0,05$; hoch signifikant: $p \leq 0,01$; höchst signifikant: $p \leq 0,001$

In Rasterproben der Beprobungsfläche 2 korrelierte die DON-Belastung von Weizenkörnern hoch signifikant mit 3Ac-DON (Tab. 29). Des Weiteren wurden signifikante Zusammenhänge zwischen DON und ZEA sowie DON und ENNB nachgewiesen.

Tab. 29: Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern der Beprobungsfläche 2 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	NIV	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
Korrelationskoeffizient ¹					
NIV		-0,220	-0,097	-0,236	0,000
DON	0,207		0,434	0,294	0,332
3Ac-DON	0,620	0,010		0,297	0,018
ZEA	0,166	0,044	0,069		-0,025
ENNB	1,000	0,030	0,918	0,867	

Kendalls Tau, zweiseitig; ¹ Korrelationskoeffizient nach Kendall; ² Irrtumswahrscheinlichkeit = signifikant: $p \leq 0,05$; hoch signifikant: $p \leq 0,01$; höchst signifikant: $p \leq 0,001$

Zusammenhang zwischen Intensität des *Fusarium*-Befalls und assoziierter Mykotoxine

In Rasterproben der Beprobungsfläche 1 korrelierte die artspezifische DNA-Menge von *F. poae* hoch signifikant mit der detektierten NIV-Belastung (Tab. 30). Für die Summe der DNA-Gehalte von *F. avenaceum* konnte ein tendenzieller Zusammenhang mit ENNB und MON festgestellt werden. Die Biomasse von *F. graminearum* korrelierte mit keiner Mykotoxin-Kontamination. Für die Beprobungsfläche 2 wurde die Befallsintensität von *Fusarium* spp. nicht quantifiziert.

Tab. 30: Korrelation zwischen Befallsintensität von *F. graminearum*, *F. avenaceum* bzw. *F. poae* und Mykotoxingehalt in Kornproben der Beprobungsfläche 1 (1 x 1 m; Sorte Aristos; Wiesengut; 2007)

	MON	NIV	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
FGRA		0,166 ¹ 0,319 ²	-0,044 0,761	-0,224 0,139	-0,141 0,325	
FAVE	0,329 0,073					0,304 0,058
FPOA		0,503 0,006				

Kendalls Tau, zweiseitig: ¹ Korrelationskoeffizient nach Kendall; ² Irrtumswahrscheinlichkeit p = signifikant: p ≤ 0,05; hoch signifikant: p ≤ 0,01; höchst signifikant: p ≤ 0,001; Schattierung: Mykotoxin wird von dieser *Fusarium*-Art nicht produziert

3.2.3 Kleinräumiges Auftreten von *Fusarium* spp. bei hoher Befallswahrscheinlichkeit

Am konventionell bewirtschafteten Standort Poppelsdorf wurde im Jahr 2007 eine Rasterbeprobung der Weizensorte Kris durchgeführt. Die Vorfrucht des Weizenschlags war Mais und es wurde auf eine Fungizidbehandlung verzichtet. Die Kornproben wurden hinsichtlich der Befallshäufigkeit und -intensität von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine untersucht.

3.2.3.1 Witterung am Standort Poppelsdorf 2007

Die Summe der Tagesniederschläge und das Tagesmittel der Temperaturen wurden am Standort Poppelsdorf im Erntejahr 2007 in der für die Infektion mit *Fusarium* spp. wichtigen Phasen von Mai bis Juli ausgewertet (Abb. 25). Die durchschnittlichen Tagestemperaturen im Mai lagen über dem langjährigen Mittel. Ab der zweiten Woche fielen regelmäßig Niederschläge mit einem starken Regenergebnis am 22.05. mit 46,7 mm. Die erste Junihälfte war trocken, ab der zweiten Woche fielen bis Mitte des Folgemonats regelmäßig Niederschläge. In diesen Zeitraum fiel die Blüte des Weizens vom 09.06. bis zum 27.06. Der Monat Juli war ab der zweiten Woche sehr trocken mit durchschnittlichen Tagestemperaturen bis 27,4 °C. Gegen Ende des Monats gab es leichte Regenschauer. Die Summe der Niederschläge und Durchschnittstemperaturen lagen in den Monaten Mai bis Juli über den Werten des langjährigen Mittels.

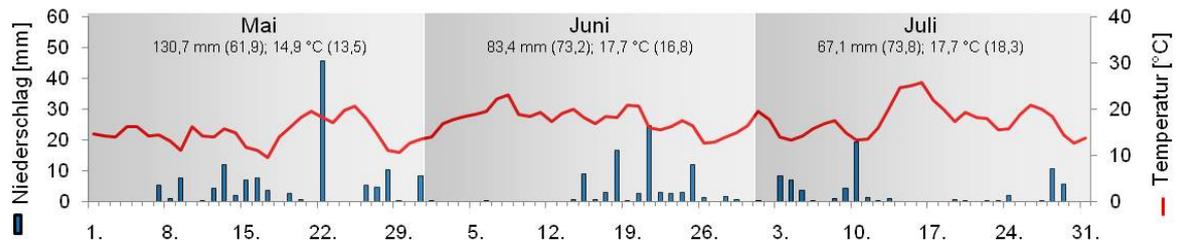


Abb. 25: Tagesniederschlagssumme und Tagesdurchschnittstemperatur der Monate Mai bis Juli (Poppelsdorf; 2007) Monatsniederschlagssumme und Monatsdurchschnittstemperatur im Diagramm angegeben, langjähriges Mittel (1961 bis 1990) in Klammern, Weizenblüte vom 09.06.-27.06.

3.2.3.2 Räumliche Verteilung der Befallsparameter von *Fusarium* spp.

Befallshäufigkeit

In den Rasterproben traten die Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae* und *F. proliferatum* auf (Abb. 26). Die Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. lag auf der 1 x 1 m großen Beprobungsfläche im Durchschnitt bei 40,4 % und in jeder Probe wurde *Fusarium*-Befall nachgewiesen. Die dominante Art war *F. graminearum* mit einer mittleren Befallshäufigkeit von 33,6 % infizierter Körner. Diese Art trat in allen Proben auf. Der durchschnittliche Befall mit *F. avenaceum* lag bei 2,9 % und wurde auf 17 Teilflächen nachgewiesen. *F. poae* trat in 16 Rasterproben auf und hatte eine mittlere Befallshäufigkeit von 3,3 %. Mit einem durchschnittlichen Befall von 0,5 % war der Anteil mit *F. proliferatum* infizierter Körner gering. Diese Art wurde auf acht Teilflächen identifiziert.

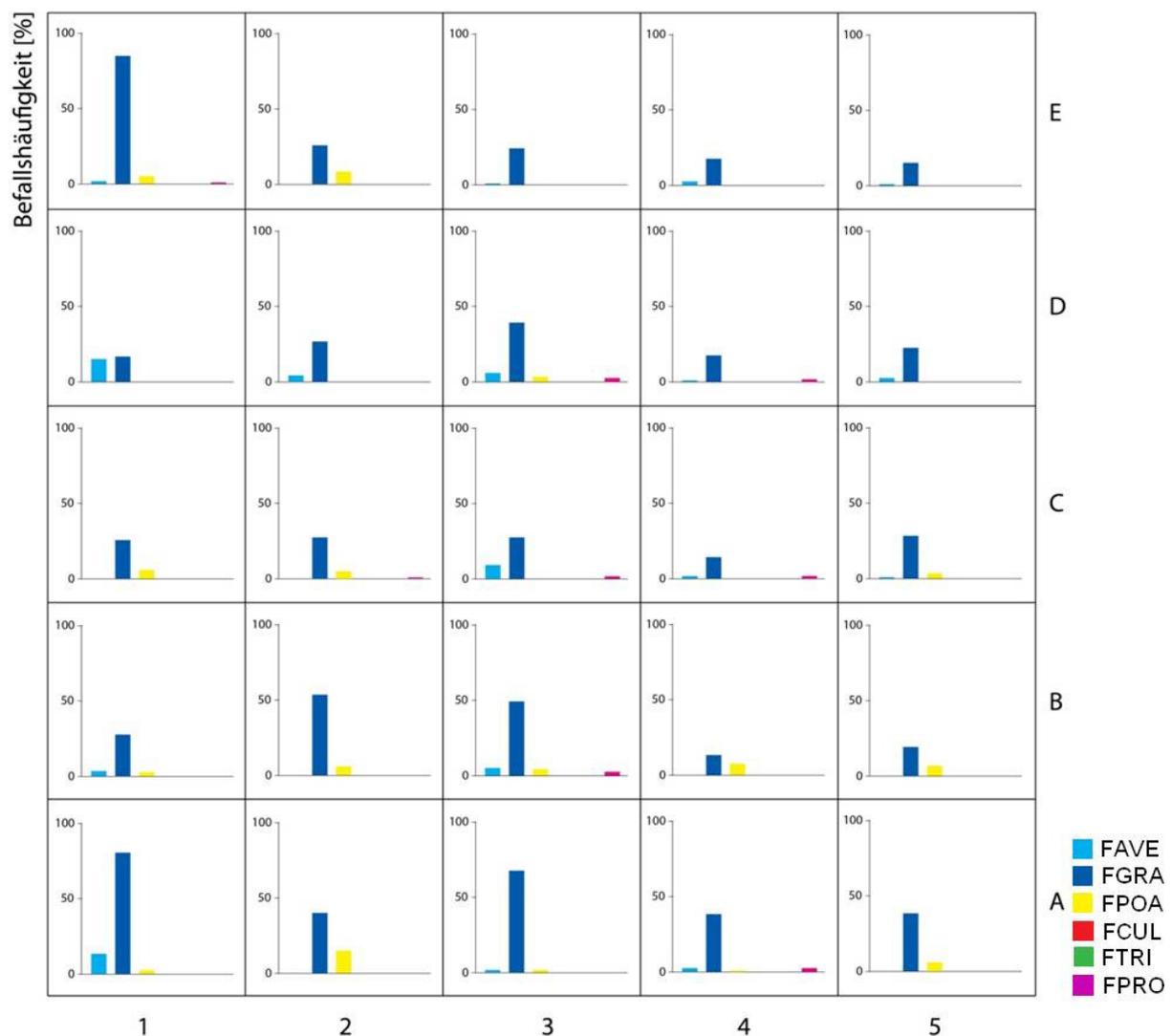


Abb. 26: Räumliche Verteilung der *Fusarium*-Befallshäufigkeit von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp.

Der **Dispersionsindex** für *F. graminearum* lag bei 14 und wies auf eine variable Verteilung hin (Tab. 31). Auch für *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. proliferatum* war das errechnete Verhältnis von Varianz zum Mittelwert für alle Arten > 1, somit lag bei allen *Fusarium*-Arten eine Variabilität innerhalb der Messwerte vor.

Tab. 31: Dispersionsindizes für das Auftreten von *Fusarium* spp. (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	FAVE	FGRA	FPOA	FPRO
MW ¹	3,4 ± 4,9	40,4 ± 23,8	4,0 ± 4,4	0,7 ± 1,1
VMR ²	6,95	14,03	4,88	1,80

¹MW (befallene Körner absolut) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Der Befall von Körnern mit *F. avenaceum* variierte auf den Teilflächen zwischen 0,0 und 15,0 %. Mit einem errechneten **Aggregationsindex** von 1,106 war die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit dieser Art eher zufällig. Die Befallshäufigkeit der dominanten Art *F. graminearum* variierte auf den Teilflächen zwischen 13,3 und 85,0 %. Es wurden zwei Patch-Cluster und ein Gap-Cluster ausgewiesen (Abb. 27). Die Aggregationsanalyse ergab einen Index von 1,499, was auf eine starke Aggregation hinwies, die statistisch abgesichert werden konnte (Tab. 32). Für die Verteilung von *F. poae* wurde ein Gap-Cluster in Zonen mit geringem Befall und zwei Patch-Cluster in Zonen mit hohen Befallswerten ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,293 lag eine aggregierte Verteilung dieser Art vor. Die Befallshäufigkeit mit *F. proliferatum* variierte zwischen 0,0 und 2,5 %. Der errechnete Aggregationsindex von 0,917 ließ auf eine zufällige Verteilung schließen.

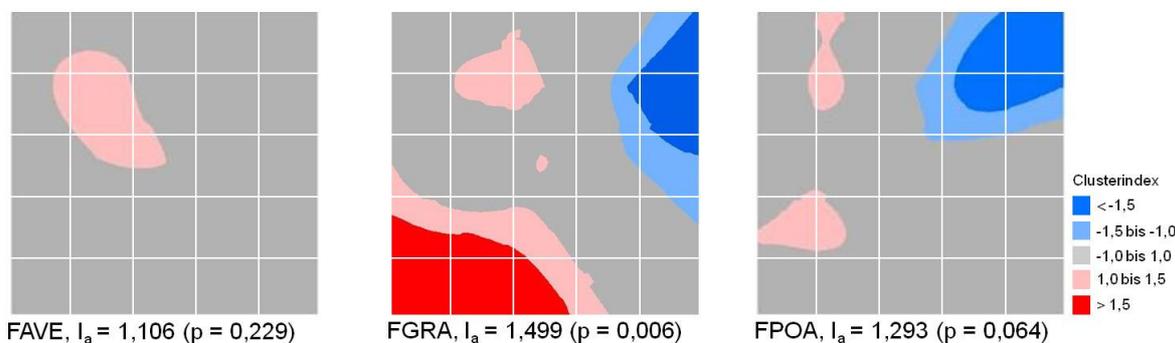


Abb. 27: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallshäufigkeiten von *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

Die folgende Tabelle 32 gibt eine Zusammenfassung der Aggregationsindizes des Befalls mit *Fusarium*-Arten auf der 1 x 1 m Beprobungsfläche der Sorte Kris.

Tab. 32: Aggregationsindizes für die Häufigkeit des *Fusarium*-Befalls von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	<i>Fusarium</i> -Befallshäufigkeit			
	FAVE	FGRA	FPOA	FPRO
I_a^1	1,106	1,499	1,293	0,917
p^2	0,229	0,006	0,064	0,669

¹ Aggregationsindex nach SADIE, $I_a = 1$: Verteilung zufällig; $I_a < 1$: Verteilung ist regelmäßiger, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; $I_a > 1$: Verteilung zeigt größere Aggregation, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; ² Irrtumswahrscheinlichkeit p = signifikant: $p \leq 0,05$; hoch signifikant: $p \leq 0,01$; höchst signifikant: $p \leq 0,001$

Befallsintensität

Auf der Beprobungsfläche führte ein Befall mit *F. avenaceum* in 16 der 25 Rasterproben zu quantifizierbaren Befallsintensitäten (Abb. 28). Die mittlere Befallsintensität betrug 17, das Minimum 1,6 und das Maximum 58 pg DNA/mg TM. Pilzliche DNA von *Fusarium graminearum* konnte in 24 Rasterproben detektiert werden. Die mittlere Befallsintensität war 494 pg DNA/mg TM, das Minimum 25 und das Maximum 3450 pg DNA/mg TM. Für *F. poae* wurden in neun Rasterproben Befallsintensitäten über dem Quantifizierungslimit ermittelt. Die mittlere Befallsintensität betrug 19 pg DNA/mg TM, das Minimum 2 und das Maximum 114 pg DNA/mg TM.

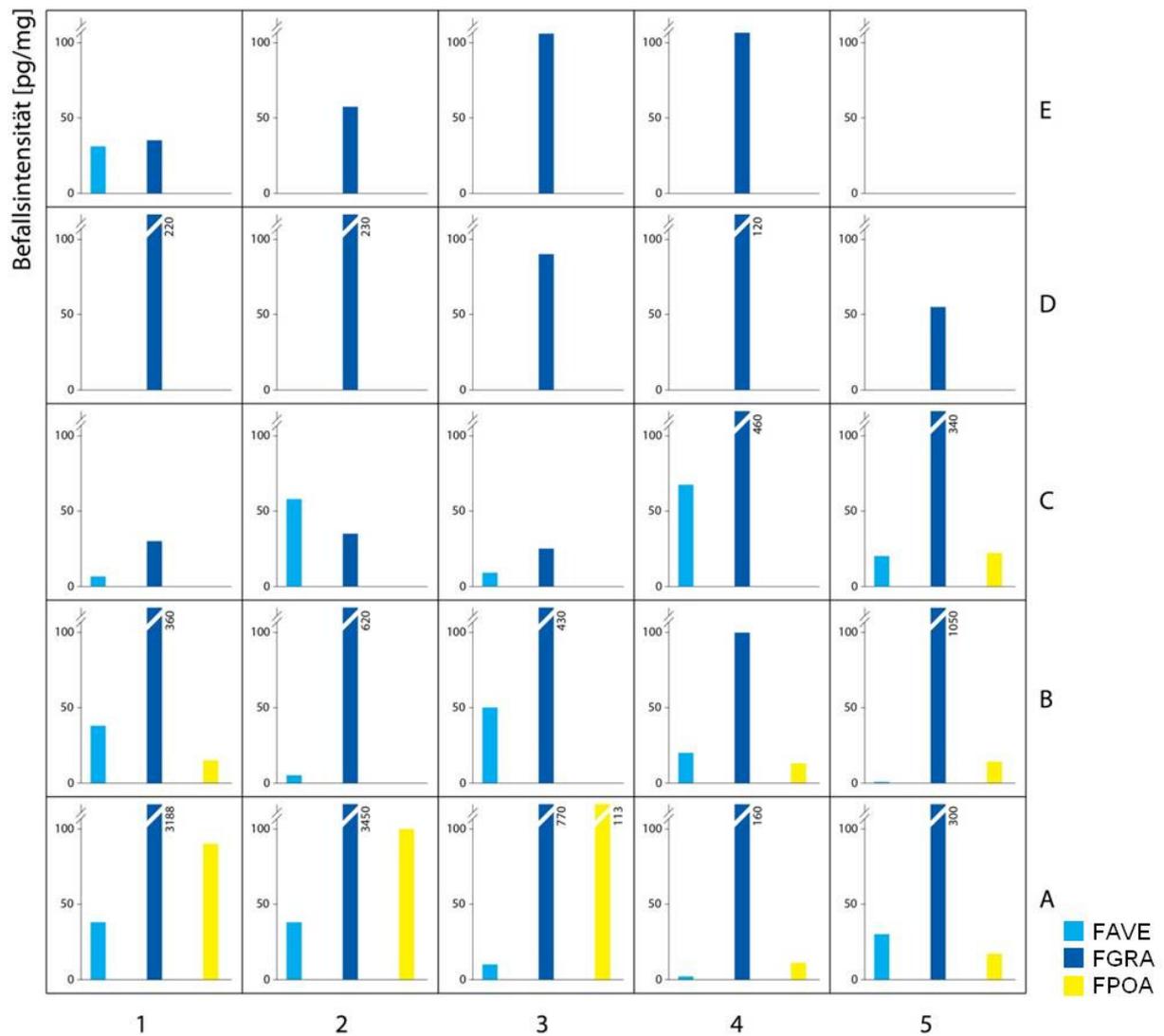


Abb. 28: Räumliche Verteilung der *Fusarium*-Befallsintensität in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007), LOQ: 9 pg/μl

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Intensität des *Fusarium*-Befalls

Mit einem **Dispersionsindex** von 1596 war die Verteilung der Befallsintensitäten mit *F. graminearum* sehr variabel (Tab. 33). Die VMR-Werte für die Befallsintensitäten von *F. avenaceum* und *F. poae* waren um den Faktor 75 kleiner im Vergleich zu *F. graminearum*, dennoch lag eine deutliche Variabilität innerhalb der Messwerte der beiden artspezifischen DNA-Mengen vor.

Tab. 33: Dispersionsindizes für die *Fusarium*-Befallsintensität (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	FAVE	FGRA	FPOA
MW ¹	17,3 ± 19,3	495 ± 889	18,0 ± 31,5
VMR ²	21,5	1596	55,3

¹MW (pg DNA/mg TM) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

In neun von 25 Rasterproben wurden quantifizierbare Befallsintensitäten von *F. avenaceum* gemessen. Für Teilflächen, auf denen keine artspezifische DNA detektiert wurde, wurde ein Gap-Cluster ausgewiesen (Abb. 29). Mit einem **Aggregationsindex** von 1,196 ließ sich eine Aggregation feststellen. Die höchsten Befallsintensitäten wurden für die Art *F. graminearum* nachgewiesen. Neben einem Patch-Cluster im Bereich der höchsten Befallsintensitäten wurde ein ausgedehntes Gap-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,592 zeigte, dass die räumliche Verteilung der artspezifischen DNA von *F. graminearum* stark aggregiert war und dies statistisch hochsignifikant abgesichert werden konnte. In insgesamt neun Rasterproben konnte Befall durch *F. poae* quantifiziert werden. Es wurden ein Patch- und ein Gap-Cluster ausgewiesen. Mit einem Aggregationsindex von 1,563 konnte eine starke Aggregation statistisch höchst signifikant belegt werden.

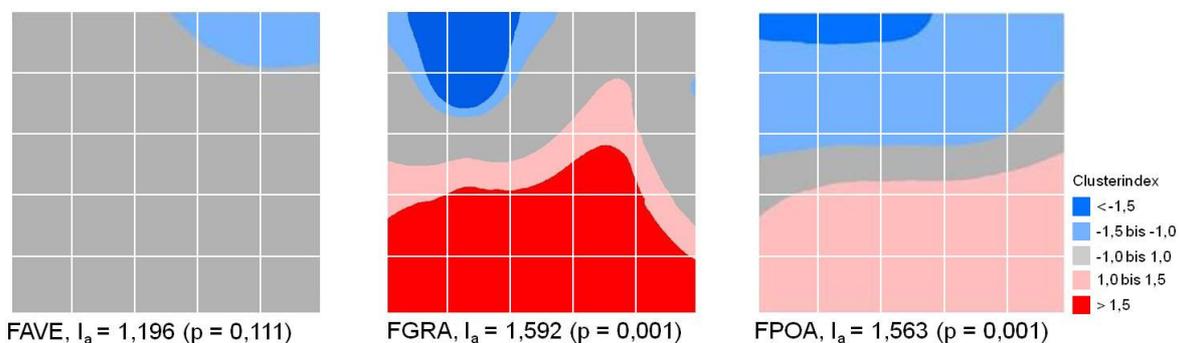


Abb. 29: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Befallsintensitäten von *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

Mykotoxinbelastung der Weizenkörner

Die Mykotoxinanalyse ergab in allen Rasterproben eine Belastung der Körner mit DON. Die durchschnittlichen Gehalte lagen bei 5916 ng/g, bei einem Minimum von 1086 und einem Maximum von 9268 ng/g (Tab. 34). Die durchschnittliche Kontamination der Körner mit 3Ac-DON lag bei 34 ng/g. Auf 23 Teilflächen wurde es mit einem Minimum von 15 und einem Maximum von 125 ng/g detektiert. Eine Belastung der Weizenkörner mit NIV lag im Mittel bei 114 ng/g. Nachgewiesen werden konnte das Toxin in 12 Rasterproben und lag zwischen 101 und 1497 ng/g. Zearalenon wurde mit einer durchschnittlichen Belastung von 457 ng quantifiziert und variierte auf den 25 Teilflächen zwischen 146 und 3685 ng/g. Moniliformin-Gehalte lagen auf der untersuchten Fläche im Durchschnitt bei 76 ng/g. Detektiert wurde das Mykotoxin in zehn Rasterproben bei einem Minimum von 37 und einem Maximum von 631 ng/g. Enniatin B wurde in allen Rasterproben nachgewiesen und wies eine durchschnittliche Kontamination von 772 ng/g, bei einem Minimum von 32 und einem Maximum von 2349 ng/g auf.

Tab. 34: Mykotoxingehalte von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007) Minima und Maxima sind hervorgehoben

Rasterprobe	Mykotoxin-Konzentration [ng/g]					
	DON (20) ¹	3Ac-DON (10)	NIV (80)	ZEA (4)	MON (20)	ENNB (2)
A1	9268	70	202	174	105	936
A2	8600	125	189	176	-	47
A3	5946	42	1497	215	-	65
A4	5038	27	115	146	-	141
A5	6013	22	105	305	37	1407
B1	8146	46	127	366	-	687
B2	9178	56	128	207	-	77
B3	6093	25	-	415	60	539
B4	5610	-	-	1150	367	2349
B5	5669	24	-	450	-	116
C1	3859	16	112	269	261	1808
C2	1086	-	-	308	-	135
C3	6717	15	105	318	181	1865
C4	5008	17	101	456	631	2095
C5	8239	11	-	3685	-	205
D1	7731	36	-	201	72	1168
D2	7470	34	-	372	-	343
D3	4535	42	164	417	91	1292
D4	5964	17	-	448	-	91
D5	6060	34	-	222	-	402
E1	3397	17	-	272	103	2458
E2	2431	32	-	197	-	169
E3	4116	45	-	261	-	473
E4	5752	42	-	190	-	32
E5	5969	45	-	202	-	408
MW ²	5916	34	114	457	76	772

¹ Quantifizierungslimit; - = < Quantifizierungslimit; ² MW= Mittelwert

Statistische Bewertung der räumlichen Verteilung der Mykotoxingehalte

Die hohen **Dispersionsindizes** für DON, NIV, ZEA, MON und ENNB zeigten, dass eine hohe Variabilität innerhalb der Messwerte für diese Mykotoxine vorlag (Tab. 35). Der Dispersionsindex von 19,1 für die Verteilung von 3Ac-DON war im Vergleich zu den anderen Mykotoxinen mindestens um den Faktor 14 kleiner, dennoch war die Verteilung der 3Ac-DON-Gehalte variabel.

Tab. 35: Dispersionsindizes für die Mykotoxingehalte (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	DON	3Ac-DON	NIV	ZEA	MON	ENNB
MW ¹	5916 ± 2029	34,0 ± 25,3	117 ± 296	457 ± 701	78,0 ± 147	772,0 ± 797
VMR ²	696	19,1	749	1075	278	823

¹MW (in ng/g) ± SD; ²Varianz-Mittelwert-Verhältnis

Die Aggregationsanalyse für MON ergab einen **Aggregationsindex** von 0,836 und die räumliche Verteilung war nicht von einer zufälligen Verteilung zu unterscheiden (Tab. 36). Der Aggregationsindex für NIV wies mit 1,036 auf eine Verteilung hin, wie man sie von einer Zufallsverteilung erwarten würde. Deoxynivalenol war auf dieser Beprobungsfläche das dominante Mykotoxin und es wurden zwei Patch-Cluster in Zonen höherer Messwerte und ein Gap-Cluster in Zonen kleiner Messwerte ausgewiesen (Abb. 30). Der errechnete Aggregationsindex von 0,959 wies dennoch auf eine zufällige Verteilung hin. In fast allen Rasterproben wurde eine Belastung durch 3Ac-DON nachgewiesen und es wurden ein Gap- und ein Patch-Cluster ausgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,592 wies auf eine starke Aggregation hin, die statistisch abgesichert werden konnte. In allen Rasterproben wurde eine Kontamination der Körner mit ZEA nachgewiesen. Der Aggregationsindex von 1,189 zeigte, dass die räumliche Verteilung dieses Mykotoxins eine Tendenz zur Aggregation hatte. In allen Rasterproben wurden Belastungen durch ENNB gemessen und mit einem Aggregationsindex von 0,992 war die räumliche Verteilung von ENNB nicht von einer zufälligen zu unterscheiden.

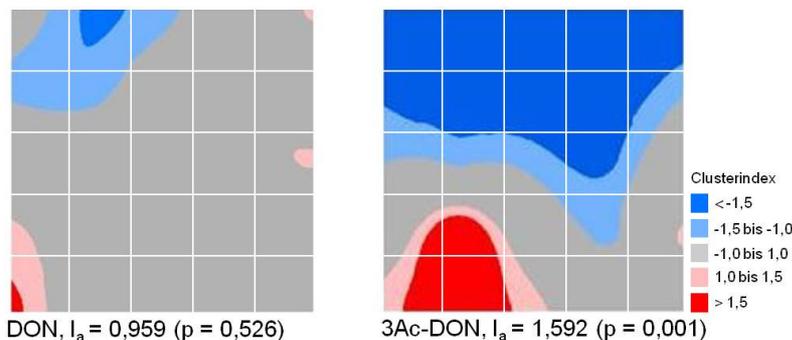


Abb. 30: Räumliche Darstellung der Clusterindizes der Gehalte von DON und 3Ac-DON (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

Die folgende Tabelle 36 gibt eine Zusammenfassung der Aggregationsindizes der Mykotoxingehalte auf der 1 x 1 m Beprobungsfläche der Sorte Kris.

Tab. 36: Aggregationsindizes für Mykotoxingehalte in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	Mykotoxin					
	MON	NIV	DON	3 Ac-DON	ZEA	ENNB
I _a ¹	0,836	1,036	0,959	1,592	1,189	0,992
P ²	0,862	0,412	0,526	0,001	0,125	0,448

¹ Aggregationsindex nach SADIE, I_a = 1: Verteilung zufällig; I_a < 1: Verteilung ist regelmäßiger, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; I_a > 1: Verteilung zeigt größere Aggregation, als von einer zufälligen Verteilung zu erwarten; ² Irrtumswahrscheinlichkeit p = signifikant: p ≤ 0,05; hoch signifikant: p ≤ 0,01; höchst signifikant: p ≤ 0,001

Korrelationen der Befallsparameter von *Fusarium* spp.

Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Befallsintensität

Für die Arten *F. graminearum* (r = 0,242) und *F. poae* (r = 0,194) waren Befallshäufigkeit und Befallsintensität in Rasterproben der Sorte Kris schwach korreliert. Für *F. avenaceum* wies die Korrelation einen negativen Koeffizienten auf (r = -0,021). Keine Korrelation konnte statistisch abgesichert werden.

Zusammenhang zwischen dem Auftreten der Mykotoxine

In den 25 Rasterproben der Sorte Kris wurde ein höchst signifikanter Zusammenhang zwischen ENNB- und MON-Gehalten der Weizenkörner ermittelt. DON-Belastungen korrelierten höchst signifikant mit 3Ac-DON-Kontaminationen (Tab. 37). Ein negativer Zusammenhang bestand auch zwischen dem Auftreten von ZON und 3Ac-DON.

Tab. 37: Zusammenhang zwischen den Mykotoxingehalten von Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

		MON	NIV	DON	3Ac-DON	ZON	ENNB
		Korrelationskoeffizient ¹					
MON	p ²		0,163	-0,121	-0,172	0,181	0,762
NIV		0,320		0,190	0,205	-0,260	0,004
DON		0,427	0,215		0,680	-0,167	-0,147
3Ac-DON		0,262	0,187	0,000		-0,335	-0,139
ZON		0,233	0,090	0,243	0,020		0,247
ENNB		0,000	0,980	0,304	0,337	0,084	

Kendalls Tau, zweiseitig; ¹ Korrelationskoeffizient nach Kendall; ² Irrtumswahrscheinlichkeit p = signifikant: p ≤ 0,05; hoch signifikant: p ≤ 0,01; höchst signifikant: p ≤ 0,001

Zusammenhang zwischen Intensität des *Fusarium*-Befalls und dem Gehalt von Mykotoxinen

Die Menge artspezifischer DNA von *F. graminearum* korrelierte signifikant mit der DON-Belastung von Weizenkörnern (Tab. 38). Signifikante Zusammenhänge von *F. graminearum* mit NIV, 3Ac-DON und ZEA bestanden nicht. Weder für MON noch für ENNB wurde ein signifikanter Zusammenhang mit der Befallsintensität von *F. avenaceum* festgestellt. Die pilzliche Biomasse von *F. poae* zeigte einen signifikanten Zusammenhang mit NIV-Gehalten auf dem 10 %-Niveau.

Tab. 38: Korrelation zwischen Befallsintensität von *F. graminearum*, *F. avenaceum* bzw. *F. poae* und Mykotoxingehalten in Weizenkörnern (1 x 1 m; Sorte Kris; Poppelsdorf; 2007)

	MON	NIV	DON	3Ac-DON	ZEA	ENNB
FGRA		0,144 ¹ 0,349 ²	0,313 0,028	0,152 0,292	0,000 1,000	
FAVE	0,242 0,112					0,233 0,102
FPOA		0,284 0,065				

¹ Korrelationskoeffizient nach Kendall; ² Irrtumswahrscheinlichkeit p = signifikant: p ≤ 0,05; Schattierung: Mykotoxin wird von dieser *Fusarium*-Art nicht produziert

3.3 Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine an Einzelähren

Das variable Auftreten der Befallsparameter von *Fusarium* spp. in Misch- und Rasterproben führte im Jahr 2009 zu der Untersuchung der kleinsten Skalenebene. Mit Untersuchung der Einzelähre sollte überprüft werden, inwiefern sich die Verteilungsmuster von *Fusarium* spp. auf Ebene der Einzelpflanze von vorhergegangenen Probenahmen unterscheiden.

Am Standort Poppelsdorf wurde auf der Ebene von 20 x 20 cm die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine von Einzelähren bzw. deren Ährenabschnitten an der Sorte Ritmo untersucht. Des Weiteren wurden die Blühzeitpunkte der Ähren innerhalb des Zeitraums der Weizenblüte in „früh“ bzw. „spät“ eingeteilt.

3.3.1 Witterung und Ascosporenflug von *Gibberella zeae*

Im Erntejahr 2009 wurde der Ascosporenflug von *Gibberella zeae* vom 27.05. bis zum 24.06. mit einer Sporenfalle ermittelt (Abb. 31). Die Niederschlagsmenge und Temperaturverläufe für diesen Zeitraum wurden von der Klimastation Poppelsdorf aufgezeichnet. Der Zeitraum der Weizenblüte erstreckte sich vom 29.05. bis zum 22.06.2009. Zu Beginn der Anthese stieg die Temperatur bis zu einem Tagesmittel von 19,2 °C an, sank aber im Laufe der Woche bis auf eine durchschnittliche Tagestemperatur von 8,5 °C ab. Mit dem Regenereignis während dieser Zeit

stieg die Anzahl der Ascosporen in der Luft bis zum 05.06. auf 593 Sporen an. Der 06.06. war mit 9,5 mm Niederschlag der kälteste Tag und der Ascosporenflug von *Gibberella zeae* fiel bis zum 08.06. auf 446 Sporen ab, stieg aber am 11.06., dem niederschlagsreichsten Tag, wieder bis auf 621 Sporen an. Nach dem Regenereignis fiel die Anzahl ermittelter Sporen auf 403 ab. In den folgenden niederschlagsfreien Tagen bis zum 16.06. erhöhte sich der Sporenflug leicht und stieg nach dem Regenereignis an diesem Tag wieder stark an. Die nächsten Tage waren niederschlagsarm und die durchschnittlichen Temperaturen lagen bei etwa 14,7 °C. Am 24.06. wurde der Höchstwert von 708 Ascosporen ermittelt. In diesem Zeitraum ließ sich ein Zusammenhang zwischen Temperatur und Sporendichte in der Luft erkennen.

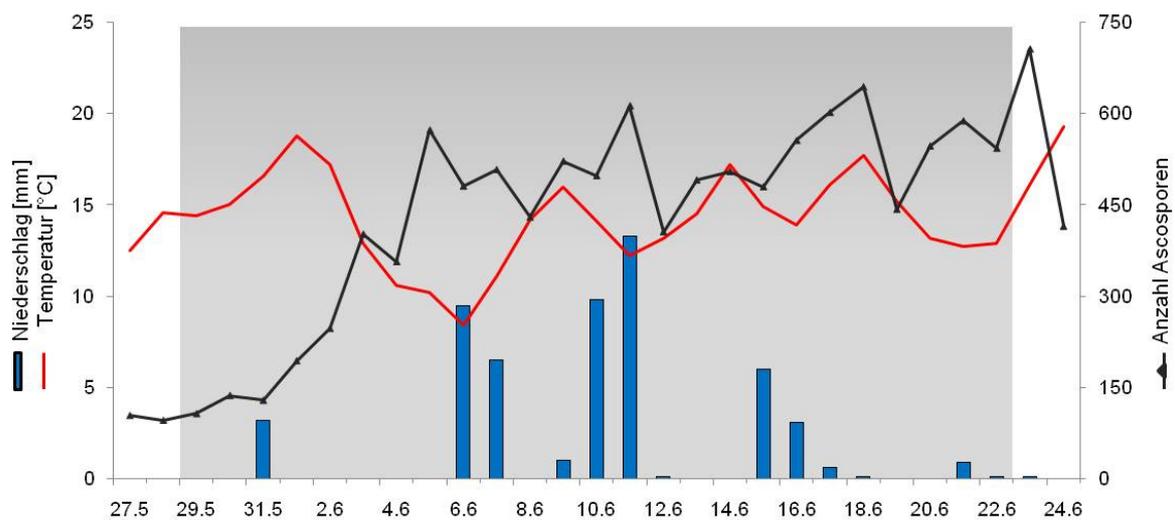


Abb. 31: Witterungsverlauf und Sporenfänge von *Gibberella zeae* mittels Sporenfalle; Ansaughöhe: 50 cm über der Erdoberfläche; Ansaugvolumen: 10 l/min; Zeitraum: 27.05. bis 24.06.2009; Schattierung: Zeitraum der Weizenblüte (Poppelsdorf; 2009)

3.3.2 Befallsintensitäten und Mykotoxinbelastung

Befallsintensität der Ähren auf Beprobungsfläche 1

Auf der ersten 20 x 20 cm großen Untersuchungsfläche wurden Standort und Blühzeitpunkte für insgesamt 15 Weizenpflanzen ermittelt. Es wurden Befallsintensitäten von *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* detektiert. An sechs Einzelähren konnte ein Befall von *Fusarium* spp. über dem Quantifizierungslimit (LOQ) von 9 pg/µl quantifiziert werden (Abb. 32). Bei fünf Ähren lag ein früher Blühzeitpunkt vor, eine Ähre blühte später. Die dominante Art war *F. graminearum*. Sie wurde an Körnern von drei Ähren detektiert und variierte zwischen 1,1 und 1483 pg DNA/mg TM. Artspezifische DNA-Gehalte von *F. poae* wurden an drei Pflanzen nachgewiesen, sie variierten zwischen 0,9 und 87,8 pg DNA/mg TM. An einer Ähre wurde eine Befallsintensität von 5,7 pg DNA/mg TM der Art *F. avenaceum* nachgewiesen. Zwei Einzelähren wiesen

artspezifische DNA von zwei *Fusarium*-Arten auf. Insgesamt variierte die Befallsintensität von *Fusarium* spp. zwischen 0,9 und 1483 pg DNA/mg TM.

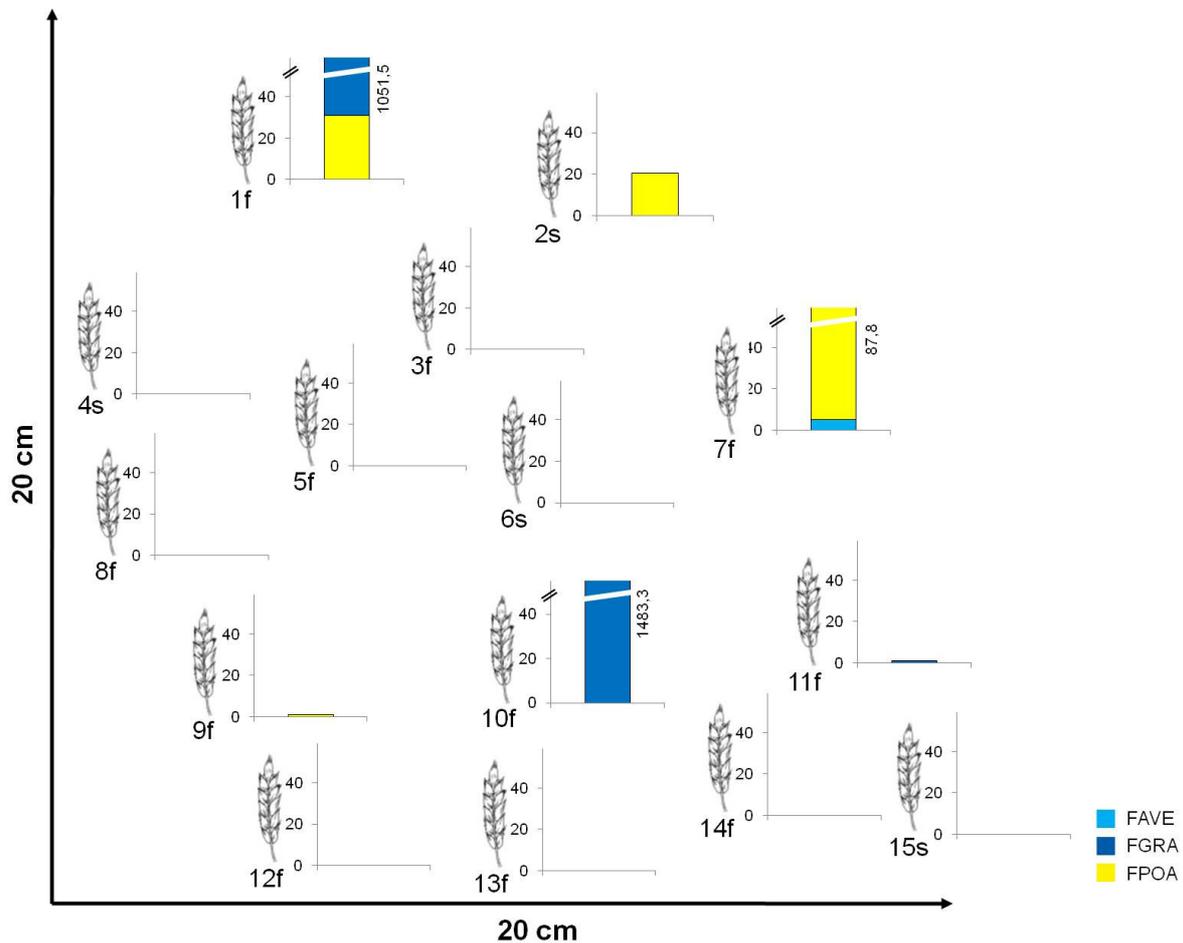


Abb. 32: Räumliche Verteilung der Befallsintensität von *Fusarium* spp. in Weizenkörnern von Einzelähren auf Beprobungsfläche 1; die Blühzeitpunkte sind angegeben: f = früh: Blühbeginn vor dem 12.06.2009 eingesetzt, s = spät: Blühbeginn nach dem 12.06.2009 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)

Befallsintensität der Ähren auf Beprobungsfläche 2

Auf der zweiten 20 x 20 cm großen Untersuchungsfläche wurden die Standorte und Blühzeitpunkte der insgesamt 14 Weizenpflanzen ermittelt. Es wurde Befall der Arten *F. avenaceum*, *F. graminearum* und *F. poae* detektiert (Abb. 33). An zehn Ähren konnten Befallsintensitäten von *Fusarium* spp. über dem Quantifizierungslimit gemessen werden. Bei acht Ähren lag ein früher Blühzeitpunkt vor, zwei Ähren blühten später. Wie auf Beprobungsfläche 1 war *F. graminearum* dominant. Die artspezifische DNA wurde an Körnern von vier Einzelpflanzen nachgewiesen, der Gehalt variierte zwischen 1,6 und 126,3 pg DNA/mg TM. Die Art *F. avenaceum* konnte an fünf Ähren nachgewiesen werden. Die Befallsintensität variierte zwischen 1,4 und 37,5 pg DNA/mg TM. An Körnern von zwei Weizenpflanzen wurde artspezifische DNA

von *F. poae* nachgewiesen, die Gehalte lagen bei 7,4 und 11,3 pg DNA/mg TM. Insgesamt lag die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. zwischen 1,4 und 126,3 pg DNA/mg TM.

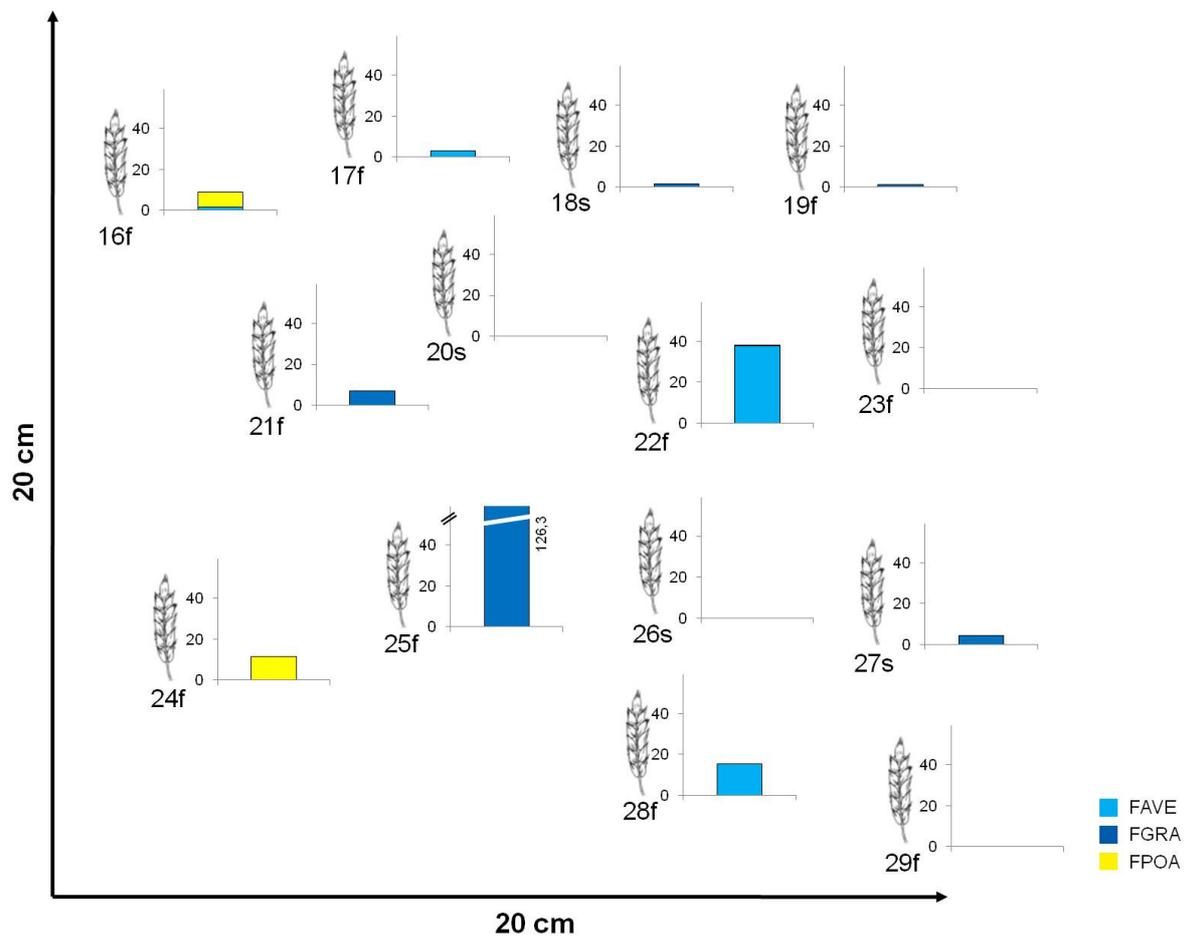


Abb. 33: Räumliche Verteilung der Befallsintensität von *Fusarium* spp. in Weizenkörnern von Einzelähren auf Beprobungsfläche 2; die Blühzeitpunkte sind angegeben: f = früh: Blühbeginn vor dem 12.06.2009 eingesetzt; s = spät: Blühbeginn nach dem 12.06.2009 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)

Verteilung der Befallsintensitäten innerhalb der Ähren auf Beprobungsfläche 1

In Weizenkörnern einer Ähre wurde *Fusarium*-spezifische DNA (*F. avenaceum*: 5,7 pg DNA/mg TM) im oberen Abschnitt nachgewiesen (Abb. 34). Drei Einzelpflanzen wiesen im mittleren Ährenabschnitt quantifizierbare Befallsintensitäten zwischen 1,9 und 87,8 pg DNA/mg TM auf. Quantifizierbare DNA im unteren Ährenabschnitt konnte in Körnern von vier Ähren zwischen 1,1 und 1483 pg DNA/mg TM ermittelt werden. Keine der untersuchten Einzelpflanzen wies in allen drei Abschnitten der Ähre eine quantifizierbare Befallsintensität durch *Fusarium* spp. auf.

Verteilung der Befallsintensitäten innerhalb der Ähren auf Beprobungsfläche 2

Wie auf der ersten Beprobungsfläche wurde in Weizenkörnern einer Ähre *Fusarium*-spezifische DNA (*F. avenaceum*: 1,4 pg DNA/mg TM) im oberen Ährenabschnitt nachgewiesen (Abb. 34). Sechs Einzelpflanzen wiesen im mittleren Teil der Ähre Befallsintensitäten mit *Fusarium* spp. zwischen 2,9 und 37,5 pg DNA/mg TM auf. Quantifizierbare DNA im unteren Abschnitt wurde in Körnern von fünf Weizenähren detektiert und variierte zwischen 0,7 und 126,3 pg DNA/mg TM. Keine der untersuchten Ähren wies in allen drei Ährenabschnitten eine *Fusarium*-Befallsintensität auf.

Mykotoxingehalte der Körner auf Beprobungsfläche 1

An sieben Ährenabschnitten wurden Kontaminationen mit NIV, DON, 3Ac-DON, 15Ac-DON und BEA nachgewiesen (Tab. 39). Die Mykotoxine 3Ac-DON und BEA wurden an jeweils einem Abschnitt der Ähre detektiert. NIV-Belastungen wurden in Körnern von zwei Ährenabschnitten nachgewiesen. Kontaminationen mit DON und seinem acetylierten Derivat 15Ac-DON wurden jeweils in fünf Teilen von Einzelähren detektiert. Mit einem Maximum von 30704 ng/g war die Belastung von Weizenkörnern mit DON am höchsten. Mykotoxin-Gehalte wurden ausschließlich in Körnern von Ähren nachgewiesen, in denen eine quantifizierbare Befallsintensität von *Fusarium* spp. identifiziert wurde (vgl. Abb. 32).

Mykotoxingehalte der Körner auf Beprobungsfläche 2

In 16 Abschnitten der untersuchten Ähren wurden mit NIV, DON und ENNB drei Mykotoxine über dem Quantifizierungslimit nachgewiesen (Tab. 39). An einer Ähre wurde im unteren Abschnitt ein NIV-Gehalt von 990 ng/g detektiert. Kontaminationen mit DON wurden in Körnern von neun Ährenabschnitten nachgewiesen. In sechs Ährenabschnitten wurden ENNB-Belastungen detektiert. Wie bei der Untersuchung der ersten Beprobungsfläche wurden Mykotoxin-Gehalte ausschließlich in Weizenkörnern solcher Ähren identifiziert, in denen auch *Fusarium*-Befall quantifiziert werden konnte (vgl. Abb. 33).

Insgesamt war zu erkennen, dass von 29 untersuchten Ähren 16 quantifizierbaren Befall mit *Fusarium* spp. aufwiesen. Mykotoxingehalte wurden ausschließlich in Ähren detektiert, in denen ebenfalls Befall mit *Fusarium* spp. nachgewiesen wurde. Bei Betrachtung der kleinsten Skalenebene, den Ährenabschnitten, wurden in sieben Fällen Mykotoxine trotz fehlenden Nachweises von *Fusarium*-DNA detektiert.

		Mykotoxin [ng/g]																	
		NIV (25) ¹			DON (25)			3 Ac-DON (20)			15 Ac-DON (25)			BEA (8)			ENNB (8)		
Ähre	Abschnitt	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten	oben	Mitte	unten
		1f	-	-	-	-	-	10811	-	-	-	-	-	183	-	-	-	-	-
	2s	-	-	1350	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	7f	-	720	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	70	-	-	-	-
	10f	-	-	-	-	3278	30704	-	-	120	-	75	675	-	-	-	-	-	-
	11f	-	-	-	-	1910	1080	-	-	-	-	58	25	-	-	-	-	-	-
	16f	-	-	-	66	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	11,4	-
	18s	-	-	-	845	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	19f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	20
	21f	-	-	-	-	226	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	22f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	905	36	-
	24f	-	-	990	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	25f	-	-	-	26	82	174	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	27s	-	-	-	-	125	36	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	28f	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	30	1315

Tab. 39: Verteilung der Mykotoxingehalte in Weizenkörnern aus Ährenabschnitten der Beprobungsflächen 1 und 2 (20 x 20 cm; Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009)

3.3.3 Einfluss des Ährenabschnitts und Zeitpunkt der Blüte auf Befall und Mykotoxinbelastung

Die Untersuchung des Effekts von Ährenabschnitt mit Blühzeitpunkt als Kovariable auf die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. ergab, dass der Abschnitt der Ähre einen Einfluss auf das Auftreten von *Fusarium*-spezifischer DNA hatte (Tab. 40). Auch für das Vorhandensein von Mykotoxingehalten konnte ein Einfluss des Faktors Ährenabschnitt ermittelt werden.

Tab. 40: Einfluss des Ährenabschnitts und Blühzeitpunkts auf die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. und Mykotoxinkontamination von Weizenkörnern in Einzelähren

Kovariable	Blühzeitpunkt	Befallsintensität FSPP				Mykotoxinkontamination			
		FG	MQ	F	sig.	FG	MQ	F	sig.
Haupteffekt	Ährenabschnitt	2	0,551	2,528	0,087	2	1,654	2,714	0,073
Modell		3	0,553	2,537	0,063	3	1,313	2,155	0,101
Residuen		74	0,218			74	0,609		
Insgesamt		77	0,231			77	0,637		

ANOVA, einfaktoriell; Schattierung: signifikant auf 10 %-Niveau; FG = Freiheitsgrade; MQ = Mittel der Quadrate

Des Weiteren wurde zur Ermittlung des Einflusses von Ährenabschnitt und Blühzeitpunkt auf die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. und Mykotoxinkontamination der Rangkorrelationskoeffizient errechnet (Tab. 41). Demnach ergab sich ein Zusammenhang zwischen Ährenabschnitt und Befallsintensität. Ein Zusammenhang von *Fusarium*-spezifischer DNA und Blühzeitpunkt wurde statistisch nicht bestätigt. Die Mykotoxinkontamination korrelierte signifikant mit dem Abschnitt der Ähre. Für die Mykotoxingehalte wurden keine signifikanten Zusammenhänge mit dem Zeitpunkt der Blüte festgestellt.

Tab. 41: Zusammenhang zwischen Ährenabschnitt bzw. Blühzeitpunkt und *Fusarium*-Befallsintensität bzw. Mykotoxingehalt

		Ährenabschnitt	Blühzeitpunkt
		r	r
Befallsintensität FSPP	r	0,209	-0,175
	sig.	0,066	0,125
	N	78	78
Mykotoxinkontamination	r	0,254	-0,052
	sig.	0,025	0,649
	N	78	78

Spearman'sche Rangkorrelation, zweiseitig: signifikant $p \leq 0,05$; Schattierung: signifikant auf 10 %-Niveau

Der Einfluss des Ährenabschnitts auf die Befallsintensität mit *Fusarium* spp. und der signifikante Zusammenhang zwischen Mykotoxingehalten und Ährenabschnitt wird im Folgenden dargestellt (Abb. 35). Die unteren Abschnitte der Ähren wiesen sowohl einen stärkeren Befall als auch höhere Mykotoxinbelastungen auf.

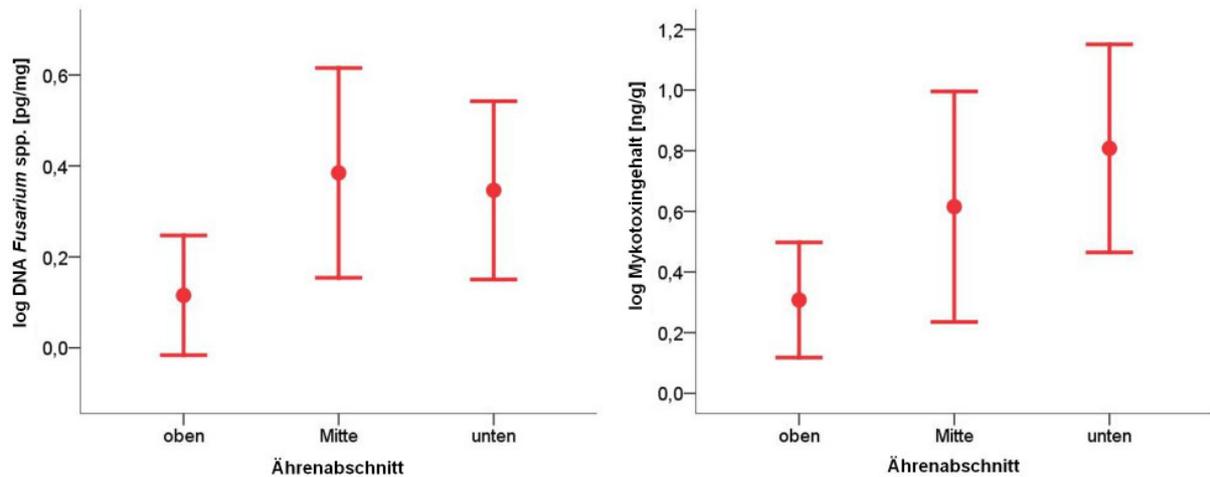


Abb. 35: Einfluss von Abschnitt der Ähre auf die *Fusarium*-Befallsintensität und die Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern (Sorte Ritmo; Poppelsdorf; 2009), dargestellt ist der Standardfehler des Mittelwerts (SEM)

4 Diskussion

Die Mykotoxinbelastung von Weizenkörnern hängt unmittelbar mit der Besiedlung der Ähre mit Pathogenen aus der Gattung *Fusarium* zusammen. Im Fokus der Bekämpfung steht nicht die Vermeidung quantitativer Ernteverluste durch die Pilze, sondern die Verminderung von Kontaminationen des Ernteguts mit toxischen Sekundärmetaboliten (STRANGE und SCOTT, 2005). Untersuchungen zeigen, dass das Auftreten von *Fusarium* spp. und der assoziierten Mykotoxine selbst innerhalb eines Schlages eine große Variabilität aufweist (XU *et al.*, 2008). Für die Entwicklung effektiver Beprobungsstrategien zur Abschätzung der Mykotoxinbelastung vor der Ernte, ist es also entscheidend die Epidemiologie von *Fusarium* spp. und das Zusammenwirken von Einfluss- und Risikofaktoren zu kennen.

Ziel der vorliegenden Arbeit war es, das kleinräumige Auftreten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine zu erfassen und die räumliche Verteilung der Befallsparameter auf unterschiedlichen Skalenebenen zu analysieren, um Verteilungsmuster der partiellen Taubähigkeit beurteilen zu können.

Zur Charakterisierung der Verteilung von *Fusarium* spp. auf den unterschiedlichen Skalenebenen wurde der Dispersionsindex als Maß der Variabilität herangezogen. Die hohen Standardabweichungen zwischen den Wiederholungen und Dispersionsindizes > 1 spiegelten die hohe Variabilität der Verteilung von *Fusarium* spp. wider. Dies steht in Übereinstimmung mit den Ergebnissen von OERKE *et al.* (2010), die eine hohe Variabilität von *Fusarium*-Befallshäufigkeiten in Weizenschlägen nachwies. Das Varianz-Mittelwert-Verhältnis gab folglich Aufschluss darüber, dass ein variables Verteilungsmuster vorlag, ließ aber keine Aussage zur räumlichen Verteilung zu, denn Befallsparameter von *Fusarium* spp. treten nicht grundsätzlich zufällig oder regelmäßig auf, sondern können Aggregationen zeigen (SHAH und BERGSTROM, 2001; WILHELM und JONES, 2005; XU *et al.*, 2008). Die VMR-Werte erlaubten einen Vergleich der Variabilität des Auftretens von *Fusarium* spp. innerhalb sowie zwischen Misch- und Rasterproben. Ein direkter Vergleich zwischen VMR-Werten für gezählte Werte (Befallshäufigkeit) und VMR-Werten für gemessene Werte (Befallsintensität und Mykotoxingehalt) ist nicht möglich. Jedoch führte die Datenstruktur eines jeden Befallsparameters durch viele Null- und Extremwerte oftmals zu Dispersionsindizes > 1 und die Aussagekraft der VMR-Werte war begrenzt. Als Konsequenz daraus wurde eine räumliche Analyse des Auftretens von *Fusarium* spp. mittels Rasterproben durchgeführt. Wie die Gegenüberstellung von Misch- und Rasterproben zeigte, wiesen beide Beprobungsarten das gleiche Artenspektrum auf. Ähnliche Ergebnisse spiegelten sich im Vergleich zweier Rasterproben innerhalb eines Feldes wider. Dies bestätigte die Untersuchungen von XU *et al.* (2008), die bei der Mehrfachbeprobung einer Fläche davon ausgehen, dass die Wahrscheinlichkeit

des Nachweises von *Fusarium*-Arten in einer Probe mit dem Nachweis in den anderen Proben zunimmt.

Die Zusammensetzung des *Fusarium*-Erregerkomplexes wird geographisch durch Klimaregionen bestimmt (BACKHOUSE *et al.*, 2001; BOTTALICO und PERRONE, 2002), doch die Variabilität des Erregerspektrums ist sehr stark vom Standort und Jahr abhängig (OERKE *et al.*, 2001). In den Versuchsjahren 2007 und 2008 wurden *F. graminearum*, *F. avenaceum*, *F. poae* und *F. culmorum* als häufigste Arten isoliert. Für den Erregerkomplex der partiellen Taubährigkeit sind dies nach PARRY *et al.* (1995) und LOGRIECO *et al.* (2003) die typischen Arten. Ferner war ein verstärktes Auftreten der Art *F. tricinctum* zu beobachten, welche nach XU *et al.* (2005, 2008) mit den Arten *F. avenaceum* und *F. culmorum* generell in den kühl-maritimen Gebieten Europas auftritt. Im Jahr 2007 wurde zusätzlich ein Befall mit *F. proliferatum* nachgewiesen, eine Art, die jedoch eher in wärmeren Gebieten auftritt und mehr mit der Kolbenfäule des Mais assoziiert wird als mit der partiellen Taubährigkeit des Weizens (BOTTALICO und PERRONE, 2002; LOGRIECO *et al.*, 2003).

Alle untersuchten Proben wiesen einen Befall mit mindestens zwei und maximal sechs verschiedenen *Fusarium*-Arten auf. Analysen zum *Fusarium*-Artenspektrum durch SCHWEYDA (1996) bestätigen dies, wonach immer mehrere Arten gleichzeitig den Wirt besiedeln und der Witterungsverlauf und die Konkurrenzfähigkeit der einzelnen Pathogene darüber entscheiden, welche sich durchsetzen. Vorherrschende Art auf allen Versuchsflächen war mit einer Ausnahme *F. graminearum*, im Gegensatz zu den Untersuchungsergebnissen von OERKE *et al.* (2001) und MEYER (2005) und SCHLANG (2010) die *F. poae* und *F. avenaceum* als dominierende Erreger im Rheinland nachwies. Die Ergebnisse dieser Arbeit weisen auf ein anderes *Fusarium*-Artenspektrum im Rheinland hin. Die Temperaturansprüche der einzelnen Arten unterscheiden sich teils deutlich. Während *F. graminearum* Temperaturen von bis zu 30 °C bevorzugt, entwickeln sich *F. poae* und *F. culmorum* am besten bei Temperaturen von ca. 25 °C und *F. avenaceum* bei kühleren Bedingungen um 20 °C (BOTTALICO und PERRONE, 2002; PARRY *et al.*, 1995). Einerseits kann angenommen werden, dass sich das Artenspektrum im Rheinland aufgrund eines möglichen Temperaturanstiegs verschoben und somit die wärmeliebende Art *F. graminearum* an Bedeutung zugenommen hat, andererseits könnten die orts- und jahresspezifischen Faktoren das vorrangige Auftreten dieser Art begünstigt haben. Aus Süddeutschland berichtete RINTELEN (2000) von einem zunehmenden Auftreten von *F. graminearum* in den letzten Jahrzehnten infolge des stärker werdenden Maisanbaus. KRAUTHAUSEN *et al.* (2003) bezeichneten *F. graminearum* als Hauptverursacher für die partielle Taubährigkeit in Deutschland.

Der Witterungsverlauf ist der Haupteinflussfaktor auf den *Fusarium*-Befall, welcher in Abhängigkeit von feucht warmen Bedingungen, durch ausreichende Temperaturen (BRENNAN *et al.*, 2005) und Niederschlagsmengen (DOOHAN *et al.*, 2003) stattfindet. Im Jahr 2007 fiel die durchschnittliche *Fusarium*-Befallshäufigkeit am Standort Wiesengut am geringsten aus. Die Witterung zur Blüte war, bis auf ein Regenereignis zum Ende der Blüte, durchgehend trocken. Aufgrund der geringen Niederschläge waren die Infektionsbedingungen ungünstig, was sich in einer mittleren Befallshäufigkeit widerspiegelte. In der gleichen Vegetationsperiode war der Anteil

Fusarium-infizierter Körner am Standort Poppelsdorf am höchsten. Hier begann die Blüte eine Woche später und in diesem Zeitraum fielen regelmäßige Niederschläge. Diese Ergebnisse bestätigen, dass die von PARRY *et al.* (1995) und LIENEMANN (2002) beschriebenen lokalen Witterungseinflüsse zum anfälligsten Stadium der Weizenblüte den entscheidenden Faktor bilden, der den Befall und somit die Befallshäufigkeit beeinflusst. Im Jahr 2008 lag die mittlere *Fusarium*-Befallshäufigkeit am Standort Klein-Altendorf bei 33,9 %. Hier fielen ebenfalls zum Zeitraum der Blüte regelmäßige Niederschläge, was nach OBST und FUCHS (2000) neben der absoluten Niederschlagsmenge für eine erfolgreiche *Fusarium*-Infektion der Ähre von Bedeutung ist.

Nach SCHLÜTER *et al.* (2006) übt nach der Witterung die Anfälligkeit einer Sorte den größten Einfluss auf dem *Fusarium*-Befall aus. Als Weizensorten wurden Drifter, Dekan und Tommi untersucht. Durch die Bundessortenliste wurden die drei Sorten mit mittlerer *Fusarium*-Anfälligkeit gleich eingestuft (ANONYM, 2007c). Doch die Häufigkeit befallener Körner und das *Fusarium*-Artenspektrum dieser drei Sorten variierten stark. So lagen die durchschnittlichen Befallshäufigkeiten in Proben von Drifter und Dekan auf einem ähnlichen Niveau, wohingegen die Befallshäufigkeit von Tommi um mehr als das zweifache höher lag. Auch bei Untersuchungen von WOSNITZA (2000) traten Abweichungen von der BSA-Benotung besonders bei Sorten im mittleren Anfälligkeitsbereich auf.

Da die drei untersuchten Sorten im Jahr 2008 den gleichen Standort- und Witterungsbedingungen unterlagen, ist eine spätere Blüte eine mögliche Erklärung für den erhöhten Befall der Sorte Tommi in diesem Untersuchungszeitraum. Innerhalb einheitlich bewirtschafteter Schläge kann von kleinskaligen Heterogenitäten ausgegangen werden, die sich in räumlich variierenden Zeiten der Blüte und der Abreife widerspiegeln und mit einem räumlich differenzierten Befall mit toxinogenen Pilzen einhergehen (DELIN, 2004; NORNG *et al.*, 2005). Es wird angenommen, dass die zeitliche und räumliche Koinzidenz aus vorhandener Inokulummenge und den standortspezifischen Witterungsbedingungen während des empfindlichen Blühstadiums der Pflanzen bei Tommi günstiger waren. Bei einem einheitlichen Zeitpunkt der Blüte der drei Sorten wäre es vermutlich zu einem ähnlichen Befallsniveau gekommen. Des Weiteren kann die kleinräumig variierende Bestandestemperatur möglicherweise den Pathogenbefall innerhalb von Feldern beeinflussen. So wurden bereits durch Erfassung des Mikroklimas die Krankheitsentwicklung und räumliche Verteilung von *Pseudoperonospora cubensis* in Gurkenbeständen (LINDENTHAL, 2005) und der *Cervospora*-Blattfleckenkrankheit an Rüben (HEINRICH, 2011) mittels Thermografie detektiert. Eine stabile Beurteilung der Sortenanfälligkeit wird somit durch Genotyp x Umweltinteraktionen erheblich erschwert (WILCOXSON *et al.*, 1992; DORMANN und OETTLER, 1993; MIEDANER und PERKOWSKI, 1996).

Nach WEINERT und WOLF (1995) kann eine verlängerte Reifephase die Ausbreitung des Erregers fördern. Da eine Infektion mit *Fusarium* spp. von den Witterungsbedingungen während der Blüh- und Kornausbildungsphase abhängt, ist ein Zusammenhang zwischen dem Befall und den entwicklungsverzögernden Effekten der Stickstoffdüngung möglich (MÜLLER *et al.*, 1997; HERMANN *et al.*, 1998; MÜLLER *et al.*, 1999). Während einige Untersuchungsergebnisse auf

keinen bzw. geringen Effekt der N-Düngung auf den Befall mit *Fusarium* spp. hinweisen (TEICH und HAMILTON, 1985; FAUZI und PAULITZ, 1994; SCHAAFSMA *et al.*, 2001), fanden andere einen signifikanten Einfluss auf die Entwicklung der partiellen Taubährigkeit (MARTIN *et al.* 1991; AUFHAMMER *et al.*, 2000; LEMMENS *et al.*, 2004).

Die Untersuchung der Mischproben ergab nur einen geringen Einfluss der N-Düngung auf den *Fusarium*-Befall. Lediglich in Proben der Sorte Tommi konnte ein Zusammenhang zwischen Stickstoffgabe und Befallshäufigkeit zweier Arten nachgewiesen werden. Es kann sowohl eine erhöhte als auch eine niedrige Dosierung der Stickstoffdüngung zu einer Begünstigung des *Fusarium*-Befalls führen (WARREN und KOMMEDAHL, 1973; COOK 1980; TEICH, 1987; OBST, 1988; HINTERHOLZER, 1992; SCHADE-SCHÜTZE, 1999; KLINGENHAGEN und FRAHM, 2002). In den Proben ohne Fungizidbehandlung zeichnete sich durch Erhöhung der N-Düngung eine Verringerung der Befallshäufigkeit ab, in den Fungizid-behandelten hingegen tendenziell eine Erhöhung. Ergebnisse von HERMANN *et al.* (1998) und TEICH und HAMILTON (1985) wiesen darauf hin, dass der Zeitpunkt der N-Düngung wie auch die Düngerform von Bedeutung sind. Möglicherweise bedingte die Verwendung von Kalkstickstoff eine Reduktion des Infektionsdrucks in der Variante ohne Fungizidbehandlung. So erzielten YI *et al.* (2001) durch den Einsatz von Kalkstickstoff eine Reduktion des Kornbefalls bis zu knapp 60 % gegenüber Kalkammonsalpeter. JUNGK (1984) ging von einer fungistatischen Wirkung der Cyanamidphase dieser Stickstoffform aus. Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass diese Wirkung jedoch durch eine Fungizidapplikation überlagert wurde. Der Einfluss von Stickstoffgaben auf den Befall mit *Fusarium* spp. in Mischproben wurde in den vier Rasterproben tendenziell bestätigt.

Ebenso unterschiedlich wie die Effekte des Stickstoffangebots auf den Befall (MARTIN *et al.*, 1991; FAUZI und PAULITZ, 1994) sind die Auswirkungen von Fungizidapplikationen (PIRGOZLIEV *et al.*, 2003). Die geringsten Befallshäufigkeiten wurden in den Fungizid-behandelten Proben nachgewiesen. Die Wirksamkeit von Prothioconazole gegenüber allen ökonomisch wichtigen *Fusarium*-Arten im Weizen ist beschrieben (DUTZMANN und SUTYHEINZE, 2004; PAUL *et al.*, 2008). Es wird eine Anwendung zur Weizenblüte empfohlen (MAGAN *et al.*, 2002). Die Fungizidbehandlung mit dem Basiswirkstoff Prothioconazole kombiniert mit dem Strobilurin Fluoxastrobin fand im Jahr 2008 zum BBCH 61 statt. Eine Bekämpfung um den Zeitpunkt der Infektion zeigte meist positive Ergebnisse und verminderte den Befall mit *Fusarium* spp. (BEYER *et al.*, 2008; FORRER *et al.*, 2000). Bei Applikation zum Zeitpunkt der Vollblüte erbringt der Triazolwirkstoff Prothioconazol eine durchschnittliche Reduktion der Symptome um ca. 40 % (PAUL *et al.* 2008).

Die Wirkstoffgruppe Strobilurine inhibiert die Atmungskette pilzlicher Pathogene (LYR, 1995), doch die Wirkung ist trotz der Indikation gegen *Fusarium* spp. bei der Symptomreduktion und vor allem bei der Reduktion von Mykotoxinbelastungen umstritten (MATTHIES *et al.*, 2000; JONES, 2000; DARDIS und WALSH, 2000; JØRGENSEN, 2001). Des Weiteren wird ein verstärkter Ährenbefall mit *Fusarium* spp. nach Behandlung mit Strobilurinen einer verzögerten Seneszenz des pflanzlichen Gewebes („greening effect“) zugeschrieben (GROSSMANN und RETZLAFF,

1997; WU und TIEDEMANN, 2001), da das Fungizid in den pflanzlichen Hormonhaushalt eingreift. In dieser Arbeit wurde jedoch stets ein Mischpräparat mit einem Triazol- und Strobilurin-haltigen Fungizid ausgebracht. Diese Kombination führte zu einer Reduktion von *Fusarium* spp. und neben der Befallshäufigkeit wurde durch die Fungizidapplikation auch das Spektrum von *Fusarium* spp. an Körnern aller Sorten verringert. Nach JENNINGS *et al.* (2000) können Art und Wirkung von Fungiziden einen großen Einfluss auf die quantitative und qualitative Zusammensetzung des *Fusarium*-Artenspektrums haben. Ein Befall mit *F. culmorum* und *F. poae* konnte durch den Einsatz der Fungizide komplett bzw. sehr stark reduziert werden. Auch die Sensitivität einzelner *Fusarium*-Arten gegenüber Fungiziden kann ursächlich für eine Veränderung des Spektrums sein (MÜLLENBORN *et al.*, 2008). Der Einfluss von Fungiziden auf den Befall mit *Fusarium* spp. in Mischproben wurde in den Rasterproben tendenziell bestätigt. Grundsätzlich sind die Ergebnisse zum Einfluss von Fungizidmaßnahmen zur Eindämmung einer *Fusarium*-Infektion im Weizen nicht eindeutig und daher sehr differenziert zu betrachten (PIRGOZLIEV *et al.*, 2003).

Die Aggregationsindizes der Befallshäufigkeiten für die *Fusarium*-Arten wiesen auf zufällige und aggregierte Verteilungen hin. In drei Fällen wurde eine regelmäßige Verteilung bzw. eine Tendenz dazu beobachtet. Auf allen Beprobungsflächen war *F. graminearum* die dominante Art und in den Varianten ohne Fungizid-Behandlung lag eine Gleichverteilung bzw. eine Tendenz zur regelmäßigen Verteilung dieser Art vor. Nach BRENNAN *et al.* (2003) gilt *F. graminearum* allgemein als die aggressivste *Fusarium*-Art. Es ist davon auszugehen, dass sich *F. graminearum* als konkurrenzstärkste Art durchsetzen konnte und sich gleichmäßig auf der Fläche verteilte. Im Gegensatz zu anderen Arten kann *F. graminearum* Ascosporen bilden, die windbürtig auf Ähren gelangen und diese infizieren (ADOLF, 1998). HOFFMANN *et al.* (1976) gehen bei einer regelmäßigen Verteilung der Befallshäufigkeit durch eine Windverbreitung des Inokulums bei gleichzeitig hohem Sporen-Angebot vorrangig aus Quellen außerhalb des Feldes aus. Eine regelmäßige Verteilung wurde auch von *F. avenaceum* auf einer Fläche ohne Fungizidapplikation beobachtet. Offenbar war die als konkurrenzschwach und wenig aggressiv geltende Art doch in der Lage sich gegen andere *Fusarium*-Arten in der kompetitiven Besiedlung der Weizenähre durchzusetzen (MANKA *et al.*, 1985). Dies kann auf die Befallshäufigkeit von *F. graminearum* zurückgeführt werden, die auf dieser Fläche um die Hälfte geringer war als auf der anderen Fungizid-unbehandelten Fläche. Auf der Fläche mit 150 kg N/ha und ohne Fungizid-Behandlung war die Häufigkeit mit *F. graminearum* befallener Körner am höchsten. Es ist wahrscheinlich, dass der hohe Infektionsdruck durch diese aggressive Art dazu führte, dass *F. avenaceum* hier zufällig verteilt war. Auf den beiden mit Fungizid behandelten Untersuchungsflächen lag eine zufällige Verteilung von *F. graminearum* vor. Durch den Einsatz von Azol-Fungiziden zum Blühzeitpunkt des Weizens kann die Befallshäufigkeit mit *Fusarium* spp. um bis zu 40 bis 70 % reduziert werden (TISCHNER, 2003). Wahrscheinlich kam es an diesem Standort zu einer Verzögerung der Ausbreitung von *F. graminearum*, sodass der möglicherweise zu früh gewählte Ausbringungstermin nicht zu einer durchgehenden Bekämpfung der Art führte. Möglicherweise wurde der Wirkstoff fortlaufend degradiert und die

Wirksamkeit somit reduziert. Der Wirkungsgrad einer Behandlung ist umso größer, je näher diese am Zeitpunkt der Infektion erfolgt. Schon eine Abweichung um 2 Tage vom optimalen Ausbringungstermin kann zu Wirkungsverlusten von bis zu 20 % führen (SUTY und MAULER-MACHNIK, 1996). Hinzu kamen die für eine *F. graminearum*-Infektion günstigen Niederschlagsereignisse, denn für das Ausschleudern der Ascosporen wie für die Verbreitung der Konidiosporen ist Regen nötig (PARRY *et al.*, 1995). Es wird vermutet, dass eine Verbreitung der Art neben windbürtigen Ascosporen auch durch bodenbürtige Makrokonidien erfolgte. Die Konidiosporen werden über Regenspritzer verbreitet, die die Sporen sukzessive über die Blattetagen oder direkt zur Ähre transportieren (ADOLF, 1998; HÖRBERG, 2002). Der Transport der Sporen reicht von 1 m horizontal und 60 cm vertikal und ist für die Infektion benachbarter Pflanzen als ausreichend anzusehen (JENKINSON und PARRY, 1994).

Fusarium poae wurde nur auf Flächen ohne Fungizidapplikation nachgewiesen und die räumliche Darstellung der Clusterindizes wies schwache Aggregationen aus, die statistisch nicht abgesichert werden konnten. Auf beiden Flächen wird eine zufällige Verteilung durch windbürtiges Inokulum in Form von Mikrokonidien dieser Art vermutet (MARKELL und FRANCL, 2003). Die Verteilung von *F. tricinctum* lag in drei Rasterproben des Standorts Klein-Altendorf aggregiert und in einer zufällig vor. Das Auftreten dieser Art wird in nördlichen Regionen beschrieben (THRANE, 2000) und weist ähnliche klimatische Ansprüche wie *F. avenaceum* auf (LANGSETH *et al.*, 1999). Mit den Witterungsverhältnissen im Jahr 2008 kann das Auftreten dieser Art jedoch nicht erklärt werden, denn die durchschnittlichen Temperaturen während des untersuchten Zeitraums lagen über denen des langjährigen Mittels. In drei Rasterproben, in denen *F. tricinctum* gefunden wurde, konnte auch *F. avenaceum* nachgewiesen werden. Dies bestätigt die Ergebnisse von LIENEMANN (2002), wonach das Auftreten von *F. tricinctum* in enger Korrelation mit dem Auftreten von *F. avenaceum* steht und die Vorfrucht Winterweizen das Auftreten dieser Arten fördert. Dem aggregierten Auftreten von *F. tricinctum* lag vermutlich eine aggregierte Verteilung der Erntereste aus dem Vorjahr zugrunde. WILHELM und JONES (2005) fanden nach der Vorfrucht Weizen ähnliche Aggregationen von *Fusarium* spp. und vermuteten ein Zusammenschieben der Erntereste durch oberirdischen Wasserabfluss.

Auch *F. culmorum* hat ähnliche Temperatur- und Feuchtigkeitsansprüche wie *F. avenaceum* und *F. tricinctum* und dominiert vor allem in den kühl maritimen Gebieten Europas (LACEY *et al.*, 1999). Das Auftreten von *F. culmorum* war mit einer Befallshäufigkeit zwischen 0,3 und 1,0 % gering. Es ist wahrscheinlich, dass die Witterung zur Vegetationsperiode 2008 ungünstig für einen Befall durch diese Art war. Es fielen zum Infektionszeitraum zwar regelmäßige Niederschläge, doch die Temperaturen lagen im Mittel zwischen 15,3 und 16,7 °C. So nannten JUGNET *et al.* (1983) ein tägliches Temperaturmaximum von 10 bis 15 °C und eine relative Luftfeuchte von 80 % als Voraussetzung für die Ausbreitung und Infektion von *F. culmorum* an der Ähre. Auf den beiden Flächen ohne Fungizid-Behandlung war die Verteilung zufällig, während auf der behandelten Fläche mit hoher N-Gabe die Teilbereiche ohne *F. culmorum*-Befall signifikant aggregiert waren.

Die beiden Rasterbeprobungen innerhalb eines Schlages ergaben eine geringe *Fusarium*-Befallshäufigkeit, was auf die trockene Witterung zum Zeitpunkt der Blüte zurückgeführt wurde. Zwar wurden mit *F. avenaceum*, *F. graminearum*, *F. poae*, *F. culmorum*, *F. tricinctum* und *F. proliferatum* die gleichen Arten nachgewiesen, doch die Häufigkeit des Auftretens der einzelnen Arten und des Befalls variierte erheblich. So war auf der ersten Beprobungsfläche *F. avenaceum* die dominierende Art, auf der zweiten wies *F. graminearum* die größte Befallshäufigkeit auf. Die Aggregationsindizes für die Häufigkeit befallener Körner auf beiden Flächen wiesen für alle *Fusarium*-Arten eine zufällige Verteilung aus. Nur bei *F. avenaceum* konnte auf der ersten Beprobungsfläche eine Tendenz zur Aggregation beobachtet werden. Nach LESLIE und SUMMERELL (2006) geht die Infektion von Einzelpflanzen mit *F. avenaceum* und *F. tricinctum* von bodenbürtigem Inokulum in Form von Konidiosporen aus. So kann sowohl das Auftreten von *F. avenaceum* als auch von *F. tricinctum* auf beiden Flächen durch Primärinokulum auf Ernteresten der Vorfrucht Erbse erklärt werden, welche im Zusammenhang mit der Wurzelfäule als Wirt dieser Arten beschrieben wird (GOSSMANN *et al.*, 2007; VOGT-KAUTE, 2010). Das Primärinokulum von *Fusarium* spp. wird überwiegend auf oberflächennahen Ernteresten der Vorfrüchte gebildet (SUTTON, 1982; PARRY *et al.*, 1995). In diesem Fall deutete die zufällige Verteilung der Befallshäufigkeiten darauf hin, dass die Erntereste der Erbse und somit das bodenbürtige Inokulum weitestgehend zufällig verteilt waren.

Fusarium poae trat sowohl an Körnern der ersten als auch der zweiten Beprobungsfläche auf, doch wird diese Art nach POLLEY und THOMAS (1991) sehr selten von Ernterückständen isoliert. Für *F. poae* wird die Bedeutung windbürtigen Inokulums in Form von Mikrokonidien vermutet und die Verbreitung der Konidien – eine Hauptfruchtform ist nicht bekannt – über Luftströmungen spielt möglicherweise eine bedeutende Rolle (MARKELL und FRANCL, 2003). Wahrscheinlich ist, dass diese Art die Ähren durch Zuflug besiedelt hatte, denn der Transport von Mikrokonidien ist bei anhaltend starkem Wind über Distanzen von einigen bis zu mehreren hundert Metern möglich (JENKINSON und PARRY, 1994; PARRY *et al.*, 1995; MARKELL und FRANCL, 2003). Eine Verbreitung der Sporen ist auch durch Insekten denkbar, so stellten STURZ und JOHNSON (1983) in Gerstenbeständen einen Zusammenhang zwischen dem Ährenbefall mit *F. poae* und dem Auftreten der Thripse-Art *Lemotrips denticornis* fest. Die zufällige räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit kann möglicherweise durch windbürtiges Inokulum aus externen Quellen erklärt werden, welches in der Luft gut durchmischt und zufallsähnlich verteilt wurde (DEL PONTE *et al.*, 2003).

Das räumlich zufällige Auftreten von *F. graminearum* wurde auf diesem Standort vermutlich ebenfalls durch windbürtiges Inokulum verursacht. SHAH und BERGSTROM (2001) zeigten, dass das zufallsbedingte Auftreten ein Indiz für windverbreitete Ascosporen als Primärinokulum von *F. graminearum* ist. Woher das Inokulum von *F. poae* und *F. graminearum* in diesem Jahr jedoch letztendlich stammte, ist nicht eindeutig, doch ist davon auszugehen, dass aufgrund des luftbürtigen Transports eine Infektion von benachbarten Inokulumquellen ausging.

Für eine Beprobungsfläche wurde zusätzlich die räumliche Verteilung der pilzlichen Biomasse von *F. avenaceum* und *F. graminearum* analysiert. Die Aggregationsindizes für die Befallsintensität

zeigten ein gegensätzliches Bild zur Befallshäufigkeit. Es lag für beide Arten eine aggregierte Verteilung vor. So wurde das zufallsbedingte Auftreten der Befallshäufigkeit durch die räumliche Verteilung des Primärinokulums erklärt, wohingegen dieser Faktor keinen größeren Einfluss auf die räumliche Verteilung der Befallsintensität erkennen ließ. Auf der Beprobungsfläche wurden für beide Arten nahezu deckungsgleich jeweils Gap- und Patch-Cluster ausgewiesen. Interaktionen zwischen *Fusarium*-Arten, die nach MORADI (2008) zu einer Reduktion der Biomasse einzelner Arten führen, können hier ausgeschlossen werden. SCHLANG (2010) kommt zu ähnlichen Ergebnissen, er führt die Bereiche mit höherer Befallsintensität auf das Auftreten aggressiver Isolate zurück, die besonders hohe Biomasseanteile verursachen. Dies kann lediglich die Aggregation von *F. graminearum* erklären, welche als aggressive Art beschrieben wird (FERNANDEZ und CHEN, 2005). Das Auftreten der Befallsintensität von *F. avenaceum* war hoch signifikant aggregiert. Allgemein geht man jedoch davon aus, dass es sich bei *F. avenaceum* eher um ein schwaches Pathogen mit geringer Aggressivität handelt.

Die Gehalte der Mykotoxine wiesen in beiden Rasterproben die gleichen räumlichen Verteilungsmuster auf. So traten Belastungen durch NIV und ENNB zufällig verteilt auf, während die Verteilung von DON, 3Ac-DON und ZEA auf beiden Beprobungsflächen aggregiert war. Auffallend waren die hohen ZEA-Gehalte, dieses Mykotoxin war vorherrschend und trat auf beiden Flächen hoch signifikant aggregiert auf. Nach DESJARDINS (2006) wird dieser Sekundärmetabolit durch die Arten *F. graminearum* und *F. culmorum* synthetisiert. Es wurden Höchstgehalte zwischen 9476 und 12521 ng/g ermittelt, jedoch wurde kein statistischer Zusammenhang zwischen ZEA-Belastungen und den beiden *Fusarium*-Arten festgestellt. Aufgrund der geringen Häufigkeit mit *F. culmorum* infizierter Körner in den beiden Rasterproben sind die hohen ZEA-Belastungen primär auf *F. graminearum* zurückzuführen. Das aggregierte Auftreten von ZEA ließ sich aber nicht auf ein aggregiertes Auftreten der mykotoxinbildenden *Fusarium*-Arten zurückführen. Auf der ersten Beprobungsfläche lagen sogar die ZEA-Höchstgehalte in Zonen, wo die geringsten bzw. keine Befallshäufigkeiten und –Intensitäten von *F. graminearum* detektiert wurden. Zu ähnlichen Ergebnissen kamen XU *et al.* (2003), sie fanden in italienischen Weizenkornproben Gehalte von DON, ZEA und NIV, konnten aber keine Art-spezifische DNA von *F. graminearum*, *F. culmorum* bzw. *F. poae* in den Proben detektieren. Sie führten dies auf mögliche DNA-Gehalte unterhalb des Quantifizierungslimit zurück. HÖHN *et al.* (2002) hielten einen Abbau *Fusarium*-spezifischer DNA-Mengen durch Bakterien und andere Mikroorganismen für möglich.

Eine Veränderung der Toxinproduktion wird bei *Fusarium*-Arten auch durch Stresssituationen wie z.B. ungünstige Witterungsbedingungen oder Konkurrenz um Nährstoffe mit anderen Pathogenen hervorgerufen (DOOHAN *et al.*, 2003; XU *et al.*, 2007; MÜLLENBORN *et al.*, 2008). So kann es in Konkurrenzsituationen einerseits zu einer Verringerung der Biomasse des Pilzes kommen und andererseits zu einer gesteigerten Mykotoxinproduktion (XU, 2007). Trotz der relativ geringen Befallshäufigkeiten wurden auf beiden Beprobungsflächen sechs Erreger der partiellen Taubährigkeit nachgewiesen, die möglicherweise miteinander konkurrierten. XU *et al.* (2007) stellten bei Mischinokulation mit verschiedenen *Fusarium*-Arten eine erhöhte

Mykotoxinproduktion fest. MORADI (2008) geht von Interaktionen verschiedener *Fusarium*-Arten aus, die zu einer überproportionalen Mykotoxinbildung führen können. Er führt es darauf zurück, dass das Mykotoxin entweder die Besiedlung der Wirtspflanze für den Pilz erleichtert und ihm so ein Vorteil gegenüber Konkurrenten verschafft, oder er aktiv gegen den Konkurrenten wirksam ist und dessen Entwicklung unterdrücken kann. Nach LLORENS *et al.* (2004) hat die Temperatur einen direkten Einfluss auf die Bildung von ZEA. Sie zeigten, dass Isolate von *F. graminearum* und *F. culmorum* bei 28 °C bzw. 32 °C *in vitro* nur wenig ZEA synthetisierten und ermittelten 20 °C als optimale Temperatur zur ZEA-Synthese. Möglicherweise stehen die hohen ZEA-Gehalte auch im Zusammenhang mit den Temperaturen im Untersuchungszeitraum 2007. Belastungen durch DON traten auf beiden Flächen aggregiert auf. Hauptproduzenten für DON sind *F. graminearum* (MILLER *et al.* 1983; ROTTER und PRELUSKY, 1996) und *F. culmorum* (DESJARDINS, 2006). Aufgrund der geringen Häufigkeit befallener Körner mit *F. culmorum* auf der ersten Beprobungsfläche lässt sich die aggregierte Verteilung der DON-Gehalte hier lediglich durch die Verteilung der Befallsintensität von *F. graminearum* erklären. Jedoch bestand auf beiden Beprobungsflächen kein Zusammenhang zwischen dem Auftreten von *F. graminearum* und DON-Gehalten. Die höchsten DON-Kontaminationen wurden auf Teilflächen gemessen, auf denen nur geringe Befallshäufigkeiten durch *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* nachgewiesen werden konnten. Dennoch wurden in dieser Zone bis zu fünf verschiedene *Fusarium*-Arten nachgewiesen und eine mögliche Konkurrenzsituation könnte die Toxinsynthese begünstigt haben. Als weiterer wichtiger Faktor ist die Wasserlöslichkeit von Deoxynivalenol einzubeziehen. Mykotoxine werden aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit von den Spelzen in die Körner transloziert (SNIJDERS und KRECHTING, 1992). Es ist wahrscheinlich, dass zum Zeitpunkt der Ernte nicht der *Fusarium*-Pilz, aber seine Sekundärmetabolite schon bis in die Körner vorgedrungen waren. Nach KANG und BUCHENAUER (1999) wird DON bereits vor dem Eindringen von *Fusarium* spp. an das Wirtsgewebe abgegeben. Dies würde den geringen Zusammenhang zwischen *Fusarium*-Befall und DON-Gehalten erklären.

Die Auswertung von Korrelationen zwischen Befallsparametern ist durchaus problematisch. In keinem Fall ist die Probe identisch, da für die *Fusarium*-spezifische DNA-Quantifizierung und für die Mykotoxinanalytik Teile einer gemahlene Probe genutzt wurden. Die mikrobiologisch untersuchten Körner waren somit in dieser Probe nicht enthalten.

Für beide Flächen bestand ein signifikanter Zusammenhang zwischen Kontaminationen mit DON, 3Ac-DON und ZEA. Nach LOGRIECO *et al.* (2003) und VIGIER *et al.* (1997) führen Häufigkeit und Intensität des Befalls mit *F. graminearum* neben DON oftmals zu Belastungen mit dessen acetylierten Derivaten 3Ac-DON sowie ZEA. Die Aggregationsanalyse ergab, dass niedrige 3Ac-DON-Gehalte jeweils auf den Teilflächen signifikant aggregiert waren, auf denen keine Aggregationen für hohe DON-Kontaminationen ausgewiesen wurden.

Geringe NIV-Gehalte wurden in beiden Rasterproben nachgewiesen und die Aggregationsanalyse wies auf eine zufällige Verteilung dieses Mykotoxins hin. Auf der ersten Beprobungsfläche wurde für die Befallsintensität von *F. poae* ein hoch signifikanter Zusammenhang mit der NIV-Belastung ermittelt, denn diese Art kann Nivalenol synthetisieren (BOTTALICO, 1998) und war ebenfalls

zufällig verteilt. Eher unwahrscheinlich, aber nicht auszuschließen, ist eine NIV-Bildung durch die Art *F. tricinctum*, die ebenfalls zufällig auf der Fläche verteilt war. LEE und MIROCHA (1984) zeigten eine *in vitro* Produktion von NIV durch diese Art.

Zusätzlich zu den Leittoxinen DON, ZEA und NIV (DESJARDINS, 2006; NICHOLSON *et al.*, 2007) wurden auf beiden Beprobungsflächen Gehalte von ENNB festgestellt, ein Mykotoxin, über dessen Toxizität und biologischer Aktivität bislang wesentlich weniger bekannt ist (JESTOI, 2008; FÖLLMANN, 2009). Die Belastungen der Körner mit ENNB waren auf beiden Beprobungsflächen räumlich zufällig verteilt. Als wichtigster Produzent von ENNB gilt *F. avenaceum* (HERMANN *et al.*, 1996; NICHOLSON *et al.*, 2007; JESTOI, 2008). Diese Art war auf der Beprobungsfläche dominierend und die Intensität ihres Befalls auf einigen Teilflächen stark aggregiert. Auf diesen Teilflächen wurden auch die höchsten ENNB-Gehalte nachgewiesen und die Befallsintensität von *F. avenaceum* war mit der ENNB-Belastung korreliert. Auf der zweiten Beprobungsfläche waren sowohl die Verteilung des *F. avenaceum*-Befalls als auch die ENNB-Kontaminationen zufällig verteilt. Es kann davon ausgegangen werden, dass auf diesen Flächen ein Befall mit *F. avenaceum* auch zu einer Belastung mit ENNB führte.

Kontaminationen mit MON wurden nur in einer Probe der ersten Beprobungsfläche detektiert. Die MON-Belastung lässt sich durch die relativ hohe Befallshäufigkeit von *F. avenaceum* auf dieser Teilfläche erklären. Nach CHELKOWSKI *et al.* (1990) ist die Produktion von Moniliformin durch *F. avenaceum*-Isolate bekannt.

Die Rasterproben der für *Fusarium*-Befall hochanfälligen Sorte Kris wiesen die höchste Befallshäufigkeit auf. Zum Zeitpunkt der Anthese und in den darauffolgenden Wochen fielen regelmäßige Niederschläge bei durchschnittlichen Temperaturen über dem langjährigen Mittel. Feucht-warme Witterungsverhältnisse während der Blüte sind als Voraussetzung für eine erfolgreiche *Fusarium*-Infektion bekannt (BAI und SHANER, 1994; PARRY *et al.*, 1995; MILLER, 2002; PIRGOZLIEV *et al.*, 2003; XU, 2003). Mit einem Anteil von 80 % aller *Fusarium*-Arten war *F. graminearum* die dominante Art. Es bestätigte sich, dass die Vorfrucht Mais das Risiko einer Infektion von Weizen mit *F. graminearum* im Folgejahr deutlich erhöht (TEICH und NELSON, 1984; RINTELEN 2000; MÜLLER und BRÖTHER, 2002; CHAMPEIL *et al.*, 2004). Sowohl Häufigkeit als auch Intensität des Befalls mit *F. graminearum* traten aggregiert auf. Dieses aggregierte Auftreten lässt sich durch Erntereste der Vorfrucht Mais erklären, deren aggregierte Verteilung einen hohen Einfluss auf die räumliche Verteilung der Befallsparameter hatte. Dies bestätigt die Ergebnisse von WILHELM und JONES (2005), sie führten das aggregierte Vorkommen von Maisstoppeln auf oberirdischen Wasserabfluss in Bodenrillen durch Schneeschmelze zurück. Es ist wahrscheinlich, dass die räumliche Verteilung der Befallshäufigkeit und der Befallsintensität von *F. graminearum* größtenteils durch die räumliche Verteilung des Primärinokulums bestimmt wurde.

Ein Zusammenhang zwischen DNA-Gehalten von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine wurde für *F. graminearum* und DON nachgewiesen. So stellten SCHNERR *et al.* (2002) in geernteten Weizenproben einen deutlichen Zusammenhang zwischen DON-Gehalt und DNA-Gehalt von *F. graminearum* fest. Auch bei Untersuchungen in Bayern wurde *F. graminearum* als

DON-Hauptproduzent nachgewiesen (RODEMANN und BARTELS, 2004; EIBLMEIER und LEPSCHY, 2007). Zwischen den Belastungen von DON und dessen acetylierten Derivat 3Ac-DON bestand ein starker Zusammenhang. Die Verteilung der 3Ac-DON-Belastung war stark aggregiert in Zonen der hohen DON-Gehalte.

Die Intensität befallener Körner mit *F. poae* war ebenfalls stark aggregiert und die ausgewiesenen Cluster dieser Art lagen in den gleichen Zonen wie die von *F. graminearum*. In dieser Zone wurde auf einer Teilfläche der NIV-Höchstgehalt von 1479 ng/g gemessen. Hier war zwar der Biomasseanteil von *F. poae* am höchsten, lag aber um den Faktor 7 unter dem von *F. graminearum*. Sowohl für *F. poae* (THRANE, 1988) als auch für *F. graminearum* ist die Produktion von NIV bekannt. Je nach Chemotyp kann *F. graminearum* NIV oder DON produzieren (DESJARDINS, 2006) und das Auftreten beider Mykotoxine im selben Schlag weist auf das Auftreten beider Chemotypen von *F. graminearum* hin. In vielen Fällen ist der Anteil von NIV-Produzenten in *F. graminearum*-Populationen geringer als der Anteil der DON-Bildner (GANG *et al.*, 1998). Auf dieser Untersuchungsfläche konnte trotz der hohen Biomasseanteile kein Zusammenhang zwischen der Befallsintensität von *F. graminearum* und der NIV-Belastung festgestellt werden, was vermuten lässt, dass auf dieser Fläche kein NIV-produzierender Chemotyp dieser Art vorhanden war. Im Gegensatz dazu korrelierte die Befallsintensität von *F. poae* schwach mit den NIV-Gehalten, was das Auftreten dieses Mykotoxins erklären kann.

Die Aggregationsanalyse ergab für die ENNB-Belastung eine zufällige Verteilung. Nach MORRISON *et al.* (2002) ist *F. avenaceum* der wichtigste und beständigste ENNB-Produzent im Weizenanbau. Ein Zusammenhang zwischen Befallsintensität dieser Art und ENNB wurde auf dieser Fläche nicht bestätigt. Aufgrund der zufälligen Verteilung der *F. avenaceum*-Befallshäufigkeit und –intensität einerseits und der nach LIENEMANN (2002) guten Etablierung unter den im Rheinland vorherrschenden Bedingungen andererseits kann angenommen werden, dass ein Befall mit dieser Art zu einer Belastung mit ENNB führte.

Moniliformin wird im Getreideanbau ebenfalls durch *F. avenaceum* produziert (FRISVAD *et al.*, 2006). Das räumliche Auftreten von MON-Gehalten war von einer zufälligen Verteilung nicht zu unterscheiden. Aufgrund der höchst signifikanten Korrelation zwischen MON und ENNB liegt der Schluss nahe, dass die Gehalte dieses Mykotoxins auf dieser Fläche von *F. avenaceum* synthetisiert wurden. Für den Maisanbau hingegen beschrieben SCHÜTT *et al.* (1998) *F. proliferatum* als einen der wichtigsten MON-Produzenten. Zwar war die Befallshäufigkeit von *F. proliferatum* auf dieser Fläche gering, jedoch kommt bei der Interpretation der detektierten MON-Gehalte, aufgrund der Vorfrucht Mais, diese Art ebenfalls als Bildner dieses Mykotoxins in Frage. Nach COTTON und MUNKVOLD (1998) sind die Ernterückstände von Mais eine bedeutende Inokulumquelle, auf denen *F. proliferatum* mindestens 630 Tage überdauern kann.

Im Vergleich zu den Rasterproben des konventionellen Anbaus wurde in den Rasterproben des organischen Anbaus eine geringere Belastung durch DON nachgewiesen. Auch BIRZELE *et al.* (2002) fanden in Winterweizenproben von Versuchsflächen des ökologischen Anbaus weniger DON als in entsprechenden Proben aus konventioneller Bewirtschaftung. Als mögliche Ursachen für niedrigeren *Fusarium*-Befall und geringere Mykotoxin-Kontaminationen von

Weizenkörnern des organischen Anbaus sehen MEIER *et al.* (2000) und OLDENBURG (2004) den weitgehenden Verzicht auf Mais als Vorfrucht und die Wahl von Sorten mit geringerer *Fusarium*-Anfälligkeit

Die vorgenommene Charakterisierung von Verteilungsmustern muss vor dem Hintergrund der untersuchten Skalenebene und der Stärke der Befallsparameter interpretiert werden. Eine räumlich gleichmäßige Verteilung eines Befallsparameters wurde nur bei sehr hohem *Fusarium*-Befall festgestellt. Dies könnte auf einer größeren Skalenebene, der Bestandesebene, wie durch SCHLANG (2010) untersucht, als eine Aggregation gewertet werden. Auf noch größerer Skalenebene würde diese Verteilung möglicherweise als zufallsbedingt ausgegeben werden. Dieser Effekt kann bei allen vorliegenden Verteilungsmustern auftreten und man kann grundsätzlich nicht von einer Skalenebene auf eine andere schließen.

Im Jahr 2009 wurden an allen untersuchten Tagen auf Ährenhöhe Ascosporen von *Gibberella zeae* ermittelt, wobei die Anzahl um den Faktor 10 variierte (84 – 736). Noch stärker variierende Sporenfänge zwischen 5 und 4500 Ascosporen pro Tag zählten KLIX *et al.* (2005) in ähnlichen Untersuchungen aus. Innerhalb der ersten Woche stieg die Anzahl impaktierter Sporen bis auf ein Grundlevel von mindestens 342 Sporen an und überschritt dieses während des folgenden Untersuchungszeitraums in deutlichen Peaks. Vor Beginn der Weizenblüte fielen regelmäßige Niederschläge und es folgten warme und trockene Witterungsbedingungen. Es ist wahrscheinlich, dass infolge der Niederschläge und den darauffolgenden steigenden Tagestemperaturen Perithezieren auf den ausgebrachten Maisstoppeln gebildet wurden. Nach v. TIEDEMANN *et al.* (2006) kann neben der Durchfeuchtung des Inokulums auch die Rücktrocknung des Inokulummaterials als auslösender Reiz zur Perithezienbildung angesehen werden. In der ersten Woche der Weizenblüte wurden knapp 150 Ascosporen im Tages-Zählfeld ermittelt. Infolge des einzigen und geringen Regenereignisses dieser Woche, stieg die Anzahl gezählter Sporen auf 573 Sporen an. Auch SUTY und MAULER-MACHNIK (1996), FERNANDO *et al.* (2000) und MARKELL und FRANCL (2003) stellten einen erhöhten Ascosporenflug in Folge von Niederschlägen fest. Nach OBST und BECHTEL (2000) ist eine Mindestniederschlagsmenge von 4 mm die Voraussetzung für den Ascosporenflug von *F. graminearum*, um eine Verbreitung des Erregers im Weizenbestand herbeizuführen. Die hohen Tagesmittel-Temperaturen vor dem Regenereignis könnten zum Eintrocknen der Perithezieren geführt haben, die ihre Ascosporen nach Wiederbefeuchtung entließen. TSCHANZ (1976) führte dies darauf zurück, dass warme Luft mehr Feuchtigkeit aufnehmen kann als kältere und wenn die Luft bei einem Temperaturanstieg zunächst nicht mit Luftfeuchte gesättigt ist, kann es durch Dehydrieren der Perithezieren zur Entlassung von Ascosporen kommen. PAULITZ (1996) führte den Rückgang von Ascosporen an Regentagen auf eine dünne Wasserschicht zurück, welche die Perithezieren bedeckt und somit die Sporenfreisetzung hemmt. Die Sporenfänge widersprechen diesem Fall, denn mit steigender Niederschlagsmenge stieg die Ascosporenzahl an diesen Tagen an. Am niederschlagsreichsten Tag des Untersuchungszeitraums, wurde der zweithöchste Sporenfang während des Zeitraums der Blüte verzeichnet. TRIAL *et al.* (2002) fanden einen Zusammenhang zwischen zunehmender Luftfeuchte und erhöhter Ascosporenfreisetzung bei relativ hoher

Luftfeuchte und Temperaturen. Sie führen dies auf einen sich aufbauenden Turgor im Perithezium zurück, womit die Ascosporen ausgeschleudert werden.

Auf beiden Untersuchungsflächen wurde an gut der Hälfte aller untersuchten Einzelähren ein *Fusarium*-Befall nachgewiesen und *F. graminearum* war dominante Art. Möglicherweise ist dies auf die relativ hohe Ascosporendichte zurückzuführen. Die Produktion und Verbreitung von Ascosporen unterliegt einem anderen Witterungsoptimum als die der Konidiosporen. FERNANDO *et al.* (1997) und SCHOLZ und STEFFENSON (2001) bezeichneten *F. graminearum* als aggressiven Erreger der partiellen Taubährigkeit, da er sich auf unterschiedliche Witterungsverhältnisse eingestellt hat. Innerhalb des Bestandes werden die Ascosporen windbürtig bis zu 30 m weit getragen. Sporenfänge in den USA dokumentieren Ascosporenflüge in über 100 m Höhe und einen kilometerweiten Transport (ADOLF 1998; SCHMALE III *et al.* 2005a). Untersuchungen von GÖDECKE und v. TIEDEMANN (2011) zeigten, dass *F. graminearum* unabhängig von der Vorfrucht das Leitpathogen in allen Befallsjahren war. Dass *F. graminearum* in den eigenen Untersuchungen als vorherrschende Art auftrat, ist auf das Inokulum in Form von verteilten Maisstoppeln zurückzuführen. Das Auftreten von *F. avenaceum* kann mit bodenbürtigem Inokulum der Vorfrucht Weizen erklärt werden. Der Anteil *F. poae*-befallener Ähren wird mit dem windbürtigem Zuflug von Mikrokonidien in Zusammenhang gebracht. Die Aggregation befallener Ähren resultiert aus aggregiertem Inokulum einzelner Erreger und der nachfolgenden Verbreitung durch Konidiosporen (HORBERG, 2002) oder Ascosporen (SCHMALE III *et al.*, 2005b). Trotz eines stetig ansteigenden Sporenflugs von *Gibberella zeae* während der Anthese war der Anteil infizierter Ährenabschnitte mit *Fusarium* spp. relativ gering. Die Witterungsbedingungen Mitte der Blüte sorgten mit hohen Niederschlagsmengen und abfallenden Temperaturen für hohe Sporenfänge. Diese Ergebnisse stützen die Hypothese von TSCHANZ (1976), wonach das Ausschleudern der Ascosporen bei niedrigen Temperaturen, mit einem Maximum bis 16/17 ° C, begünstigt wird. Möglicherweise kam es trotz augenscheinlich vorhandenen Inokulums selten zur Infektion der Ähren, denn mit Hilfe einer Sporenfalle kann lediglich eine Aussage über die Anzahl der Sporen in der Luft, allerdings keine Aussage über deren Keimfähigkeit getroffen werden (FERNANDO *et al.*, 2000). Es wird davon ausgegangen, dass die Menge des windbürtigen Inokulums zu gering war um ein erhöhtes Auftreten im untersuchten Bestand hervorzurufen. So fingen TISCHNER *et al.* (2004) während des Zeitpunkts der Blüte Ascosporenmengen zwischen 2000 und 26.050. Verglichen mit diesen Ergebnissen lag die Höchstmenge an Sporen in der vorliegenden Arbeit bis um den Faktor 35 darunter.

Mykotoxinbelastungen wurden ausschließlich an Einzelähren nachgewiesen, an denen ebenfalls *Fusarium*-spezifische DNA-Mengen quantifiziert wurden. Bei der Betrachtung der kleinsten Skalenebene, den Ährenabschnitten, wurden in sieben Fällen Mykotoxingehalte trotz des fehlenden Nachweises von *Fusarium*-DNA gemessen. Hier wird davon ausgegangen, dass die Mykotoxine aufgrund ihrer Wasserlöslichkeit bereits bis in die Körner gelangten (SNIJDERS und KRECHTING, 1992), der für ihre Synthese verantwortliche Pilz aber nicht.

Sowohl die Befallsintensität als auch Mykotoxinkontamination korrelierten mit dem Abschnitt der Ähre. So traten diese beiden Parameter vorrangig im unteren Ährenabschnitt auf.

Möglicherweise lag hier eine Infektion durch vegetativ gebildete Konidiosporen vor, die durch Spritzwasser sukzessive auf höhere Blattetagen bis zum unteren Ährenabschnitt transportiert wurden (ADOLF, 1998; JENKINSON und PARRY, 1994). Die Mykotoxingehalte variierten von Ähre zu Ähre stark. Dies bestätigt die Untersuchungen von HART und SCHABENBERGER (2001) bei denen die Verteilung von Mykotoxingehalten innerhalb einer Parzelle bereits auf kurzen Distanzen hohe Variabilitäten aufwies. Im Gegensatz dazu gingen HART (1998) und WHITAKER *et al.* (2005) von einer großflächigen Infektion des Getreides durch *Fusarium*-Stämme aus, woraus letztendlich für BISELLI (2006) eine homogene Verteilung der Toxine im Erntegut resultiert. Diese Annahmen werden durch die Ergebnisse der vorliegenden Arbeit nicht gestützt.

Der höchste Mykotoxingehalt wurde im unteren Ährenabschnitt einer Ähre mit 30.704 ppb detektiert. Dieser Wert überschreitet den gesetzlich festgelegten Höchstgehalt für unverarbeiteten Hartweizen (ANONYM, 2007a) um das > 17-fache. Unter der Annahme, dass der Ährenabschnitt aus elf Körnern bestand, mit einer TKM von 45 g, müsste die Probe mit 183 befallsfreien Körnern verschnitten werden, um den gesetzlichen Bestimmungen zu entsprechen. Nach PREIß und ALBERT (2000) sind Mykotoxingehalte sowohl innerhalb des Feldbestandes als auch in der Einzelähre ungleichmäßig verteilt. Als Hauptquelle der Mykotoxinbelastung in einer Charge nannten sie sogenannte *Fusarium*-Körner. COTTY (2001) wies bei Untersuchungen zu *Aspergillus flavus* an Baumwolle (*Gossypium*) in Proben von Einzelpflanzen einzelne Baumwollsamensamen mit Aflatoxingehalten von über 500.000 ppb nach, während die anderen Samen belastungsfrei waren.

Für die Mykotoxin-Analytik ist daher eine repräsentative Probenahme unerlässlich. Dabei ist zu berücksichtigen, dass Mykotoxine ungleichmäßig verteilt sind. Das gilt für die Verteilung innerhalb der Ähre, als auch innerhalb des Kornes (MÜNZING und MASLOFF, 2005). Die Variabilität, ausgelöst durch die Probenahme, stellt bei der Mykotoxinbestimmung den größten Unsicherheitsfaktor dar und durch die heterogene Verteilung der Sekundärmetabolite kommt es punktuell zu sehr hohen und an anderer Stelle sehr geringen, bis hin zu nicht nachweisbaren Belastungen (WHITAKER *et al.*, 2005). Je kleiner der Probenumfang, desto größer ist nach STADLER und GUDE (2010) die Gefahr, eine nicht repräsentative Probe zu ziehen. Durch falsche Probenahmen oder durch die Entnahme inhomogener und nicht repräsentativer Labor-Teilproben können Fehler von 50 bis 200 % auftreten (KANDLER, 2008).

Die Ergebnisse dieser Arbeit haben gezeigt, dass das Auftreten einzelner Befallsparameter von *Fusarium* spp. und der assoziierten Mykotoxine auch im kleinräumigen Bereich sehr variabel ist. Die Untersuchungen zum räumlichen Auftreten von Befallshäufigkeit, Befallsintensität und Mykotoxinbelastungen wiesen sowohl regelmäßige, zufällige als auch aggregierte Verteilungen auf und ließen keine Gesetzmäßigkeiten erkennen. Grundsätzlich lässt sich für eine realistische Bewertung der Befallssituation ableiten, dass zur Berücksichtigung der hohen Variabilität ein hoher Probenansatz zu wählen ist, um eine repräsentative Probe zu erhalten.

5 Zusammenfassung

In der vorliegenden Arbeit wurde durch die Erfassung des *Fusarium*-Artenspektrums, der Befallshäufigkeit, der Quantifizierung der Befallsintensität bedeutender *Fusarium*-Arten und der Bestimmung der Mykotoxinbelastung das Auftreten der partiellen Taubährigkeit in Weizenbeständen auf unterschiedlichen Skalenebenen untersucht und räumlich analysiert. Auf der ersten Skalenebene wurden Mischproben von drei Weizensorten gezogen und die Variabilität des Auftretens von *Fusarium* spp. in Abhängigkeit von Stickstoffgaben und Fungizidapplikation bestimmt. Zur Ermittlung des räumlichen Auftretens von *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine, wurden auf der zweiten Skalenebene von 1 x 1 m Rasterbeprobungen durchgeführt um Verteilungsmuster verschiedener Befallsparameter von *Fusarium* spp. charakterisieren zu können. Auf der kleinsten Skalenebene wurde zunächst das Auftreten der partiellen Taubährigkeit an Einzelpflanzen auf einer Fläche von 20 x 20 cm untersucht und anschließend die Verteilung von *Fusarium* spp. und assoziierter Mykotoxine an der einzelnen Ähre bestimmt.

- In den Misch- und Rasterproben wurden in beiden Jahren mit *F. graminearum*, *F. avenaceum*, *F. poae*, *F. culmorum*, *F. tricinctum* und *F. proliferatum* sechs Erreger der partiellen Taubährigkeit nachgewiesen. Vorherrschende Art war in allen Versuchsjahren *F. graminearum*. Dies zeigte, dass sich das *Fusarium*-Artenspektrum von vorangegangenen Untersuchungen zum Erregerkomplex im Rheinland unterschied.
- Die Untersuchung der Mischproben ergab, dass mit steigender Befallshäufigkeit die Anzahl nachgewiesener *Fusarium*-Arten stieg.
- Die Befallshäufigkeit zeigte im Jahr 2007 erhebliche Unterschiede auf den beiden untersuchten Standorten und variierte zwischen 12,6 % und 40,4 %. Dies war einerseits auf die unterschiedlichen Blühzeitpunkte und die lokalen Witterungseinflüsse zum Zeitpunkt der Blüte zurückzuführen und andererseits auf die unterschiedlichen Anbauintensitäten der untersuchten Felder. Im Jahr 2008 lag die Befallshäufigkeit der Sorten Drifter (23,9 %) und Dekan (28,9 %) in etwa auf einem Niveau, wohingegen die Sorte Tommi eine mittlere Befallshäufigkeit von 60,6 % aufwies, was auf einen späteren Blühzeitpunkt und unterschiedliche Infektionsbedingungen zurückgeführt wurde.
- Beide Beprobungsarten wiesen bei geringer Stickstoffgabe und Fungizidverzicht die größten Befallshäufigkeiten auf. Eine Erhöhung der Stickstoffgabe führte nur bei ausbleibender Fungizidapplikation zu einer Verringerung des *Fusarium*-Befalls. Der geringste Befall mit *Fusarium* spp. wurde in der Fungizid behandelten Variante mit geringer Stickstoffgabe nachgewiesen.

- Unterschiedliche Stickstoffgaben und Fungizidbehandlungen hatten signifikanten Einfluss auf das räumliche Auftreten einzelner *Fusarium*-Arten. In den Rasterproben mit geringer N-Gabe und ohne Fungizidapplikation trat *F. tricinctum* aggregiert auf, eine Fungizidbehandlung führte zu einer räumlich zufälligen Verteilung dieser Art. In den Rasterproben mit hoher N-Gabe und ohne Fungizidapplikation traten *F. avenaceum* und *F. culmorum* zufällig verteilt auf und bei Fungizidbehandlung lag eine signifikant aggregierte Verteilung dieser Arten vor.
- Die molekularbiologische Quantifizierung der *Fusarium*-Arten zeigte, dass *F. graminearum* in den Versuchsjahren 2007 und 2009 der wichtigste Erreger der partiellen Taubährigkeit auf allen untersuchten Flächen war.
- Im Jahr 2007 wurden in allen Proben die Leittoxine Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEA) nachgewiesen. Bei der Rasterbeprobung von zwei Stellen in einem Bestand waren die Zearalenon-Kontaminationen am höchsten. Die Rasterbeprobung aus dem Bestand mit hohem Befallsdruck wies Deoxynivalenol als dominierendes Mykotoxin auf. An beiden Standorten wurde die Belastung durch die dominierenden Mykotoxine auf den Befall mit *F. graminearum* zurückgeführt. Des Weiteren traten 3-Acetyldeoxynivalenol (3Ac-DON), Nivalenol (NIV), Moniliformin (MON) und Enniatin B (ENNB) auf. Im Jahr 2009 wurden an Einzelähren vorrangig Belastungen mit DON und seinen acetylierten Derivaten 3Ac-DON und 15Ac-DON nachgewiesen, seltener NIV und ENNB. Dies war auf die eingestreuten Maisstoppeln, Primärinokulum für *F. graminearum*, zurückzuführen.
- Für die Rasterproben konnte kein Zusammenhang zwischen Befallshäufigkeit und Mykotoxingehalten nachgewiesen werden, wohingegen bei den drei Rasterbeprobungen in zwei Fällen ein Zusammenhang zwischen Pilzbiomasse und Mykotoxinbelastung bestand. In der Probe aus dem Schlag mit hohem Befallsdruck bestand ein starker Zusammenhang zwischen DON und dem acetylierten Derivat 3Ac-DON. Das Auftreten einer Art an einem Ort war unabhängig von dem Auftreten anderer Arten.
- Die Befallshäufigkeit trat häufig räumlich zufällig oder aggregiert auf, in drei von sieben Fällen lag eine Gleichverteilung oder eine Tendenz dazu vor. *Fusarium avenaceum* trat sowohl aggregiert als auch zufällig und regelmäßig auf, was auf die unterschiedliche Verteilung des bodenbürtigen Inokulums zurückgeführt wurde. *Fusarium graminearum* hatte auf einer Fläche eine Tendenz zur Gleichverteilung, hier machte die Art > 30 % der Befallshäufigkeit aus. Während das zufällige Auftreten auf einigen Flächen mit dem windbürtigen Inokulum begründet wurde, lag die aggregierte Verteilung auf anderen Flächen dem aggregierten bodenbürtigen Inokulum zugrunde. Für *F. poae* wurden die zufallsbedingten Verteilungsmuster durch windbürtiges Inokulum in Form von Mikrokonidien erklärt. Das

räumlich zufällige und aggregierte Auftreten von *F. tricinctum* wurde auf die räumliche Verteilung von Ernteresten der jeweiligen Vorfrucht zurückgeführt. Das sporadische Auftreten von *F. culmorum* und *F. proliferatum* erschwerte eine genauere Beurteilung ihrer räumlichen Verteilung.

- Die Befallsintensität trat in einem Fall zufallsbedingt und in dem anderen Fall aggregiert auf, was auf die räumliche Verteilung des Primärinokulums zurückgeführt wurde. Für eine repräsentative Probenahme muss das häufige Auftreten von Aggregationen beachtet werden, hier muss die Probenzahl wesentlich höher gewählt werden als bei räumlich zufälligem oder regelmäßigem Auftreten.
- Die Mykotoxinbelastungen traten sowohl aggregiert als auch zufällig auf, in keinem Fall wurde eine regelmäßige Verteilung festgestellt. In den beiden Rasterproben innerhalb eines Bestandes wiesen die Mykotoxine die gleichen Verteilungsmuster auf: DON, 3Ac-DON und ZEA traten aggregiert auf, NIV und ENNB waren zufällig verteilt. In der Rasterbeprobung aus dem Schlag mit hohem Befallsdruck wiesen 3Ac-DON und ZEA eine Aggregation bzw. eine Tendenz zur Aggregation auf. Das in hohen Konzentrationen nachgewiesene DON und die Mykotoxine MON, NIV und ENNB waren zufällig verteilt.
- Die Infektion von Einzelähren wurde im Jahr 2009 sowohl auf die Ascosporen von *Gibberella zeae* als auch auf Konidiosporen des bodenbürtige Inokulum zurückgeführt.
- Bei Untersuchung der Einzelähre korrelierte der Abschnitt der Ähre mit der *Fusarium*-spezifischen DNA und der Mykotoxinkontamination. Die unteren Abschnitte der Ähren wiesen sowohl einen stärkeren Befall als auch höhere Mykotoxinbelastungen auf.

6 Literaturverzeichnis

- ABILDGREN, M.P., LUND, F., THRANE, U., ELMHOLT, S. (1987): Czapek-Dox agar containing iprodione and dichloran 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.
- AHRENS, W., FEHRMANN, H. (1984): Attack of wheat by *Septoria nodorum* and *Fusarium ear blight*. 1st Crop loss analysis. *Journal of Plant Diseases and Protection* 91 (1): 42-58.
- ALBRECHT und PARTNER (2009): Qualitätssicherung in der Weizenproduktion, Fusarium-Ährenbefall, Risikofaktoren, Grenzwerte, Bekämpfungsstrategien, Entscheidungshilfen. Schriftenreihe des Landesamtes für Umwelt, Landwirtschaft und Geologie Heft 29/2009. Freistaat Sachsen, 2009.
- ANONYM (2003): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln) 2003. Bundessortenamt, Hannover.
- ANONYM (2007a): Verordnung (EG) Nr. 1126/2007 der Kommission vom 28. September 2007 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln hinsichtlich Fusarientoxinen in Mais und Maiseerzeugnissen. *Amtsblatt der Europäischen Union* L 255/14.
- ANONYM (2007b): Anhang, *Amtsblatt der Europäischen Union* L 255/16.
- ANONYM (2007c): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln) 2007. Bundessortenamt, Hannover.
- ANONYM (2009): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln) 2009. Bundessortenamt, Hannover.
- ANONYM (2010): Aussaatfläche 2010: Mehr Weizen, weniger Gerste. Pressemitteilung Nr. 178 vom 19.05.2010. Statistisches Bundesamt Deutschland.
- ANONYM (2011a): Ährenfusariosen in Weizen, kurzer Leitfaden zu Risikofaktoren, Bekämpfungsstrategie, Mykotoxingrenzwerten und Verwertungsmöglichkeiten. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft (LfL), 4. Auflage, 2011.

- ANONYM (2011b): Beschreibende Sortenliste Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen (großkörnig), Hackfrüchte (außer Kartoffeln) 2003. Bundessortenamt, Hannover.
- AUFHAMMER, W., KÜBLER, E., KAUL, H.P., HERMANN, W., HÖHN, D., CUILIN, Y. (2000): Ährenbefall mit Fusarien (*F. graminearum*, *F. culmorum*) und Deoxynivalenolgehalt im Korngut von Winterweizen in Abhängigkeit von der N-Düngung. Pflanzenbauwissenschaft 4 (2): 72-78
- BACKHOUSE, D., BRYDEN, W.L., BURGESS, L.W., APS Press, St. Paul, Minnesota 2001, 122-137.
- BACKHOUSE, D., BURGESS, L.W., SUMMERELL, B.A. (2001): Biogeography of *Fusarium*. *Fusarium* - Paul E. Nelson Memorial Symposium, edited by SUMMERELL, B.A., LESLIE, J.F.,
- BAI, G.H., SHANER, G. (1994): Scab of wheat: Prospects for control. Plant Disease 78: 760-766.
- BAKAN, B., GIRAUD-DELVILLE, C., PINSON, L., RICHARD, M.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.
- BALTES, W., MATISSEK, R. (2011): Lebensmittelchemie. Springer-Lehrbuch, Springer –Verlag, Berlin Heidelberg Dordrecht London New York, 7. vollständig überarbeitete Auflage. ISBN: 978-3-642-16583-2.
- BAN, T., SUENAGA, K. (2000): Genetic analysis of resistance to *Fusarium* head blight caused by *Fusarium graminearum* in Chinese wheat cultivar Sumai 3 and the Japanese cultivar Saikai 165. Euphytica 113: 87-99.
- BARTELS, M. (1998): Ährenfusarien - die unterschätzte Gefahr? Top agrar 12: 62-65.
- BATEMAN, G.L. (2005): The contribution of ground-level inoculum of *Fusarium culmorum* to ear blight of winter wheat. Plant Pathology 54: 299-307.
- BECHTEL, D.B., KALEIKU, L.A., GAINES, R.L., SEITZ, L.M. (1985): The effects of *Fusarium graminearum* infection on wheat kernels. Cereal Chemistry 62: 191-197.
- BEYER, M., AUMANN, J. (2008): Effects of *Fusarium* infection on the amino acid composition of winter wheat grain. Food Chemistry 111: 750-754.

- BHAT, R.V., SHETTY, P.H., AMRUTH, R.P., SUDERSHAN, R.V. (1997): A foodborne disease outbreak due to the consumption of moldy sorghum and maize containing fumonisin mycotoxins. *Clinical Toxicology* 35: 249-255.
- BIRZELE, B., MEIER, A., HINDORF, H., KRÄMER, J., DEHNE, H.W. (2002): Epidemiology of *Fusarium* infection and deoxynivalenol content in winter wheat in the Rhineland, Germany. *European Journal of Plant Pathology* 108: 667-673.
- BISELLI, S. (2006): Analytische Methoden für die Kontrolle von Lebens- und Futtermitteln auf Mykotoxine. *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* 1: 106-114.
- BOTTALICO, A. (1998): *Fusarium* diseases of cereals: species complex and related mycotoxin profiles in Europe. *Journal of Plant Pathology* 80: 85-103.
- 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.
- BRENNAN, J.M., EGAN, D., COOKE, B.M., DOOHAN, F.M. (2005): Effect of temperature on head blight of wheat caused by *Fusarium culmorum* and *Fusarium graminearum*. *Plant Pathology* 54: 156-160.
- BRENNAN, J.M., FAGAN, B., VAN MAANEN, A. (2003): Studies on in vitro growth and pathogenicity of European *Fusarium* fungi. *European Journal of Plant Pathology* 109: 577-587.
- BROWN, J.K.M., HOVMØLLER, M.S. (2002): Aerial dispersal of fungi on the global and continental scales and its consequences for plant disease. *Science* 297: 537-541.
- CHAMPEIL, A., DORE, T., FOURBET, J.F. (2004): *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.
- CHELLKOWSKI, J., ZAWADZKI, M., ZAJKOWSKI, P., LOGRIECO, A., BOTTALICO, A. (1980): Moniliformin production by *Fusarium* species. *Mycotoxin Research* 6 (1): 41-45.
- CHEN, B., TSAI, M., JOW, G. (2006): Induction of calcium influx from extracellular fluid by beauvericin in human leukemia cells. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 340: 134-139.
- CLARK, J.S., LEWIS, M., HORVATH, L. (2001): Invasion by extremes: population and spread with variation in dispersal and reproduction. *American Naturalist* 157: 537-554.

- COOK, R.J. (1980): *Fusarium* foot rot in wheat and its control in the Pacific Northwest. Plant Disease 64: 1061-1066.
- COTTON, T.K., MUNKVOLD, G.P. (1998): Survival of *Fusarium moniliforme*, *F. proliferatum* and *F. subglutinans* in maize stalk residue. Phytopathology 88: 550-555.
- COTTY, P.J. (2001): Cottonseed Losses and Mycotoxins. In: Compendium of Cotton Diseases, 2nd edition 2001: 9-13.
- CUMAGUN, C.J.R., BOWDEN, R.L., JURGENSON, J.E., LESLIE, J.F., MIEDANER, T. (2004): Genetic mapping of pathogenicity and aggressiveness of *Gibberella zea* [*Fusarium graminearum*] toward wheat. Phytopathology 94: 520-526.
- DARDIS, J., WALSH, E.J. (2000): Studies on the effectiveness of metconazole in controlling *Fusarium* head blight caused by *Fusarium culmorum* in spring wheat (*Triticum aestivum* L.). Cereal Research Communications 28: 443-450.
- 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.
- DELIN, S. (2004): Within-field variations in grain protein content - Relationship to yield and soil nitrogen and consistency in maps between years. Precision Agriculture 5: 565-577.
- DESJARDINS, A.E. (2006): *Fusarium* Mycotoxins: Chemistry, Genetics and Biology. 1. Auflage. APS Press, St. Paul, Minnesota, USA.
- 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.
- DIAZ, G.J., BROERMANS, H.J. (1994): Fumonisin toxicosis in domestic animals: a review. Veterinary and Human Toxicology 36: 548-555.
- DICKSON, J.G. (1922): Wheat scab influenced by climate. Wisconsin Agricultural Experiment Station (WAES) 339: 32-34.
- 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., BRENNAN, J., COOKE, B.M. (2003): Influence of climatic factors on *Fusarium*-species pathogenic to cereals. European Journal of Plant Pathology 109: 755-768.

- DORMANN, M., OETTLER, G. (1993): Genetic variation of resistance to *Fusarium graminearum* (headblight) in primary hexaploid triticale. *Hodowa Roslin, Aklimatyzacja i Nasiennictwo* 37: 121-127.
- DUTZMANN, S., SUTY-HEINZE, A. (2004): Prothioconazole: a broad spectrum demethylation-inhibitor (DMI) for arable crops. *Pflanzenschutz-Nachrichten Bayer* 57, 2: 249-264.
- EDWARDS, S.G., PIRGOZLIEV, S.R., HARE, M.C., JENKINSON, P. (2001): Quantification of trichothecene-producing *Fusarium* species in harvested grain by competitive PCR to determine the efficacy of fungicides against *Fusarium* head blight of winter wheat. *Applied and Environmental Microbiology* 67: 1575-1580.
- EIBLMEIER, P., LEPSCHY VON GEISSENTHALL, J. (2007): Risk evaluation of deoxynivalenol levels in Bavarian wheat from survey data. *Journal of Plant Diseases and Protection* 114: 69-75.
- ELLNER, F. (2007): Lagergetreide erhöht das Mykotoxin-Risiko. *Getreide Magazin* 2: 116-118.
- ENGELHARDT, G., BERGER, M. (2008): Mykotoxine – Giftige Stoffwechselprodukte von Schimmelpilzen. Bayerisches Staatsministerium der Justiz und für Verbraucherschutz 2011.
- EUDES, F., COMEAU, A., RIOUX, S., COLLIN, J. (2001): Impact of trichothecenes on *Fusarium* head blight [*Fusarium graminearum*] development in spring wheat (*Triticum aestivum*). *Canadian Journal of Plant Pathology* 23: 318-322.
- FAUZI, M.T., PAULITZ, T.C. (1994): The effect of plant growth regulators and nitrogen fertilization on *Fusarium* head blight of the spring wheat cultivar Max. *Plant Disease* 78: 289-292.
- FENG, Q.L., YU, W.L., XUE, Y.L., YOSHIKAWA, T. (2002): *Fusarium* toxins in wheat from an area in Henan Province, PR China, with a previous human red mould intoxication episode. *Food Additives and Contaminants* 19 (2): 163-167.
- 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.
- FERNANDO, W.G.D., MILLER, J.D., SEAMAN, W.L., SEIFERT, K., PAULITZ, T. (2000): Daily and seasonal dynamics of airborne spores of *Fusarium graminearum* and other *Fusarium* species sampled over wheat plots. *Canadian Journal of Botany* 78: 497-505.

- FERNANDO, W.G.D., PAULITZ, T.C., SEAMAN, W.L., DUTILEULL, P., MILLER, J.D. (1997): Head blight gradients caused by *Gibberella zea* from area sources of inoculum in wheat field plots. *Phytopathology* 87: 414-421.
- FINK-GREMMELS, J. (2005): European Mycotoxin Seminar Series by Alltech, 2005, Tagungsband: 31-41.
- 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, α -zearalenol and β -zearalenol for uterine and oviduct estrogen receptors in swine, rats and chickens: An indicator of estrogenic potencies. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Comparative Pharmacology and Toxicology* 94: 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.
- FORRER, H.R., HECKER, A., KULLING, C., KESSLER, P., JENNY, E., KREBS, H. (2000): Fusarienbekämpfung mit Fungiziden? *Agrarforschung* 7 (6): 258-263.
- FREEMAN, G.G., MORRISON, R.I. (1949): The Isolation and Chemical Properties of Trichothecin, an Antifungal Substance from *Trichothecium roseum* Link. *Biochemical Journal* 1949, 44: 1-4.
- FRISVAD, J.C., THRANE, U., SAMSON, R.A., PITT, J.I. (2006): Important mycotoxins and the fungi which produce them. *Advances in Food Mycology* 571: 3-31.
- GANG, G., MIEDANER, T., SCHUMACHER, 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: 203-203.
- GEDEK, B. (1980): *Kompendium der medizinischen Mykologie*. 1. Auflage Verlag Paul Parey, Berlin-Hamburg: 324-333.
- GOEDEKE, R., VON TIEDEMANN, A. (2011) Einfluss der Vorfrucht auf das *Fusarium*-Artenspektrum und die Mykotoxinkontamination in Körnern von Winterweizen, Zuckerindustrie 136 (3): 172-178

- GÖRTZ, A. (2009): Auftreten der *Fusarium*-Kolbenfäule im Maisanbau in Deutschland und Maßnahmen zur Vermeidung der Mykotoxinbelastung in Maiskörnern. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelms Universität Bonn.
- GOSSMANN, M., KEFERBÖCK, J., BÜTTNER, C. (2007): Untersuchungen zum Befall und qualitätsmindernden Einfluß von *Fusarium* spp. an Melone (*Cucumis melo*) in Niederösterreich. Tagungsbericht ALVA-Jahrestagung 2007: 232-233.
- GREENHALGH, R., LEVANDIER, D., ADAMS, W., MILLER, J.D., BLACKWELL, B.A., McALEES, A.J., TAYLOR, A. (1986): Production and characterization of deoxynivalenol and other secondary metabolites of *Fusarium culmorum*. Journal of Agricultural and Food Chemistry 34: 98-102.
- GROSSMANN, K., RETZLAFF, G. (1997): Bioregulatory Effects of the Fugicidal Strobilurin Kresoxim-methyl in Wheat (*Triticum aestivum*), Pesticide Science 50: 11-20.
- HÄBERLE, J. (2008): Kartierung und Validierung von Resistenz-QTL gegen Ährenfusarium in Winterweizen. Dissertation, Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft. Schriftenreihe 1. Auflage Februar/2008.
- HAMILL, R.L., HIGGENS, C.E., BOAZ, H.E., GORMAN, M. (1969): The structure of beauvericine, a new depsipeptide antibiotic toxic to *Artemia salina*. Tetrahedron Letters 49: 4255-4258.
- HART, L.P. (1998): Variability of vomitoxin in truckloads of wheat in a wheat scab epidemic year. Plant Disease 82 (6): 625-630.
- HART, L.P., SCHABENBERGER, O. (2001): Early detection of deoxynivalenol in wheat grain. National Fusarium Head Blight Proceedings 2001: 164-167. Cincinnati, OH.
- HASTINGS, A., CUDDINGTON, K., DAVIES, K.F., DUGAW, C.J., ELMENDORF, S., FREESTONE, A. (2005): The spatial spread of invasions: new developments in theory and evidence. Ecology Letters 8: 91-101.
- HEINRICH, I. (2011): Anwendungsmöglichkeiten der Infrarotthermographie zur Detektion von *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit, Echtem Mehltau und Rübenrost an Zuckerrüben. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- HEREBIAN, D., ZÜHLKE, S., LAMSHÖFT, M., SPITELLER, M. (2009): Multimycotoxin 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.
- HERMANN, W., KÜBLER, E., AUFHAMMER, W. (1998): Ährenbefall mit Fusariosen und Toxingehalt im Korngut bei verschiedenen Getreidearten. *Pflanzenbauwissenschaften* 2: 97-107.
- HESELTEINE, J.V., MEHLMAN, M.A. (editors) *Mycotoxins in human and animal health*. Pathotox Publishers, Park Forest South: 263-273.
- HESTBJERG, H., NIELSEN, K.F., THRANE, U., ELMHOLT, S. (2002): Production of trichothecenes and secondary metabolites by *Fusarium culmorum* and *Fusarium equiseti* on common laboratory media and a soil organic matter agar: an ecological interpretation. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 7593-7599.
- HILTON, A.J., JENKINSON, P., HOLLINS, T.W., PARRY, D.W. (1999): Relationship between cultivar height and severity of *Fusarium* ear blight in wheat. *Plant Pathology* 48: 202-208.
- HINTERHOLZER, J. (1992): Pflanzenbauliche Aspekte zum Toxinproblem bei Mais. In: Veröffentlichung der Bundesanstalt für Agrarbiologie Linz/Donau: 69-80.
- HIRST, J.M. (1958): The automatic volumetric spore trap and examples of its use in plant pathology. *Journal of the proceedings of the Linnean Society. Botany, London* 169, No. 1-2: 66-73.
- HOFFMANN, G.M., NIEHAUS, F., SCHÖNBECK, F., WELTZIEN, H.C., WILBERT, H. (1976): *Lehrbuch der Phytomedizin*. 1. Auflage. Verlag Paul Parey, Hamburg, Berlin.
- HÖHN, D., ROSENBERGER, A., KAUL, H.P., KÜBLER, E., AUFHAMMER, W. (2002): Ährenfusariumbefall (*F. culmorum*) und Deoxynivalenol-Akkumulation im Kornausbildungsverlauf abreifedifferenzierter Winterweizenbestände. *Pflanzenbauwissenschaften* 6: 1-8.
- 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): Survival of *Gibberella zeae* in *Fusarium*-damaged wheat kernels. *Plant Disease* 87: 282-287.
- IVANOVA, L., SKJERVE, E., ERIKSEN, G.S., UHLIG, S. (2006): Cytotoxicity of enniatins A, A1, B, B1, B2 and B3 from *Fusarium avenaceum*. *Toxicon* 47 (8): 868-876.

- JANSEN, C., v. WETTSTEIN, D., SCHÄFER, W., KOGEL, K.H., FELK, A., MAIER, F.J. (2005): Infection patterns in barley and wheat spikes inoculated with wild-type and trichothecene synthesis gene disrupted *Fusarium graminearum*. Proceedings of the National Academy of Science USA 102: 16892-16897.
- JECFA (2001): Safety evaluation of certain mycotoxins in food, prepared by the Fifty-sixth meeting of the JOINT FAO/WHO Expert Committee on Food Additives 2001, Series 47: 410.
- JELINEK, C.F., POHLAND, A.E., WOOD, G.E. (1989): Worldwide occurrence of mycotoxins in foods and feeds – an update. Journal of the Association of Official Analytic Chemists 72: 223-229.
- JENKINSON, P., PARRY, D.W. (1994): Splash dispersal of conidia of *Fusarium culmorum* and *Fusarium avenaceum*. Mycological Research 98: 505-510.
- JENNINGS, P., TURNER, J.A., NICHOLSON, P. (2000): Overview of *Fusarium* ear blight in the UK – effect of fungicide treatment on disease control and mycotoxin production. In: Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference – Pests and Diseases 2000, Vol. 2: 707-712. British Crop Protection Council, Farnham, UK.
- JESTOI, M. (2008): Emerging *Fusarium*-Mycotoxins Fusaproliferin, Beauvericin, Enniatins and Moniliformin – a review. Critical Reviews in Food Science and Nutrition 48: 21-49.
- JOFFE, A.Z. (1986): *Fusarium* Species: Their Biology and Toxicology. John Willey & Sons, New York, Chichester, Brisbane, Tontono, Singapore.
- JONES, R.K. (2000): Assessments of *Fusarium* head blight of wheat and barley in response to fungicide treatment. Plant Disease 84: 1021-1030.
- JØRGENSEN, L.N. (2001): Control of *Fusarium* ear blight in winter wheat. Proceedings of the 17th Danish Plant Protection Conference II, DJF-rapport 24: 197-210.
- JUGNET, M.P., BAURRAULT, G., CARON, D., ET ALBERTINI, L. (1983): Epidemiologie de *Fusarium culmorum* (W.G.Smith) Sacc. Sur ble dans le sud ouest de la France. Mecanismes et agents de dissemination des conidies. Cryptogamie, Mycological Research 14: 95-108.
- JUNGK, A. (1984): Toxikologie der Pflanzenernährung (Düngerschäden). In: HOCK, B., ELSTNER, E.F.: Pflanzentoxikologie: Der Einfluss von Schadstoffen und Schadwirkungen auf Pflanzen: 224-240. Wissenschaftsverlag, Bibliographisches Institut Mannheim, Wien, Zürich.

- KANDLER, H. (2008): Probenahme von Lebensmitteln für die Mykotoxanalytik – Hintergründe, Probenahmepläne, Probenahmeunsicherheit, Probenahmeprotokolle, Beurteilung von Zertifikaten. In: Fusarien & Mykotoxine in Getreide und Mais – eine Herausforderung, Fachtagung ART Zürich-Reckenholz, 28.03.2008: 13.
- KANG, Z., BUCHENAUER, H. (1999): Immunocytochemical localization of *Fusarium* toxins in infected wheat spikes by *Fusarium culmorum*. *Physiological and Molecular Plant Pathology* 55: 275-288.
- KANG, Z., BUCHENAUER, H. (2002): Studies on the infection process of *Fusarium culmorum* in wheat spikes: Degradation of host cell wall components and localization of trichothecene toxins in infected tissue. *European Journal of Plant Pathology* 108: 653-660.
- KIECANA, I., PERKOWSKI, J., CHELKOWSKI, J., VISCONTI, A. (1987): Trichothecene mycotoxins in kernels and head Fusariosis susceptibility in winter triticale. *Mycotoxin Research. European Seminar 'Fusarium-Mycotoxins, Taxonomy, Pathogenicity', Special Edition, Warsaw: 53-56.*
- KIRCH, G. (2006): Auftreten und Bekämpfung phytophager Insekten an Getreide und Raps in Schleswig-Holstein. Dissertation, Justus-Liebig-Universität Giessen.
- KLINGENHAGEN, G., FRAHM, J. (2002): Unterschiedliche Anbauintensitäten und *Fusarium*-Belastung. Tagungsband der 13. und 14. Wissenschaftlichen Fachtagung: *Fusarium*-Befall und Mykotoxinbelastung von Getreide und Schadverdichtung in Ackerböden am 5.12. 2001: 23-31.
- KLIX, M., VERREET, J.A., BEYER, M. (2005): *Fusarium graminearum* im Weizen: Bedeutung der Ascosporen für Befall und Mykotoxinbildung. In: Vierter Arbeitsbericht der Arbeitsgruppe Lebensmittelqualität und –sicherheit der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel: 3-19.
- KLÖHN, H., KLINK, H., VERREET, J.A. (2010): Mykotoxinbelastung des Weizens durch Auftreten von *Fusarium*-Pilzen. *Landpost* 05.06.2010: 28-29.
- KOT, M., LEWIS, M.A., VAN DEN DRIESCHE, P. (1996): Dispersal data and the spread of invading organisms. *Ecology* 77: 2027-2042.
- KRAUTHAUSEN, J.H., WEINERT, J., BAUERMANN, W., WOLF, G.A. (2003): Mehrjährige Erhebungen zum Vorkommen von Ährenfusarien und dem Mykotoxin Deoxynivalenol in Getreide aus Rheinland-Pfalz. *Gesunde Pflanze* 55: 136-143.
- KUIPER-GOODMAN, T., SCOTT, P.M., WATANABE, H. (1987): Risk assessment of the mycotoxin zearalenone. *Regulatory Toxicology and Pharmacology* 7: 253-306.

- LACEY, J. (1989): Pre- and post-harvest ecology of fungi causing spoilage of foods and other stored products. *Journal of Applied Bacteriology Symposium Supplement* 18: 11-25.
- 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 (3): 277-283.
- LANCASHIRE, P.D., BLEIHOLDER, H., BOOM, T.V.D., LANGELÜDDEKE, P., STAUSS, R., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1991): A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. *Annals of Applied Biology* 119: 561-601. doi: 10.1111/j.1744-7348.1991.tb04895.x
- LANGEVIN, F., EUDES, F., COMEAU, A. (2004): Effect of trichothecens produced by *Fusarium graminearum* during *Fusarium* head blight development in six cereal species. *European Journal of Plant Pathology* 110: 735-746.
- 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.
- LEE, Y.W., MIROCHA, C.J. (1984): Production of Nivalenol and Fusarenone-X by *Fusarium tricinctum* Fn-2B on a rice substrate. *Applied and Environmental Microbiology* 48: 857-858.
- LEMMENS, M., HAIM, K., LEW, H., RUCKENBAUER, P. (2004): The effect of nitrogen fertilization on *Fusarium* head blight contamination in wheat. *Journal of Phytopathology* 152: 1-8.
- LEONARD, K.J., BUSHNELL, W.R. (2003): *Fusarium* Head Blight of Wheat and Barley. APS Press, St. Paul, MN, USA.
- LEPSCHY v. GEISSENTHAL, J. (1992): Fusarientoxine in Getreide – ihre Entstehung und Vorbeugungsmaßnahmen. *Gesunde Pflanze* 44: 35-39.
- LEPSCHY, J., MUNZERT, M. (2004): Verfahren zur Abschätzung des DON-Gehalts. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LESLIE, J.F., SUMMERELL, B.A. (2006): *The Fusarium Laboratory Manual*. 1. Ausgabe, Blackwell publishing, Ames, Iowa, USA.
- 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.

- LINDENTHAL, M. (2005): Visualisierung der Krankheitsentwicklung von Falschem Mehltau an Gurken durch *Pseudoperonospora cubensis* mittels Thermografie. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- LINK, H.F. (1809): Observations in ordines plantarum naturalis, Dissertatio I. Der Gesellschaft Naturforschender Freunde zu Berlin. Magazin für die neuesten Entdeckungen in der gesamten Naturkunde 3: 3-42.
- LLORENS, A., MATEO, R., HINOJO, M.J., LOGRIECO, A., JIMÉNEZ, M. (2004): Influence of the interactions among ecological variables in the characterization of zearalenone producing isolates of *Fusarium* spp. Systematic and Applied Microbiology 27: 253-260.
- 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., RITTIENI, A., CARAFFA, M.F., RANDAZZO, G., BOTTALICO, A., MACCHIA, L. (1996): Fusaproliferin production by *Fusarium subglutinans* and its toxicity to *Artenia salina* SF-9 insect cells and IARC/LCL 171 human B lymphocytes. Applied and Environmental Microbiology 62: 3378-3384.
- LUDEWIG, A., KABSCH, U., VERREET, J.A. (2005): Comparative deoxynivalenol accumulation and aggressiveness of isolates of *Fusarium graminearum* on wheat and the influence on yield as affected by fungal isolate and wheat cultivar. Journal of Plant Diseases and Protection 112: 329-342.
- LYR, H. (1995): Modern Selective Fungicides. Gustav Fischer Verlag, Berlin.
- MAGAN, N., HOPE, R., COLLEATE, A., BAXTER, E.S. (2002): Relationship between growth and mycotoxin production by *Fusarium* species, biocides and environment. European Journal of Plant Pathology 108 (7): 685-690.
- MAINA, J.W. (2008): Development of *Fusarium* species differing in mycotoxin production and conidia formation on wheat plant. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- 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.
- MARASAS, W.F. (1996): Fumonisin: history, world-wide occurrence and impact. Advances in Experimental Medicine and Biology 392: 1-17.

- MARKELL, S.G., FRANCL, L.J. (2003): *Fusarium* head blight inoculum: Species prevalence and *Gibberella* spore type. Plant Disease 97: 814-820.
- MARKELL, S.G., FRANCL, L.J. (2003): *Fusarium* head blight inoculum: species prevalence and *Gibberella zeae* spore type. Plant Disease 87: 814-820.
- MARTIN, R.A., MACLEOD, J.A., CALDWELL, C. (1991): Influences of production inputs on incidence of infection by *Fusarium* species on cereal seed. Plant Disease 75: 784-788.
- MASTEL, K., MICHELS, K. (2000): Dauerbrenner Fusarium. Landinfo 9: 9-13.
- MATTHIASCHK, G., SPOTT, H.J., WEBER, R. (1999): Fumonisine in Lebensmitteln des deutschen Marktes. Bundesgesundheitsblatt-Gesundheitsforschung-Gesundheitsschutz 42: 161-164.
- MATTHIES, A., FLATTER, A., SEMAR, M., BLEIHOLDER, H., OPPITZ, K. (2000): *Fusarium* in wheat: importance and toxin production in the field – possibilities and limits of fungicide treatments. Proceedings of the 22rd Mycotoxin-Workshop Bonn 2000, Mycotoxin Research 16A (1): 6-10.
- MATTHIES, A., MENK, B.H., BLEIHOLDER, H. (2000): Untersuchungen zur Wirksamkeit von Strobilurin-haltigen Fungiziden im Vergleich zu Azolen auf den Gehalten an Deoxynivalenol (DON) in Weizenproben des Erntejahres 1999 – Erste Erkenntnisse -. Gesunde Pflanze 52: 26-32.
- MAULER-MACHNIK, A., SUTY, A. (1997): New findings on the epidemiology, importance and control of *Fusarium* ear blight on wheat. Fifth European Fusarium Seminar, Szeged, Hungary, 25 (3/2): 707-709.
- MAULER-MACHNIK, A., ZAHN, K. (1994): Ährenfusariosen an Weizen – neue Erkenntnisse zur Epidemiologie und zur Bekämpfung mit Folicur (Tebuconazol). Pflanzenschutz Nachrichten Bayer 47 (2): 133-160.
- McLAUGHLIN, C.S., VAUGHAN, M.H., CAMPBELL, I.M., WEI, C.M., STAFFORD, M.E., HANSEN, B.S. (1977): Inhibition of protein synthesis by trichothecenes. In RODRICKS, J.V.,
- 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., BIRZELE, B., OERKE, E.C., DEHNE, H.W. (2000): Impact of growth conditions on the occurrence of *Fusarium* spp. and the mycotoxin content of wheat. Mycotoxin Research 16A: 12-15.

- MERRILL, A.H., VAN ECHTEN, J.R., WANG, E., SANDHOFF, K. (1993): Fumonisin inhibits sphingosine (sphinganine) N-acetyltransferase and de novo sphingolipid biosynthesis in cultured neurons in situ. *Journal of Biological Chemistry* 268: 27299-27306.
- MESTERHÁZY, Á. (1995): Types and components of resistance to *Fusarium* head blight of wheat. *Plant Breeding* 114 (5): 377-386.
- MEYER, D., WEIPERT, D., MIELKE, H. (1986): Effects of *Fusarium culmorum* infection on wheat quality. *Getreide Mehl Brot*. 40: 35-39.
- MEYER, G.H. (2005): Kornbefall durch *Fusarium*-Arten an Winterweizen in Nordrhein-Westfalen in den Jahren 2001-2003 unter besonderer Berücksichtigung Moniliforminbildender Arten. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- MIEDANER, T., PERKOWSKI, J. (1996): Correlations among *Fusarium culmorum* head blight resistance, fungal colonization and mycotoxin contents in winter rye. *Plant Breeding* 115: 347-351.
- MILLER, J.D. (2002): Aspects of the ecology of *Fusarium* toxins in cereals. *Advances in Experimental Medicine Biology* 504: 19-27.
- MILLER, J.D., EWEN, M.A. (1997): Toxic effects of deoxynivalenol on ribosomes and tissues of the spring wheat cultivar Frontana and Casavant. *Natural Toxins* 5: 234-237.
- MILLER, J.D., YOUNG, J.C., SAMPSON, D.R. (1985): Deoxynivalenol and *Fusarium* head blight resistance in spring cereals. *Phytopathologische Zeitschrift* 113 (4): 359-367.
- MILLER, J.D., YOUNG, J.C., TRENHOLM, H.L. (1983): *Fusarium* Toxins in Field Corn: Time Course of Fungal Growth and Production on Deoxynivalenol and Other Mycotoxins. *Canadian Journal of Botany* 61: 3080-3087.
- 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.
- MORRISON, E., KOSIAK, B., RITIENI, A., AASTVEIT, A.H., UHLIG, S., BERNHOFT, A. (2002): Mycotoxin production by *Fusarium avenaceum* strains isolated from Norwegian grain and the cytotoxicity of rice culture extracts to porcine kidney epithelial cells. *Journal of Agricultural and Food Chemistry* 50: 3070-3075.
- MÜCKE, W., LEMMEN, C.H. (2004): Schimmelpilze, 3. Auflage. Ecomed Medizin, Verlagsgruppe Hüthing Jehle Rehm GmbH.

- MÜLLENBORN, C., STEINER, U., LUDWIG, M., OERKE, E.C. (2008): Effect of fungicides on the complex of *Fusarium* species and saprophytic fungi colonizing wheat kernels. *European Journal of Plant Pathology* 120: 157-166.
- MÜLLENBORN, C., STEINER, U., LUDWIG, M., OERKE, E.C. (2008): Effect of fungicides on the complex of *fusarium* species and saprophytic fungi colonizing wheat kernels. *European Plant Pathology* 120: 157-166.
- MÜLLER, C., BRÖTHER, H. (2002): Untersuchungen zum Artenspektrum von *Fusarium*-Pilzen im Erntegut von Getreide im Land Brandenburg. *Gesunde Pflanzen* 54. Jahrgang, Heft 2: 33-37.
- MÜLLER, H.M., REIMAN, J., SCHUMACHER, U., SCHWADORF, K. (1997): *Fusarium* toxins in wheat harvested during six years in an area of southwest Germany. *Natural Toxins* 5 (1): 24-30.
- MÜLLER, H.M., REIMANN, J., SCHUMACHER, U., SCHWADORF, K. (1997): *Fusarium* toxins in wheat harvested during six years in an area of southwest Germany. *Natural Toxins* 5: 24-30.
- MÜLLER, H.M., SCHOLLENBERGER, M., HERMANN, W., DROCHNER, W. (1999): Zum Vorkommen von Fusarientoxinen im Weizen der Ernte 1998 aus zwei Anbaugebieten in Baden-Württemberg. In: *Cyanamid Agrar, Fusarium-Symposium 02.12.1999*: 8-9.
- MÜLLER, M.E.H., BRENNING, A., VERCH, G., KOSZINSKI, S., SOMMER, M. (2010): Multifactorial spatial analysis of mycotoxin contamination of winter wheat at field and landscape scale. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 139: 245-254.
- MÜNZING, K., MASLOFF, S. (2005): Einhaltung neuer Mykotoxinhöchstwerte bei Getreidepartien. *Getreidetechnologie* 59: 289-293.
- MUTHOMI, J.W., OERKE, E.C., MUTITU, E.W., SCHADE-SCHÜTZ, A., DEHNE, H.W. (2002): Susceptibility of Kenyan wheat varieties to head blight, fungal invasion and deoxynivalenol accumulation inoculated with *Fusarium graminearum*. *Journal of Phytopathology* 150: 30-36.
- 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.
- NAMATAME, I., TOMODA, H., ISHIBASHI, S., OMURA, S. (2004): Antiatherogenic activity of fungal beauveriolides, inhibitors of lipid droplet accumulation in macrophages. *Proceedings of the National Academy of Science* 101 (3): 737-742.

- 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 the International Wheat Conference, Mar de Plata, Argentina, edited by BUCK, H.T., NISI, J.E., SALOMON, N., Springer, Dordrecht, Netherlands.
- 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.
- NORNG, S., PETTTTT, A.N., KELLY, R.M., BUTLER, D.G., STRONG, W.M. (2005): Investigating the relationship between site-specific yield and protein of cereal crops. Precision Agriculture 6: 41-51.
- NOSER, J., SCHMUTZ, H.R., SCHMID, S., SCHNEIDER, P. (2007): Bestimmung von Enniatinen in Getreideprodukten auf dem Schweizer Markt. Lebensmittelchemie 61: 49-72.
- OBST, A. (1988): Wie man Ährenfusariosen vermeidet. DLG-Mitteilung 9: 470-471.
- OBST, A., BECHTEL, A. (2000): Witterungsvoraussetzungen für den Ährenbefall des Weizens mit *Fusarium graminearum*. Bodenkultur und Pflanzenbau 4 (3): 81-88.
- OBST, A., FUCHS, H. (2000): Der *Fusarium*-Besatz in Winter- und Sommergetreide – Untersuchungsergebnisse von Saatgetreidestichproben aus Bayern 1987-1999. Bodenkultur und Pflanzenbau 4: 21-26.
- OBST, A., LEPSCHY, J., BECK, R. (1997): Ährenfusariosen nicht unterschätzen! Top agrar 5: 48-54.
- OBST, A., OBST, L., STRECKERT, G. (1990): Natürliche Gifte im Getreide – eine Gefahr für unsere Lebensmittel? Fördergemeinschaft Integrierter Pflanzenbau 6, Bonn.
- OERKE, E.C., MEIER, A., DEHNE, H.W., SULYOK, M., KRŠKA, R., STEINER, U. (2010): Spatial variability of fusarium head blight pathogens and associated mycotoxins in wheat crops. Plant Pathology 59: 671-682.
- OERKE, E.C., MEIER, A., LIENEMANN, K., MEYER, G., MUTHOMI, J., SCHADESCHÜTZE, A., STEINER, U., DEHNE, H.W. (2001): Auftreten und Bekämpfung von Fusarien im Rheinland. In: *Fusarium*-Befall und Mykotoxinbelastung von Getreide – Ursachen, Auswirkungen, Vermeidungsstrategien. 13. Wissenschaftliche Fachtagung. Band 92, Schriftenreihe des Lehr- und Forschungsschwerpunktes „Umweltverträgliche und standortgerechte Landwirtschaft“ Landwirtschaftliche Fakultät der Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.

- OERKE, E.C., STEINER, U. (2002): Viele Fusarien – viele Toxine. DLG-Mitteilungen 3: 50-53.
- OLDENBURG, E. (2004): Crop cultivation measures to reduce mycotoxin contamination in cereals. Journal of Applied Botany and Food Quality 78: 174-177.
- OSHIRO, T., RUDEL, L.L., OMURA, S., TOMODA, H. (2007): Selectivity of Microbial Acyl-CoA: cholesterol Acyltransferase Inhibitors toward Isozymes. Japan Antibiotics Research Association 60: 43-51.
- PARRY, D.W., JENKINSON, P., McLEOD, L. (1995): *Fusarium ear blight* (scab) in small grain cereals – A review. Plant Pathology 44: 207-391.
- PATEL, S., HAZEL, C.M., WINTERTON, A.G., MORTBY, E. (1996): Survey of ethnic foods for mycotoxins. Food Additives and Contaminants 13: 833-841.
- PAUL, P.A., LIPPS, P.E., HERSHMAN, D.E., MCMULLEN, M.P., DRAPER, M.A., MADDEN, L.V. (2008): Efficacy of triazole-based fungicides for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol control in wheat: A multivariate meta-analysis. Phytopathology 98: 999-1011.
- PAUL, P.A., LIPPS, P.E., HERSHMAN, D.E., MCMULLEN, M.P., DRAPER, M.A., MADDEN, L.V. (2008): Efficacy of triazole-based fungicides for *Fusarium* head blight and deoxynivalenol control in wheat: A multivariate metaanalysis. Phytopathology 98: 999-1011.
- PAULITZ, T. (1996): Diurnal release of ascospores by *Gibberella zeae* in inoculated wheat plots. Plant Disease 80: 674-678.
- PAULITZ, T.C. (1999): *Fusarium head blight*: a re-emerging disease. Phytoprotection 80 (2): 127-133.
- PEREYRA, S.A., DILL-MACKY, R. (2008): Colonization of the residues of diverse plant species by *Gibberella zeae* and their contribution to *Fusarium* head blight inoculum. Plant Disease 92: 800-807.
- PERKOWSKI, J., MIEDANER, T., GEIGER, H.H., MÜLLER, H.M., CHELKOWSKI, J. (1995): Occurrence of deoxynivalenol (DON), 3-acetyl-DON, zearalenone and ergosterol in winter rye inoculated with *Fusarium culmorum*. Cereal Chemistry 72: 205-209.
- 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.
- 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.
- PIRGOZLIEV, S.R., SIMON, G.E., MARTIN, G.H., JENKINSON, P. (2003): Strategies for the control of *Fusarium* head blight in cereals. *European Journal of Plant Pathology* 109: 731-742.
- POLLEY, R.W., THOMAS, M.R. (1991): Surveys of diseases of winter wheat in England and Wales 1976-1988 *Annals of Applied Biology* 119: 1-20.
- POOLE, R.W. (1979): An introduction to quantitative ecology. McGraw-Hill, New York, USA.
- PREIß, U., ALBERT, G. (2000): *Fusarium* und Mykotoxin-Nachweis in Getreide. Mitteilung Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinhessen, Nahe-Hunsrück 2000.
- PRELUSKY, D. B., ROTTER, B.A., ROTTER, R.G. (1994): Toxicology of mycotoxins. In: MILLER, J.D., TRENTHOLM, H.L.: *Mycotoxins in grain: Compounds other than aflatoxins*. Eagan Press, St. Paul, MN: 359-403.
- PRELUSKY, D.B., HAMILTON, R.M.G., TRENHOLM, H.L. (1989): Application of the chick embryotoxicity bioassay for the evaluation of mycotoxin toxicity. *Microbiologie Aliments Nutrition* 7: 57-65.
- PRINCE, R., CROFTS, A., STEINRAUF, L.A. (1974): A comparison of beauvericin, enniatin and valinomycin as calcium transporting agents in liposomes and chromatophores. *Biochemical and Biophysical Research Communications* 59: 697-703.
- PUNITHALINGHAM, E., HOLLIDAY, P. (1972): *Ascochyta pisi*. CMI Description of Pathogenic Fungi, No. 334.
- RANDAZZO, G., FOGLIANO, V., RITIENI, A., MANNINA, L., ROSSI, E., SCARALLO, A. (1993): Proliferin, a new sesterterpene from *Fusarium proliferatum*. *Tetrahedron* 49: 10883-10896.
- RILEY, R.T., WANG, E., SCHROEDER, J.J., SMIT, E.R., PLATTNER, R.D., ABBAS, H., YOO, HWAN-SOO, MERRILL, A.H. jr. (1996): Evidence for disruption of sphingolipid metabolism as a contributing factor in the toxicity and carcinogenicity of fumonisins. *Natural Toxins* 4: 3-15.

- RINTELEN, J. (2000): Erste Untersuchungen in den Jahren 1982-1989 zum Befall von Futtergetreide, Mais-, Hafer- und Weizenkörnern mit Fusarien. Ergebnisse eines LBP-Forschungsverbands, Druckhaus Kastner, Wolnzach: 15-20.
- RINTELEN, J. (2000): Ist das starke Auftreten von *Gibberella zeae* (*Fusarium graminearum*) an Getreideähren auf die Zunahme des Maisanbaus zurückzuführen? In: Risiken durch den Ährenparasiten *Fusarium graminearum* – Ergebnisse eines LBP-Forschungsverbands. Schriftreihe Bodenkultur und Pflanzenbau der Bayerischen Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau: 11-14.
- RODEMANN, B. (1999): Mykotoxine in Getreide. Forschungsreport für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten 2: 6-9.
- RODEMANN, B., BARTELS, G. (2004): Mykotoxinproblematik im Getreide – Bedeutung, Vorkommen und Vermeidung. Schriftenreihe der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft Ulmer. Stuttgart Heft: 7: 28-40. Gesunde Pflanzen – Gesunde Nahrung: Pflanzenschutz ist Verbraucherschutz. HEITERFUß, R., KLINGAUF, F. (Herausgeber). ISSN/ISBN: 0939-8929; 3-8001-8918-6.
- RODEMANN, B., BARTELS, G. (2007): Integrierte Strategien zur Bekämpfung von Ährenfusarium, *Septoria tritici* und *Drechslera tritici-repentis* unter besonderer Berücksichtigung der Sortenleistung. In: Besser ernten mit resistenten Sorten. Ig-Pflanzenzucht: 5-15.
- ROSSI, V., LANGUASCO, L., PATTORI, E., GIOSUE, S. (2002): Dynamics of airborne *Fusarium* macroconidia in wheat fields naturally affected by head blight. Journal of Plant Pathology 84 (1): 53-64.
- ROTTER, B.A., PRELUSKY, D.B. (1996): Toxicology of deoxynivalenol (Vomitoxin). Journal of Toxicology and Environmental Health 48: 1-34.
- SCHAAFSMA, A.W., TAMBURIC-ILINCIC, L., MILLER, J.D., HOOKER, D.C. (2001): Agronomic considerations for reducing deoxynivalenol in wheat grain. Canadian Journal of Plant Pathology 23: 279-285.
- SCHADE-SCHÜTZE, A. (1999): Auftreten und biologische Charakterisierung von Fusarium-Arten im Weizenanbau. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- SCHLANG, N. (2010): Auftreten der partiellen Taubährigkeit in Weizenbeständen – räumliche Verteilung der *Fusarium*-Arten und assoziierter Mykotoxine. Dissertation, Rheinische Friedrich-Wilhelms-Universität Bonn.
- SCHLEGEL, H.G. (1992): Allgemeine Mikrobiologie. Thieme Verlag, Stuttgart, New York 7. Auflage.

- SCHLÜTER, K., KROPF, U. (2006): Auftreten von *Fusarium culmorum* und *Fusarium graminearum* im Ackerbau Schleswig-Holsteins, ISBN 3981091205.
- SCHLÜTER, K., KROPF, U., KARLOVSY, P. (2006): Untersuchungen zur systemischen Infektion von *Fusarium culmorum* an Winterweizen in Schleswig-Holstein. *Gesunde Pflanze* 58: 107-116.
- SCHNERR, H. VOGEL, R.F., NIESSEN, L. (2002): Correlation between DNA of trichothecene-producing *Fusarium* species and deoxynivalenol concentrations in wheat samples. *Letters in Applied Microbiology* 35: 121-125.
- SCHOLZ, U., STEFFENSON, B.J. (2001): Effect of *Gibberella zeae* ascospores and *Fusarium graminearum* conidia on *Fusarium* head blight severity and deoxynivalenol production in barley. In: 2001 National Fusarium Head Blight Forum Proceedings. Dec. 8-10, 2001: 147-149.
- SCHRÖDER, H.W., CHRISTENSEN, J.J. (1963): Factors affecting resistance of wheat to scab caused by *Gibberella zeae*. *Phytopathology* 53: 831-838.
- SCHÜTT, F., NIRENBERG, H.I., DEML, G. (1998): Moniliformin production in the genus *Fusarium*. *Mycotoxin Research* 14: 35-40.
- SCHWEYDA, H.J. (1996): Pathogene und fakultativ pathogene samenbürtige Pilze auf Saatgetreide aus Baden-Württemberg: Biologie, Befallssituation, Konsequenzen. Dissertation, Universität Karlsruhe.
- SEO-JONG, A.H., KIM, J.C., LEE, Y.W., SEO, J.A., LEE, Y.W. (1996): Isolation and characterization of two new type C fumonisins produced by *Fusarium oxysporum*. *Journal of Natural Products* 59: 1003-1005.
- SHAH, D.A., BERGSTROM, G.C. (2001): Spatial patterns of *Fusarium* head blight in New York fields in 2000 and 2001. *Proceedings of the 2001 National Fusarium head blight forum*: 154-155.
- SMALE III, D.G., ARNTSEN, Q.A., BERGSTROM, G.C. (2005a): The forcible discharge distance of ascospores of *Gibberella zeae*. *Canadian Journal of Plant Pathology* 27: 376-382.
- SMALE III, D.G., SHAH, D.A., BERGSTROM, G.C. (2005b): Spatial Patterns of Viable Spore Deposition of *Gibberella zeae* in Wheat Fields. *Ecology and Epidemiology* 95: 472-479.
- SNIJDERS, C.H.A., KRECHTING, C.F. (1992): Inhibition of deoxynivalenol translocation and fungal colonization in *Fusarium* head blight resistant wheat. *Canadian Journal of Botany* 70: 1570-1576.

- SNIJNERS, 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 (8): 1570-1576.
- STACK, R.W. (2003): History of *Fusarium head blight* with emphasis of North America. In *Fusarium Head Blight of Wheat and Barley*, Leonard, K.J. and Bushnell, W.R. (editors) St. Paul, MN: APS Press: 1-34.
- STADLER, R., GUDE, T. (2010): Einführung in moderne analytische Verfahren mit ausgewählten Beispielen. *Handbuch für Lebensmittelchemiker 2010*: 253-289.
- STRANGE, R.N., SCOTT, P.R. (2005): Plant disease: A threat to global food security. *Annual Review of Phytopathology* 43: 83-116.
- STURZ, A.V., JOHNSON, H.W. (1983): Early colonization of wheat and barley by *Fusarium poae*. *Journal of Plant Pathology* 5: 30-34.
- SUGIURA, Y., WATANABE, Y., TANAKA, T., YAMAMOTO, S., UENO, Y. (1990): Occurrence of *Gibberella zeae* strains that produce both nivalenol and deoxynivalenol. *Applied and Environmental Microbiology* 65: 3047-3051.
- SULYOK, M., BERTHILLER, F., KRŠKA, B., SCHUHMACHER, R. (2006): Development and validation of a liquid chromatography/tandem mass spectrometric method for the determination of 39 mycotoxins in wheat and maize. *Rapid Communications in Mass Spectrometry* 20: 2649-2659.
- 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.
- SUTY, A., MAULER-MACHNIK, A. (1998): Ährenfusariosen an Weizen, Biologie, Epidemiologie und Bekämpfung. *Getreide Magazin* 3: 138-140.
- SUTY, A., MAULER-MACHNIK, A., COURBON, R. (1996): New findings on the epidemiology of *Fusarium* ear blight and its control with tebuconazole. In: *Proceedings of the Brighton Crop Protection Conference Vol. 2*: 511-516. BCPC, Fanham, UK.
- SZÉCSI, Á., BARTÓK, T., VARGA, M., MAGYAR, D., MESTERHÁZY, Á. (2005): Determination of trichothecene chemotypes of *Fusarium graminearum* strains isolated in Hungary. *Journal of Phytopathology* 153: 445-448.
- TANAKA, T., HASEGAWA, A., YAMAMOTO, S., LEE, U., SUGIURA, Y., UENO, Y. (1988): Worldwide contamination of cereals by *Fusarium* mycotoxins nivalenol,

- deoxynivalenol und zearalenone. 1st Survey of 19 countries. Journal of Agricultural and Food Chemistry 36: 979-983.
- TEICH, A.H. (1987): Less wheat scab with urea than with ammonium nitrate fertilizers. Cereals 56: 28-30.
- TEICH, A.H., HAMILTON, J.R. (1985): Effect of cultural practices, soil phosphorus, potassium and pH on the incidence of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol levels in wheat. Applied and Environmental Microbiology 49 (6): 1429-1431.
- TEICH, A.H., NELSON, K. (1984): Survey of *Fusarium* head blight and possible effects of cultural practices in wheat fields in Lambton Country in 1983. Canadian Plant Disease Survey 64 (1): 11-13.
- THRANE, U. (1988): Screening for fusarin C production by European isolates of *Fusarium* species. Mycotoxin Research 4: 2-10.
- 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.
- TISCHNER, H. (2003): Triticale und Roggen: Sortengesundheit ausreizen. dlz 1: 38-41.
- TISCHNER, H., BECHTEL, A., SCHENKEL, B., EIBLMEIER, P. (2004): Ährenfusarium Winterweizen: Epidemiologie, Fungizide, Zusatzstoffe. Versuchsergebnisse aus Bayern 2004. Bayerische Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz.
- TOMASZEWSKI, J., MITURSKI, R., SEMCZUK, A., KOTARSKI, J., JACKOWICKI, J. (1998): Tissue zearalenone concentration in normal, hyperplastic and neoplastic human endometrium. Ginekologia Polska 69:363-366.
- TOMODA, H., HUANG, X., CAO, J., NISHIDA, H., NAGAO, R., OKUDA, S., TANAKA, H., OMURA, S. (1992): Inhibition of acyl-CoA: cholesterol acyltransferase activity by cyclodepsipeptide antibiotics. Journal of Antibiotics (Tokyo) 45 (10): 1626-1632.
- TÓTH, B., MESTERHÁZY, Á., HORVÁTH, Z., BARTÓK, T., VARGA, M., VARGA, J. (2005): Genetic variability of central European isolates of the *Fusarium graminearum* species complex. European Journal of Plant Pathology 113: 35-45.
- TRENHOLM, H.L., HAMILTON, R.M.G., FRIEND, D.W., THOMPSON, B.K., HARTIN, K.E. (1984): Feeding trials with vomitoxin (deoxynivalenol)-contaminated wheat: Effects on swine, poultry and dairy cattle. Journal of the American Veterinary Medical Association 185: 527-531.

- TRIAL, F., XU, H., LORANGER, R., GAUDOURY, D. (2002): Physiological and environmental aspects of ascospore discharge in *Gibberella zae* (anamorph *Fusarium graminearum*). *Mycologia* 94: 181-189.
- TSCHANZ, A.T., HORST, R.K., NELSON, P.E. (1976): The effect of environment on sexual reproduction of *Gibberella zae*. *Mycologia* 68: 327-340.
- UENO, Y. (1980): Trichothecene mycotoxins. *Mycology, chemistry and toxicology. Advances in Nutritional Research Science* 3: 301-353.
- VAN RENSBURG, S.J. (1977): Role of epidemiology in the elucidation of mycotoxin health risks. *Mycotoxins in Human and Animal Health*: 699-711.
- VERREET, J.A., AUMANN, J. (2002): Mykotoxinproblematik in der Pflanzenproduktion. Schriftenreihe der Agrar- und Ernährungswissenschaftlichen Fakultät der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel, Heft 94, 2002.
- 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 Plant Pathology* 19: 60-65.
- VOGT-KAUTE, W. (2010): Pausen tun gut – das gilt auch für Leguminosen. Publikation im Rahmen des Projektes: Steigerung der Wertschöpfung ökologisch angebauter Marktfrüchte durch Optimierung des Managements der Bodenfruchtbarkeit.
- VON TIEDEMANN, A., BRAUN, C., BRANDFAß, C., WEINERT, J. (2006): Entwicklung einer Computer gestützten Entscheidungshilfe zur Minimierung des Befallsrisikos durch Ährenfusariosen und der Toxinbelastung sowie zur Optimierung der Bekämpfung. Abschlussbericht Forschungsauftrag 02 HS 023.
- VOSS, H.H. (2010): Inheritance of quantitative resistance and aggressiveness in the wheat/*Fusarium* pathosystem with emphasis on *Rht* dwarfing genes. Dissertation, Universität Hohenheim.
- VOSS, K.A. (1990): Toxins from *Fusarium moniliforme*, a common fungus in corn. *Veterinary and Human Toxicology* 32: 57-63.
- 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.

- WAGGONER, P.E., AYLOR, D.E. (2000): Epidemiology: A Science of Patterns. Annual Review of Phytopathology 38: 71-94.
- WARREN, H.L., KOMMENDAHL, T. (1973): Fertilization and wheat refuse effects on *Fusarium* species associated with wheat roots in Minnesota. Phytopathology 63: 103-108.
- WEINERT, J., WOLF, G.A. (1995): Gegen Ährenfusariosen helfen nur resistente Sorten. Pflanzenschutz-Praxis 2: 30-32.
- WHITAKER, T.B., SLATE, A.B., JOHANSSON, A.S. (2005): Sampling feeds for mycotoxin analysis. In: DIAZ, D.E. (ed.) The Mycotoxin Blue Book. Nottingham, University Press, United Kingdom: 1.
- WILCOXSON, R.D., BUSCH, R.H., OZMON, E.A. (1992): *Fusarium* head blight resistance in spring wheat cultivars. Plant Disease 76: 658-661.
- 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.
- WILLCOX, G. (2000): Nouvelles données sur l'origine de la domestication des plantes au Proche-Orient. In: Guilaine, J. (editor) Premiers paysans du monde. Paris, 121-140.
- WITZENBERGER, A., VAN DEN BOOM, T., HACK, H. (1989): Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. Gesunde Pflanzen 41 (11): 384-388.
- WOLFF, J., NEUDECKER, C., KLUG, C., WEBER, R. (1988): Chemical and toxicologic studies of native corn in flour and bread. Ernährungswissenschaften 27: 1-22.
- WOSNITZA, A. (2000): Verbesserung der *Fusarium*-Resistenzbewertung bei Weizen. Bodenkultur und Pflanzenbau 4 (3): 59-75.
- WU, Y.X., V. TIEDEMANN, A. (2001): Physiological effects of azoxystrobin and epiconazole on senescence and the oxidative status of wheat. Pesticide Biochemistry and Physiology 71: 1-10.
- XU, X.M., MONGER, W., RITTIENI, 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. (2003): Is the amount of mycotoxins in cereal grain related to the quantity of *Fusarium* DNA? In: Aspects of Applied Biology 68, 2003, BRYSON, R.J.,

- KENNEDY, R., MAGAN, N., SCUDAMORE, K.A. (editors): Mycotoxins in food production systems: 101-108.
- XU, X.M., PARRY, D.W., NICHOLSON, P. (2005): Predominance and association of pathogenic fungi causing *Fusarium* ear blighting wheat in four European countries. *European Journal of Plant Pathology* 112: 143-154.
- 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.
- YAGEN, B., JOFFE, A.Z. (1976): Screening of toxic isolates of *Fusarium poae* and *Fusarium sporotrichioides* involved in causing alimentary toxic aleukia. *Applied and Environmental Microbiology* 32: 423-427.
- YI, C., KAUL, H.P., KÜBLER, E., SCHWADORF, K., AUFHAMMER, W. (2001): Head blight (*Fusarium graminearum*) and deoxynivalenol concentration in winter wheat as affected by pre-crop, soil tillage and nitrogen fertilization. *Journal of Plant Diseases and Protection* 108: 217-230.
- ZADOKS, J.C., SCHEIN, R.D. (1979): *Epidemiology and plant disease management*. Oxford University Press, New York.
- ZHAN, J., BURNS, A.M., LIU, M.X., FAETH, S.H., GUNATILAKA, A.A. (2007): Search for cell motility angiogenesis inhibitors with potential anticancer activity: beauvericin and other constituents of two endophytic strains of *Fusarium oxysporum*. *Journal of Natural Products* 70: 227-232.
- ZHANG, Y.J., FAN, P.S., ZHANG, X., CHEN, C.J., ZHOU, M.G. (2009): Quantification of *F. graminearum* in harvested grain by polymerase chain reaction to assess efficacies of fungicides on *Fusarium* head blight, deoxynivalenol contamination and yield of winter wheat. *Phytopathology* 99: 95-100.
- ZIMMERMANN, G. (1997): Ährenfusariosen bei Winterweizen in Bayern und Ausprägung der Resistenz von aktuellen Sorten. In: *Ährenfusariosen des Getreides*. Bayerische Landesanstalt für Bodenkultur und Pflanzenbau, 2. Auflage 1: 55-60.
- ZÜHLKE, S., HEREBIAN, D., DEHNE, H.W., SPITELLER, M. (2008): Multimykotoxinmethode für die Landwirtschaft. *Labor Praxis* 1: 22-25.

Danksagung

An dieser Stelle möchte ich all denjenigen DANKE sagen, die mich bei der Erstellung meiner Dissertation in vielfältigster Weise unterstützt haben:

Mein größter Dank gilt meinem Doktorvater Herrn Prof. Dr. H.-W. Dehne für die Überlassung des Themas, dem entgegengebrachten Vertrauen bei der Durchführung der Arbeit und der damit verbundenen Möglichkeit mein Interesse an der Wissenschaft im Bereich der Phytopathologie weiterzuentwickeln.

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. J. Léon für sein Interesse, der Übernahme des Koreferats, der Möglichkeit der Durchführung der molekularbiologischen Untersuchungen in seiner Abteilung und der Unterstützung bei der statistischen Verarbeitung meiner Daten.

Danken möchte ich Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. M. Spiteller für die Übernahme des Koreferats und für die sehr gute Zusammenarbeit mit seiner Arbeitsgruppe an der TU Dortmund.

Ein besonders großer Dank gilt Herrn PD Dr. E.C. Oerke für die Betreuung meiner Arbeit. Dank seiner großen Unterstützung, der unermüdlichen Bereitschaft zur Beantwortung von Fragen, seiner konstruktiven Kritik und seiner wertvollen Anregungen war es erst möglich diese Arbeit zu erstellen.

Der Arbeitsgruppe um Herrn Prof. Dr. Dr. h.c. M. Spiteller vom Institut für Umweltforschung der Universität Dortmund, insbesondere Herrn Dr. S. Zühlke, möchte ich für die Durchführung der Mykotoxinanalyse und den freundlichen Kontakt danken.

Frau PD Dr. U. Steiner danke ich für die hilfreiche Unterstützung bei allen mikroskopischen Untersuchungen und den vielfältigen Anregungen rund um Versuchsfragen.

Ein weiterer Dank gilt den Mitarbeitern und Versuchstechnikern des Versuchsgutes Klein-Altendorf und des Versuchsgutes Wiesengut für die freundliche und vor allem tatkräftige Unterstützung bei der Durchführung von Feldversuchen.

Ein herzliches Dankeschön an Kerstin und Stefan, die mir stets freundschaftlich bei allen Fragen und Belangen rund um die Labortätigkeit zur Seite standen. DANKE!!!

Ich danke allen Mitarbeitern und Doktoranden des Instituts für die stets kollegiale Zusammenarbeit und die angenehme Arbeitsatmosphäre. Ein großer Dank gilt Frau Ingrid Sikora und Frau Regina Kirchner-Bierschenk, die in allen organisatorischen Belangen stets einen

kühlen Kopf behielten. Weiterhin möchte ich mich ganz herzlich bei den Mitarbeitern vom Versuchsfeld bedanken, die mich tatkräftig und zuverlässig sowohl bei Freiland- als auch Gewächshausversuchen unterstützt haben. Besonders bedanken möchte ich mich bei Anne, Katharina, Jürgen, Ellen, Caroline, Angelika, Andy, Norbert, Muna, Gisela, Inge und Herrn PD Dr. A. Hamacher für die vielfältige Unterstützung und das freundschaftliche Verhältnis!

Meinem lieben Thorsten danke ich für die immerwährende Unterstützung auch in schwierigen Zeiten.

Meinen Eltern, meinem Bruder Benedikt und meinen Großeltern werde ich allezeit besonders dankbar sein, denn sie haben mich immer bedingungslos unterstützt und mir erst die Möglichkeit gegeben meinen beruflichen Werdegang zu realisieren. Meinem Großvater danke ich für das große Interesse an meiner Arbeit und den fachlichen Anregungen.