

**Simulation der Epidemie von *Septoria tritici* an Winterweizen mit dem Modell SEPTRI2
unter besonderer Berücksichtigung der Sortenanfälligkeit**

Von der Naturwissenschaftlichen Fakultät der
Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover
zur Erlangung des Grades

DOKTOR DER GARTENBAUWISSENSCHAFTEN

Dr. rer. hort.

genehmigte
DISSERTATION

von

M.Sc. Diplom-Ingenieur (FH) Tobias Erven
geboren am 01.06.1979 in Linnich

2011

Referent: Prof. Dr. Bernhard Hau

Korreferent: Prof. Dr. Henning Kage

Tag der Promotion: 01.10.2010

Kurzfassung

In den vergangenen Jahren führten Epidemien von *Septoria tritici* vermehrt zu hohen Ertragsverlusten bei der Weizenproduktion. Fungizide können einer Epidemie nur entgegenwirken, wenn sie infektionsnah appliziert werden. Für den Entwicklungszyklus von *S. tritici* ist eine Latenzzeit von mindestens 16 Tagen charakteristisch. Simulationsmodelle bieten die Möglichkeit, den Zeitpunkt einer Behandlung zu optimieren und die Epidemieentwicklung besser zu bewerten. In dieser Arbeit wurde daher das Modell SEPTRI2 (*Septoria tritici*) entwickelt, das auf Grundlage aktueller Wetterdaten verschiedene biologische Abläufe im Entwicklungszyklus von *S. tritici* abbildet. Es wird sowohl der Zeitpunkt des Erstauftretens als auch die Befallsstärke für die oberen vier Blattetagen berechnet. Kennzeichnend für das Modell ist die Simulation der Befallsentwicklung von *S. tritici* an unterschiedlich anfälligen Winterweizensorten. In Abhängigkeit zur BSA-Note der Septoria-Anfälligkeit werden drei Sortenklassen (gering, mittel und stark anfällig) differenziert.

Entscheidend für das Zustandekommen einer Epidemie sind erfolgreich abgeschlossene Neuinfektionen. Dazu werden im Modell definierte Werte verschiedener Witterungsparameter für die drei Prozesse *Aufquellen der Pyknidien*, *Sporenverteilung* und *Infektion* stündlich überprüft. Ein Neuinfektionsprozess ist unter optimalen Bedingungen frühestens nach 17 Stunden beendet und kann maximal 44 Stunden dauern. Zur anschließenden Simulation der Befallsentwicklung wurden umfangreiche Laborversuche durchgeführt, in denen die Reaktion von Weizensorten bei einer *S. tritici*-Infektion untersucht wurde. Eine Einzelblattmethode erwies sich für die Datenerhebung bei verschiedenen Temperaturstufen als geeignet. Das Pilzwachstum wird im Modell SEPTRI2 mit einer temperaturabhängigen Rate berechnet, die sowohl das latente als auch das sichtbare Läsionswachstum umfasst. Beginn der Befallsentwicklung ist der Zeitpunkt einer erfolgreichen Infektion und mit dem Erreichen der maximalen Anzahl an Pyknidien ist das Läsionswachstum beendet. Das Ende wird mit einer sortenabhängigen Dauer der Pyknidienformation betrachtet. Des Weiteren werden bei der Simulation die Pyknidiendichte sowie die Dauer der Inkubations- und Latenzzeit jeder Sortenklasse berechnet. Zusätzlich umfasst das Modell SEPTRI2 ein Blattentwicklungsmodul (sortenunabhängig), das ab einem simulierten BBCH-Stadium (Ontogenesemodell SIMONTO) in Abhängigkeit der Temperatursumme die Phasen Blattwachstum, Blatterhaltung und Seneszenz darstellt. Die Validierung von SEPTRI2 erfolgte mit Daten aus Freiland-Erhebungen der Jahre 2007 bis 2009. Im Vergleich mit Bonituren aus Rheinland-Pfalz wurde das Erstauftreten von Septoria-Läsionen auf den Blattetagen F-1 und F-2 in 75% aller Varianten korrekt simuliert. Bei der visuellen Validierung wurden 68% der Fälle auf diesen Blattetagen als korrekt eingestuft. Eine Unterschätzung trat im Mittel bei 7%, eine Überschätzung in 25% der Fälle auf. Zusätzlich wurde eine statistische Validierung durchgeführt. Für die Rheinland-Pfälzischen Standorte ergab der Kolmogorov-Smirnov-Test für die Blattetage F-2 durchweg nicht signifikante Unterschiede. Für den Achsenabschnitt der Regressionsgeraden zwischen den beobachteten und simulierten Befallsdaten wurde maximal ein Wert von 2,29 bestimmt, in den meisten Fällen war der Wert < 1 . Die Simulation unterschätzte häufig den erhobenen Befall, für die Blattetage F-2 lagen die Werte der Steigung zwischen 0,59 und 0,89. Die berechneten Bestimmtheitsmaße waren alle $> 82\%$.

Schlagwörter: *Septoria tritici*, Simulationsmodell, Sortenunterschiede

Abstract

During the last years, yield losses in wheat caused by epidemics of *Septoria tritici* increased strongly. Fungicides can only protect the wheat crop when they are sprayed close to an infection event. On the other hand, a latent period of at least 16 days is typically for the life cycle of *S. tritici*. In this situation, simulation models can help to evaluate the actual epidemic status and to determine the optimal time for a fungicide treatment. Therefore, a simulation model was developed in this thesis that reproduces biological processes in the life cycle of *S. tritici* influenced by actual weather data. It simulates the time of the primary infection as well as the disease severity progress on the upper four leaf layers. The main characteristic of the Model SEPTRI2 (*Septoria tritici*) is the simulation of *S. tritici* disease progression on winter wheat varieties differing in susceptibility. Dependent on the Septoria susceptibility mark of the BSA (Federal Plant Variety Office), three variety classes are differentiated (slightly susceptible, medium susceptible, highly susceptible).

Successfully completed new infections are crucial for the start of an epidemic. The essential weather parameters for an infection process are checked on an hourly basis. A new infection process needs at least 17 hours, but can last up to 44 hours. For the simulation of the following processes of the disease cycle, extensive laboratory investigations were conducted. The reaction to an infection was examined in different varieties. A single leaf method was chosen to collect data for different temperatures and varieties. Differences were identified for the growth rate of the fungus. In the model SEPTRI2, the growth rate of the fungus is calculated dependent on temperature and contains the latent as well as the visible lesion growth. Growth starts at the time of a successful infection and the lesion growth terminates when the maximum number of pycnidia is reached. The duration of the pycnidial formation depends on the variety. In addition, the pycnidial density and the durations of the incubation and latent period are calculated for every variety class. Moreover, a leaf growth module (independent of the variety) is included which describes the phases of leaf expansion, leaf maintenance and leaf senescence starting from a simulated BBCH stage (model for ontogenetic development SIMONTO) in dependence on the thermal time.

The validation of the simulation model was conducted with German field data from the years 2007 to 2009. Comparing field data from Rhineland-Palatinate with model output shows that the first appearance of Septoria lesions was correctly simulated on leaf F-1 (i.e. the first leaf below the flag leaf) and F-2 in 75% of all variants. The progress of the diseases severity on these leaves was correctly simulated in 68% of the cases. On average, the epidemic was underestimated in 7% and overestimated in 25% of the cases. Furthermore a statistical validation was performed. Over all locations in Rhineland-Palatinate, the Kolmogorov-Smirnov test consistently determined no significant differences for the leaf F-2. The maximum value of the intercept of the regression line between observed and simulated disease data was 2.29, in most cases the value was < 1 . Often the simulation underestimated the observed disease level, for instance on leaf F-2, the values of the slope of the regression line ranged from 0.59 to 0.89. The calculated coefficients of determination for this leaf layer were all $> 82\%$.

Keywords: *Septoria tritici*, simulation model, cultivar varieties

Inhaltsverzeichnis

1. EINLEITUNG.....	1
2. LITERATURÜBERSICHT.....	3
2.1 <i>Septoria tritici</i> , der Erreger der Blattdürre an Winterweizen.....	3
2.1.1 Bedeutung und Verbreitung von <i>S. tritici</i>	3
2.1.2 Taxonomie.....	3
2.1.3 Biologie von <i>M. graminicola</i>	4
2.1.4 Biologie von <i>S. tritici</i>	5
2.2 Epidemiologische Entwicklung.....	8
2.3 Resistenzeigenschaften von Winterweizensorten.....	11
2.4 Modelle in der Epidemiologie.....	13
2.5 Modelle in der praktischen Landwirtschaft.....	16
2.6 Modelle zur Septoria-Befallsprognose.....	16
2.6.1 Das Prognosemodell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006).....	16
2.6.2 Modell von COAKLEY et al. (1985).....	17
2.6.3 Modell von O' CALLAGHAN et al. (1994).....	19
2.6.4 Modell von GLADDERS et al. (2001).....	20
2.6.5 Modell von PIETRAVALLE et al. (2003).....	21
2.6.6 Modell von AUDSLEY et al. (2005).....	22
2.6.7 Modell von TE BEEST et al. (2009).....	22
3. MATERIAL UND METHODEN.....	25
3.1 Begriffsdefinitionen.....	25
3.2 Laborversuche.....	26
3.2.1 Pilzwachstum.....	28
3.2.2 Inkubations- und Latenzzeit und Dauer der Pyknidienformation.....	29
3.3 Pyknidiendichte.....	31
3.4 Anzahl der Läsionen, Pyknidiengröße und Pyknosporenlänge.....	32
3.5 Freilandhebungen – Bonitur der Befallsstärke.....	33
3.5.1 Standorte der Exakt-Bonituren.....	35
3.5.2 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz (LSV-RP).....	39
3.5.3 Sortenbeobachtungen durch die Pflanzenschutzdienste der Länder (PSD).....	39
3.5.4 Fungizidversuche.....	40
3.5.5 Sortenspektrum der Versuche.....	42
3.5.6 Verarbeitung des Datenmaterials.....	43
4. ERGEBNISSE.....	45
4.1 Laborversuche.....	45
4.1.1 Pilzwachstum.....	45
4.1.1.1 Modellierung des Pilzwachstums.....	45
4.1.1.2 Modellierung der Rate des Pilzwachstums.....	48
4.1.1.3 Sortenfaktor der Rate des Pilzwachstums.....	49
4.1.2 Dauer der Inkubationszeit.....	52
4.1.2.1 Modellierung der Inkubationszeit.....	52
4.1.2.2 Sortenfaktor der Inkubationszeit.....	54
4.1.3 Dauer der Latenzzeit.....	55
4.1.3.1 Modellierung der Latenzzeit.....	56
4.1.3.2 Sortenfaktor der Latenzzeit.....	57
4.1.4 Dauer der Pyknidienformation.....	58
4.1.4.1 Modellierung der Dauer der Pyknidienformation.....	59
4.1.4.2 Sortenfaktor der Dauer der Pyknidienformation.....	60
4.1.5 Dauer der Inkubations- und Latenzzeit sowie des Pilzwachstums an den Standorten der Exakt-Bonituren.....	61
4.2 Pyknidiendichte.....	64
4.2.1 Modellierung der Pyknidiendichte.....	65

4.2.2	Sortenfaktor der Pykniendichte.....	66
4.3	Anzahl der Läsionen, Pykniendichte und Pyknosporenlänge.....	67
4.4	Freilanderhebungen.....	69
4.4.1	Standorte der Exakt-Bonituren	69
4.4.2	Landessortenversuche Rheinland-Pfalz (LSV-RP)	75
4.4.3	Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder (PSD).....	83
4.4.4	Fungizidversuche.....	84
5.	MODELLENTWICKLUNG	87
5.1	Modul der Blattentwicklung im Modell SEPTRI2	88
5.1.1	Relative Blattfläche	88
5.1.2	Das Modell SIMONTO zur Berechnung des BBCH-Stadiums	90
5.1.3	Die Phasen der Blattentwicklung	91
5.1.4	Modellierung des Blattwachstums	93
5.2	Simulation der Befallsentwicklung von <i>S. tritici</i>	95
5.2.1	Der Neuinfektionsprozess.....	98
5.2.2	Der Ausgangswert des Pilzwachstums.....	103
5.2.3	Das Pilzwachstum.....	108
5.2.4	Die Inkubationszeit.....	110
5.2.5	Die Latenzzeit	111
5.2.6	Die Dauer der Pyknidienformation.....	112
5.2.7	Fungizidwirkung.....	112
5.3	Programmtechnische Umsetzung	116
6.	VALIDIERUNG.....	117
6.1	Validierung des Erstauftretens von <i>S. tritici</i> mit dem Modell SEPTRI2 anhand der Daten aus den Exakt-Bonituren, der LSV-RP und den PSD-Bonituren.....	117
6.2	Visuelle Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Boniturdaten der Standorte der Exakt-Bonituren und der LSV-RP.....	122
6.3	Statistische Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Simulations- und Boniturdaten der Standorte der Exakt-Bonituren und der LSV-RP	126
6.3.1	Blatttage F.....	127
6.3.2	Blatttage F-1	128
6.3.3	Blatttage F-2	130
6.3.4	Blatttage F-3	131
6.3.5	Blatttage F-4	132
6.3.6	Zusammenfassende Auswertung	133
6.4	Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Daten der PSD	134
6.4.1	Blatttage F.....	134
6.4.2	Blatttage F-1	136
6.4.3	Blatttage F-2	137
6.4.4	Zusammenfassende Auswertung	138
6.5	Fungizid-Varianten.....	139
7.	DISKUSSION	141
8.	ZUSAMMENFASSUNG	153
9.	ANHANG.....	155
10.	LITERATUR.....	157

Verzeichnis der verwendeten Abkürzungen

Allgemein

BB	= Brandenburg
BBCH	= Code für Pflanzen-Entwicklungsstadien (<u>B</u> ASF, <u>B</u> ayer, <u>C</u> IBA-Geigy, <u>H</u> OECHST)
BSA	= Bundessortenamt
DLR R-N-H	= Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück
DWD	= Deutscher Wetterdienst
F, F-x	= Bezeichnung der Blättertage bei Getreide. F = Fahnenblatt, von dort an werden abwärts die folgenden Blättertage mit einer Ziffer (-x) benannt
ISIP	= Informationssystem integrierte Pflanzenproduktion
LSV	= Landessortenversuche
MV	= Mecklenburg-Vorpommern
NI	= Niedersachsen
PSD	= Pflanzenschutzdienste der Länder
RP	= Rheinland-Pfalz
SH	= Schleswig-Holstein
SEPTRI2	= neues Befallsstärke-Simulationsmodell <u>S</u> eptoria <u>t</u> ritici
SIMONTO	= <u>S</u> imulation <u>O</u> ntogenese
SIMSEPT	= <u>S</u> imulation <u>S</u> eptoria <u>t</u> ritici von (KLUGE et al., 2006)
SN	= Sachsen
ST	= Sachsen-Anhalt
TH	= Thüringen
WHEGROSIM	= <u>W</u> heat <u>G</u> rowth <u>S</u> imulation
ZEPP	= Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz
°C	= Temperatur in Grad Celsius
%	= Prozent
bzw.	= beziehungsweise
cm	= Zentimeter
d. h.	= das heißt
dt/ha	= Dezitonnen pro Hektar
g	= Gramm
km	= Kilometer
m	= Meter
mg	= Milligramm
mg/l	= Milligramm pro Liter
mm	= Millimeter
mm ²	= Quadratmillimeter
u. a.	= unter anderem
z. B.	= zum Beispiel
z. T.	= zum Teil

Variablen

$a(SK)$	= relative Pykniendichte auf dem Fahnenblatt für die Sortenklasse SK
$APW(Fx)_t$	= Ausgangswert Pilzwachstum der Blättertage F_x am Tag t
$b(SK)$	= Steigung der Geraden für die Sortenklasse SK
$bef(Fx)_t$	= Summe der Befallswerte des latenten und sichtbaren Befalls

$bef_{IZ}(F_x)_t$	= Summe der Befallswerte (Inkubationszeit abgelaufen) der Blattetage F_x am Tag t
$bef_{LZ}(F_x)_t$	= Summe der Befallswerte (Latenzzeit abgelaufen) der Blattetage F_x am Tag t
$BS(F_x)_t$	= Befallsstärke (%) der Blattetage F_x am Tag t
$d(T)$	= Dauer verschiedener Zeiten in Abhängigkeit von der Temperatur
$F(x)$	= Blattetage
$FAB(F_x; F_y)$	= Faktor für den Abstand der betrachteten Blattetage F_x zur benachbarten Blattetage F_y
FBE	= Blattetagenfaktor
$FF(t)$	= Fungizidfaktor am Tag t nach der Applikation
FW_{\max}	= maximale Fungizidwirkung
$GB_{PW}(T)_t$	= Gleichung Beta-Funktion (Pilzwachstum) in Abhängigkeit von der Temperatur T am Tag t
$GB_{IZ}(T)_t$	= Gleichung Beta-Funktion (Inkubationszeit) in Abhängigkeit von der Temperatur T am Tag t
$GB_{LZ}(T)_t$	= Gleichung Beta-Funktion (Latenzzeit) in Abhängigkeit von der Temperatur T am Tag t
$GB_{PF}(T)_t$	= Gleichung Beta-Funktion (Pyknidienformation) in Abhängigkeit von der Temperatur T am Tag t
$infP(F_y)_t$	= infektiöses Potential der Blattetage F_y am Tag t
n	= Formparameter der Beta-Funktion
m	= Anzahl der Boniturtermine bei der AUDPC-Berechnung
P	= Signifikanzniveau
p	= Anzahl der Parameter
q	= Anpassungsfaktor
r_{FW}	= Rate Fungizidwirkung der logistischen Funktion
r_L	= Wachstumsrate der logistischen Funktion
r_G	= Wachstumsrate der Gompertz-Funktion
$r_{PW}(T; SK)_t$	= Rate Pilzwachstum in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t
$r_{IZ}(T, SK)_t$	= Rate Inkubationszeit in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t
$r_{LZ}(T, SK)_t$	= Rate Latenzzeit in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t
$r_{PF}(T, SK)_t$	= Rate Pyknidienformation in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t
$r(T)$	= Rate in Abhängigkeit von der Temperatur
RBF_{ST}	= relative Blattfläche (Start)
RBF_{WA}	= relative Blattfläche (Wachstumsphase)
RBF_{ER}	= relative Blattfläche (Erhaltungsphase)
RBF_{SE}	= relative Blattfläche (Seneszenzphase)
$s[d]$	= Standardfehler
$SF_{PD}(SK; F_y)$	= Sortenfaktor Pyknidiendichte der Sortenklasse SK und der Blattetage F_y
$SF_{PW}(SK)$	= Sortenfaktor Pilzwachstum der Sortenklasse SK
$SF_{IZ}(SK)$	= Sortenfaktor Inkubationszeit der Sortenklasse SK

$SF_{LZ}(SK)$	= Sortenfaktor Latenzzeit der Sortenklasse SK
$SF_{PF}(SK)$	= Sortenfaktor Pyknidienformation der Sortenklasse SK
t	= Zeit
T	= Temperatur ($^{\circ}\text{C}$)
T_{\max}	= maximale Temperatur
T_{\min}	= minimale Temperatur
T_{opt}	= optimale Temperatur
TE_i	= stündliche effektive Temperatur
TE_t	= effektive Tagesmitteltemperatur
$TSUM$	= Temperatursumme ($^{\circ}\text{C}$ Tage)
$TSUM_{WA}$	= erforderliche Temperatursumme am Ende der Wachstumsphase
$TSUM_{ER}$	= erforderliche Temperatursumme am Ende der Erhaltungsphase
$TSUM_{SE}$	= erforderliche Temperatursumme am Ende der Seneszenzphase
ν	= Infektionsrate eines Neuinfektionsprozesses
$y(t)$	= Befallsstärke am Tag t
y_0	= Achsenabschnitt
Y_{opt}	= Rate bei optimaler Temperatur
y_{Py}	= relative Pyknidiendichte
x	= Faktor der Blattetage bei der Pyknidiendichte

1. EINLEITUNG

Winterweizen ist die anbaustärkste Getreideart in Deutschland, deren Anbaufläche von 2007 auf 2008 bundesweit um 7% zunahm und mit über 3,1 Millionen Hektar einen neuen Höchststand erreichte (STATISTISCHES BUNDESAMT DEUTSCHLAND, 2008). Die Weizenerträge, die in Deutschland derzeit durchschnittlich 70 dt/ha betragen, können durch Epidemien verschiedener Schaderreger in starkem Maße reduziert werden. Beispielsweise betragen die Ertragsverluste durch Epidemien der Blattdürrekrankheit, die durch *Septoria tritici* verursacht wird, bis zu 30% bei günstigen Witterungsbedingungen für den Schaderreger (EYAL, 1999; MÜLLER & HABERMEYER, 2001).

Um die Verluste durch pilzliche Schaderreger zu reduzieren, werden Fungizide eingesetzt, wobei im Sinne des integrierten Pflanzenschutzes der chemische Pflanzenschutz unter vorrangiger Berücksichtigung von anbau- und kulturtechnischen Maßnahmen auf ein notwendiges Maß zu beschränken ist (LÜTKE ENTRUP & OEHMICHEN, 2000). Bei der Kontrolle des Schadpilzes *S. tritici* an Winterweizen war der Fungizideinsatz in den vergangenen Jahren europaweit oftmals zu intensiv (HARDWICK et al., 2002). Bei der Blattdürre ist das Bekämpfungsziel, die Ausbreitung des Befalls auf die oberen drei ertragsrelevanten Blattetagen zu verhindern. Da Septoria-Epidemien von vielen Faktoren (z. B. der Witterung) beeinflusst werden, sind stadienabhängige Fungizidbehandlungen unwirtschaftlich (ROYLE et al., 1986). Notwendig sind gezielte Maßnahmen, die aus dem Epidemiegeschehen abgeleitet werden. Ein wichtiges Hilfsmittel zur Optimierung von Pflanzenschutzmaßnahmen sind Simulationsmodelle, die reale Epidemien in vereinfachter und abstrahierter Form mathematisch beschreiben (KRANZ, 1996). Als ein Beispiel soll in dieser Arbeit ein Modell zur Simulation von Septoria-Epidemien entwickelt werden.

Epidemien von *Septoria tritici* wurden bereits von mehreren Wissenschaftlern untersucht und verschiedene witterungsbasierte Modelle zur Prognose des Auftretens des Schadpilzes veröffentlicht (AUDSLEY et al., 2005; COAKLEY et al., 1985; GLADDERS et al., 2001; O'CALLAGHAN et al., 1994; PIETRAVALLE et al., 2003; TE BEEST et al., 2009). Charakteristisch für *S. tritici* ist eine relativ lange Dauer der Latenzzeit im Vergleich zu anderen ackerbaulich relevanten Schaderregern (BROKENSHIRE, 1976; LOVELL et al., 2004; SHAW, 1990). Der Niederschlag hat einen wesentlichen Einfluss auf das epidemische Auftreten, da die schleimigen Pykno-sporen über Regenspritzer verbreitet werden (HESS & SHANER, 1987). Die Temperatur und die relative Luftfeuchte sind ebenfalls bestimmend für die Epidemieentwicklung (CEYNOWA et al., 1993; HESS & SHANER, 1987; HOLMES & COLHOUN, 1974; WAINSHILBAUM & LIPPS, 1991).

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung eines Modells zur Simulation von Septoria-Epidemien unter besonderer Berücksichtigung der Sortenanfälligkeit des Winterweizens. Die spezifischen Sortenreaktionen und deren Auswirkungen auf die Befallsentwicklung können dann bei der Planung von Fungizidbehandlungen berücksichtigt werden. Unterschiede in der Anfälligkeit wurden bereits häufig durch Feldbeobachtungen nachgewiesen (ARRAIANO et al., 2006; BROKENSHIRE, 1976; CHUNGU et al., 2001; COOKE & JONES, 1971; SHANER et al., 1975). Zunächst müssen Wissenslücken über sortenspezifische Reaktionen in Experimenten geschlossen und anschließend die Erkenntnisse in ein mathematisches Modell übertragen werden. Die Simulation der Befallsentwicklung soll für die oberen Blattetagen in Abhängigkeit der Witterungsparameter

Temperatur, relative Luftfeuchte und Niederschlag in Verbindung mit der Sortenklasse erfolgen. Dabei ist die Anfälligkeit einer Sorte keine stabile Eigenschaft, sondern ein komplexes System, auf das die Umweltbedingungen Einfluss nehmen (SHAW & ROYLE, 1993).

In Laborversuchen müssen verschiedene Parameter untersucht werden, wie z. B. das Pilzwachstum, die Pykniendichte oder die Dauer von Inkubationszeit, Latenzzeit und Pyknidienformation. Die gewonnenen Ergebnisse werden anschließend zur Modellierung verwendet. Zudem wird für die Simulation der Befallsentwicklung auf einzelnen Blättern ein Modul der Blattentwicklung benötigt, mit dem das Erscheinen der Blätter in Abhängigkeit der ontogenetischen Entwicklung vorhergesagt wird, was auf dem Modell SIMONTO (ROßBERG et al., 2005) beruht. Eine Vielzahl an Daten von Septoria-Epidemien soll in Feldern mehrerer Bundesländern erhoben werden, um damit den Zusammenhang zwischen der festgestellten Befallsstärke und der Einstufung der Sorten nach der BSA-Note zu untersuchen, aber auch um das Modell zu validieren.

Um das neuentwickelte Modell von dem vorhandenen Modell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006) abzugrenzen, wird es als SEPTRI2 (Simulation *Septoria tritici*) bezeichnet.

2. LITERATURÜBERSICHT

In diesem Kapitel werden die Taxonomie, die Biologie und die Epidemiologie des Erregers der Blattdürrekrankheit an Weizen, *Septoria tritici* Roberge, erstmals veröffentlicht von DESMAZIERES 1842, sowie dessen teleomorphe Form, das sexuelle Stadium *Mycosphaerella graminicola* (Fuckel) J. Schröt. in Cohn, erläutert (CUNFER & UENG, 1999; SANDERSON, 1972). Des Weiteren werden Unterschiede in der Septoria-Anfälligkeit der Sorten vorgestellt und verschiedene Septoria-Modelle beschrieben, insbesondere das Modell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006).

2.1 *Septoria tritici*, der Erreger der Blattdürre an Winterweizen

2.1.1 Bedeutung und Verbreitung von *S. tritici*

Der Schadpilz *S. tritici* ist weltweit einer der wirtschaftlich bedeutendsten Krankheitserreger im Weizenanbau (EYAL, 1999; LOVELL et al., 1997), der besonders in feucht-kühlen Klimaregionen oftmals hohe Ertrags- und Qualitätsverluste verursacht (BAHAT et al., 1980; CHUNGU et al., 2001; HALAMA, 1996; HARDWICK et al., 2001). Die ersten Befallsgebiete in Europa erstreckten sich entlang der holländischen und französischen Küste und wenig später auch in den norddeutschen Küstenraum (SILFHOUT VAN et al., 1989). Bereits vor über 25 Jahren berichtete MIELKE (1981) über das alljährliche Auftreten von *S. tritici* in den Marschen der Nordseeküste sowie in regenreichen Gebieten des Binnenlandes. Besonders in den Jahren 1977 bis 1980 wurde aufgrund von feuchten und kühlen Witterungsverhältnissen in den Frühjahr- und Sommermonaten ein verstärktes Auftreten beobachtet, das durch einen zunehmenden Weizenanbau und hohe Anfälligkeiten der Sorten gefördert wurde. Im Jahr 1993 wurde *S. tritici* in allen deutschen Anbaugebieten nachgewiesen (OBST, 1993). Die Verbreitung wurde durch den Anbau von frühreifen und kurzstrohigen Sorten in Verbindung mit einer intensivierten Landwirtschaft gefördert (ARRAIANO et al., 2006). In Hohertragssorten wurden ohne Fungizidmaßnahmen bis zu 50% Ertragsverluste beobachtet (ARRAIANO et al., 2001; SIMÓN et al., 2002). Der Septoria-Befall in Jahren mit feuchter Frühjahrswitterung führte in der Region Norddeutschland zu Ertragsverlusten von 20 dt/ha (CEYNOWA et al., 1993). Besonders bei einem starken Befall der oberen drei Blättagen (F bis F-2) waren die Verluste sehr hoch (ARRAIANO et al., 2006; SHAW & ROYLE, 1989).

2.1.2 Taxonomie

Bis heute sind *S. tritici* und *M. graminicola* verschiedenen Arten zugeordnet, obwohl es sich um zwei Stadien (asexuelles und sexuelles) desselben Schaderregerkomplexes handelt (CUNFER & UENG, 1999).

Im Jahre 1842 berichtete DESMAZIÈRES erstmals über den Erreger der Blattdürre an Weizen, *Septoria tritici* Rob. in Desm., der in demselben Jahr von Roberge beschrieben wurde (CUNFER & UENG, 1999). Weitergehende Untersuchungen zur Gattung Septoria führte WEBER (1922) durch, in denen er die Morphologie der Pyknidien und der Pykno-sporen sowie das Myzelwachstum von

S. tritici und *Stagonospora nodorum* (Blatt- und Spelzenbräune an Weizen, früher als *Septoria nodorum* bezeichnet) ausführlich differenzierte.

Die systematische Einordnung der Blattdürre an Weizen mit der Hauptfruchtform (teleomorphe Form) *M. graminicola* und der Nebenfruchtform (anamorphe Form) *S. tritici* ist in Tabelle 1 dargestellt.

Tabelle 1: Systematische Stellung von *Mycosphaerella graminicola* (teleomorphe Form) und *Septoria tritici* (anamorphe Form) (CUNFER & UENG, 1999).

	<i>Mycosphaerella graminicola</i>	<i>Septoria tritici</i>
Abteilung	<i>Eumycota</i>	<i>Eumycota</i>
Unterabteilung	<i>Ascomycotina</i>	<i>Deuteromycotina</i>
Klasse	<i>Loculoascomycetes</i>	<i>Coelomycetes</i>
Ordnung	<i>Dothideales</i>	<i>Sphaeropsidales</i>
Gattung	<i>Mycosphaerella</i>	<i>Septoria</i>

Die teleomorphe Form *M. graminicola* wurde von SANDERSON (1972) das erste Mal als sexuelles Stadium mit dieser Pilzkrankheit in Verbindung gebracht. Die ersten Berichte in Europa stammen aus Großbritannien von SCOTT et al. (1988). Aus weiteren Ländern wurde von *M. graminicola* berichtet, z. B. aus Australien (BROWN, 1975), Brasilien (METHA, 1989), Deutschland (VERREET et al., 1990), Frankreich (HALAMA, 1996) und Kanada (HOORNE et al., 2002).

Die Vertreter der Unterabteilung *Deuteromycotina*, in der *S. tritici* eingeordnet ist, sind für die Massenvermehrung eines Schaderregers durch asexuell gebildete Konidien verantwortlich und epidemiologisch von großer Bedeutung. Der Ordnung *Sphaeropsidales* sind alle Krankheiten zugehörig, die ihre Konidien in kugelförmigen Fruchtkörpern, den Pyknidien, bilden (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999).

2.1.3 Biologie von *M. graminicola*

Der Pilz *M. graminicola* gehört zu den Ascomyceten, bei denen in der Meiose durch Replikation neue Allelkombinationen (Genotypen) entstehen. Die sexuellen Fruchtkörper von *M. graminicola* (Pseudothecien) bilden sich nach den Pyknidien (asexuelle Fruchtkörper) auf den Blättern. Die Dauer zwischen dem Erscheinen der Pyknidien und den reifen Pseudothecien liegt zwischen 62 und 140 Tagen (HUNTER et al., 1999; KEMA et al., 1996c; SHAW, 1990). Zur Entwicklung der Pseudothecien ist bei heterothallischen Pilzen (d. h. sie benötigen zur Fortpflanzung sexuell differenzierte Thalli) wie *M. graminicola*, der Myzelkontakt verschiedener Paarungstypen (genetisch verschiedene Geschlechtszellen) notwendig. Der Myzelkontakt ist durch das Wachstum von Läsionen gegeben, es wurden auch verschiedene Paarungstypen in einer Läsion nachgewiesen (CHAMBERLAIN & INGRAM, 1997; COWGER et al., 2002). Die windbürtigen Ascosporen von *M. graminicola* entwickeln sich in bitunicaten, obyriformen Ascii (doppelwandig, birnenförmig) im Pseudothecium, die eine Größe von 10-15 x 2,5-3 µm haben (SANDERSON, 1972). In einem

Pseudothecium zählten ERISKEN & MUNK (2003) im Durchschnitt 26 Asci mit einer Streuung von 19 bis 45 Asci. Das ergibt ca. 200 Sporen pro Pseudothecium unter der Prämisse, dass alle Asci reif sind und acht Sporen enthalten. Die Pseudothecien sind seitlich abgeflacht, messen durchschnittlich 73-80 x 77-100 µm und haben eine dunkelbraune Färbung. Sie sind oberflächlich in totem Blattgewebe oder in Weizenstoppeln eingesunken (SANDERSON, 1972). In späteren Untersuchungen wurden Pseudothecien hauptsächlich auf dem Fahnenblatt und der Blattetage F-1 gefunden, nicht aber am Stängel der Pflanzen (HALAMA, 1996). Für den Ausstoß der Ascosporen aus den Pseudothecien sind Temperaturen über 0°C sowie eine hohe relative Luftfeuchte und 1 mm Niederschlag ausreichend (ARSENIUK et al., 1998). Der Prozess der Infektion des Wirtgewebes ausgehend von sexuellen Ascosporen ist identisch mit dem der asexuellen Pyknosporen von *S. tritici* (COHEN & EYAL, 1993; DUNCAN & HOWARD, 2000; HILU & BEVER, 1957; KEMA et al., 1996d).

2.1.4 Biologie von *S. tritici*

Durch die asexuelle Vermehrung der anamorphen Form *S. tritici* entwickeln sich genetisch identische Pyknosporen (Konidien) in Pyknidien, die neue Infektionen verursachen. Als Pyknidien werden die sich im Blattgewebe entwickelnden asexuellen Fruchtkörpern bezeichnet, die als kleine dunkle Punkte auf den Blättern erscheinen (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999). Ein Pyknidium kann zwischen 5.000 und 10.000 Sporen entlassen (EYAL, 1971). Nach GOUGH (1978) bilden sich in einem Pyknidium zwischen 4.000 und 20.000 Pyknosporen. Die reifen Pyknosporen werden umhüllt von einer extrazellulären Matrix (Schleim) bei hoher Luftfeuchtigkeit durch die Ostiole (kleine Öffnung in der Mitte der Pyknidien) entlassen (EYAL, 1971; ZILLINSKY, 1983). Nach HOFFMANN & SCHMUTTERER (1999) treten die Schleimranken bei einer relativen Luftfeuchte > 98% aus der Ostiole aus. Ein mehrfacher Sporenausstoß ist durch ein wiederholtes Aufquellen und Eintrocknen der Pyknidien möglich (EYAL, 1971). Die austretende Sporenmasse ist schwach rosa bis gelblich weiß. Unter dem Mikroskop betrachtet sind die Pyknosporen durchsichtig, fadenförmig oder zylindrisch, mit abgerundeten Enden und gewöhnlich durch zwei bis vier Septen unterteilt (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999) (Abbildung 1 und Abbildung 2).

Nach der Verbreitung der Pyknosporen über Wind und Regen beginnt mit der Sporenkeimung die Phase der Infektion. Der gesamte Infektionsprozess kann in einem Temperaturbereich von 2-36°C (Optimum 22-24°C) stattfinden (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999; WEBER, 1922). Im Allgemeinen sind regnerische Tage positiv für den Infektionsprozess (HESS & SHANER, 1987; MAGBOUL et al., 1992). Freies Wasser auf der Blattoberfläche fördert die Sporenkeimung, das Wachstum der Keimschläuche und die Penetrationsrate (MAGBOUL et al., 1992).

SHANER & FINNEY (1976) und SHANER (1981) grenzen die optimale Keimungstemperatur der Pyknosporen zwischen 20°C und 25°C ein. Als Minimum geben sie 2-3°C an. Mit licht- und elektronenmikroskopischen Methoden wurde beobachtet, dass die meisten Sporen an beiden Enden auskeimen (KEMA et al., 1996d). Die Keimungsrate der Pyknosporen, die Keimschlauch

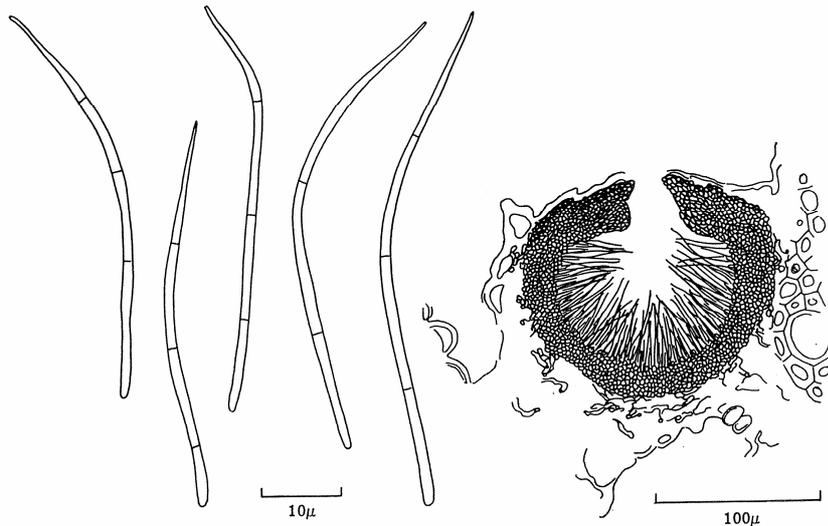


Abbildung 1: Pykno-sporen von *S. tritici* (links) und Pyknidium mit Pykno-sporen im Blattgewebe (rechts). Durch die Öffnung (Ostiole) werden die Sporen entlassen. (C.M.I., 1984).

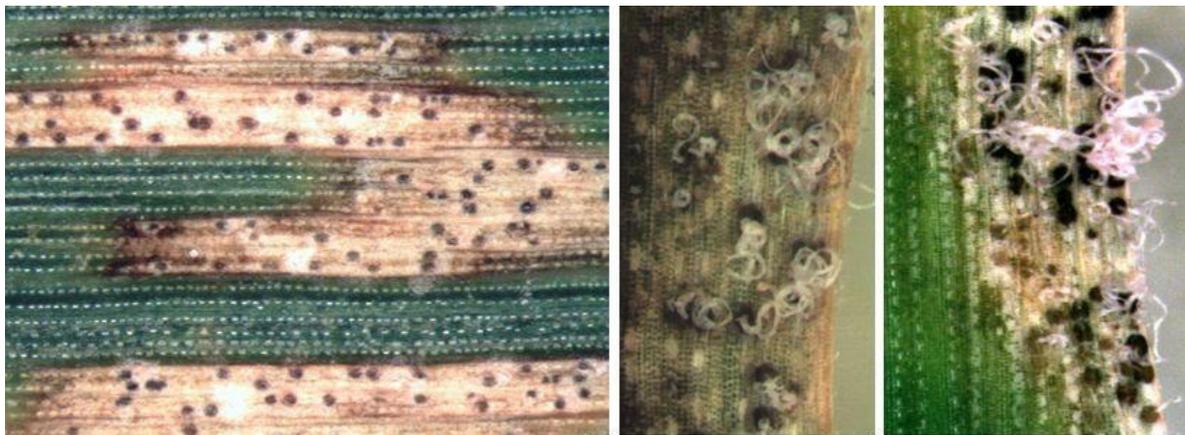


Abbildung 2: Pyknidien in Septoria-Läsionen und aus Pyknidien ausgetretene Schleimranken. Aufnahmen bei 25-facher Vergrößerung. Deutliche Abgrenzung von Läsionen und gesundem Gewebe.

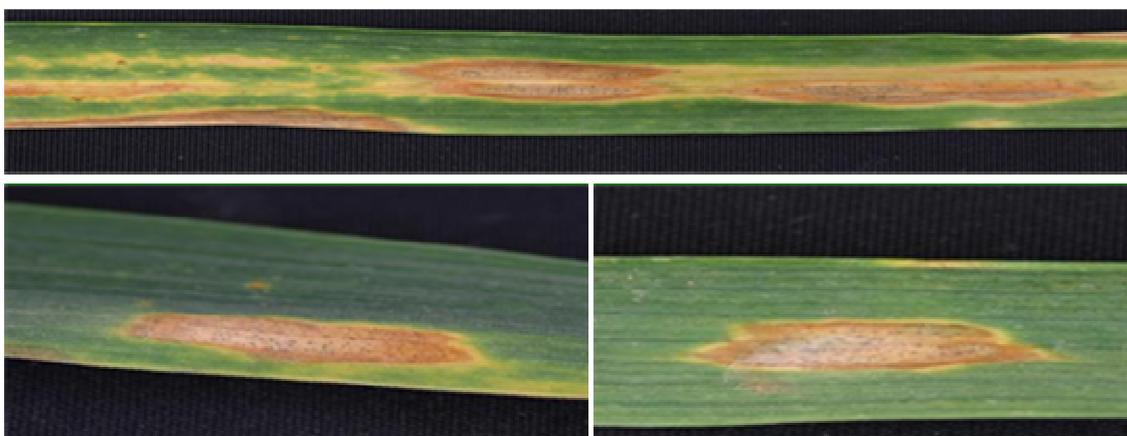


Abbildung 3: Weizenblätter mit Septoria-Läsionen und Pyknidien, die eine deutliche Abgrenzung zum grünen Blattgewebe zeigen. Auf dem oberen Bild sind zwischen den Läsionen gelblich chlorotische Blattveränderungen zu sehen.

länge und die Verzweigungsart der Hyphen im Interzellularraum des Blattgewebes sind sortenspezifisch (COHEN & EYAL, 1993). Keimschläuche wachsen häufig ohne zu penetrieren über Spaltöffnungen hinweg. Daher werden Chemotropismus und Thigmotropismus, also Reaktionen auf chemische Reize (Zucker) und mechanische Reize (Stomata), beim Infektionsprozess ausgeschlossen (KEMA et al., 1996d). Zur Penetration werden entweder Appressorien (Haftorgane) über den Spaltöffnungen gebildet oder die Hyphen wachsen direkt in die Spaltöffnungen der Blätter (COHEN & EYAL, 1993). Die Sporen penetrieren zum größten Teil durch die Stomata (DUNCAN & HOWARD, 2000; KEMA et al., 1996d; PALMER & SKINNER, 2002), da nur selten Appressorien an der Verbindungsstelle zweier Epidermiszellen oder an der Basis von Pflanzenhaarzellen beobachtet wurden (COHEN & EYAL, 1993).

Eine hohe Infektionswahrscheinlichkeit wird bei Temperaturen von 5-19°C sowie einer Blattnässedauer von 35 Stunden erreicht, der weitere 48 Stunden mit einer relativen Luftfeuchtigkeit von über 90% folgen (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999). Der optimale Temperaturbereich für den Infektionsprozess liegt zwischen 16 bis 20°C, bei einer Blattnässedauer von > 48 Stunden (CEYNOWA et al., 1993; HESS & SHANER, 1987). Nach KLINK (1997) und MAGBOUL et al. (1992) wird der höchste Infektionserfolg bei 18°C und 96 Stunden Blattnässe erreicht. Für eine erfolgreiche Infektion sind mindestens 12 Stunden Blattnässe notwendig (HOLMES & COLHOUN, 1974; ROYLE et al., 1986), wohingegen nach RENFRO & YOUNG (1956) die minimale Blattnässedauer 15 Stunden beträgt. Eine drei Tage anhaltende Blattnässedauer nach Inokulation oder natürlicher Infektion erhöht deutlich den Infektionserfolg im Vergleich zu unterbrochenen Blattnässeperioden. Ein Infektionsprozess (von der Landung der Sporen bis zur Etablierung im Wirt) ist unter optimalen Bedingungen nach 24 Stunden abgeschlossen (SHIPTON et al., 1971).

Die Anzahl der erfolgreichen Infektionen, die später die Läsionen hervorrufen, erhöht sich mit steigender Blattnässedauer und Temperatur in der Infektionsphase bis zu einem Optimum. Die resultierende Befallsstärke ist bei einer Temperatur von 25°C während der Infektionsperiode geringer im Vergleich zu 15°C. Ebenfalls wird nach einer Blattnässedauer von 15 Stunden bei 20°C eine geringere Befallsstärke erreicht im Vergleich zu einer längeren Blattnässedauer bei 20°C (MAGBOUL et al., 1992).

Die Dauer eines erfolgreichen Infektionsprozesses von *S. tritici* verlängert sich, wenn in zwei aufeinander folgenden Nächten die Temperaturen unter 7°C sinken. Niedrige Temperaturen beeinflussen nicht nur die Keimung der Sporen und das Myzelwachstum, sondern auch das Wachstum der Läsionen (RENFRO & YOUNG, 1956; SHANER, 1981; SHANER & FINNEY, 1976). Bei einer Temperatur von 10°C ist der Infektionserfolg zwar deutlich reduziert, es erfolgt allerdings keine Hemmung des Prozesses (MAGBOUL et al., 1992).

Eine Inkubationsdauer von nur 12 Stunden ist nicht ausreichend für eine erfolgreiche Infektion. Es wachsen zwar Hyphen in die substomatäre Höhle, aber es entwickeln sich keine Läsionen und Pyknidien. Erst nach einer Inkubationsdauer von 48 Stunden erscheinen später die typischen *S. tritici*-Symptome. Für die Ausbreitung in der Pflanze müssen die Pilzhyphen die Mesophyllzellen erreichen. Dazu benötigen sie mindestens 48 Stunden (KEMA et al., 1996d). Fünf Tage nach der

Inokulation ist die substomatäre Höhle von Hyphen komplett besiedelt. Die ersten Anlagen von Pyknidien entwickeln sich bei anfälligen Sorten acht Tage nach der Inokulation. Die Entwicklung der Pyknidien findet unter den Stomata statt. Innerhalb von zwei bis drei Tagen entwickelt sich aus einem „Vorpyknidium“ ein reifes Pyknidium pro substomatärer Höhle (KEMA et al., 1996d). Zehn bis zwölf Tage nach der Inokulation kollabieren die Mesophyllzellen und die Zellwände werden abgebaut (KEMA et al., 1996d). Bei anfälligen Sorten ist 12 Tage nach der Inokulation die Bildung der Pyknidien und eine starke Ausbreitung von Pilzgewebe in den Mesophyllzellen zu beobachten (COHEN & EYAL, 1993). Freigesetzte Nährstoffe ermöglichen eine starke Myzelvermehrung. Innerhalb des Blattes wird das Mesophyllgewebe ohne die Bildung von Haustorien interzellulär kolonisiert. Bei anfälligen Sorten wird im Vergleich zu resistenten Sorten ein verstärktes Myzelwachstum beobachtet (KEMA et al., 1996d; PNINI-COHEN et al., 2000).

Nach dem Ablauf der Inkubationszeit werden Läsionen auf den Blättern sichtbar, in denen nach Ablauf der Latenzzeit die Pyknidien erscheinen. Die hellgrünen, später gelblich bis rotbraunen, unregelmäßig runden bis ovalen Septoria-Läsionen zeigen sich in allen Entwicklungsstadien auf den Blättern (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999). In frischen Läsionen sind die Pyknidien geleeartig und strohfarben und werden erst mit dem Alter dunkler (ZILLINSKY, 1983). Aufgrund der zahlreichen Pyknidien haben Septoria-Läsionen oft ein gesprenkeltes Aussehen (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999) (Abbildung 3).

Aus Sicht der Pflanzenphysiologie reduzieren die Läsionen die photosynthetisch aktive Blattfläche, wodurch signifikante Ertragsverluste entstehen können. Die Zusammenhänge zwischen Befall und physiologisch beeinflussten Prozessen wurden von ROBERT et al. (2006) untersucht.

2.2 Epidemiologische Entwicklung

In Regionen mit intensivem Getreideanbau kann sich *S. tritici* bereits im Herbst etablieren, da genügend Inokulum aus angrenzenden Anbauflächen vorhanden ist (CEYNOWA et al., 1993; SHAW & ROYLE, 1989). POLLEY & THOMAS (1991) konnten belegen, dass auch in Jahren mit durchschnittlich hohen Ertragsverlusten ein Septoria-Befall nicht auf allen Flächen auftritt. Ebenso kann in Jahren mit ungünstigen Infektionsbedingungen für *S. tritici* auf einzelnen Flächen ein beachtlicher Befall auftreten.

Eine erfolgreiche epidemische Ausbreitung ist bei vielen Pilzarten von der Kombination aus sexueller und asexueller Reproduktion abhängig, die von genetischen Eigenschaften und den Umweltbedingungen gesteuert wird (CHAMBERLAIN & INGRAM, 1997). Nach SHAW & ROYLE (1989, 1993) ist das sexuelle Stadium größtenteils für die Überdauerung der Blattdürre in den Sommermonaten verantwortlich, während für die Epidemieentwicklung in der Saison das asexuelle Stadium maßgeblich ist. Primärinfektionen an Winterweizen werden hauptsächlich von windbürtigen Ascosporen verursacht (SHAW & ROYLE, 1989), da Pyknosporen in Verbindung mit Niederschlägen nur über eine Distanz von 0,5 bis 1 m verteilt werden (BRENNAN et al., 1986) (Abbildung 4). In Versuchen in Norddeutschland konnten zwar keine Sporen von *M. graminicola* nachgewiesen

werden, jedoch wurde aufgrund einer gleichmäßigen Verteilung von Primärsymptomen die Ascosporeninfection nicht ausgeschlossen (CEYNOWA et al., 1993).

Die Ascosporen von *M. graminicola* dienen nicht nur als primäre Inokulumquelle (SCHUH, 1990; SHAW & ROYLE, 1989), sondern können während des ganzen Jahres gebildet werden (HUNTER et al., 1999; KEMA et al., 1996d). Die Versuche von COWGER et al. (2002) unterstützen die Aussage, dass mehrere Zyklen von *M. graminicola* in einer Saison möglich sind. Dabei ist die Anzahl der Zyklen abhängig von der Anfälligkeit der Sorte. Der Einfluss der Ascosporen auf die Epidemienentwicklung in der generativen Phase ist jedoch sehr gering (EYAL, 1971; GOUGH, 1978). ERIKSEN et al. (2001) belegten, dass erst am Ende einer Vegetationszeit der Anteil der Pseudothecien im Verhältnis zu den Pyknidien auf 20-30% ansteigt. Zudem konnte keine signifikante Veränderung der Anzahl verschiedener Genotypen von Beginn bis zum Ende der Saison nachgewiesen werden (CHEN & McDONALD, 1996).

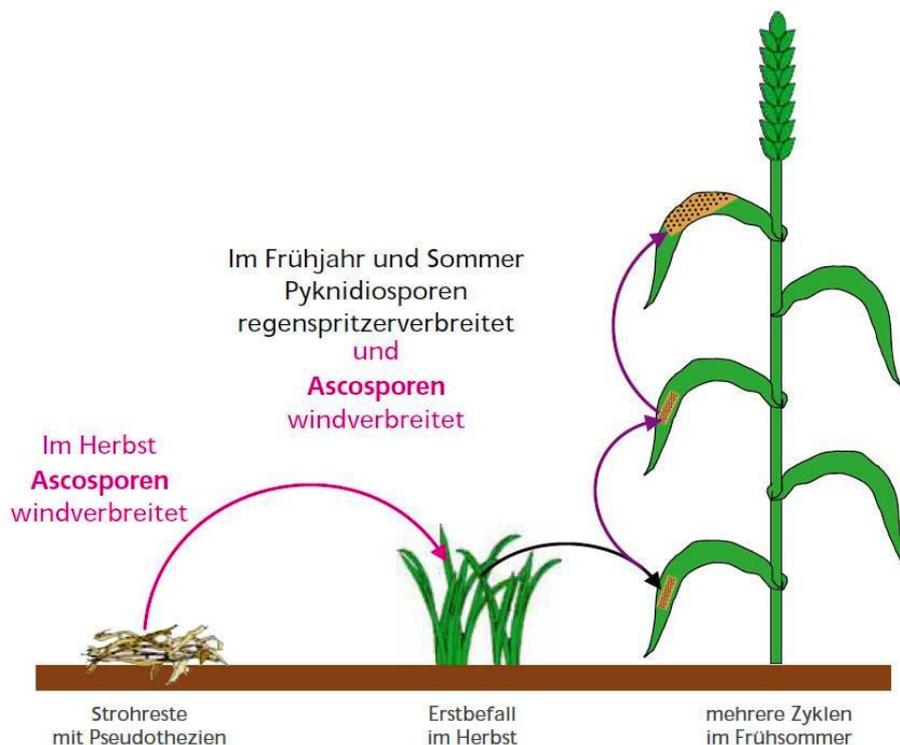


Abbildung 4: Sexuelle und asexuelle Entwicklungsphase von *S. tritici* (OBST & GERING, 2002).

Für die epidemische Ausbreitung des Befalls ist Niederschlag der begrenzende Faktor (CEYNOWA et al., 1993). Feuchtigkeit in Form von Regen oder Tau ist für eine erfolgreiche Infektion (BAHAT et al., 1980; FELLOWS, 1962; HILU & BEVER, 1957) sowie für alle folgenden Stadien im Infektionszyklus erforderlich (EYAL, 1971; FELLOWS, 1962; GOUGH, 1978; HESS & SHANER, 1987; HILU & BEVER, 1957). Die Infektion der oberen Blätter erfolgt durch Sporen, die in Regentropfen von unteren Blättern zurückprallen (CORDO et al., 1999; LOVELL et al., 1997). Für die Verteilung der Sporen sind 5 bis 10 mm Niederschlag pro Tag oder an drei aufeinander folgenden Tagen insgesamt 10 mm Niederschlag notwendig (THOMAS et al., 1989). Nach GLADDERS et al. (2001) sind für die Sporenverteilung Niederschlagsmengen von mindestens 10 mm an einem Tag oder an drei

aufeinander folgenden Tagen jeweils 1 mm erforderlich. PIETRAVALLE et al. (2003) berichten, dass sowohl die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 9 mm signifikant mit der Befallsstärke korrelierte als auch die Anzahl an Tagen mit Niederschlägen $> 0,1$ mm. Bereits eine geringe Befallsstärke auf den unteren Blattetagen ist für Infektionen der oberen Blattetagen ausreichend (ROYLE et al., 1986). Neben dieser Verbreitungsart ist ein Befallsaufbau im Bestand auch ohne Regentropfen durch eine Überlappung von Blättern möglich. Bei der Berührung von infizierten und symptomlosen Blättern werden Sporen übertragen (LOVELL et al., 1997; PARKER et al., 1997). SHAW & ROYLE (1993) bewerten die Sporenverteilung über Regentropfen auf die oberen Blattetagen als ineffizienten Prozess, durch den nur wenige Infektionen an oberen Blättern verursacht werden. Bei kurzstrohigen Sorten befinden sich die Blätter verschiedener Blattetagen zeitweise auf gleicher Höhe, so dass es zu einer Überlappung der Blätter kommt. In Bezug auf die Septoria-Anfälligkeit ist bei gering anfälligen Sorten die Dauer der Überlappung von Blättern verschiedener Blattetagen kürzer als bei stark anfälligen Sorten (LOVELL et al., 1997).

Bei Sekundärinfektionen werden viele Sporen mit dem Wasserfluss auf einem Blatt verteilt. Die Anzahl der Neuinfektionszyklen auf einem Blatt wird von der zur Verfügung stehenden Blattfläche begrenzt. Auf dem Fahnenblatt ist maximal ein weiterer Infektionszyklus durch auf diesem Blatt gebildete Sporen möglich (SHAW & ROYLE, 1993).

Starke Epidemien werden gefördert, wenn die Entfernung zwischen neu gebildeten Blättern und Inokulum gering ist (SHAW & ROYLE, 1993). Zudem wird ein hoher Endbefall aufgrund der langen Latenzzeit von *S. tritici* nur erreicht, wenn die oberen Blattetagen bereits in der Bildungsphase infiziert werden. Ist die Entfernung zwischen infektiösen und symptomlosen Blättern zu weit, können nur Starkregenereignisse den nötigen Splasheffekt für die Verteilung der Sporen auslösen (SHAW & ROYLE, 1993).

Es werden zwei Arten der Befallsausbreitung unterschieden. Bei einem plötzlichen Ausbruch erscheinen die Septoria-Läsionen nach der Schossphase gleichzeitig auf den oberen Blattetagen. Es sind Starkregenereignisse notwendig, damit die Pyknosporen der unteren Blätter alle oberen Blattetagen infizieren können. Wenn am Ende der Schossphase die oberen Blätter keine Läsionen aufweisen, können keine Sekundärinfektionen durch Blattberührung ausgelöst werden (CEYNOWA et al., 1993; SHAW & ROYLE, 1993). Für einen kontinuierlichen Befallsaufbau sind anhaltende Perioden mit günstigen Infektionsbedingungen erforderlich. Die Blätter werden bereits zum Zeitpunkt des Erscheinens infiziert, wodurch hohe Befallsstärken auf den Blättern erreicht werden (ROYLE et al., 1986).

Reife Pyknidien entlassen beim ersten Sporenausstoß zwischen 40 bis 60% der Pyknosporen (EYAL, 1971). Unter optimalen Bedingungen findet innerhalb von 24 Tagen alle zwei Tage eine erneute Sporulation statt, so dass zwölf Sporengenerationen möglich sind. Das Maximum der Sporenproduktion ist dabei von der Höhe der relativen Luftfeuchte abhängig (BROKENSHIRE, 1975; GOUGH & LEE, 1985). Unter wechselnden Umweltbedingungen im Freiland ist die Pyknidiendichte geringer als unter kontrollierten Bedingungen (DANON & EYAL, 1990). Generell sind alte Pflanzen anfälliger für einen Befall mit *S. tritici* als Jungpflanzen (KEMA & SILFHOUT VAN, 1997).

Der Zusammenhang zwischen den Befallsparametern Größe der Läsionen und Pyknidiendichte ist nicht linear und hängt von dem Wachstumsstadium der Pflanzen, den Umweltbedingungen sowie dem Genotyp ab (DANON & EYAL, 1990). Für anfällige Sorten konnte jedoch eine Korrelation zwischen der Läsionsgröße und der Pyknidiendichte belegt werden (COHEN & EYAL, 1993).

In der Literatur sind verschiedene Korrelationen der Befallsstärke zu pflanzenbaulichen Aspekten und Witterungsparametern beschrieben, die im Folgenden vorgestellt werden.

Der Aussaattermin hat einen signifikanten Einfluss auf die Befallsstärke. Früh gesäte Bestände haben einen höheren Septoria-Befall als spät gesäte (DAAMEN & STOL, 1992; GLADDERS et al., 2001). Für die Region New South Wales (Australien) konnte aus Daten von 38 Jahren belegt werden, dass eine Korrelation zwischen Aussaattermin und Epidemie besteht. In früh gesäten Beständen etablierte sich *S. tritici* in einem längeren Zeitraum und erreichte höhere Befallsstärken (MURRAY et al., 1990). Eine weitere Korrelation der Befallsstärke besteht für die Anzahl an Frosttagen im November sowie den Niederschlagsereignissen in den Monaten Mai und Juni (GLADDERS et al., 2001). Die Befallsstärke zum Stadium der Milchreife korreliert mit der Anzahl an Regentagen in der Schossphase (SHAW & ROYLE, 1993; TYLDESLEY & THOMPSON, 1980). Die Auswertungen von ROYLE et al. (1993) belegen eine negative Korrelation der Befallsstärke zu der Zahl an Tagen mit Temperaturen unter -2°C in den Monaten November und Dezember.

Erhöhte Stickstoffgaben fördern die Septoria-Epidemie in Weizenbeständen (SHIPTON et al., 1971; SIMÓN et al., 2002) in Folge eines veränderten Mikroklimas (ANSAR & LEITCH, 2009; SCHUH, 1990; SHAW & ROYLE, 1989). Ab einer Stickstoff-Düngung von 150 kg/ha stieg der Septoria-Befall im Vergleich zur Kontrolle an. Jedoch führte eine Verdopplung der Menge nur zu einer geringen, nicht signifikanten weiteren Steigerung des Befalls, unabhängig von der Blattetage und dem Wachstumsstadium (ANSAR & LEITCH, 2009). Im BBCH-Stadium 70 wurde nur eine geringe Erhöhung des Befalls in Abhängigkeit von Bestanddichten von 120 und 600 Ähren/m² festgestellt, wohingegen im BBCH-Stadium 55 die Bestandesdichte einen deutlicheren Einfluss auf den Befall hatte (ANSAR & LEITCH, 2009).

2.3 Resistenzeigenschaften von Winterweizensorten

Sortenunterschiede in der *S. tritici*-Anfälligkeit werden jedes Jahr in der Sortenliste des Bundesortenamtes veröffentlicht und wurden in vielen Arbeiten thematisiert (AHMED et al., 1996; BROWN et al., 2001; CHUNGU et al., 2001; COHEN & EYAL, 1993; KEMA et al., 1996a; SHAW, 1990; VÉCHET & VOJÁCKOVÁ, 2005; ZHANG et al., 2001).

Für *S. tritici* ist keine vollständige Resistenz beschrieben, da Läsionen mit Pyknidien bei jeder Sorte identifiziert werden können. Daher wird die Einschränkung der Pathogenentwicklung als eine Form der Resistenz bezeichnet (SIMÓN et al., 2005). Einen Schaderregerbefall unter geringerer Einbuße an Leistungsfähigkeit zu überstehen wird auch als Toleranz bezeichnet (AUST et al., 1991). Die Pyknidien von *S. tritici* erscheinen für gewöhnlich in den hellbraunen Läsionen. Bei stark anfälligen

Sorten wurde beobachtet, dass sich Pyknidien im noch grünen, aber bereits kollabierten Gewebe entwickeln (COHEN & EYAL, 1993; KEMA et al., 1996a).

MCDONALDS & MARTINEZ (1990) konnten anhand von DNA-Untersuchungen mittels RFLP-Analyse nachweisen, dass die Pyknidien auf einem Blatt zu einem hohen Grad genetisch verschieden sind. COWGER et al. (2002) verwendeten mehrere *M. graminicola*-Isolate verschiedener Sorten zur Überprüfung der Virulenz auf anderen Winterweizensorten. Die Ergebnisse bestätigen eine sortenabhängige Reaktion auf *M. graminicola*-Isolate. Auch die Ergebnisse der Versuche von KEMA et al. (1996b) weisen auf eine beträchtliche genetische Variation spezifischer Resistenz- und Virulenzfaktoren für Wirt und Pathogen hin.

Signifikante Unterschiede in der Virulenz verschiedener Isolate zu einzelnen Weizensorten sind in der Literatur belegt (BROWN et al., 2001; VÊCHET & VOJÁCKOVÁ, 2005). Daher kann bei *S. tritici* an Winterweizen nicht von einer horizontalen Resistenz gesprochen werden, die durch eine rassenspezifische, gleichmäßige Widerstandskraft eines Genotyps gegenüber allen Virulenzen einer Erregerart definiert ist. Es liegt eine vertikale Resistenz vor, d. h. eine rassenspezifische Widerstandskraft (AUST et al., 1991). Jedoch ist die genetische Variabilität der Isolate innerhalb einer Population sehr hoch, und innerhalb eines Quadratmeters konnten 2/3 der gesamten genetischen Variabilität nachgewiesen werden (MORZFELD, 2004). Daher kann im Freiland immer eine Mischung verschiedener Septoria-Isolate angenommen werden, die bei Inokulationsversuchen im Labor eine höhere Pyknidiendichte ergab im Vergleich zur Inokulation mit Einzelisolaten (ZELIKOVITCH & EYAL, 1991).

Eine geringe Anfälligkeit von Weizensorten gegenüber *S. tritici* kann entweder auf einem einzelnen dominanten Resistenzgen oder auf additiven Effekten mehrerer Gene beruhen (EYAL, 1999; KEMA et al., 1996d). Laut SIMÓN et al. (2005) haben mehrere Gene einen Einfluss auf die Resistenz des Weizens, deren Wirkung jedoch von den Umweltbedingungen und den Septoria-Isolaten abhängig ist. Weiterhin ist möglich, dass nur die Größe der nekrotisierten Fläche oder nur die Pyknidienbedeckung von der Resistenz beeinflusst wird.

An Blattresten konnten Sortenunterschiede für die Sporulationsdauer und die Sporulationszeit ermittelt werden. Bestimmte Sorten entließen über einen längeren Zeitraum eine höhere Anzahl an Sporen (BROKENSHIRE, 1975). Da dieses Ergebnis keinen Zusammenhang zur Septoria-Anfälligkeit hatte, ist bei der Sortenwahl auch das Verhalten auf Blattresten zu beachten.

Die Pyknidiendichte von gering anfälligen Sorten ist geringer im Vergleich zu stark anfälligen Sorten, wobei kein Zusammenhang zur Läsionsgröße besteht (KEMA et al., 1996a). Die Anzahl und Größe der Läsionen ist bei gering anfälligen Sorten ebenfalls reduziert (BENEDIKZ et al., 1981; DAAMEN & STOL, 1992) und die Pyknidiengröße geringer im Vergleich zu stark anfälligen Sorten (GOUGH, 1978; HESS & SHANER, 1987). Des Weiteren bilden gering anfällige Sorten weniger Sporen, wobei die Sporenproduktion zusätzlich von den Umweltbedingungen beeinflusst wird (GOUGH, 1978). Charakteristisch für Sorten verschiedener Septoria-Anfälligkeit ist das Verhältnis von Läsionsgröße zur Blattgröße (KEMA et al., 1996a).

In der Literatur sind Angaben zur Korrelation der Sortenanfälligkeit mit der Pflanzenhöhe und dem Zeitpunkt des Ährenschiebens zu finden. SIMÓN et al. (2004) berichten, dass bei kurzstrohigen Sorten die Läsionen größer sind im Vergleich zu langstrohigen Sorten. Sorten mit frühem Zeitpunkt des Ährenschiebens bilden weniger Läsionen aus. In anderen Publikationen wird kein genetischer Zusammenhang zwischen einer Resistenz und der Pflanzengröße bzw. dem Ährenschieben beschrieben, sondern epidemiologische Effekte als Ursache angesehen (ARAMA et al., 1999).

Bei starken Septoria-Epidemien gab es keine Unterschiede bezüglich der vertikalen Befallszunahme bei Sorten verschiedener Wuchshöhen. Bei einer langsamen Befallsausbreitung entwickelten sich Septoria-Läsionen auf den oberen vier Blättern von kurzstrohigen Sorten 10 bis 20 Tage später als bei langstrohigen Sorten (BAHAT et al., 1980). Die Dauer der Latenzzeit ist bei gering anfälligen Sorten im Vergleich zu stark anfälligen Sorten erhöht (EYAL, 1999; KEMA et al., 1996d). VILJANEN-ROLLINSON et al. (2005) berichten, dass die Dauer der Latenzzeit zehn verschiedener Sorten um maximal 11 Tage differierte. Die Dauer der Latenzzeit wird nicht nur von der genetischen Struktur der Sorten beeinflusst, sondern verlängert sich auch bei geringerem Inokulum (SHEARER & ZADOKS, 1972, 1974).

Bei gering anfälligen Sorten sind viele Pyknidien nur mikroskopisch als Anlagen zu sehen, bei anfälligen Sorten hingegen sind sie makroskopisch zu identifizieren. Die Pyknidienreifung ist auf resistenten Sorten soweit gehemmt, dass auch unter günstigen Umweltbedingungen viele Pyknidien nur das Stadium eines so genannten Vorpyknidiiums erreichen (COHEN & EYAL, 1993).

Bei resistenten Sorten wurde eine erhöhte Menge an Callose (Polysaccharid, physische Barriere (Papillen) durch Verschluss von Zellporen) in den Mesophyllzellen befallener Blätter nachgewiesen (COHEN & EYAL, 1993). Gering anfällige Sorten reagieren bereits kurz nach der Infektion mit der Produktion von Callose, während bei stark anfälligen Sorten erst später die Callose-Konzentration ansteigt (SHETTY et al., 2003). Die Resistenz von Sorten ist abhängig von einer schnellen Erkennung des Pathogens, die aufgrund der Anwesenheit von β -1,3-Glucan in den pilzlichen Zellwänden erfolgt. Dies veranlasst die Pflanze zur Ansammlung von β -1,3-Glucanase und weiteren Abwehrreaktionen (SHETTY et al., 2009).

2.4 Modelle in der Epidemiologie

Ein grundlegendes Konzept der Epidemiologie ist das Krankheitsviereck, das die Wechselwirkungen zwischen Erreger- und Wirtspopulationen unter dem Einfluss von Umweltfaktoren und den Eingriffen des Menschen verdeutlicht (KRANZ, 1996) (Abbildung 5). Die sich daraus ergebenden phytopathologischen Kenntnisse sind Voraussetzung für die Modellierung von Befallsverläufen. Alle Komponenten des Krankheitsvierecks sind bestimmend für die Dynamik einer Epidemie. Die Witterungsbedingungen und der Standort beeinflussen die Entwicklung des Erregers und der Wirtspflanze. Die Umweltfaktoren wirken auf die Übertragung des Schaderregers und die Infektion (KRANZ, 1996).

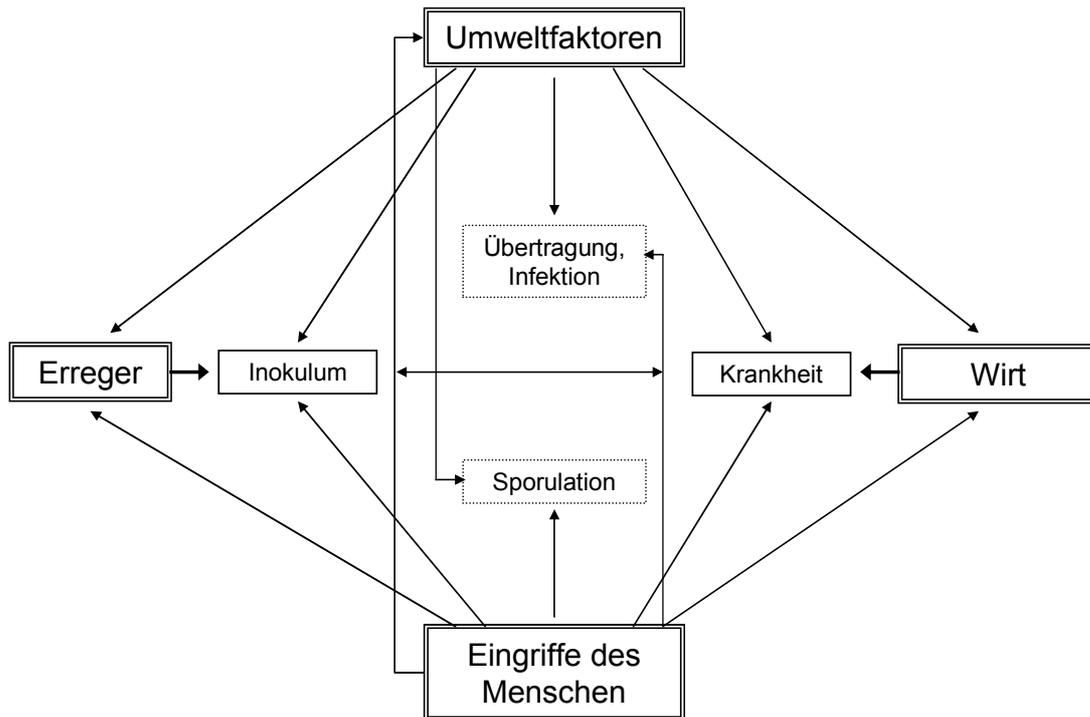


Abbildung 5: Krankheitsviereck mit Komponenten die zum Entstehen von Epidemie führen. Wechselwirkungen zwischen Wirtspflanzen und Krankheitserregern unter dem Einfluss von Umweltfaktoren und den Eingriffen des Menschen (KRANZ, 1996).

Die Epidemiologie von Pflanzenkrankheiten wird von KRANZ (1996) als eine „ökologische Arbeitsrichtung der Phytopathologie“ bezeichnet. Es werden Zusammenhänge verschiedener Parameter untersucht, die zum Entstehen von Epidemien führen. Zur Entwicklung von Modellen, die eine Epidemie in Abhängigkeit von Witterungs- und Anbauparametern beschreiben, kann als Grundlage die Systemanalyse verwendet werden (Abbildung 6). Im Mittelpunkt stehen dabei Experimente im Freiland, Gewächshaus oder Labor (Klimaschrank), deren Erkenntnisse und Ergebnisse mit Hilfe von mathematischen und statistischen Methoden in ein Modell umgesetzt werden. Die ersten Simulationsmodelle wurden in den sechziger Jahren veröffentlicht (WAGGONER & HORSFALL, 1969). Seitdem folgten zahlreiche weitere Simulationsmodelle für Pflanzenkrankheiten (CAMPBELL & MADDEN, 1990; HAU, 1985, 1988; HAU et al., 1985; TENG, 1985), von denen einige eine zufrieden stellende Übereinstimmung von erhobenen und simulierten Daten zeigen (TENG, 1985).

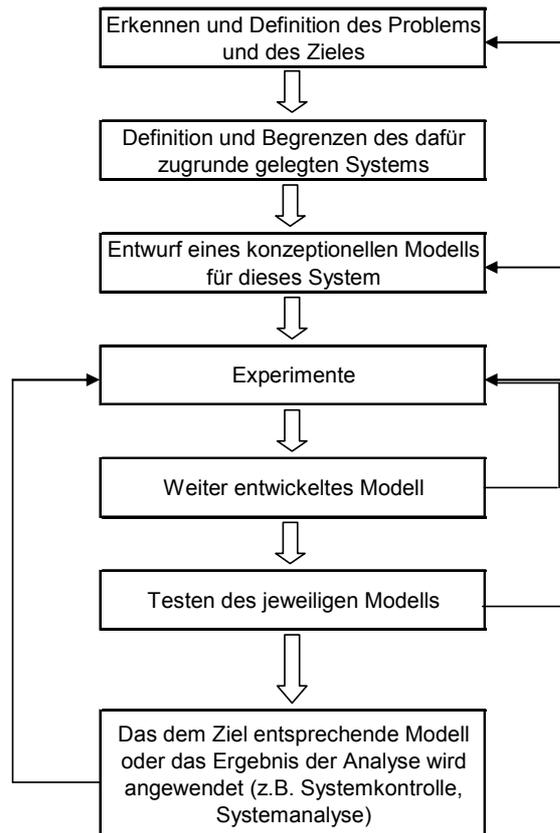


Abbildung 6: Schema der Systemanalyse zur Untersuchung von komplexen Epidemien mit dem Ziel der Entwicklung eines Modells (KRANZ, 1996).

Die Entwicklung von Modellen verläuft in mehreren Schritten, wobei keine festgelegte Reihenfolge eingehalten werden muss, sondern Rücksprünge zu vorangegangenen Schritten möglich sind. Unabhängig für die Betrachtung von Simulations- oder analytischen Modellen kann der Prozess der Modellbildung in vier Schritten dargestellt werden, die sich auch in der Abbildung 6 wiederfinden. Zu Beginn muss das Modellziel formuliert werden, für das nach der Abgrenzung des Themas ein konzeptionelles Modell entworfen wird. Im zweiten Schritt müssen Daten gewonnen werden, die verschiedene zu modellierende Prozesse beschreiben. Dazu können eigene Experimente durchgeführt werden oder Daten aus Literaturrecherchen verwendet werden. Danach folgen die mathematische Formulierung der experimentellen Zusammenhänge, die Schätzung der Parameter und die Programmierung der Abläufe für ein Computermodell. Der letzte Schritt ist die Validierung, die Überprüfung von Modell und Wirklichkeit (CAMPBELL & MADDEN, 1990; HAU, 1985, 1988; HAU et al., 1985; KRANZ & HAU, 1980; TENG, 1981). Dazu sollten Datensätze verwendet werden, die nicht in die Modellbildung eingeflossen sind. Die Validierung kann als ein subjektiver Test mit einem visuellen Vergleich von erhobenen und simulierten Daten verstanden werden. Ein quantitativer Vergleich kann mit statistischen Methoden durchgeführt werden (z. B. Regressionsanalysen, Varianzanalysen, Korrelationen) (TENG, 1981).

2.5 Modelle in der praktischen Landwirtschaft

In der Landwirtschaft werden witterungsbasierte Prognosemodelle u. a. zur Simulation des Zeitpunktes des Erstauftretens verschiedener Schädlinge und Krankheiten eingesetzt. Des Weiteren können Perioden mit hohem Befallsdruck berechnet werden und so die Bekämpfung an den Befallsdruck angepasst werden. Bei der Bekämpfung von pilzlichen Schaderregern in Getreide können zum Beispiel aufgrund der Informationen aus Prognosemodellen Pflanzenschutzmittel durch eine Optimierung des Behandlungstermins eingespart werden (KLEINHENZ & JÖRG, 1998). Des Weiteren bieten einige Prognosemodelle die Möglichkeit für das Überschreiten einer Bekämpfungsschwelle den optimalen Termin für eine Fungizidanwendung zu berechnen (RACCA et al., 2002a)

Die Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) in Deutschland hat dabei die Aufgabe der Überprüfung und Verbesserung der Prognosemodelle übernommen (JÖRG & KLEINHENZ, 1996; JÖRG & ROßBERG, 1998; RACCA et al., 2002b). In den letzten elf Jahre wurden bei der ZEPP mehr als 20 wetterbasierte Prognosemodelle für Schädlinge und Krankheiten erfolgreich entwickelt und validiert (www.zepp.info). Prognosemodelle werden in der integrierten Pflanzenproduktion bereits in großem Umfang als Entscheidungshilfen eingesetzt. Dazu wird die Internetplattform von ISIP e.V. (Informationssystem integrierte Pflanzenproduktion) genutzt. Dort erhalten Berater und Landwirte Informationen zu aktuellen Befallssituationen verschiedener Schaderreger in Ackerkulturen. Es können schlagspezifische Eingaben vorgenommen werden, um z. B. den Aussattermin oder die Sortenklasse zu variieren.

2.6 Modelle zur Septoria-Befallsprognose

Zur Befallsprognose einer Septoria-Epidemie sind in der Literatur mehrere Ansätze beschrieben. Alle Ansätze haben gemeinsam, dass sie Witterungsdaten berücksichtigen, wobei vornehmlich Niederschlagsereignisse über die Stärke einer Septoria-Epidemie entscheiden. Im Folgenden werden die bisher veröffentlichten Modelle zu *S. tritici* dargestellt.

2.6.1 Das Prognosemodell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006)

Das Prognosemodell SIMSEPT wurde im Jahr 2006 von KLUGE et al. entwickelt. Es berechnet unter Berücksichtigung der Wetterparameter Temperatur, relative Luftfeuchte und Niederschlag die Epidemieentwicklung für die Schadpilze *S. tritici* und *S. nodorum*. Bei einem sogenannten Neuinfektionsereignis wird auf Grundlage der Reifung des latenten Potentials (entspricht der Dauer der Latenzzeit) und des Pilzwachstums (Nekrosenwachstum) eine Befallshäufigkeit berechnet und zu den Terminen 1. März, 1. April und 1. Mai eine Behandlungsempfehlung gegeben. Dieses Prognosemodell wurde nicht in die Praxis eingeführt. Jedoch ist das Modul „Berechnung eines Neuinfektionsereignisses“ unter dem Namen SIMSEPT1 seit einigen Jahren in der landwirtschaftlichen Beratung erprobt worden. Es berechnet auf Grundlage aktueller

Witterungsdaten, ob ein Neuinfektionsereignis stattgefunden hat, und informiert über den Tag eines erfolgreich abgeschlossenen Neuinfektionsprozesses.

Der Neuinfektionszyklus ist im Modell in drei Phasen gegliedert, die das Aufquellen der Pyknidien, die Sporenverteilung und die Sporenkeimung behandeln. Werden die erforderlichen Bedingungen in einer der Phasen nicht erfüllt, wird das laufende Neuinfektionsereignis abgebrochen. Ein Neuinfektionszyklus wird gestartet, wenn in der vergangenen Stunde eine relative Luftfeuchte von $\geq 85\%$ gemessen wurde. Der Prozess Aufquellen der Pyknidien war erfolgreich, wenn in zwei aufeinander folgenden Stunden die relative Luftfeuchte $\geq 85\%$ war. Durch die Aufnahme der Feuchtigkeit drücken sich die Schleimranken mit den Pyknosporen aus den Pyknidien. In der folgenden Phase des Infektionsprozesses muss innerhalb von 24 Stunden mindestens 0,5 mm Niederschlag in einer Stunde fallen. Ist diese Bedingung erfüllt, erfolgt die Sporenkeimung. Für einen erfolgreichen Abschluss muss die relative Luftfeuchte seit dem letzten Regenereignis an mindestens 14 aufeinander folgenden Stunden $\geq 85\%$ gewesen sein. An dieser Stelle ist das Modell SIMSEPT1 beendet. Für die weiteren Berechnungen im kompletten Modell SIMSEPT wird mit dem Abschluss eines Neuinfektionsprozesses eine Neuinfektionsrate berechnet. Diese Rate, multipliziert mit dem aktuellen Wert des infektiösen Potentials, wird als neues latentes Potential berücksichtigt. Für das latente Potential werden zwei Prozesse getrennt betrachtet. Zum Einen ist es das stündliche Wachstum des Myzels im Blatt und zum Anderen die Dauer der Latenzzeit in Abhängigkeit der Temperatur. Die Dauer wird im Modell über einen stündlichen Entwicklungszuwachs berechnet. Die stündlichen Werte werden aufsummiert, bis der Wert 1 erreicht ist. Nach dem Ablauf der Latenzzeit fließt das latente Potential ins infektiöse Potential mit ein. Im Verlauf einer Vegetationsperiode wächst so das infektiöse Potential an. Des Weiteren wird mit der ‚Rate Nekrosenwachstum‘ der stündliche Zuwachs des infektiösen und latenten Potentials kalkuliert. Es können mehrere Altersklassen (Infektionszyklen) für latentes Potential parallel berücksichtigt werden.

Die Behandlungsempfehlung resultiert aus der Befallshäufigkeit, die mit einer linearen Funktion aus dem infektiösen Potential berechnet wird. Im Modell beschreibt das infektiöse Potential den Mittelwert der Befallsstärke der oberen drei Blattetagen ab BBCH 37 (BBCH-Stadium nach dem Modell SIMONTO).

Die Änderungsraten für das Pilzwachstum (infektiöser und latenter Anteil), die Reifung des latenten Potentials sowie die Neuinfektionsrate werden mit Witterungsparametern berechnet. Den größten Einfluss hat die Temperatur, nur für die Neuinfektionsrate werden Angaben zur relativen Luftfeuchte und Niederschlag benötigt. An diesen drei Stellen im Modell wird die Berücksichtigung einer Sortenanfälligkeit vorgeschlagen. Bisher wurde keine Validierung des Modells vorgenommen.

2.6.2 Modell von COAKLEY et al. (1985)

COAKLEY et al. (1985) untersuchten den Zusammenhang zwischen der Befallsstärke von *S. tritici* und Klimadaten mit dem Ziel, eine rechtzeitige Empfehlung für eine Behandlung zu geben. Für die Prognose wurde der Kalendertag 170 (19. Juni) gewählt, da spätere Infektionen nur einen geringen

Effekt auf den Ertrag haben. Zur Modellerstellung wurden die Boniturdaten von 12 Jahren (1973-1984) der anfälligen Sorte Monon verwendet.

Die Befallsstärke am Tag 170 war signifikant mit neun wetterabhängigen Parametern korreliert, die in der Tabelle 2 dargestellt sind. Mit verschiedenen statistischen Methoden wurden die insgesamt 129 Modelle getestet. Die neun Modelle, die den Befall am Tag 170 am besten abbilden, sind in Tabelle 3 dargestellt. Das beste Ergebnis erzielt ein Modell mit zwei Variablen (Modell EA). Modelle mit drei Variablen waren alle nicht signifikant. Zur Beschreibung der Modellgüte wurde mit der linearen Regressionsanalyse das R^2 ermittelt und der Cp-Wert nach Mallow berechnet. Zur Validierung mit unabhängigen Daten wurde Allen's PRESS-Wert („Predictive error sum of squares“) verwendet. Bei einem niedrigen PRESS-Wert ist die beste Übereinstimmung der Daten mit dem Modell gegeben.

Tabelle 2: Korrelationen von Befallsstärke und Witterungsparametern mit der Bezeichnung der entwickelten Modell (COAKLEY et al., 1985).

unabhängige Witterungsvariable	Witterungsintervall	Korrelationskoeffizient	P	Modell
Anzahl aufeinander folgender Tage mit Temperaturen $\leq 7^\circ\text{C}$	05. März bis 03. Mai	-0,70	0,05	A
	04. April bis 03. Mai	-0,71	0,01	
negative Gradtage	02. März bis 30. April	-0,65	0,05	
Mittlere tägliche Minimaltemperatur	02. März bis 30. April	0,64	0,05	
Anzahl aufeinander folgender Tage ohne Niederschlag	24. März bis 13. Mai	-0,75	0,01	D
	26. März bis 04. Mai	-0,82	0,001	E
	05. April bis 04. Mai	-0,75	0,01	C
Häufigkeit von Niederschlägen	29. März bis 07. Mai	0,67	0,05	B
	10. April bis 30. April	0,70	0,05	

Tabelle 3: Ergebnisse der statistischen Validierung der Einzelmodelle sowie ausgewählter Kombinationen.

Modell	R^2	Cp	PRESS
A	0,51	17,5	2,372
B	0,48	19,15	2,464
C	0,6	13,1	2,035
D	0,61	12,65	1,848
E	0,7	7,95	1,559
BA	0,83	2,97	958
CA	0,86	1,46	779
DA	0,86	1,36	795
EA	0,86	1,35	793

Für das Modell EA werden zwei Variablen benötigt, die für einen relativ kurzen Zeitraum erfasst werden müssen. Zunächst geht die Häufigkeit von aufeinander folgenden Tagen ohne Niederschlag im Zeitraum vom 26. März bis 4. Mai (X_7) ins Modell mit ein. Von SHANER & FINNEY (1976) wurde die Anzahl an Tagen mit Niederschlag vom 1. April bis 14. Juni verwendet, was im Ergebnis mit

COAKLEY et al. (1985) vergleichbar ist. Die zweite unabhängige Variable im Modell ist die Häufigkeit von aufeinander folgenden Tagen mit einem Temperaturminimum von $\leq 7^{\circ}\text{C}$ im Zeitraum vom 4. April bis zum 3. Mai (X_2). Die Befallsstärke (y) ist die abhängige Variable und wird für den 19. Juni mit der Gleichung

$$y = 147,480 - 3,025X_1 - 2,093X_2$$

berechnet.

Bei der Modellentwicklung lagen die Werte für X_1 in einem Bereich von 8 bis 19 Tagen und für X_2 in einem Bereich von 12 bis 24 Tagen. Das Modell ist darauf ausgerichtet, am 5. Mai jeden Jahres (Schossphase des Weizens) die Befallsstärke für 22 Tage nach dem Ährenschieben zu simulieren.

2.6.3 Modell von O' CALLAGHAN et al. (1994)

O' CALLAGHAN et al. (1994) haben die Anzahl von Pyknidien als unabhängige Variable zur Prognose des Befalls auf den oberen vier Blättern verwendet. Die Datengrundlage zur Modellentwicklung stammt aus einem Versuchsjahr, in dem an zwei verschiedenen Sorten Pyknidien an voll entwickelten Blättern jeder Blattetage gezählt wurden.

Eine relative Wachstumsrate für *S. tritici* wurde aus der Steigung der Graden für den Logarithmus der Pyknidienanzahl im Verhältnis zu den Gradtagen seit dem Start einer Infektion ermittelt. Der Achsenabschnitt des Logarithmus der Pyknidienanzahl wurde als Ausgangswert für die Pyknidien auf einem Blatt verwendet (siehe Tabelle 4). Für das Modell wurden die Vorgaben gemacht, dass mindestens 1 mm Niederschlag zum Auslösen einer Neuinfektion notwendig ist. Die Inkubationszeit wurde unabhängig von der Blattetage mit 400 Gradtagen angesetzt. Für eine Pyknidienpopulation auf einem Blatt wird ein exponentielles Wachstum der Form

$$N_t = N_0 * e^{rt}$$

mit N_t = Anzahl der Pyknidien zum Zeitpunkt t (in Gradtagen), N_0 = Initialbefall und r = relative Wachstumsrate angenommen.

Tabelle 4: Relative Wachstumsrate (r) und Startwert für die Infektion (N_0) für *S. tritici* an den vier oberen Blättern für die Sorte Riband.

Blattetage	relative Wachstumsrate einer Pyknidien- Population (log Pyknidien/ $^{\circ}\text{C}$ -Tage)	Startwert für die Pyknidien auf einem Blatt (log Pyknidienanzahl)
Fahnenblatt	0,00507	0,25
F-1	0,00530	0,29
F-2	0,00486	0,43
F-3	0,00442	0,80

Im folgenden Schritt wurden Datensätze zur Befallsstärke aus Freilandversuchen mit dem Befallswert N_t korreliert und für jede Blatttage eine Regressionsgleichung abgeleitet (siehe Tabelle 5). Die Daten stammten aus demselben Anbaujahr von einem anderen Standort. Von einer Validierung dieses Ansatzes mit Daten aus weiteren Jahren wird in der Publikation nicht berichtet.

Tabelle 5: Abgeleitete Regressionsgleichungen für die Korrelation der im Freiland erhobenen Befallsstärken (Y_t) zu den simulierten Befallswerten (N_t).

Fahnenblatt	$Y_{t1} = 13,28N_{t1} + 0,20$
Blatttage F-1	$Y_{t2} = 8,51N_{t2} + 5,31$
Blatttage F-2	$Y_{t3} = 10,66N_{t3} - 1,09$
Blatttage F-3	$Y_{t4} = 17,01N_{t4} - 5,71$

2.6.4 Modell von GLADDERS et al. (2001)

Das Ziel der Arbeit von GLADDERS et al. (2001) war die Untersuchung der Faktoren, die Einfluss auf die Befallsstärke der oberen zwei Blatttagen zum Stadium der frühen bis späten Milchreife (BBCH 73-75) haben. Zur Modellierung meteorologischer und regionaler Effekte wurde eine logistische Regression mit den Datensätzen gerechnet, die eine Befallsstärke von über 5% hatten. Dazu wurden Erhebungsdaten aus den Jahren 1985 bis 1996 von 3513 zufällig ausgewählten Weizenbeständen aus 18 Regionen in England und Wales ausgewertet. Zur Stabilisierung der Varianz wurden die Daten logarithmisch transformiert. Betrachtet wurden die Unterschiede in der Sortenanfälligkeit, dem Aussattermin und der Fungizidbehandlung. Weiterhin wurde eine schrittweise Regression mit den log-transformierten Befallsstärkedaten ($y = \log_{10}(x + 1)$) als unabhängige Variable zur der Anzahl der Tage mit Nachttemperaturen $\leq -2^\circ\text{C}$ für die Monate von Oktober bis März als abhängige Variable durchgeführt. Dabei erwies sich der November als einflussreichster Monat. Für den Niederschlag wurden die Monate Mai und Juni in der Analyse betrachtet. Gezählt wurden die Tage, an denen an einem Tag mindestens 10 mm Niederschlag gemessen wurde oder an drei aufeinander folgenden Tagen mindestens 1 mm. Die Ergebnisse sind in der Tabelle 6 zusammengefasst. Die Sortenanfälligkeit zeigte keine Korrelation zur Befallsstärke. In den anderen Fällen ergab sich ein enger Zusammenhang zwischen den modellierten und erhobenen Daten. Eine Validierung des Modells an unabhängigen Daten ist nicht beschrieben.

Tabelle 6: Ergebnis der logistischen Regression der signifikanten fixen und zufälligen Effekte.

Fixe Effekte	Standardisierter Koeffizient	Standardfehler	Koeffizient	P
Aussaattermin (1. Sep. = Tag 1)	-0,0281	0,0055	-0,42	< 0,001
Anzahl an Novembertagen mit Temperaturen $\leq -2^{\circ}\text{C}$	-0,237	0,072	-0,584	< 0,01
Niederschläge im Mai*	0,279	0,069	0,47	< 0,001
Niederschläge im Juni*	0,167	0,044	0,45	< 0,001
Fungizidbehandlungen	-2,67	0,422	-0,417	< 0,001

* 1 Tag mit > 10 mm Niederschlag oder 3 aufeinanderfolgende Tage mit > 1 mm Niederschlag

Zufällige Effekte	Komponente	Standardfehler	P
Region	0,454	0,208	< 0,001
Jahr	0,354	0,233	< 0,01
Region x Jahr	0,332	0,135	< 0,05

2.6.5 Modell von PIETRAVALLE et al. (2003)

PIETRAVALLE et al. (2003) entwickelten ein zweistufiges Modell. Im ersten Teil des Modells wird das Auftreten einer Epidemie bis zum BBCH 75 prognostiziert (qualitatives Modell, Schwellenwert 5% Befallsstärke auf den oberen drei Blättetagen). Der zweite Teil ist ein quantitatives Modell zur Prognose der Befallsstärke auf den oberen drei Blättetagen. Die Datengrundlage sind Erhebungen in den Jahren von 1994 bis 1998 an neun Standorten in England. Untersucht wurden 34 verschiedene Witterungsvariablen, die z. T. zusätzlich in mehrere Stufen unterteilt waren. Für die Auswertung wurde immer die Dauer seit Beginn der zu untersuchenden Witterungsvariablen bis zum Erreichen von BBCH 75 (time lag) und die Dauer bis zum Ende der zu untersuchenden Witterung kalkuliert (window length).

Die besten Ergebnisse für die Prognose einer Epidemie bis BBCH 75 erzielten die Variablen Wintertemperatur im Januar und Februar sowie die Windgeschwindigkeit. Das beste Modell zur Prognose der Befallsstärke zu BBCH 75 (S_{BBCH75}) beruht auf der Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge > 9 mm. Die Gleichung des Modells lautet:

$$S_{BBCH75} = 13,8(1,5)Rain_{Nod;9}[90;37] + 6,1(2,8) \quad R^2 = 0,86$$

Die Angaben in den runden Klammern sind die Standardfehler der Schätzungen und in eckigen Klammern die optimalen Werte für „time lag“ und „window length“, in diesem Fall die Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge > 9 mm im Zeitraum von 37 Tagen beginnend 90 Tage vor dem Erreichen des BBCH-Stadiums 75.

Die Anzahl an Tagen mit einer Niederschlagsmenge von > 9 mm ($Rain_{Nod;9}$) zeigte die höchste Korrelation zu den Boniturergebnissen. In der Tabelle 7 sind die elf Variablen mit den höchsten Korrelationen aufgelistet. Neben der Anzahl an Tagen > 9 mm ergab auch die Variable Anzahl an Tagen mit Niederschlägen > 0,1 mm eine hohe Korrelation zu den Ergebnissen. Das Modell wurde nicht mit externen Daten validiert. Jedoch ist aufgrund dieser Untersuchungen der Niederschlag die entscheidende Variable für eine Epidemie.

Tabelle 7: Variablen mit der höchsten Korrelation zur Befallsstärke.

	Time lag	Window length	Korrelation	P
Durchschnittlicher Niederschlag	89	35	0,85	< 0,001
Durchschnittliche mittlere Temperatur	67	47	0,74	0,001
Durchschnittliche Blattnässe	90	45	0,83	< 0,001
Anzahl von aufeinander folgenden Tagen mit Niederschlag > 0 mm	62	15	0,77	0,001
Anzahl von Tagen mit Niederschlag >1mm	87	42	0,88	< 0,001
Anzahl von aufeinander folgenden Tagen mit Niederschlag > 1 mm	95	50	0,88	< 0,001
Anzahl von aufeinander folgenden Tagen mit Temperaturen > 7°C	145	70	0,72	0,003
Anzahl von aufeinander folgenden Tagen mit Blattnässe > 80%	99	54	0,78	0,001
Anzahl von aufeinander folgenden Tagen mit Blattnässe < 20%	162	13	0,74	0,002
Anzahl von Tagen mit Niederschlag > 9 mm	90	37	0,93	< 0,001
Anzahl von Tagen mit Niederschlag > 0,1 mm	65	63	0,80	< 0,001

2.6.6 Modell von AUDSLEY et al. (2005)

Dieses Modell beschreibt für die oberen sechs Blattetagen von Weizen den Verlust an grüner Blattfläche bei einem Befall mit den Erreger *Septoria tritici*, *Puccinia striiformis*, *Erysiphe graminis* und *Puccinia triticina*. Hier wird das Modell für *S. tritici* näher betrachtet, das zusätzlich mit einem Pflanzenwachstums-Modell kombiniert werden kann. In dem Modell werden die Parameter Witterung (Temperatur, Niederschlag und Luftfeuchte), Sortenanfälligkeit und Inokulum bei der Befallsentwicklung berücksichtigt. Für Sortenresistenzen werden Werte zwischen 0 und 9 verwendet, wobei 9 einer resistenten Sorte entspricht. Das Modell kann während der Saison mit Daten aus Feldbeobachtungen angepasst werden, wobei zum einen die Befallsstärke korrigiert werden kann und zum anderen einzelne Parameter modifiziert werden können. Die Sporen von *S. tritici* breiten sich ab 0,1 mm Niederschlag aus. Bis zu einer Niederschlagsmenge von 1 mm erhöht sich die Infektionseffizienz auf einen maximalen Wert von acht. Die Latenzzeit wird in Anhängigkeit von der Temperatursumme betrachtet (zwischen 300°C und 375°C) und das Wachstum der Läsionen mit einer logistischen Funktion beschrieben. Des Weiteren kann eine Fungizidwirkung abgebildet werden. Die Daten zur Ermittlung der Formeln wurden der Literatur entnommen und anschließend das Modell mit den Daten einer Saison validiert. Dabei standen Erhebungen von acht verschiedenen Standorten zur Verfügung, jeweils mit Daten von ein bis drei Sorten, und ohne eine Fungizidvariante.

2.6.7 Modell von TE BEEST et al. (2009)

In dieser Arbeit wurde ein Frühwarnmodell entwickelt, dass zu BBCH 31 voraussagt, ob sich eine schädigende Epidemie (d. h. ein Befallsstärke von > 5% auf den oberen drei Blattetagen) entwickelt. Dazu wurden die Witterungsdaten aus zwölf Regionen ausgewertet, die für einen

Zeitraum von acht Jahren erfasst wurden. Bei der Modellentwicklung wurde zwischen drei Sortenklassen in Abhängigkeit der Einstufung der Anfälligkeit des National Institute of Agricultural Botany (NIAB) unterschieden. Das beste Gesamtmodell für alle Sortenklassen in Bezug auf die Befallsstärke zu BBCH 75 wurde mit den Parametern Niederschlag und Minimum-Temperatur erreicht. Dazu wurde der Niederschlag > 3 mm in einer Periode von 80 Tagen vor dem Erreichen des BBCH-Stadiums 31 akkumuliert und die Minimum-Temperaturen (Basistemperatur 0°C) in einer 50 Tage Periode mit dem Start 120 Tage vor dem Erreichen des BBCH-Stadiums 31 (Januar/Februar). Zudem wurde für die resistenten Sorten und mittel anfälligen Sorten ein Modell entwickelt (für die stark anfälligen Sorten lagen zu wenige Daten vor) mit dem Ergebnis, dass die Variablen für das Modell der Sorten mittlerer Anfälligkeit mit denen des Gesamtmodells übereinstimmten. Für die gering anfälligen Sorten wurde das beste Modell für eine Periode von 110 Tagen mit Niederschlag > 6 mm ermittelt. Da sich das Gesamtergebnis jedoch nicht verbesserte, wurde ein Modell für alle Sortenklassen verwendet.

Das Modell wurde mit unabhängigen Daten validiert. In 61% der Fälle bei einer erhobenen Befallsstärke von $> 5\%$ wurde dieses Ereignis korrekt vorhergesagt. Ein Befall unterhalb der Grenze von 5% wurde in 73% der Fälle korrekt angegeben. In Abhängigkeit von der Sortenanfälligkeit wurden bei 85% der resistenten Sorten und bei 50% der anfälligen Sorten die Fälle unterhalb der 5% Grenze korrekt vorhergesagt.

3. MATERIAL UND METHODEN

Zur Charakterisierung der Septoria-Anfälligkeit verschiedener Weizensorten wurden grundlegende Kenntnisse zu Sortenunterschieden für die spätere Modellierung in Laborversuchen am Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR) in Bad Kreuznach experimentell gewonnen. Zur Anpassung und Validierung des entwickelten Modells wurde die Befallsstärke von *S. tritici* an natürlich infizierten Pflanzen an mehreren Standorten in Deutschland erhoben.

3.1 Begriffsdefinitionen

Läsionen

Läsionen sind „deutlich ausgeprägte, lokal begrenzte chlorotische oder nekrotische Flecken“ (AUST et al., 1991). In dieser Arbeit werden mit dem Begriff Läsion Blattveränderungen bezeichnet, die von einer pilzlichen Infektion hervorgerufen wurden.

Nekrosen

Als Nekrose wird ein „lokaler Zell- oder Gewebetod als Folge der Abtötung des Protoplasmas durch toxische oder physikalische Einwirkung oder als Reaktion der Pflanze auf parasitische Einflüsse bezeichnet“ (AUST et al., 1991).

Pilzwachstum

Der Parameter Pilzwachstum umfasst das latente Wachstum ab der Inokulation und das sichtbare Wachstum der Läsionen. Für das Wachstum des Pilzes während der Inkubationszeit liegen keine Boniturdaten vor, da das Hyphenwachstum nicht experimentell dokumentiert werden konnte. Da zur Modellierung der Rate des Pilzwachstums nicht nur das Wachstum der sichtbaren Läsionen berücksichtigt werden sollte, wurde das Wachstum für den gesamten Zeitraum betrachtet.

Inkubationszeit

Die Inkubationszeit beschreibt die Dauer von der Landung der Sporen auf einem Blatt bis zum Auftreten der ersten Symptome. Als Ende der Inkubationszeit wurde der Zeitpunkt definiert, an dem die ersten hellbraunen Färbungen aufgrund des Beginns des Läsionswachstums auf den Blättern sichtbar waren.

Latenzzeit

Die Latenzzeit beginnt mit der Sporenlandung und ist beendet, wenn die ersten Pyknidien mit infektiösen Sporen auf den Blättern zu erkennen sind (SHEARER & ZADOKS, 1972). Mit dem Erscheinen der Pyknidien wurde bei hoher Luftfeuchtigkeit das Austreten von Sporen aus der Ostiole beobachtet (Ergebnis bei 10-facher Vergrößerung). Die maximale Differenz zwischen Inkubations- und Latenzzeit betrug in den Laborversuchen fünf Tage.

Dauer der Pyknidienformation

Die Dauer der Pyknidienformation wurde für diese Arbeit als Dauer vom Erscheinen der ersten Pyknidien (entspricht dem Ende der Latenzzeit) bis zum Erreichen der maximalen Anzahl an Pyknidien auf einem Blatt definiert. Das Ende dieser Periode wurde zur Charakterisierung des Endes des Pilzwachstums verwendet.

Erstaufreten

Das Erstaufreten von *S. tritici* auf einer Blatttage wurde als Zeitpunkt definiert, zu dem auf den ersten Blättern die ersten Pyknidien in Läsionen erschienen. Besonders bei Freilandhebungen können die ersten Läsionen nur in Verbindung mit Pyknidien eindeutig *S. tritici* zugeordnet werden. Deshalb ist der Termin des Erstaufretens von *S. tritici* das Erscheinen der ersten Pyknidien. Bei niedrigen Temperaturen wurden die ersten Pyknidien gleichzeitig mit den ersten Läsionen beobachtet.

3.2 Laborversuche

In Laborversuchen wurden bei verschiedenen Temperaturstufen das sortenabhängige Wachstum von Läsionen sowie die Inkubations- und Latenzzeit und die Dauer der Pyknidienformation untersucht. (Klimaschränke: RUMED, Typ 1201 und 1301 sowie Flohr Instruments, Typ MKKL1200). Die Daten wurden mit einer modifizierten Einzelblattmethode erhoben, die bei ARRAIANO et al. (2001) beschrieben ist.

Für die Untersuchungen wurden die Blätter von im Gewächshaus angezogenen Weizenpflanzen genutzt. Dazu wurden die Sorten Solitär (Züchter: Schweiger Weizen GbR, Septoria-BSA-Note 2) und Drifter (Züchter: Liamgrain GmbH, Septoria-BSA-Note 7) in 30 x 55 cm großen Anzuchtplatten aus Kunststoff ausgesät, die in 40 Kleincontainern von 3 x 3 cm aufgeteilt waren. In jedem Kleincontainer wurde eine Pflanze ausgesät. Bis zum Erreichen des 2- bis 3-Blattstadiums standen die Platten bei Temperaturen zwischen 15°C und 20°C unter Wachstums Lampen bei regelmäßiger Bewässerung im Gewächshaus. Als Substrat wurde „Frühstorfer Erde Typ T“ (Topferde) gewählt. Mit dem Erreichen des 2- bis 3-Blattstadiums wurden die Pflanzen mit einer Sporensuspension im Labor inokuliert. Die Sporen stammten aus Pyknidien von Septoria-Läsionen unbehandelter Pflanzen im Freiland. Zur Herstellung der Sporensuspension wurden die Blätter zuerst unter fließendem Wasser gereinigt und danach zur Anregung des Austretens von Schleimranken für 12 Stunden in eine feuchte Kammer gelegt. Die Blattstücke wurden in einen Erlenmeyerkolben mit destilliertem Wasser gegeben und für 15 Minuten auf einem Schüttler bewegt, um die Sporenranken von den Pyknidien zu lösen. Nach dem Abgießen der Sporensuspension wurde die Sporendichte mittels Zählkammer (Thomakammer) bestimmt und die Dichte nach Literaturangaben auf einen optimalen Wert von $3 \cdot 10^6$ Sporen/ml eingestellt (ARRAIANO et al., 2001; GIECO et al., 2004; KEMA et al., 1996d). Zur Verbesserung der Blattbenetzung wurden zwei Tropfen Tween 20 hinzugegeben (SIMÓN et al., 2004; VILJANEN-ROLLINSON et al., 2005). Die Sporendichte wurde bei der Inokulation nicht variiert.

Vor der Inokulation wurde die Sporenvitalität mittels einer fluoreszierenden Anfärbung mit Fluorescein diacetate (FDA) und Propidiumiodid-Farbstoff überprüft. Bei vitalen Zellen wurde das FDA zu Fluorescein umgesetzt. Diese Zellen erschienen unter UV-Licht grün. Bei toten Zellen wurde der Zellkern durch Propidiumiodid angefärbt, wodurch die Zellen rot fluoreszierten.

Bei positivem Test der Sporenvitalität wurde die Sporensuspension mit einer handelsüblichen Sprühflasche auf die Blätter der Jungpflanzen gleichmäßig verteilt. Nach kurzem Antrocknen der Sporensuspension auf den Blättern wurden die zweiten und dritten Blätter der Jungpflanzen abgeschnitten und unter der Sterilbank (Tecnoflow ZF 120-II GS) in vorbereitete Petrischalen gelegt.

Der Wasseragar in den Petrischalen (mit Belüftungsnocken, Durchmesser 140 mm, Höhe 20 mm, Firma Roth) wurde mit 10 g Agarpulver (Agar-Agar, Kobe I, Firma Roth) pro einem Liter destillierten Wasser in Laborglasflaschen angesetzt. Nach dem Autoklavieren (Sanyo Autoclave MLS-3020) bei 121°C für 45 Minuten wurde bei einer Temperatur von 55°C 100 mg Benzimidazol zugegeben, das die natürliche Seneszenz der Blätter hemmte. In jede Petrischale wurden 75 ml Agar gegossen. Versuche zur Benzimidazolkonzentration in Wasseragar von ARRAIANO et al. (2001) ergaben bei 100 mg/l Benzimidazol die beste Korrelation mit Ergebnissen zu Inokulationsversuchen an Ganzpflanzen.

In die Petrischalen wurden fünf bis sechs mit *S. tritici* infizierte Blattstücke gelegt. Dazu wurde unter der Sterilbank ein 3 x 6 cm großes Agarstück aus der Mitte ausgeschnitten und längs halbiert. Die Blätter wurden über das Loch gelegt, sodass die Enden auf dem Agar auflagen. Abschließend wurden die Agarstreifen über die Blattenden gelegt und die Petrischale mit Parafilm verschlossen (Abbildung 7). Die Infektionsbedingungen waren für jede untersuchte Temperaturstufe identisch. Nachdem die geschlossenen Platten 48 Stunden bei 20°C ohne Licht standen (Steigerung der Infektionswahrscheinlichkeit), wurde die Beleuchtung auf einen 12 Stunden-Rhythmus eingestellt. 72 Stunden nach der Inokulation wurde der Parafilmstreifen von den Petrischalen entfernt und jeweils verschiedene Temperaturen zur Untersuchung der Dauer der Latenzzeit eingestellt (ARRAIANO et al., 2001). Die Luftfeuchte in den Klimaschränken betrug im Untersuchungszeitraum zwischen 70 und 80%.

Die Untersuchungen wurden bei Temperaturen von 5°C bis 25°C in Fünfgradschritten durchgeführt. In einem Zeitraum von zwei Jahren wurden drei Wiederholungen für jede Sorte und Temperaturstufe durchgeführt, bei denen im Durchschnitt 50 Blätter pro Sorte getestet wurden. Die prozentuale Blattfläche mit Läsionen wurde im Zweitages-Rhythmus bonitiert, sowie die Anzahl der Pyknidien unter einem Binokular gezählt. Die Bonituren waren in Abhängigkeit von der Temperatur nach drei bis sechs Wochen beendet. Für die Auswertung des Pilzwachstums konnten nur die Temperaturstufen von 10°C, 15°C, 20°C und 25°C verwendet werden, da bei der 5°C-Variante keine Befallswerte erhoben wurden.

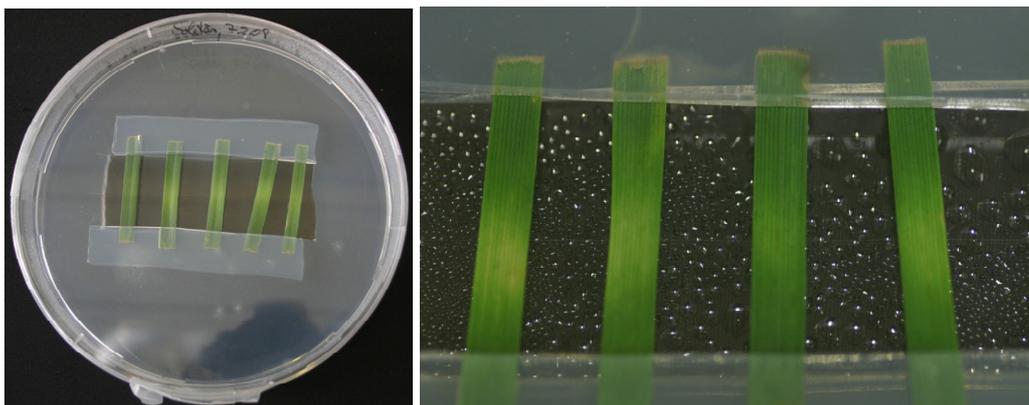


Abbildung 7: Einzelblattmethode (verändert nach ARRAIANO et al. (2001)) zur Untersuchung des Wachstums der Läsionen sowie der Dauer der Inkubationszeit, der Latenzzeit und der Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* für verschieden anfällige Sorten in Abhängigkeit von der Temperatur.

3.2.1 Pilzwachstum

Die Datenerhebungen für die Untersuchung des Pilzwachstums wurden mit der Einzelblattmethode durchgeführt. *S. tritici* entwickelte sich zunächst ohne sichtbare Symptome in den Wirtszellen. In der zweiten Phase wurden die Läsionen auf den Blättern sichtbar (KEMA et al., 1996d).

Für jeden Boniturtermin wurde die mittlere Befallsstärke der Blätter gebildet. Die Bonituren wurden durchgeführt, bis 50% der Blätter vollständig nekrotisiert waren. Diese Methode erfolgte in Anlehnung an die in Freilandhebungen.

Zur Modellierung der Befallsentwicklung wurden die logistische Funktion (Gleichung [1]) sowie die Gompertz-Funktion (Gleichung [2]) verwendet (CAMPBELL & MADDEN, 1990), wobei der maximale Wert auf 1, d.h. 100%, gesetzt wurde.

Logistische Funktion:

$$y(t) = 1 / [1 + \exp(-\{\ln[y_0 / (1 - y_0)] + r_L * t\})] \quad [1]$$

wobei:

$y(t)$	= Befallsstärke am Tag t
y_0	= berechnete Befallsstärke am Tag $t = 0$
r_L	= Wachstumsrate der logistischen Funktion
t	= Zeit (Tage nach der Inokulation)

Gompertz-Funktion:

$$y(t) = \exp[\ln(y_0) \exp(-r_G * t)] \quad [2]$$

wobei:

$y(t)$	= Befallsstärke am Tag t
y_0	= berechnete Befallsstärke am Tag $t = 0$
r_G	= Wachstumsrate der Gompertz-Funktion
t	= Zeit (Tage nach der Inokulation)

3.2.2 Inkubations- und Latenzzeit und Dauer der Pyknidienformation

Auf Basis der Laborversuche mit der Einzelblattmethode konnten die Inkubations- und die Latenzzeit in Abhängigkeit von der Temperatur ermittelt werden. Die Daten der Inkubations- und Latenzzeit wurden mit der Beta-Funktion modelliert. Die allgemeine Beta-Funktion wurde dazu modifiziert (HAU, 1988). Die erhobenen Daten jeder Temperaturstufe wurden im ersten Schritt in eine relative Rate umgerechnet (Gleichung [3]). Die Rate der Inkubationszeit wird mit r_{IZ} und die Rate der Latenzzeit mit r_{LZ} in den Ergebnisdarstellungen bezeichnet.

Das Myzel von *S. tritici* wächst nach der Etablierung in den Mesophyllzellen, bis diese absterben und die Zellen kollabieren. Das Kollabieren der Zellen beginnt unter optimalen Bedingungen zwölf Tage nach der Inokulation (KEMA et al., 1996d). Das bedeutet, dass sich die Läsionen nicht weiter vergrößern. Mit dem Ende der Pyknidienformation ist das Pilzwachstum abgeschlossen.

Die Berechnung der Dauer der Pyknidienformation beginnt mit dem Ende der Latenzzeit, wenn die ersten Pyknidien sichtbar sind. Als Ende der Pyknidienformation wurde der Zeitpunkt gewählt, an dem die maximale Anzahl an Pyknidien erreicht wurde. Dazu wurde an jedem Termin die Anzahl der Pyknidien auf den Blättern erhoben. Zur Modellierung der Daten für die Rate der Dauer der Pyknidienformation (r_{PF}) wurden die Gleichungen [3] und [4] verwendet.

$$r(T) = 1/d(T) \quad [3]$$

wobei:

$r(T)$	= Rate (Inkubationszeit, Latenzzeit, Dauer der Pyknidienformation) in Abhängigkeit von der Temperatur T
$d(T)$	= Dauer (in Tagen) von Inkubationszeit, Latenzzeit und Pyknidienformation in Abhängigkeit von der Temperatur T

Mit den Raten für die Dauer der Inkubations- bzw. Latenzzeit sowie der Dauer der Pyknidienformation wurden die Beta-Funktionen (Gleichung [4]) berechnet:

$$r(T) = Y_{opt} [(T - T_{min}) / (T_{opt} - T_{min})]^{n(T_{opt} - T_{min}) / (T_{max} - T_{opt})} * [(T_{max} - T) / (T_{max} - T_{opt})]^n \quad [4]$$

wobei:

$r(T)$	= Rate (Inkubationszeit, Latenzzeit, Dauer der Pyknidienformation) in Abhängigkeit von der Temperatur T
Y_{opt}	= Rate bei optimaler Temperatur
T	= Temperatur
T_{min}	= minimale Temperatur
T_{max}	= maximale Temperatur
T_{opt}	= optimale Temperatur
n	= Formparameter

Bei der Modellierung der Daten wurde die Beta-Funktion mit festen Parameterwerten für T_{min} und T_{max} verwendet. Die exakte untere und obere Temperaturgrenze kann nur mit erhöhtem Aufwand untersucht werden. Für die Anpassung der Daten wurden nach Literaturangaben die Temperaturen von 2°C und 30°C festgelegt (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999; MAGBOUL et al., 1992; SHANER, 1981; SHANER & FINNEY, 1976; WEBER, 1922).

Zur Konstruktion eines Sortenfaktors, der in Abhängigkeit eines Parameters unterschieden wird, wurde anhand der geschätzten Parameterwerte und Standardfehler für T_{opt} und n überprüft, ob für diese Parameter die Mittelwerte bei der Anpassung eingesetzt werden können. Dazu wurde die folgende Gleichung [5] verwendet (CAMPBELL & MADDEN, 1990).

$$(\Theta_1 - \Theta_2) \pm t[P/2; n_1 + n_2 - (2p)] * s[d] \quad [5]$$

wobei:

Θ_1	= Wert für Parameter 1 (entspricht T_{opt} oder n der Sorte Solitär)
Θ_2	= Wert für Parameter 2 (entspricht T_{opt} oder n der Sorte Drifter)
P	= Signifikanzniveau (hier: $P/2 = 0,025$)
n_1	= Anzahl der Beobachtungen für Parameter 1
n_2	= Anzahl der Beobachtungen für Parameter 2
p	= Anzahl der Parameter im Modell
$s[d]$	= kalkulierter Standardfehler = $\sqrt{s^2[\Theta_1] + s^2[\Theta_2]}$

Wenn das berechnete Konfidenzintervall (Gleichung [5]) nicht den Wert null enthielt, wurde die Nullhypothese, dass die beiden Parameterwerte identisch sind, zurückgewiesen. Diese Überprüfung wurde für die Rate des Pilzwachstums sowie der Dauer von Inkubationszeit, Latenzzeit und der Pyknidienformation durchgeführt. Enthielt das berechnete Konfidenzintervall für

die Parameter T_{opt} und n der Sorten Solitär und Drifter den Wert null, so wurde eine neue Anpassung mit den Mittelwerten berechnet.

3.3 Pykniendichte

Im Jahr 2009 wurden an Weizenpflanzen der Standorte der Freilandhebungen Nieder-Hilbersheim und Mörschbach Daten zur Pykniendichte verschieden anfälliger Sorten erhoben (siehe Tabelle 8). Die detaillierte Beschreibung der Freilandversuche erfolgt in Kapitel 3.5. Da die Ergebnisse für den Parameter der Pykniendichte ebenfalls zur Modellerstellung verwendet wurden, erfolgt die Beschreibung der Methode in diesem Kapitel.

S. tritici hatte sich unter natürlichen Bedingungen an Weizenpflanzen im Freiland etabliert und entwickelt. An mehreren Terminen wurden Pflanzen mit Wurzeln aus den unbehandelten Parzellen entnommen. Da der Probenumfang nicht an einem Tag bearbeitet werden konnte, wurden die Pflanzen für einige Tage in einer Kühlkammer bei 5°C gelagert. Zur Datenerhebung im Labor wurden ein Binokular (Wild Heerbrugg M650, 10- bis 40-fache Vergrößerung) und ein Mikroskop (Zeiss Axiolap, 100- bis 400-fache Vergrößerung) verwendet. Die Läsionsgröße und die Anzahl der Pyknidien wurden insgesamt für die Blätter von F-5 bis zum Fahnenblatt ermittelt. Am Standort Nieder-Hilbersheim konnten aufgrund einer späten Epidemieentwicklung nur Mitte Juni natürlich infizierte Pflanzen entnommen werden. Für den Standort Mörschbach wurden die Proben von drei Terminen ausgewertet. Die Pykniendichte beschreibt die Anzahl an Pyknidien pro cm² Läsionsfläche.

Tabelle 8: Sorten, deren Pflanzen zur Datenerhebung für den Parameter Pykniendichte an den Standorten der Freilandhebungen Mörschbach und Nieder-Hilbersheim verwendet wurden, sowie das Datum und das BBCH-Stadium zur Probennahme.

Standort Mörschbach		
Datum	BBCH-Stadium	Sorten
24.05.2009	43	Solitär-2, Skagen-3, Cubus-6, Drifter-7
02.06.2009	55	Solitär-2, Cubus-6, Biscay-7, Drifter-7
14.06.2009	65	Solitär-2, Skagen-3, Cubus-6, Biscay-7, Drifter-7
Standort Nieder- Hilbersheim		
12.06.2009	71	Solitär-2, Skagen-3, Cubus-6, Biscay-7, Drifter-7

Aus zeitlichen Gründen war die Anzahl der untersuchten Sorten eines Standortes begrenzt. Für die gering anfällige Sorte Solitär sowie die stark anfälligen Sorten Drifter und Cubus wurden an jedem Termin Daten erhoben. Die Sorten Solitär und Drifter wurden auch in den Laborversuchen verwendet. Ergebnisse der Sorten Skagen und Biscay lagen für jeweils drei Termine vor.

Für die Daten der Pyknidiendichte wurden die Größe von einzelnen Septoria-Läsionen und die Anzahl der Pyknidien für verschiedene Sorten und Blattetagen ermittelt. Die Läsionen wurden auf Folie abgezeichnet und am PC vermessen (Dokumentenscanner Océ VarioPrint 2050, Software Datinf Measure, Version 2.1). Dabei wurden nur die Läsionen berücksichtigt, die nicht zusammengefloßen waren und sich deutlich zum gesunden Blattgewebe abgrenzten. Die Anzahl der Pyknidien in den betrachteten Läsionen wurde mit Hilfe eines Binokulars bei 10-facher Vergrößerung ermittelt.

Im Modell SEPTRI2 wurde die relative Pyknidiendichte verwendet. Dazu wurden die Werte der Pyknidiendichte in Abhängigkeit der Sortenanfälligkeit und der Blattetage zur maximalen Pyknidiendichte in Relation betrachtet. Mit einer linearen Regression wurden die relativen Werte angepasst.

$$y_{Py}(Fx; SK) = a(SK) - b(SK) * F(x) \quad [6]$$

wobei:

$y_{Py}(Fx; SK)$	= relative Pyknidiendichte in Abhängigkeit Blattetage Fx und der Sortenklasse SK
$a(SK)$	= relative Pyknidiendichte auf dem Fahnenblatt für die Sortenklasse SK
$b(SK)$	= Steigung der Geraden für die Sortenklasse SK
$F(x)$	= Faktor der Blattetage

3.4 Anzahl der Läsionen, Pyknidiengröße und Pyknosporenlänge

Bei der Ermittlung von Parametern zur Differenzierung der Sortenanfälligkeit wurden auch die Anzahl der Läsionen, die Pyknidiengröße und die Sporenlänge untersucht. Bei der Modellentwicklung wurden sie jedoch nicht verwendet, da keine Sortendifferenzierung in Abhängigkeit der Anfälligkeit bestand (Pyknidiengröße und Pyknosporenlänge) und die Anzahl der Läsionen für die Struktur des Modells nicht relevant waren. Zur Vollständigkeit werden diese Untersuchungen in der Arbeit dargestellt.

Anzahl der Läsionen

Im Rahmen der Erfassung der Daten für die Pyknidiendichte wurde auch die Anzahl der Läsionen auf den Fahnenblättern und den Blattetagen F-1 und F-2 für 50 Pflanzen pro Termin und Sorte erhoben.

Pyknidiengröße

In der Literatur gibt es Hinweise, dass die Pyknidiengröße auf resistenten Sorten geringer ist als auf anfälligen Sorten (GOUGH, 1978; HESS & SHANER, 1987). Zur Überprüfung dieser Angaben wurde die Größe der Pyknidien an verschiedenen anfälligen Sorten erhoben und untersucht, ob die Pyknidien in Abhängigkeit von den Sorten variierten. Die Daten für diesen Befallsparameter wurden am 17.6.2008 und 4.7.2008 sowie am 16.3.2009 erhoben. Pyknidien auf den Blättern aus den

unbehandelten Parzellen in Nieder-Hilbersheim wurden im Labor mit Hilfe eines Okularmikrometers am Mikroskop gemessen. In Abhängigkeit vom Boniturtermin wurden die Pyknidien verschiedener Blatttagen untersucht. Für sechs Sorten wurden jeweils 100 Pyknidien pro Sorte von mehreren Blättern der zu den Probennahmen vorhandenen oberen zwei Blatttagen gemessen. Die abgelesenen Werte der horizontalen und vertikalen Länge der Pyknidien wurden mit einem auf die Skalierung des Okularmikrometers und auf den Vergrößerungswert des Objektivs abgestimmten Faktor multipliziert. Aus diesen Angaben in mm wurde der Mittelwert gebildet, der als Radius zur Berechnung der Fläche der runden Pyknidien diente. Die Pyknidiengröße wird als Fläche in mm² angegeben.

Pykno-sporenlänge

Sortenunterschiede beim Schaderreger *Cercospora beticola* an Zuckerrüben können anhand der Sporenlänge kategorisiert werden (JÖRG et al., 2004; RACCA et al., 2006). Daher wurde dieser Parameter auch für eine Differenzierung der Sortenanfälligkeit bei *S. tritici* in Betracht gezogen. Zur Untersuchung der Länge von *S. tritici*-Sporen wurden von verschiedenen Sorten an zwei Terminen Proben im Freiland entnommen. Läsionen mit Pyknidien wurden aus den Blättern ausgeschnitten und in destilliertes Wasser gelegt. Nach 12 Stunden wurden die Blattstücke in dem Erlenmeyerkolben geschüttelt und danach die Sporensuspension abgegossen. Mit einem am Computer angeschlossenen Mikroskop konnte über eine Längenmessfunktion die Länge von jeweils 100 Sporen pro Sorte und Termin erhoben werden (Software Leica Application Suite, Version 2.8.1). Insgesamt wurden sechs Sorten (Solitär, Skagen, Kranich, Cubus, Biscay, Drifter) untersucht.

3.5 Freilanderhebungen – Bonitur der Befallsstärke

Die Tabelle 9 zeigt einen Überblick der *S. tritici*-Freilanderhebungen, die in drei aufeinander folgenden Jahren durchgeführt wurden. In den weiteren Ausführungen werden die Erhebungen der Boniturjahre 2007, 2008 und 2009 differenziert, zu denen die Aussaaten verschiedener Weizensorten jeweils im Herbst des Vorjahres stattfanden. Die vier dargestellten Erhebungsgruppen unterschieden sich in Art und Umfang der Bonituren.

Tabelle 9: Übersicht der Freilanderhebungen. Standorte der Boniturjahre 2007, 2008 und 2009 der Exakt-Bonituren, der Landessortenversuche, der Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder und der Fungizidversuche. Erhobene Parameter sind mit einem x gekennzeichnet.

	Standorte 2007	Standorte 2008	Standorte 2009	markierte Pflanzen	zufällige Pflanzen	alle Blattetagen	obere 4 Blattetagen	obere 3 Blattetagen	Befallsstärke	Pyknioblendichte
1. Exakt-Bonituren										
Nieder-Hilbersheim	Nieder-Hilbersheim, Wahlbach	Nieder-Hilbersheim, Mörschbach	X	-	X	-	-	X	2008	2009
2. Landessortenversuche Rheinland-Pfalz										
Wörrstadt, Uhler, Herxheim	Wörrstadt, Kümbdchen, Herxheim, Biedesheim	Wörrstadt, Kümbdchen, Herxheim, Biedesheim	-	X	-	X	-	X	-	-
3. Bonituren Pflanzenschutzdienste der Länder										
BB, MV, NI, RP, SH, SN, ST, TH ¹⁾	BB, MV, NI, RP, SH, SN, ST, TH ¹⁾	BB, MV, NI, RP, SH, SN, ST, TH ¹⁾	-	X	-	-	X	X	-	-
4. Fungizidversuche										
Nieder-Hilbersheim	Nieder-Hilbersheim, Simmern	Nieder-Hilbersheim, Simmern	-	X	-	X	-	X	-	-

¹⁾BB: Brandenburg, MV: Mecklenburg-Vorpommern, NI: Niedersachsen, RP: Rheinland-Pfalz, SH: Schleswig-Holstein, SN: Sachsen, ST: Sachsen-Anhalt, TH: Thüringen

Die Bonituren in den Erhebungsgruppen 1, 2 und 4 wurden von Mitarbeitern der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) durchgeführt. In den weiteren Bundesländern (Erhebungsgruppe 3) wurden die Erhebungen von den Mitarbeitern des jeweiligen Pflanzenschutzdienstes betreut. Dieser Gruppe wurde außerdem ein rheinland-pfälzischer Standort zugeordnet, an dem die Erhebungen von einem Mitarbeiter des Pflanzenschutzdienstes durchgeführt wurden (Tabelle 9). Zur Gewährleistung einer einheitlichen Datenerhebung wurde für alle beteiligten Personen eine ausführliche Bonituranleitung erstellt.

Die Erhebungen an den Standorten der Exakt-Bonituren wurden an markierten Pflanzen und für alle Blattetagen durchgeführt. Dazu wurde zu BBCH 31/32 an 100 Haupttrieben pro Sorte ein Etikett mit einer Pflanzennummer befestigt, damit die Befallsentwicklung an denselben Pflanzen dokumentiert wurde. In den anderen Erhebungsgruppen wurden die Bonituren je Termin an zufällig ausgewählten Pflanzen vorgenommen und jeweils die vier bzw. drei oberen Blattetagen betrachtet. Neugebildete Blätter wurden berücksichtigt, wenn sie ca. 20% der endgültigen Größe erreicht hatten. An allen Standorten wurde wöchentlich die Befallsstärke von *S. tritici* geschätzt. Die Befallsstärke sagte aus, wie viel Prozent der gesamten Blattfläche mit eindeutigen *S. tritici*-Läsionen bedeckt waren. Die Blattläsionen wurden erst anhand der Pyknidien *S. tritici* zugeordnet. Ohne Pyknidien als sicheres Zeichen war die Verwechslungsgefahr mit Läsionen anderer Schaderreger (zum Beispiel von DTR, *Drechslera tritici-repentis*) oder Blattveränderungen aufgrund abiotischer Ursachen sehr hoch.

Alle Erhebungen wurden in ca. 15 m² großen Parzellen in drei- oder vierfacher Wiederholung je Sorte durchgeführt. Die Parzellen waren in randomisierten Blockanlagen angelegt. Ackerbauliche Maßnahmen, wie Herbizid- oder Insektizidbehandlungen und Düngungsmaßnahmen, wurden standortspezifisch durchgeführt. Fungizide kamen nur in der Erhebungsgruppe 4 zum Einsatz. Es wurden mit dem Erreichen des BBCH-Stadiums 31/32 wöchentlich 100 Pflanzen, verteilt auf die Wiederholungen, bonitiert. Die Bonituren waren beendet, wenn an 50% der betrachteten Pflanzen

das Fahnenblatt abgestorben war. Durchschnittlich dauerten die Datenerhebungen in jedem der drei Versuchsjahre zehn Wochen. Bei verzögerter Abreife des Getreides aufgrund kühler Witterung verlängerte sich der Boniturzeitraum.

Die Werte der Befallsstärke wurden im Feld in vorbereitete Tabellenblätter eingetragen und zur weiteren Bearbeitung in den PC übertragen (EXCEL 2003). Zudem wurde das Entwicklungsstadium (BBCH-Stadium) jeder Sorte wöchentlich ermittelt und notiert.

3.5.1 Standorte der Exakt-Bonituren

Die Aussaaten verschiedener Winterweizensorten an den Standorten der Exakt-Bonituren in Rheinland-Pfalz wurden für diese Arbeit vorgenommen. Im Boniturjahr 2007 wurden diese Erhebungen nur am Standort Nieder-Hilbersheim an zehn verschiedenen anfälligen Sorten durchgeführt. Aufgrund eines witterungsbedingten geringen Krankheitsdrucks in dieser Region wurden die Erhebungen im Boniturjahr 2008 an den Standorten Nieder-Hilbersheim und Wahlbach und im Boniturjahr 2009 an den Standorten Nieder-Hilbersheim und Mörschbach realisiert.

Der Ort Nieder-Hilbersheim liegt in der Region Rheinhessen (Abbildung 8) auf einer Höhe von 244 m ü. NN in einer warm-trockenen Klimaregion. Die durchschnittliche Jahresniederschlagsmenge der letzten zehn Jahre betrug 523 mm mit einer Jahresdurchschnittstemperatur von 10,3°C. In den epidemiologisch wichtigen Monaten von April bis Juli summierte sich der durchschnittliche Niederschlag auf 193,4 mm, bei einer mittleren Temperatur von 15,3°C. Der Boden wird als sandiger Lehm beschrieben.

Die Standorte Wahlbach und Mörschbach der Boniturjahre 2008 und 2009 befinden sich in der Mittelgebirgslandschaft des Hunsrücks (Abbildung 8), der Teil des Rheinischen Schiefergebirges ist. Geographisch liegen die Standorte nordöstlich bzw. nordwestlich der Stadt Simmern in einer feucht kühlen Klimaregion. Die Erhebungsflächen befanden sich auf einer Höhe von 440 m ü. NN. Der durchschnittliche Niederschlag der letzten zehn Jahren betrug 523 mm bei einer Temperatur von 9,0°C. In den Monaten von April bis Juli fielen durchschnittlich 236,8 mm Niederschlag mit einer Durchschnittstemperatur von 13,6°C. Die Bodenart auf den Ackerflächen ist als lehmiger Schluff eingeordnet.

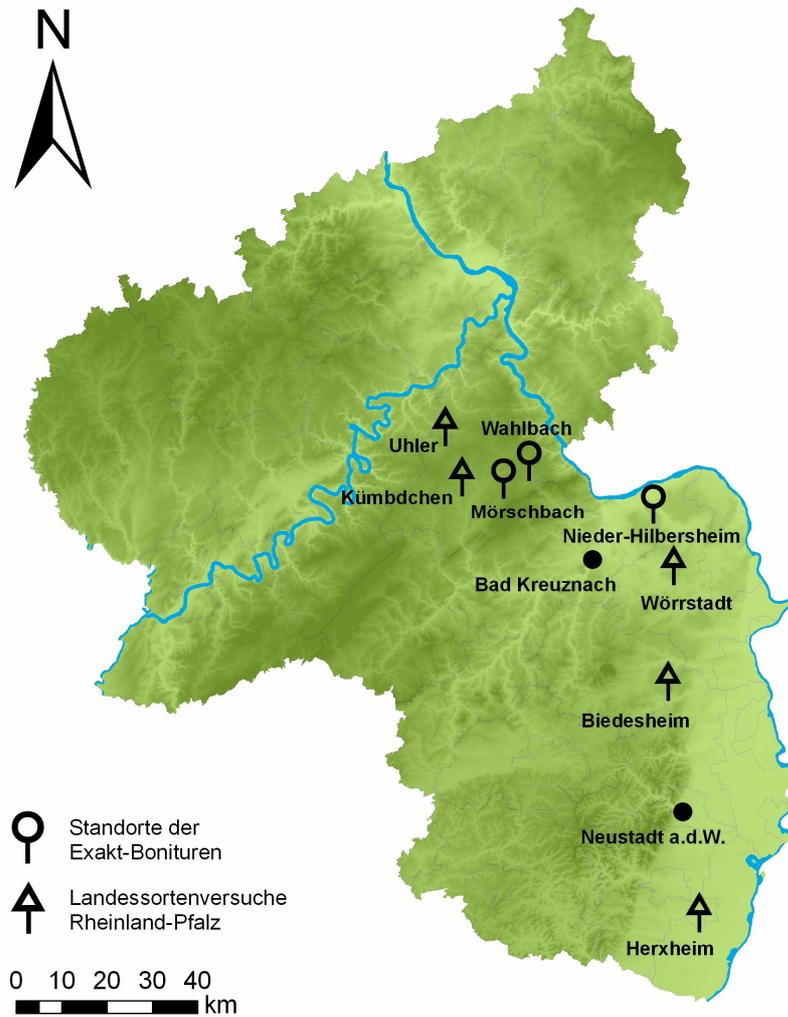


Abbildung 8: Standorte der Exakt-Bonituren und der Landessortenversuche Rheinland-Pfalz sowie die Stadt Bad Kreuznach, Standort der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) und des Dienstleistungszentrums ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR RNH).

In der Abbildung 9 sind die gemessenen Temperaturen und Niederschlagsmengen der den Bonitur-Standorten nächstgelegenen Wetterstationen dargestellt. Für die Jahre 2008 und 2009 ist der Zeitraum vom 1. April bis 1. Juli abgebildet, da diese Monate bestimmend für eine Septoria-Epidemie sind. Für den Standort Nieder-Hilbersheim wurden die Daten der Wetterstation Rommersheim (Entfernung 11 km) verwendet und für die Standorte Wahlbach und Mörschbach die Messungen der Wetterstation Wahlbach (Entfernung 1 km bzw. 3 km).

Der Temperaturverlauf an den Standorten der beiden Wetterstationen unterschied sich in den Jahren 2008 und 2009 nur geringfügig. Die Tagesmitteltemperatur gemessen an der Wetterstation Rommersheim war im Jahr 2008 für den betrachteten Zeitraum um 1,5°C und im Jahr 2009 um 1,3°C höher als an der Wetterstation Wahlbach. Die Niederschlagssumme beider Standorte unterschied sich vom 1. April bis 1. Juli im Jahr 2008 um 16 mm (Wahlbach 145 mm und Rommersheim 129 mm). Im Jahr 2009 war die Summe identisch. Niederschlagsereignisse mit

Regenmengen von > 0,5 mm wurden in 2008 sechsmal häufiger in Wahlbach gemessen, im Jahr 2009 gab es auch hier keinen Unterschied zwischen den Standorten.

Weitere Daten zur Charakterisierung der Versuchstandorte sind der Tabelle 10 zu entnehmen.

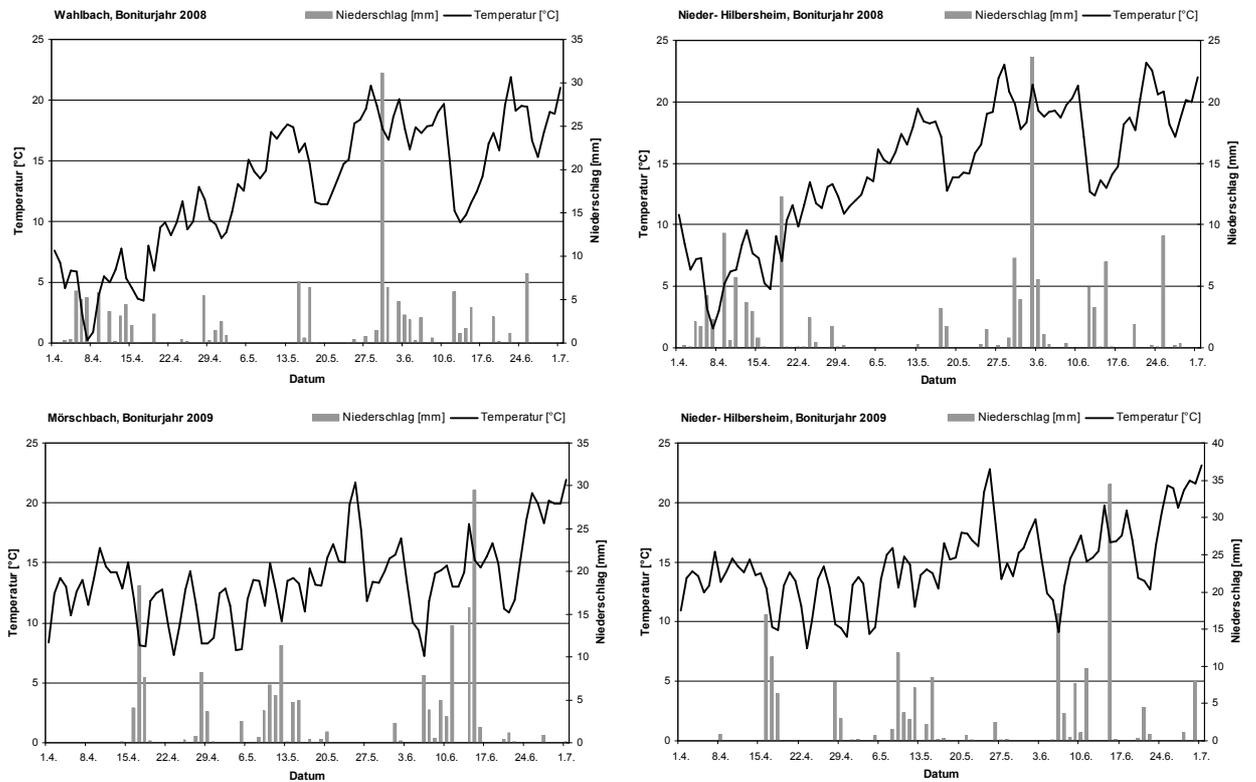


Abbildung 9: Tagesmitteltemperatur (°C) und täglicher Niederschlag (mm) an den Standorten der Bonituren in Rheinhessen und Hunsrück für die Jahre 2008 und 2009 im Zeitraum vom 1. April bis 1. Juli.

Tabelle 10: Schlagdaten der Standorte Nieder-Hilbersheim, Wahlbach und Mörschbach für die Boniturjahre 2007 bis 2009.

Boniturjahr	2007			2008			2009		
	Standort	Nieder-Hilbersheim	Wahlbach	Nieder-Hilbersheim	Wahlbach	Nieder-Hilbersheim	Mörschbach		
Region	Rheinhausen	Rheinhausen	Hunrück	Rheinhausen	Hunrück	Rheinhausen	Hunrück		
Höhe [m ü. NN]	244	244	440	244	440	244	430		
Aussaattermin	12.10.2006	09.10.2007	08.10.2007	09.10.2007	08.10.2007	10.10.2008	29.09.2008		
Auflauftermin	23.10.2006	23.10.2007	22.10.2007	23.10.2007	22.10.2007	27.10.2008	16.10.2008		
Winterweizensorten	Atoll, Boomer, Cubus, Dekan, Drifter, Leiffer, Ludwig, Solitär, Tommi, Tuareg	Atoll, Biscay, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär	Atoll, Biscay, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär	Atoll, Biscay, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär	Biscay, Cubus, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär	Biscay, Cubus, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär	Biscay, Cubus, Drifter, Kranich, Skagen, Solitär		
Anzahl Bonituren	12	10	10	10	10	10	10		
Untersuchungszeitraum	11.4.07 - 26.6.07	13.5.08 - 15.7.08	15.5.08 - 15.7.08	13.5.08 - 15.7.08	15.5.08 - 15.7.08	29.4.09 - 30.6.09	30.4.09 - 2.7.09		
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	lehmgiger Schluff	sandiger Lehm	lehmgiger Schluff	sandiger Lehm	lehmgiger Schluff		
Bodentyp	Parabraunerde	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde		
Ackerzahl	80	80	50	80	50	80	50		
Bodenbearbeitung	pfluglos	pfluglos	pfluglos	pfluglos	pfluglos	pfluglos	pfluglos		
Parzellengröße	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²	ca. 15 m ²		
Vorfrucht	Winterweizen	Winterweizen	Winterraps	Winterweizen	Winterraps	Winterweizen	Winterraps		
Vorvorfrucht	Winterweizen	Winterweizen	Wintergerste	Winterweizen	Wintergerste	Winterweizen	Wintergerste		
N-Düngung	160 kg	160 kg	180 kg	160 kg	180 kg	160 kg	180 kg		
Wetterstation	Rommersheim	Rommersheim	Wahlbach	Rommersheim	Wahlbach	Rommersheim	Wahlbach		
Entfernung von der Wetterstation	10,7 km	10,7 km	0,8 km	10,7 km	0,8 km	10,7 km	3,1 km		
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	523,2 mm	523,2 mm	672,7 mm	523,2 mm	672,7 mm	523,2 mm	672,7 mm		
Zehnjährige Durchschnittstemperatur	10,3°C	10,3°C	9,0°C	10,3°C	9,0°C	10,3°C	9,0°C		

3.5.2 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz (LSV-RP)

In Rheinland-Pfalz werden jedes Jahr an mehreren Standorten Landessortenversuche (LSV) durchgeführt. In den unbehandelten Kontrollen dieser Versuche wurde an vier Weizensorten verschiedener Septoria-Anfälligkeit die Befallsstärke bonitiert. Im Boniturjahr 2007 wurden die Erhebungen an den Standorten Uhler, Wörrstadt und Herxheim durchgeführt. In den Jahren 2008 und 2009 wechselte der Standort der LSV im Hunsrück von Uhler nach Kümbdchen und mit Biedesheim wurde an einem vierten Standort der LSV *S. tritici* bonitiert. Die klimatischen Eckdaten der vier Standorte sind der Tabelle 11 zu entnehmen. Eine Tabelle mit weiteren Schlagdaten ist im Anhang (Kapitel 8) zu finden.

In der Abbildung 8 sind die Standorte der Landessortenversuche Rheinland-Pfalz eingezeichnet, an denen die Erhebungen durchgeführt wurden.

Tabelle 11: Monatsmittelwerte für Temperatur und relative Luftfeuchte sowie die Niederschlagssumme der Jahre 2007 bis 2009 an den Standorten der Wetterstationen der Landessortenversuche.

Standort Wetterstation	Biedesheim			Herxheim			Uhler/Kümbdchen			Wörrstadt		
	Grünstadt- Asselheim			Herxheimweyher			Wahlbach			Rommersheim		
	T [°C]	rL [%]	N [mm]	T [°C]	rL [%]	N [mm]	T [°C]	rL [%]	N [mm]	T [°C]	rL [%]	N [mm]
April	12,8	65	31,9	12,5	71	41,1	10,1	75	30,3	11,8	71	32,6
Mai	16,7	65	47,6	16,7	72	49,6	13,9	76	69,5	15,7	72	41,4
Juni	18,5	71	96,5	18,7	77	67,3	15,5	82	65,7	17,7	77	76,8
Juli	19,4	68	53,5	19,6	76	84,2	16,8	78	59,0	19,1	73	72,3
Mittelwert	16,9	67,2	57,4	16,9	74,1	60,6	14,1	77,8	56,1	16,1	73,2	55,8

3.5.3 Sortenbeobachtungen durch die Pflanzenschutzdienste der Länder (PSD)

Die Pflanzenschutzdienste der Länder führen jedes Jahr Sortenbeobachtungen durch, in denen die Wirkung verschiedener Fungizidstrategien untersucht wird. In den unbehandelten Kontrollen wurde in jedem der drei Boniturjahre in sieben Bundesländern an mehreren Standorten die Befallsstärke von *S. tritici* an Winterweizen erhoben. Im Jahr 2007 waren es insgesamt 17 Standorte, im Jahr 2008 zusammen 15 Standorte und im Jahr 2009 wurde an 14 Standorten die Befallsstärke erhoben (siehe Abbildung 10). Bei der Auswahl von fünf Sorten pro Standort wurde darauf geachtet, dass diese nach Möglichkeit an allen Standorten angebaut wurden und zudem verschiedene Anfälligkeitsstufen vertreten waren. In Rheinland-Pfalz wurden im Jahr 2007 die Daten an vier Sorten und in den Jahren 2008 und 2009 an drei Sorten erhoben. Häufig bonitierte Sorten sind in der Tabelle 13 aufgeführt.

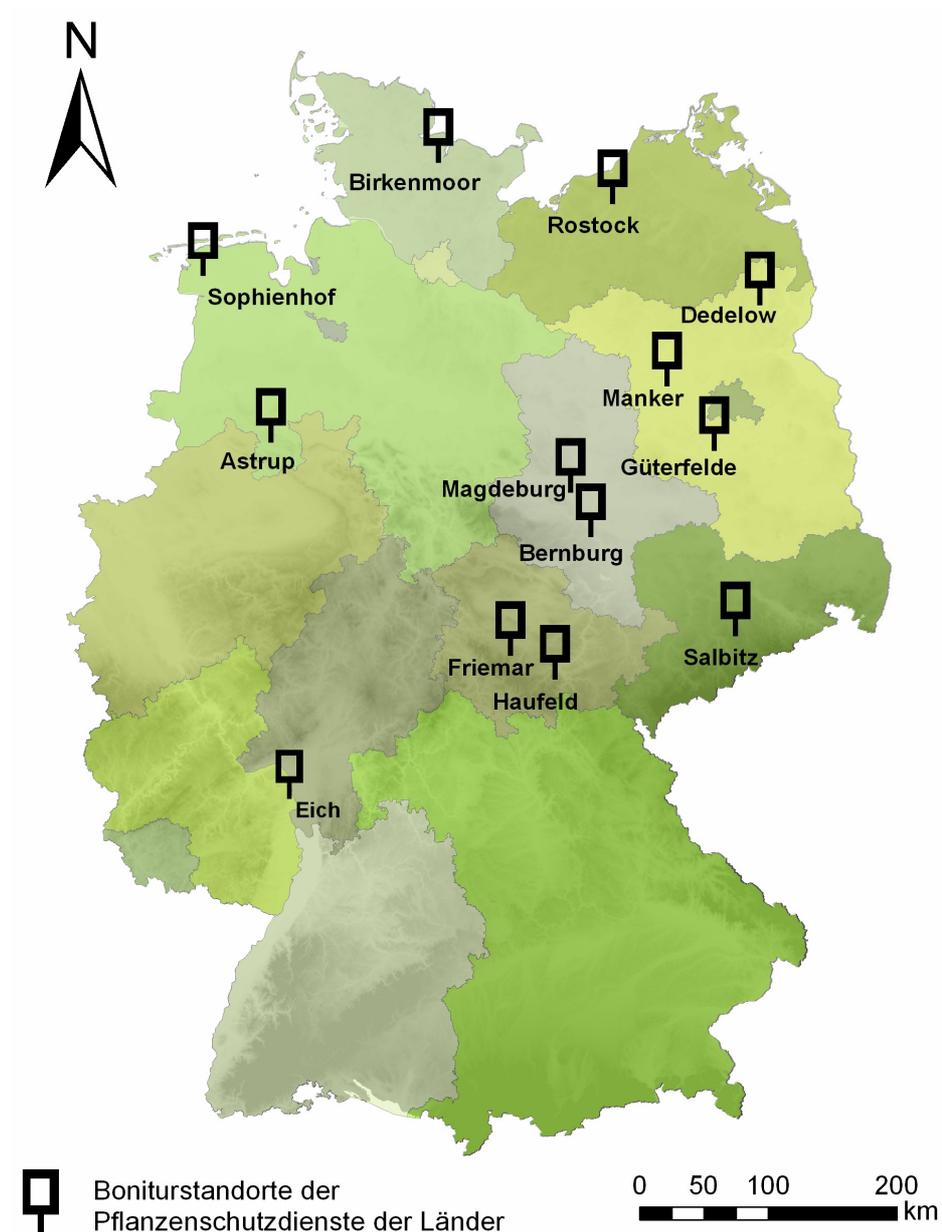


Abbildung 10: Erhebungsstandorte der Pflanzenschutzdienste der Länder im Boniturjahr 2009 (am Standort Güterfelde 2009 zwei Boniturflächen). Im Jahr 2008 war es ein weiterer Standort und im Jahr 2007 vier weitere Standorte.

3.5.4 Fungizidversuche

Die Septoria-Fungizidversuche wurden in jedem der drei Boniturjahre parallel zu den Exakt-Bonituren an den Standorten Nieder-Hilbersheim und Wahlbach bzw. Mörschbach durchgeführt. Im Boniturjahr 2007 konnten keine Daten im Fungizidversuch erhoben werden, da aufgrund einer anhaltenden Trockenperiode im Zeitraum vom 01. März bis zum 10. Mai keine Infektionen stattfanden und eine Ausbreitung des Befalls auf die oberen Blätter im Behandlungszeitraum ausblieb.

Im Boniturjahr 2008 wurde an beiden Standorten zu BBCH-Stadium 31/32 eine Fungizidapplikation durchgeführt, am Standort Nieder-Hilbersheim mit dem kurativ wirkenden Fungizid Input (systemische Eigenschaften) von Bayer CropScience (160 g/l Prothioconazol und 300 g/l Spiroxamine) und am Standort Wahlbach mit dem protektiv wirkenden Kontaktfungizid Bravo 500 von Syngenta (500 g/l Chlothalonil). Für einen Vergleich des Bekämpfungserfolges wurden die Fungizide mit unterschiedlicher Wirkungsweise gewählt. Der Septoria-Befall im Boniturjahr 2009 war zum Zeitpunkt des BBCH-Stadiums 31/32 sehr gering, so dass die Behandlung erst im BBCH-Stadium 41 mit den identischen Mitteln aus dem Jahr 2008 vorgenommen wurde.

Die Behandlungen erfolgten mit einem Druckluft-Parzellenspritzgerät (Typ Schachtner) bei einer Aufwandmenge von 200 l/ha Wasser und 1,25 l/ha Input bzw. 300 l/ha Wasser und 2 l/ha Bravo 500 (siehe Tabelle 12).

Tabelle 12: Übersicht der Fungizidanwendungen an den Standorten der Exakt-Bonituren in den Jahren 2008 und 2009.

Standort	Boniturjahr 2008		Boniturjahr 2009	
	Nieder-Hilbersheim	Wahlbach	Nieder-Hilbersheim	Mörschbach
Mittel (Aufwandmenge)	Input (1,25 l/ha)	Bravo 500 (2 l/ha)	Input (1,25 l/ha)	Bravo 500 (2 l/ha)
Applikationsdatum	08.05.2008	10.05.2008	22.05.2009	24.05.2009
	BBCH 31/32	BBCH 31/32	BBCH 41	BBCH 41

Zur Abbildung einer Fungizidwirkung über die Zeit wurde im Modell SEPTRI2 eine modifizierte logistische Funktion verwendet (Gleichung [7]).

$$FF(t) = 1 / (1 + \exp(\ln[y_0 / (1 - y_0)] + r_{FW} \cdot t)) \quad [7]$$

Für die Funktion FF gilt:

$$FF(t = 0) = 1 - y_0 \quad \text{mit } y_0 = 0,00001$$

$$FF(t \rightarrow \infty) = 0$$

wobei:

$FF(t)$ = Fungizidfaktor am Tag t nach der Applikation

r_{FW} = Rate Fungizidwirkung der logistischen Funktion

t = Zeit (Tage nach der Fungizidbehandlung)

$1 - y_0$ = maximale Fungizidwirkung

3.5.5 Sortenspektrum der Versuche

In der Beschreibenden Sortenliste des Bundessortenamtes (BSA) wird jährlich die Septoria-Anfälligkeit aller zugelassenen Weizensorten veröffentlicht. Als gering anfällig sind nur wenige Sorten eingestuft. Im Boniturjahr 2009 war die stark anfällige Sorte Atoll nicht mehr verfügbar, da sie vom Markt genommen wurde. Abbildung 11 zeigt den relativen Anteil der Sorten mit BSA-Noten von 2 bis 8. Mit den Noten 1 und 9 sind keine Sorten bezüglich der Septoria-Anfälligkeit bewertet. Die Noten bedeuten für Krankheiten und Schädlinge: 1 - fehlend oder sehr gering, 2 - sehr gering bis gering, 3 - gering, 4 - gering bis mittel, 5 - mittel, 6 - mittel bis stark, 7 - stark, 8 - stark bis sehr stark und 9 - sehr stark (BUNDESSORTENAMT, 2009).

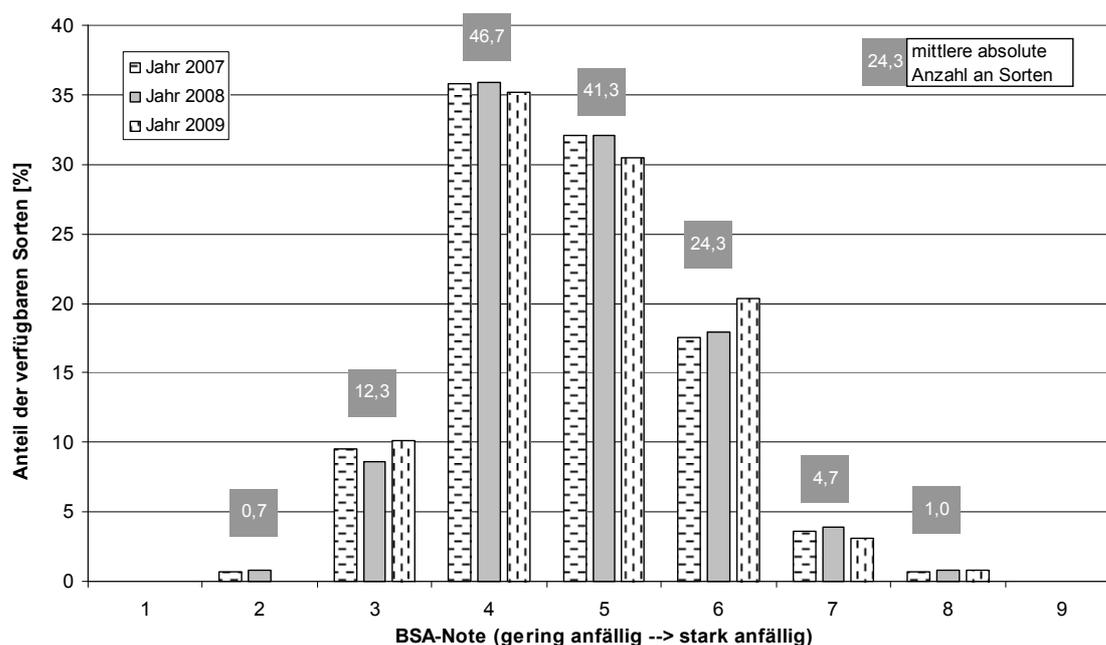


Abbildung 11: Bewertungen des Bundessortenamtes der *S. tritici*-Anfälligkeit von Winterweizen im Vergleich der Jahre 2007 bis 2009. Mit steigender BSA-Note nimmt die Anfälligkeit zu (BUNDESSORTENAMT, 2009).

In den verschiedenen Erhebungsgruppen wurden diese Einstufungen bei der Sortenwahl berücksichtigt. Die Bonituren an den Standorten der Exakt-Bonituren wurden an Sorten mit geringer und starker Anfälligkeit durchgeführt. Bei den Landessortenversuchen und den Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder wurden auch Sorten mittlerer Anfälligkeit gewählt und zudem noch die Vermehrungsfläche bei der Sortenwahl berücksichtigt. In der Tabelle 13 sind die am häufigsten bonitierten Sorten in einer Übersicht zusammengefasst. Insgesamt wurden in den drei Boniturjahren 299 Datensätze an verschiedenen Sorten erhoben (Exakt-Bonituren 34; Bonituren in Landessortenversuchen Rheinland-Pfalz 44; Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder 205; Fungizidversuche 16).

Tabelle 13: Übersicht der am häufigsten bonitierten Sorten der Erhebungsgruppen. BSA-Note und Anzahl der Datensätze der Boniturjahre 2007/2008/2009.

BSA-Note	Solitär	Jenga	Skagen	Dekan	Kranich	Tommi	Boomer	Brilliant	Mulan	Akteur	Cubus	Biscay	Drifter
	2	3	3	4	4	4	5	5	5	6	6	7	7
1. Exakt-Bonituren	1/2/2	0/0/0	0/2/2	1/0/0	0/2/2	1/0/0	1/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/2	0/2/2	1/2/2
2. Landessortenversuche Rheinland-Pfalz	0/0/0	0/4/4	3/0/0	0/4/4	0/0/0	3/4/0	3/0/0	0/0/0	0/0/4	3/4/4	0/0/0	0/0/0	0/0/0
3. Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder	0/0/0	9/9/11	7/6/7	5/9/8	0/0/0	13/2/2	12/0/0	2/6/3	0/12/13	11/9/10	2/3/0	0/0/2	0/0/0
4. Fungizidversuche	1/2/2	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	1/0/2	0/2/2	0/2/2
Datensätze insgesamt	10	37	20	31	4	25	16	9	29	41	10	6	9

3.5.6 Verarbeitung des Datenmaterials

Aus den Daten der Freilanderbefallserhebungen zur Befallsstärke von *S. tritici* auf den verschiedenen Blattetagen wurden die Mittelwerte der Sorten gebildet. Für diese Berechnung wurde die Summe der Befallsstärke der lebenden Blätter durch deren Anzahl geteilt. Unter dem Begriff *lebende Blätter* werden alle Blätter ohne und mit Septoria-Befall zusammengefasst. Die restlichen Blätter galten als abgestorben.

Die Auswertung der Boniturdaten ergab, dass der Mittelwert der Befallsstärke am Ende der Saison unter Berücksichtigung aller bonitierten Blätter wieder abnahm. Bei der Boniturmethode mit zufälligen Pflanzen gab es keine Angabe über den Septoria-Befall auf den abgestorbenen Blättern. Daher verringerte sich die Summe der Befallsstärke am Boniturende. Wurden alle abgestorbenen Blätter entweder als befallen oder als befallsfrei gewertet, war der Fehler im Mittelwert sehr hoch. In dieser Arbeit erfolgte die Berechnung der mittleren Befallsstärke mit der Gleichung [8].

$$\text{Mittelwert Befallsstärke} = \frac{\text{Summe Befallsstärke}}{\text{Anzahl lebender Blätter (mit Befall und ohne Befall)}} \quad [8]$$

AUDPC-Berechnung

Zum Vergleich von Befallskurven wurden die Werte der AUDPC (area under the disease progress curve) mit der Gleichung [9] berechnet (KRANZ, 2002; ROBERT et al., 2004). Als Einheit wird Prozent-Tage oder Anteil-Tage verwendet (CAMPBELL & MADDEN, 1990).

$$\text{AUDPC} = \sum_i^{m-1} \left(\frac{y_i + y_{i+1}}{2} \right) * (t_{i+1} - t_i) \quad [9]$$

m = Anzahl der Boniturtermine

y_i = Befallsstärke (BS) in % zum Zeitpunkt t_i

t_i = Boniturtage

In dieser Arbeit wurde der AUDPC-Wert für die mittlere Befallsstärke der oberen drei Blattetagen ermittelt. Die Varianzanalysen der AUDPC-Werte wurden mit den Einzelwerten aller Wiederholungen einer Variante durchgeführt.

Statistische Auswertung der erhobenen Daten

Die Versuchsdaten wurden mit Hilfe von Microsoft Excel 2003 tabellarisch erfasst. Die statistische Auswertung erfolgte mit den Programmen SIGMAPLOT2000[®] (10.0) und XLSTAT[®] (2008.5) und die Programmierung wurde mit DELPHI[®] (7.0) von der BORLAND SOFTWARE CORPORATION durchgeführt. Die Grafiken wurden mit dem Programm EXCEL 2003 angefertigt. Als statistisches Testverfahren wurde der Tukey-Test verwendet bei einem Signifikanzniveau von $\alpha=0,05$.

Zur grafischen Darstellung der Verteilung statistischer Daten wurden Boxplot-Diagramme verwendet. In der Box liegen die mittleren 50% der Daten. Die Länge der Box entspricht dem Interquartilabstand (IQR), die Grenzen werden als unteres und oberes Quartil benannt. Die Daten unter- und oberhalb dieser Grenzen werden mit Whiskers dargestellt. Die Länge der Whisker beträgt das 1,5-fache des IQR. Daten, die zwischen dem 1,5-fachen und dem 3-fachen des IQR liegen, werden als Ausreißer bezeichnet. Werte über dem 3-fachen des IQR werden in Diagrammen gesondert gekennzeichnet und als Extremwerte angesprochen. Des Weiteren werden der Median als senkrechte Linie und der Mittelwert als Kreuz in den Boxplots eingezeichnet.

4. ERGEBNISSE

In diesem Kapitel werden die Ergebnisse der Laborversuche und der Freilandhebungen vorgestellt. Zur Modellentwicklung wurden die Erkenntnisse aus den Laborversuchen verwendet. Mit den Daten der Exakt-Bonituren wurde die Anpassung des Modells vorgenommen. Die Validierung wurde anhand der Daten aus den Landessortenversuchen in Rheinland-Pfalz sowie den der Pflanzenschutzdienste der Länder durchgeführt.

Die hinter den Sortennamen angegebene Zahl benennt die BSA-Note für die *S. tritici*-Anfälligkeit der Sorte auf Grundlage der Veröffentlichung des Bundessortenamtes (BUNDESSORTENAMT, 2009).

Auf Grundlage der Ergebnisse aus den Versuchen und Erhebungen wurde eine Einteilung der Sorten in drei Anfälligkeits-Klassen in Abhängigkeit der BSA-Note vorgenommen. Die Sorten mit den BSA-Noten 2 und 3 wurden der Klasse gering anfällig zugeordnet, die Sorten mit den BSA-Noten 4 und 5 der Klasse mittlerer Anfälligkeit, und in die Klasse stark anfällig fielen die Sorten mit den BSA-Noten 6 und 7.

4.1 Laborversuche

4.1.1 Pilzwachstum

Die Berechnungen zum Pilzwachstum basieren auf den Ergebnissen der Laborversuche mit der Einzelblattmethode. *S. tritici* wächst bis zum Ende der Inkubationszeit latent und mit Ablauf der Inkubationszeit wird der Befall in Form von Läsionen auf den Blättern sichtbar. Die Mittelwerte der erhobenen Befallsstärken an Boniturterminen sind der Abbildung 12 zu entnehmen. Zur Ermittlung einer geeigneten Anpassung erfolgte die Modellierung des Pilzwachstums zunächst mit der logistischen Funktion und der Gompertz-Funktion.

4.1.1.1 Modellierung des Pilzwachstums

Bestimmend für den Verlauf der Befallskurven ist der Ausgangsbefall y_0 . Für die Modellierung der Rate des Pilzwachstums wurde dieser Ausgangsbefall festgelegt, da die Blätter bei allen Laborversuchen mit der Einzelblattmethode mit einer identischen Sporendichte inokuliert wurden. Für die Anpassung der Boniturdaten mit der logistischen Funktion (Gleichung [1]) wurde ein Startwert von $y_0 = 0,0003\%$ verwendet. Dieser berechnete sich aus den Mittelwerten der frei angepassten Werte für y_0 je Temperatur und Sorte.

Die Anpassung der Gompertz-Funktion an die Daten ergab sehr niedrige Werte für y_0 . Sie lagen in einem Bereich von $7,54E-18$ und $3,24E-17$. Eine Anpassung der Gompertz-Funktion an die Daten mit einem festen Mittelwert für y_0 war nicht möglich. Des Weiteren konnte SIGMA-Plot mit den Daten keine Standardfehler für die Anpassung der Gompertz-Funktion berechnen. Die

Bestimmtheitsmaße variierten für die Sorte Solitär in einem Bereich von 0,81 bis 0,95 und für die Sorte Drifter zwischen 0,91 und 0,99. Lediglich bei der Variante Drifter 10°C wurde mit der Gompertz-Funktion ein höheres Bestimmtheitsmaß für die Anpassung erreicht. In den übrigen Varianten wurden die Daten durch die logistische Funktion exakter beschrieben, so dass diese bei der weiteren Modellierung verwendet wird.

Die Anpassung der logistischen Funktion an die Daten ergab für die stark anfällige Sorte höhere Wachstumsraten. Es wurden für alle Temperaturstufen Bestimmtheitsmaße zwischen 0,96 und 0,99 berechnet. Für die gering anfällige Sorte Solitär variierten die Bestimmtheitsmaße in einem Bereich zwischen 0,89 und 0,98, wobei in keinem Fall das Signifikanzniveau überschritten wurde ($\alpha = 0,05$). Die berechneten Raten sind in Tabelle 14 und die modellierten Kurvenverläufe in Abbildung 12 dargestellt.

Tabelle 14: Geschätzte Raten r_L (1/Tag) der logistischen Funktion (Gleichung [1]) für das Pilzwachstum von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter. Der maximale Befall wurde auf 100%, y_0 auf 0,0003% festgehalten.

Sorte	Temperatur	Wert	Standardfehler	p	R ²
Solitär-2	10°C	0,25	0,026	<0,0001	0,97
Solitär-2	15°C	0,38	0,129	0,0333	0,89
Solitär-2	20°C	0,38	0,096	0,0057	0,90
Solitär-2	25°C	0,30	0,027	<0,0001	0,98
Drifter-7	10°C	0,30	0,034	<0,0001	0,96
Drifter-7	15°C	0,43	0,078	0,0026	0,97
Drifter-7	20°C	0,49	0,045	<0,0001	0,99
Drifter-7	25°C	0,34	0,038	<0,0001	0,97

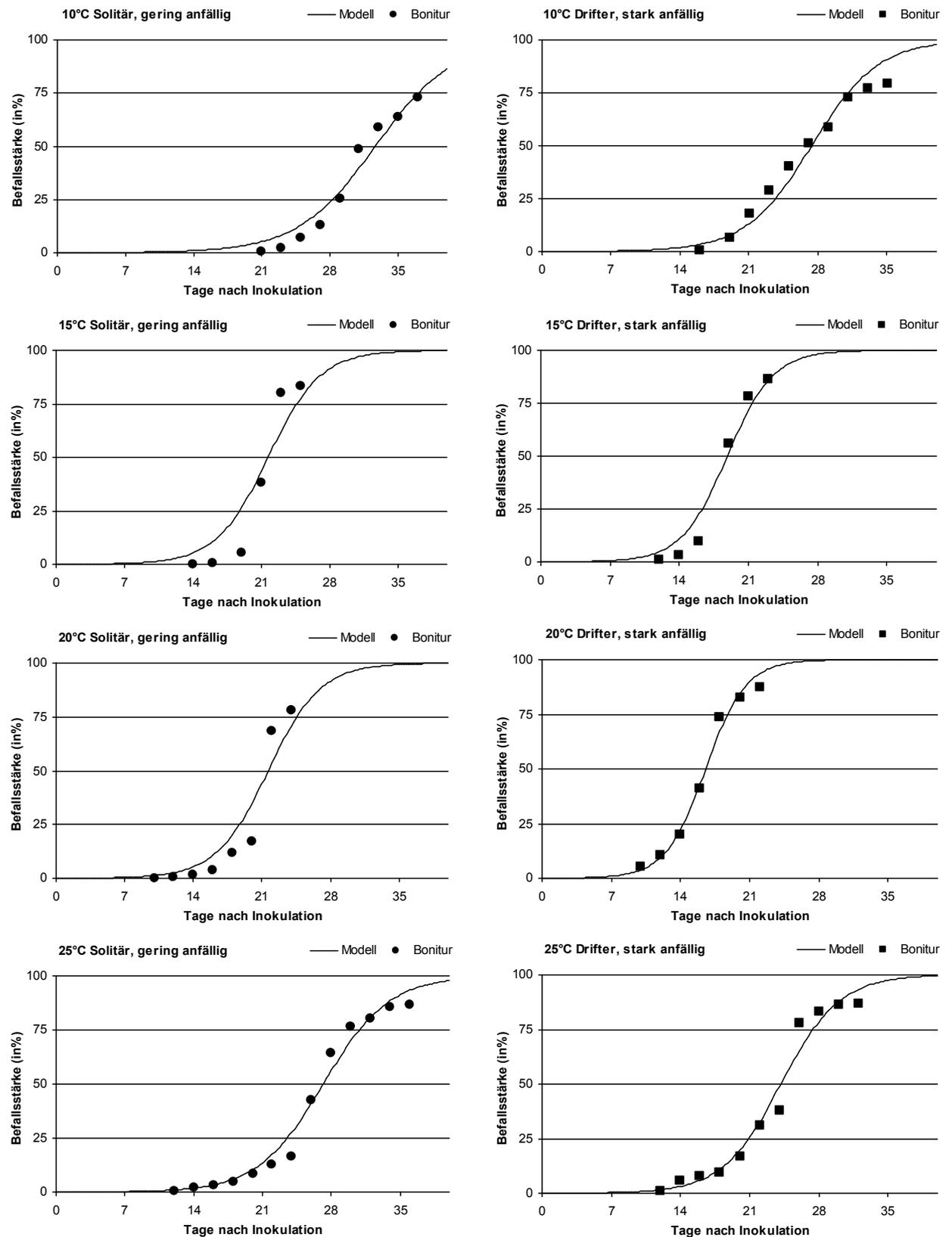


Abbildung 12: Pilzwachstum von *S. tritici* (logistische Funktion) in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). Die Punkte sind die Boniturdaten und die Linien die angepassten logistischen Funktionen.

4.1.1.2 Modellierung der Rate des Pilzwachstums

Mit den geschätzten Wachstumsraten der logistischen Funktion wurde eine Anpassung mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) in Abhängigkeit von der Temperatur für beide Sorten vorgenommen. Die Werte für die Parameter T_{\min} und T_{\max} wurden auf 2 und 30°C fixiert. Sowohl für die stark anfällige Sorte Drifter als auch für die gering anfällige Sorte Solitär ergaben sich gute Anpassungen ($R^2=0,99$). Die Parameterwerte für T_{opt} der beiden Sortenklassen unterschieden sich nur um 0,1°C. Die mit der Beta-Funktion angepassten Raten des Pilzwachstums der Sorte Solitär verliefen im unteren Temperaturbereich oberhalb der Raten der Sorte Drifter. Der Wert für den Parameter Y_{opt} war bei der stark anfälligen Sorte höher als bei der gering anfälligen Sorte (Tabelle 15, Abbildung 13).

Tabelle 15: Geschätzte Parameterwerte der Beta-Funktion (Gleichung [4]) für die Rate des Pilzwachstum von *S. tritici* der gering anfälligen Sorte Solitär und stark anfälligen Sorte Drifter.

Solitär-2 ($R^2 = 0,99$)				Drifter-7 ($R^2 = 0,99$)			
Parameter	Wert	Standardfehler	p	Parameter	Wert	Standardfehler	p
Y_{opt}	0,391	0,008	<0,0001	Y_{opt}	0,487	0,010	<0,0001
T_{opt}	18,7	0,278	<0,0001	T_{opt}	18,6	0,228	<0,0001
* T_{\min}	2	-	-	* T_{\min}	2	-	-
* T_{\max}	30	-	-	* T_{\max}	30	-	-
n	0,82	0,090	0,0028	n	1,01	0,090	0,0015

* Parameterwerte in der Beta-Funktion fix

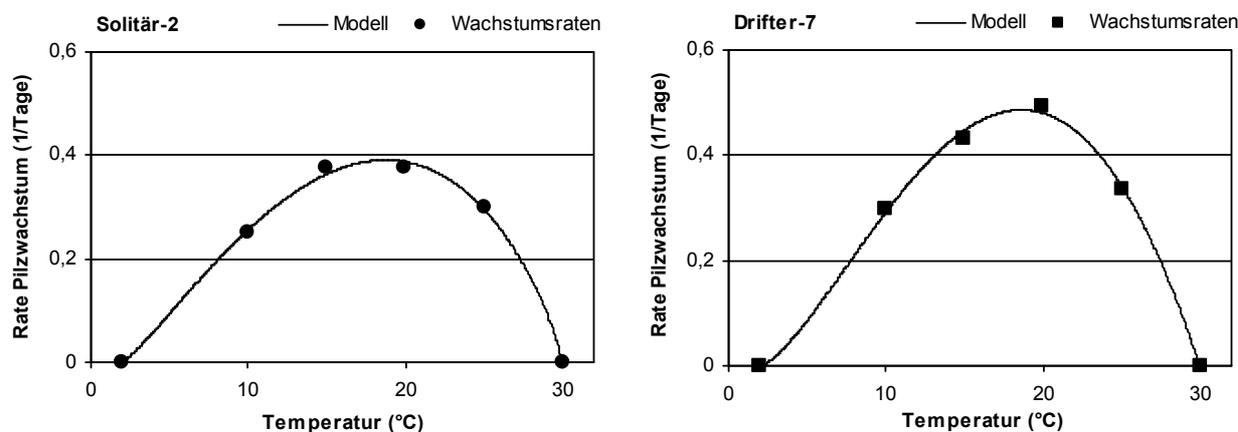


Abbildung 13: Rate des Pilzwachstums von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). Modell nach Gleichung [4].

Die Modellierung der Daten mit der logistischen Funktion hat eine sortenabhängige Differenzierung der Raten des Pilzwachstums ergeben. Das Myzel und im Anschluss die Läsionen der stark anfälligen Sorte Drifter entwickelten sich mit einer höheren Rate im Vergleich zu der gering anfälligen Sorte Solitär.

4.1.1.3 Sortenfaktor der Rate des Pilzwachstums

Für die drei Sortenklassen wurde eine Wachstumsrate in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet. Dabei war die Sorte Solitär stellvertretend für die Sortenklasse „gering anfällig“ und die Sorte Drifter repräsentativ für die Sortenklasse „stark anfällig“. Die Raten der Sorten mittlere Anfälligkeit bildeten sich aus dem Mittelwert von Solitär und Drifter.

Zur Berechnung des sortenabhängigen Pilzwachstums im Modell SEPTRI2 wurden die Wachstumsraten mit den Mittelwerten der frei angepassten Parameter n und T_{opt} neu berechnet.

Die Überprüfung der Differenz der geschätzten Parameterwerte beider Sorten mit der Gleichung [5] ergab die Konfidenzintervalle für $T_{opt} = [-0,61; 0,81]$ und für $n = [-0,44; 0,06]$. Da der Wert null in beiden Konfidenzintervallen enthalten ist, konnten für die Temperatur $T_{opt} = 18,7$ und für den Formparameter $n = 0,91$ verwendet werden. Mit dieser Festlegung wurde ein Überschneiden der Kurven im unteren Temperaturbereich vermieden, und die beiden Beta-Funktionen unterschieden sich nur noch im Y_{opt} .

Die Parameterwerte für Y_{opt} wurden in Relation zu der stark anfälligen Sortenklasse gesetzt und für die Sortenklassen mittlerer und geringer Anfälligkeit ein Faktor berechnet. (Tabelle 16, Abbildung 14).

Tabelle 16: Parameterwerte zur Berechnung der Rate des Pilzwachstums von *S. tritici* mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) und Sortenfaktoren der gering, mittel und stark anfälligen Sortenklassen.

Rate Pilzwachstum	Y_{opt}	T_{opt}	T_{min}	T_{max}	n
r_{PW}	0,479	18,7	2	30	0,91
Sortenfaktoren					
$SF_{PW}(SK)$	0,83	gering anfällige Sorten			
	0,91	mittel anfällige Sorten			
	1	stark anfällige Sorten			

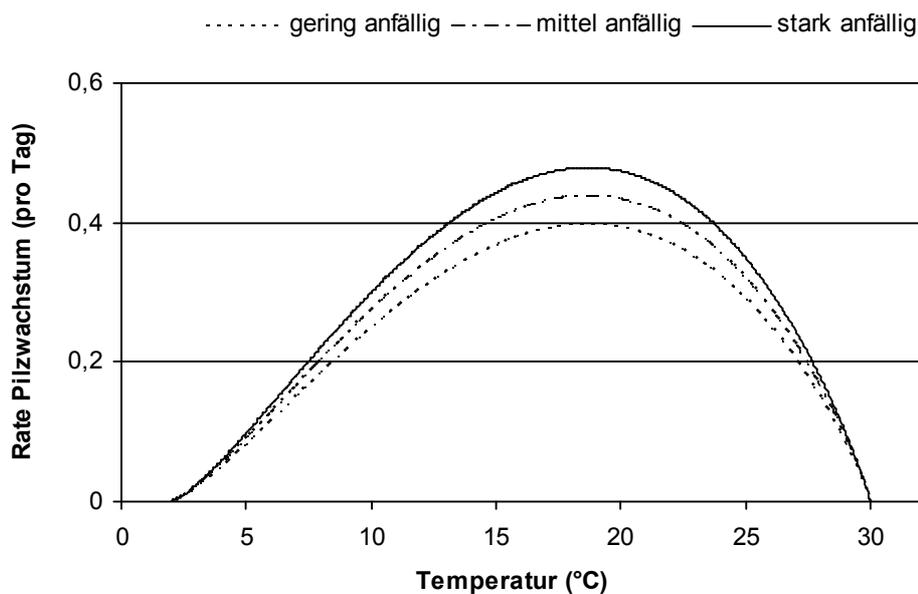


Abbildung 14: Tägliche Rate des Pilzwachstums von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei den Sortenklassen mit geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit.

In der Abbildung 15 sind die Tageswerte der Pilzwachstumsrate in Abhängigkeit von der Temperatur an den Standorten der Exakt-Bonituren der Sortenklasse mittlerer Anfälligkeit dargestellt. Im Jahr 2008 waren die Raten bis Ende April aufgrund niedrigerer Temperaturen geringer im Vergleich zu den Jahren 2007 und 2009. In den aus epidemiologischer Sicht für einen hohen Befall der oberen Blättertagen ausschlaggebenden Monate Mai und Juni unterschieden sich die Wachstumsraten nur geringfügig. Die mittlere Wachstumsrate war lediglich am Standort Mörschbach 2009 mit 0,28 etwas geringer als die Mittelwerte der anderen Standorte, die im Bereich von 0,31 und 0,32 lagen.

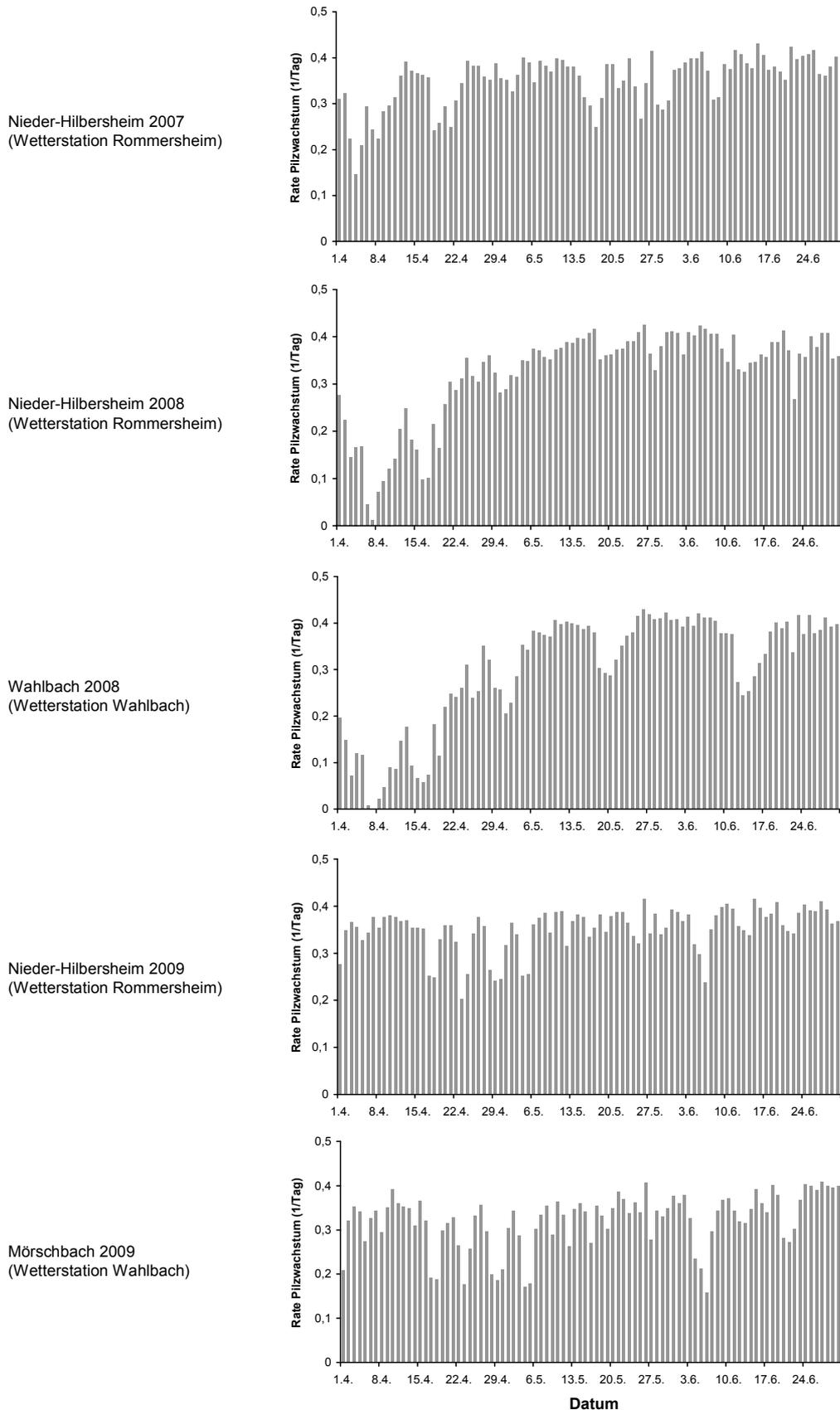


Abbildung 15: Tageswerte der Pilzwachstumsrate von *S. tritici* in den Jahren 2007 bis 2009 an den Standorten der Exakt-Bonituren für den Zeitraum vom 1. April bis 30. Juni. Berechnet mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) und den Parameterwerten aus Tabelle 16 der Sortenklasse mittlerer Anfälligkeit.

4.1.2 Dauer der Inkubationszeit

Die Dauer der Inkubationszeit wurde unter kontrollierten Bedingungen mit der Einzelblattmethode an den Sorten Solitär und Drifter für fünf Temperaturstufen untersucht. Bei der Auswertung der Daten wurden zunächst die Ausreißer jeder Temperaturstufe mit Hilfe einer Boxplot-Analyse entfernt. Die resultierenden Boniturwerte jeder Temperaturstufe sind in Abbildung 16 für die gering anfällige Sorte Solitär und die stark anfällige Sorte Drifter dargestellt. Das Kreuz in den Grafiken markiert den Mittelwert, mit dem die Modellierung der Daten durchgeführt wurde.

Ein geringer Sortenunterschied bezüglich der Inkubationszeit ergab sich bei einer Temperatur von 5°C. Im Bereich von 10°C bis 25°C waren deutliche Sortenunterschiede zu verzeichnen, die sich in einer längeren Inkubationszeit der stark anfälligen Sorte Drifter zeigten. Bei optimaler Temperatur von 20°C erschienen die ersten Läsionen bei der gering anfälligen Sorte nach 15,6 Tagen und bei der stark anfälligen Sorte Drifter bereits nach 10 Tagen (Abbildung 16).

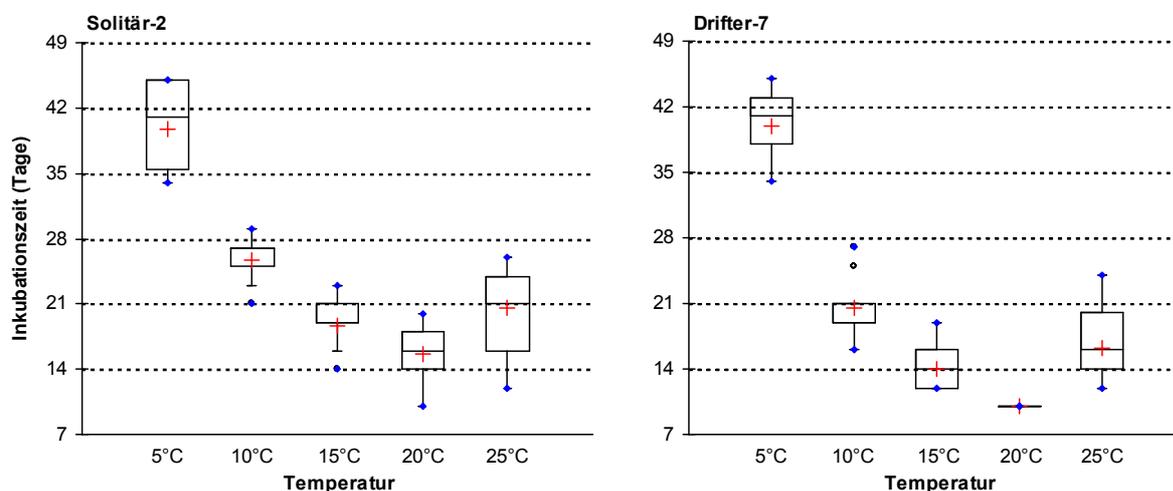


Abbildung 16: Dauer der Inkubationszeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). (+ = Mittelwert, – = Median).

4.1.2.1 Modellierung der Inkubationszeit

Zur Modellierung wurde die Dauer in eine Rate ($=1/\text{Dauer}$) umgewandelt (Gleichung [3], Tabelle 17).

Die berechneten Raten wurden mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) angepasst. Dabei wurden T_{\min} und T_{\max} wieder auf 2 bzw. 30°C festgelegt. In Tabelle 18 sind die geschätzten Parameterwerte für die Sorten angegeben und in Abbildung 17 die Verläufe graphisch dargestellt.

Tabelle 17: Rate der Inkubationszeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter. Berechnung nach Gleichung [3].

Temperatur	Rate der Inkubationszeit	
	Solitär-2	Drifter-7
5°C	0,025	0,025
10°C	0,039	0,049
15°C	0,053	0,072
20°C	0,064	0,100
25°C	0,049	0,061

Tabelle 18: Geschätzte Parameterwerte der Beta-Funktion (Gleichung [4]) für die Rate der Inkubationszeit von *S. tritici* bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter.

Solitär-2 (R ² = 0,98)				Drifter-7 (R ² = 0,96)			
Parameter	Wert	Standardfehler	p	Parameter	Wert	Standardfehler	p
Y_{opt}	0,059	0,003	<0,0001	Y_{opt}	0,089	0,007	0,0002
T_{opt}	19,4	1,081	<0,0001	T_{opt}	19,1	1,027	<0,0001
* T_{min}	2	-	-	* T_{min}	2	-	-
* T_{max}	30	-	-	* T_{max}	30	-	-
n	0,49	0,151	0,0304	n	0,90	0,301	0,0405

* Parameterwerte in der Beta-Funktion fix

Die Anpassung der Funktion an die Boniturdaten ergab für beide Sorten hohe Bestimmtheitsmaße. Bei der Sorte Solitär war die Abweichung der Boniturdaten zum Modell etwas größer. Die optimalen Temperaturen (T_{opt}) lagen für beide Sorten knapp über 19°C. Die Kurvenverläufe unterschieden sich im unteren Temperaturbereich (< 10°C), mit einem deutlich höheren Y_{opt} -Wert für die stark anfälligen Sorte Drifter. Dies hat eine kürzere Inkubationszeit bei optimaler Temperatur zur Folge.

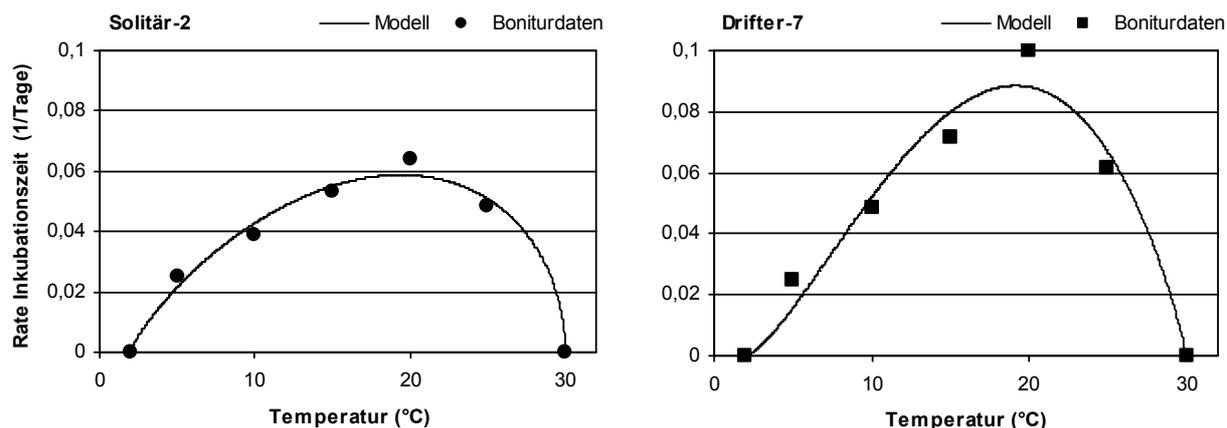


Abbildung 17: Rate der Inkubationszeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). Modell nach Gleichung [4].

4.1.2.2 Sortenfaktor der Inkubationszeit

Für die Verwendung der Inkubationszeit im Modell SEPTRI2 wurden die Daten mit den Mittelwerten der Formparameter T_{opt} und n modelliert (Konfidenzintervall der Differenzen nach Gleichung [5] für $T_{opt} = [-2,66;3,26]$ und für $n = [-1,08;0,26]$). Mit dieser Methode wurde ein gleichförmiger Verlauf der Kurven erreicht und die Sortenklassen konnten anhand des Parameters Y_{opt} differenziert werden. Die Sorte Solitär wurde repräsentativ für die Sortenklasse gering anfällig verwendet und die Sorte Drifter für die Sortenklasse stark anfällig, die mit dem Sortenfaktor eins berechnet wurde (Tabelle 19). Der Sortenfaktor für die Klasse mittlerer Anfälligkeit wurde aus dem Mittelwert des Parameters Y_{opt} der gering und stark anfälligen Sorte berechnet.

Die Raten der Inkubationszeit in Abhängigkeit von der Temperatur der drei Sortenklassen sind in der Abbildung 18 dargestellt.

Tabelle 19: Parameterwerte zur Berechnung der Rate der Inkubationszeit von *S. tritici* mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) und Sortenfaktoren der gering, mittel und stark anfälligen Sortenklassen.

Inkubationszeit	Y_{opt}	T_{opt}	T_{min}	T_{max}	n
r_{IZ}	0,085	19,3	2	30	0,70
Sortenfaktoren					
$SF_{IZ} (SK)$	0,73	gering anfällige Sorten			
	0,86	mittel anfällige Sorten			
	1	stark anfällige Sorten			

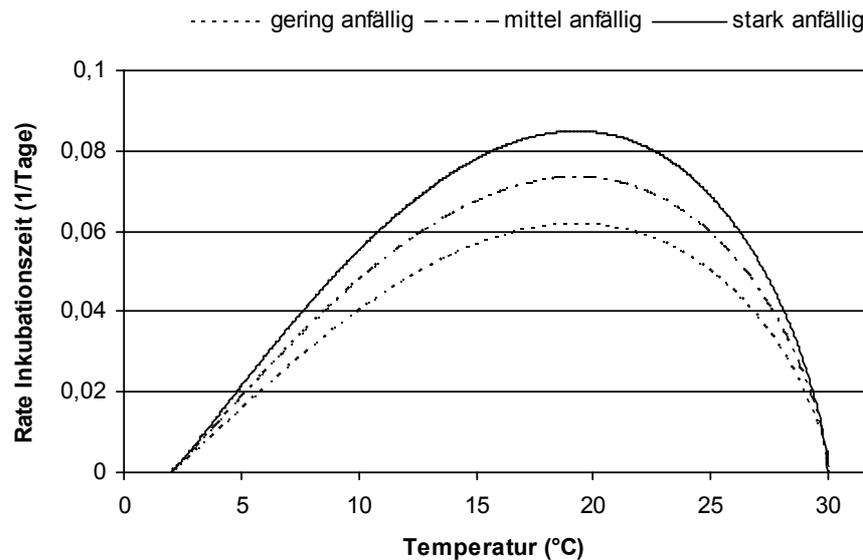


Abbildung 18: Tägliche Rate der Inkubationszeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei den Sortenklassen mit geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit.

4.1.3 Dauer der Latenzzeit

Die Dauer der Latenzzeit wurde unter kontrollierten Bedingungen mit der Einzelblattmethode für sechs Temperaturstufen für die gering anfällige Sorte und die stark anfällige Sorte untersucht. Mit Hilfe einer Boxplot-Analyse wurden die Ausreißerwerte jeder Temperaturstufe entfernt. Die resultierenden Boniturdaten sind in einem Boxplot dargestellt (Abbildung 19). Die Kreuze markieren die zur Modellierung verwendeten Mittelwerte.

Mit Ausnahme der Temperaturstufe von 5°C war die Latenzzeit der stark anfälligen Sorte einige Tage früher als bei der gering anfälligen Sorte beendet. Die kürzeste Latenzzeit ergab sich mit etwa 16 Tagen für die Sorte Drifter bei 20°C. Die Differenz der Latenzzeit in Abhängigkeit von der Sortenklasse betrug für die Temperaturen von 10°C bis 22°C jeweils ca. drei Tage (Tabelle 20).

Bei einer Temperatur von 5°C sind die Dauer der Inkubationszeit und der Latenzzeit annähernd identisch. Bei den Bonituren traten die ersten Pyknidien häufig in noch nicht nekrotisiertem Gewebe auf.

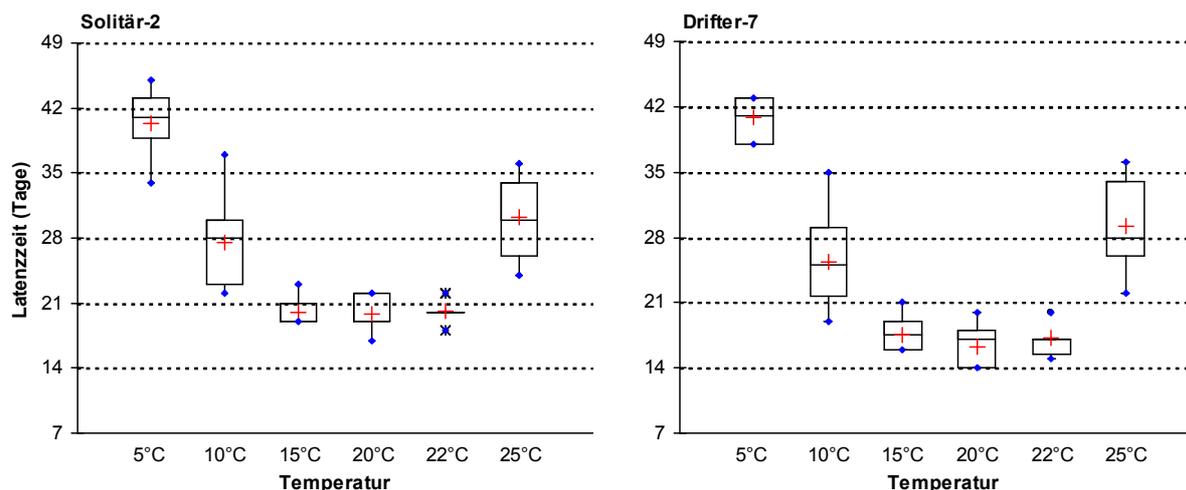


Abbildung 19: Dauer der Latenzzeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). (+ = Mittelwert, – = Median).

4.1.3.1 Modellierung der Latenzzeit

Zur Modellierung der Dauer der Latenzzeit wurden die Daten wie bei der Inkubationszeit im ersten Schritt in eine Rate (=1/Dauer) umgewandelt (Gleichung [3], Tabelle 20) und anschließend mit einer Beta-Funktion (Gleichung [4]) für die Temperaturen zwischen 2°C und 30°C angepasst.

Tabelle 20: Rate der Latenzzeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter. Berechnung nach Gleichung [3].

Temperatur	Rate der Latenzzeit	
	Solitär-2	Drifter-7
5°C	0,025	0,025
10°C	0,036	0,039
15°C	0,050	0,057
20°C	0,050	0,061
22°C	0,049	0,058
25°C	0,033	0,034

Die Ergebnisse der Anpassung für die Latenzzeit sind in Tabelle 21 und Abbildung 20 dargestellt. Bei der stark anfälligen Sorte Drifter konnte *S. tritici* in einer kürzeren Zeit nach der Inokulation Pyknidien mit infektiösen Sporen bilden.

Tabelle 21: Geschätzte Parameterwerte der Beta-Funktion (Gleichung [4]) für die Rate der Latenzzeit von *S. tritici* bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter.

Solitär-2 (R ² = 0,98)				Drifter-7 (R ² = 0,97)			
Parameter	Wert	Standardfehler	p	Parameter	Wert	Standardfehler	p
Y_{opt}	0,051	0,002	<0,0001	Y_{opt}	0,060	0,004	<0,0001
T_{opt}	17,1	0,757	<0,0001	T_{opt}	17,3	0,787	<0,0001
* T_{min}	2	-	-	* T_{min}	2	-	-
* T_{max}	30	-	-	* T_{max}	30	-	-
n	0,70	0,161	0,0074	n	0,91	0,228	0,0101

* Parameterwerte in der Beta-Funktion fix

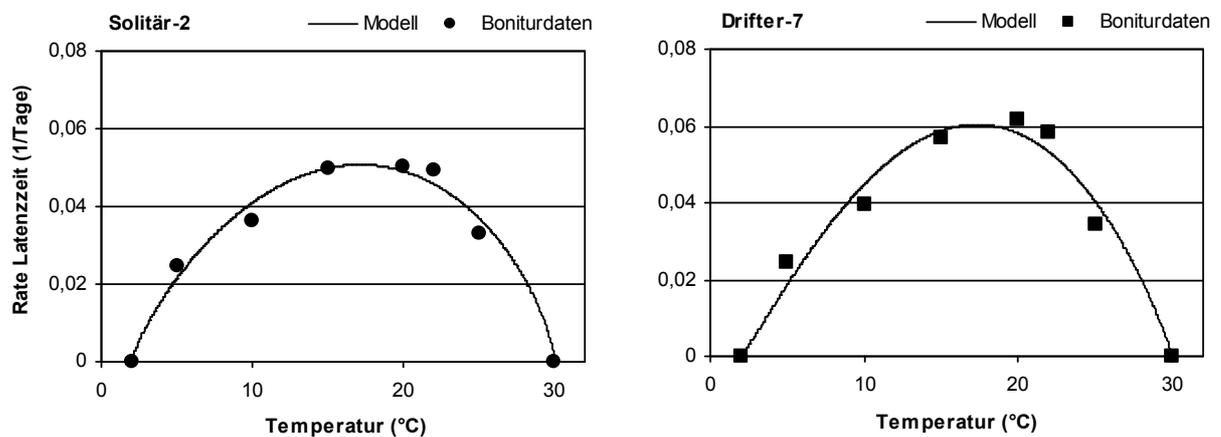


Abbildung 20: Rate der Latenzzeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). Modell nach Gleichung [4].

4.1.3.2 Sortenfaktor der Latenzzeit

Für die Umsetzung der Latenzzeit im Modell wurden die Daten beider Sorten mit den Mittelwerten der Parameter T_{opt} und n neu an die Funktion angepasst (Konfidenzintervall der Differenzen nach Gleichung [5] $T_{opt} = [-2,37;1,97]$ und $n = [-0,76;0,34]$). Die Sortenklassen wurden mit einem Faktor basierend auf den Parameterwerten für Y_{opt} differenziert. Für die Sortenklasse stark anfällig wurde stellvertretend wieder die Sorte Drifter betrachtet und für die Sortenklasse gering anfällig die Sorte Solitär. Der Faktor für die Sorten mittlerer Anfälligkeit wurde aus dem Mittelwert der beiden anderen Sortenklassen gebildet (Tabelle 22).

Mit der vorgenommenen Anpassung wurde ein gleichförmiger Verlauf der Kurven für die Rate der Latenzzeit in Abhängigkeit von der Temperatur erreicht (Abbildung 21).

Tabelle 22: Parameterwerte zur Berechnung der Rate der Latenzzeit von *S. tritici* mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) und Sortenfaktoren der gering, mittel und stark anfälligen Sortenklassen.

Latenzzeit	Y_{opt}	T_{opt}	T_{min}	T_{max}	n
r_{LZ}	0,059	17,2	2	30	0,81
Sortenfaktoren					
$SF_{LZ} (SK)$	0,88	gering anfällige Sorten			
	0,94	mittel anfällige Sorten			
	1	stark anfällige Sorten			

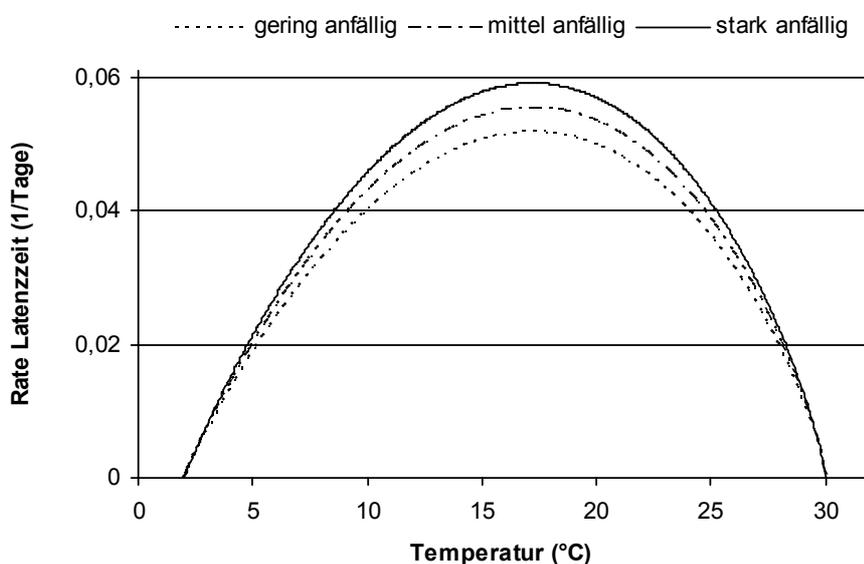


Abbildung 21: Tägliche Rate der Latenzzeit von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei den Sortenklassen mit geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit.

4.1.4 Dauer der Pyknidienformation

Die Dauer der Pyknidienformation wurde für jedes bonitierte Blatt ermittelt. Es wurden die Tage ab dem Erscheinen der ersten Pyknidien bis zur maximalen Anzahl an Pyknidien notiert. Als Datengrundlage konnten die erhobenen Werte von vier Temperaturstufen für die gering und die stark anfällige Sorte verwendet werden. Bei einer Temperatur von 5°C wurden diese Daten nicht erhoben. Die Verteilung der Daten nach dem Entfernen der Ausreißer aus dem Datensatz (Boxplot-Analyse) ist in der Abbildung 22 dargestellt. Die Dauer der Pyknidienformation war bei der gering anfälligen Sorte Solitär kürzer als bei der stark anfälligen Sorte Drifter. Die Dauer bis zum Erreichen der maximalen Anzahl an Pyknidien war bei Temperaturen von 15 und 20°C für die stark anfällige Sorte etwa ein Tag länger.

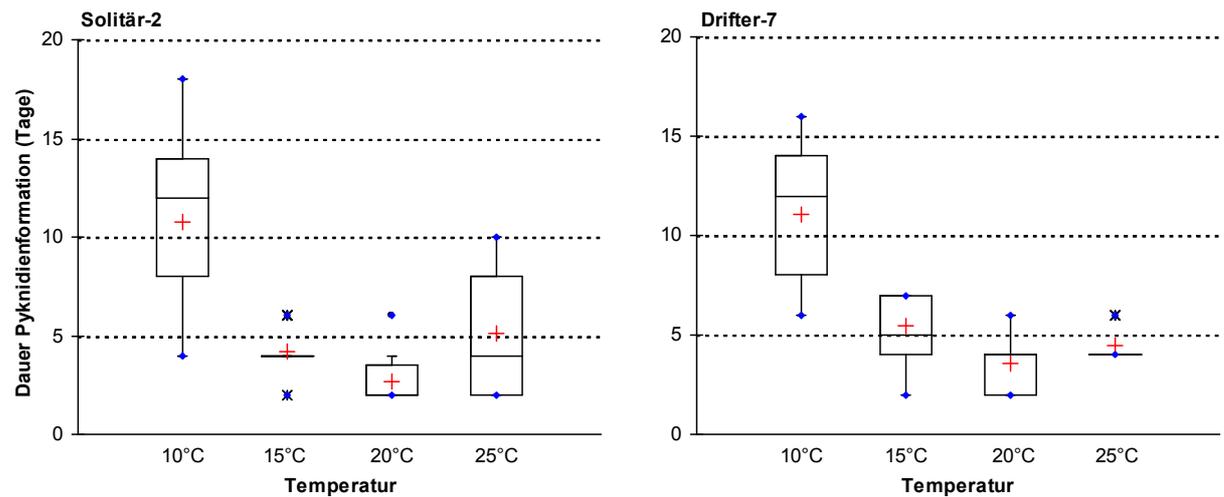


Abbildung 22: Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). (+ = Mittelwert, – = Median).

4.1.4.1 Modellierung der Dauer der Pyknidienformation

Die Daten wurden zunächst in eine Rate umgewandelt (Gleichung [3]) und anschließend mit einer Beta-Funktion (Gleichung [4]) in Abhängigkeit von der Temperatur angepasst.

Tabelle 23: Rate der Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter. Berechnung nach Gleichung [3].

Temperatur	Rate der Dauer der Pyknidienformation	
	Solitär-2	Drifter-7
10°C	0,089	0,090
15°C	0,240	0,184
20°C	0,376	0,280
25°C	0,204	0,224

Bei 10°C ergaben sich keine großen Sortenunterschiede. Der Wert für den Parameter Y_{opt} der gering anfälligen Sorte war um ein Viertel höher als bei der stark anfälligen Sorte. Die optimale Temperatur (T_{opt}) unterschied sich um etwa 1°C zwischen den beiden Sorten. Der Parameterwert für n war bei der gering anfälligen Sorte doppelt so groß wie bei der stark anfälligen Sorte (Abbildung 23).

Tabelle 24: Geschätzte Parameterwerte der Beta-Funktion (Gleichung [4]) für die Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* bei der gering anfälligen Sorte Solitär und der stark anfälligen Sorte Drifter.

Solitär-2 (R ² = 0,99)				Drifter-7 (R ² = 0,99)			
Parameter	Wert	Standardfehler	p	Parameter	Wert	Standardfehler	p
Y_{opt}	0,367	0,012	<0,0001	Y_{opt}	0,276	0,008	<0,0001
T_{opt}	19,9	0,217	<0,0001	T_{opt}	21,1	0,278	<0,0001
* T_{min}	2	-	-	* T_{min}	2	-	-
* T_{max}	30	-	-	* T_{max}	30	-	-
n	2,18	0,202	0,0017	n	1,14	0,134	0,0034

* Parameterwerte in der Beta-Funktion fix

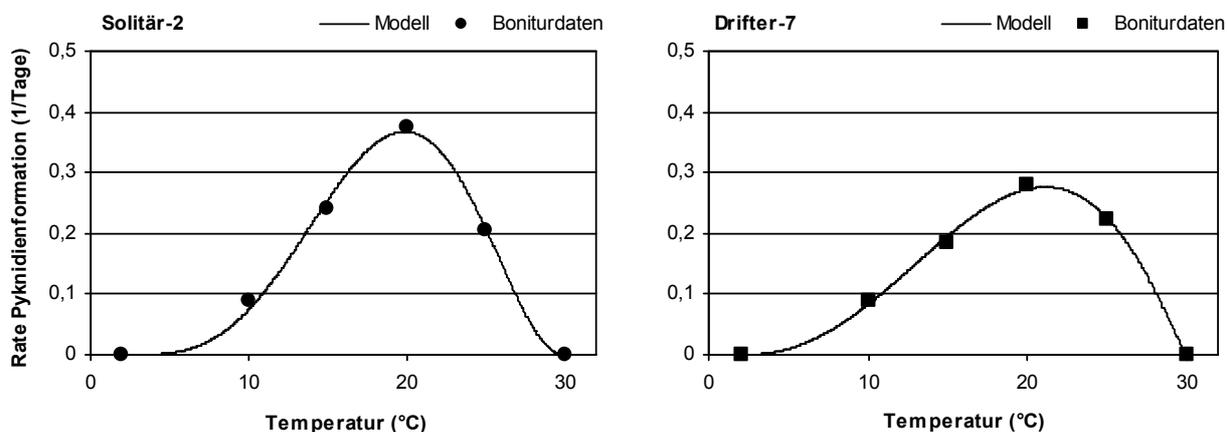


Abbildung 23: Rate der Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei der gering anfälligen Sorte Solitär (links) und der stark anfälligen Sorte Drifter (rechts). Modell nach Gleichung [4].

4.1.4.2 Sortenfaktor der Dauer der Pyknidienformation

Für die Berechnung eines Sortenfaktors wurde die Anpassung der Raten mit den Mittelwerten für die Parameter T_{opt} und n durchgeführt. Die Überprüfung der Daten mit der Gleichung [5] ergab zwar, dass die Parameterwerte nicht identisch sind (Konfidenzintervall der Differenzen: $T_{opt} = [-1,90; -0,50]$ und $n = [0,56; 1,52]$), aber aufgrund der positiven Ergebnisse für die Anpassung der Beta-Funktionen für die Raten des Pilzwachstums, der Inkubations- sowie der Latenzzeit wurden auch für die Dauer der Pyknidienformation die Mittelwerte verwendet. Die resultierenden Parameterwerte der neu angepassten Beta-Funktion sowie die Sortenfaktoren zur Differenzierung der Anfälligkeit sind der Tabelle 25 zu entnehmen. Wiederum wurden die beiden Sorten Solitär und Drifter repräsentativ für die gering und stark anfällige Sortenklasse verwendet.

Mit diesen Parameterwerten ergaben sich die in Abbildung 24 dargestellten Kurvenverläufe für die Dauer der Pyknidienformation in Abhängigkeit von der Temperatur.

Tabelle 25: Parameterwerte zur Berechnung der Rate der Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) und Sortenfaktoren der gering, mittel und stark anfälligen Sortenklassen.

Pyknidienformation	Y_{opt}	T_{opt}	T_{min}	T_{max}	n
r_{PF}	0,291	20,5	2	30	1,66
Sortenfaktoren					
$SF_{PF}(SK)$	1,21	gering anfällige Sorten			
	1,10	mittel anfällige Sorten			
	1	stark anfällige Sorten			

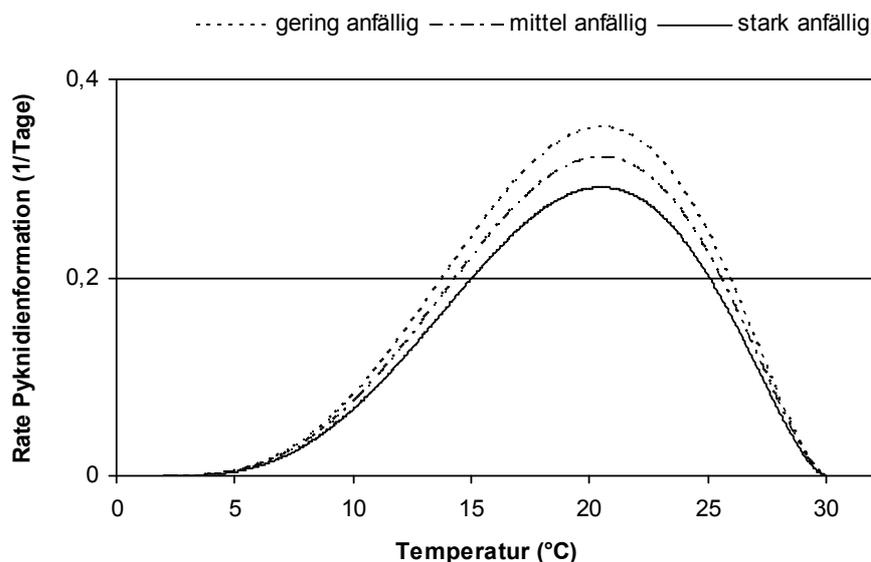


Abbildung 24: Tägliche Rate der Dauer der Pyknidienformation von *S. tritici* in Abhängigkeit von der Temperatur bei den Sortenklassen mit geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit.

4.1.5 Dauer der Inkubations- und Latenzzeit sowie des Pilzwachstums an den Standorten der Exakt-Bonituren

Ein Vergleich der Dauer von Inkubations- und Latenzzeit sowie des Pilzwachstums wurde anhand der Temperaturdaten der Standorte der Exakt-Bonituren von 2007 bis 2009 durchgeführt (Abbildung 25). Es wurden jeweils die Zeiträume vom 01.01. bis 15.06. betrachtet. Das Datum auf den x-Achsen der Grafiken steht für den Beginn der Perioden. Ab diesem Zeitpunkt wurden die

täglichen Raten bis zum Ende der Perioden summiert. Die Dauer des Pilzwachstums berechnete sich aus der Summe von Latenzzeit und Dauer der Pyknidienformation.

In jedem der betrachteten Jahre nahm die Dauer der drei Perioden von Jahresbeginn an ab und verlief in den Monaten April, Mai und Juni auf demselben Niveau. In den Jahren 2007 und 2008 war die Dauer von Inkubations- und Latenzzeit in den Monaten Januar und Februar kürzer im Vergleich zum Jahr 2009. Niedrige Temperaturen erhöhten die Dauer der Perioden. Insgesamt ist der Verlauf der Kurven im Jahr 2009 annähernd parallel. Für die Jahre 2007 und 2008 ist ein gleichförmiger Verlauf erst ab Mitte März zu erkennen.

Die Dauer der drei untersuchten Perioden unterschied sich in Abhängigkeit der Standorte und Jahre für die entscheidenden Monate der Befallsentwicklung auf den oberen Blättern nur geringfügig. Aufgrund der relativ langen Dauer der Perioden, auch unter optimalen Temperaturbedingungen, wurde der Einfluss von Tagesschwankungen reduziert.

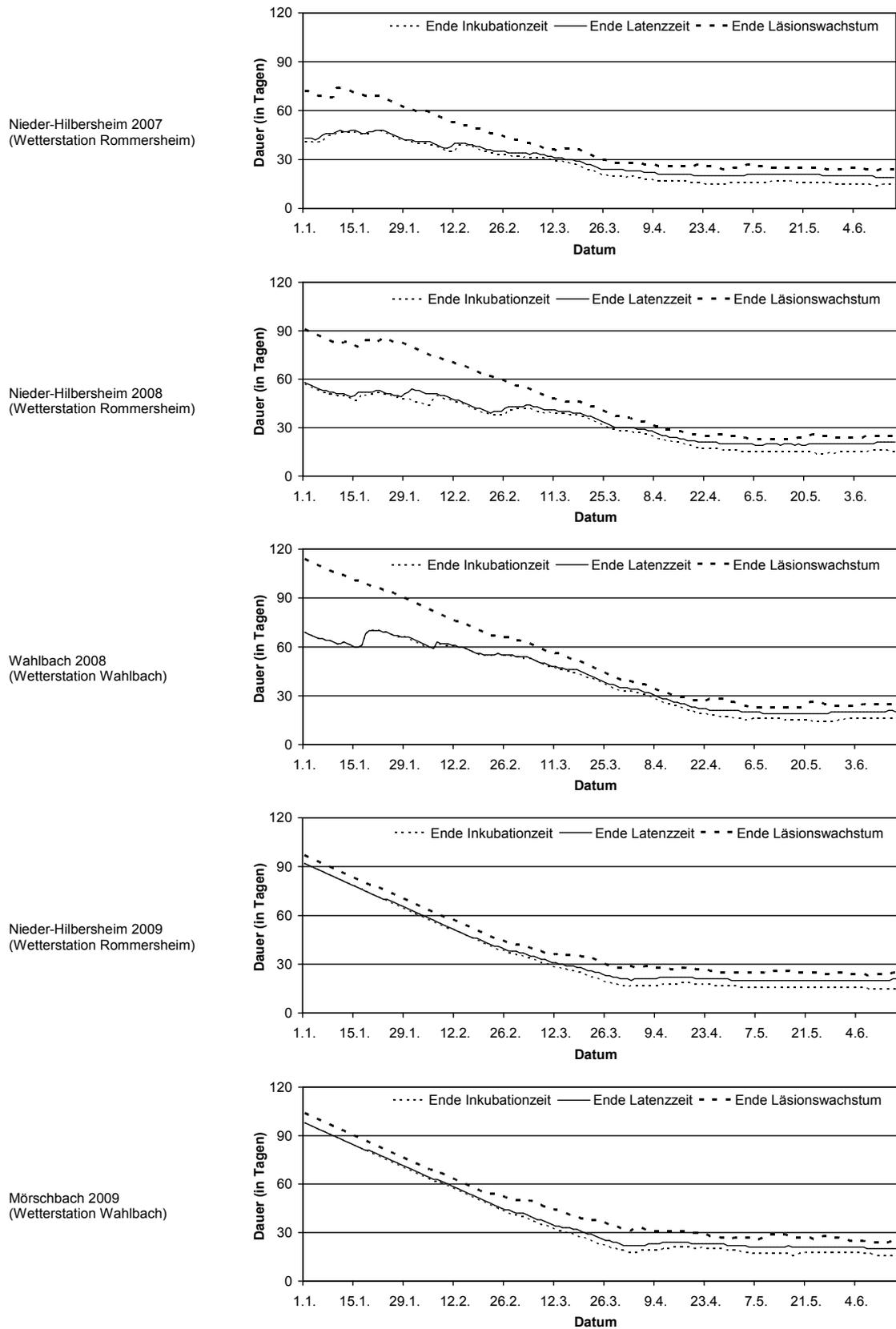


Abbildung 25: Dauer bis zum Ende der Inkubationszeit, der Latenzzeit und des Läsionswachstums (= Latenzzeit + Dauer der Pyknidienformation) für Sorten mittlerer Anfälligkeit für den Zeitraum vom 1. Januar bis 15. Juni an den Standorten der Exakt-Bonituren (2007-2009). Berechnungen in Abhängigkeit der gemessenen Temperaturen.

4.2 Pyknidiendichte

Die Pyknidiendichte beschreibt Sortenunterschiede an natürlich infizierten Pflanzen und wurde bei der Modellentwicklung berücksichtigt. Sie berechnet sich aus den erhobenen Daten der Läsionsgröße und der Anzahl der Pyknidien. Zur Auswertung waren die Daten von zwei gering anfälligen Sorten (Solitär und Skagen) und von drei stark anfälligen Sorten (Biscay, Cubus und Drifter) für die Blattetagen von F-5 bis zum Fahnenblatt verfügbar. Aus der Gesamtheit aller Daten wurden die Ausreißer- und Extremwerte entfernt. Mit den bereinigten Daten wurden die folgenden Auswertungen durchgeführt.

Der im Modell verwendete Sortenfaktor differenziert sich in Abhängigkeit der Blattetage und der Sortenanfälligkeit für die drei Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit. Daher wurden die Versuchsergebnisse für die Abhängigkeit von Pyknidiendichte und Sorten sowie für die Abhängigkeit von Pyknidiendichte und Blattetage aufbereitet. Im ersten Box-Plot ist die Pyknidiendichte in Abhängigkeit der untersuchten Sorten dargestellt. Dazu wurden alle verfügbaren Werte der verschiedenen Blattetagen den jeweiligen Sorten zugeordnet (Abbildung 26). Die Pyknidiendichte der gering anfälligen Sorten unterschied sich signifikant von den stark anfälligen Sorten. Im Bezug auf die drei stark anfälligen Sorten war die Pyknidiendichte der Sorte Cubus etwas geringer, was zu einem signifikanten Unterschied führte. Tendenziell ordnete sich diese Sorte jedoch eindeutig zu den beiden anderen stark anfälligen Sorten.

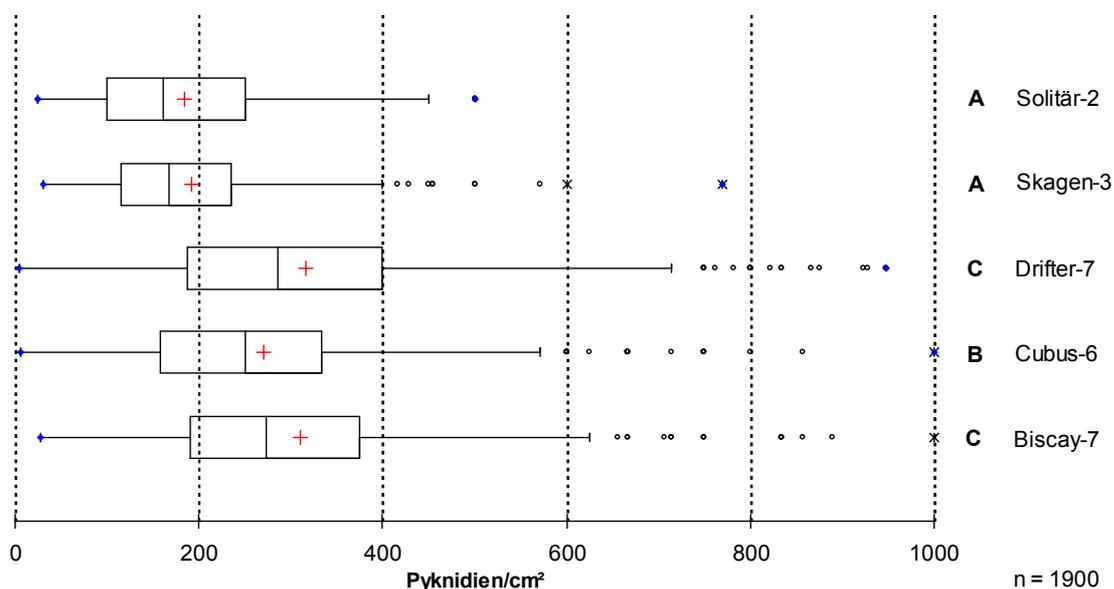


Abbildung 26: Pyknidiendichte pro cm² Läsionsfläche in Abhängigkeit der verschiedenen Sorten. Varianzanalyse mit den Daten der oberen sechs Blattetagen mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Sorten mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

Zur Analyse der Pyknidiendichte in Abhängigkeit von der Blattetage wurden die Daten aller Sorten einer Blattetage zusammen betrachtet. Die Auswertung ergab signifikante Unterschiede für alle betrachteten Blattetagen, mit Ausnahme der Blattetagen F-4 und F-5. Die Mittelwerte der Pyknidiendichte erhöhten sich mit steigender Blattetage. Auf dem Fahnenblatt wurde eine mittlere

Pykniendichte von über 400 Pyknidien pro cm^2 Läsionsfläche aus den erhobenen Daten berechnet. Im Vergleich zu dem Fahnenblatt war die Pykniendichte auf der Blattetage F-1 um 27% und auf der Blattetage F-2 um 40% geringer.

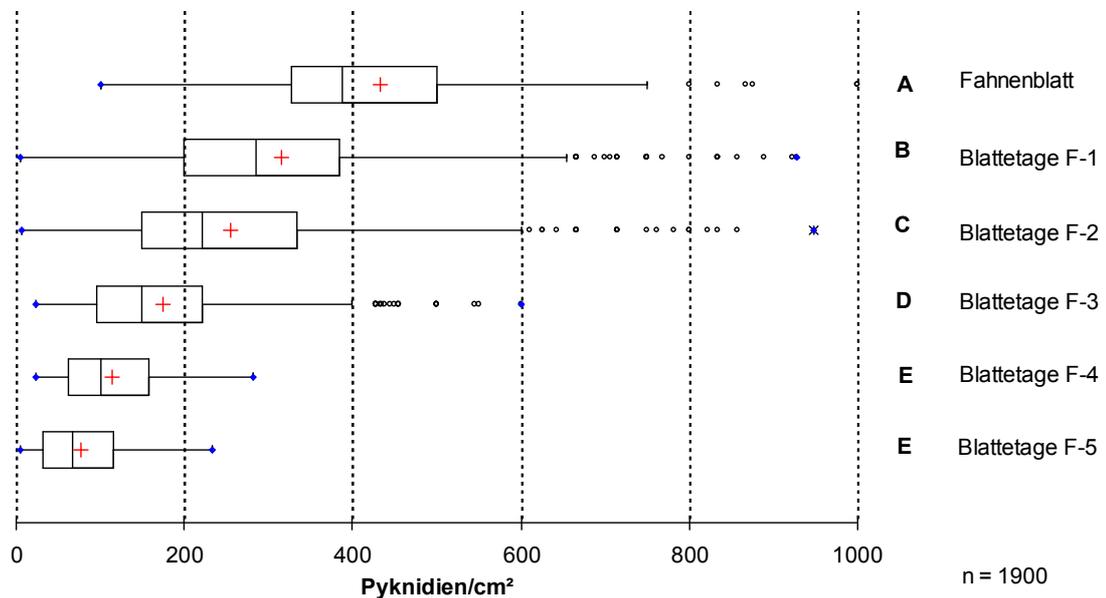


Abbildung 27: Pykniendichte pro cm^2 Läsionsfläche in Abhängigkeit der Blattetagen (+ = Mittelwert, | = Median). Varianzanalyse mit den Daten aller Sorten pro Blattetage und anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Blattetagen mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

4.2.1 Modellierung der Pykniendichte

Zur Modellierung der Daten zur Pykniendichte wurden die erhobenen Daten in Abhängigkeit von Sortenklasse und Blattetage zu dem höchsten Wert in Relation gesetzt. Mit den berechneten Werten der relativen Pykniendichte wurde für die Sortenklasse der gering anfälligen und der stark anfälligen Sorten eine lineare Regressionsanalyse durchgeführt (Gleichung [6]). Für die Sortenklasse gering anfällig wurden die Daten von Solitär und Skagen verwendet und für die Sortenklasse stark anfällig die Daten von Biscay, Cubus und Drifter.

Mit der linearen Regression konnten die Daten der Sortenklassen mit einem hohen Bestimmtheitsmaß angepasst werden. Die höchste relative Pykniendichte von eins wurde auf dem Fahnenblatt für die stark anfälligen Sorten ermittelt. Die Pykniendichte auf den Blättern der stark anfälligen Sorten stieg ausgehend von der Blattetage F-5 schneller an als bei den gering anfälligen Sorten (Tabelle 26, Abbildung 28).

Tabelle 26: Geschätzte Parameterwerte der linearen Regression (Gleichung [6]) der relativen Werte der Pyknidiendichte in Abhängigkeit der Blatttagen F bis F-5 und der Sortenklasse geringer und starker Anfälligkeit.

Variante	Parameter	Wert	Standardfehler	p	R ²
gering anfällig	<i>a</i>	1	0,0052	<0,0001	0,99
	<i>b</i>	-0,161	0,0017	<0,0001	
stark anfällig	<i>a</i>	0,689	0,0199	<0,0001	0,98
	<i>b</i>	-0,108	0,0066	<0,0001	

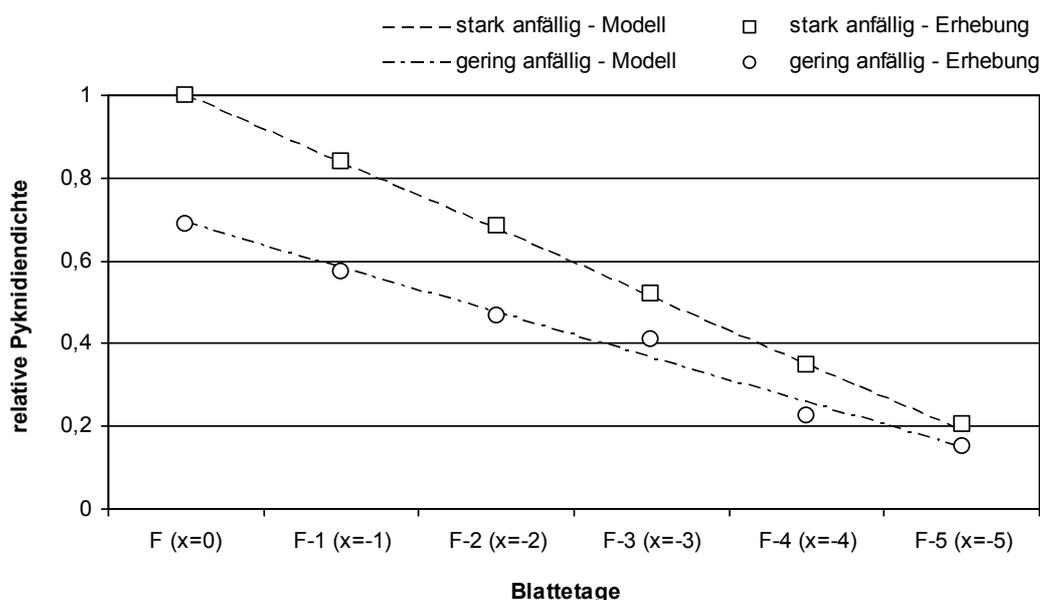


Abbildung 28: Relative Pyknidiendichte in Abhängigkeit von der Blatttage für die Mittelwerte der stark und gering anfälligen Sorten. Punkte markieren die berechneten Mittelwerte der erhobenen Daten, die x-Werte sind die Faktoren für die Blatttagen. (Lineare Regression (Gleichung [6])).

4.2.2 Sortenfaktor der Pyknidiendichte

Die jeweilige Pyknidiendichte für eine Sortenklasse und Blatttage berechnete sich nach der Gleichung [6] (lineare Regression) mit den Parameterwerten für die Sortenklasse aus der Tabelle 26 (relative Pyknidiendichte auf der Blatttage F und Steigung) sowie dem Faktor für die Blatttage. Für die Berechnung der Pyknidiendichte der Sorten mittlerer Anfälligkeit wurden die mittleren Parameterwerte von *a* und *b* der gering und stark anfälligen Sortenklasse verwendet. In der Tabelle 27 sind die im Modell verwendeten Sortenfaktoren für die Blatttagen dargestellt.

Tabelle 27: Sortenfaktor der Pyknidiendichte in Abhängigkeit von der Blattetage und der Sortenklasse geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit ($SF_{PD}(SK; Fy)$).

		Sortenklasse		
		gering anfällig	mittel anfällig	stark anfällig
Blatttage	F	0,69	0,84	1
	F-1	0,58	0,71	0,84
	F-2	0,47	0,58	0,68
	F-3	0,36	0,44	0,52
	F-4	0,26	0,31	0,36

4.3 Anzahl der Läsionen, Pyknidiendichte und Pyknosporenlänge

Dargestellt ist das Ergebnis der relativen Anzahl an Läsionen als Mittelwert der oberen drei Blatttagen in Abhängigkeit der Sorten. Für jede Blatttage wurden 50 Werte pro Sorte erhoben. Die relative Anzahl der Läsionen wurde bestimmt, indem der größte absolute Wert gleich eins gesetzt wurde. Das Ergebnis der statistischen Auswertung ergab signifikante Unterschiede zwischen den gering und stark anfälligen Sorten. Für die stark anfälligen Sorten wurden bei Drifter im Mittel die meisten Läsionen gezählt (Abbildung 29). Die Ergebnisse der Untersuchungen zur Anzahl der Läsionen belegten Unterschiede in der Sortenanfälligkeit. Sie wurden jedoch nicht bei der Modellentwicklung berücksichtigt, da die sortenspezifische Befallsentwicklung durch die verwendeten Parameter zureichend abgebildet wurde.

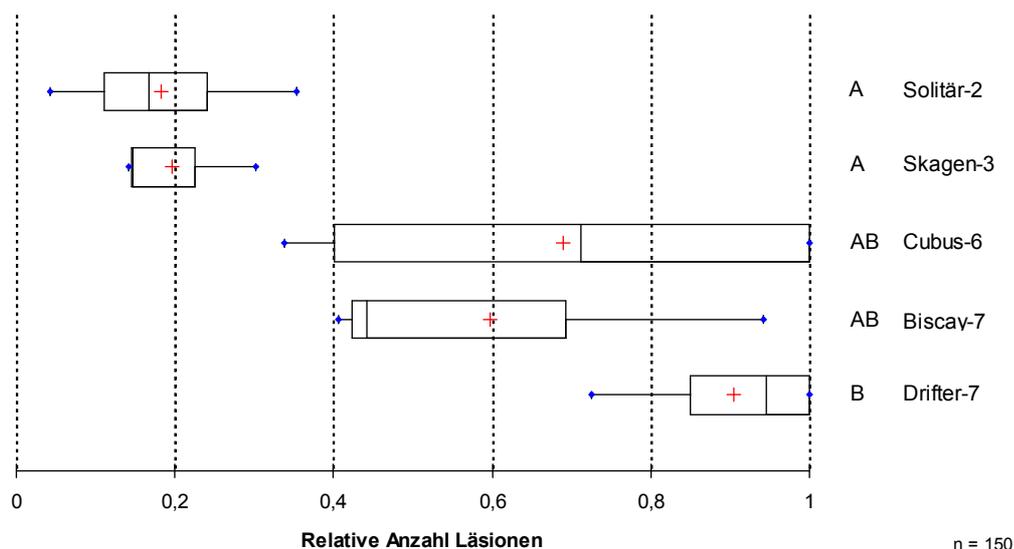


Abbildung 29: Relative Anzahl der Läsionen für fünf Sorten verschiedener Septoria-Anfälligkeit (+ = Mittelwert, | = Median). Varianzanalyse mit allen Daten je Sorte und anschließendem Tukey-Test ($\alpha = 0,05$). Sorten mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

Pyknidiengröße

Zur Auswertung der Pyknidiengröße wurden die Extremwerte und Ausreißer mit Hilfe einer Boxplot-Analyse aus den Datensätzen entfernt. Die Mittelwerte differenzieren sich in Abhängigkeit vom Boniturtermin. An jedem Termin wurden die Pyknidien auf Blättern zweier Blattetagen bonitiert. Mit steigender Blattetage nahm die Größe der Pyknidien ab. Zwischen den Terminen betrug die mittlere Differenz der Pyknidiengröße ca. 0,3 mm².

Die stark anfällige Sorte Drifter unterschied sich zu jedem Termin signifikant von den anderen Sorten. Tendenziell wiesen die stark anfälligen Sorten größere und die gering anfälligen Sorten kleinere Pyknidien auf. Es wurden zwar signifikante Unterschiede berechnet, jedoch ergab sich keine Korrelation zur Septoria-Anfälligkeit (Abbildung 30).

Die Pyknidiengröße unterschied sich nicht in Abhängigkeit der Sortenanfälligkeit und konnte daher bei der Modellentwicklung vernachlässigt werden.

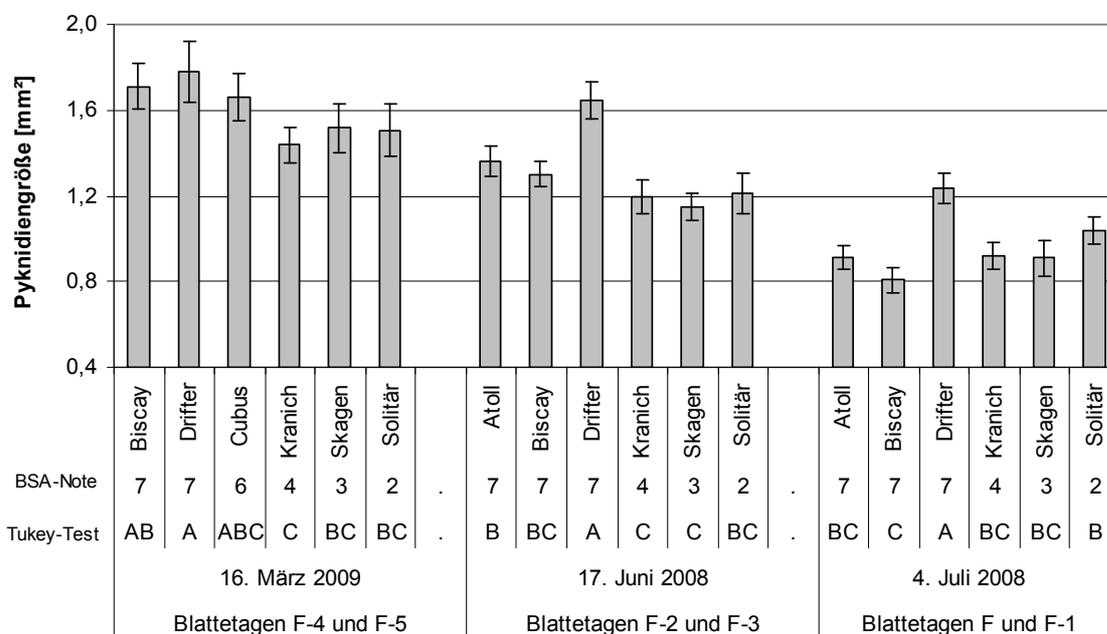


Abbildung 30: Mittlere Pyknidiengröße in Abhängigkeit von der Blattetage gemessen an drei Terminen für sechs verschiedene Sorten. Striche markieren den Standardfehler. Für jede Sorte sind die BSA-Note und das Ergebnis der Varianzanalyse mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$) angegeben. Für jeweils einen Termin unterscheiden sich die Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Sporenlänge

Die Untersuchungen zur Sporenlänge zeigten keine sortenabhängigen Unterschiede (Abbildung 31). Die Mittelwerte der Sorten lagen in einem Bereich von 0,06 mm (Sorte Kranich) bis 0,067 mm (Sorte Biscay). Tendenziell wurden für die Sorte Kranich geringere Sporenlängen gemessen, die jedoch nicht signifikant verschieden zu den Sporenlängen der anderen Sorten waren.

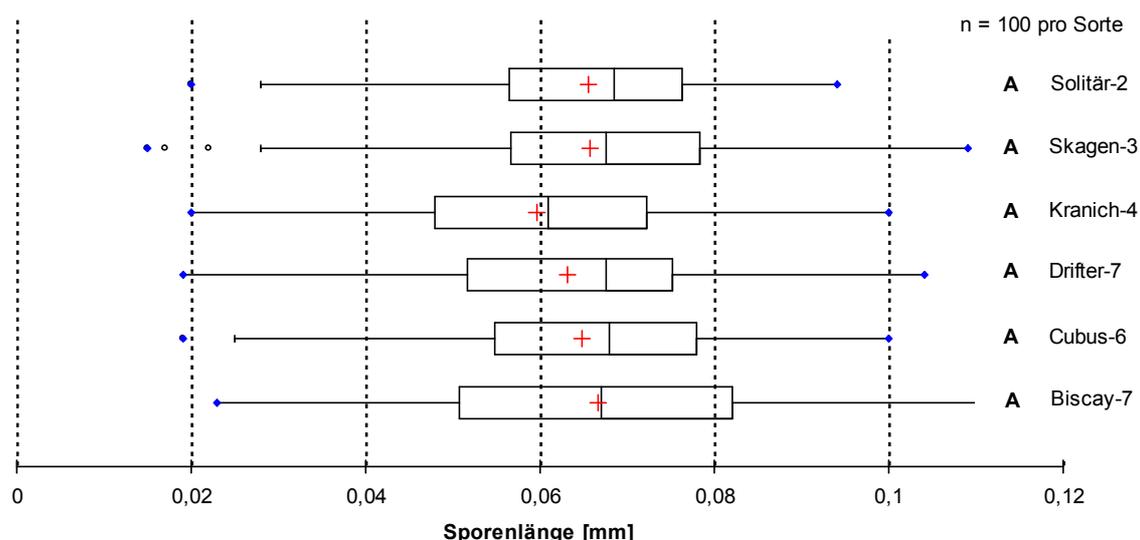


Abbildung 31: Boxplot-Ergebnis der Messung der Sporenlänge von *S. tritici* für Sorten verschiedener Anfälligkeit (+ = Mittelwerte, | = Median). Rechts Ergebnis der Varianzanalyse mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Sorten mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

4.4 Freilandhebungen

Zur Darstellung der sortenabhängigen Befallsverläufe von *S. tritici* an den Standorten der Exakt-Bonituren und der Erhebungen in den Landessortenversuchen Rheinland-Pfalz wurde für jeden Boniturtermin der Mittelwert der Befallsstärke der oberen drei Blattetagen gebildet (Mittelwerte der einzelnen Blattetagen nach Gleichung [8]). In den Grafiken (Abbildung 32 bis Abbildung 47) sind die sortenabhängigen Verläufe der Befallsstärken im Boniturzeitraum sowie das 95%-Konfidenzintervall dargestellt. Zusätzlich veranschaulichen Tabellen die Ergebnisse der Varianzanalyse der AUDPC-Werte mit anschließendem Tukey-Test (Tabelle 28 bis Tabelle 32). Die AUDPC-Werte wurden dabei für jede Wiederholung berechnet (Gleichung [9]).

Für die Darstellung der Boniturergebnisse der Pflanzenschutzdienste der Länder wurde auf die Abbildung einzelner Befallsverläufe verzichtet. Die Boniturergebnisse wurden anhand der AUDPC-Werte ausgewählter Sorten und Standorten dargestellt.

4.4.1 Standorte der Exakt-Bonituren

Im Boniturjahr 2007 wurden Anfang Juni die ersten Septoria-Läsionen auf den oberen drei Blattetagen sichtbar. In der Woche vom 5. bis 13. Juni war bei allen Sorten der stärkste Befallszuwachs zu verzeichnen. Das Boniturrende war bereits eine Woche später erreicht. In dieser kurzen Zeit der Befallsentwicklung konnten sich Sortenunterschiede nur schwach ausprägen (Abbildung 32). Die mittlere Befallsstärke der stark anfälligen Sorten Atoll und Drifter war immer etwas höher im Vergleich zu den Mittelwerten der gering anfälligen Sorte Solitär und der mittelstark anfälligen Sorte Dekan.

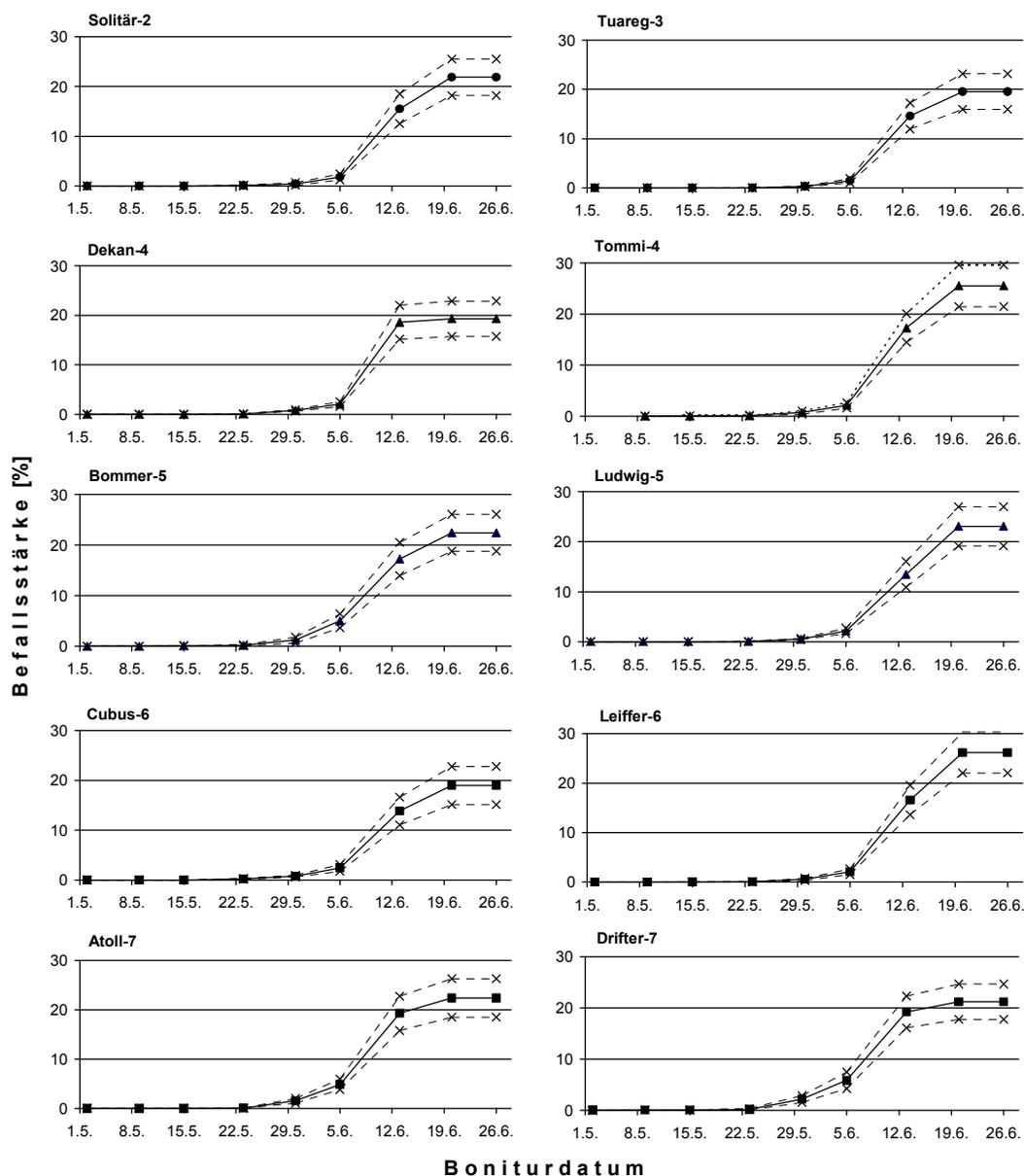


Abbildung 32: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Exakt-Bonituren in **Nieder-Hilbersheim 2007** (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

Das Erstauftreten von Septoria-Läsionen erfolgte bei den stark anfälligen Sorten ca. eine Woche früher als bei den gering anfälligen Sorten. Die Varianzanalyse der AUDPC-Werte der einzelnen Wiederholungen für den Standort Nieder-Hilbersheim 2007 ergab keine statistischen Unterschiede zwischen den Sorten.

Im Boniturjahr 2008 zeigten die Boniturdaten beider Standorte deutliche Sortenunterschiede in der Septoria-Anfälligkeit. Am Standort Nieder-Hilbersheim stieg der Septoria-Befall ca. zwei Wochen früher an als am Standort Wahlbach (Abbildung 33 und Abbildung 34). Die Epidemie am Standort Nieder-Hilbersheim baute sich langsamer auf. In Wahlbach stieg die Befallsstärke innerhalb von drei Wochen auf das Maximum an, wobei sich die anfälligen Sorten bereits zu Beginn deutlich differenzierten. An beiden Standorten erreichten die stark anfälligen Sorten Atoll und Biscay bis zum Boniturrende die höchsten Befallsstärken und die gering anfälligen Sorten Solitär und Skagen zeigten geringere Befallsstärken. Die Sortenunterschiede waren für den Standort Wahlbach stärker ausgeprägt als in Nieder-Hilbersheim. Für Wahlbach betrug die Differenz der End-Befallsstärke zwischen der Sorte mit dem geringsten und höchsten Befall 19,8%. Für Nieder-Hilbersheim wurde eine Differenz von 13,2% berechnet.

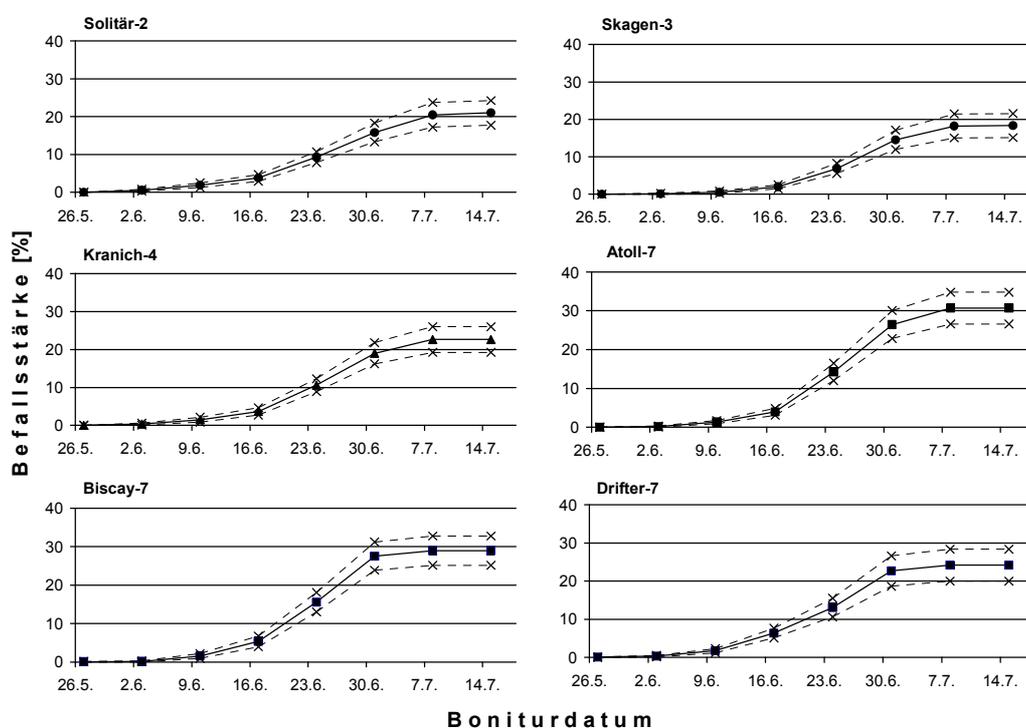


Abbildung 33: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Exakt-Bonituren in **Nieder-Hilbersheim 2008**. (Mittelwert der oberen drei Blätteragen und 95%-Konfidenzintervall).

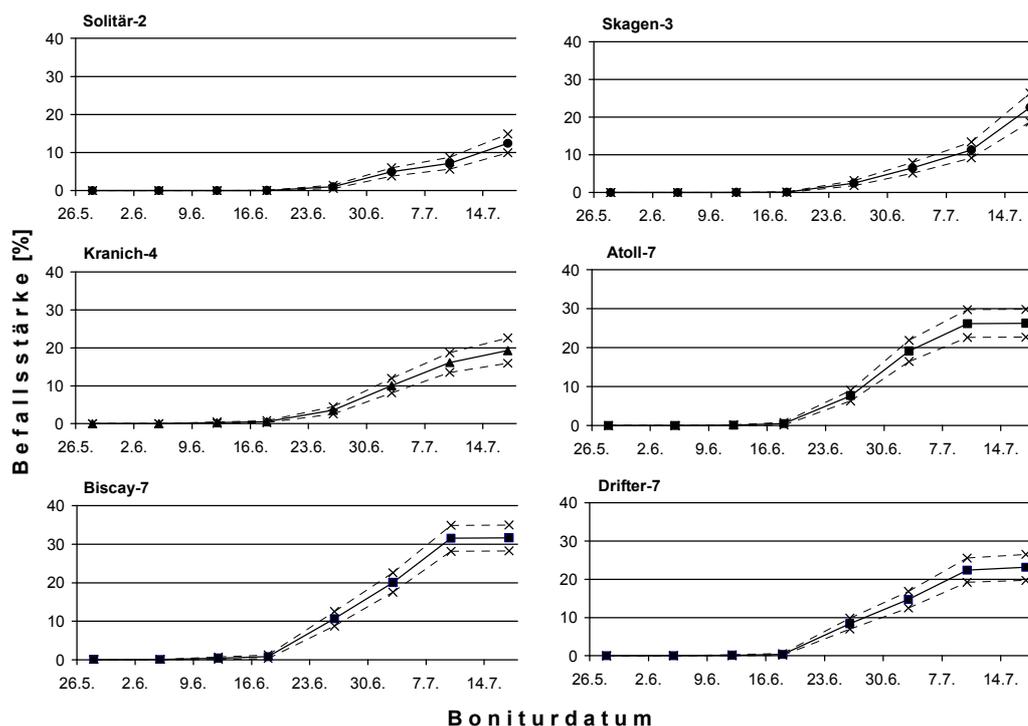


Abbildung 34: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Exakt-Bonituren in **Wahlbach 2008**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

Tabelle 28: Varianzanalyse der AUDPC-Werte (%-Tage) am Standort der Exakt-Bonituren in Nieder-Hilbersheim und Wahlbach 2008 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jeden Standort unterscheiden sich Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Nieder- Hilbersheim 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppe		
Skagen-3	51,32	A		
Solitär-2	61,90	A	B	
Kranich-4	72,57	A	B	C
Drifter-7	82,40		B	C
Biscay-7	94,00			C
Atoll-7	94,31			C

Wahlbach 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppen		
Solitär-2	31,96	A		
Skagen-3	55,22	A	B	
Kranich-4	60,03	A	B	
Drifter-7	82,07		B	C
Atoll-7	97,80			C
Biscay-7	112,94			C

Die Varianzanalyse mit anschließendem Tukey-Test ergab für beide Standorte eine signifikante Unterscheidung der Sorten geringer und starker Anfälligkeit. Die Sorte Kranich wurde tendenziell mit einer mittleren Anfälligkeit eingestuft (Tabelle 28).

In Abbildung 35 und Abbildung 36 sind für das Boniturjahr 2009 deutliche Sortenunterschiede in der Befallsentwicklung zu sehen. Der Befall auf den oberen drei Blattetagen am Standort Mörschbach wurde eine Woche früher sichtbar im Vergleich zu Nieder-Hilbersheim. Jedoch war die Befallszunahme in Nieder-Hilbersheim größer und der Maximalbefall am Boniturrende höher. Die als stark anfällig eingestuft Sorten hatten eine höhere mittlere Befallsstärke auf den oberen drei Blattetagen. Am Standort Nieder-Hilbersheim betrug die Differenz der End-Befallsstärke zwischen der Sorte mit dem geringsten und höchsten Befall 15,5% und in Mörschbach 13,9%. Als stark anfällig konnten demnach die Sorten Biscay und Drifter eingestuft werden. Die Sorten Skagen und Solitär konnten der Sortenklasse geringer Anfälligkeit zugeordnet werden.

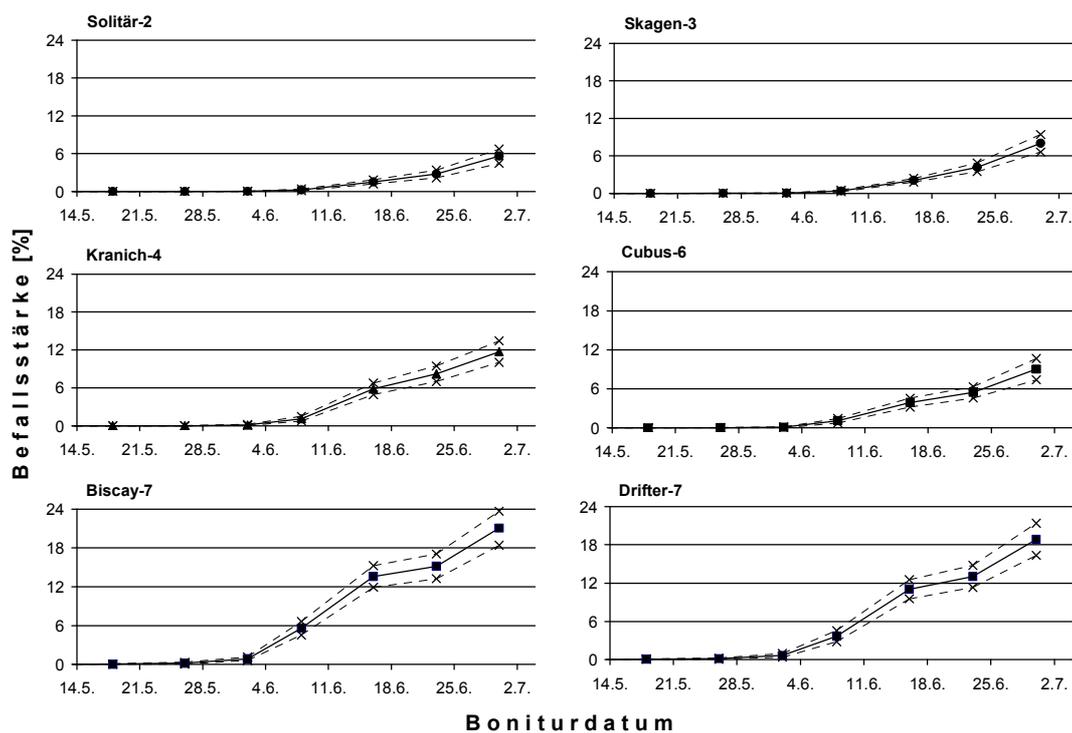


Abbildung 35: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Exakt-Bonituren in **Nieder-Hilbersheim 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

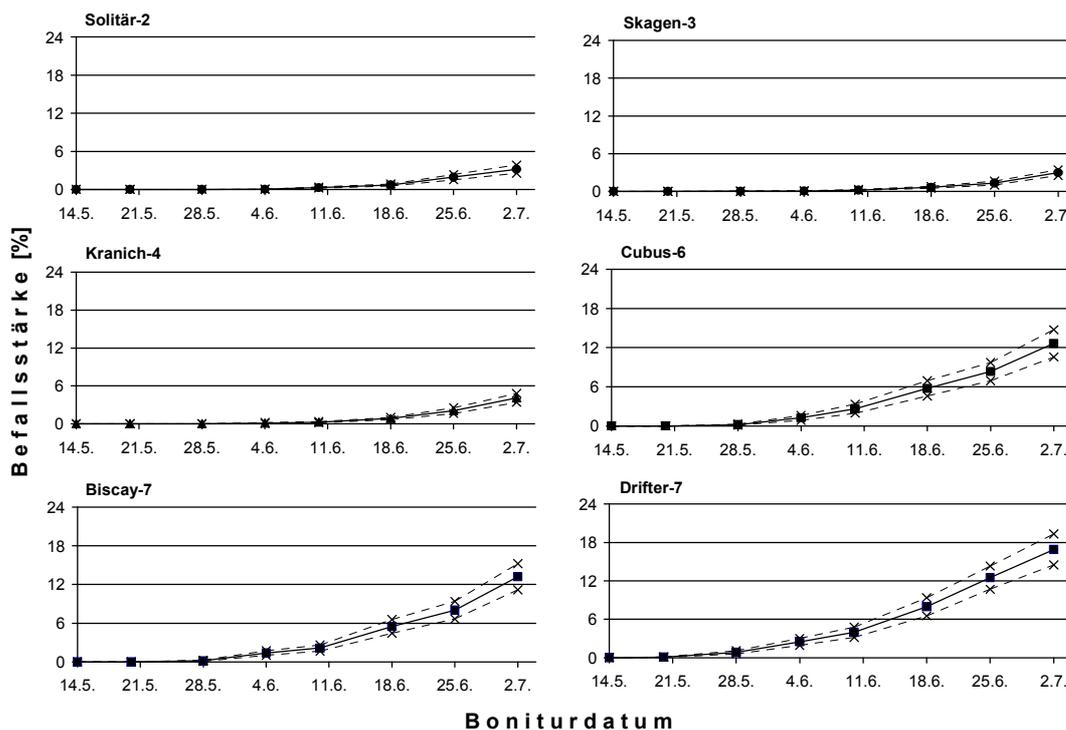


Abbildung 36: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Exakt-Bonituren in **Mörschbach 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

Tabelle 29: Varianzanalyse der AUDPC-Werte (%-Tage) am Standort der Exakt-Bonituren in Nieder-Hilbersheim und Mörschbach 2009 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jeden Standort unterscheiden sich Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Nieder- Hilbersheim 2009

Sorte	Mittelwert	Gruppe
Solitär-2	7,32	A
Skagen-3	10,74	A B
Cubus-6	15,04	A B
Kranich-4	21,18	B
Drifter-7	38,10	C
Biscay-7	45,95	C

Mörschbach 2009

Sorte	Mittelwert	Gruppen
Skagen-3	3,76	A
Solitär-2	4,57	A
Kranich-4	5,41	A
Biscay-7	23,83	B
Cubus-6	24,48	B
Drifter-7	36,30	C

Die Tabelle 29 verdeutlicht diese Einstufung der Sorten. Die stark und gering anfälligen Sorten waren signifikant verschieden voneinander. Die Sorten Kranich und Cubus ordneten sich in den Bereich der mittleren Anfälligkeit ein.

Zusammenfassend belegen die Ergebnisse für die verschiedenen Standorte und Sorten eine Übereinstimmung zu den BSA-Noten der Septoria-Anfälligkeit. In den Boniturjahren 2008 und 2009 bestätigen signifikante Unterschiede die Einteilung der Sortenklassen.

Am Standort Nieder-Hilbersheim wurden im Jahr 2009 bereits Ende April DTR-Läsionen sichtbar. Diese konnten in Laboruntersuchungen eindeutig als solche identifiziert werden und bei den Freilandbonituren als solche angesprochen werden.

Im Gegensatz zu den Boniturjahren 2007 und 2008 zeigten die Befallsverläufe 2009 keinen asymptotischen Verlauf der maximalen Befallsstärke am Boniturende. Diese Unterschiede lassen sich witterungsbedingt mit einem verzögerten bzw. beschleunigten Absterben der oberen Blätter erklären. In allen Jahren wurden die Bonituren durchgeführt bis an 90% der Pflanzen das Fahnenblatt abgestorben war. Ein verkürzter Boniturzeitraum war nicht die Ursache für diesen Sachverhalt.

4.4.2 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz (LSV-RP)

Die Befallsentwicklung von *S. tritici* in den Landessortenversuchen Rheinland-Pfalz ist ebenfalls für die mittlere Befallsstärke der oberen drei Blattetagen (F bis F-2) dargestellt. Das erste Datum in den folgenden Abbildungen bezieht sich auf den Termin, an dem das BBCH-Stadium 39 überschritten war. Vor diesem Termin waren die oberen drei Blattetagen in keinem Boniturjahr befallen.

In den folgenden Abbildungen sind die Befallsverläufe der bonitierten Sorten für das Jahr 2007 dargestellt. Am Standort Herxheim erhöhte sich die mittlere Befallsstärke auf den oberen drei Blattetagen bereits nach dem 30.05.2007. An den anderen beiden Standorten wurde ein Befallsanstieg erst eine Woche später beobachtet. Das Boniturende, und somit das Befallsmaximum, war bereits zwei Wochen später erreicht (Standort Uhler nach drei Wochen). Sowohl die Betrachtung der einzelnen Standorte als auch der Vergleich aller Standorte ergab keine Zusammenhänge der Sortenunterschiede in Abhängigkeit zur BSA-Note. An den Standorten Herxheim und Uhler war am letzten Boniturtermin bereits jeweils eine Sorte abgestorben (Abbildung 37 bis Abbildung 39).

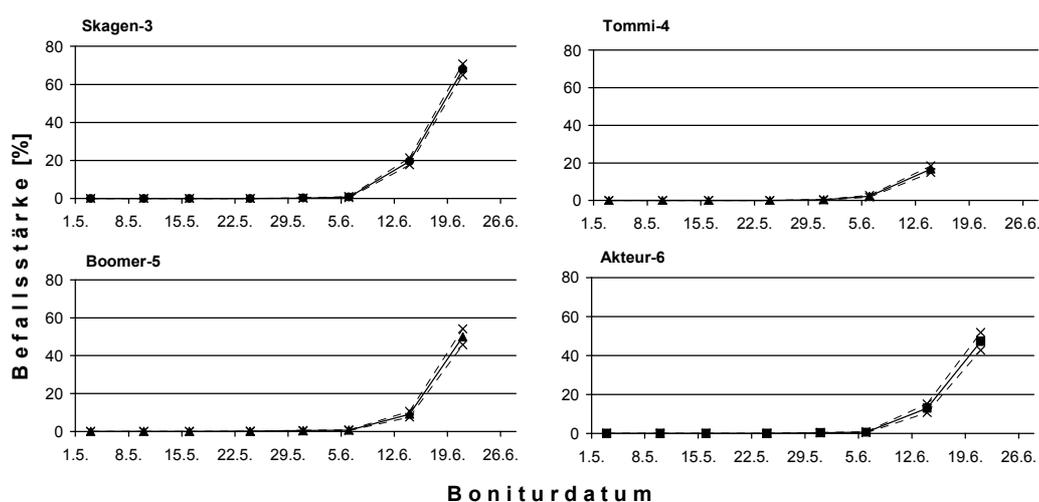


Abbildung 37: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in Herxheim 2007. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

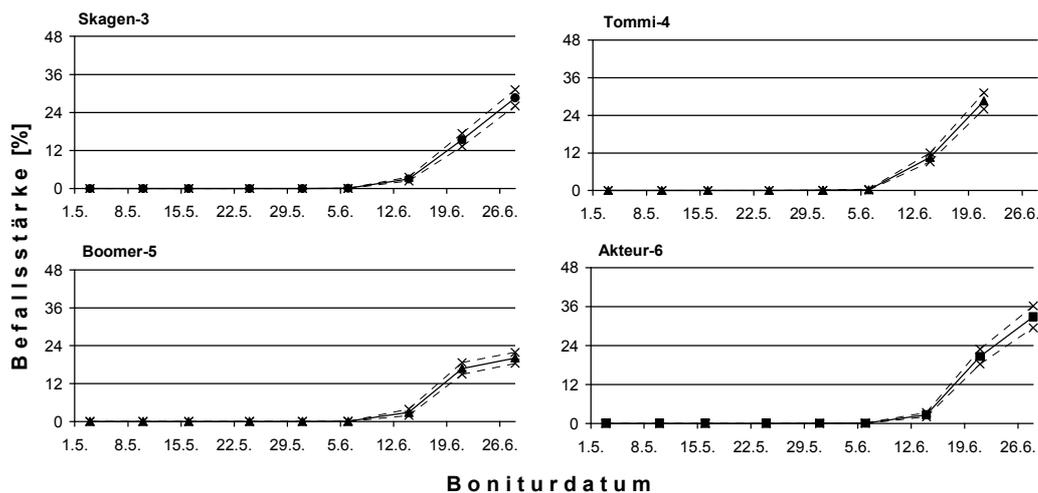


Abbildung 38: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in Uhler 2007. (Mittelwert der oberen drei Blätteragen und 95%-Konfidenzintervall).

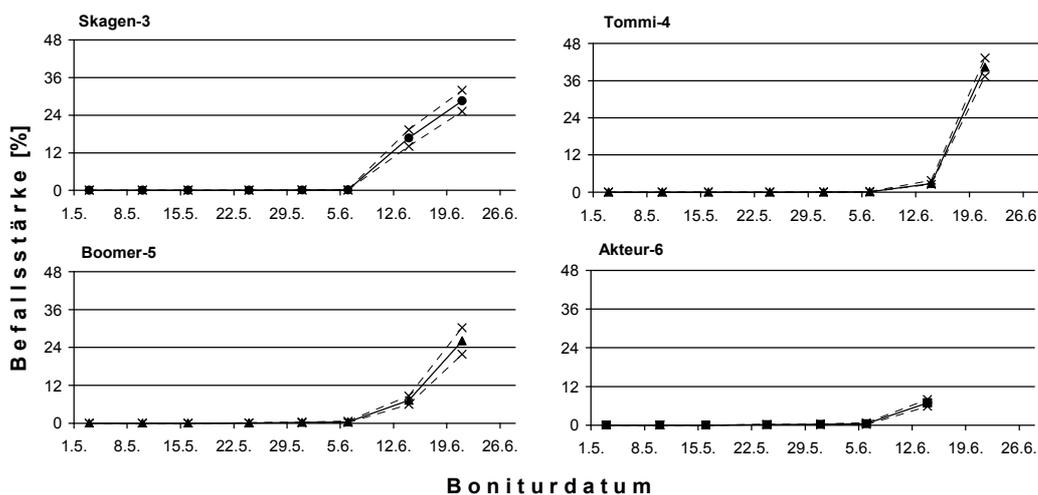


Abbildung 39: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in Wörrstadt 2007. (Mittelwert der oberen drei Blätteragen und 95%-Konfidenzintervall).

Für die Varianzanalyse wurden am Standort Herxheim die Bonituren einschließlich 14.06.07 berücksichtigt, für Uhler und Wörrstadt bis zum 21.06.07. Die Auswertung auf signifikante Unterschiede hat für das Jahr 2007 keinen Zusammenhang zwischen den mittleren AUDPC-Werten und den BSA-Noten der Sorten ergeben. Die als gering anfällig eingestufte Sorte Skagen hatte an den Standorten Herxheim und Wörrstadt den stärksten Septoria-Befall.

Tabelle 30: Varianzanalyse der AUDPC-Werte (%-Tage) am Standort der Landessortenversuche in Herxheim, Uhler und Wörrstadt 2007 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jeden Standort unterscheiden sich Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Herxheim 2007		
Sorte	Mittelwert	Gruppe
Boomer-5	5,73	A
Akteur-6	8,31	A B
Tommi-4	9,72	A B
Skagen-3	10,44	B

Uhler 2007		
Sorte	Mittelwert	Gruppe
Skagen-3	10,74	A
Boomer-5	11,52	A
Akteur-6	13,22	A
Tommi-4	23,89	B

Wörrstadt 2007		
Sorte	Mittelwert	Gruppe
Akteur-6	13,15	A
Boomer-5	22,32	A
Tommi-4	22,72	A
Skagen-3	36,31	B

Die Befallsverläufe des Boniturjahres 2008 belegen Sortenunterschiede in der Septoria-Anfälligkeit. Drei bis vier Wochen vor Boniturrende nahm der Septoria-Befall auf den oberen drei Blättern an allen vier Standorten zu. Am Standort Wörrstadt entwickelte sich nur eine schwache Epidemie. Der Maximalbefall der stark anfälligen Sorte Akteur erreichte knapp 5%. Für die gering anfällige Sorte Jenga blieb der Befall unter 1%. An den Standorten Herxheim und Biedesheim erreichte die Differenz zwischen der stark und der gering anfälligen Sorte zum Boniturrende 18,6% bzw. 7,3%. Der Septoria-Befall am Standort Kümbdchen entwickelte sich über fünf Wochen und erreichte am letzten Boniturtermin eine Differenz von 17,3% zwischen Jenga und Akteur. Das Boniturrende wurde an allen Standorten mit Ausnahme von Herxheim in derselben Woche erreicht (Abbildung 40 bis Abbildung 43).

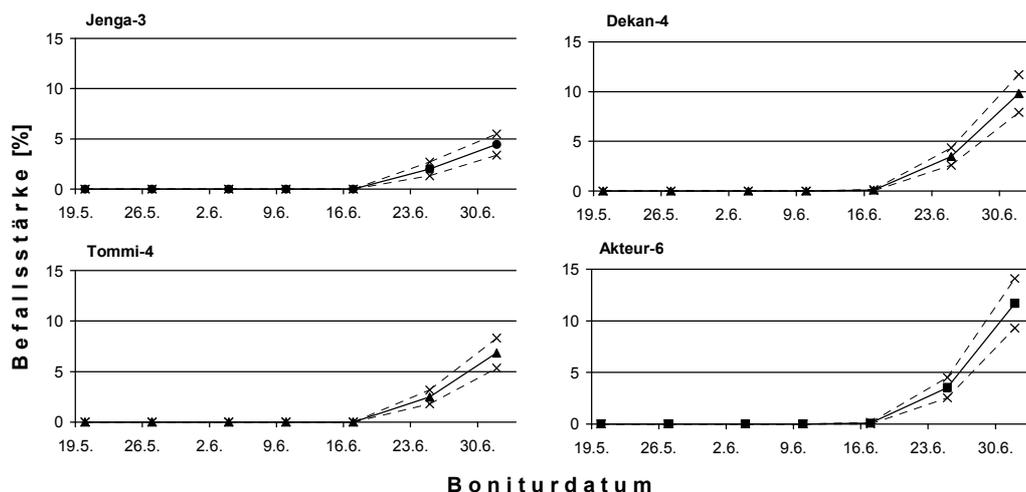


Abbildung 40: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in Biedesheim 2008. (Mittelwert der oberen drei Blättern und 95%-Konfidenzintervall).

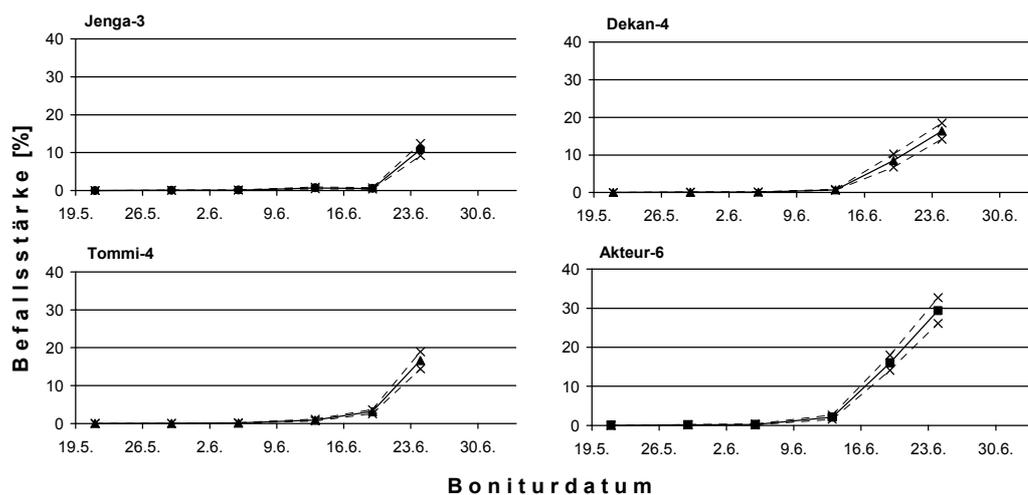


Abbildung 41: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Herxheim 2008**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

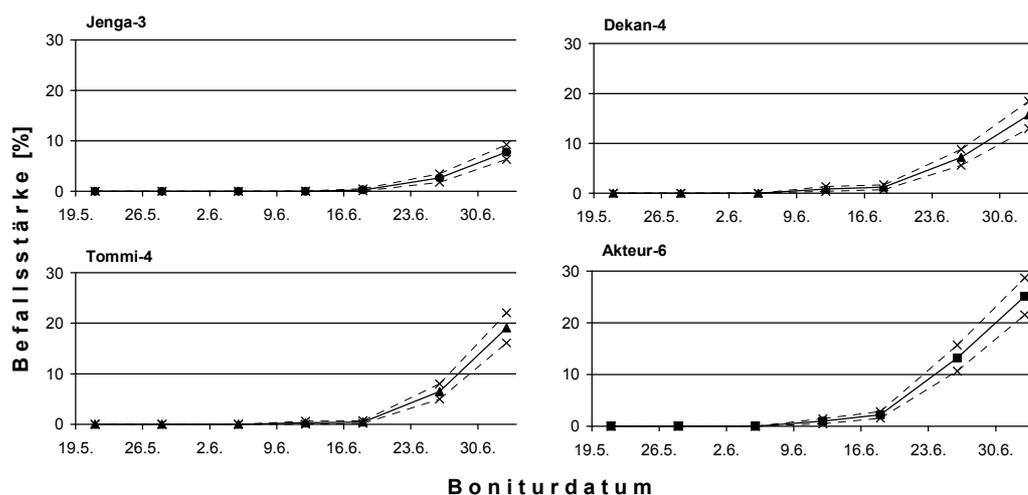


Abbildung 42: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Kümbdchen 2008**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

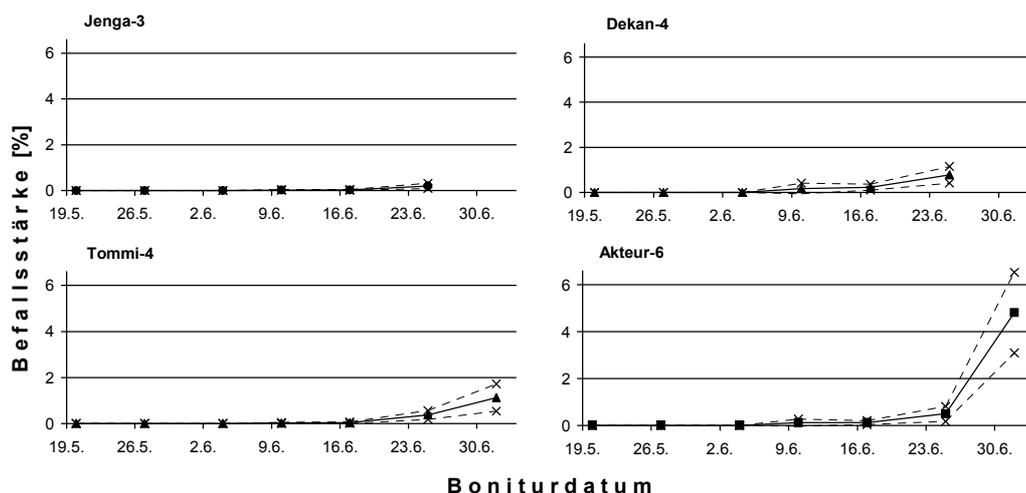


Abbildung 43: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Wörrstadt 2008**. (Mittelwert der oberen drei Blatttagen und 95%-Konfidenzintervall).

An allen Standorten unterschied sich die stark anfällige Sorte Akteur von der gering anfälligen Sorte Jenga (Tabelle 31). Für den Standort Wörrstadt war dies nur tendenziell zutreffend, an den anderen drei Standorten berechneten sich signifikante Unterschiede. Die Sorten Dekan und Tommi ordneten sich nach dem Mittelwert der AUDPC in den Bereich mittlere Anfälligkeit ein. Im Jahr 2008 konnten die Berechnungen der AUDPC für alle Standorte bis zum jeweils letzten Boniturermin durchgeführt werden.

Tabelle 31: Varianzanalyse der AUDPC-Werte (%-Tage) am Standort der Landessortenversuche in Biedesheim, Herxheim, Kümbdchen und Wörrstadt 2008 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jeden Standort unterscheiden sich Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Biedesheim 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	4,22	A
Tommi-4	5,74	A B
Dekan-4	8,37	B C
Akteur-6	8,87	C

Herxheim 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	6,85	A
Tommi-4	12,44	B
Dekan-4	17,46	C
Akteur-6	33,17	D

Kümbdchen 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	6,82	A
Tommi-4	15,45	A B
Dekan-4	17,28	A B
Akteur-6	28,89	B

Wörrstadt 2008

Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	0,16	A
Tommi-4	0,24	A
Akteur-6	0,46	A
Dekan-4	0,78	A

Im Jahr 2009 erhöhte sich der Befall der Sorten Akteur und Mulan an den Standorten Biedesheim, Herxheim und Kümbdchen ca. fünf Wochen vor Boniturrende. Der Befallsanstieg für die gering anfällige Sorte Jenga verzögerte sich um eine bis drei Wochen. Bei der Sorte Dekan war der Befall ebenfalls auf einem vergleichsweise niedrigen Niveau. Das Boniturrende war in Biedesheim drei Wochen später als in Herxheim und Wörrstadt erreicht. Der End-Befall der stark anfälligen Sorte

Akteur betrug am Standort Biedesheim 9,1% und in Kümbdchen 14,0%, mit Differenzen zur gering anfälligen Sorte Jenga von 5,1% und 13,5%. Die Sortenunterschiede wurden am Standort Herxheim ebenso mit einer hohen Differenz der Sorten Akteur und Jenga belegt. An diesem Standort lag der Maximalbefall bei 54,9%. Der Septoria-Befall am Standort Wörrstadt war auch im Jahr 2009 sehr gering. Die mittlere End-Befallsstärke für die stark anfällige Sorte Akteur betrug am letzten Boniturtermin lediglich 2,5%, jedoch auch an diesem Standort mit einer Differenz von 2,2% zur gering anfälligen Sorte Jenga (Abbildung 44 bis Abbildung 47).

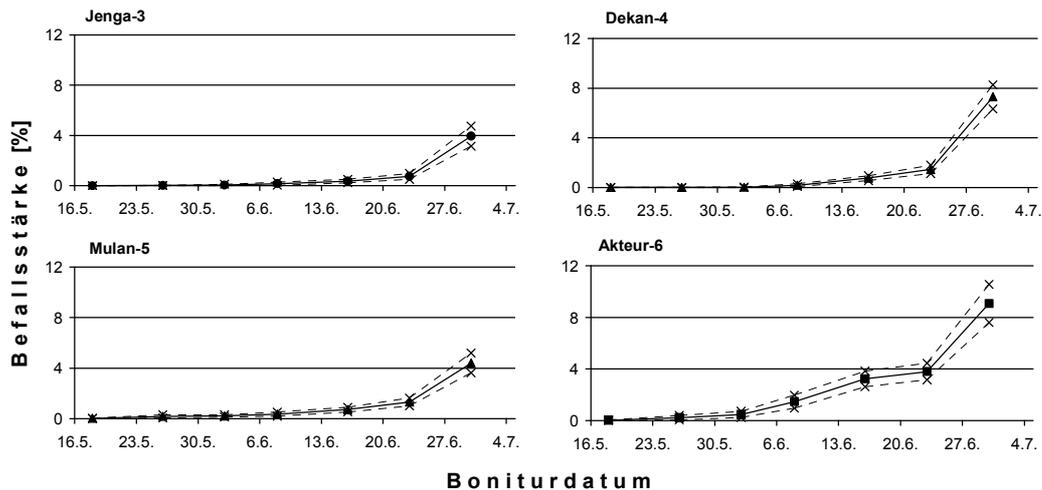


Abbildung 44: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Biedesheim 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blätteragen und 95%-Konfidenzintervall).

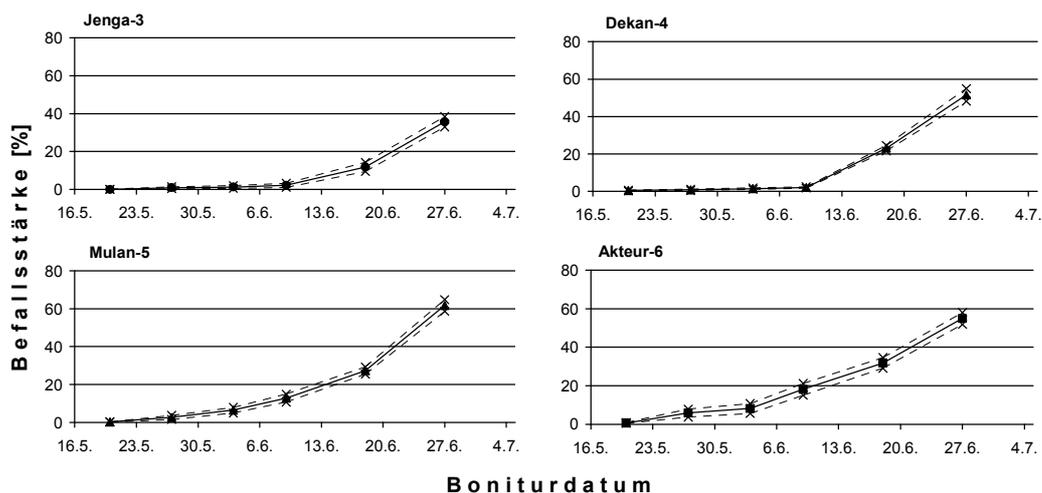


Abbildung 45: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Herxheim 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blätteragen und 95%-Konfidenzintervall).

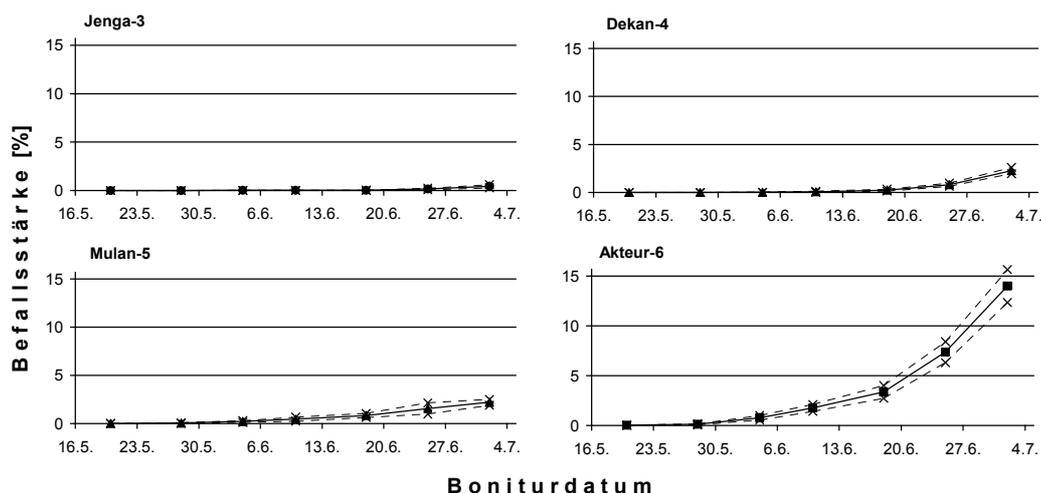


Abbildung 46: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Kümbdchen 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

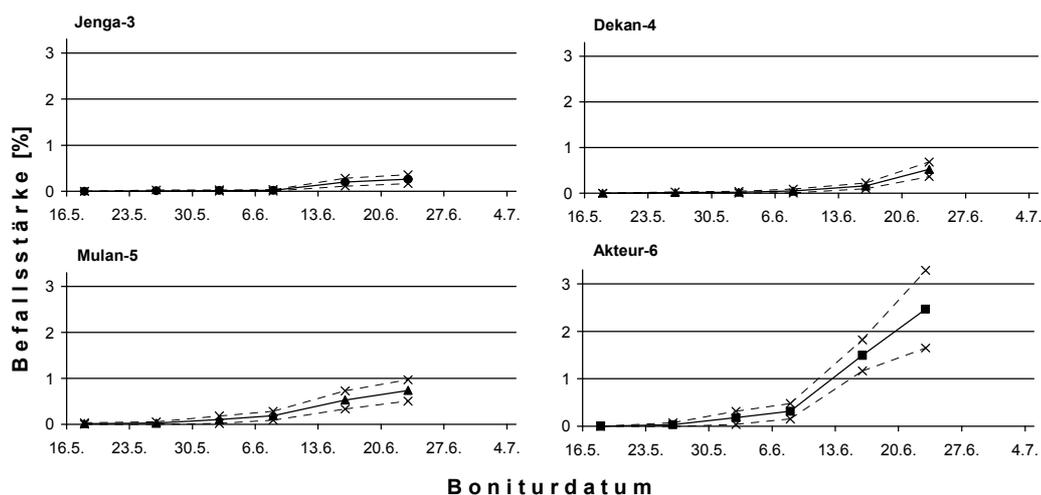


Abbildung 47: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der LSV in **Wörrstadt 2009**. (Mittelwert der oberen drei Blattetagen und 95%-Konfidenzintervall).

In Übereinstimmung zum Boniturjahr 2008 unterschieden sich die gering und stark anfälligen Sorten Jenga und Akteur an allen vier Standorten im Jahr 2009 signifikant voneinander (Tabelle 32). Im Jahr 2009 konnten auch für den Standort Wörrstadt die Unterschiede statistisch abgesichert werden. Ebenso waren die Sorten Dekan und Mulan mit den BSA-Noten 4 und 5 tendenziell im Bereich der mittleren Septoria-Anfälligkeit. Die AUDPC-Werte wurden für jeden Standort bis zum letzten Boniturtermin berechnet.

Tabelle 32: Varianzanalyse der AUDPC-Werte (%-Tage) am Standort der Landessortenversuche in Biedesheim, Herxheim, Kümbdchen und Wörrstadt 2009 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jeden Standort unterscheiden sich Sorten mit den gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Biedesheim 2009			Herxheim 2009		
Sorte	Mittelwert	Gruppe	Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	3,30	A	Jenga-3	34,05	A
Mulan-5	4,94	A	Dekan-4	53,58	B
Dekan-4	5,97	A	Mulan-5	80,44	C
Akteur-6	13,79	B	Akteur-6	89,80	C

Kümbdchen 2009			Wörrstadt 2009		
Sorte	Mittelwert	Gruppe	Sorte	Mittelwert	Gruppe
Jenga-3	0,43	A	Jenga-3	0,39	A
Dekan-4	2,28	A	Dekan-4	0,50	A
Mulan-5	4,20	A	Mulan-5	1,19	A
Akteur-6	21,06	B	Akteur-6	3,27	B

In Abbildung 48 sind alle Daten der Exakt-Bonituren und der Landessortenversuche der Boniturjahre 2008 und 2009 zusammengefasst. Das Boniturjahr 2007 wurde nicht berücksichtigt, da der Zusammenhang zwischen Befall und BSA-Note nicht immer gegeben war. Für jeden der zwölf Standorte wurde die Sorte mit dem höchsten Mittelwert der AUDPC gleich eins gesetzt (Mittelwert der Wiederholungen) und die übrigen Sorten dazu in Relation gesetzt. Die Sorten wurden in die Klassen geringe, mittlere und starke Anfälligkeit in Abhängigkeit der BSA-Noten eingeteilt. Nach dem Entfernen der statistischen Ausreißer wurde mit insgesamt 189 Datensätzen die Auswertung durchgeführt. Die Varianzanalyse ergab signifikante Unterschiede und nach dem Tukey-Test wurde jede Sortenklasse in eine statistische Gruppe eingeordnet.

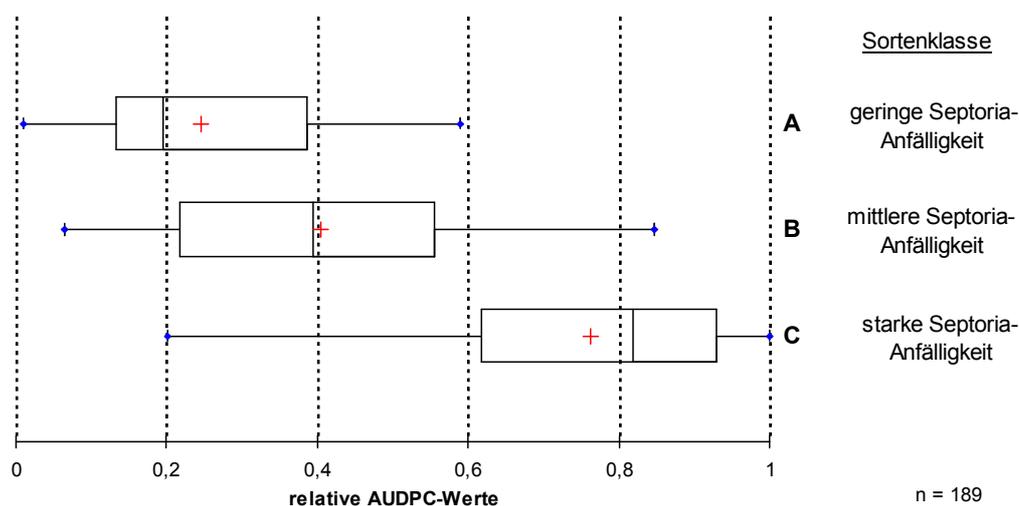


Abbildung 48: Boxplot der relativen Sortenabstufung nach den AUDPC-Werten, eingeteilt in die Sortenklassen gering anfällig (BSA-Noten 2 und 3), mittel anfällig (BSA-Note 4 und 5) und stark anfällig (BSA-Noten 6 und 7) (+ = Mittelwert, | = Median). Varianzanalyse mit den Daten der Sortenklassen und anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Sortenklassen mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

4.4.3 Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder (PSD)

Zur Darstellung einer Auswahl der Ergebnisse der Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder wurde der AUDPC-Wert gewählt (Gleichung [9]). Die Berechnungen auf Grundlage der mittleren Befallsstärke der oberen drei Blätter (F bis F-2) erfolgten für jede Wiederholung und Boniturjahr. Pro Bundesland ist ein Standort mit vier Sorten dargestellt. Die Sorten waren nicht in jedem Jahr identisch, da das Sortenspektrum der Standorte variierte. Die Säulen wurden in der Reihenfolge der BSA-Noten der Sorten, beginnend mit geringer Anfälligkeit, sortiert (Abbildung 49).

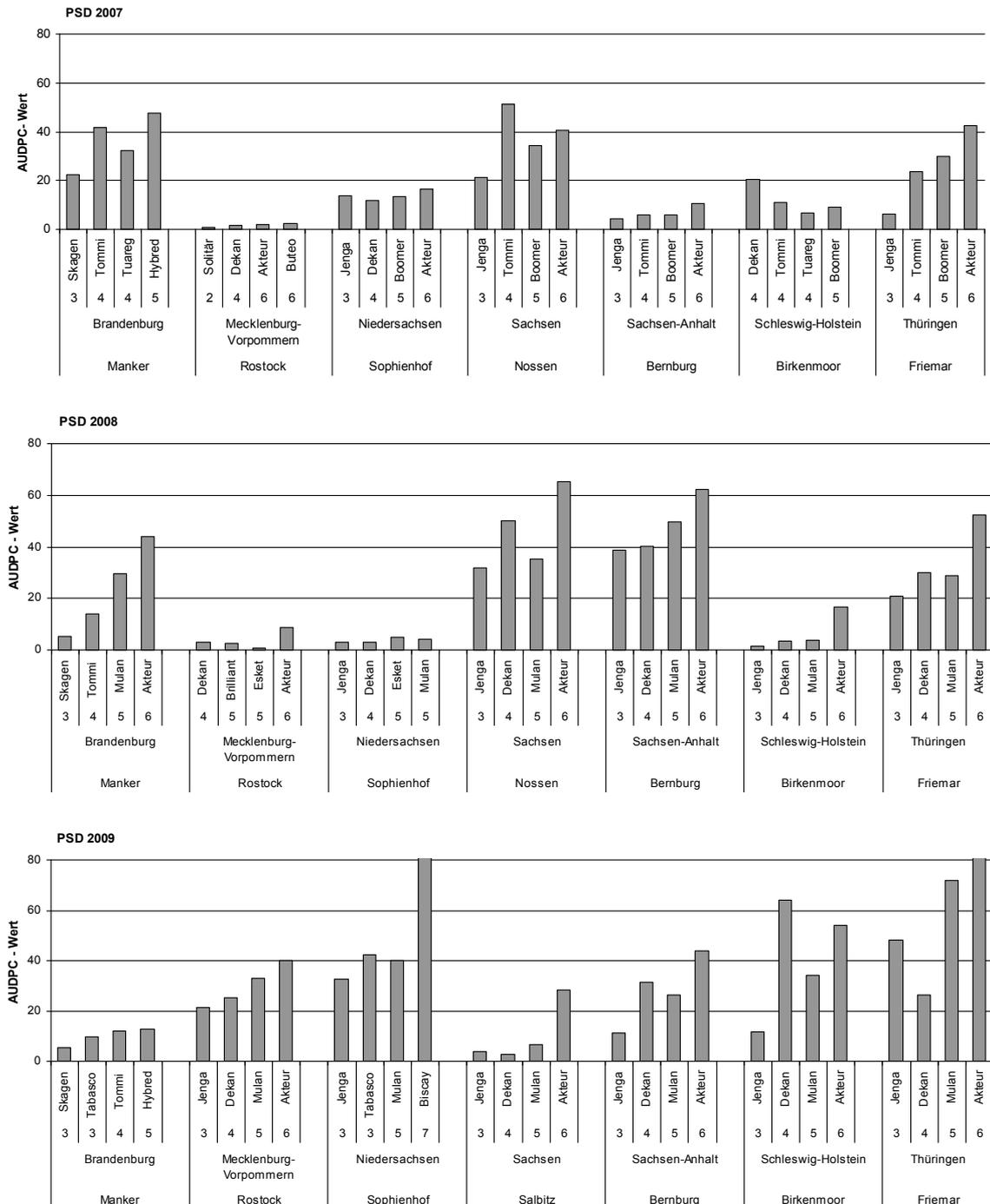


Abbildung 49: AUDPC -Werte (%-Tage) der Bonituren der Pflanzenschutzdienste der Länder für die Boniturjahre 2007 bis 2009, vier Sorten pro Standort (Auswahl aus mehreren Standorten).

Die Einordnung der Sorten nach ihrer BSA-Note der Septoria-Anfälligkeit korrelierte nicht an allen Standorten mit den berechneten AUDPC-Werten. Bis auf wenige Ausnahmen differenzierten sich die stark und die gering anfälligen Sorten jedoch eindeutig voneinander.

Zur statistischen Auswertung der Daten wurden für jedes Boniturjahr die AUDPC-Werte der Wiederholungen aller Sorten in Relation zu der Sorte mit dem höchsten Wert betrachtet. Diese Werte wurden in Abhängigkeit der BSA-Note analysiert (Tabelle 33). In der linken Spalte ist die Zuordnung der Ergebnisse in die Sortenklassen angefügt.

Tabelle 33: Varianzanalyse der relativen AUDPC-Werte (%-Tage) an den Standorten der Pflanzenschutzdienste der Länder in Abhängigkeit der BSA-Noten für die Jahre 2007 bis 2009 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jedes Boniturjahr unterscheiden sich die Sorten, die mit den gleichen Buchstaben bezeichnet sind, nicht signifikant.

Boniturjahr 2007			
Sortenklasse	BSA-Note	Mittelwert	Gruppe
gering anfällig	2	0,213	A
	3	0,324	A
mittel anfällig	4	0,502	B
	5	0,550	B C
stark anfällig	6	0,645	C

Boniturjahr 2008			
Sortenklasse	BSA-Note	Mittelwert	Gruppe
gering anfällig	3	0,270	A
mittel anfällig	4	0,353	A B
	5	0,466	B
stark anfällig	6	0,670	C
	7	0,954	C

Boniturjahr 2009			
Sortenklasse	BSA-Note	Mittelwert	Gruppe
gering anfällig	3	0,321	A
mittel anfällig	4	0,489	B
	5	0,582	B
stark anfällig	6	0,740	C
	7	0,976	C

In allen drei Jahren konnte anhand der Daten der Pflanzenschutzdienste der Länder die Einteilung der Sorten in drei Sortenklassen in Abhängigkeit zur BSA-Note in den meisten Fällen statistisch abgesichert werden. Im Jahr 2007 wurden die Sorten mit der BSA-Note 5 und im Jahr 2008 die Sorten mit der BSA-Note 4 nicht eindeutig in die Sortenklasse mittlerer Anfälligkeit eingeteilt. Die Gruppierung der BSA-Noten im Jahr 2009 entsprach den definierten Sortenklassen.

4.4.4 Fungizidversuche

In den folgenden Abbildungen sind die Befallsverläufe der Sorten der Fungizidversuche dargestellt. Die durchgezogenen Linien entsprechen der Bonitur der behandelten Variante und die gestrichelten Linien der Erhebungen der unbehandelten Variante. Im Jahre 2008 zeigte sich an beiden

Standorten ein deutlicher Effekt der fungiziden Wirkung auf den Befall von *S. tritici* (Abbildung 50 und Abbildung 51).

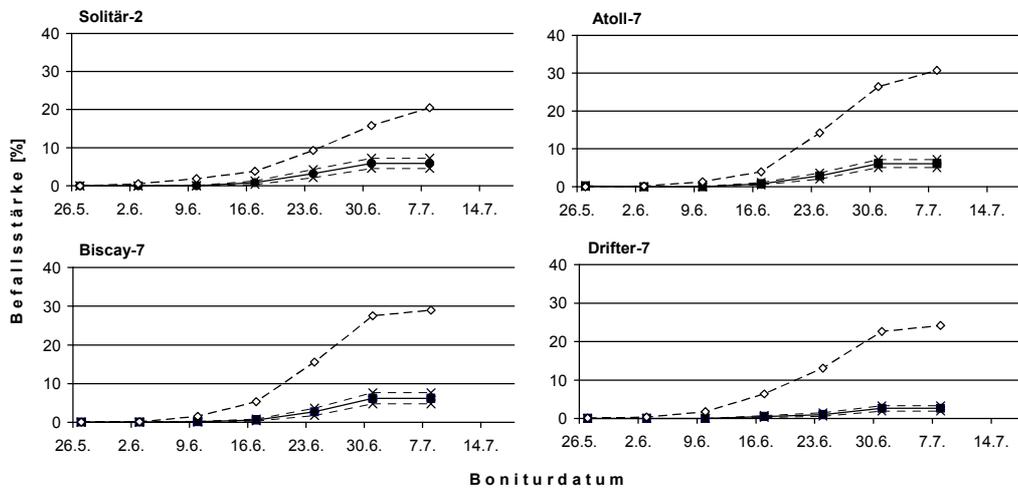


Abbildung 50: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Fungizidversuche in **Nieder-Hilbersheim 2008** (Behandlung am 8.5. mit Input). Mittelwert der oberen 3 Blätteragen und Standardabweichung. (durchgezogen = behandelt mit 95%-Konfidenzintervall, gestrichelt (--) = unbehandelt).

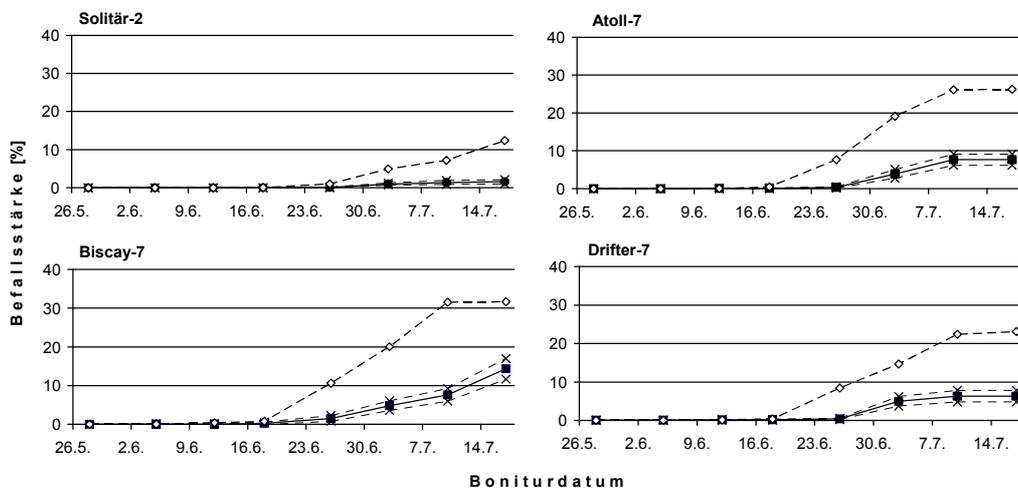


Abbildung 51: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Fungizidversuche in **Wahlbach 2008** (Behandlung am 10.5. mit Bravo 500). Mittelwert der oberen 3 Blätteragen und Standardabweichung. (durchgezogen = behandelt mit 95%-Konfidenzintervall, gestrichelt (--) = unbehandelt).

Im Jahre 2009 waren die Fungizideffekte weniger deutlich, die Befallskurven verliefen parallel und am Standort Mörschbach differierten die Befallskurven der behandelten und unbehandelten Varianten nur geringfügig (Abbildung 52 und Abbildung 53). Zum Einen war der Befall in der unbehandelten Variante geringer im Vergleich zum Boniturjahr 2008, zum Anderen wurde die Behandlung zu einem späteren Zeitpunkt durchgeführt.

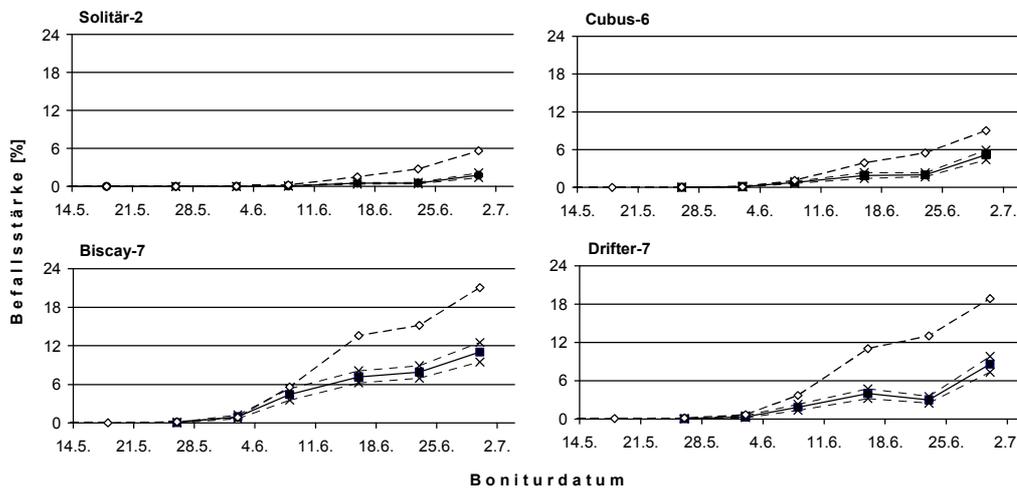


Abbildung 52: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Fungizidversuche in **Nieder-Hilbersheim 2009** (Behandlung am 22.5. mit Input). Mittelwert der oberen drei Blätteragen und Standardabweichung. (durchgezogen = behandelt mit 95%-Konfidenzintervall, gestrichelt (--) = unbehandelt).

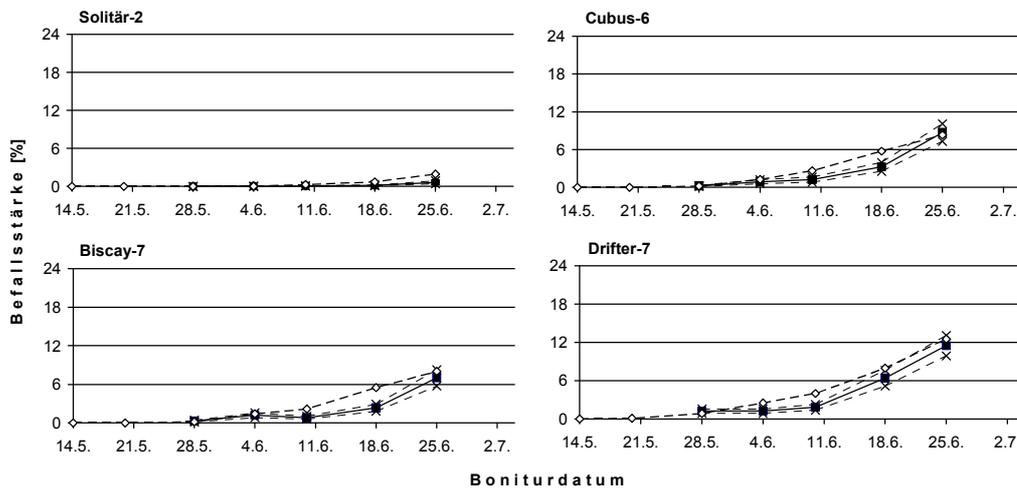


Abbildung 53: Sortenabhängige Entwicklung der Befallsstärke von *S. tritici* am Standort der Fungizidversuche in **Mörschbach 2009** (Behandlung am 24.5. mit Bravo 500). Mittelwert der oberen drei Blätteragen und Standardabweichung. (durchgezogen = behandelt mit 95%-Konfidenzintervall, gestrichelt (--) = unbehandelt).

5. MODELLENTWICKLUNG

In diesem Kapitel wird die Entwicklung des Modells SEPTRI2 (*Septoria tritici*) vorgestellt. In Anlehnung an die Nomenklatur von Simulationsmodellen bei der ZEPP (RACCA et al., 2010) simuliert das Modell SEPTRI2 die Befallsstärkeentwicklung. In Abhängigkeit von der Sortenklasse und der Blattetage wird die tägliche Befallsstärke berechnet. Dazu werden die oberen vier Blattetagen der Weizenpflanzen separat betrachtet. Basis für das Modell SEPTRI2 ist das Modell SIMSEPT von KLUGE et al. (2006). Der größte Teil der Modellfunktionen wurde durch die in dieser Arbeit gewonnenen Erkenntnisse modifiziert. Ein ausführlicher Vergleich der Modelle SEPTRI2 und SIMSEPT ist in der Diskussion dargestellt.

Im Modell SEPTRI2 wird die Befallsentwicklung von *S. tritici* von BBCH 15 bis zum Absterben des Fahnenblattes simuliert. Stündlich wird die Änderung der Befallsstärke berechnet, die den prozentualen Anteil der nekrotisierten Blattfläche beschreibt. Dazu werden verschiedene Prozesse der Befallsentwicklung simuliert, die anhand der Daten aus den Laborversuchen modelliert wurden. Zur Ermittlung eines Anpassungsfaktors, der für die Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums nach einer erfolgreichen Neuinfektion benötigt wird, wurden die Daten des Standortes Mörschbach 2009 der Exakt-Bonituren verwendet. Dieser Faktor wurde nicht in Abhängigkeit der Sortenklasse oder der Blattetage ermittelt. Die Einflüsse von Sortenklasse und Blattetage beruhen ausschließlich auf den Daten der Laborversuche. Des Weiteren hat der Anpassungsfaktor keinen Einfluss auf die stündlichen Berechnungen der Befallsentwicklung, sondern wird für jeden Neuinfektionszyklus einmalig zur Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums eingesetzt. Mit dem Ausgangswert des Pilzwachstums beginnt das Wachstum des zunächst noch latenten Befalls in der ersten Stunde nach einem Neuinfektionsereignis. Die Daten von Mörschbach 2009 der Exakt-Bonituren wurden nicht zur statistischen Validierung des Gesamtmodells betrachtet.

Nach VANDERPLANK (1963) können drei Arten von Läsionen differenziert werden: ‚noch nicht infektiöse‘ Läsionen, ‚infektiöse‘ und ‚nicht mehr infektiöse‘ Läsionen. Bei der Modellierung von *S. tritici* auf Winterweizen werden nur ‚noch nicht infektiöse‘ und ‚infektiöse‘ Läsionen unterschieden, da aus Pyknidien mehrmals Sporen austreten und Sekundärinfektionen hervorrufen können. In eigenen Laborversuchen wurden Blattstücke mit Pyknidien alle 24 Stunden in Wasser ausgewaschen und anschließend die Sporendichte bestimmt. Eine deutliche Reduktion der Sporenmenge trat erst nach dem achten Versuchsdurchlauf auf (BROKENSHIRE, 1975; EYAL, 1971).

Die zur Simulation benötigten Wetterdaten wurden an Wetterstationen gemessen, die zum Teil von den Pflanzenschutzdiensten der Länder und zum Teil vom Deutschen Wetterdienst betrieben werden. Mit dem Datenbanksystem AGMEDAWIN (Agrarmeteorologische Datenbank für Windows) werden die Daten verwaltet und gespeichert (KEIL & KLEINHENZ, 2007) und konnten für diese Arbeit genutzt werden.

5.1 Modul der Blattentwicklung im Modell SEPTRI2

Im Modell SEPTRI2 werden die oberen vier Blattetagen getrennt betrachtet. Für die Simulation der Blattentwicklung wurde ein empirisches Modul in Anlehnung an das Modell WHEGROSIM (WHEatGROwthSIMulation) entwickelt, das die Blattentwicklung für verschiedene Phasen berechnet (ROSSI et al., 1997). Das Erscheinen einer Blattetage wird in SEPTRI2 in Abhängigkeit vom erreichten BBCH-Stadium der Pflanze bestimmt. Danach werden in Abhängigkeit von Temperatursummen die Dauer der Phasen Blattwachstum, Blatterhaltung und Blattseneszenz nacheinander berechnet. Die Blattfläche wird an zwei Stellen für die Simulation der Befallsentwicklung im Modell SEPTRI2 benötigt. Dabei wird die Blattfläche als eine Relativzahl bezogen die Blattetage mit der größten Fläche ($F-1$) verwendet. Die relative Blattfläche wird bei der Simulation des täglichen Pilzwachstums berücksichtigt und bei der Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums benötigt (Kapitel 5.2.2).

Das folgende Strukturdiagramm erläutert das Blattentwicklungs-Modul im Modell SEPTRI2. Als Eingangsgröße wird das BBCH-Stadium benötigt, das vom Modell SIMONTO (Simulation der Ontogenese) (ROßBERG et al., 2005) berechnet wird.

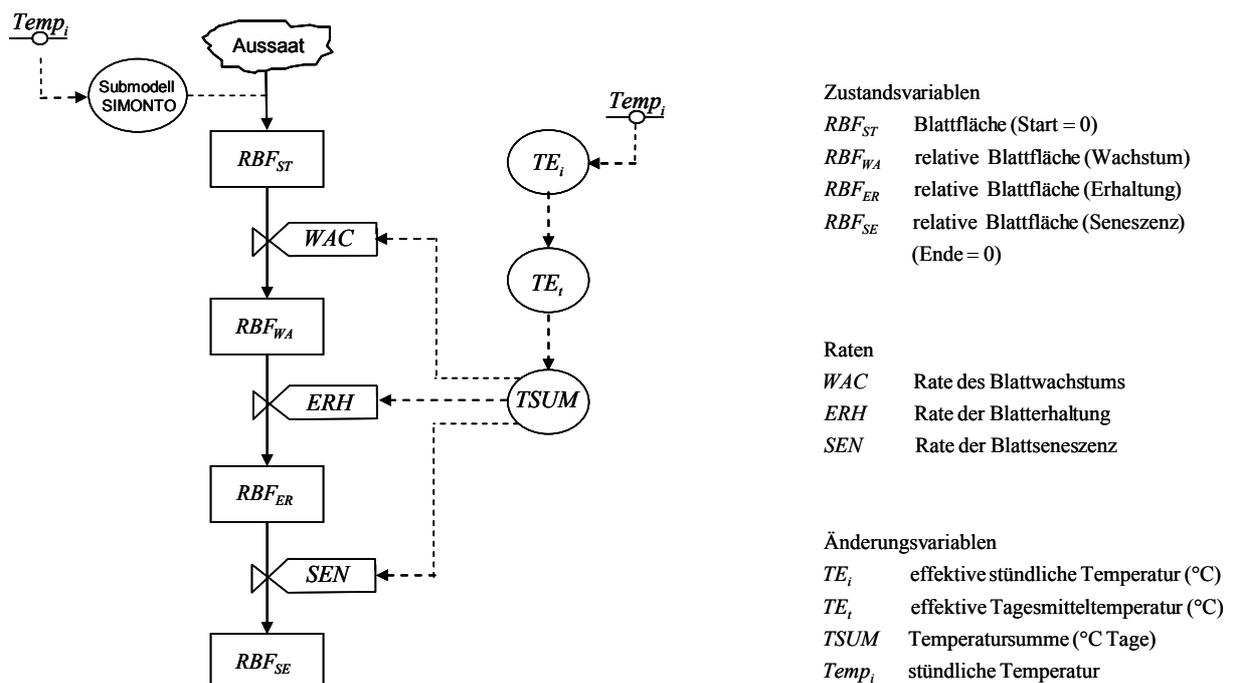


Abbildung 54: Strukturdiagramm des Blattentwicklungs-Modul im Modell SEPTRI2. Die maximale Blattfläche jeder Blattetage in der Phase der Blatterhaltung wird als relative Blattfläche in Relation zu der Blattetage mit der größten Fläche (entspricht $F-1$) abgebildet.

5.1.1 Relative Blattfläche

Zur Beschreibung der relativen Blattfläche der verschiedenen Blattetagen wurde ein Blattetagenfaktor aus den erhobenen Daten der verschiedenen Sorten ermittelt.

Die gemessenen Blattgrößen wurden mit einer Varianzanalyse und anschließendem Tukey-Test auf den Einfluss der Sortenanfälligkeit untersucht. Für die Sortenklassen geringer und starker Septoria-Anfälligkeit ergaben sich bei dem Fahnenblatt und der Blatttage F-1 keine signifikanten Unterschiede. Die Flächen der Blatttagen F-2, F-3 und F-4 unterschieden sich in Bezug auf die Sortenklasse signifikant voneinander, wobei die Blatttagen F-2 und F-3 der stark anfälligen Sorten etwa 10% größer waren und die Blatttage F-4 etwa 30% größer im Vergleich zu den gering anfälligen Sorten (Tabelle 34).

Aufgrund dieser geringen Sortenunterschiede für die Blatttagen F bis F-3 wurde die relative Blattgröße im Modell SEPTRI2 nicht in Abhängigkeit der Sortenklasse betrachtet. Für den Boxplot in Abbildung 55 wurden für eine Blatttage alle erhobenen Daten berücksichtigt. Die größte mittlere Blattfläche hatte die Blatttage F-1, die sich signifikant von den anderen Blatttagen unterschied. Identische mittlere Blattflächen wurden durch die statistische Analyse für das Fahnenblatt und die Blatttage F-2 ermittelt. Die Blatttagen F-3 und F-4 waren wiederum signifikant verschieden. Die maximale Differenz der gemessenen Blattgrößen der Blatttagen F, F-1 und F-2 betrug zwischen 25 und 26 cm² (inklusive Ausreißer). Für die Blatttagen F-3 und F-4 beliefen sich die Differenzen zwischen minimalem und maximalem Wert auf 20 cm² und 10 cm² (Abbildung 55).

Im folgenden Schritt wurden die mittleren Blattflächen der einzelnen Blatttagen in Relation zur Blattfläche der Blatttage F-1 gesetzt (Tabelle 35). Das Ergebnis war der Blatttagenfaktor zur Berechnung der relativen Blattgröße der einzelnen Blatttagen.

Tabelle 34: Varianzanalyse der gemessenen Blattflächen (cm²) der gering und stark anfälligen Sorten für jede der Blatttagen F bis F-4 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Für jede Blatttage unterscheiden sich Sortenklassen mit gleichen Buchstaben nicht signifikant.

Blatttage	Sortenklasse	mittlere Blattgröße	Gruppe
F	gering anfällig	22,59	A
	stark anfällig	23,01	A
F-1	gering anfällig	26,29	A
	stark anfällig	25,86	A
F-2	gering anfällig	23,93	A
	stark anfällig	21,39	B
F-3	gering anfällig	16,48	A
	stark anfällig	14,72	B
F-4	gering anfällig	11,92	A
	stark anfällig	8,42	B

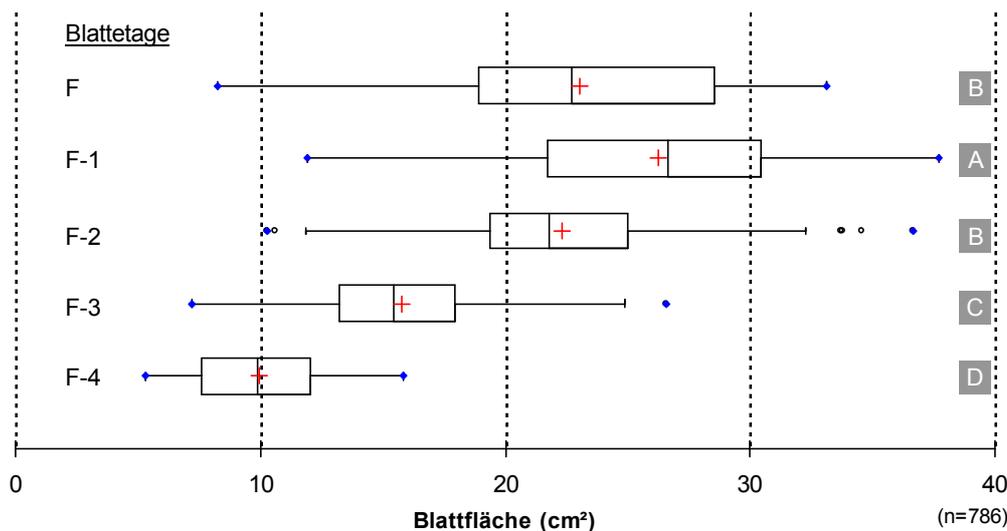


Abbildung 55: Variabilität der Blattflächen (cm²) der Blatttagen F bis F-4 (+ = Mittelwert, | = Median). Rechts: Varianzanalyse mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Blatttagen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

Tabelle 35: Blatttagenfaktoren ($FBE(F_x)$) der relativen Blattflächen der Blatttagen F bis F-4.

Blatttage	F	F-1	F-2	F-3	F-4
$FBE(F_x)$	0,88	1	0,85	0,6	0,38

5.1.2 Das Modell SIMONTO zur Berechnung des BBCH-Stadiums

Mit dem Modell SIMONTO (ROßBERG et al., 2005) wird die ontogenetische Entwicklung von Winterweizen simuliert. Die ontogenetische Entwicklung von Weizen wird durch die BBCH-Skala charakterisiert (HACK et al., 1992; LANCASHIRE et al., 1991; MEIER, 2001; WITZENBERGER et al., 1989), einer Weiterentwicklung des von ZADOKS et al. (1974) veröffentlichten Dezimalcodes. Das Modell SIMONTO berechnet drei Faktoren, die Einfluss auf die Rate der ontogenetischen Entwicklung der Pflanzen haben. Dabei werden das Aussaatjahr und das Erntejahr getrennt betrachtet. Zur Berechnung der täglichen Rate wird eine maximale Rate mit drei Faktoren reduziert. Damit werden die Vernalisation, die Temperatur und der photoperiodische Einfluss berücksichtigt. Der Faktor zur Kalkulation des Vernalisation-Fortschritts wurde in dieser Arbeit nicht dargestellt. Die Werte der Modellparameter Temperatur und Tageslänge (Photoperiode) wurden mit einer Vielzahl von Datensätzen zu Ontogeneseverläufen geschätzt. Die Validierung des Modells hatte eine Übereinstimmung von Simulation und Bonitur in ca. 50% der untersuchten Datensätze ergeben. In lediglich 20% der Fälle war das Ergebnis nicht zufriedenstellend. Die restlichen Anteile lagen in einem Bereich von +/- 6 Tagen zu früh bzw. zu spät (ROßBERG et al., 2005).

Im Folgenden wird die Berechnung der täglichen Entwicklungsrate (d_t) für das Erntejahr vorgestellt (Gleichung [10]). Dazu werden die Faktoren zur Berücksichtigung der Temperatur (F_{TE}) und der Tageslänge (F_{TL}) benötigt.

$$d_{t+1} = d_t + d_{\max} * F_{TE} * F_{TL} \quad [10]$$

wobei:

d_t	= tägliche Entwicklungsrate
d_{\max}	= maximale Entwicklungsrate
F_{TE}	= Faktor zur Berücksichtigung des Temperatureinflusses
F_{TL}	= Faktor zur Berücksichtigung der Tageslänge

5.1.3 Die Phasen der Blattentwicklung

Die verschiedenen Phasen der Blattentwicklung werden für jede Blattetage betrachtet. Die Infektion einer Blattetage ist erst möglich, wenn ein Blatt 20% seiner maximalen Größe erreicht hat.

Das Blattwachstum beginnt mit dem Erscheinen des Blattes. Danach folgen die Blatterhaltung und die Seneszenz. Nach der Seneszenz ist das Blattgewebe komplett abgestorben. In der Wachstumsphase steigt die Blattfläche mit der Temperatursumme linear auf die maximale relative Blattfläche an, in der Phase der Blatterhaltung verändert sich die Blattfläche nicht, bis sie in der Phase der Seneszenz wieder mit der Temperatursumme linear bis auf null abfällt (siehe Abbildung 56).

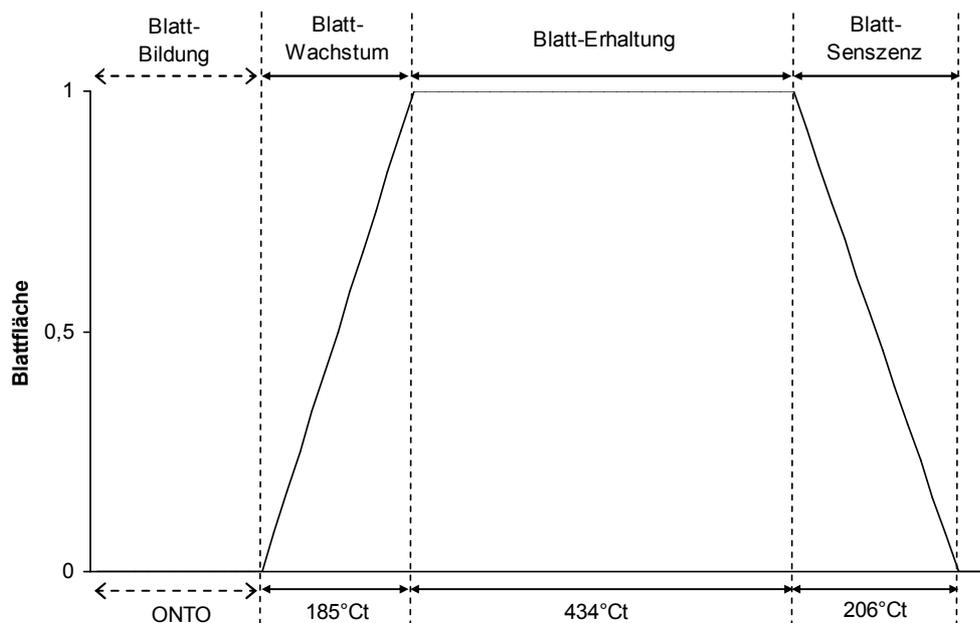


Abbildung 56: Phasen der Blattentwicklung von der Blattbildung bis zur Seneszenz in Abhängigkeit von der Temperatursumme (in Gradtagen °Ct) mit der entsprechenden Blattfläche, am Beispiel der Blattetage F-1 (verändert nach ROSSI et al. (1997)).

Die Dauer der Phasen Wachstum, Erhaltung und Seneszenz werden für jede Blatttage in Abhängigkeit der täglichen Temperatursumme unter Berücksichtigung einer Basistemperatur von 4°C berechnet. Die Basistemperatur wurde in Anlehnung an das Modell SIMONTO gewählt, da der Beginn des Blattwachstums in Abhängigkeit vom simulierten BBCH-Stadium definiert wurde. Bei Rossi et al. (1997) wurden je nach Entwicklungsstadium verschiedene Basistemperaturen zwischen -2°C und +9°C verwendet. Des Weiteren wurden für die Parameterschätzung im Modell WHEGROSIM Daten aus Modellen für die Regionen Süd- und Norditalien kombiniert sowie verschiedene Sorten der Kulturen Durumweizen und Winterweizen betrachtet. Die ermittelten Temperatursummen für die Dauer der gesamten Blattentwicklung an Winterweizen im Modell WHEGROSIM konnten daher nicht für die Anbau- und Witterungsbedingungen in Deutschland verwendet werden. Daher wurden neue Werte aus den Versuchsdaten der Jahre 2007 bis 2009 der Freilandhebungen in Rheinland-Pfalz (Exakt-Bonituren und LSV-RP) bestimmt. Der Beginn des Blattwachstums des Weizens wurde in Abhängigkeit vom ontogenetischen Entwicklungsstadium definiert, das mit dem Modell SIMONTO simuliert wird.

Für die Bestimmung des Endes der Seneszenzphase wurde das Datum gewählt, an dem der Anteil abgestorbener Blätter einer Blatttage >90% betrug. Mit einer Varianzanalyse wurden mögliche Sortenunterschiede in der Dauer der Blattentwicklung überprüft. Der Tukey-Test ergab keine signifikanten Unterschiede in Abhängigkeit von der Blatttage und der Sortenklasse. Da aus der Literatur keine Zusammenhänge zwischen der Septoria-Anfälligkeit verschiedener Sorten und der Dauer der Blattentwicklung bekannt sind, wurde im Modell die Dauer der Blattentwicklung ausschließlich in Abhängigkeit von der Blatttage betrachtet. Die statistische Analyse der Daten in Abhängigkeit von der Blatttage ergab zwei signifikant verschiedene Gruppen (Tabelle 36). Im Modell wird die mittlere Dauer der Blatttage für die Simulation verwendet.

Tabelle 36: Varianzanalyse der mittleren Dauer der Blattentwicklung (in °Ct) in Abhängigkeit von der Blatttage (n=310) mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Blatttagen mit gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant. Datengrundlage waren die Freilandhebungen 2007-2009 in Rheinland-Pfalz.

Blatttage	mittlere Dauer der Blattentwicklung	Gruppe
F	773	B
F-1	825	A
F-2	858	A
F-3	751	B
F-4	751	B

Die Anteile für die Dauer des Blattwachstums, der Blatterhaltung und der Blattseneszenz an der gesamten Blattentwicklung wurden nach den Angaben von Rossi et al. (1997) festgelegt. Demnach berechnet sich die Temperatursumme der Blatterhaltung aus der Temperatursumme des Blattwachstums * 2,345 und die Temperatursumme der Seneszenz aus der Temperatursumme des Blattwachstums * 1,115. Die notwendigen Temperatursummen der Blatttagen sind in der Tabelle 37 dargestellt. Der Beginn des Blattwachstums erfolgt ab einem Initial-BBCH-Stadium. Die

Angaben sind der Literatur entnommen (MEIER, 2001) und wurden für die Blatttage F-2 auf das Modell angepasst.

Tabelle 37: Temperatursummen der Blatttagen von F bis F-4 ($TSUM$ in °Ct) für die Dauer der Phasen *Wachstum*, *Erhaltung* und *Seneszenz* und BBCH-Stadium für den Beginn des Blattwachstums (unter Berücksichtigung einer Basistemperatur von 4°C).

	F	F-1	F-2	F-3	F-4
Start	BBCH 37	BBCH 32	BBCH 31,5	BBCH 30	BBCH 15
$TSUM_{WA}$	173	185	192	168	168
$TSUM_{ER}$	407	434	451	395	395
$TSUM_{SE}$	193	206	214	188	188

5.1.4 Modellierung des Blattwachstums

Die Simulation der Blattendwicklung erfolgt ab dem Initial-BBCH-Stadium einer Blatttage. Die tägliche effektive Temperatur wird unter Berücksichtigung einer Basistemperatur von 4°C aus den gemessenen Stundenwerten berechnet (Gleichung [11]). Dieser Wert wird auf die bestehende Temperatursumme einer Blatttage in der jeweiligen Phase der Blattendwicklung aufsummiert (Gleichung [12]). Die Phase des Blattwachstums ist mit Erreichen der erforderlichen Temperatursumme für die maximale Blattfläche abgeschlossen. Für die anschließende Phase der Blatterhaltung beginnt das Summieren wieder bei null.

$$TE_t = \sum_{i=1}^{24} TE_i / 24 \tag{11}$$

wobei:

$$\begin{aligned} TE_t &= \text{tägliche effektive Temperatur (}^\circ\text{C)} \\ TE_i &= \text{stündliche effektive Temperatur (}^\circ\text{C)} \end{aligned} \quad TE_i = \begin{cases} 0 & \text{für } T_i \leq 4^\circ\text{C} \\ T_i - 4 & \text{für } T_i > 4^\circ\text{C} \end{cases}$$

$$TSUM(Fx)_{t+1} = TSUM(Fx)_t + TE_t \tag{12}$$

wobei:

$$\begin{aligned} TSUM(Fx)_t &= \text{Temperatursumme in Gradtagen der Blatttage } Fx \text{ bis zum Tag } t \\ TE_t &= \text{tägliche effektive Temperatur (}^\circ\text{C)} \end{aligned}$$

Bei der Simulation des Pilzwachstums wird die aktuelle Blattfläche jeder Blattetage berücksichtigt. Mit den Gleichungen [13] bis [15] berechnet sich diese in Abhängigkeit von der Entwicklungsphase.

$$RBF_{WA}(Fx)_t = FBE(Fx) * [TSUM(Fx)_t / TSUM_{WA}(Fx)] \quad [13]$$

für $TSUM(Fx)_t < TSUM_{WA}(Fx)$

$$RBF_{ER}(Fx)_t = FBE(Fx) * 1 \quad [14]$$

für $TSUM(Fx)_t < TSUM_{ER}(Fx)$

$$RBF_{SE}(Fx) = FBE(Fx) * [1 - (TSUM(Fx)_t / TSUM_{SE}(Fx))] \quad [15]$$

für $TSUM(Fx)_t < TSUM_{SE}(Fx)$

wobei:

- $RBF_{WA}(Fx)_t$ = relative Blattfläche (Wachstumsphase) der Blattetage Fx am Tag t
- $RBF_{ER}(Fx)_t$ = relative Blattfläche (Erhaltungsphase) der Blattetage Fx am Tag t
- $RBF_{SE}(Fx)_t$ = relative Blattfläche (Seneszenzphase) der Blattetage Fx am Tag t
- $TSUM(Fx)_t$ = Temperatursumme der Blattetage Fx am Tag t
- $TSUM_{WA}(Fx)$ = erforderliche Temperatursumme am Ende der Wachstumsphase der Blattetage Fx
- $TSUM_{ER}(Fx)$ = erforderliche Temperatursumme am Ende der Erhaltungsphase der Blattetage Fx
- $TSUM_{SE}(Fx)$ = erforderliche Temperatursumme am Ende der Seneszenzphase der Blattetage Fx
- $FBE(Fx)$ = Faktor der Blattetage Fx (Tabelle 35)

In Abbildung 57 ist die Simulation der Blattenwicklung für den Standort Mörschbach 2009 (Wetterstation Wahlbach) veranschaulicht. Der Beginn des Blattwachstums der verschiedenen Blattetagen wurde in Abhängigkeit vom BBCH-Stadium bestimmt. Die täglichen effektiven Temperaturen wurden summiert, bis der Zielwert erreicht war (Tabelle 37). Danach folgen die Phasen der Blatterhaltung, in denen sich die Blattfläche nicht veränderte. In der dritten Phase der Blattenwicklung reduzierten sich die Blattflächen wieder bis zum Wert null, womit das Ende der Seneszenz-Phase erreicht war.

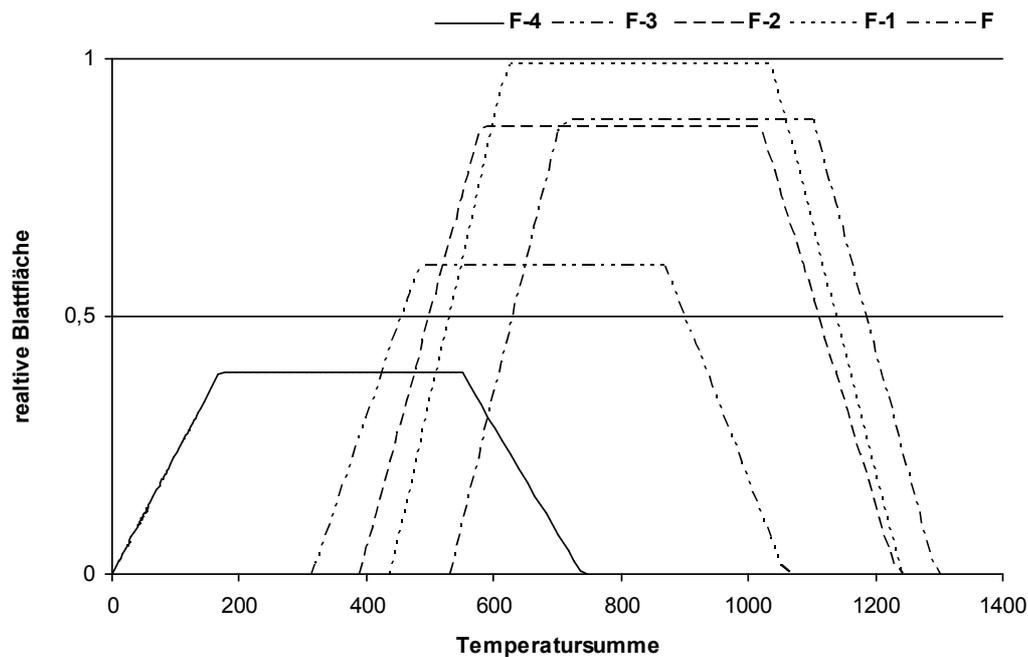


Abbildung 57: Dauer der Blattentwicklung (Wachstum, Erhaltung, Seneszenz) der Blattetagen F-4 bis F in Abhängigkeit von der täglichen Temperatursumme (Basistemperatur 4°C) für den Standort Mörschbach 2009. Start der Grafik ist das Erscheinen der Blattetage F-4 (BBCH 15; hier: 14.11.2008).

5.2 Simulation der Befallsentwicklung von *S. tritici*

Die Primärinfektion eines Weizenbestandes mit *S. tritici* im Herbst wird im Modell SEPTR12 nicht simuliert, sondern ein ausreichendes Inokulum für eine erfolgreiche Infektion vorausgesetzt. Die Simulation der Befallsentwicklung beginnt zu BBCH 15 auf der Blattetage F-4. Ein früherer Simulationsbeginn würde den Startwert stark herabsetzen und kaum zu einem verbesserten Ergebnis führen. Entscheidend für die Simulation der Befallsentwicklung auf den oberen Blattetagen sind vielmehr die Infektionsereignisse im Erntejahr. Das BBCH-Stadium 15 wurde gewählt, da es in der Regel noch im Aussaatjahr erreicht wird und somit Neuinfektionen im Frühjahr, ausgehend von einem Befall der Pflanzen, berechnet werden können. In der Praxis ist es möglich, dass das BBCH-Stadium 15 übersprungen wird, da die Bestockung des Weizens (BBCH 20) bereits begonnen hat. Für den Start der Berechnungen wird der vom Modell SIMONTO simulierte Termin für das BBCH-Stadium 15 verwendet.

Die modellierten Prozesse zur Simulation der Befallsentwicklung von *S. tritici* basieren auf den Ergebnissen der Laborversuche. Kennzeichnend für das Modell SEPTR12 ist die Berücksichtigung der Sortenanfälligkeit. Die Sortenklassen werden an folgenden Stellen berücksichtigt:

- Ausgangswert des Pilzwachstums (Pyknidiendichte, Kapitel 4.2.2)
- Berechnung des Pilzwachstums (Kapitel 4.1.1.3)
- Dauer der Inkubationszeit (Kapitel 4.1.2.2)

- Dauer der Latenzzeit (Kapitel 4.1.3.2)
- Dauer der Pyknidienformation (Kapitel 4.1.4.2)

Aufgrund der Ergebnisse zur Pyknidiengröße und der Pyknosporenlänge wurden diese Parameter als sortenunabhängig nicht weiter betrachtet. Die Sortenanfälligkeit wurde nach der BSA-Note der Septoria-Anfälligkeit in drei Sortenklassen (gering anfällig, mittel anfällig, stark anfällig) differenziert.

Im Modell SEPTRI2 werden die Berechnungen stündlich durchgeführt und die Ergebnisse der Parameter einheitlich relativ betrachtet. Für jeden Infektionszyklus einer Blattetage wird bis zum Ende der Dauer der Pyknidienformation der Befallswert stündlich aktualisiert. Die Summe der Befallswerte aller Infektionszyklen einer Blattetage $bef(Fx)$ ergibt die relativ befallene Fläche einer Blattetage. Die Variable $bef(Fx)$ umfasst dabei sowohl den latenten als auch den sichtbaren Anteil des Befalls. Das Endergebnis von SEPTRI2 ist die Summe der Befallswerte aller Infektionszyklen einer Blattetage, bei denen die Inkubationszeit abgelaufen ist, d. h. die Läsionen sichtbar sind. Diese Variable wird mit $bef_{IZ}(Fx)$ bezeichnet. Für die zeitabhängigen Parameter werden in den folgenden Gleichungen zur Berechnung des Pilzwachstums immer die täglichen Werte angegeben. Die Ausgabe des Simulationsergebnisses von SEPTRI2 erfolgt als prozentuale Befallsstärke, die sich aus der Summe der relativen Befallswerte einer Blattetage zusammensetzt. Das ist der mit Septoria-Läsionen bedeckte Anteil der Blattfläche einer Blattetage (Gleichung [16]).

$$BS(Fx)_t = bef_{IZ}(Fx)_t * 100 \quad [16]$$

wobei:

$$\begin{aligned} BS(Fx)_t &= \text{Befallsstärke (in Prozent) der Blattetage } F_x \text{ am Tag } t \\ bef_{IZ}(Fx)_t &= \text{Summe der Befallswerte aller Infektionszyklen (Inkubationszeit abgelaufen) der} \\ &\quad \text{Blattetage } F_x \text{ am Tag } t \end{aligned}$$

Die Entwicklung von *S. tritici* wird anhand der Infektkette dargestellt (KRANZ, 1996). Die Infektkette beschreibt die fortgesetzte Übertragung von Sporen von Wirt zu Wirt (GÄUMANN, 1951) oder bezogen auf das Septoria-Modell die Infektion neuer Blattetagen sowie weitere Befallszyklen auf einer Blattetage.

In Bezug auf die Infektkette startet die Simulation im Modell GEMETA (Gerstenmehltau) mit der Landung der Sporen (HAU, 1985). Ab diesem Ereignis beginnen die Phasen der Inkubationszeit und der Latenzzeit (KRANZ, 1996). Für das Modell SEPTRI2 wurde der Sporenaustritt als Simulationsstart definiert. In der Abbildung 58 sind die betrachteten Prozesse und Abläufe graphisch dargestellt.

Im Modell SEPTRI2 werden mehrere Infektionszyklen auf einer Blattetage parallel simuliert.

Infektionszyklen werden für Primär- und Sekundärinfektionen unterschieden. Da nach GÄUMANN (1951) der Begriff Primärinfektion auch zur Unterscheidung von Folgeinfektionen verwendet werden kann, wird im Septoria-Modell die erste Infektion einer Blattetage als Primärinfektion bezeichnet.

Zum Zeitpunkt des Endes der Latenzzeit einer Primärinfektion ist das Erstauftreten von *S. tritici* auf einer Blattetage. Das Erstauftreten wird anhand der Latenzzeit bestimmt, da erst mit Pyknidien die ersten Läsionen gezielt erfasst werden können.

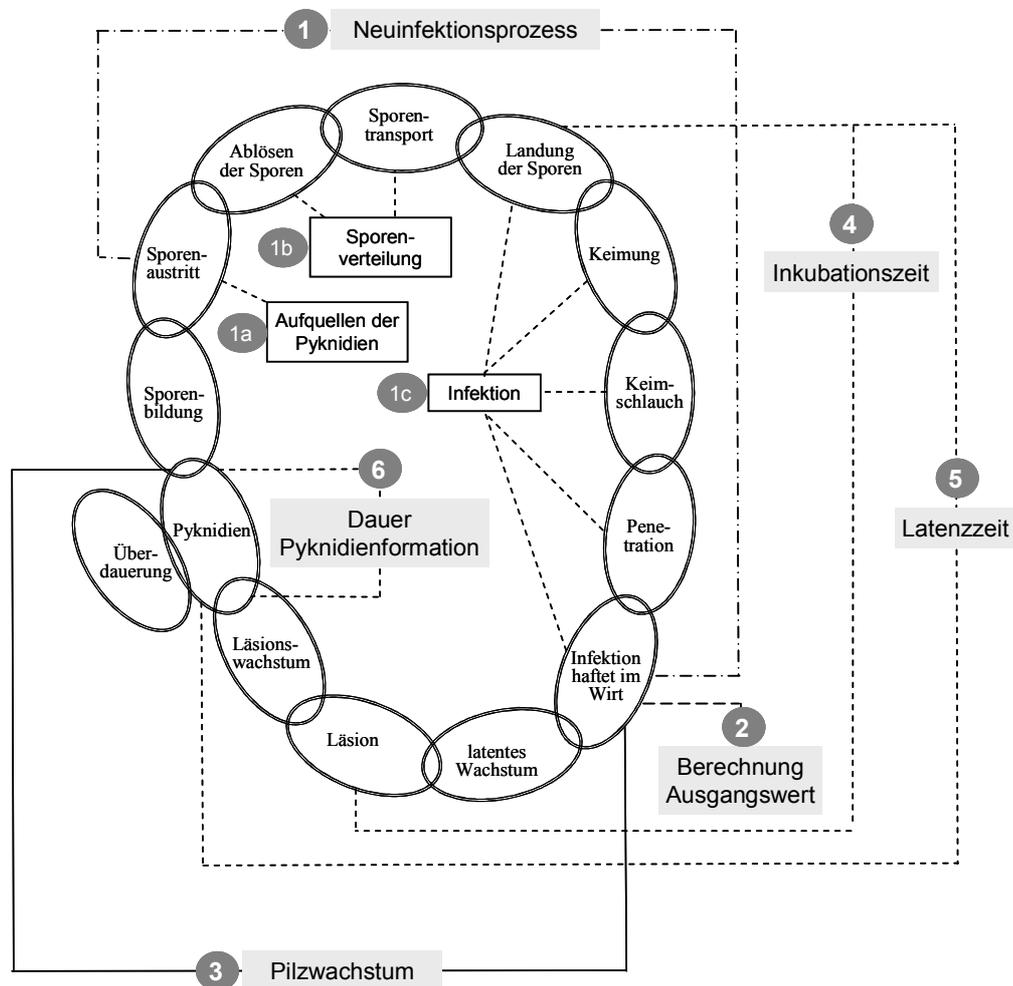


Abbildung 58: Berechnete und modellierte Prozesse und Größen im Modell SEPTRI2 (1 bis 6) in Anlehnung an die Infektkette (KRANZ, 1996).

(1) Neuinfektionsprozess

Mit Austreten von Sporen aus den Pyknidien beginnt ein Neuinfektionsprozess. Dieser ist erfolgreich beendet, wenn sich der Pilz in der Pflanze etabliert hat. Es werden die Phasen (1a) Aufquellen der Pyknidien, (1b) Sporenverteilung und (1c) Infektion differenziert.

(2) Berechnung des Ausgangswerts für das Pilzwachstum

Bei einem erfolgreich abgeschlossenen Neuinfektionsprozess wird ein Ausgangswert für das Pilzwachstum berechnet. Zu Simulationsbeginn wird ein fixer Startwert verwendet. Die folgenden Ausgangswerte basieren auf dem aktuellen Befall der gesamten Pflanze.

(3) Pilzwachstum

Das Pilzwachstum beginnt bei Abschluss einer erfolgreichen Neuinfektion. Mit einer temperatur- und sortenabhängigen Rate wird der tägliche Zuwachs kalkuliert. Das Ende des Pilzwachstums wird über die Dauer der Pyknidienformation definiert.

(4) Inkubationszeit

In der Inkubationszeit wächst der Pilz latent im Blattgewebe. Die Dauer wird ab der Landung der Sporen kalkuliert. Am Ende der Inkubationszeit sind die Läsionen auf dem Blatt sichtbar.

(5) Latenzzeit

Die Latenzzeit beginnt wie die Inkubationszeit mit der Landung der Sporen. Mit dem Erscheinen von Pyknidien ist die Latenzzeit abgeschlossen. Bei günstigen Witterungsbedingungen kann ein neuer Infektionsprozess beginnen.

(6) Dauer Pyknidienformation

Es wird die Zeit ab dem Erscheinen der ersten Pyknidien bis zum Erreichen der maximalen Anzahl betrachtet. Erhöht sich die Anzahl Pyknidien nicht weiter, ist das Läsionswachstum beendet.

5.2.1 Der Neuinfektionsprozess

Ein Neuinfektionsprozess von *S. tritici* beginnt mit dem Aufquellen der Pyknidien (Sporenaustritt). Die Sporenverteilung erfolgt in den Strukturelementen Ablösen der Sporen und Sporentransport. Das Ablösen der Sporen erfolgt durch Regentropfen, durch die die Sporen auf der Blattfläche verteilt werden. Alle folgenden Strukturelemente der Infektkette werden zusammen bis zum Haften der Infektion im Wirt als Infektion behandelt.

Zur Beschreibung der Abläufe eines Neuinfektionsprozesses sind die einzelnen Schritte in einem Flussdiagramm dargestellt (Abbildung 59). Die Sinnbilder wurden entsprechend der Beschreibung der DIN 66001 (Sinnbilder für Programmablaufpläne) verwendet. Anfangs- und Endpunkt eines Neuinfektionsprozesses werden durch ein Oval symbolisiert. Mit einer Raute werden die Überprüfungen vorgegebener Bedingungen repräsentiert, die mit „Ja“ oder „Nein“ beantwortet werden. Die drei Prozesse Aufquellen der Pyknidien, Sporenverteilung und Infektion sind mit den Rechtecken dargestellt. Die speziellen Bedingungen, die zum Erreichen der folgenden Phase führen, sind in einem Parallelogramm vermerkt. SEPTRI2 bestimmt den Fortschritt eines Neuinfektionsprozesses anhand der stündlichen Witterungsbedingungen. Das Abfragen der Wetterdaten ist in dem Flussdiagramm als sogenanntes Unterprogramm dargestellt. Sind die Bedingungen an einem Entscheidungsknoten erfüllt, so wird in der darauf folgenden Stunde daran angeknüpft. Bei einem Abbruch beginnt ein Neuinfektionsprozess wieder am ersten Entscheidungsknoten.

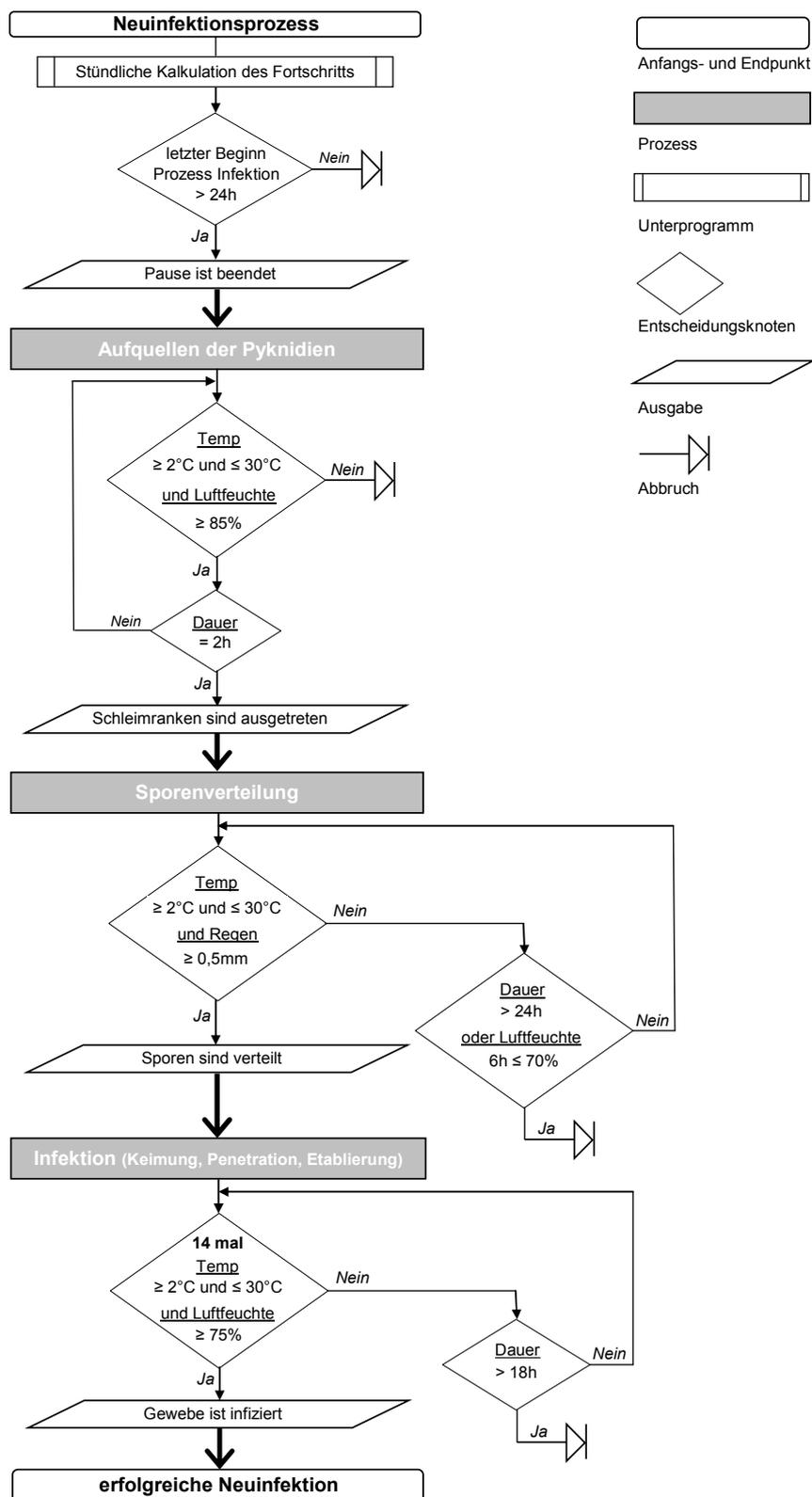


Abbildung 59: Ablauf eines Neuinfektionsprozesses. Abbruch des Vorgangs, wenn an einem Entscheidungsknoten die Bedingungen nicht erreicht werden.

Vor Beginn der Phase „Aufquellen der Pyknidien“ wird überprüft, ob der Beginn der Infektionsphase des letzten Neuinfektionsprozesses mindestens 24 Stunden zurückliegt. Mit dieser Pause wird berücksichtigt, dass die Pyknidien vor einem erneuten Aufquellen trockene Bedingungen benötigen, damit neue Schleimranken aus den Pyknidien austreten können. Die durch Läsionswachstum vergrößerte infektiöse Blattfläche wird nach Ablauf der Pause berücksichtigt.

Für das Aufquellen der Pyknidien muss die relative Luftfeuchte in zwei aufeinanderfolgenden Stunden bei $\geq 85\%$ liegen und Temperaturen müssen zwischen 2°C und 30°C gemessen werden (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999). Am Ende dieser Phase sind die Schleimranken aus den Pyknidien ausgestreten und können mit Regentropfen verbreitet werden.

Die Phase der Sporenverteilung kann maximal 24 Stunden andauern. Fällt innerhalb von 24 Stunden nicht mindestens 0,5 mm Niederschlag in einer Stunde bei Temperaturen zwischen 2°C und 30°C , wird der Neuinfektionsprozess abgebrochen. Ebenso darf die relative Luftfeuchte in diesem Zeitraum nicht an sechs aufeinander folgenden Stunden unter 70% sinken. Damit wird ein mögliches Eintrocknen der Sporen auf dem Blatt vor der Verteilung mit dem Niederschlag berücksichtigt.

Damit die Infektion erfolgreich abgeschlossen werden kann, muss die relative Luftfeuchte innerhalb von 18 Stunden in mindestens 14 Stunden Werte von $\geq 75\%$ erreichen. Zudem muss die Temperatur zwischen 2°C und 30°C gelegen haben (HOLMES & COLHOUN, 1974; RENFRO & YOUNG, 1956; ROYLE et al., 1986; SHANER, 1981; SHANER & FINNEY, 1976). Aus biologischer Sicht beginnt der Prozess der Infektion mit der Sporenkeimung. Hierzu ist im Modell eine Regenspauze von zwei Stunden erforderlich (Niederschlagsmenge jeweils $< 0,5$ mm). Wenn an zwei aufeinanderfolgenden Stunden der Niederschlag nicht $< 0,5$ mm war, beginnen die Berechnungen für die Infektion wieder von neuem. Dieser Zeitpunkt ist ebenso die erste Stunde der Inkubations- und Latenzzeit. In dem Flussdiagramm (Abbildung 59) ist diese zusätzliche Bedingung nicht dargestellt.

In SEPTR12 kann der Prozess der Infektion ab dem Beginn der Keimung der Sporen maximal 18 Stunden dauern bis der Abbruch des Neuinfektionsprozesses erfolgt. Sind alle Bedingungen erfüllt, war die Neuinfektion erfolgreich.

Neuinfektionen werden bei AUDSLEY et al. (2005) für die Blattetage berücksichtigt, deren Blätter mindestens 5% der maximalen Größe erreicht haben. Bei diesem Wert wurde im Modell SEPTR12 das Erstauftreten von *S. tritici* zu früh simuliert, wie die Anpassung der Simulation an die Boniturdaten mit Werten im Bereich von 1% bis 30% ergeben hatte. Das beste Ergebnis wurde bei einer Blattgröße von mindestens 20% erzielt. Damit wird eine senkrechte Blattstellung zu Beginn des Wachstums berücksichtigt und eine Mindestgröße der Blätter für die Primärinfektion festgelegt.

Für eine erfolgreiche Infektion muss die relative Luftfeuchte laut Literatur mindestens 90% betragen (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999). In diesem Modell wird eine relative Luftfeuchte von 75% als untere Grenze betrachtet, da unterstellt wird, dass eine relative Luftfeuchte von mindestens 75% in 2 m Höhe einer relativen Luftfeuchte von mindestens 90% im Bestand entspricht (GUTSCHE et al., 1999). Zudem hat ein Vergleich der Daten verschiedener Wetterstationen ergeben, dass die maximal gemessenen Werte der relativen Luftfeuchte schwanken. Die Messwerte einiger

Wetterstationen überstiegen in der gesamten Vegetationszeit nie 95%, während von anderen Stationen in Verbindung mit Niederschlag eine relative Luftfeuchte von 100% gemessen wurde.

Die Anzahl der Neuinfektionsereignisse in der Vegetationszeit sind abhängig von den erhobenen Wetterdaten. Mit den Wetterdaten der den Standorten der Exakt-Bonituren von 2007 bis 2009 nächstgelegenen Wetterstationen Rommersheim und Wahlbach wurden die Neuinfektionsereignisse kalkuliert. Das erste Datum entspricht dem Termin zu BBCH 15, zu dem die Berechnungen für die Blatttage F-4 begannen. In Abhängigkeit vom Boniturjahr variierte dieser Termin zwischen Ende November und Mitte Januar. Im Jahr 2007 wurden aufgrund trockener Witterung ab der Schossphase des Weizens (BBCH 30) bis zur Mitte der Blüte (BBCH 65) nur wenige Neuinfektionsereignisse ausgegeben. Im selben Zeitraum gab es in den anderen Boniturjahren häufiger Neuinfektionen. Besonders im Boniturjahr 2009 wurden während der Entwicklung der oberen Blatttagen häufig erfolgreiche Neuinfektionen bestimmt (Abbildung 60).

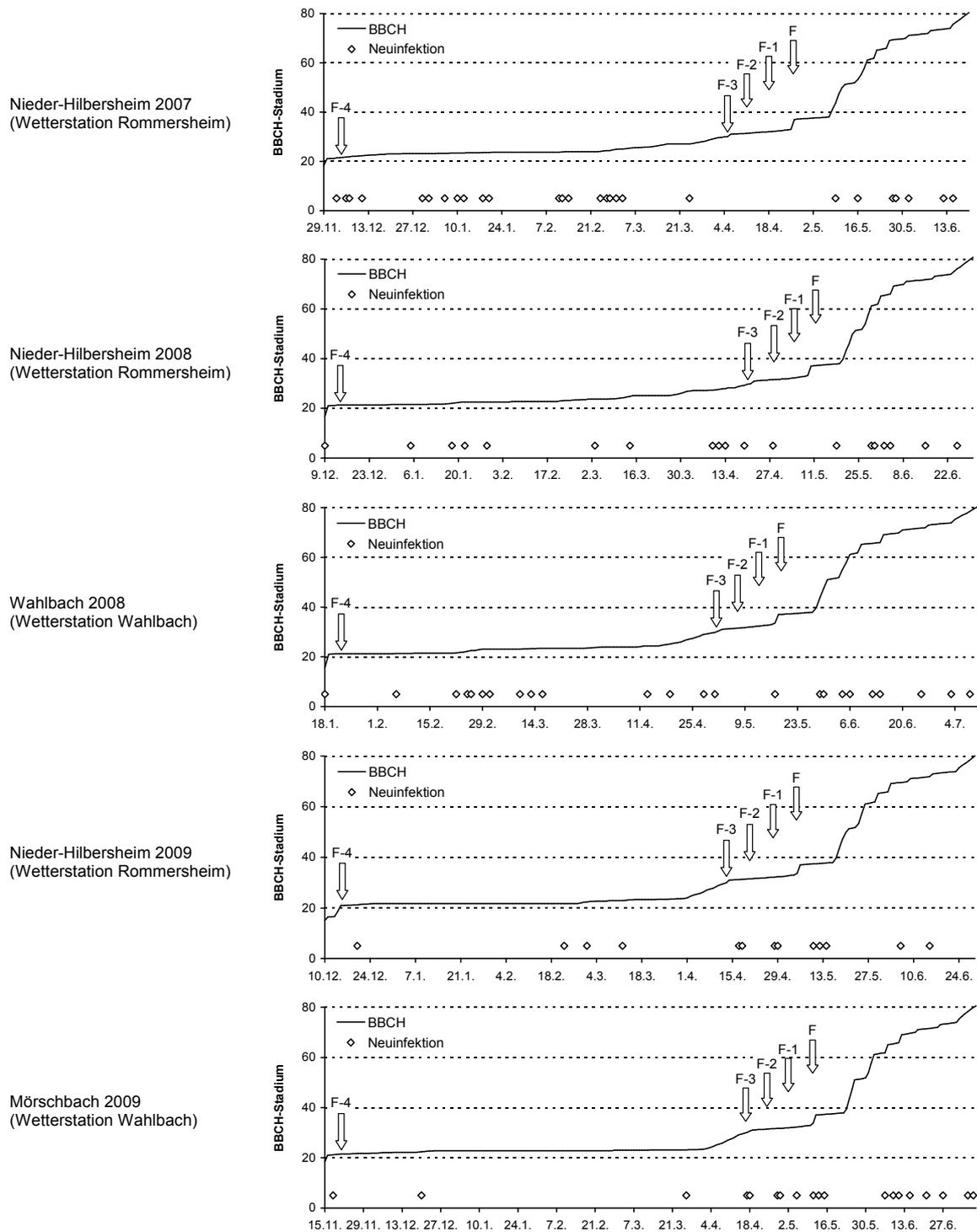


Abbildung 60: Entwicklung der BBCH-Stadien nach dem Modell SIMONTO und erfolgreiche Neuinfektion in den Boniturjahren 2007-2009 an den Standorten der Exakt-Bonituren. Pfeile markieren die Termine, an denen die Blattetagen erschienen sind. Start ist der erste Termin, an dem das BBCH-Stadium 15 überschritten wurde, Ende zu BBCH 80.

5.2.2 Der Ausgangswert des Pilzwachstums

Der Ausgangswert des Pilzwachstums bestimmt den Befallswert, mit dem nach dem Abschluss einer Neuinfektion das Pilzwachstum beginnt. Dieser steigt mit zunehmendem Befall an und verringert sich wieder in der Seneszenzphase der Blätter.

Bei einem erfolgreich beendeten Neuinfektionsprozess folgt für jede Blatttage die Berechnung des Ausgangswerts für das Pilzwachstum (Gleichung [17]).

$$APW(Fx)_t = v * q(SK) * [1 - bef(Fx)_t] * RBF_{SE}(Fx)_t * \sum_F^{F-4} infP(Fy)_t \quad [17]$$

wobei:

$APW(Fx)_t$	= Ausgangswert Pilzwachstum der Blatttage Fx am Tag t
v	= mittlere Infektionsrate eines Neuinfektionsprozesses (Summe der stündlichen Infektionsraten durch die Anzahl der Stunden des Neuinfektionsprozesses)
$q(SK)$	= Anpassungsfaktor der Sortenklasse mit den Werten:
	0,144 für gering anfällige Sorten
	0,074 für mittel anfällige Sorten
	0,038 für stark anfällige Sorten
$1 - bef(Fx)_t$	= verfügbare Blattfläche der Blatttage Fx am Tag t
$RBF_{SE}(Fx)_t$	= relative Blattfläche (Seneszenzphase) der Blatttage Fx am Tag t
$infP(Fy)_t$	= infektiöses Potential der betrachteten und benachbarten Blatttagen Fy am Tag t

Die verschiedenen Variablen, die in die Berechnung des Ausgangswerts für das Pilzwachstum einfließen, werden im Folgenden nacheinander betrachtet.

Infektionsrate

Mit der Infektionsrate wird die relative Zunahme des Befalls pro Zeiteinheit und Bezugsgröße beschrieben (AUST et al., 1991). In SEPTR12 wird damit der stündliche Einfluss der Temperatur auf den gesamten Neuinfektionsprozess betrachtet. Bei niedrigen Temperaturen können weniger Pyknosporen erfolgreich infizieren als bei optimalen Bedingungen. Die Infektionsrate wird in jeder Stunde eines Neuinfektionsprozesses in Abhängigkeit von der Temperatur bestimmt (Abbildung 61). Aus der Summe der Stundenwerte wird für die Dauer des Neuinfektionsprozess die mittlere Infektionsrate gebildet, die in der Gleichung [17] verwendet wird.

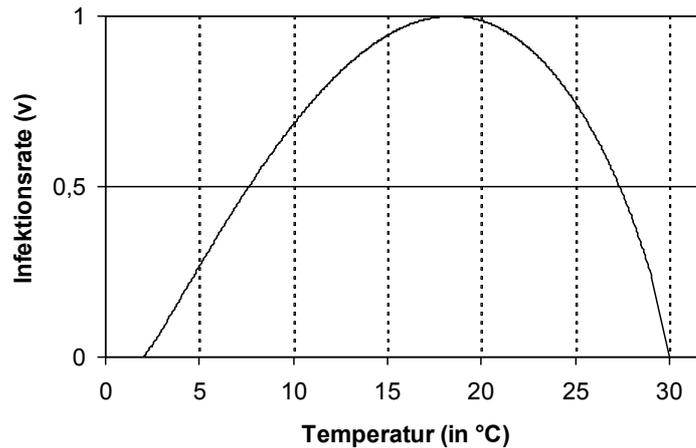


Abbildung 61: Infektionsrate zur Bewertung der relativen Befallszunahme bei einem Neuinfektionsprozess in Abhängigkeit von der Temperatur.

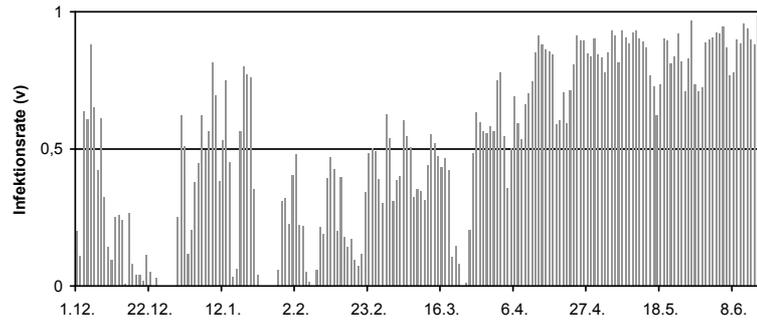
Die Modellierung der Infektionsrate erfolgte mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]). Grundlage war die von KLUGE et al. (2006) verwendete quadratische Funktion für den Faktor des Temperatureinflusses bei einem Neuinfektionsereignis, die aus Literaturangaben und Ergebnissen eigener, nicht veröffentlichter Versuche (persönliche Mitteilung E. Kluge) ermittelt wurde. Als Optimum wurde die aus den verschiedenen Laborversuchen mittlere Temperatur von 18,4°C verwendet. Die untere und obere Temperaturgrenze wurde wie für die bereits beschriebenen Anpassungen bei Temperaturen von 2°C und 30°C festgelegt (HOFFMANN & SCHMUTTERER, 1999) (Tabelle 38).

Tabelle 38: Parameterwerte zur Berechnung der Infektionsrate mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) während eines Neuinfektionsprozesses.

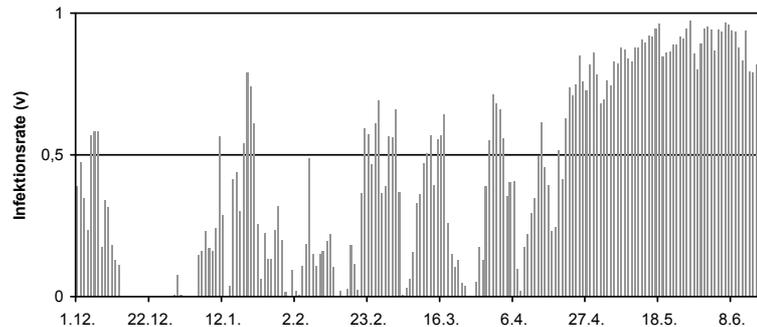
Infektionsrate	Y_{opt}	T_{opt}	T_{min}	T_{max}	n
v	1	18,4	2	30	0,81

Die täglichen Infektionsraten der Boniturjahre von 2007 bis 2009 sind für den Zeitraum vom 01.12. bis zum 15.06. in der Abbildung 62 dargestellt. In Abhängigkeit von der Temperatur an den Standorten der Exakt-Bonituren wurde die tägliche mittlere Infektionsrate berechnet. Es wird deutlich, dass die Temperaturen im Winter 2007 höher waren als im Jahr 2008, da höhere Infektionsraten berechnet wurden. Der Winter 2009 hatte im Vergleich der Jahre die niedrigsten Temperaturen, da bis Mitte Februar für die meisten Tage eine Infektionsrate von null berechnet wurde. Für den Zeitraum ab Mitte April sind die Jahresunterschiede geringer. Im Modell SEPTR12 wird die Infektionsrate nur während eines Neuinfektionsprozesses kalkuliert.

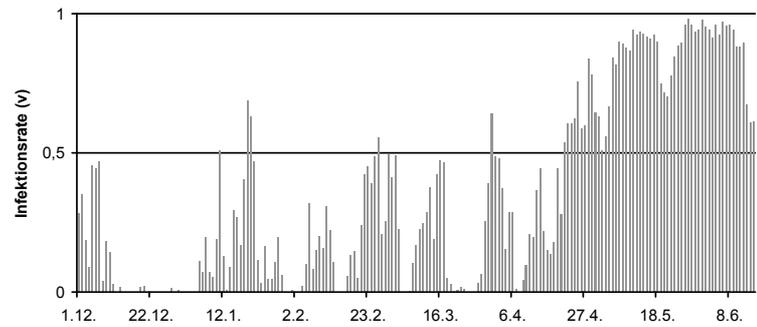
Nieder-Hilbersheim 2007
(Wetterstation Rommersheim)



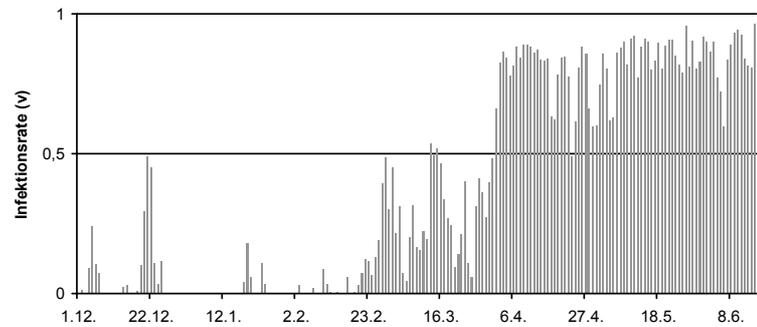
Nieder-Hilbersheim 2008
(Wetterstation Rommersheim)



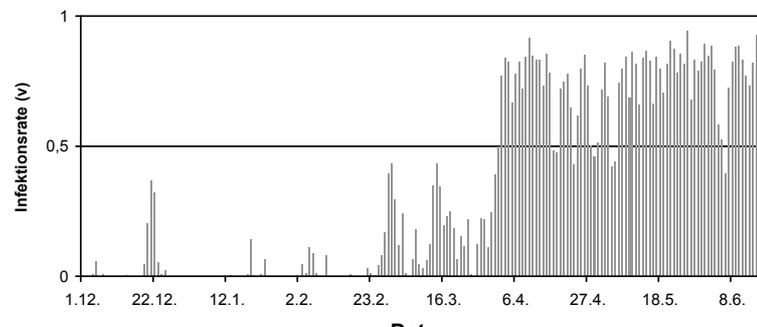
Wahlbach 2008
(Wetterstation Wahlbach)



Nieder-Hilbersheim 2009
(Wetterstation Rommersheim)



Mörschbach 2009
(Wetterstation Wahlbach)



Datum

Abbildung 62: Tägliche Werte der Infektionsrate für die Boniturjahre 2007 bis 2009 in Abhängigkeit von den Temperaturen an den Standorten der Exakt-Bonituren für den Zeitraum vom 1. Dezember bis 30. Juni.

Anpassungsfaktor

Zur Anpassung der Simulationsergebnisse an den tatsächlichen Verlauf im Freiland wurde für jede Sortenklasse ein Faktor bei der Berechnung des Ausgangswerts verwendet. Für den Standort Wahlbach 2008 der Exakt-Bonituren wurden die optimalen Anpassungsfaktoren mit Hilfe einer Programmschleife bestimmt, für die sich die geringsten Abweichungen zwischen simulierten und erhobenen Daten ergaben. Der Standort Wahlbach 2008 wurde gewählt, da sich an diesem Standort die Wetterstation in unmittelbarer Nähe zur Erhebungsfläche befand.

verfügbare Blattfläche

Infektionen können nur auf der verfügbaren Blattfläche erfolgen. Daher wird mit diesem Faktor die bereits befallene Fläche einer Blattetage (d. h. die Summe der Befallswerte aller Infektionszyklen) berücksichtigt.

Blattfläche in der Seneszenz

Infektionen können nur auf grünem Blattgewebe erfolgen. Die Sporen, die auf bereits nekrotisierte Blattstellen fallen, verursachen keine neuen Infektionen.

Infektiöses Potential der Blattetagen

Das infektiöse Potential der betrachteten und benachbarten Blattetagen wird nach der Gleichung [18] berechnet. Von jeder Blattetage wird der Wert der befallenen Fläche mit Pyknidien mit dem Sortenfaktor der Pyknidiendichte für die jeweilige Sortenklasse und Blattetage multipliziert (Modellierung in Kapitel 4.2.2, Sortenfaktoren in Tabelle 27). Die Pyknidiendichte wird berücksichtigt, da bei einer geringen Pyknidiendichte weniger Sporen vorhanden sind die Infektionen auslösen können, als bei einer hohen Pyknidiendichte.

Bei der Berechnung des infektiösen Potentials fließt die relative Blattfläche mit ein. Die relative Blattfläche wird verwendet, da von einer kleinen Blattfläche weniger Sporen verteilt werden als von einer großen Blattfläche. Des Weiteren wird ein Faktor $FAB(F_x, F_y)$ für den Abstand der betrachteten zur benachbarten Blattetage für das infektiöse Potential berücksichtigt (Tabelle 39).

$$infP(F_y)_t = bef_{LZ}(F_y)_t * SF_{PD}(SK; F_y) * RBF(F_y)_t * FAB(F_x, F_y) \quad [18]$$

wobei:

- $infP(F_y)_t$ = infektiöses Potential der betrachteten und benachbarten Blattetagen F_y am Tag t
- $bef_{LZ}(F_y)_t$ = Summe der Befallswerte (Latenzzeit abgelaufen) der Blattetage F_y am Tag t
- $SF_{PD}(SK; F_y)$ = Sortenfaktor der Pyknidiendichte für die Sortenklasse SK und der Blattetage F_y
- $RBF(F_y)_t$ = relative Blattfläche in Abhängigkeit der Blattentwicklung (Wachstum, Erhaltung, Seneszenz) der Blattetage F_y am Tag t
- $FAB(F_x, F_y)$ = Faktor für den Abstand der betrachteten Blattetage F_x zur benachbarten Blattetage F_y (Tabelle 39)

Zu Beginn der Simulation ab BBCH 15 ist die befallene Fläche mit Pyknidien null. Erst mit dem Ende der Latenzzeit des ersten betrachteten Neuinfektionsprozesses ist ein Befallswert vorhanden, der für die Berechnung verwendet werden kann. Bis zu diesem Zeitpunkt wird mit einem Befallswert-*Start* von 0,0003% gerechnet. Dieser Wert ist identisch mit dem Startwert der Anpassung der logistischen Funktion. Dieser wurde mit den im Labor erhobenen Daten des Pilzwachstums erstellt (Kapitel 4.1.1). Der Wert von 0,0003% wird verwendet, bis sich aufgrund des Befalls der Blattetage ein höherer Befallswert berechnet.

Abstand der Blattetagen

Der Abstand der Blattetagen wird betrachtet, da ein Befall der gesamten Pflanze nur möglich ist, wenn Sporen von den unteren Blattetagen auf die oberen Blattetagen verteilt werden. Die Primärinfektion einer Blattetage kann nur von Pykno-sporen unterer Blattetagen erfolgen. Da der Abstand benachbarter Blattetagen zur betrachteten Blattetage variiert, wurden die Faktoren in einer Matrix festgelegt. Zur Vereinfachung wurde angenommen, dass *S. tritici* sich nur auf höhere Blattetagen ausbreitet, da die Sporen, die von höheren Blattetagen auf untere Blattetagen fallen, nur wenig Zeit für die Entwicklung haben, bis die natürliche Seneszenz beginnt (AUDSLEY et al., 2005).

Die Abstände der Blattetagen werden als Faktoren bei der Berechnung berücksichtigt. Messungen im Boniturjahr 2007 zum Abstand der Blattetagen an den zehn Sorten am Standort Nieder-Hilbersheim haben keinen Zusammenhang zwischen der Pflanzenhöhe und der Septoria-Anfälligkeit ergeben. Die erhobenen Daten ergaben einen mittleren Abstand von 10 cm der Blattetagen von F-4 bis F-1. Dieser Wert wurde von AUDSLEY et al. (2005) für den Abstand jeder benachbarten Blattetage verwendet. Eine Abweichung zu den eigenen Erhebungswerten gab es für den Abstand zwischen Blattetage F-1 und dem Fahnenblatt, der 20 cm betrug. Das infektiöse Potential einer Blattetage verringert sich pro 10 cm Abstand zur betrachteten Blattetage um 50% (Tabelle 39).

Der Ausgangswert des Pilzwachstums für eine Blattetage bildet sich aus der Summe des infektiösen Potentials der eigenen Blattetage und der Werte der benachbarten Blattetagen unter Berücksichtigung des Abstandes der Blattetagen. Im Falle der betrachteten Blattetage wird der Wert 1 verwendet.

Tabelle 39: Faktoren zur Berücksichtigung des Abstands von betrachteter Blattetage (F_x) zur benachbarten Blattetage (F_y) bei der Berechnung des infektiösen Potentials einer Blattetage (Sporenverteilung nur von untere auf obere Blätter).

		(Fy) = benachbarte Blattetage				
		F	F-1	F-2	F-3	F-4
(Fx) = betrachtete Blattetage	F	1	0,25	0,13	0,06	0,03
	F-1	0	1	0,5	0,25	0,13
	F-2	0	0	1	0,5	0,25
	F-3	0	0	0	1	0,5
	F-4	0	0	0	0	1

Bei der Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums (APW) werden für die relative Blattfläche (RBF), verfügbare Blattfläche ($1 - bef$) und die befallene Fläche mit Pyknidien (bef_{LZ}) die Werte zum Zeitpunkt des Beginns eines Neuinfektionsprozesses verwendet. Die Infektionsrate (v) kann erst am Ende eines erfolgreichen Neuinfektionsprozesses berechnet werden, da die Temperaturen während des gesamten Neuinfektionsprozesses bewertet werden.

5.2.3 Das Pilzwachstum

Zur einheitlichen Darstellung in dieser Arbeit werden für die zeitabhängigen Parameter die täglichen Werte dargestellt. Im Modell SEPTR12 werden diese für die stündlichen Berechnungen durch 24 dividiert. Das Pilzwachstum wird im Modell SEPTR12 in Bezug auf den aktuellen Befallswert kalkuliert. Es wird dabei nicht zwischen latentem und sichtbarem Befall unterschieden. Der erste Befallswert, mit dem die Berechnungen in der ersten Stunde nach einem erfolgreichen Neuinfektionsprozess beginnen, ist der Ausgangswert des Pilzwachstums (APW).

Der Wert der befallenen Fläche zum Zeitpunkt t wird mit Gleichung [19] berechnet. Dazu wird der Wert der befallenen Fläche zum Zeitpunkt $t-1$ mit der Rate des Pilzwachstums erhöht. Des Weiteren wird die gesamte bereits befallene Fläche berücksichtigt, da sich der Befall nur auf der verfügbaren Blattfläche ausbreiten kann. Die verfügbare Blattfläche nimmt im Verlauf der Befallsentwicklung ab und verringert den kalkulierten Zuwachs.

$$bef(Fx)_t = bef(Fx)_{t-1} * r_{PW}(T, SK)_t * [1 - bef(Fx)_{t-1}] \quad [19]$$

wobei:

$bef(Fx)_t$ = Summe der Befallswerte der Blattetage F_x am Tag t

$r_{PW}(T, SK)_t$ = Rate Pilzwachstum in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t

$1 - bef(Fx)_{t-1}$ = verfügbare Blattfläche der Blattetage F_x am Tag t

Der Wert für die Rate des Pilzwachstums wird über die Beta-Funktion (Gleichung [4]) mit den modellierten Parameterwerten und der stündlichen Temperatur berechnet. Dabei wird zudem der Sortenfaktor berücksichtigt (Modellierung der Parameterwerte und der Sortenfaktoren Kapitel 4.1.1.3). Die Gleichung [20] beschreibt die Berechnung der Rate des Pilzwachstums.

$$r_{PW}(T, SK)_t = GB_{PW}(T)_t * SF_{PW}(SK) \quad [20]$$

wobei:

$$r_{PW}(T, SK)_t = \text{Rate Pilzwachstum in Abhängigkeit von Temperatur } T \text{ und Sortenklasse } SK \text{ am Tag } t$$

$$GB_{PW}(T)_t = \text{Gleichung der Beta-Funktion [4] für das Pilzwachstum in Abhängigkeit von der Temperatur } T \text{ am Tag } t$$

$$= 0,479 * ((T - 2)/16,7)^{1,35} * ((30 - T)/11,3)^{0,91}$$

$$SF_{PW}(SK) = \text{Sortenfaktor Pilzwachstum der Sortenklasse } SK \text{ mit den Werten:}$$

1	für stark anfällige Sorten
0,91	für mittel anfällige Sorten
0,83	für gering anfällige Sorten

In der Phase der Blatterhaltung hat die Blattfläche die maximale Größe einer Blattetage. Für die Phasen des Blattwachstums und der Blattseneszenz muss ein Korrekturfaktor für die Blattfläche berücksichtigt werden. Dadurch ist die für das Pilzwachstum verfügbare Blattfläche verringert und der berechnete Befallswert zum Zeitpunkt t muss auf die aktuelle Blattfläche angepasst werden.

In der Phase des Blattwachstums erfolgt die Korrektur mit der Gleichung [21]. Dazu wird das Verhältnis der Blattflächen an den Zeitpunkten $t-1$ und t gebildet. Der Befallswert wird damit auf die größere Blattfläche angepasst, da sich ansonsten die befallene Fläche mit der wachsenden Blattfläche erhöhen würde.

$$bef(Fx)_t \hat{=} bef(Fx)_t * [RBF_{WA}(Fx)_{t-1} / RBF_{WA}(Fx)_t] \quad [21]$$

wobei:

$$bef(Fx)_t = \text{Summe der Befallswerte der Blattetage } Fx \text{ am Tag } t$$

$$RBF_{WA}(Fx)_t = \text{relative Blattfläche (Wachstumsphase) der Blattetage } Fx \text{ am Tag } t$$

In der Phase der Seneszenz wird mit dem Korrekturfaktor die Abnahme der verfügbaren Blattfläche aufgrund der Seneszenz der Blätter berücksichtigt. Der berechnete Befallswert wird mit dem Faktor für die Größe der Blattfläche angepasst (Gleichung [22]).

$$bef(Fx)_t \hat{=} bef(Fx)_t * [RBF_{SE}(Fx)_t / RBF_{SE}(Fx)_{t-1}] \quad [22]$$

wobei:

$$\begin{aligned} bef(Fx)_t &= \text{Summe der Befallswerte der Blattetage } Fx \text{ am Tag } t \\ RBF_{SE}(Fx)_t &= \text{relative Blattfläche (Seneszenzphase) der Blattetage } Fx \text{ am Tag } t \end{aligned}$$

Die Befallsstärke einer Blattetage ist der Anteil der berechneten Befallswerte, für die die Inkubationszeit abgelaufen ist. Dazu werden alle bereits beendeten und die laufenden Infektionszyklen betrachtet.

5.2.4 Die Inkubationszeit

Die Werte für die Rate der Inkubationszeit werden mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) in Verbindung mit den modellierten Parameterwerten sowie der aktuellen Temperatur berechnet. Weiterhin wird der entsprechende Sortenfaktor berücksichtigt (Schätzung der Parameterwerte und der Sortenfaktoren in Kapitel 4.1.2.2). Die Berechnung der Rate der Inkubationszeit ist in Gleichung [23] dargestellt.

$$r_{IZ}(T, SK)_t = GB_{IZ}(T)_t * SF_{IZ}(SK) \quad [23]$$

wobei:

$$\begin{aligned} r_{IZ}(T, SK)_t &= \text{Rate Inkubationszeit in Abhängigkeit von Temperatur } T \text{ und Sortenklasse } SK \\ &\quad \text{am Tag } t \\ GB_{IZ}(T)_t &= \text{Gleichung der Beta-Funktion [4] für die Inkubationszeit in Abhängigkeit von der} \\ &\quad \text{Temperatur } T \text{ am Tag } t \\ &= 0,085 * ((T - 2)/17,3)^{1,12} * ((30 - T)/10,7)^{0,70} \\ SF_{IZ}(SK) &= \text{Sortenfaktor Inkubationszeit der Sortenklasse } SK \text{ mit den Werten:} \\ &\quad 1 \quad \text{für stark anfällige Sorten} \\ &\quad 0,86 \quad \text{für mittel anfällige Sorten} \\ &\quad 0,73 \quad \text{für gering anfällige Sorten} \end{aligned}$$

Die Inkubationszeit ist beendet, sobald die Summe der berechneten Raten, ab dem Beginn der Inkubationszeit, den Wert eins erreichen (Gleichung [24]). Bei niedrigen und hohen Temperaturen ergeben sich geringere Raten als bei Temperaturen im Bereich des Optimums und die Dauer der Inkubationszeit erhöht sich. Ebenso bewirken Temperaturen oberhalb des Optimums eine verlängerte Inkubationszeit.

$$\sum r_{IZ}(T, SK) = 1 \quad [24]$$

Mit dem Ende der Inkubationszeit wird der latente Befall sichtbar und daher bei der Berechnung des Wertes für die Befallsstärke einer Blattetage berücksichtigt.

5.2.5 Die Latenzzeit

Die Werte für die Rate der Latenzzeit werden mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) in Verbindung mit den modellierten Parameterwerten und der aktuellen Temperatur berechnet. Dabei wird ein Sortenfaktor berücksichtigt (Modellierung der Parameterwerte und der Sortenfaktoren Kapitel 4.1.3.2). Mit der Gleichung [25] ergibt sich die Rate der Latenzzeit.

$$r_{LZ}(T, SK)_t = GB_{LZ}(T)_t * SF_{LZ}(SK) \quad [25]$$

wobei::

$r_{LZ}(T, SK)_t$ = Rate Latenzzeit in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t

$GB_{LZ}(T)_t$ = Gleichung der Beta-Funktion [4] für die Latenzzeit in Abhängigkeit von der mittleren Temperatur am Tag t

$$= 0,059 * ((T - 2) / 15,2)^{0,96} * ((30 - T) / 12,8)^{0,81}$$

$SF_{LZ}(SK)$ = Sortenfaktor Latenzzeit der Sortenklasse SK mit den Werten:

- 1 für stark anfällige Sorten
- 0,94 für mittel anfällige Sorten
- 0,88 für gering anfällige Sorten

Die Latenzzeit ist beendet, wenn die Summe der einzelnen Raten den Wert 1 erreicht hat (Gleichung [26]). Bei hohen und niedrigen Temperaturen ergeben sich geringere Raten der Latenzzeit als bei Temperaturen nahe dem Optimum. Dadurch erhöht sich die Dauer der Latenzzeit.

$$\sum r_{LZ}(T, SK) = 1 \quad [26]$$

Mit dem Ablauf der Latenzzeit sind die Pyknidien sichtbar und die Sporen können zu Neuinfektionen beitragen. Daher wird der Befallswert eines Neuinfektionszyklus ab diesem Zeitpunkt bei der Kalkulation des Ausgangswerts für das Pilzwachstum bei einer erfolgreichen Neuinfektion berücksichtigt.

5.2.6 Die Dauer der Pyknidienformation

Die Werte für die Rate der Dauer der Pyknidienformation werden mit der Beta-Funktion (Gleichung [4]) in Verbindung mit den modellierten Parameterwerten und der aktuellen Temperatur bestimmt. Ein Sortenfaktor wird ebenfalls berücksichtigt (Modellierung der Parameterwerte und der Sortenfaktoren Kapitel 4.1.3.2). Die Gleichung [23] beschreibt die Berechnung der Rate der Dauer der Pyknidienformation.

$$r_{PF}(T, SK)_t = GB_{PF}(T) * SF_{PF}(SK) \quad [23]$$

wobei:

$r_{PF}(T, SK)_t$ = Rate der Dauer Pyknidienformation in Abhängigkeit von Temperatur T und Sortenklasse SK am Tag t

$GB_{PF}(T)$ = Gleichung der Beta-Funktion [4] für die Dauer der Pyknidienformation in Abhängigkeit von der Temperatur T am Tag t

$$= 0,291 * ((T - 2)/18,5)^{3,22} * ((30 - T)/9,5)^{1,65}$$

$SF_{PF}(SK)$ = Sortenfaktor der Pyknidienformation der Sortenklasse SK mit den Werten:

- 1 für stark anfällige Sorten
- 0,94 für mittel anfällige Sorten
- 0,88 für gering anfällige Sorten

Die Dauer der Pyknidienformation ist beendet, wenn die Summe der einzelnen Raten den Wert eins erreicht hat. Zu diesem Zeitpunkt erhöht sich die Anzahl der Pyknidien nicht weiter.

$$\sum r_{PF}(T, SK) = 1 \quad [24]$$

Das Wachstum der Läsionen eines Infektionszykluses wird berechnet, bis die Pyknidienformation abgeschlossen ist. In Abhängigkeit von der optimalen Temperatur verlängert sich die Dauer dieser Phase.

5.2.7 Fungizidwirkung

Zur Demonstration der Fungizidwirkung auf die Befallsentwicklung von *S. tritici* wurden die Daten des Standortes Wahlbach 2008 modelliert. An diesem Standort wurde ein protektives Fungizid eingesetzt, das heißt die Wirkung beginnt ab dem Zeitpunkt der Behandlung. Eine Modellierung der Wirkung des kurativen Fungizids wurde nicht durchgeführt, da Daten zur heilenden Wirkung im Rahmen dieser Arbeit nicht erhoben wurden.

Zur Auswertung der Daten wurde die Befallsentwicklung in jeder behandelten Wiederholung der vier Sorten Solitär, Biscay, Drifter und Atoll betrachtet. Eine Differenzierung in Abhängigkeit von der Septoria-Anfälligkeit wurde nicht vorgenommen, da protektive Fungizide eine sporenabtötende Wirkung haben und nicht die Pflanzen beeinflussen. Der maximale Befall einer Wiederholung wurde

gleich eins gesetzt und die anderen Erhebungsdaten dazu relativiert. In Abhängigkeit zu den Tagen nach der Behandlung berechnete sich für jede Wiederholung ein prozentualer Wert der Fungizidwirkung. Zur Beschreibung der Fungizidwirkung am Tag 1 nach der Behandlung wurden die Boniturdaten der behandelten und unbehandelten Variante ab dem 28.05.2008 betrachtet und somit eine Inkubationszeit von ca. 18 Tagen berücksichtigt. Vor dem Ablauf der Inkubationszeit ist der Effekt einer Behandlung im Bestand nicht zu sehen, da das Fungizid eine Wirkung auf die Sporen hat, wodurch die resultierende Befallsstärke reduziert wurde.

Die Auswertung bezieht sich auf die Daten der Blatttage F-2. Im Vergleich zu den Daten für den Mittelwert der oberen drei Blatttagen ergaben sich keine signifikanten Unterschiede der Fungizidwirkung.

Die Fungizidwirkung war in den ersten zwei Wochen nach der Behandlung unverändert. Ab der dritten Woche nahm die Wirkung ab und war nach ca. fünf Wochen komplett abgebaut (Tabelle 40). Die Streuung der Daten der einzelnen Wiederholung war in den ersten drei Wochen nach der Behandlung gering. Für den Termin fünf Wochen nach der Behandlung variierten die Ergebnisse in einem Bereich zwischen 70% und 5%, bevor die Wirkung bei allen Wiederholungen in der folgenden Woche null war.

Tabelle 40: Varianzanalyse der Fungizidwirkungen der Wiederholungen in Abhängigkeit der Tage nach der Behandlung (10.5.) am Standort Wahlbach 2008 mit anschließendem Tukey-Test ($\alpha=0,05$). Tage mit den gleichen Buchstaben unterscheiden sich nicht signifikant.

Tage nach der Behandlung	mittlere Fungizidwirkung	Gruppe		
1	95,00%	A		
7	94,54%	A		
14	94,04%	A		
20	92,12%	A	B	
28	82,15%		B	
35	34,38%			C
42	0,00%			D

Zur Beschreibung der Fungizidwirkung im Modell SEPTRI2 wurde eine logistische Anpassung (Gleichung [7]) an die erhobenen Daten der einzelnen Termine vorgenommen. Dazu wurde die mittlere Fungizidwirkung aus Tabelle 40 am Tag 1 nach der Behandlung gleich 1 gesetzt und die weiteren Tage dazu in Relation betrachtet. Die geschätzten Parameterwerte sind in der Tabelle 41 abgebildet. Die Boniturdaten und der Verlauf der logistischen Anpassung ist aus der Abbildung 63 ersichtlich.

Tabelle 41: Geschätzte Parameterwerte der logistischen Funktion zur Berechnung des täglichen Fungizidfaktors in Abhängigkeit von den Tagen nach der Fungizidbehandlung (Gleichung [7]).

Fungizidfaktor ($R^2 = 0,93$)

Parameter	Wert	Standardfehler	p
FW_{\max}	1	0,000006	<0,0001
r_{FW}	0,367	0,033600	<0,0001
y_o	0,00001		

*Parameterwert fix

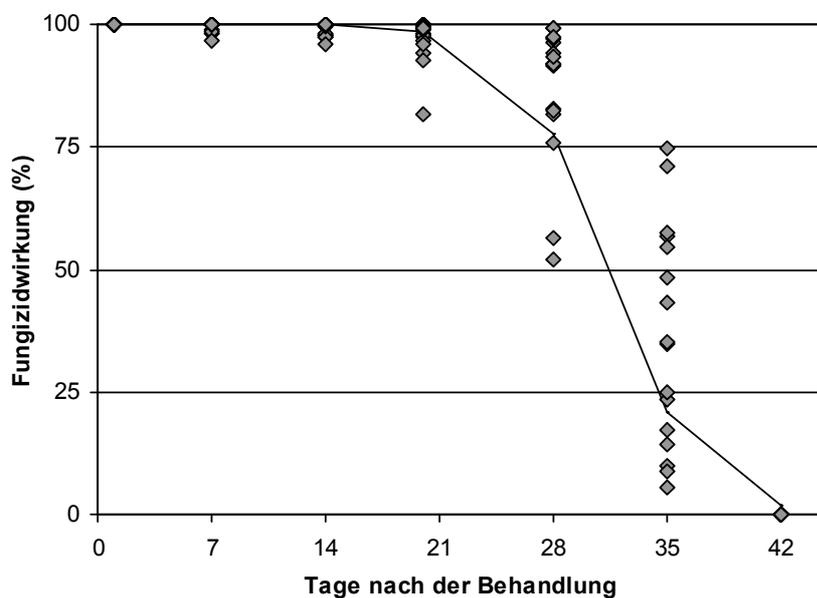


Abbildung 63: Fungizidwirkung am Standort Wahlbach 2008 in Abhängigkeit der Tage nach der Applikation. Punkte markieren die Bonituren der einzelnen Wiederholungen und die durchgezogene Linie das Ergebnis der logistischen Anpassung.

Während eines Neuinfektionsprozesses wird aufgrund der Wirkung von protektiven Fungiziden, wie dem hier eingesetzten Bravo 500 (Wirkstoff Chlorothalonil), der Anteil erfolgreicher Infektionen verringert. Dabei nimmt die Wirkung im Laufe der Zeit nach der Behandlung ab. Im Modell SEPTRI2 wurde ein Fungizidfaktor integriert, der während eines Neuinfektionsprozesses stündlich aktualisiert wird.

Mit der Infektionsrate wird bei der Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums der Anteil an Sporen berücksichtigt, der Infektionen hervorrufen kann. Die mittlere Infektionsrate für die Dauer eines Neuinfektionsprozesses wird aus der Summe der stündlichen Werte in Abhängigkeit von der Temperatur gebildet. Für die Simulation der Befallsentwicklung bei Einsatz eines Fungizides wird die berechnete Fungizidwirkung stündlich mit der Infektionsrate multipliziert, die dadurch reduziert wird. Der Ausgangswert des Pilzwachstums ist herabgesetzt und die täglichen Befallswerte sind

geringer. Nach 42 Tagen wird kein Fungizidfaktor mehr bei der Berechnung der Infektionsrate berücksichtigt.

$$APW(Fx)_t = v * FF_t * q(SK) * [1 - bef(Fx)_t] * RBF_{SE}(Fx)_t * \sum_F^{F-4} infP(Fy)_t \quad [17]$$

wobei:

$APW(Fx)_t$	= Ausgangswert Pilzwachstum der Blattetage Fx am Tag t
v	= mittlere Infektionsrate eines Neuinfektionsprozesses (Summe der stündlichen Infektionsraten durch die Anzahl der Stunden des Neuinfektionsprozesses)
FF_t	= Fungizidfaktor am Tag t nach der Applikation
$q(SK)$	= Anpassungsfaktor der Sortenklasse mit den Werten: 0,144 für gering anfällige Sorten 0,074 für mittel anfällige Sorten 0,038 für stark anfällige Sorten
$1 - bef(Fx)_t$	= verfügbare Blattfläche der Blattetage Fx am Tag t
$RBF_{SE}(Fx)_t$	= relative Blattfläche (Seneszenzphase) der Blattetage Fx am Tag t
$infP(Fy)_t$	= infektiöses Potential der betrachteten und benachbarten Blattetagen Fy am Tag t

In der Abbildung 64 sind die Simulationsergebnisse der unbehandelten und behandelten Varianten mit den Wetterdaten des Standortes Wahlbach 2008 dargestellt. Für jede Sortenklasse ist eine deutliche Abnahme der Befallsstärke zu erkennen. Ohne Fungizidbehandlung sind die Unterschiede der Befallsstärken an jedem Termin der verschiedenen Sortenklassen größer als für die Varianten mit Fungizidbehandlung. Bei den stark anfälligen Sorten war die Befallsreduzierung stärker als bei den gering anfälligen Sorten.

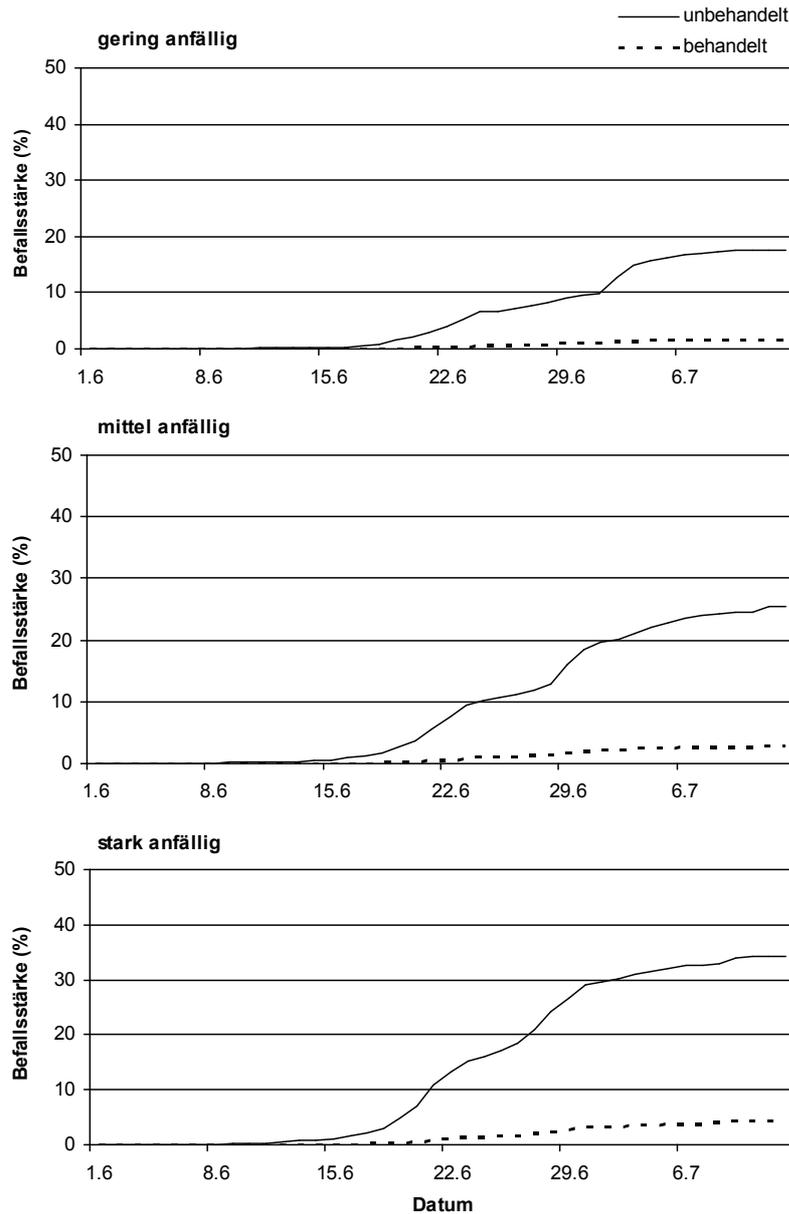


Abbildung 64: Vergleich der Simulation der Befallsentwicklung für den Standort Wahlbach 2008 der behandelten und der unbehandelten Variante der Blattetage F-2 der drei Sortenklassen. Behandlungstermin: 10.5.2008.

5.3 Programmtechnische Umsetzung

Die aus den Daten gewonnenen Funktionen und Parameterwerte wurden für die Simulation der Befallsentwicklung und zur Validierung des Modells SEPTRI2 in ein Computerprogramm umgesetzt. Die Programmierung wurde von Diplom-Informatiker Wilhelm Erven in der Programmiersprache Turbo Pascal mit der Software DELPHI® (7.0) durchgeführt.

6. VALIDIERUNG

Zur Validierung des Modells SEPTRI2 wurden drei verschiedene Aspekte betrachtet. Die Ergebnisse wurden dabei in Abhängigkeit von Sortenklasse und Blattetage (Anzahl variiert je nach Erhebung) dargestellt. Es wurde für folgende Bereiche eine Validierung durchgeführt:

- Erstauffreten: Überprüfung, ob das Erstauffreten von Läsionen korrekt simuliert wird
- visuelle Validierung der Befallsentwicklung: subjektive Überprüfung, ob die Simulation die tatsächliche Befallsentwicklung widerspiegelt
- statistische Validierung: Vergleich von Simulations- und Boniturdaten mit statistischen Methoden

Da zu Boniturrende die Blätter aufgrund der Seneszenz, des Befalls mit *S. tritici* sowie weiterer Schaderreger stark nekrotisiert waren, wurde für die visuelle und die statistische Validierung der letzte Boniturtermin nicht berücksichtigt. Der letzte betrachtete Termin war überwiegend zu BBCH-Stadium 77/83 (Ende Milchreife, Beginn der Frucht- und Samenreife). Beispielsweise kam es im Jahr 2007 zwei bis drei Wochen vor Boniturrende (Boniturrende = BBCH 85) zu einem massiven Braunrostbefall, wodurch sich Läsionen überlagerten und eine eindeutige Zuordnung nicht mehr möglich war.

Die mit den Erhebungsdaten der Exakt-Bonituren Wahlbach 2008 geschätzten Anpassungsfaktoren $q(SK)$ zur Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums $APW(Fx)$ (Gleichung [17]) haben keinen Einfluss auf die Simulation des Erstauffretens, da nur der Zeitpunkt der Primärinfektionen berücksichtigt wurde. Für die tägliche Berechnung der Befallsentwicklung wird der Anpassungsfaktor ebenfalls nicht benötigt, sondern nur einmalig nach einem Neuinfektionsereignis zur Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums zusammen mit vier weiteren Faktoren (Gleichung [17]). Im Rahmen der visuellen Validierung wurden die Befallsverläufe der verschiedenen Blattetagen auch für den Standort Wahlbach 2008 abgebildet. Bei der statistischen Validierung aller Blattetagen und Sortenklassen wurden diese Daten nicht verwendet.

6.1 Validierung des Erstauffretens von *S. tritici* mit dem Modell SEPTRI2 anhand der Daten aus den Exakt-Bonituren, der LSV-RP und den PSD-Bonituren

Zur Validierung des Erstauffretens von *S. tritici* auf den oberen Blattetagen wurde das Datum des bonitierten Erstauffretens mit dem simulierten Ende der Latenzzeit verglichen (Definitionen siehe Kapitel 3.1). Die berechneten Abstände (Tage) zwischen Bonitur und Simulation wurden in fünf Klassen eingeteilt. Dabei wurde die Simulation als korrekt bewertet, wenn sie in einem Bereich von ± 7 Tagen im Vergleich zum bonitierten Erstauffreten lag. In den Bereichen unter- bzw. oberhalb von 12 Tagen wurde die Simulation als extrem zu früh bzw. extrem zu spät bewertet. Bei Abweichungen zwischen 8 und 12 Tagen wurde von einer zu frühen bzw. zu späten Simulation gesprochen (Abbildung 65).

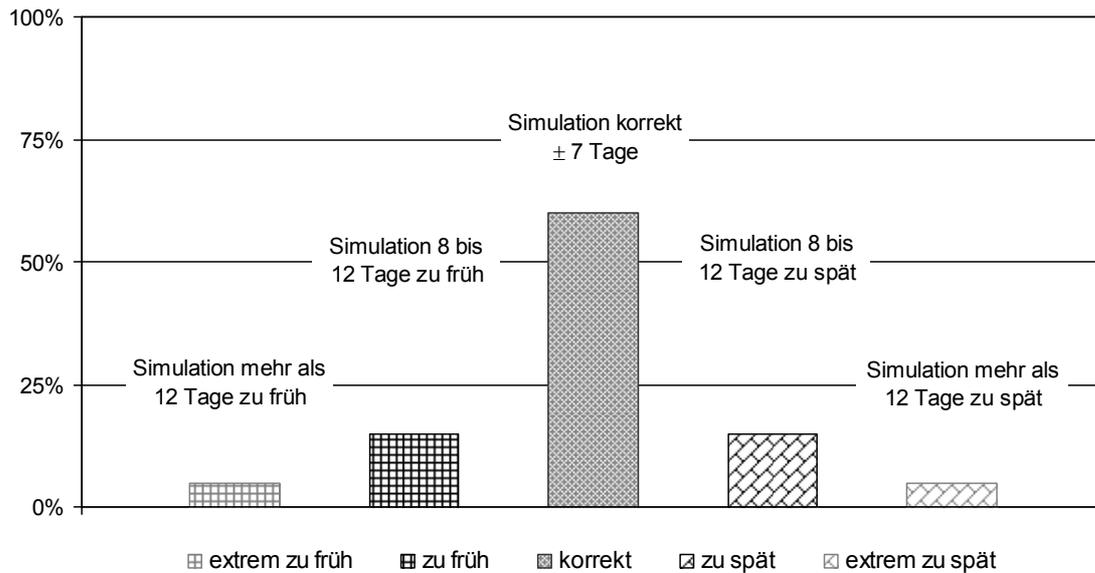


Abbildung 65: Validierungsschema für die Simulation des Erstauftretens von *S. tritici*. Säulen zeigen den prozentualen Anteil der Ereignisse Simulation extrem zu früh (< - 12 Tage), zu früh (-8 bis -12 Tage), korrekt (+/- 7 Tage), zu spät (8 bis 12 Tage) und extrem zu spät (> 12 Tage) für eine Sortenklasse und eine Blatttage.

Bei der Validierung des Erstauftretens von Septoria-Läsionen wurden zunächst die Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP sowohl getrennt als auch zusammen analysiert (alle Standorte in Rheinland-Pfalz). Anschließend wurde der Termin des Erstauftretens für die Erhebungsdaten der PSD im Vergleich zur Simulation untersucht.

Für die Validierung standen von den Standorten der Exakt-Bonituren insgesamt 36 Datensätze (= Varianten) und von den Erhebungen in den Landessortenversuchen 40 Datensätze zur Verfügung. Für die gering anfälligen Sorten der Exakt-Bonituren lag der Anteil korrekter Simulationen bei 70% für die Blatttagen F-1 und F-2. Mit den Daten der LSV-RP ergab sich für die Blatttage F-2 in 100% der Fälle eine korrekte Simulation bei den gering anfälligen Sorten. Für die Blatttage F-1 hingegen waren nur 30% korrekt und ein Anteil von 50% extrem zu früher Simulationen. Die korrekten Simulationen der Sorten mittlerer Anfälligkeit waren für die Blatttagen F und F-1 der Exakt-Bonituren bei > 75%. Auf den unteren Blatttagen wurde ein großer Anteil zu spät simuliert. An den Standorten der LSV-RP wurde das Erstauftreten auf der Blatttage F-2 zu 100% korrekt bewertet. Bei den stark anfälligen Sorten war die Simulation für die Blatttagen F und F-1 wie bei den Sorten mittlerer Anfälligkeit in keinem Fall zu spät. In die Klasse ‚Simulation korrekt‘ wurden für alle Standorte zwischen 70% und 87,5% der betrachteten Fälle eingeordnet. Das Ergebnis der Blatttage F-2 der stark anfälligen Sorten war für die LSV-RP wieder etwas besser als für die Exakt-Bonituren (Tabelle 42).

In der Tabelle 42 wurden die Ergebnisse getrennt nach den Exakt-Bonituren und den Erhebungen in den LSV-RP dargestellt. Für eine weitere Auswertung wurden alle Daten aus Rheinland-Pfalz zusammen für die drei Sortenklassen betrachtet. Dabei ergab sich ein gutes Ergebnis für die

Sortenklassen mittlerer und starker Anfälligkeit, bei denen die Simulationen auf den Blatttagen F-1 und F-2 in über 75% der Fälle als korrekt bewertet wurden. Bei den gering anfälligen Sorten lag das Ergebnis korrekter Simulationen für die Blatttage F-2 ebenfalls bei 75%, jedoch für die Blatttage F-1 nur bei 40%. Eine zu späte Simulation trat bei allen Sortenklassen am häufigsten für die Blatttage F-3 auf (Abbildung 66).

Die Simulations-Ergebnisse für die Standorte der PSD waren allgemein etwas weniger zutreffend. Die Anteile an den Klassen extrem zu früh und extrem zu spät waren höher im Vergleich zu den Daten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP. Das beste Ergebnis wurde für die Blatttage F-2 der Sorten mittlerer und starker Anfälligkeit erreicht, in denen die Simulation in über 50% der Fälle korrekt war (Abbildung 67).

Tabelle 42: Ergebnisse der Validierung des simulierten Erstauftretens im Vergleich zu den Erhebungen an den Standorten der Exakt-Bonituren (n = 34 pro Blatttage) und der Landessortenversuche (n = 40 pro Blatttage) für die Blatttagen von F bis F-3. Die Werte sind die prozentualen Anteile (%) der jeweiligen Klassen, die in Abbildung 65 definiert wurden.

Sortenklasse gering anfällig

	Exakt-Bonituren (n = 10)				Landessortenversuche (n = 10)			
	F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3
extrem zu früh	30	20	0	10	30	50	0	20
zu früh	20	10	20	0	10	20	0	10
korrekt	50	70	70	50	60	30	100	30
zu spät	0	0	0	20	0	0	0	10
extrem zu spät	0	0	10	20	0	0	0	30

Sortenklasse mittel anfällig

	Exakt-Bonituren (n = 8)				Landessortenversuche (n = 20)			
	F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3
extrem zu früh	12,5	0	0	0	15	10	0	0
zu früh	0	25	0	0	5	10	0	10
korrekt	87,5	75	37,5	37,5	70	80	100	50
zu spät	0	0	12,5	0	0	0	0	10
extrem zu spät	0	0	50	62,5	10	0	0	30

Sortenklasse stark anfällig

	Exakt-Bonituren (n = 16)				Landessortenversuche (n = 10)			
	F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3
extrem zu früh	0	0	0	0	10	20	0	0
zu früh	25	12,5	0	6,3	10	0	0	0
korrekt	75	87,5	62,5	56,3	70	80	100	60
zu spät	0	0	25	0	0	0	0	0
extrem zu spät	0	0	12,5	37,5	10	0	0	40

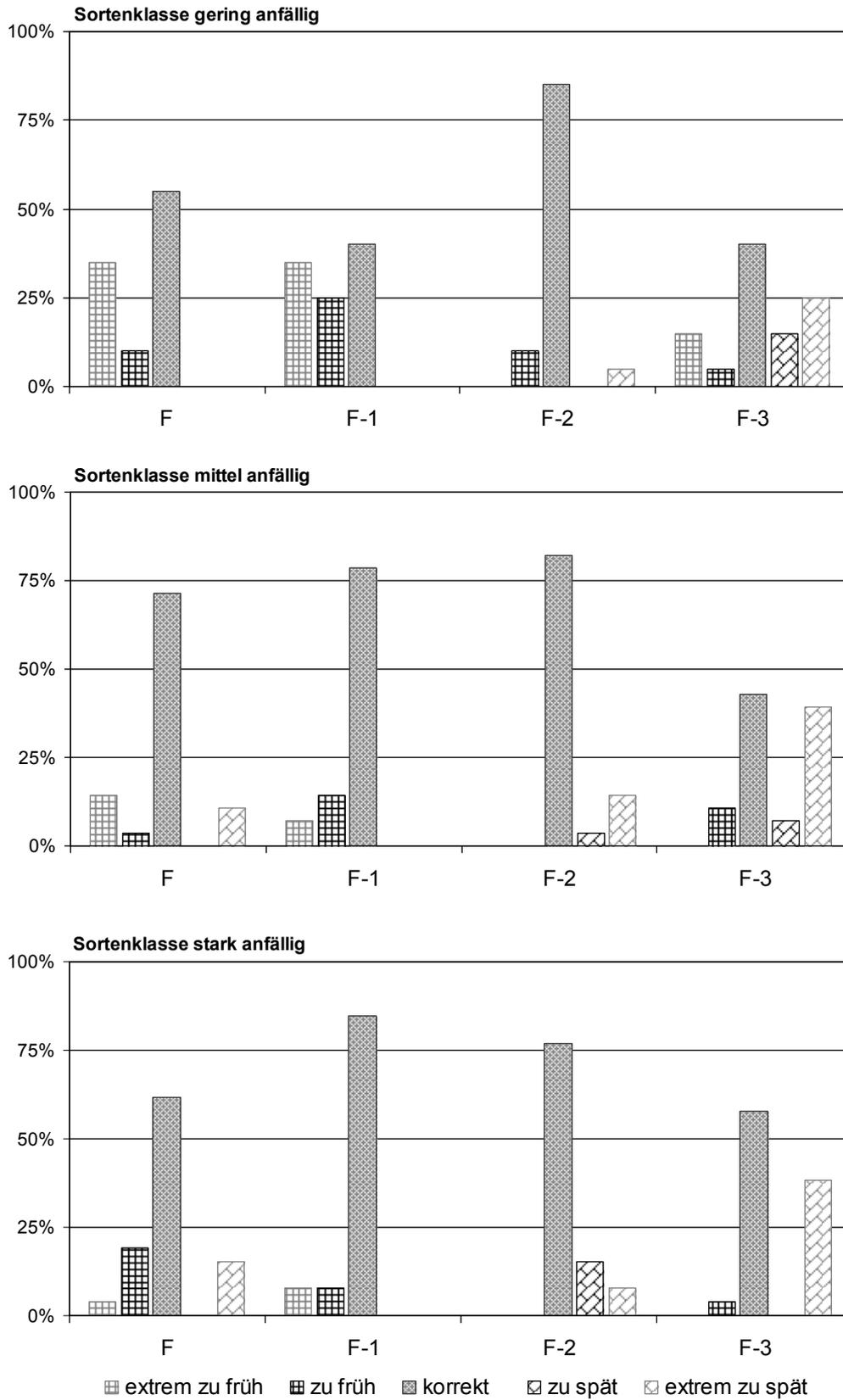


Abbildung 66: Ergebnis der Validierung des Erstauftretens von *S. tritici* auf den oberen vier Blättagen (F bis F-3) aller Standorte in Rheinland-Pfalz (Exakt-Bonituren und LSV-RP). Prozentuale Anteile (%) den jeweiligen Klassen (Definition in Abbildung 65).

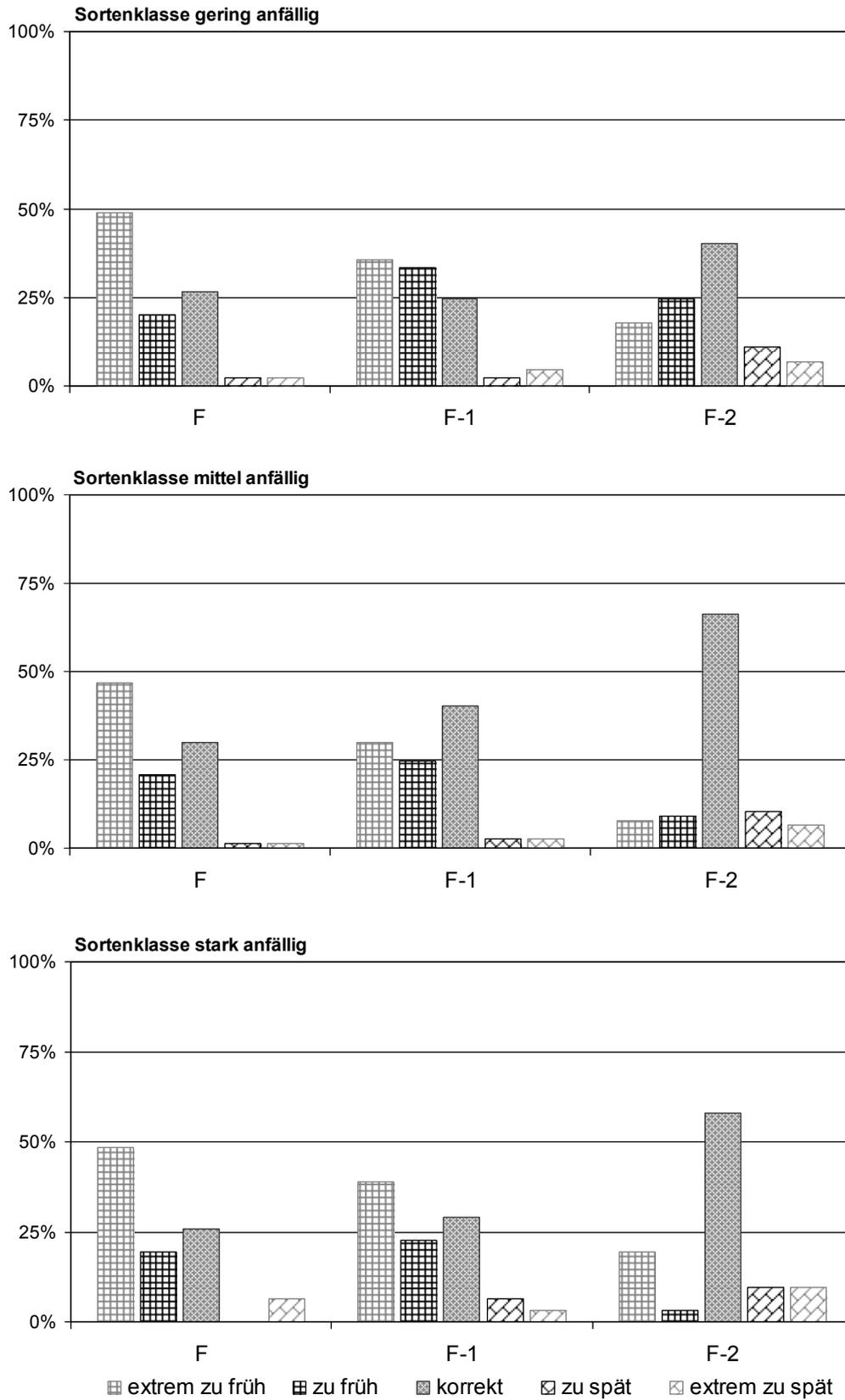


Abbildung 67: Ergebnis der Validierung des Erstauftritts von *S. tritici* auf den oberen drei Blatttagen (F bis F-3) der PSD-Bonituren. Prozentuale Anteile (%) in den jeweiligen Klassen (Definition in Abbildung 65).

6.2 Visuelle Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Boniturdaten der Standorte der Exakt-Bonituren und der LSV-RP

Bei der visuellen Validierung des Befallsstärkeverlaufs wurde ein subjektiver Vergleich von erhobenen Befallsstärken und simulierten Befallsverläufen durchgeführt. Eine Übereinstimmung der Daten lag vor, wenn es keine bzw. nur geringe Abweichungen zwischen erhobenen Daten und Modell gab. Dabei wurde eine Abweichung der Daten am letzten Termin weniger stark gewichtet, wenn der Befallsbeginn und die folgenden Termine treffend simuliert wurden. Der Grad der Abweichung der Daten ist subjektiv und abhängig von der jeweiligen Person, die die Validierung vornimmt (ROSSI et al., 1997). Die Boniturdaten für die Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit wurden aus den Mittelwerten der einzelnen Sorten berechnet. Sowohl für die visuelle als auch für die anschließende statistische Validierung wurden die Ergebnisse der Standorte Biedesheim und Herxheim 2008 als Ausreißer eingestuft, da an diesen Standorten im Vergleich zu den anderen Standorten extrem hohe Abweichungen zwischen erhobenen Daten und der Simulation auftraten.

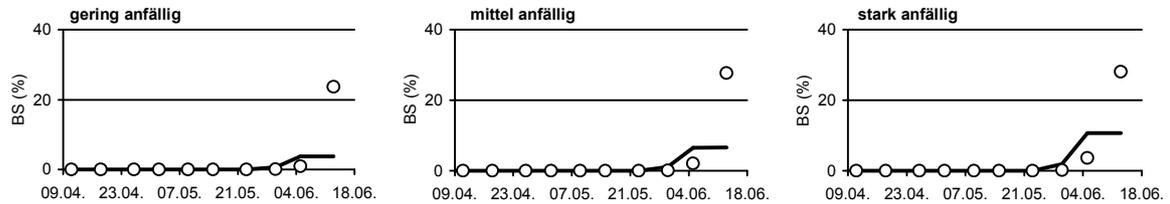
Für jede Variante (Standort, Sortenklasse, Blattetage) wurde zur Bewertung der Simulation eine Grafik mit dem simulierten Befallsverlauf und den erhobenen Befallsstärken erstellt. In der Abbildung 68 und der Abbildung 69 sind die Grafiken der Blattetagen F-1 und F-2 für die Standorte der Exakt-Bonituren dargestellt. Diese Blattetagen wurden gewählt, da bei der Entscheidung über Fungizideinsätze die Befallsentwicklung auf diesen Blattetagen maßgeblich ist.

Beim Vergleich der Simulationen ist für die Sortenklassen eine deutliche Abstufung zu erkennen. Die simulierten Befallsverläufe der Sorten mittlerer Anfälligkeit liegen ober- bzw. unterhalb der Kurven der Sortenklassen geringer bzw. starker Anfälligkeit. Im Vergleich mit den Felddaten ist für beide Blattetagen erkennbar, dass das Modell in der überwiegenden Zahl der Varianten den Befall korrekt simuliert hat. Für die Blattetage F-1 wurde der Befallsverlauf an den ersten Terminen in keinem Fall unterschätzt, wohingegen es bei Betrachtung der Befallsverläufe für die Blattetage F-2 zu keiner Überschätzung kam. Die Befallsentwicklung gering anfälliger Sorten wurde auf beiden betrachteten Blattetagen für die Standorte Nieder-Hilbersheim 2007 und 2009 am besten abgebildet, mit Ausnahme des letzten Termins. Für die übrigen drei Standorte zeigen die Grafiken geringe Über- bzw. Unterschätzungen des Befalls. Die Simulation für Sorten starker Anfälligkeit ergab ebenfalls am Standort Nieder-Hilbersheim 2008 eine Überschätzung des Befalls (Blattetage F-1). Der Befall auf der Blattetage F-2 bei Sorten mittlerer Anfälligkeit wurde für alle Standorte korrekt simuliert. Im Vergleich aller dargestellten Befallsverläufe unterschätzte die Simulation den Befall für die stark anfälligen Sorten am Standort Mörschbach 2009 am deutlichsten (Abbildung 68 und Abbildung 69).

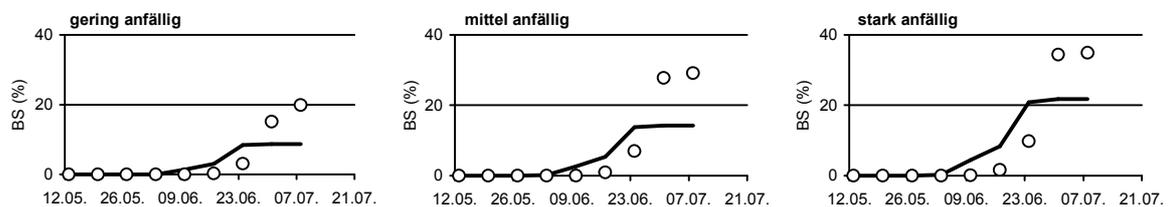
Die Tabelle 43 zeigt das Ergebnis der visuellen Validierung für alle Blattetagen und Standorte der Exakt-Bonituren und der Erhebungen in den LSV-RP. Die Zuordnung der Varianten in drei Klassen (unterschätzt, korrekt oder überschätzt) erfolgte anhand verschiedener Symbole. Die Daten der Blattetagen F-1 und F-2 der Exakt-Bonituren sind dabei entsprechend den beschriebenen Abbildungen. Für die Standorte der LSV-RP wurden die Befallsverläufe für die oberen drei

Blattetagen zufriedenstellend simuliert. Nicht korrekte Simulationen waren überwiegend Überschätzungen des Befalls. Auf der Blattetage F-3 war die Simulation für 43% der Varianten korrekt, für die restlichen Varianten lag jeweils eine Unterschätzung des Befalls vor (Tabelle 43).

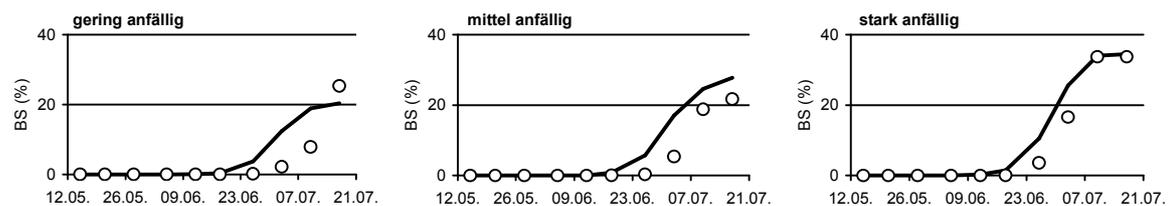
Nieder-Hilbersheim 2007 (Wetterstation Rommersheim), Blattetage F-1



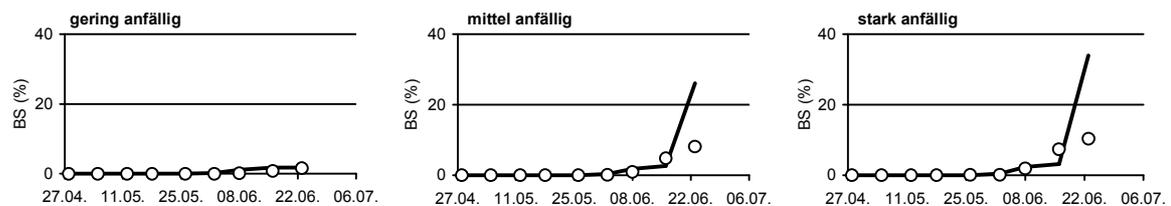
Nieder-Hilbersheim 2008 (Wetterstation Rommersheim), Blattetage F-1



Wahlbach 2008 (Wetterstation Wahlbach), Blattetage F-1



Nieder-Hilbersheim 2009 (Wetterstation Rommersheim), Blattetage F-1



Mörschbach 2009 (Wetterstation Wahlbach), Blattetage F-1

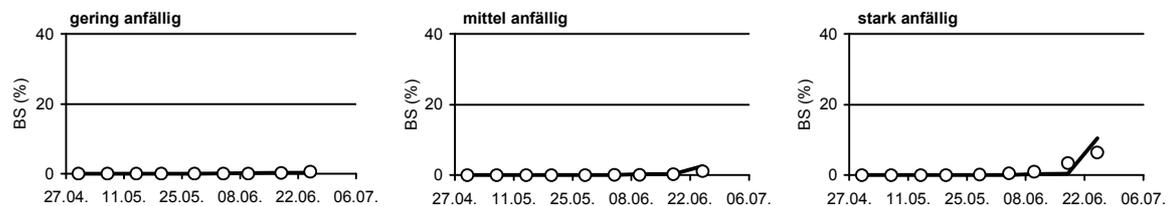
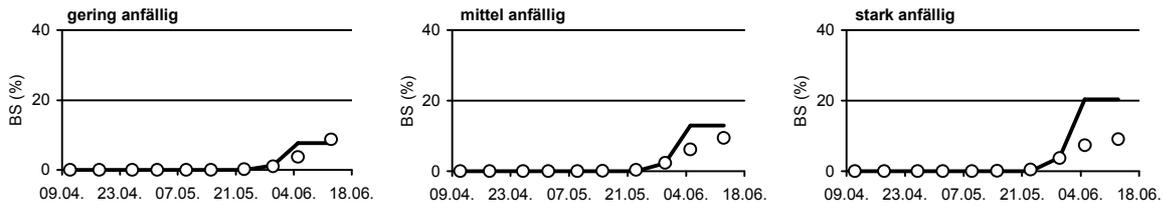
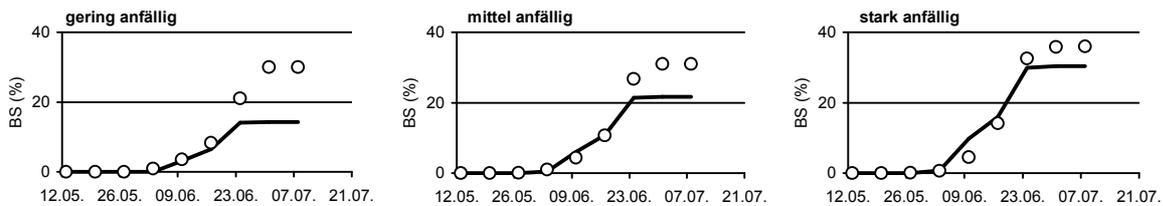


Abbildung 68: Vergleich der simulierten (durchgezogene Linie) und bonitierten Befallskurven (Punkte) für die **Blattetage F-1** an den Standorten der Exakt-Bonituren in den Jahren 2007 bis 2009. Auf der y-Achse ist jeweils die Befallsstärke abgetragen und auf der x-Achse das Datum. Die Grafiken jedes Standortes zeigen von links nach rechts die Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit.

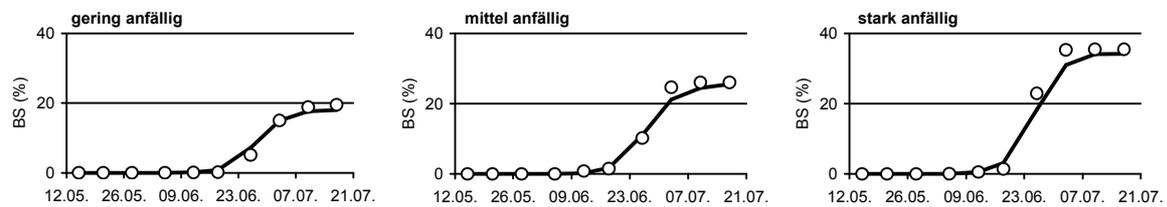
Nieder-Hilbersheim 2007 (Wetterstation Rommersheim), Blatttage F-2



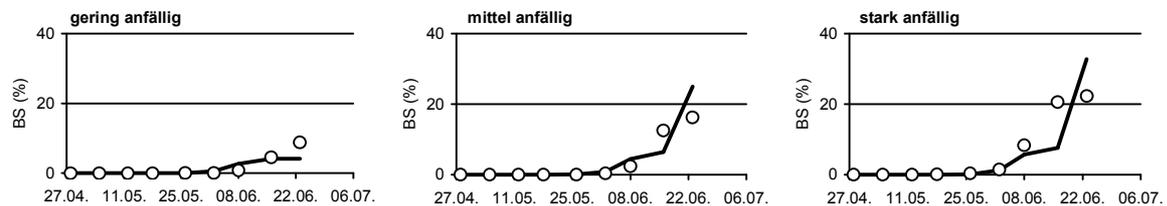
Nieder-Hilbersheim 2008 (Wetterstation Rommersheim), Blatttage F-2



Wahlbach 2008 (Wetterstation Wahlbach), Blatttage F-2



Nieder-Hilbersheim 2009 (Wetterstation Rommersheim), Blatttage F-2



Mörschbach 2009 (Wetterstation Wahlbach), Blatttage F-2

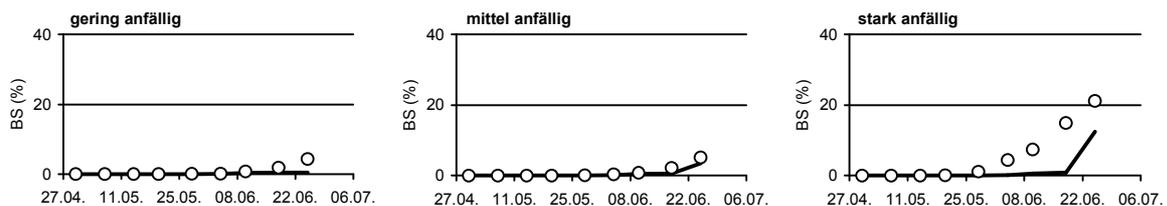


Abbildung 69: Vergleich der simulierten (durchgezogene Linie) und bonitierten Befallskurven (Punkte) für die Blatttage F-2 an den Standorten der Exakt-Bonituren in den Jahren 2007 bis 2009. Auf der y-Achse ist jeweils die Befallsstärke abgetragen und auf der x-Achse das Datum. Die Grafiken jedes Standortes zeigen von links nach rechts die Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit.

Tabelle 43: Ergebnis der visuellen Validierung für die Standorte der Exakt-Bonituren und der Landessortenversuche der Boniturjahre von 2007 bis 2009. Einteilung der Simulationen in die Klassen unterschätzt, korrekt und überschätzt für jede Blatttage (F bis F-4) der Sortenklasse geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit.

Boniturjahr	Standort	gering anfällig				mittel anfällig				stark anfällig			
		F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3
<u>Exakt-Bonituren</u>													
2007	Nieder-Hilbersheim	●	●	●	- ¹	● ²	●	●	-	+ ³	●	●	-
2008	Nieder-Hilbersheim	+	●	-	-	+	●	●	-	+	+	●	-
2008	Wahlbach	+	+	●	-	●	●	●	-	●	●	●	●
2009	Nieder-Hilbersheim	+	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
2009	Mörschbach	●	●	-	-	-	●	●	-	-	●	-	-
<u>Landessortenversuche</u>													
2007	Herxheim	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-
2007	Uhler	+	●	●	-	+	●	●	●	+	+	+	●
2007	Wörrstadt	●	●	+	●	●	-	+	●	●	●	+	●
2008	Kümbdchen	●	●	●	-	●	●	●	-	●	●	●	-
2008	Wörrstadt	+	+	+	-	●	+	+	-	●	+	+	-
2009	Biedesheim	●	+	+	●	●	●	●	●	+	●	●	●
2009	Herxheim	●	●	●	●	●	●	●	-	●	●	●	-
2009	Kümbdchen	●	●	●	●	●	●	●	●	●	-	-	-
2009	Wörrstadt	●	+	+	●	+	+	+	●	●	+	+	●

¹- = unterschätzt; ²● = korrekt; ³+ = überschätzt

Zusammenfassend für die visuelle Validierung sind in der Tabelle 44 die prozentualen Anteile der Klassen unterschätzt, korrekt und überschätzt dargestellt. Die Simulationen für die Blatttagen F und F-1 waren zu einem hohen Anteil (%) durchweg korrekt. Bei der Blatttage F-2 kam es für die Sortenklassen gering und stark anfällig vermehrt zu Unter- bzw. Überschätzungen. Für die Sorten mittlerer Anfälligkeit hingegen wurden über 78% der Befallsverläufe als korrekt simuliert eingestuft. Die Befallsentwicklung auf der Blatttage F-3 wurde weniger treffend simuliert, da für 57% der Varianten die Befallsverläufe unterschätzt wurden.

Tabelle 44: Prozentuale Verteilung des Ergebnisses der visuellen Validierung für die Klassen unterschätzt, korrekt und überschätzt der Blatttagen F bis F-4 der Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Anfälligkeit (Daten aus der Tabelle 43).

Simulation		gering anfällig				mittel anfällig				stark anfällig			
		F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3	F	F-1	F-2	F-3
unterschätzt	-	0	0	14,3	57,1	7,1	7,1	0	57,1	7,1	7,1	14,3	57,1
korrekt	●	64,3	71,4	57,1	42,9	71,4	78,6	78,6	42,9	64,3	64,3	57,1	42,9
überschätzt	+	35,7	28,6	28,6	0	21,4	14,3	21,4	0	28,6	28,6	28,6	0

6.3 Statistische Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Simulations- und Boniturdaten der Standorte der Exakt-Bonituren und der LSV-RP

Die statistische Validierung wurde mit den Felddaten und den Simulationsdaten für die Sortenklassen geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit durchgeführt. Für die Felddaten wurden die Mittelwerte der Sortenklassen verwendet. Datenpaare aus bonitierten und simulierten Befallsstärken wurden ab dem Termin berücksichtigt, an dem einer der beiden Werte größer als null war. Bei den Berechnungen wurde aufgrund der fortgeschrittenen Seneszenz der Blätter das letzte Datenpaar einer Blattetage nicht berücksichtigt. Es wurden nur Datensätze verwendet, in denen mindestens drei Datenpaare vorhanden waren. Zur Validierung wurden zwei statistische Methoden genutzt. Mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test (nicht parametrischer Test) wurde die Güte der Anpassung überprüft, indem die erhobenen Daten mit den simulierten Daten verglichen wurden. Als zweite Methode wurde eine Regressionsanalyse (parametrischer Test) genutzt, wobei die simulierten Daten als abhängige Variable und die erhobenen Daten als unabhängige Variable betrachtet wurden. Anschließend wurden die Eigenschaften des linearen Modells anhand zweier Nullhypothesen mit Hilfe eines Student-t-Tests untersucht. Der erste Test überprüfte, ob der Achsenabschnitt a gleich null war und der zweite, ob die Steigung b gleich eins war. Dazu wurden die geschätzten Parameterwerte für a und b sowie deren Standardfehler $S.E._a$ und $S.E._b$ benötigt.

$$t_a = |a - 0| / S.E._a \quad [30]$$

$$t_b = |b - 1| / S.E._b \quad [31]$$

wobei:

a	= Geschätzter Achsenabschnitt a der Geradengleichung
$S.E._a$	= Standardfehler von a
b	= Geschätzte Steigung b der Geradengleichung
$S.E._b$	= Standardfehler von b

Die Nullhypothesen wurden akzeptiert, wenn der t-Test für a und b nicht signifikant war, d. h. der berechnete Wert kleiner als die Prüfgröße bei einer Irrtumswahrscheinlichkeit von $\alpha = 0,05$ war.

Zur Validierung wurden die einzelnen Rechenschritte bis zur Ausgabe der Ergebnisse in einer Entwicklerversion des Modells SEPTRI2 programmiert, da insgesamt 498 Datensätze (Varianten) zur Auswertung zur Verfügung standen. Der Umfang der verwendeten Datensätze setzte sich wie folgt zusammen:

- Exakt-Bonituren: 4 Standorte * 3 Sortenklassen * 5 Blattetagen = 60 Varianten
- Bonituren LSV-RP: 9 Standorte * 3 Sortenklassen * 4 Blattetagen = 108 Varianten
- Bonituren PSD: 43 Standorte * (x) Sortenklassen * 3 Blattetagen = 330 Varianten (werden separat im Kapitel 6.4 behandelt)

An den Standorten der PSD-Bonituren wurden nicht immer für alle drei Sortenklassen Daten erhoben.

Im Folgenden werden die Auswertungen für die Standorte der Exakt-Bonituren und der LSV-RP dargestellt. In den Varianten der berücksichtigten 13 Standorte konnte für 5,4% der gering anfälligen Sorten keine statistische Auswertung durchgeführt werden, da die Anzahl der Wertepaare in den vorliegenden Datensätzen zu gering war. Bei den mittel und stark anfälligen Sorten waren die Berechnungen immer möglich.

Anhand der Ergebnisse der statistischen Validierung kann die Simulation der Befallsentwicklung charakterisiert werden. Beim Kolmogorov-Smirnov-Test bedeutet ein nicht signifikantes Ergebnis, dass die bonitierten und simulierten Daten einer Variante einen statistischen Zusammenhang haben. Für den Achsenabschnitt a sind Werte nahe 0 als gut zu bewerten und für die Steigung b bei 1. Werte > 1 bedeuten, dass die Simulation im Mittel den Befall überschätzt und bei Werten < 1 , dass der erhobene Befallsverlauf unterschätzt wurde. Das Bestimmtheitsmaß R^2 kann maximal den Wert 1 erreichen, was eine gute Anpassung bedeuteten kann. Jedoch müssen immer die Ergebnisse aller Parameter betrachtet werden, denn ausschließlich ein hohes R^2 beschreibt noch keine gute Simulation der Befallsentwicklung.

6.3.1 Blatttage F

Bei den gering anfälligen Sorten bestimmte der Kolmogorov-Smirnov-Test für das Fahnenblatt in 60% der Varianten nicht signifikante Unterschiede. Die Unterschiede des Achsenabschnitts a zu 0 waren in allen Varianten und die der Steigung b zu 1 für 30% der Varianten nicht signifikant. Die Simulation unterschätzte in 40% der Varianten den erhobenen Befall. Die hohe Überschätzung des Befalls durch das Modell für Wörrstadt 2008 trat ein, da der erhobene Befall bei maximal 0,03% lag, die Simulation bei maximal 2,5%. Für die gering anfälligen Sorten der Blatttage F konnte nur in 30% der Varianten ein Bestimmtheitsmaß von $> 0,75$ angegeben werden.

Für die Sorten mittlerer Anfälligkeit berechnete der Kolmogorov-Smirnov-Test in 46% der Varianten und für die stark anfälligen Sorten in 69% der Varianten nicht signifikante Unterschiede. Bis auf eine Ausnahme bei den mittel anfälligen Sorten waren die a -Werte in keinem Fall signifikant verschieden zu 0. Für die b -Werte wurden häufiger signifikante Unterschiede zu 1 berechnet (mittel anfällig: 53% signifikant, stark anfällig: 61% signifikant). Für beide Sortenklassen überschätzt die Simulation wie bei den gering anfälligen Sorten den Befall in ca. 60% der Varianten. Der Anteil an Bestimmtheitsmaßen über 0,75 war mit jeweils 54% besser als bei den gering anfälligen Sorten.

Hohe Überschätzungen des Befalls durch das Modell traten für die Sorten mittlerer und starker Anfälligkeit für Nieder-Hilbersheim 2009 und Wörrstadt 2008 auf. Bei der detaillierten Betrachtung der Datensätze war zu erkennen, dass eine hohe Abweichung der Werte erst am letzten betrachteten Termin erfolgte. Die Differenzen lagen für Biedesheim 2009 bei 7% und 8%, für Nieder-Hilbersheim 2009 sogar bei 12,1% und 16,4% (jeweils mittel und stark anfällig). Die

Datenpaare eine Woche zuvor ergaben hingegen nur geringe Abweichungen zwischen 0,1% und 0,5% je nach Standort und Sortenklasse (Tabelle 45).

Tabelle 45: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP auf der **Blatttage F** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Boniturjahr	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,63	0,05*	0,34	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s ⁽⁶⁾	1,98	0,2*	0,2	5
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s	0,26	4,01	0,24	4
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	gering			— ⁽⁷⁾		0
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	gering	ns	0,17	0,07*	0,51	3
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	gering	ns	-0,13	13,81*	1	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	gering	ns	0,38	0,13	0,42	3
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	gering	ns	0,47	1,75	0,97	3
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	gering	s	0,92	53,24	0,37	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	gering	s	0,11	1,84	0,8	4
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	gering	ns	0,19	2,9	0,98	3
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	gering			—		1
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	gering			—		2
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	1,09	0,08	0,32	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	2,62	0,38	0,3	6
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	-1,65	30,17	0,72	4
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	mittel	s	-0,37	8,09	0,77	4
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	mittel	ns	0,26	0,06*	0,47	3
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	mittel	s	-0,05	15,49*	1	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	mittel	ns	0,63	0,23	0,4	3
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	mittel	ns	0,41	1,45	0,95	4
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	mittel	s	0,83	12,65	0,6	5
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	mittel	s	-1,09	39,66	0,9	4
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	mittel	ns	-0,5	4,66*	0,99	4
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	mittel	ns	-0,21	4,76	0,91	3
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	mittel	s	0,06	6,53*	1	3
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	1,83	0,11	0,3	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	3,1	0,58	0,56	6
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	-1,65	15,51	0,74	5
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	stark	s	-1,12	2,45	0,61	4
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	stark	ns	0,25	0,09*	0,46	4
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	stark	s	0,82	15,31*	1	5
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	stark	ns	0,64	2,78	0,92	4
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	stark	ns	0,38	0,67*	0,99	4
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	stark	s	0,34	39,14*	0,98	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	stark	ns	-1,31	8,07	0,61	5
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	stark	ns	0,31	0,7*	0,99	4
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	stark	s	-0,24	2,02	0,85	4
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	stark	ns	0,06	1,24	0,9	4

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; ⁽⁷⁾— = keine statistische Auswertung möglich; * = signifikant

6.3.2 Blatttage F-1

Der Kolmogorov-Smirnov-Test belegte für die Daten der Blatttage F-1 ein gutes Simulationsergebnis. Der Anteil signifikanter Unterschiede lag bei den gering anfälligen Sorten bei 23%, für die mittel anfälligen Sorten bei 15% und für die stark anfälligen Sorten bei 31%. Die *a*-Werte wurden zu 100% in allen Sortenklassen als nicht signifikant eingestuft. Die *b*-Werte wurden für gering anfällige Sorten in 38% der Varianten als signifikant eingestuft und für die mittel und stark

anfälligen Sortenklassen in ca. der Hälfte der Varianten als signifikant bewertet (mittel anfällig: 54%, stark anfällig: 46%). Die Verteilung an Unter- und Überschätzungen, d. h. b -Werte kleiner bzw. größer eins, konnte für alle drei Sortenklassen als gleichmäßig betrachtet werden. Zu hohen Überschätzungen des Befallsverlaufs durch das Modell kam es ausschließlich an Standorten der LSV-RP. Besonders auffällig hierbei war wiederum Wörrstadt 2008, zudem Kümbdchen 2009 bei den gering anfälligen Sorten und Wörrstadt 2009 bei den Sorten geringer und mittlerer Anfälligkeit. Die Bestimmtheitsmaße waren für die mittel und stark anfälligen Sorten in einem höheren Bereich im Vergleich zu den gering anfälligen Sorten (Tabelle 46).

Tabelle 46: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP auf der **Blatttage F-1** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Boniturjahr	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns ⁽⁵⁾	2,11	0,07	0,29	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns	3,82	0,29*	0,57	5
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns	0,67	0,85	0,67	4
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	gering	ns	0,13	0,27	0,46	4
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	gering	ns	0,29	0,01*	0,34	3
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	gering	ns	1,21	2,41*	0,99	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	gering	ns	1,19	0,02*	0,29	3
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	gering	ns	0,49	0,97	0,98	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	gering	s ⁽⁶⁾	1,79	26,55	0,52	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	gering	ns	0,15	5,12*	0,89	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	gering	ns	0,96	2,1*	0,96	5
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	gering	s	-0,01	14,91	0,82	4
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	gering	s	0,63	7,48	0,51	4
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	3,56	0,11	0,32	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	4,31	0,38*	0,67	6
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	-2,25	2,88	0,76	4
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	mittel	ns	-0,05	2,4*	0,97	5
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	mittel	ns	0,48	0,02*	0,33	3
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	mittel	ns	0,79	2,8*	0,98	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	mittel	ns	2,08	0,19	0,3	3
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	mittel	ns	0,44	0,72*	0,99	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	mittel	s	1,98	5,59	0,57	5
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	mittel	ns	0,02	9,13*	0,96	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	mittel	ns	0,21	1,99*	0,95	5
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	mittel	ns	-0,12	2,04	0,83	5
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	mittel	s	-0,38	18,79	0,95	3
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	5,6	0,2	0,36	3
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	6,37	0,48*	0,7	6
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	-2,17	2,56	0,67	5
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	stark	s	-1,25	1,53	0,79	5
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	stark	ns	0,54	0,04*	0,37	4
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	stark	s	9,11	2,93*	0,89	5
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	stark	ns	2,6	0,46	0,53	4
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	stark	ns	0,49	0,69*	1	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	stark	s	1,06	18,51*	0,96	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	stark	ns	-0,4	2,31	0,83	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	stark	ns	-2,38	0,57*	0,98	5
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	stark	s	-0,78	1,13	0,8	5
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	stark	ns	0,4	1,77	0,79	4

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.3.3 Blatttage F-2

Für die Blatttage F-2 hat der Kolmogorov-Smirnov-Test für den größten Teil der Varianten nicht signifikante Unterschiede bestimmt (gering anfällig: 77%, mittel anfällig: 85%, stark anfällig: 62%). Zudem waren die a -Werte für alle Varianten der gering und mittel anfälligen Sorten nicht signifikant verschieden von 0. Für stark anfällige Sorten wurde für eine Variante ein signifikanter Zusammenhang berechnet. Auffällig war die prozentuale Zunahme negativer a -Werte von der Sortenklasse gering anfällig zur Sortenklasse stark anfällig. Die b -Werte aller Sortenklassen waren für die Sortenklassen gering und mittel anfällig in über 50% der Varianten zu einem höheren Anteil signifikant verschieden von 1, für die Sortenklasse stark anfällig in 46% der Varianten. Bei den gering anfälligen Sorten trat häufiger eine Unterschätzung des Befalls durch das Modell auf als bei den anderen beiden Sortenklassen, bei denen die Anteile an Über- und Unterschätzungen gleichmäßig verteilt waren. Die Validierungsergebnisse für die Standorte der Exakt-Bonituren waren zufriedenstellend. Für die Standorte der LSV-Bonituren wurden hohe Überschätzungen durch die Simulation wiederum für die Datensätze des Standortes Wörrstadt berechnet. Die b -Werte waren für Wörrstadt 2008 bei allen drei Sortenklassen deutlich größer 1, zudem je nach Sortenklasse auch für Wörrstadt 2007 und 2009. Die Bestimmtheitsmaße der Berechnungen waren für die Sorten mittlerer Anfälligkeit in 92% der Varianten größer als 0,75. Auch für die anderen beiden Sortenklassen lagen die Anteile der Bestimmtheitsmaße größer als 0,75 bei über 60% (Tabelle 47).

Tabelle 47: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP auf der **Blatttage F-2** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Boniturjahr	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	$K^{(1)}$	$a^{(2)}$	$b^{(3)}$	R^2	$n^{(4)}$
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,69	0,95	0,76	5
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns	1,38	0,47*	0,92	6
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns	0,82	0,47*	0,72	6
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	gering	s ⁽⁶⁾	0,13	0,09*	0,63	5
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	gering	ns	0,39	0,01*	0,28	3
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	gering	ns	3,19	0,5*	0,96	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	gering	ns	2,4	0,15	0,27	3
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	gering	ns	-0,31	1,51	0,96	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	gering	s	-0,19	16,4*	0,99	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	gering	ns	0,46	2,43	0,72	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	gering	ns	0,38	0,92	0,91	5
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	gering	s	0,03	3,54*	0,99	5
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	gering	ns	0,43	4,07*	0,78	6
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	-0,21	1,59	0,91	5
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	1,32	0,69*	0,97	7
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	0	1,16	0,76	6
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	mittel	ns	-0,18	0,67*	0,94	5
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	mittel	ns	-0,03	0,32*	1	4
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	mittel	ns	4,41	0,77	0,91	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	mittel	s	0,8	4,99	0,56	4
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	mittel	ns	-0,45	0,81*	0,99	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	mittel	s	-0,88	11,12*	0,98	5
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	mittel	ns	0,16	2,74*	0,92	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	mittel	ns	0,12	0,48*	0,94	5
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	mittel	ns	-0,19	0,72	0,95	5
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	mittel	ns	0,27	5,36	0,8	5

Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	-0,77	2,43*	0,94	7
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	2,36	0,81*	0,97	7
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	-0,84	0,99	0,65	6
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	stark	s	-1,6	0,48*	0,65	6
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	stark	ns	0,84	0,1*	0,37	4
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	stark	s	13,26	1,49	0,78	5
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	stark	s	-13,66*	26,82*	0,98	4
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	stark	ns	-1,47	1,04	0,88	5
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	stark	s	-4	32,19	0,71	4
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	stark	ns	-0,3	1,28	0,95	6
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	stark	ns	-2,93	0,79	0,83	6
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	stark	ns	-0,81	0,43*	0,85	6
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	stark	ns	0,79	1,75	0,67	5

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.3.4 Blatttage F-3

Für die Blatttage F-3 wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test in den Sortenklassen gering und mittel anfällig ein Anteil von 62% nicht signifikanter Unterschiede festgestellt. Für die stark anfälligen Sorten war der Anteil mit 31% nicht signifikanter Unterschiede deutlich niedriger. Bei Betrachtung der Signifikanz der a -Werte wurde nur für eine Variante bei der Sortenklasse mittel anfällig ein signifikanter Unterschied ermittelt. Die Abweichungen des b -Wertes waren jeweils für über 50% der Varianten signifikant verschieden von 1 (gering anfällig 54%, mittel anfällig 69%, stark anfällig 54%). Dabei lagen die Abweichungen häufiger im Bereich der Unterschätzung des Befalls durch das Modell. Beispielsweise wurde für Herxheim 2007 an jedem Termin der Befall zu niedrig simuliert. An den letzten beiden Terminen wurde für die gering anfälligen Sorten ein Befall von 3,97% erhoben und 0,02% simuliert. Die Differenzen zwischen erhobenen und simulierten Werten sind für die anderen beiden Sortenklassen vergleichbar. Die häufig auffälligen Ergebnisse des Standorts Wörrstadt bei den oberen Blatttagen traten bei der Blatttage F-3 nicht auf. Zwar wurde der Befall in den meisten Varianten auch überschätzt, jedoch waren die b -Werte deutlich niedriger. Die berechneten Bestimmtheitsmaße für die Datensätze der Blatttage F-3 waren nur für gering und mittel anfällige Sorten zu 77% Bereich $> 0,75$.

Tabelle 48: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP auf der **Blatttage F-3** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Boniturjahr	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s ⁽⁶⁾	-0,39	0,4*	0,8	6
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s	-0,5	0,2*	0,94	8
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,66	0,75	0,91	7
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	gering	s	-0,07	0,22*	0,96	6
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	gering	s	0	0,01*	0,83	5
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	gering	ns	6,05	0,07*	0,26	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	gering	ns	-0,26	1,03	0,77	6
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	gering	ns	-1,54	1,58	0,55	6
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	gering	s	-0,06	0,31*	0,69	7
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	gering	ns	0,06	1,26	0,88	7
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	gering	ns	-0,94	1,13	0,76	6

LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	gering	ns	-0,08	1,91	0,9	5
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	gering	ns	0,34	3,62*	0,92	7
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	-0,38	0,41*	0,8	9
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	-0,58	0,21*	0,97	8
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	ns	0,35	0,99	0,95	7
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	mittel	ns	-0,57	0,34*	0,74	6
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	mittel	s	-0,03	0,02*	0,78	6
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	mittel	ns	10,01	0,22	0,36	4
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	mittel	ns	-0,62*	1,29*	0,99	6
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	mittel	ns	-3,41	0,85	0,62	6
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	mittel	s	-0,15	0,41*	0,91	7
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	mittel	ns	0,24	0,83	0,8	8
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	mittel	s	-1,79	0,41*	0,85	7
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	mittel	ns	-0,33	0,41*	0,84	6
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	mittel	ns	-0,29	3,47*	0,91	6
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	-0,55	0,58*	0,85	10
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	-1,86	0,4*	0,94	9
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	ns	-0,82	1,14*	0,99	8
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	stark	s	-1,06	0,26*	0,25	7
LSV-Bo.	2007	Herxheim	3 km	stark	s	-0,05	0,06	0,74	7
LSV-Bo.	2007	Uhler	9 km	stark	s	14,01	0,84	0,36	5
LSV-Bo.	2007	Wörrstadt	2 km	stark	ns	-1,22	1,93	0,86	6
LSV-Bo.	2008	Kümbdchen	6 km	stark	s	-7,07	1,62	0,43	7
LSV-Bo.	2008	Wörrstadt	2 km	stark	s	-0,31	0,24*	0,89	7
LSV-Bo.	2009	Biedesheim	4 km	stark	ns	0,01	0,56*	0,84	8
LSV-Bo.	2009	Herxheim	3 km	stark	s	-1,12	0,5	0,51	7
LSV-Bo.	2009	Kümbdchen	3 km	stark	s	-1,42	0,34*	0,72	6
LSV-Bo.	2009	Wörrstadt	2 km	stark	ns	-0,63	2,11	0,82	7

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.3.5 Blatttage F-4

Für die Blatttage F-4 wurden mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test bei allen Varianten signifikante Unterschiede ermittelt (Ausnahme: Nieder-Hilbersheim 2007, gering anfällig). Die *a*-Werte waren für die Hälfte der Varianten signifikant verschieden von 0 (Nieder-Hilbersheim 2007 und 2008), wohingegen die *b*-Werte aller Datensätze signifikant verschieden von 1 waren (Ausnahme: Nieder-Hilbersheim 2007, mittel anfällig). Die Simulation unterschätzte durchweg den erhobenen Befall. Die Differenzen für z. B. Mörschbach 2009 lagen bei den gering anfälligen Sorten bei 2,5% (Boniturwert 4,3%) und für die stark anfälligen Sorten bei 10% (Boniturwert 13,5%). Trotz dieser Unterschätzungen des Befalls durch das Modell wurden hohe Bestimmtheitsmaße berechnet, die für Sorten mittlerer Anfälligkeit in drei der vier untersuchten Varianten bei über 0,75 lagen (Tabelle 49).

Tabelle 49: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren auf der **Blatttage F-4** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Boniturjahr	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	ns ⁽⁵⁾	4,97*	0,29*	0,3	10
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s ⁽⁶⁾	0,97*	0,09*	0,91	9
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	gering	s	0,4	0,19*	0,65	9
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	gering	s	-0,06	0,41*	0,97	9

Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	7,03*	0,54	0,46	10
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	1,45*	0,19*	0,93	9
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	mittel	s	0,35	0,27*	0,76	9
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	mittel	s	-0,05	0,48*	0,99	9
Exakt-Bo.	2007	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	11,35*	0,49*	0,38	10
Exakt-Bo.	2008	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	1,47*	0,19*	0,98	9
Exakt-Bo.	2009	Nieder-Hilbersheim	11 km	stark	s	0,15	0,23*	0,91	9
Exakt-Bo.	2009	Mörschbach	3 km	stark	s	-0,37	0,23*	0,71	9

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.3.6 Zusammenfassende Auswertung

In der Tabelle 50 ist das Ergebnis der statistischen Validierung, zusammenfassend für alle Standorte in Abhängigkeit von der Sortenklasse und der Blatttage dargestellt. Sowohl für die Exakt-Bonituren als auch für die Erhebungen in den Landessortenversuchen bestimmte der Kolmogorov-Smirnov-Test für die Blatttage F-2 nicht signifikante Unterschiede zwischen den Datensätzen der Erhebungen und der Simulationen. Für alle Blatttagen betrachtet wurden signifikante Unterschiede am häufigsten für die Sortenklasse geringer Anfälligkeit bestimmt. Die berechneten Werte für den Achsenabschnitt a waren in der überwiegenden Anzahl der Varianten nicht signifikant verschieden von 0. Für die b -Werte hingegen wurde für knapp über 50% aller Varianten ein signifikanter Unterschied zu 1 berechnet. Die meisten signifikanten Fälle traten dabei in den Exakt-Bonituren für die Sortenklassen geringer und mittlerer Anfälligkeit auf. Über alle Varianten betrachtet unterschätzte die Simulation häufig den erhobenen Befallsverlauf. Die berechneten Überschätzungen traten fast ausschließlich bei den Fahnenblättern auf. Die Bestimmtheitsmaße der Exakt-Bonituren der Blatttage F-2 sind durchweg größer als 0,82. Für die übrigen Varianten wurden z. T. niedrige Bestimmtheitsmaße berechnet.

Tabelle 50: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der Exakt-Bonituren und der LSV-RP für die Blatttagen F bis F-3 in der Zusammenfassung aller Daten für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Sortenklasse (Anfälligkeit)	Blatttage	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
Exakt-Bo.	gering	F	s ⁽⁶⁾	2,17	0,46	0,14	17
Exakt-Bo.	gering	F-1	s	2,27	0,47*	0,41	23
Exakt-Bo.	gering	F-2	ns ⁽⁵⁾	0,89	0,61*	0,82	29
Exakt-Bo.	gering	F-3	s	0,46	0,25*	0,57	35
Exakt-Bo.	mittel	F	s	2,4	0,82	0,28	22
Exakt-Bo.	mittel	F-1	ns	3,35	0,58*	0,43	25
Exakt-Bo.	mittel	F-2	ns	0,9	0,83*	0,88	30
Exakt-Bo.	mittel	F-3	s	0,83	0,26*	0,55	39
Exakt-Bo.	stark	F	ns	2	1,15	0,49	24
Exakt-Bo.	stark	F-1	ns	3,31	0,74	0,63	26
Exakt-Bo.	stark	F-2	ns	0,44	0,87	0,82	33
Exakt-Bo.	stark	F-3	s	-0,08	0,48*	0,58	43
LSV-Bo.	gering	F	s	0,86	1,55	0,14	29
LSV-Bo.	gering	F-1	ns	2,1*	0,21*	0,08	38

LSV-Bo.	gering	F-2	ns	1,94*	0,43*	0,42	41
LSV-Bo.	gering	F-3	ns	1,31*	0,22*	0,29	53
LSV-Bo.	mittel	F	ns	0,98	3,14	0,21	33
LSV-Bo.	mittel	F-1	s	1,64	1,06	0,41	39
LSV-Bo.	mittel	F-2	ns	2,1*	0,59*	0,72	43
LSV-Bo.	mittel	F-3	s	0,54	0,44*	0,56	56
LSV-Bo.	stark	F	ns	2,25	1,17	0,11	38
LSV-Bo.	stark	F-1	ns	2,47	0,72	0,32	42
LSV-Bo.	stark	F-2	ns	2,29	0,89	0,47	45
LSV-Bo.	stark	F-3	s	0,98	0,57*	0,25	60

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare; ⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.4 Validierung des Modells SEPTRI2 mit den Daten der PSD

In den Jahren von 2007 bis 2009 wurden von den Pflanzenschutzdiensten in mehreren Bundesländern Septoria-Bonituren durchgeführt. Zur Validierung des Modells SEPTRI2 waren von den Felddaten die Befallsstärken der oberen drei Blattetagen verfügbar. Nach der Zuordnung der Sorten in die drei Sortenklassen, ergaben sich für die drei Boniturjahre insgesamt 330 mögliche Datensätze. Davon konnte nur ein Anteil von 52,7% für die statistische Auswertung verwendet werden, da in den Datensätzen zu wenige Datenpaare verfügbar waren. In Bezug auf die 43 Standorte, an denen Erhebungen durchgeführt wurden, konnten 24 mit in die Auswertungen einfließen. In den Ergebnistabellen der Blattetagen sind nur die verwertbaren Daten abgebildet.

6.4.1 Blattetage F

Für das Fahnenblatt ergab der Kolmogorov-Smirnov-Test für die Sorten geringer und mittlerer Anfälligkeit in über 81% der Varianten nicht signifikante Unterschiede zwischen den Datensätzen. Bei den stark anfälligen Sorten wurden für die Hälfte der Varianten nicht signifikante Unterschiede berechnet. Die Abweichungen des Achsenabschnitt a von null wurden bei allen drei Sortenklassen für alle Varianten als nicht signifikant bewertet. Für die Abweichungen des b -Wertes von 1 zeigte sich ein gemischtes Ergebnis. Während für gering anfällige Sorten 73% der Datensätze als nicht signifikant eingestuft wurden, waren es bei den stark anfälligen Sorten nur 30% (mittel anfällig: 54%). Die Unter- und Überschätzungen des Befalls durch das Modell betragen für die Sorten mittlerer und starker Anfälligkeit jeweils 50%. Bei den gering anfälligen Sorten überwogen mit 65% die Unterschätzungen des Befalls. Der Anteil an Bestimmtheitsmaßen über 0,75 war bei den gering anfälligen Sorten mit 36% sehr niedrig, wohingegen bei den stark anfälligen Sorten ein Anteil von 80% erreicht werden konnte. Eine deutliche Überschätzung des Befalls durch die Simulation trat für Biestow 2007 bei den mittel und stark anfälligen Sorten auf. Die Simulationen erreichten hier Befallsstärken von über 60%, während laut Erhebungen nur Befallsstärken von < 1% auftraten. Im Fall von Birkenmoor 2009 für die stark anfälligen Sorten wurde für das Fahnenblatt kein Befall erhoben, jedoch ergab die Simulation niedrige Befallsstärken im Bereich von < 0,1, nur am letzten Termin mit einer simulierten Befallsstärke von knapp 3%. Sowohl für den Standort Birkenmoor als

auch für den Standort Biestow war die nächstgelegene Wetterstation in ca. 20 km Entfernung (Tabelle 51).

Tabelle 51: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der PSD auf der **Blatttage F** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Boniturjahr	Bundesland	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
2007	ST	Bernburg	5 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,08	0,13	0,58	3
2007	MV	Biestow	19 km	gering	s ⁽⁶⁾	3,83	6,88	0,29	3
2007	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	0,06	0,18*	0,98	3
2007	BB	Manker	11 km	gering	ns	5,19	0,54	0,55	4
2007	MV	Nesow	25 km	gering	s	7,88	1,9	0,3	3
2007	SN	Nossen	1 km	gering	ns	0,22	0,22	0,75	3
2007	SH	Sophienhof	25 km	gering	ns	1,33	0,49	0,3	3
2008	BB	Manker	11 km	gering	ns	0,56	0,84	0,52	3
2009	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	-0,02	1,33*	1	3
2009	SN	Salbitz	0,5 km	gering	ns	0,03	0,02*	0,38	3
2009	NI	Sophienhof	25 km	gering	ns	3,19	22,14	0,82	3
2007	BB	Berge	0,5 km	mittel	ns	1,25	4,42	0,64	3
2007	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	0,13	0,26	0,48	3
2007	MV	Biestow	19 km	mittel	s	4,02	448,91*	0,99	4
2007	BB	Dedelow	10 km	mittel	s	4,53	6,78	0,52	3
2007	TH	Friemar	0,5 km	mittel	ns	0,01	0,03*	0,91	3
2007	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	0,02	0,6*	1	4
2007	BB	Manker	11 km	mittel	ns	5,61	1,68*	0,99	4
2007	SN	Nossen	1 km	mittel	ns	0,38	0,13	0,66	3
2007	NI	Sophienhof	25 km	mittel	ns	1,71	0,41	0,29	3
2008	BB	Manker	11 km	mittel	ns	0,77	1,03	0,56	3
2009	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	-0,04	2,32	0,85	3
2009	BB	Dedelow	10 km	mittel	ns	0,01	0,05*	0,91	3
2009	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	-0,03	1,56*	1	4
2009	MV	Rostock	19 km	mittel	ns	0,03	0,05	0,25	3
2009	SN	Salbitz	0,5 km	mittel	s	0,03	0,13*	0,32	4
2009	NI	Sophienhof	25 km	mittel	ns	5,63	13,6	0,81	3
2007	BB	Berge	0,5 km	stark	ns	0,43	3,44	0,97	3
2007	ST	Bernburg	5 km	stark	s	0,12	0,38*	0,95	4
2007	MV	Biestow	19 km	stark	s	11,26	252,29*	0,93	4
2007	SH	Birkenmoor	23 km	stark	s	2,68	92,96	0,83	3
2007	BB	Dedelow	10 km	stark	s	4,74	14,76*	0,99	5
2007	TH	Friemar	0,5 km	stark	ns	0,01	0,01*	0,92	4
2007	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	0,08	0,04*	0,92	3
2007	MV	Nesow	25 km	stark	s	11,05	15,59	0,9	4
2007	SN	Nossen	1 km	stark	s	3,05	14,4*	0,98	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	stark	ns	1,99	3,02	0,97	3
2008	ST	Bernburg	5 km	stark	ns	0,18	0,55	0,25	3
2008	BB	Manker	11 km	stark	ns	0,66	0,24*	0,56	4
2008	SN	Nossen	1 km	stark	ns	-0,04	0,47	0,49	3
2009	ST	Bernburg	5 km	stark	s	0,07	1,08	0,93	4
2009	SH	Birkenmoor	23 km	stark	s	0,09	93,69*	1	4
2009	BB	Dedelow	10 km	stark	ns	0,01	0,03*	0,98	3
2009	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	0,01	0,24*	0,99	4
2009	MV	Rostock	19 km	stark	s	0,02	0,35*	0,99	4
2009	SN	Salbitz	0,5 km	stark	ns	0,02	0,01*	0,74	4
2009	NI	Sophienhof	25 km	stark	s	0,79	20,24*	0,97	4

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare; ⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.4.2 Blatttage F-1

Der Kolmogorov-Smirnov-Test ergab für die Blatttage F-1 für alle Sortenklassen in ca. der Hälfte der Varianten nicht signifikante Ergebnisse. Die berechneten Werte für den Achsenabschnitt a waren für alle Sortenklassen in allen Varianten nicht signifikant verschieden von 0. Bei den Werten der Steigung b ergaben sich für gering und mittel anfällige Sorten für knapp über die Hälfte der Varianten nicht signifikante Abweichungen von 1, wohingegen für stark anfällige Sorten ein Anteil von 45% bestimmt wurde. Bei allen Sortenklassen trat eine Unterschätzung des erhobenen Befalls etwas häufiger auf als Überschätzungen. Die Überschätzungen hatten meistens extrem hohe b -Werte. Die Bestimmtheitsmaße der gering und mittel anfälligen Sorten waren sehr niedrig, nur für die stark anfälligen Sorten konnte ein Anteil von 68% mit Werten über 0,75 bestimmt werden. Zu hohen Überschätzungen des erhobenen Befalls durch das Modell kam es bei den Datensätzen Biestow 2007 und Rostock 2008. Bei den stark anfälligen Sorten ergaben die Daten für Berge 2007 eine hohe Überschätzung. In diesem Fall lag die Wetterstation jedoch in unmittelbarer Nähe, im Vergleich zu Biestow 2007 und Rostock 2008 (Tabelle 52).

Tabelle 52: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der PSD auf der **Blatttage F-1** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Boniturjahr	Bundesland	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
2007	ST	Bernburg	5 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,28	0,13	0,5	3
2007	MV	Biestow	19 km	gering	s ⁽⁶⁾	23,83	61,53	0,2	4
2007	TH	Friemar	0,5 km	gering	ns	0,04	0,03*	0,6	4
2007	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	0,27	0,07*	0,76	3
2007	BB	Manker	11 km	gering	s	17,05	2,25	0,83	4
2007	MV	Nesow	25 km	gering	s	31,26	3,81	0,26	3
2007	SN	Nossen	1 km	gering	s	2,97	0,45	0,25	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	gering	ns	6,87	0,98	0,26	3
2008	BB	Manker	11 km	gering	ns	3,35	0,77	0,49	3
2008	SN	Nossen	1 km	gering	ns	-0,01	1,28	0,96	4
2009	NI	Astrup	1 km	gering	s	0,02	0,05*	0,49	5
2009	ST	Bernburg	5 km	gering	ns	0,08	0,05*	0,84	3
2009	SH	Birkenmoor	23 km	gering	s	0,2	336,21*	1	5
2009	TH	Haufeld	1 km	gering	ns	-0,16	0,64	0,7	4
2009	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	0,12	0,87	0,99	4
2009	MV	Rostock	19 km	gering	s	0,07	0,06*	0,3	4
2009	SN	Salbitz	0,5 km	gering	ns	0,08	0,05*	0,4	4
2009	NI	Sophienhof	25 km	gering	s	0,32	24,4*	0,88	5
2007	BB	Berge	0,5 km	mittel	ns	7,41	2,55	0,45	3
2007	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	0,46	0,24	0,45	3
2007	MV	Biestow	19 km	mittel	s	26,76	106,36	0,72	4
2007	BB	Dedelow	10 km	mittel	s	26,27	2,05	0,44	3
2007	TH	Friemar	0,5 km	mittel	ns	0,05	0,01*	0,64	4
2007	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	0,16	0,39	0,62	4
2007	BB	Manker	11 km	mittel	s	29,35	1,12	0,76	4
2007	SN	Nossen	1 km	mittel	s	5,19	0,25	0,22	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	mittel	ns	8,59	0,78	0,26	3
2008	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	0,98	0,68	0,34	3
2008	BB	Manker	11 km	mittel	ns	2,82	0,26*	0,54	4
2008	SN	Nossen	1 km	mittel	ns	0,08	0,26	0,94	3
2008	MV	Rostock	19 km	mittel	ns	-10,91	174,18	0,7	4
2009	NI	Astrup	1 km	mittel	s	0,02	0,05*	0,63	5
2009	ST	Bernburg	5 km	mittel	s	-0,53	0,2*	0,95	3
2009	SH	Birkenmoor	23 km	mittel	s	-0,1	73,4*	0,99	5
2009	BB	Dedelow	10 km	mittel	ns	0,02	0,04*	0,91	3
2009	TH	Haufeld	1 km	mittel	ns	-0,5	1,04	0,83	4

2009	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	0,11	1,02	0,99	4
2009	MV	Rostock	19 km	mittel	s	0,09	0,1*	0,31	4
2009	SN	Salbitz	0,5 km	mittel	s	0,1	0,12*	0,36	5
2009	NI	Sophienhof	25 km	mittel	s	1,4	11,47*	0,99	5
2007	BB	Berge	0,5 km	stark	s	2,6	185,6	0,95	3
2007	ST	Bernburg	5 km	stark	ns	0,42	0,63	0,95	4
2007	MV	Biestow	19 km	stark	s	35,43	63,67	0,59	4
2007	SH	Birkenmoor	23 km	stark	s	13,7	49,31	0,69	3
2007	BB	Dedelow	10 km	stark	s	28,05	1,24	0,44	5
2007	TH	Friemar	0,5 km	stark	ns	0,06	0,01*	0,7	4
2007	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	0,31	0,1*	0,87	3
2007	MV	Nesow	25 km	stark	s	34,81	8,88	0,36	4
2007	SN	Nossen	1 km	stark	s	12,47	4,49	0,89	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	stark	ns	8,45	3	0,88	3
2008	ST	Bernburg	5 km	stark	ns	1,23	0,2	0,44	3
2008	BB	Manker	11 km	stark	s	0,67	0,25*	0,96	5
2008	SN	Nossen	1 km	stark	ns	-0,07	0,37*	0,86	4
2008	MV	Rostock	19 km	stark	s	-19,29	37,15*	0,83	5
2009	ST	Bernburg	5 km	stark	s	-0,19	0,1*	0,93	4
2009	SH	Birkenmoor	23 km	stark	ns	-0,13	7,18*	1	5
2009	BB	Dedelow	10 km	stark	ns	0,02	0,03*	0,94	3
2009	TH	Haufeld	1 km	stark	ns	-0,49	0,87	0,85	5
2009	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	-0,06	0,27*	1	5
2009	MV	Rostock	19 km	stark	s	0,08	0,57*	0,98	5
2009	SN	Salbitz	0,5 km	stark	s	0,09	0,02*	0,6	5
2009	NI	Sophienhof	25 km	stark	ns	7,41	6,32*	0,87	5

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.4.3 Blattetage F-2

Der Kolmogorov-Smirnov-Test berechnete mit den Daten der Blattetage F-2 für jede Sortenklasse in ca. 50% der Varianten signifikante Unterschiede. Für den a -Wert wurde nur bei einer Variante ein nicht signifikanter Unterschied zu 0 bestimmt. Die Abweichungen des berechneten b -Wertes von 1 waren bei den gering anfälligen Sorten in 68% der Varianten signifikant. Für die anderen beiden Sortenklassen war der Anteil signifikanter Ergebnisse mit 50% und 45% etwas niedriger. Bei jeder Sortenklasse überwog der Anteil an unterschätzten Befallsverläufen. Bestimmtheitsmaße im Bereich $> 0,75$ wurden für die gering anfälligen Sorten in 32% und für die stark anfälligen Sorten in 55% der Varianten berechnet.

Tabelle 53: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der PSD auf der **Blattetage F-2** in den Jahren 2007 bis 2009 für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Boniturjahr	Bundesland	Standort	Entfernung der Wetterstation	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
2007	ST	Bernburg	5 km	gering	ns ⁽⁵⁾	0,56	0,12	0,49	3
2007	MV	Biestow	19 km	gering	s ⁽⁶⁾	42,73	17,63	0,22	4
2007	TH	Friemar	0,5 km	gering	ns	0,07	0,02*	0,47	3
2007	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	0,31	0,13*	0,98	3
2007	BB	Manker	11 km	gering	s	33,04	0,95	0,73	4
2007	MV	Nesow	25 km	gering	s	52,86	5,49	0,31	3
2007	SN	Nossen	1 km	gering	s	8,25	0,38	0,2	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	gering	ns	5,35	2,14	0,5	5
2008	ST	Bernburg	5 km	gering	ns	0,48	0,31*	0,67	4
2008	BB	Manker	11 km	gering	ns	-1,71	3,39*	0,99	5
2008	SN	Nossen	1 km	gering	s	0,05	0,09*	0,89	5

2009	NI	Astrup	1 km	gering	s	0,07	0,08*	0,42	6
2009	ST	Bernburg	5 km	gering	s	0,05	0,02*	0,88	5
2009	SH	Birkenmoor	23 km	gering	s	0,52	54,76*	1	5
2009	TH	Haufeld	1 km	gering	s	-0,64	0,44*	0,9	5
2009	ST	Magdeburg	2 km	gering	ns	0,11	0,84*	1	5
2009	MV	Rostock	19 km	gering	ns	0,16	0,1*	0,72	4
2009	SN	Salbitz	0,5 km	gering	ns	0,12	0,02*	0,38	4
2009	NI	Sophienhof	25 km	gering	ns	0,18	7,86*	1	6
<hr/>									
2007	BB	Berge	0,5 km	mittel	ns	14,96	1,25	0,47	3
2007	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	1,05	0,18	0,41	3
2007	MV	Biestow	19 km	mittel	s	51,4	26,71	0,28	4
2007	SH	Birkenmoor	23 km	mittel	ns	-2,23	7,58	0,99	3
2007	BB	Dedelow	10 km	mittel	s	14	3,69	0,76	4
2007	TH	Friemar	0,5 km	mittel	s	0,08	0,01*	0,51	3
2007	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	0,32	0,18*	0,86	4
2007	BB	Manker	11 km	mittel	s	45,28*	0,69	0,67	4
2007	MV	Nesow	25 km	mittel	s	30,98	53,02	0,46	3
2007	SN	Nossen	1 km	mittel	s	13,65	0,19	0,19	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	mittel	s	2,67	4,57	0,64	4
2008	ST	Bernburg	5 km	mittel	ns	1,03	0,16*	0,58	4
2008	BB	Manker	11 km	mittel	s	-2,95	0,78	0,69	5
2008	SN	Nossen	1 km	mittel	s	-0,08	0,14*	0,93	6
2008	MV	Rostock	19 km	mittel	s	-7,94	23,59	0,45	6
2009	NI	Astrup	1 km	mittel	s	0,06	0,06*	0,44	8
2009	ST	Bernburg	5 km	mittel	s	-0,33	0,18*	0,92	5
2009	SH	Birkenmoor	23 km	mittel	ns	-0,05	15,27*	0,97	6
2009	BB	Dedelow	10 km	mittel	ns	0,02	0,01*	0,93	4
2009	TH	Haufeld	1 km	mittel	s	-1,13	0,28*	0,73	5
2009	ST	Magdeburg	2 km	mittel	ns	0,08	1,01	1	5
2009	MV	Rostock	19 km	mittel	s	0,11	0,1*	0,59	5
2009	SN	Salbitz	0,5 km	mittel	ns	0,18	0,06*	0,4	5
2009	NI	Sophienhof	25 km	mittel	ns	1,58	3,83*	0,98	6
<hr/>									
2007	BB	Berge	0,5 km	stark	ns	6,54	13,1	0,91	3
2007	ST	Bernburg	5 km	stark	ns	1,08	0,45	0,81	4
2007	MV	Biestow	19 km	stark	s	55,86	17,03	0,26	4
2007	SH	Birkenmoor	23 km	stark	s	20,45	12,8	0,72	3
2007	BB	Dedelow	10 km	stark	s	41,47	1,17	0,3	5
2007	TH	Friemar	0,5 km	stark	s	0,06	0,01*	0,62	4
2007	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	0,61	0,19	0,87	3
2007	MV	Nesow	25 km	stark	s	44,31	25,33	0,35	4
2007	SN	Nossen	1 km	stark	s	23,65	0,92	0,6	4
2007	NI	Sophienhof	25 km	stark	s	3,97	4,22	0,79	5
2008	ST	Bernburg	5 km	stark	ns	-0,46	0,3*	0,99	6
2008	BB	Manker	11 km	stark	ns	-1,43	0,91	0,44	6
2008	SN	Nossen	1 km	stark	s	-0,14	0,08*	0,73	5
2008	MV	Rostock	19 km	stark	s	-7,29	5,41	0,34	6
2009	ST	Bernburg	5 km	stark	s	-0,48	0,14*	0,87	5
2009	SH	Birkenmoor	23 km	stark	ns	-0,41	6,42*	0,96	6
2009	BB	Dedelow	10 km	stark	s	0,02	0,01*	0,99	3
2009	TH	Haufeld	1 km	stark	s	-1,39	0,36*	0,97	5
2009	ST	Magdeburg	2 km	stark	ns	-0,1	0,36*	0,99	6
2009	MV	Rostock	19 km	stark	s	-0,44	0,53*	0,82	6
2009	SN	Salbitz	0,5 km	stark	s	0,19	0,02*	0,54	5
2009	NI	Sophienhof	25 km	stark	ns	6,38	1,41	0,94	6

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare;

⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.4.4 Zusammenfassende Auswertung

Die zusammenfassende Auswertung der Daten der Pflanzenschutzdienste der Länder ergab für den Kolmogorov-Smirnov-Test nicht signifikante Unterschiede für die Blattetage F-2 aller Sortenklassen, für die anderen Blattetagen signifikante Unterschiede zwischen den Datensätzen. Die *a*-Werte waren für alle Varianten signifikant verschieden von 0, wohingegen die *b*-Werte bis auf eine Ausnahme alle nicht signifikant verschieden von 1 waren. Die Bestimmtheitsmaße sind für alle Varianten sehr niedrig, in über 50% der Varianten sogar kleiner als 0,1.

Tabelle 54: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien in den Varianten der PSD für die Blatttage F bis F-3 in der Zusammenfassung aller Daten für die Sortenklassen gering anfällig, mittel anfällig und stark anfällig.

Gruppe	Sortenklasse (Anfälligkeit)	Blatttage	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
PSD-Bo.	gering	F	s ⁽⁶⁾	1,39*	0,86	0,22	55
PSD-Bo.	gering	F-1	s	4,46*	2	0,13	71
PSD-Bo.	gering	F-2	ns ⁽⁵⁾	6,63*	1,23	0,12	83
PSD-Bo.	mittel	F	s	2,46*	1,73*	0,37	73
PSD-Bo.	mittel	F-1	s	7,27*	0,98	0,09	88
PSD-Bo.	mittel	F-2	ns	8,48*	0,77	0,09	109
PSD-Bo.	stark	F	s	5,46*	1,61	0,04	78
PSD-Bo.	stark	F-1	s	10,7*	0,41	0,02	91
PSD-Bo.	stark	F-2	ns	11,36*	0,58	0,06	104

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare; ⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; * = signifikant

6.5 Fungizid-Varianten

Die Simulation der Befallsentwicklung unter Berücksichtigung einer Fungizidbehandlung konnte nicht ausreichend validiert werden, da zu wenige Datensätze zur Verfügung standen. Mit den Boniturdaten der Blatttage F-2 der behandelten Variante am Standort Wahlbach 2008 wurde der Faktor der Fungizidwirkung berechnet. Einzig der Standort Mörschbach 2009 konnte zur Validierung genutzt werden, an dem aber auch in der unbehandelten Variante ein geringer Befall erhoben wurde, so dass das Fungizid seine Wirkung nicht entfalten konnte. An den Standorten Nieder-Hilbersheim 2008 und 2009 wurde die Behandlung mit einem kurativen Fungizid durchgeführt, dass eine andere Wirkung auf den Befallsverlauf hat. Das Modell SEPTRI2 gilt bisher nur für protektive Fungizide.

In der Tabelle 55 sind die Ergebnisse der statistischen Auswertung dargestellt. Nach dem Kolmogorov-Smirnov-Test waren die Datensätze bis auf eine Ausnahme signifikant verschieden. Die *a*-Wert waren alle nicht signifikant verschieden von 0 und für die Ergebnisse für die *b*-Werte ergaben in den meisten Varianten einen signifikanten Unterschied zu 1. Die Bestimmtheitsmaße waren für die Blatttage F-2 in einem hohen Bereich von > 0,94.

Tabelle 55: Ergebnisse des Kolmogorov-Smirnov-Tests und der Regressionsanalysen zum Vergleich von simulierten und beobachteten Septoria-Epidemien unter dem Einfluss eines protektiv wirkenden Fungizids am Standort Mörschbach 2009 für die Sortenklassen gering und stark anfällig.

Boniturjahr	Standort	Blatttage	Sortenklasse (Anfälligkeit)	K ⁽¹⁾	a ⁽²⁾	b ⁽³⁾	R ²	n ⁽⁴⁾
2009	Mörschbach	F	gering			— ⁽⁷⁾		
2009	Mörschbach	F-1	gering	s ⁽⁶⁾	0,14	1,02	0,38	4
2009	Mörschbach	F-2	gering	ns ⁽⁵⁾	0,16	0,19*	0,48	5
2009	Mörschbach	F-3	gering	s	0	0,3*	0,78	5
2009	Mörschbach	F	stark	s	-0,04	0,19*	0,46	4
2009	Mörschbach	F-1	stark	s	-0,02	0,22*	0,91	5
2009	Mörschbach	F-2	stark	s	-0,06	0,1*	0,98	5
2009	Mörschbach	F-3	stark	s	-2,68	0,29*	0,77	5

⁽¹⁾K = Kolmogorov-Smirnov-Test; ⁽²⁾a = geschätzter Achsenabschnitt a; ⁽³⁾b = geschätzte Steigung b; ⁽⁴⁾n = Anzahl der Datenpaare; ⁽⁵⁾ns = nicht signifikant; ⁽⁶⁾s = signifikant; ⁽⁷⁾— = keine statistische Auswertung möglich; * = signifikant

7. DISKUSSION

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung eines Modells zur Simulation von Septoria-Epidemien unter Berücksichtigung der Sortenanfälligkeit des Winterweizens. Um das neuentwickelte Modell von dem vorhandenen Modell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006) abzugrenzen, wird es als SEPTRI2 (Simulation *Septoria tritici*) bezeichnet.

Für die Modellentwicklung und Validierung wurden dreijährige Feldversuche sowie Klimaschrankexperimente zu einzelnen Phasen der Erregerentwicklung durchgeführt. Eine Herausforderung bei der Bonitur von *S. tritici* im Freiland war die exakte Bestimmung verschiedener Läsionen auf den Blättern. Als hilfreich erwies sich die Regel, Läsionen erst bei sichtbaren Pyknidien als *S. tritici*-Läsionen zu bewerten (GIECO et al., 2004). Dennoch kann ein Schätzfehler aufgrund abiotischer Blattverbräunungen, Läsionen anderer Pilze oder einsetzender natürlicher Seneszenz der Blätter nicht ausgeschlossen werden.

Die Erhebungen an den Standorten der Exakt-Bonituren und der Landessortenversuche ergaben für alle drei Boniturjahre in der überwiegenden Zahl der Fälle signifikante Sortenunterschiede. Dies wurde auch in den Erhebungen der Pflanzenschutzdienste der Länder für jedes Boniturjahr bestätigt. Eine unterschiedliche Septoria-Anfälligkeit von Winterweizensorten konnte somit eindeutig belegt werden. Auf Grundlage der Daten aus den Freilandenerhebungen konnten die Winterweizensorten in Abhängigkeit von der BSA-Note in drei Klassen eingeteilt werden, nämlich gering, mittel und stark anfällig.

SEPTRI2 unterscheidet sich von SIMSEPT durch die Berücksichtigung der Septoria-Anfälligkeit der Winterweizensorten, die Betrachtung des Pilzwachstums mit einer gemeinsamen Rate für die latente und sichtbare Entwicklungsphase, die Berechnung der Befallsstärken für einzelne Blattetagen und die Erweiterung mit einem Blattwachstums-Modul. Zudem konnte in dieser Arbeit ein Ansatz zur Entwicklung eines SEPTRI3 gezeigt werden, das den Einfluss von Fungiziden auf den Befallsverlauf von *S. tritici* simuliert.

Experimentelle Vorgehensweise

Grundlage des Modells SEPTRI2 zur Simulation von Septoria-Epidemien sind mathematisch beschriebene biologische Abläufe im Lebenszyklus von *S. tritici* an Winterweizen, die im Klimaschrank mit einer modifizierten Einzelblattmethode bei verschiedenen Temperaturstufen untersucht wurden. Im Vergleich zu einer Ganzpflanzenmethode erwies sich die Einzelblattmethode als effizienter, da der Platzbedarf von Pflanzen in Töpfen um ein Vielfaches höher gewesen wäre. Ein weiterer Nachteil von Ganzpflanzen ist, dass Weizenpflanzen unter optimalen Bedingungen sehr schnell wachsen. Eine starke Bestockung und ein extremes Längenwachstum der Blätter nach der Inokulation der Pflanzen im 3-Blattstadium entsprachen aber nicht der natürlichen Entwicklung von Weizenpflanzen. Die infizierten Blätter waren bereits mit Ablauf der Latenzzeit zum größten Teil vollständig nekrotisiert, da die Pflanzen eine große Anzahl neuer Blätter bildeten und die älteren Blätter abgestoßen wurden. Mit der Einzelblattmethode wurden diese Effekte umgangen und ein Einfluss des Pflanzenwachstums auf die pilzliche Entwicklung konnte ausgeschlossen werden. Der

Literatur ist zu entnehmen, dass keine signifikanten Unterschiede in der Befallsentwicklung von *S. tritici* auf Blättern an Pflanzen im Vergleich zur Einzelblattmethode bestehen (BENEDIKZ et al., 1981). Des Weiteren konnten Blätter des 3-Blattstadiums zur Datenerhebung verwendet werden, da keine Unterschiede zur Befallsentwicklung auf Blättern höherer Blattetagen auftraten (ARRAIANO et al., 2001). BENEDIKZ et al. (1981) erzielten für *Septoria nodorum* eine hohe Korrelation zwischen Ergebnissen der Einzelblattmethode und der Freilandversuchen. KEMA et al. (1996a) berichten ebenfalls von guten Erfahrungen mit dieser Methode. In dieser Arbeit hat sich jedoch für den Vergleich von simulierten und erhobenen Befallsverläufen gezeigt, dass der gesamte Entwicklungsprozess in den Petrischalen etwas schneller abläuft als unter Freilandbedingungen. Speziell für die stark anfälligen Sorten war die auf Grundlage der Laborergebnissen modellierte Rate der Sorte Drifter zu hoch. Die daraus für die Simulation folgenden Umstände werden im Zusammenhang mit der Diskussion des Ausgangswerts des Pilzwachstums erläutert.

Zur Inokulation der Blattstücke wurde für jeden Versuchsansatz eine ausreichende Menge an Sporen benötigt. Die Vermehrung von *S. tritici*-Sporen kann auf Nähragar erfolgen (ARRAIANO et al., 2001; MAGBOUL et al., 1992; SIMÓN et al., 2004). Vorversuche hatten jedoch morphologische Unterschiede zwischen den Sporen von Nähragar und von Weizenblättern ergeben. Auf Nähragar wurden hefeartige Strukturen, sogenannte Blastosporen gebildet (MAGBOUL et al., 1992), die kleiner waren und eine geringere Anzahl an Septen hatten als unter natürlichen Bedingungen entwickelte Sporen. Zur realitätsnahen Durchführung der Versuche wurden für die Inokulationen Sporen aus Pyknidien verwendet. Vor der Inokulation wurde die Vitalität der Sporen getestet, damit die Keimfähigkeit der Sporen gewährleistet war.

Eine Septoria-Epidemie im Freiland beginnt mit der Primärinfektion der Weizenpflanzen. Die Infektion kann durch Pyknosporen verursacht werden, die aus Pyknidien stammen, die auf Ernteresten oder Ausfallgetreide gebildet wurden (CEYNOWA et al., 1993; HILU & BEVER, 1957; SCHUH, 1990). Die Pflanzen können aber auch von Ascosporen infiziert werden, die im sexuellen Vermehrungszyklus von *M. graminicola* gebildet werden (BROWN, 1975; HALAMA, 1996; HOORNE et al., 2002; METHA, 1989; SCOTT et al., 1988; SHAW & ROYLE, 1989; VERREET et al., 1990). Über das Vorkommen der sexuellen Form in Deutschland wurde von VERREET et al. (1990) berichtet. Daher wurden zur Bestimmung des Ausgangsinokulums ausgehend von Ascosporen in den Jahren 2007 bis 2009 mehrere Experimente zum sexuellen Stadium *Mycosphaerella graminicola* unternommen. In umfangreichen Versuchen unter kontrollierten Bedingungen im Klimaschrank und Gewächshaus konnte jedoch das Auftreten von Ascosporen nicht nachgewiesen werden. Daher konnte für SEPTRI2 kein Modul zur Quantifizierung von Primärinfektionen ausgehend von Ascosporen erstellt werden. In weiterführenden Untersuchungen muss die Biologie des Schaderregers im Hinblick auf die Bedeutung der sexuellen Vermehrungsphase für eine Septoria-Epidemie weiter analysiert werden.

Modellierung

Grundlegend für die Simulation der Befallsentwicklung auf verschiedenen Blattetagen ist die Berücksichtigung der verfügbaren Blattfläche. Zur Berechnung der aktuell verfügbaren Blattfläche

wurde ein Modellansatz von Rossi et al. (1997) mit Daten aus den Exaktversuchen angepasst und in SEPTRI2 implementiert. Dazu wurde die Dauer vom Erscheinen bis zum Absterben einer Blattetage in Abhängigkeit von der Temperatursumme als Mittelwert für alle Sorten bestimmt. Eine Optimierung des Blattentwicklungsmoduls könnte erzielt werden, wenn Sortenunterschiede in Bezug auf die Pflanzenentwicklung bearbeitet und für die Simulation berücksichtigt werden. Zudem ist es möglich, mit Ergebnissen aus gezielten Erhebungen zum Blattwachstum die Dauer der einzelnen Phasen exakter zu berechnen. Dadurch würden die in den Grafiken zur visuellen Validierung aufgetretenen Abweichungen zwischen erhobenem und simuliertem Befall speziell an den späten Boniturterminen vermutlich geringer. Die Ursache dieser Differenzen liegt oftmals darin begründet, dass in der Simulation die Blattetage bereits abgestorben ist (also kein weiterer Befallszuwachs möglich ist), in den Erhebungen jedoch noch weitere Befallswerte erhoben wurden (Beispiel: Nieder-Hilbersheim 2008, Blattetage F-1).

Neuinfektionsprozess

Die Gliederung eines Neuinfektionsereignisses in die Prozesse ‚Aufquellen der Pyknidien‘, ‚Sporenverbreitung‘ und ‚Infektion‘ wurde aus SIMSEPT übernommen. Überarbeitet wurden die in den Prozessen betrachteten Parameter, die teilweise ergänzt und die Grenzwerte an neue Erkenntnisse angepasst wurden. Eine Gegenüberstellung der in beiden Modellen berücksichtigten Witterungsparameter und deren Grenzwerte erfolgt in Tabelle 56. In der Literatur schwanken die Angaben zur Mindesttemperatur für eine erfolgreiche Infektion beachtlich. Die Pathogenentwicklung beginnt nach Lovell et al. (2004) ab Temperaturen von $-2,4^{\circ}\text{C}$, wohingegen Magboul et al. (1992) von einer starken Reduktion der Pathogenentwicklung bereits bei Temperaturen von $< 10^{\circ}\text{C}$ sprechen. Des Weiteren ist beschrieben, dass sich bei Temperaturen $< 7^{\circ}\text{C}$ für zwei Tage nach der Infektion keine Symptome entwickeln (Holmes & Colhoun, 1974; Renfro & Young, 1956). Im Modell SEPTRI2 wurde sowohl für den Infektionsprozess als auch für die modellierten Raten eine untere Temperatur von 2°C (Hoffmann & Schmutterer, 1999; Shaner, 1981) und eine obere Temperaturgrenze von 30°C (Magboul et al., 1992) gewählt. Versuche zur minimalen Temperatur, bei der Infektionen nicht mehr erfolgreich sind und das Wachstum eingestellt wird, sind sehr aufwändig. Zur Annäherung an die Grenze muss die Temperatur in kleinen Schritten reduziert werden. Bei *S. tritici* ist dazu ein hoher Zeitbedarf notwendig, da bereits bei 5°C die Latenzzeit 40 Tage beträgt. Zur exakten Bestimmung der oberen Temperaturgrenze ist die Einzelblattmethode weniger geeignet, da aufgrund der hohen Temperatur der Wasseragar austrocknet und sich auf den Blättern nach kurzer Zeit Schimmel bildet. Eine weitere Änderung im Ablauf des Neuinfektionsprozesses im Vergleich zum Modell SIMSEPT erfolgte durch die Berücksichtigung der Regenpause. Die zugrunde liegende Annahme, dass die Sporen nicht mit der Keimung beginnen solange Regen auf die Blätter trifft, basiert auf Diskussionen mit Herrn Dr. Guido Albert, DLR Bad Kreuznach. Gezielte Versuche zur Absicherung dieser Annahme mit Daten konnten nicht mehr durchgeführt werden. Ein Aspekt zur Optimierung der Simulation ist daher die Untersuchung des Verhaltens von Sporen auf Blättern unter Einfluss von starkem Niederschlag. Im Modell SIMSEPT werden nicht nur die Bedingungen der jeweiligen Prozesse überprüft, sondern zusätzlich noch eine allgemeine Abbruchbedingung berücksichtigt, unabhängig von den Prozessen. Für diese

allgemeine Abbruchbedingung wird nur die relative Luftfeuchtigkeit betrachtet. Da im Modell SEPTRI2 die relative Luftfeuchtigkeit für jeden Prozess mit berücksichtigt wird, konnte auf diese allgemeine Abbruchbedingung verzichtet werden.

Tabelle 56: Vergleich der im Neuinfektionsprozess berücksichtigten Witterungsparameter und deren Grenzwerte für das Modell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006) und das Modell SEPTRI2.

	SIMSEPT	SEPTRI2
Aufquellen der Pyknidien	- Temperatur zwischen 1°C und 25°C - relative Luftfeuchte > 85% für eine Dauer von 2 Stunden	- Temperatur zwischen 2°C und 30°C - relative Luftfeuchte > 85% für eine Dauer von 2 Stunden
Sporenverbreitung	- Temperatur nicht berücksichtigt - relative Luftfeuchte nicht berücksichtigt - Niederschlag > 0,5 mm	- Temperatur zwischen 2°C und 30°C - relative Luftfeuchte > 70% - Niederschlag > 0,5 mm
Infektion	- Start ohne Berücksichtigung einer Regenpause - Temperatur nicht berücksichtigt - relative Luftfeuchte > 80% für 14 Stunden aus einer Dauer von 18 Stunden	- Neustart wenn Niederschlag in den ersten 2 Stunden > 0,5 mm - Temperatur zwischen 2°C und 30°C - relative Luftfeuchte > 75% für 14 Stunden aus einer Dauer von 18 Stunden
allgemeine Abbruchbedingung	- relative Luftfeuchte in den vergangenen 6 Stunden < 70%	- keine allgemeine Abbruchbedingung berücksichtigt

Pilzwachstum

Die Befallsentwicklung und somit die simulierte Befallsstärke sind in erster Linie von der Wachstumsrate des Pilzes abhängig. Bei der Entwicklung der Rate des Pilzwachstums wurde eine Anpassung mit der logistischen Funktion und der Gompertz-Funktion gegenübergestellt. Grundlage waren die Daten aus den Laborversuchen bei unterschiedlichen Temperaturstufen. Letztendlich war die logistische Funktion besser geeignet, da in Verbindung mit der Gompertz-Funktion das Pilzwachstum im Bereich geringer Befallswerte zu stark war. Bei der logistischen Funktion liegt der Wendepunkt bei einer Befallsstärke (relativ) von 0,5, wohingegen bei der Gompertz-Funktion der Wendepunkt bereits bei 0,37 erreicht wird (CAMPBELL & MADDEN, 1990). Dadurch steigt der Befall im unteren Bereich schneller an. Eine Verwendung der Gompertz-Funktion hätte einen extrem niedrigen Startwert von 10^{-16} erfordert. Die notwendigen Raten konnten aber nur unbefriedigend an die erhobenen Daten angepasst werden. Daher wurde die Simulation mit der logistischen Funktion vorgenommen. Zudem lassen die Verläufe der Befallskurven der Freilandhebungen vorrangig einen logistischen Verlauf vermuten.

Im Modell SEPTRI2 wird das Pilzwachstum als ein zusammenhängender Prozess ab dem Zeitpunkt einer erfolgreichen Infektion bis zum Ende der Pyknidienformation betrachtet. Dabei wird der Befallswert für jeden Infektionszyklus stündlich berechnet. Im Modell SIMSEPT werden das latente und das sichtbare Wachstum (Rate Nekrosenwachstum) getrennt betrachtet. Am Ende der Latenzzeit addiert sich der simulierte Befall auf einen Gesamtwert des Befalls.

Für die Phasen des latenten und des sichtbaren Wachstums wird im Modell SIMSEPT dieselbe Rate verwendet. Dadurch wächst der latente Befall in demselben Maße wie die Läsionen. Da es keine Information über die Rate des latenten Myzelwachstums gibt, wurde im Modell SEPTRI2 der gesamte Prozess des Pilzwachstums modelliert. Ansätze, eine Läsions-Wachstumsrate auf die latente Phase zu übertragen, waren nicht erfolgreich, da dadurch die Befallsstärke am Ende der

Latenzzeit bereits sehr hoch war. Im Modell SIMSEPT ist die maximale Wachstumsrate um den Faktor sechs geringer im Vergleich zu der stark anfälligen Sorte in SEPTRI2.

Die Raten, mit denen das Wachstum in den Modellen simuliert wird, können nicht miteinander verglichen werden, da sie mit unterschiedlichen Funktionen modelliert wurden. Im Modell SEPTRI2 wurde die Wachstumsrate durch die Anpassung einer logistischen Funktion an die Erhebungsdaten bestimmt und die berechneten Raten in Abhängigkeit der Temperatur mit einer Beta-Funktion modelliert. Die anschließende Simulation der Befallsentwicklung erfolgte ebenfalls mit einer logistischen Funktion. Das Wachstum im Modell SIMSEPT konnte nicht überprüft werden, da die der Modellierung zugrundeliegenden Daten nicht verfügbar waren. Für den Einfluss der Temperatur wurden drei lineare Wachstumsphasen an Literaturdaten angepasst (Abbildung 70). Obwohl die Wachstumsrate in SIMSEPT nicht auf einer logistischen Funktion basiert, wurde bei der Simulation der Befallsentwicklung trotzdem eine logistische Funktion verwendet.

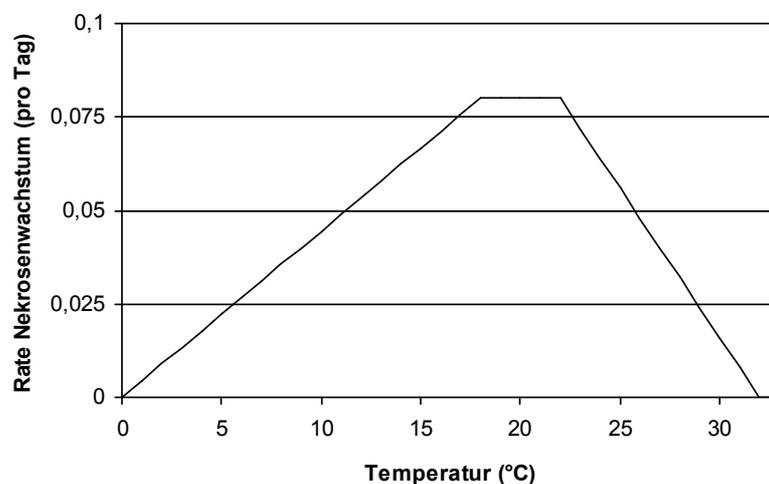


Abbildung 70: Rate Nekrosenwachstum im Modell SIMSEPT. Die maximale Wachstumsrate pro Tag beträgt 0,08 im Bereich von 18°C bis 22°C.

Die im Modell SEPTRI2 verwendeten Raten des Pilzwachstums konnten mit Literaturangaben durchaus bestätigt werden. MAGBOUL et al. (1992) veröffentlichten Abbildungen zur Befallsentwicklung von *S. tritici* bei Temperaturen von 10°C, 15°C, 20°C und 25°C in Abhängigkeit von der Zeit (Tage). Die Daten aus der Literatur wurden mit einer Beta-Funktion angepasst, im Anschluss die Raten berechnet (Parameterwerte identisch der Rate des Pilzwachstum in SEPTRI2) und im Ergebnis ein Bestimmtheitsmaß von 82% erreicht. Der modellierte Kurvenverlauf nach den Daten von MAGBOUL et al. (1992) verlief zwischen den Kurven der stark und gering anfälligen Sortenklassen des Modells SEPTRI2 (Abbildung 71). Dabei war die Differenz zu der Rate der Sortenklasse stark anfällig größer als der Abstand zur Sortenklasse gering anfällig im Bereich des Optimums, womit sich auch die Kritik an der vermuteten hohen Rate des Pilzwachstums der stark anfälligen Sorten im Modell SEPTRI2 widerspiegelt.

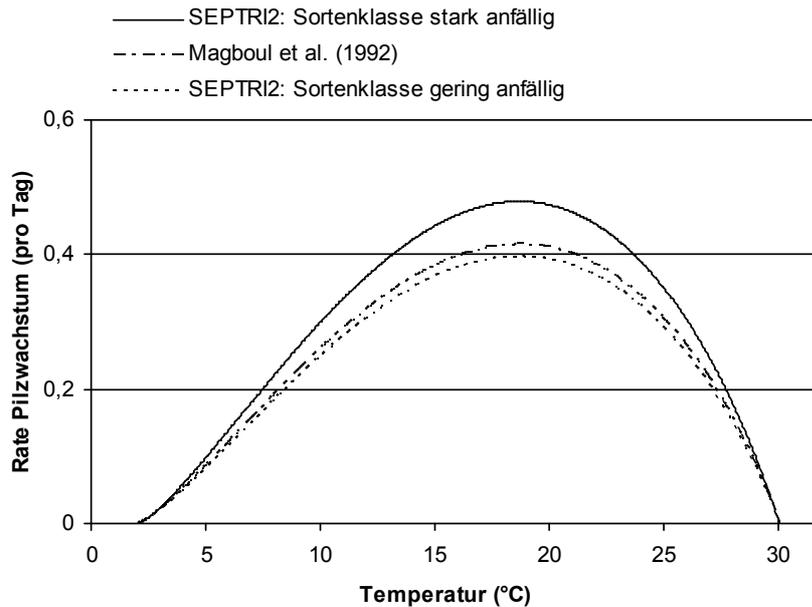


Abbildung 71: Pilzwachstumsraten der Sortenklassen geringer und starker Anfälligkeit im Modell SEPTRI2 im Vergleich zu der Wachstumsrate ermittelt aus den Darstellungen von MAGBOUL et al. (1992).

In den Septoria-Modellen SIMSEPT (KLUGE et al., 2006) und EPISEPT (RAPILLY & JOLIVET, 1976) wird das Läsionswachstum nicht begrenzt, sondern bis zum Absterben der Pflanze simuliert. Diese Methode ergab für das Modell SEPTRI2 aufgrund einer intensiven Befallsentwicklung keine annehmbaren Ergebnisse. Aufgrund der Annahme, dass das Pilzwachstum mit dem Durchbrechen der Pyknidien und dem gleichzeitigen Kollabieren der Zellen eingestellt wird, wurde das Pilzwachstum mit der Dauer der Pyknidienformation begrenzt. Tabelle 57 zeigt für die beiden Modelle eine Gegenüberstellung wichtiger Unterschiede bezüglich des Pilzwachstums.

Ausgangswert des Pilzwachstums

Der Ausgangswert des Pilzwachstums berechnet sich aus verschiedenen Faktoren. Die Hauptfaktoren für die beiden Modelle SIMSEPT und SEPTRI2 sind in der Tabelle 57 gegenübergestellt und werden im Folgenden z.T. näher betrachtet.

Die Pyknidiendichte ist im Modell SEPTRI2 ein wichtiger Baustein zur Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums. Grundlage waren Daten, die an natürlich infizierten Blättern aus den Feldversuchen erhoben wurden. Die Werte differenzieren nicht nur in Abhängigkeit der Sortenanfälligkeit, sondern ebenfalls für verschiedene Blattetagen. Da eine Abhängigkeit der Pyknidiendichte von der Blattetage in der Literatur bisher nicht beschrieben wurde, wären weitere Untersuchungen aufschlussreich. An dieser Stelle sei darauf hingewiesen, dass die Daten nicht auf einer Mischung alter und neuer Läsionen beruhten, sondern ausschließlich Läsionen mit frischen Pyknidien und deutlicher Abgrenzung zum gesunden Gewebe betrachtet wurden.

Eine weitere Optimierung des Modells SEPTRI2 könnte mit aktuellen Daten zur Modellierung der Infektionsrate erfolgen. Die im Modell SEPTRI2 derzeit verwendete Infektionsrate basiert z. T. auf Ergebnissen nicht veröffentlichter Versuche. Im Rahmen dieser Arbeit wurde der Einfluss der

Temperatur auf den Infektionserfolg der Pyknosporen nicht gezielt untersucht. Eine Verschiebung der Infektionsrate in Abhängigkeit von der Temperatur hätte Auswirkung auf den Ausgangswert des Pilzwachstums und somit letzten Endes auf die Befallsstärke.

Ausschlaggebend für die Aufnahme des Anpassungsfaktors in die Gleichung zur Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums war die Minimierung der Differenz zwischen simulierten und erhobenen Befallsstärken. Der simulierte Befallsverlauf ist zum einen abhängig von der Rate des Pilzwachstums und zum anderen vom Startwert, der im Modell SEPTRI2 als Ausgangswert des Pilzwachstums bezeichnet wird. Zur Anpassung des simulierten Befallsverlaufs an den erhobenen Befallsverlauf konnte die Rate des Pilzwachstums nicht verändert werden, da sie auf Grundlage von im Labor erhobenen Daten modelliert wurde. Daher wurde der Startwert mit dem Anpassungsfaktor verändert. Auffallend an den Werten für die drei Sortenklassen ist, dass für gering anfällige Sorten ein höherer Wert verwendet wird als für stark anfällige Sorten. Dadurch wird der Ausgangswert des Pilzwachstums für stark anfällige Sorten stärker verringert als für gering anfällige Sorten. Die Ursache dafür ist, dass das Pilzwachstum für stark anfällige Sorten zu stark ist. Die Daten zur Modellierung der Wachstumsrate wurden im Labor mit der beschriebenen Einzelblattmethode bei konstanten Temperaturen und durchgehend hoher Luftfeuchte ermittelt. Die Dauer der Latenzzeit war unter Laborbedingungen entweder kürzer im Vergleich zu Freilandbedingungen (regelmäßig wechselnden Temperaturen im Freiland) oder die konstant hohe relative Luftfeuchte könnte einen Einfluss gehabt haben. Die anscheinend zu hohe Wachstumsrate für stark anfällige Sorten führt zu der Vermutung, dass die Rate des Pilzwachstums nur einen geringen Sorteneinfluss hat. Zur Klärung müssten Laborversuche mit weiteren Sorten durchgeführt werden. Für die Modellierung der Wachstumsrate konnten in dieser Arbeit Laborversuche nur an einer stark und einer gering anfälligen Sorte vorgenommen werden.

Tabelle 57: Vergleich des Pilzwachstums und des Ausgangswert des Pilzwachstums für das Modell SIMSEPT (KLUGE et al., 2006) und das Modell SEPTRI2.

	SIMSEPT	SEPTRI2
Berechnung des Pilzwachstums	- Wachstum für latente und sichtbare Phase betrachtet - Berechnungen mit derselben Funktion - Befallswert nach Ablauf der Latenzzeit auf den Wert des sichtbaren Befalls addiert <u>Konsequenz</u> Befall steigt immer weiter an	- Pilzwachstum als zusammenhängenden Prozess modelliert - Ende des Wachstum der Läsionen mit Ende der Pykniidienformation <u>Konsequenz</u> Befall erreicht einen maximalen Wert
	<u>Rate des Pilzwachstums</u> - basiert auf drei linearen Funktionen - Temperaturbereich von 0°C bis 32°C (Optimum 18°C bis 22°C)	<u>Rate des Pilzwachstums</u> - basiert auf einer Beta-Funktion (logistisch ermittelte Wachstumsraten) - Temperaturbereich von 2°C bis 30°C - Berücksichtigung der Sortenklasse
	<u>Simulationsergebnis</u> mittlere Befallsstärke der Blattetagen F-2 und F-3 ab BBCH 37	<u>Simulationsergebnis</u> Befallsstärke je Blattetagen zu jedem Zeitpunkt (ab dem Erscheinen einer Blattetage)
Ausgangswert Pilzwachstum	- ein Wert (ohne Bezug zur Blattetage) <u>Hauptfaktoren</u> - Neuinfektionsrate - aktueller Befallswert - verfügbare Blattfläche	- individueller Wert pro Blattetage <u>Hauptfaktoren</u> - aktueller Befall - Pykniidiedichte - Infektionsrate - verfügbare Blattfläche - Einfluss benachbarter Blattetagen - Sortenklasse - Anpassungsfaktor

Die Ergebnisse zur Anzahl der Läsionen belegen, dass sich bei anfälligen Sorten mehr Läsionen entwickeln als bei gering anfälligen Sorten. Aus einer höheren Anzahl an Läsionen resultiert eine höhere Befallsstärke, die für stark anfällige Sorten in den Freilandhebungen dokumentiert wurde. Als Sortenfaktor wurde die Anzahl der Läsionen im Modell SEPTRI2 nicht verwendet, da die Differenzierung der Sortenanfälligkeit mit anderen Parametern ausreichend simuliert wurde.

Für einige Parameter, die zur Differenzierung der Sortenanfälligkeit in Betracht gezogen wurden, konnte der vorher vermutete Sorteneinfluss nicht bestätigt werden. Beispielsweise ergaben die Untersuchungen zur Pyknidiengröße keine signifikanten Sortenunterschiede, vielmehr zeigt sich, dass die Größe der Pyknidien in Abhängigkeit der Blattetagen differierte. Allerdings wäre zu überprüfen, ob in größeren Pyknidien signifikant mehr Sporen gebildet werden, wodurch die Anzahl der möglichen Neuinfektionen ansteigen würde. Dazu müssten das Volumen der Pyknidien und die Anzahl der Sporen bestimmt werden. In früheren Untersuchungen wurde berichtet, dass Pyknidien auf gering anfälligen Sorten kleiner waren als auf stark anfälligen Sorten (GOUGH, 1978; HESS & SHANER, 1987). Auch bei der Sporenlängen, die bei *Cercospora beticola* an Zuckerrüben einen Bezug zur Sortenanfälligkeit hat (JÖRG et al., 2004; RACCA et al., 2006), konnten keine Sortenunterschiede festgestellt werden.

Inkubation- und Latenzzeit

Die Inkubationszeit sowie die Dauer der Pyknidienformation werden im Modell SIMSEPT nicht berücksichtigt. Die Rate der Latenzzeit im Modell SIMSEPT startet bereits bei -5°C , erreicht das Optimum bei 22°C (im Modell SEPTRI2 bei ca. 18°C) und verläuft wieder gegen 0 bei 31°C . Für den Temperaturbereich von 7°C bis 15°C sind die Werte der Rate identisch mit der stark anfälligen Sortenklasse im Modell SEPTRI2. Unterhalb sowie oberhalb dieser Temperaturen betragen die Differenzen der Rate der Latenzzeit bis zu 0,04 (30°C). Aufgrund dieser im Allgemeinen höheren Raten ist die Dauer der Latenzzeit im Modell SIMSEPT kürzer (Abbildung 72).

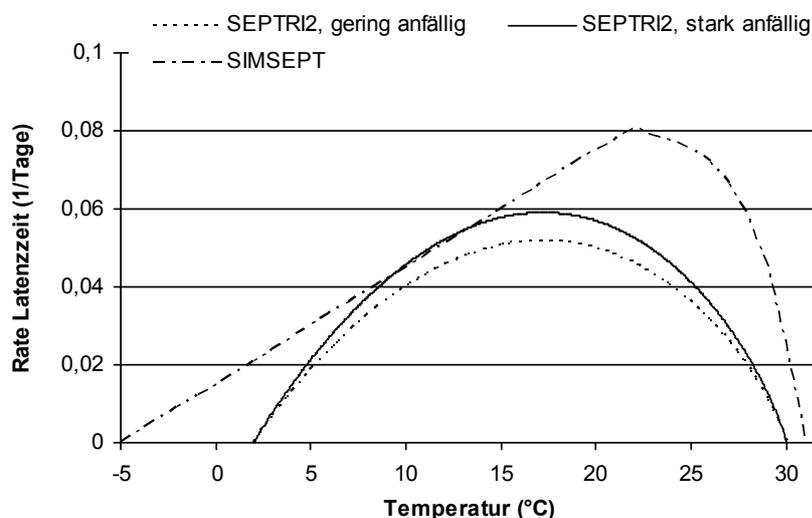


Abbildung 72: Vergleich der Rate zur Bestimmung der Dauer der Latenzzeit der Modelle SIMSEPT und SEPTRI2 in Abhängigkeit von der Temperatur.

In der Literatur sind verschiedene Angaben für die Dauer der Latenzzeit zu finden (14 bis 25 Tage (BROKENSHERE, 1976), 15 bis 25 Tage (SHAW, 1990), 11 bis 42 Tage (LOVELL et al., 2004)). In den Versuchen zur Entwicklung der Rate der Latenzzeit für das Modell SEPTRI2 wurde die kürzeste Latenzzeit von 14 Tagen unter konstanten Temperaturen von 20°C ermittelt. Die Modellierung der Daten aller Temperaturstufen ergab ein Temperaturoptimum von 17,2°C. Bei der Simulation der Latenzzeit mit gemessenen Freiland-Temperaturen betrug die kürzeste Latenzzeit 20 Tage. Für Infektionszyklen, die die Latenzzeit im Herbst vor einer längeren Kälteperiode nicht mehr beenden, ist eine Dauer von über 100 Tagen möglich. Da Septoria-Läsionen in jedem der drei Boniturjahre bereits in den ersten wärmeren Tagen im Frühjahr im Bestand beobachtet wurden, erfolgte im Modell SEPTRI2 kein Abbruch von Infektionszyklen im Winter. Die Berechnungen der Zeiten mit den Temperaturdaten der Wetterstationen zeigten ab dem späten Frühjahr für alle drei Jahre einen vergleichbaren Verlauf. Die Jahresunterschiede in den Wintermonaten waren deutlich ausgeprägt, da die mittleren Temperaturen schwankten. In der Hauptphase der Epidemie waren die Kurvenverläufe auf demselben Niveau, da aufgrund der langen Inkubations- und Latenzzeit die Dauer bis zum Erreichen der erforderlichen Temperatursumme wenig differierte.

Simulation und Validierung

Als Simulationsstart von SEPTRI2 wurde das BBCH-Stadium 15 gewählt, da vor der Bestockungsphase in jedem der drei Boniturjahre bereits eindeutige Septoria-Läsionen an Weizenpflanzen auftraten. Die Validierung des Erstauftretens von *S. tritici* auf der Blattetage F-2 jeder Sortenklasse hat für über 75% der Fälle eine treffende Simulation des Termins des Erstauftretens bestätigt (Daten der Exakt-Bonituren und LSV-RP). Bei nicht treffenden Simulationen lag häufiger eine zu frühe (Unterschätzung) als eine zu späte Simulation (Überschätzung) vor. Bei der Beurteilung ist zu beachten, dass eine zu frühe Simulation günstiger ist als eine zu späte Simulation, bei der der optimale Termin für eine Fungizidapplikation bereits verstrichen sein könnte. Diese Problematik besteht bei einer Unterschätzung des Termins nicht.

Eine Ursache für zu späte Simulationen im Vergleich zu den Bonituren war, dass die erste Infektion einer Blattetage vom simulierten BBCH-Stadium abhängig ist. Wird ein Initial-BBCH-Stadium beispielsweise erst zwei Tage nach einem erfolgreichen Neuinfektionsprozess berechnet, obwohl die Blattetage bereits erschienen war, erfolgte noch keine Primärinfektion. Bei einer anschließenden Trockenperiode war es möglich, dass der Termin von simuliertem und bonitiertem Erstauftreten um einige oder mehrere Tage variierte.

Bei der Bewertung der Daten hatten die frühen und mittleren Termine einen stärkeren Einfluss auf die Einstufung in unterschätzte, korrekte oder überschätzte Fälle als die späten Termine. Die Fälle, in denen der Epidemiebeginn und der Befallsverlauf an den darauf folgenden Terminen zwischen Simulation und Erhebung annähernd übereinstimmten, wurden als korrekt bewertet. Wichtig sind diese Aspekte für die Verwendung des Modells SEPTRI2 als Entscheidungshilfe in der landwirtschaftlichen Praxis. Die Simulation des Befalls an den späten Terminen, und dabei insbesondere am letzten Termin der abgebildeten Befallsverläufe, ist für die Bewertung von

untergeordneter Bedeutung. Von großem Interesse für die Landwirtschaft sind der Zeitpunkt des Epidemiebeginns sowie der anschließende Befallsverlauf. Für eine erfolgreiche Fungizidstrategie sind diese Parameter entscheidend, da ein verspäteter Fungizideinsatz unwirtschaftlich ist.

Bei den PSD-Daten war die Simulation des Erstauftretens in vielen Fällen zu früh. Ein möglicher Grund könnte das schwierige Erkennen der ersten Läsionen sein. Bei den Bonituren wurde immer nur eine repräsentative Anzahl an Pflanzen stellvertretend für den gesamten Bestand betrachtet. Für das Erkennen der ersten Läsionen, die nur auf wenigen Blättern erscheinen, müssen die Blätter sehr genau betrachtet werden. Der Befall einer Parzelle wurde immer nur anhand einer kleinen Stichprobe bewertet.

Die visuelle Validierung der simulierten Befallsverläufe hat für alle Sortenklassen in etwa einen identischen Anteil an korrekten Simulationen ergeben. Die größten Abweichungen von einer korrekten Simulation traten für die Blatttage F-2 bei den Sorten mittlerer und starker anfällig auf. Die statistische Validierung mit den Daten aus Rheinland-Pfalz belegt, dass für jede Sortenklasse die Simulation der Befallsentwicklung mit dem Modell SEPTR12 durchgeführt werden kann. Die verschiedenen Parameter, die bei der statistischen Validierung angegeben wurden, müssen für eine Bewertung der Güte der Simulationen im Gesamten betrachtet werden. Es ist keine Einschätzung der Simulation allein an den Angaben zur Signifikanz, des Bestimmtheitsmaßes oder den Werten für den Achsenabschnitt bzw. die Steigung der Regressionsgeraden für eine Variante möglich. Es traten Kombinationen auf, bei denen extrem hohe Abweichungen von den Zahlenwerten als nicht signifikant eingestuft wurden, und umgekehrt traten Fälle auf, bei denen annähernd passende Zahlenwert als signifikant bewertet wurden. Der Achsenabschnitt wurde häufig als signifikant eingestuft, wenn der Beginn von Bonitur und Simulation versetzt waren, d. h. eines von beiden deutlich früher begonnen hatte. Weiterhin waren die a -Werte in der Regel positiv, wenn die Simulation früher begann. Mit negativen a -Werten ging häufig ein früherer Erhebungstermin einher im Vergleich zum Start der Simulation. Natürlich wurde auch bei einem identischen Beginn von Bonitur und Simulation ein Wert abweichend von Null berechnet, da Differenzen an den folgenden Terminen auftraten, die die den Nullpunkt der Regressionsgeraden verschoben. Bei den Varianten mit signifikanten b -Werte waren die simulierten Werte häufig kleiner als die bonitierten Werte. Die Ursachen einer laut statistischer Validierung nicht zufriedenstellenden Simulation können vielfältig sein. Ein Hauptgrund ist wahrscheinlich die geringe Anzahl an Datenpaaren für die Berechnungen der Statistik. Die Regressionsgerade basiert lediglich auf wenigen Punkten, wodurch Ausreißer einen hohen Einfluss auf den Verlauf haben. Im Zuge der Modellentwicklung wurden verschiedene Faktoren identifiziert, die in ihrer Gesamtheit alle das Simulationsergebnis beeinflussen. Im Zusammenspiel der Faktoren wird der biologische Prozess der Befallsentwicklung im Modell nachgestellt. Die Faktoren unterliegen dabei einer gewissen Unsicherheit, wodurch das berechnete Ergebnis von der Realität abweichen kann. Beispielsweise wurden die Blattentwicklung, die Infektionsrate und die Rate des Pilzwachstums bereits kritisch diskutiert.

Die Schätzung des Befalls bei beginnender Blattseneszenz ist schwierig, da in dieser Phase die typischen Blattverbräunungen stark zunehmen. Natürliche Nekrosen entwickeln sich mit

beginnender Seneszenz zunächst zwischen Septoria-Läsionen, da diese Blattbereiche nur noch in geringem Umfang Assimilate produzieren und die noch verwertbaren Blattinhaltsstoffe zu höheren Blattetagen bzw. in die Ähre abtransportiert werden.

In der Gesamtheit betrachtet gelingt mit dem Modell SEPTRI2 eine aussagekräftige Simulation des Befallsverlaufs. Die Über- bzw. Unterschätzungen des Befallsverlaufs bei der visuellen Validierung müssen nicht in jedem Fall auf einer fehlerhaften Simulation beruhen. Auch für den erhobenen Befall ist nicht auszuschließen, dass aufgrund von Schätzfehlern die Werte vom tatsächlichen Befall abweichen.

Differenzen zwischen Bonitur und Simulation bezüglich des Befallsverlaufs könnten teilweise auf den zugrundeliegenden Witterungsdaten für die Simulation beruhen. An einigen Standorten war die nächstgelegene Wetterstation bis zu 25 km entfernt, an anderen Standorten im Umkreis von wenigen Kilometern. Für den Standort Nieder-Hilbersheim zum Beispiel wurden Daten der Wetterstationen Gau-Algesheim (in 6 km Entfernung) und Rommersheim (in 11 km Entfernung) verwendet. Die Witterungsdaten passen daher, aufgrund geographischer Unterschiede der Stationen, nicht exakt zum Standort Nieder-Hilbersheim. Sommerliche konvektive Niederschläge am Schlag werden von den Wetterstationen häufig nicht erfasst. Da nicht nur die Entfernung, sondern auch Höhenunterschiede und klimatische Bedingungen bei der Betrachtung von Wetterdaten eine Rolle spielen, waren repräsentative Ergebnisse von Modellergebnissen bisher nur für die direkte Umgebung der Wetterstationen möglich (ZEUNER, 2007).

Bei der ZEPP stehen seit 2010 flächenbezogene Wetterdaten im Raster von 1 km² für die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und Niederschlag zur Verfügung. Somit ist eine standortspezifische Berechnung für jeden beliebigen Schlag in Deutschland möglich und es ist mit einer wesentlichen Verbesserung der Prognoseergebnisse zu rechnen. Die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte werden durch eine eigene Routine der ZEPP interpoliert und bereitgestellt (ZEUNER, 2007). Für den flächendeckenden Niederschlag werden Radarniederschlagsmessungen des DWD verwendet (BARTELS, 2004).

Fungizidmodul

Die Fungizidanwendung reduzierte an beiden untersuchten Standorten (Wahlbach 2008 und Mörschbach 2009) den Septoria-Befall. Die Fungizidwirkung des eingesetzten Kontaktfungizids kann mit dem entwickelten Fungizidmodul simuliert werden. Bei dem Produkt Bravo mit dem Wirkstoff Chlorthalonil handelt es sich um einen Wirkstoff mit ausschließlich protektivem Effekt (Kontaktfungizid). Dieser wird nicht in das Gewebe der Pflanze aufgenommen und gehört daher zu den nicht-systemischen Fungiziden. Bei der Simulation der Wirkung von nicht-systemischen Fungiziden sind nur die noch folgenden Neuinfektionen zu berücksichtigen. Kontaktfungizide beeinflussen oder stoppen u. a. die Entwicklung von Sporen und Konidien oder das Wachstum von Keimschläuchen und verhindern somit eine Infektion. Bei systemischen Fungiziden gelangt der Wirkstoff in die Pflanze und beeinflusst die weitere Entwicklung des Pilzes im Blattgewebe auch zu Beginn der Inkubationszeit.

Das systemische Fungizid Input hat neben einer protektiven auch eine kurative Leistung. Kurative Leistung bedeutet, dass auch ein bereits vorhandener Befall noch gestoppt wird. Daher sind für eine Simulation dieser Fungizidwirkung auch Neuinfektionen zu berücksichtigen, die vor der Applikation des Fungizides erfolgten. Die Berechnung der Wirkung in Abhängigkeit von der Zeit zwischen Infektion und Applikation stellt dabei eine besondere Herausforderung dar, d.h. wie viele Stunden nach einer Infektion die Ausbreitung und das Wachstum des Myzels noch gestoppt werden kann. Weiterhin muss das Wetter nach der Applikation von Fungiziden beachtet werden. Es muss die Frage berücksichtigt werden, wann ein Wirkstoff regenfest ist, d. h. wann er nicht mehr durch Niederschläge vom Blatt abgewaschen werden kann. In Abhängigkeit von der Zeit zwischen Applikation und Niederschlag ist ein systemischer Wirkstoff in das Blatt verlagert und kann nicht mehr vom Blatt abgewaschen werden. Ein nicht-systemischer Kontaktwirkstoff hat zwar eine gewisse Regenfestigkeit, die jedoch in Abhängigkeit von der Niederschlagsintensität und dem verwendeten Wirkstoff variieren kann.

Zur Implementierung eines für die landwirtschaftliche Praxis hilfreichen Fungizidmoduls hinsichtlich einer optimierten Terminierung von Fungizidmaßnahmen zur Redzierung des Septoria-Befalls sind daher weitere Arbeiten notwendig. In Freilandversuchen müssen Befallsdaten von unbehandelten und behandelten Varianten erhoben werden, die zur Validierung von Simulationen dienen, die basierend auf Ergebnissen aus Laborversuchen den Befallsverlauf beim Einsatz von Fungiziden darstellen.

8. ZUSAMMENFASSUNG

Mit dem Modell SEPTRI2 wird die Befallsentwicklung für Sorten geringer, mittlerer und starker Septoria-Anfälligkeit simuliert. Die Einteilung der Sorten in die Anfälligkeitsklassen erfolgte in Anlehnung an die Ergebnisse der Freilandhebungen. Weitere Sorten können nach der Septoria-BSA-Note zugeordnet werden. An insgesamt fünf Stellen im Modell wird der Einfluss der Sorten berücksichtigt. Zu einem werden auf Grundlage der Ergebnisse aus Laborversuchen drei Entwicklungszeiten (Inkubationszeit, Latenzzeit und Dauer der Pyknidienformation) differenziert und des Weiteren das Pilzwachstum mit einer sortenabhängigen Rate in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet. Ein weiterer Sortenfaktor basiert auf den Daten der Pyknidiendichte. Dieser Parameter wird in Abhängigkeit der Blatttage betrachtet, wohingegen die anderen Sortenfaktoren als eine Rate in Abhängigkeit zur stündlichen Temperatur verwendet werden (Tabelle 58).

Im Modell SEPTRI2 werden Neuinfektionsereignisse und die Befallsstärkeentwicklung in Abhängigkeit von der Blatttage berechnet. Damit jede Blatttage separat berücksichtigt werden kann, wurde ein Blattwachstumsmodul entwickelt, das die Phasen des Blattwachstums, der Erhaltung und der Seneszenz für jede Blatttage abbildet. Das Erscheinen einer Blatttage erfolgt in Abhängigkeit des BBCH-Stadiums, das von dem Modell SIMONTO berechnet wird. Der erste Befall wird ausgehend von einem Startwert für die Blatttage F-4 simuliert.

Ein Neuinfektionsprozess ist in drei Prozesse gegliedert, für die nacheinander stündlich die vorgegebenen Witterungsparameter (Temperatur und relative Luftfeuchte) überprüft werden. Zur Sporenverteilung sind in einer Stunde 0,5 mm Niederschlag erforderlich. Ausgehend von einer erfolgreichen Neuinfektion kann das Erstauftreten von *S. tritici* für jede der oberen vier Blatttagen über die Dauer der Latenzzeit bestimmt werden.

Nach einer erfolgreichen Neuinfektion beginnt die Simulation des Pilzwachstums. Zunächst wird der Ausgangswert des Pilzwachstums unter Berücksichtigung des aktuellen Befalls auf den unteren Blatttagen kalkuliert. Nach der Inkubationszeit wird der latente Befall sichtbar und mit Ablauf der

Tabelle 58: Übersicht der Sortenfaktoren im Modell SEPTRI2. Abhängige Parameter, Datengrundlage zur Bildung der Sortenfaktoren und Verwendung im Modell.

Sortenfaktor	Abhängig von der Sortenklasse und der	Verwendung
Inkubationszeit	Temperatur	Rate der Dauer, bis Läsionen auf den Blättern nach einem Neuinfektionsereignis sichtbar werden (Start: Landung der Sporen)
Latenzzeit	Temperatur	Rate der Dauer, bis Pyknidien auf den Blättern nach einem Neuinfektionsereignis sichtbar werden (Start: Landung der Sporen)
Pyknidienformation	Temperatur	Rate der Dauer, bis die maximale Anzahl an Pyknidien erreicht ist (Start: Ende der Latenzzeit)
Pyknidiendichte	Blatttage	Faktor bei der Berechnung des Ausgangswerts des Pilzwachstums
Pilzwachstum	Temperatur	Rate des Pilzwachstums ab einer erfolgreichen Infektion bis zum Ende der Pyknidienformation

Latenzzeit entwickeln sich die ersten Pyknidien, deren Sporen neue Infektionen auslösen. Das Wachstum des Pilzes und somit der Läsionen ist mit dem Erreichen der maximalen Anzahl an Pyknidien beendet. Die Befallsstärke einer Blattetage berechnet sich aus der Summe der Befallswerte der Infektionsprozesse, für die die Inkubationszeit bereits abgelaufen ist. Für jede Blattetage können mehrere Infektionsprozesse parallel betrachtet werden. Des Weiteren kann mit dem Modell SEPTR12 die Befallsentwicklung nach der Applikation eines protektiv wirkenden Fungizids betrachtet werden.

Die Validierung des Modells erfolgte mit Erhebungsdaten der Jahre 2007 bis 2009 sowohl aus Exakt-Bonituren (60 Datensätze) als auch aus den Landessortenversuchen Rheinland-Pfalz (108 Datensätze). Des Weiteren waren Erhebungsdaten aus sieben weiteren Bundesländern für die Jahre 2007 bis 2009 verfügbar (174 Datensätze). Da die Blattetage F-2 für die Praxis die größte Bedeutung hat, diente sie als Referenzetage. Das Erstauftreten von *S. tritici* auf dieser Blattetage an den Standorten in Rheinland-Pfalz wurde mit dem Modell SEPTR12 im Mittel für alle drei Sortenklassen in über 75% der Fälle korrekt simuliert. Für die Erhebungen der Pflanzenschutzdienste der Länder war der Anteil korrekter Simulationen zwar etwas niedriger, jedoch für mittel und stark anfällige Sorten noch bei > 60%, mit einem deutlich höheren Anteil zu früher als zu später Simulationen.

Die simulierten Befallsverläufe der Blattetagen F-1 und F-2 wurden bei einer visuellen Validierung mit den Daten aus den Exakt-Bonituren und der Landessortenversuche für die Sorten mittlerer Anfälligkeit in jeweils über 78% als korrekt eingestuft. Für die Sortenklasse gering und starke anfällig war das Ergebnis für die Blattetage F-1 etwas besser im Vergleich zur Blattetage F-2. Jeweils die Anteile der Überschätzungen waren höher als die der Unterschätzungen.

Zur statistischen Validierung wurden die erhobenen und simulierten Daten mit dem Kolmogorov-Smirnov-Test, der Regressionsanalyse des Achsenabschnitts und der Steigung sowie mit dem Bestimmtheitsmaß verglichen. Bei den Daten aus Rheinland-Pfalz bestimmte der Kolmogorov-Smirnov-Test durchschnittlich für die oberen drei Blattetagen in 50% aller Varianten der gering und mittel anfälligen Sorten nicht signifikante Unterschiede. Für die Sorten starker Anfälligkeit lagen die Anteile nicht signifikant unterschiedlicher Varianten bei 75%. Die Ergebnisse für den Achsenabschnitt a waren für die Sortenklasse gering anfällig in 63% der Fälle nicht signifikant. Für die Sortenklasse stark anfällig waren alle Ergebnisse nicht signifikant. Bei den Werten der Steigung b traten für die gering anfällige Sortenklasse nur in jeweils 25% der Varianten nicht signifikante Unterschiede zu eins auf. Die Ergebnisse der Sortenklasse mittel anfällig waren mit 38% nicht signifikanter Ergebnisse nur geringfügig besser, jedoch wurden für die stark anfällige Sortenklasse 75% nicht signifikante Unterschiede ermittelt. Für die Blattetagen F-1 und F-2 zeigte die Betrachtung der berechneten Werte der Steigung eine in etwa gleichmäßige Verteilung an Unter- und Überschätzungen für alle drei Sortenklassen. Teilweise kam es zu hohen Überschätzungen des erhobenen Befalls an bestimmten Standorten und dabei vermehrt für die Sorten geringer Anfälligkeit.

9. ANHANG

Boniturjahr 2007 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz			
Standort	Herxheim	Uhler	Wörrstadt
Region	Pfalz	Hunsrück	Rheinhesen
Höhe [m ü. NN]	125	430	240
Aussaattermin	18.10.2006	11.10.2006	18.10.2006
Auflauftermin	28.10.2006	22.10.2006	28.10.2006
Winterweizensorten	Akteur, Boomer, Skagen, Tommi	Akteur, Boomer, Skagen, Tommi	Akteur, Boomer, Skagen, Tommi
Anzahl Bonituren	11	12	12
Untersuchungszeitraum	12.04.07 - 21.06.07	19.04.07 - 04.07.09	12.04.07 - 27.06.07
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm
Bodentyp	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde	Pararendzina
Ackerzahl	68	43	75
Bodenbearbeitung	Pflug	pfluglos	Pflug
Parzellengröße	10 m ²	10 m ²	10 m ²
Vorfrucht	Zuckerrübe	Winterraps	Winterweizen
Vorvorfrucht	Tabak	Wintergerste	Zuckerrüben
N-Düngung	159 kg/ha	192 kg/ha	160 kg/ha
Wetterstation	Herxheimweyer	Gondershausen	Rommersheim
Entfernung von der Wetterstation	2,6 km	8,8 km	1,8 km
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	500 mm	624 mm	570 mm
Zehnjährige Durchschnittstemperatur	10,2°C	7,8°C	9,6°C

Boniturjahr 2008 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz				
Standort	Biedesheim	Herxheim	Kümbdchen	Wörrstadt
Region	Donnerbergkreis	Pfalz	Hunsrück	Rheinhesen
Höhe [m ü. NN]	280	125	365	240
Aussaattermin	09.10.2007	25.10.2007	09.10.2007	16.10.2007
Auflauftermin	21.10.2007	08.11.2007	24.10.2007	01.11.2007
Winterweizensorten	Akteur, Dekan, Mulan, Tommi			
Anzahl Bonituren	11	9	11	11
Untersuchungszeitraum	06.05.08 - 15.07.08	24.04.08 - 24.06.08	08.05.08 - 17.07.08	29.04.08 - 08.07.08
Bodenart	sandiger Lehm	sandiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm
Bodentyp	Braunerde	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde	Pararendzina
Ackerzahl	70	68	45	75
Bodenbearbeitung	Pflug	pfluglos	Pflug	Pflug
Parzellengröße	10 m ²	10 m ²	10 m ²	10 m ²
Vorfrucht	Sommergerste	Zuckerrübe	Winterraps	Winterweizen
Vorvorfrucht	Zuckerrüben	Tabak	Wintergerste	Zuckerrüben
N-Düngung	200 kg/ha	196 kg/ha	195 kg/ha	160 kg/ha
Wetterstation	Grünstadt-Asselheim	Herxheimweyer	Wahlbach	Rommersheim
Entfernung von der Wetterstation	3,6 km	2,6 km	5,8 km	1,8 km
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	650 mm	500 mm	664 mm	570 mm
Zehnjährige Durchschnittstemperatur	8,8°C	10,2°C	7,8°C	9,6°C

Boniturjahr 2009 Landessortenversuche Rheinland-Pfalz				
Standort	Biedesheim	Herxheim	Kümbdchen	Wörrstadt
Region	Donnerbergkreis	Pfalz	Hunsrück	Rheinhesen
Höhe [m ü. NN]	280	125	365	240
Aussaattermin	08.10.2008	13.10.2008	13.10.2008	14.10.2008
Auflauftermin	20.10.2008	26.10.2008	27.10.2008	27.10.2008
Winterweizensorten	Akteur, Dekan, Jenga, Mulan			
Anzahl Bonituren	10	9	11	10
Untersuchungszeitraum	28.04.09 - 30.06.09	29.04.09 - 27.06.09	30.04.09 - 08.07.09	28.04.09 - 30.06.09
Bodenart	lehmiger Schluff	sandiger Lehm	sandiger Lehm	Lehm
Bodentyp	Braunerde	Parabraunerde	Pseudogley-Braunerde	Pararendzina
Ackerzahl	70	68	45	75
Bodenbearbeitung	Pflug	Pflug	pfluglos	Pflug
Parzellengröße	10 m ²	10 m ²	10 m ²	10 m ²
Vorfrucht	Sommergerste	Zuckerrübe	Winterraps	Sommergerste
Vorvorfrucht	Zuckerrüben	Tabak	Wintergerste	Zuckerrüben
N-Düngung	200 kg/ha	162 kg/ha	200 kg/ha	130 kg/ha
Wetterstation	Grünstadt-Asselheim	Herxheimweyer	Wahlbach	Rommersheim
Entfernung von der Wetterstation	3,6 km	2,6 km	3,1 km	1,8 km
Zehnjähriges Niederschlagsmittel	650 mm	500 mm	664 mm	570 mm
Zehnjährige Durchschnittstemperatur	8,8°C	10,2°C	7,8°C	9,6°C

10. LITERATUR

1. AHMED, H. U., MUNDT, C. C., HOFFER, M. E., COAKLEY, S. M. (1996). Selective influence of wheat cultivars on pathogenicity of *Mycosphaerella graminicola* (anamorph *Septoria tritici*). *Phytopathology* 86, 454-458.
2. ANSAR, M., LEITCH, M. H. (2009). The effect of agronomic practices on the development of *Septoria tritici* leaf blotch and its subsequent affect on yield and yield components of wheat. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture* 3, 57-67.
3. ARAMA, P. F., PARLEVLIE, J. E., VAN SILFHOUT, C. H. (1999). Heading date and resistance to *Septoria tritici* blotch in wheat not genetically associated. *Euphytica* 106, 63-68.
4. ARRAIANO, L. S., BRADING, P. A., BROWN, J. K. M. (2001). A detached seedling leaf technique to study resistance to *Mycosphaerella graminicola* (anamorph *Septoria tritici*) in wheat. *Plant Pathology* 50, 339-346.
5. ARRAIANO, L. S., BRADING, P. A., DEDRYVER, F., BROWN, J. K. M. (2006). Resistance of wheat to *Septoria tritici* blotch (*Mycosphaerella graminicola*) and associations with plant ideotype and the 1BL-1RS translocation. *Plant Pathology* 55, 54-61.
6. ARSENIUK, E., GÓRAL, T., SCHAREN, A. L. (1998). Seasonal patterns of spore dispersal of *Phaeosphaeria* spp. and *Stagonospora* spp. *Plant Disease* 82, 187-194.
7. AUDSLEY, E., MILNE, A., PAVELEY, N. (2005). A foliar disease model for use in wheat disease management decision support systems. *Annals of Applied Biology* 147, 161-172.
8. AUST, H.-J., BUCHENAUER, H., KLINGAUF, F., NIEMANN, P., PÖHLING, H. M., SCHÖNBECK, F. (1991). *Glossar Phytomedizinischer Begriffe*. Ulmer, Stuttgart.
9. BAHAT, A., GELERNTER, I., BROWN, M. B., EYAL, Z. (1980). Factors affecting the vertical progression of *Septoria* leaf blotch in short-statured wheats. *Phytopathology* 70, 179-184.
10. BARTELS, H. (2004). Projekt RADOLAN. Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer). Zusammenfassender Abschlussbericht. Deutscher Wetterdienst, Abteilung Hydrometeorologie.
11. BENEDIKZ, P. W., MAPPLEDORAM, C. P., SCOTT, P. R. (1981). A laboratory technique for screening cereals for resistance to *Septoria nodorum* using detached seedling leaves. *Transactions of the British Mycological Society* 77, 667-669.
12. BRENNAN, R. M., FITT, B. D. L., COLHOUN, I., TAYLER, G. S. (1986). Factors affecting the germination of *Septoria nodorum* pycnidiospores. *Journal of Phytopathology* 117, 49-53.
13. BROKENSHIRE, T. (1975). Wheat debris as an inoculum source for seedling infection by *Septoria tritici*. *Plant Pathology* 24, 202-207.
14. BROKENSHIRE, T. (1976). The reaction of wheat genotypes to *Septoria tritici*. *Annals of Applied Biology* 82, 415-423.
15. BROWN, J. K. M., KEMA, G. H. J., FORRER, H.-R., VERSTAPPEN, E. C. P., ARRAIANO, L. S., BRADING, P. A., FOSTER, E. M., FRIES, P. M., JENNY, E. (2001). Resistance of wheat cultivars and breeding lines to *Septoria tritici* blotch by isolates of *Mycosphaerella graminicola* in field trials. *Plant Pathology* 50, 325-338.
16. BROWN, J. S. (1975). The ascogenous state of *Septoria tritici* found in Victoria. *Australian Plant Pathology Society Newsletter* 4, 1.

17. BUNDESSORTENAMT (2009). Beschreibende Sortenliste 2009. Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Hackfrüchte. Bundessortenamt, Hannover.
18. C.M.I. (1984). Description of pathogenic fungi and bacteria. Commonwealth Mycological Institute, Ferry Lane, Kew, Surrey, England.
19. CAMPBELL, C. L., MADDEN, L. V. (1990). Introduction to Plant Diseases Epidemiology. John Wiley & Sons, New York.
20. CEYNOWA, J., LINDENBERG, H., PIENING, G. (1993). Epidemiologie und infektionsbezogene Bekämpfung der Blattdürre (*Septoria tritici*) an Winterweizen. Gesunde Pflanzen 45, 155-162.
21. CHAMBERLAIN, M., INGRAM, D. S. (1997). The balance and interplay between asexual und sexual reproduction in fungi. Advances in Botanical Research 24, 71-87.
22. CHEN, R.-S., McDONALD, B. A. (1996). Sexual reproduction plays a major role in the genetic structure of populations of the fungus *Mycosphaerella graminicola*. Genetics 142, 1119-1127.
23. CHUNGU, C., GILBERT, J., TOWNLEY-SMITH, F. (2001). *Septoria tritici* blotch development as affected by temperature, duration of leaf wetness, inoculum concentration, and host. Plant Disease 85, 430-435.
24. COAKLEY, S. M., MCDANIEL, L. R., SHANER, G. (1985). Model for predicting severity of *Septoria tritici* blotch on winter wheat. Phytopathology 75, 1245-1251.
25. COHEN, L., EYAL, Z. (1993). The histology of processes associated with the infection of resistant and susceptible wheat cultivars with *Septoria tritici*. Plant Pathology 42, 737-743.
26. COOKE, B. M., JONES, D. G. (1971). The epidemiology of *Septoria tritici* and *Septoria nodorum* III. The reaction of spring and winter wheat varieties to infection by *Septoria tritici* and *S. nodorum*. Transactions of the British Mycological Society 56, 121-135.
27. CORDO, C. A., SIMÓN, M. R., PERELLÓ, A. E., ALIPPI, H. E. (1999). Spore dispersal of leaf blotch pathogens of wheat (*Mycosphaerella graminicola* and *Septoria tritici*). In: *Septoria and Stagonospora Diseases of Cereals: A Complication of Global Research*. M. Van Ginkel and J. Krupinsky, eds. International maize and wheat improvement center, Mexico, D.F. 98-101.
28. COWGER, C., McDONALD, B. A., MUNDT, C. C. (2002). Frequency of sexual reproduction by *Mycosphaerella graminicola* on partially resistant wheat cultivars. Phytopathology 92, 1175-1181.
29. CUNFER, B. M., UENG, P. P. (1999). Taxonomy and identification of *Septoria* and *Stagonospora* species on small-grain cereals. Annual Review of Phytopathology 37, 267-284.
30. DAAMEN, R. A., STOL, W. (1992). Surveys of cereal diseases and pests in the Netherlands. 5. Occurrence of *Septoria* spp. in winter wheat. Netherlands Journal of Plant Pathology 98, 369-376.
31. DANON, T., EYAL, Z. (1990). Inheritance of resistance to two *Septoria tritici* isolates in spring and winter bread wheat cultivars. Euphytica 47, 203-214.
32. DUNCAN, K. E., HOWARD, R. J. (2000). Cytological analysis of wheat infection by the leaf blotch pathogen *Mycosphaerella graminicola*. Mycological Research 104, 1074-1082.
33. ERIKSEN, L., MUNK, L. (2003). The occurrence of *Mycosphaerella graminicola* and its anamorph *Septoria tritici* in winter wheat during the growing season. European Journal of Plant Pathology 109, 253-259.

34. ERIKSEN, L., SHAW, M. W., OSTERGARD, H. (2001). A model of the effect of pseudothecia on genetic recombination and epidemic development in populations of *Mycosphaerella graminicola*. *Phytopathology* 91, 240-248.
35. EYAL, Z. (1971). The kinetics of pycnospore liberation in *Septoria tritici*. *Canadian Journal of Botany* 49, 1095-1099.
36. EYAL, Z. (1999). The *Septoria tritici* and *Stagonospora nodorum* blotch diseases of wheat. *European Journal of Plant Pathology* 105, 629-641.
37. FELLOWS, H. (1962). Effects of light, temperature and fertilizer on infection of wheat leaves by *Septoria tritici*. *Plant Disease Reporter* 46, 846-848.
38. GÄUMANN, E. (1951). *Pflanzliche Infektionslehre* (2. Auflage). Verlag Birkhäuser, Basel.
39. GIECO, J. O., DUBCOVSKY, J., CAMARGO, L. E. A. (2004). Aggressiveness and physiological specialization of *Septoria tritici* Rob. isolates. *Scientia Agricola (Piracicaba, Brazil)* 61, 414-421.
40. GLADDERS, P., PAVELEY, N. D., BARRIE, I. A., HARDWICK, N. V., HIMES, M. J., LANGTON, S., TAYLOR, M. C. (2001). Agronomic and meteorological factors affecting the severity of leaf blotch caused by *Mycosphaerella graminicola* in commercial wheat crops in England. *Annals of Applied Biology* 138, 301-311.
41. GOUGH, F. J. (1978). Effect of wheat host cultivars on pycnidiospore production by *Septoria tritici*. *Phytopathology* 68, 1343-1345.
42. GOUGH, F. J., LEE, T. S. (1985). Moisture effects on the discharge and survival of conidia of *Septoria tritici*. *Phytopathology* 75, 180-182.
43. GUTSCHE, V., JÖRG, E., KLEINHENZ, B. (1999). *Phytophthora - Prognose mit SIMPHYT III*. *Kartoffelbau* 50, 128-130.
44. HACK, H., BLEIHOLDER, H., BUHR, L., MEIER, U., SCHNOCK-FRICKE, U., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1992). Einheitliche Codierung der phänologischen Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen - Erweiterte BBCH-Skala. *Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst* 44, 265-270.
45. HALAMA, P. (1996). The occurrence of *Mycosphaerella graminicola*, teleomorph of *Septoria tritici* in France. *Plant Pathology* 45, 135-138.
46. HARDWICK, N. V., JONES, D. R., SLOUGH, J. E. (2001). Factors affecting diseases of winter wheat in England and Wales, 1989-98. *Plant Pathology* 50, 650-652.
47. HARDWICK, N. V., TURNER, J. A., SLOUGH, J. E., ELCOCK, S. J., JONES, D. R., GLADDERS, P. (2002). Oilseed rape and cereal diseases - How are farmers responding to their control? *British Crop Protection Council Conference: Pest and Diseases* 2, 903-910.
48. HAU, B. (1985). *Epidemiologische Simulatoren als Instrumente der Systemanalyse mit besonderer Berücksichtigung eines Modells des Gerstenmehltaus*. Verlag Paul Parey, Berlin und Hamburg.
49. HAU, B. (1988). *Ein erweitertes analytisches Modell für Epidemien von Pflanzenkrankheiten*. Habilitationsschrift, Justus-Liebig-Universität, Gießen.
50. HAU, B., EISENSMITH, S. P., KRANZ, J. (1985). Construction of temporal models: II. Simulation of aerial epidemics. In: Gilligan, C. A., ed. *Advances in Plant Pathology, Vol. 3. Mathematical Modelling of Crop Diseases*. Academic Press, London, 31-65.
51. HESS, D., SHANER, G. (1987). Effect of moisture and temperature on development of *Septoria tritici* blotch in wheat. *Phytopathology* 77, 215-219.

52. HILU, H. M., BEVER, W. M. (1957). Inoculation, oversummering and suspect-pathogen relationship of *Septoria tritici* on Triticum species. *Phytopathology* 47, 474-480.
53. HOFFMANN, G. M., SCHMUTTERER, H. (1999). Parasitäre Krankheiten und Schädlinge an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen. Verlag Eugen Ulmer GmbH & Co., Stuttgart.
54. HOLMES, S. J., COLHOUN, J. (1974). Infection of wheat by *Septoria nodorum* and *Septoria tritici* in relation to plant age, air temperature and relative humidity. *Transactions of the British Mycological Society* 63, 329-338.
55. HOORNE, C., LAMARI, L., GILBERT, J., BALLANCE, G. M. (2002). First report of *Mycosphaerella graminicola*, the sexual state of *Septoria tritici*, in Manitoba, Canada. *Canadian Journal of Plant Pathology* 24, 445-449.
56. HUNTER, T., COKER, R. R., ROYLE, D. J. (1999). The teleomorph stage, *Mycosphaerella graminicola*, in wheat epidemics of *Septoria tritici* blotch on winter wheat in the UK. *Plant Pathology* 48, 51-57.
57. JÖRG, E., KLEINHENZ, B. (1996). Zweimal weniger spritzen. *DLG-Mitteilungen* 4, 46-48.
58. JÖRG, E., RACCA, P., ERVEN, T. (2004). *Cercospora beticola* - Epidemiologische Untersuchungen zu Sortenunterschieden an Zuckerrüben. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 396, 513.
59. JÖRG, E., ROßBERG, D. (1998). Entwicklung von SIMLEP 2 zur schlagspezifischen Kartoffelkäferprognose. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 357, 100.
60. KEIL, B., KLEINHENZ, B. (2007). AgmedaWin – a tool for easy and flexible management of meteorological data. *OEPP/EPPO Bulletin* 335-338.
61. KEMA, G. H. J., ANNONE, J. G., SAYOUD, R., VAN SILFHOUT, C. H., VAN GINKEL, M., DE BREE, J. (1996a). Genetic variation for virulence and resistance in the wheat- *Mycosphaerella graminicola* pathosystem I. Interactions between pathogen isolates and host cultivars. *Phytopathology* 86, 200-212.
62. KEMA, G. H. J., SAYOUD, R., ANNONE, J. G., VAN SILFHOUT, C. H. (1996b). Genetic variation for virulence and resistance in the wheat- *Mycosphaerella pathosystem* II. Analysis of interactions between pathogen isolates and host cultivars. *Phytopathology* 86, 213-220.
63. KEMA, G. H. J., SILFHOUT VAN, C. H. (1997). Genetic variation for virulence and resistance in the wheat-*Mycosphaerella graminicola* pathosystem III. Comparative seedling and adult plant experiments. *Phytopathology* 87, 266-272.
64. KEMA, G. H. J., VERSTAPPEN, E. C. P., TODOROVA, M., WAALWIJK, C. (1996c). Successful crosses and molecular tetrad and progeny analyses demonstrate heterothallism in *Mycosphaerella graminicola*. *Current Genetics* 30, 251-258.
65. KEMA, G. H. J., YU, D., RIJKENBERG, F. H. J., SHAW, M. W., BAAYEN, R. P. (1996d). Histology of the pathogenesis of *Mycosphaerella graminicola* in wheat. *Phytopathology* 86, 777-786.
66. KLEINHENZ, B., JÖRG, E. (1998). Integrierter Pflanzenschutz - Rechnergestützte Entscheidungshilfen. Reihe A: Angewandte Wissenschaft Heft 473. Köllen Druck + Verlag GmbH.
67. KLINK, H. (1997). Geoepidemiologische Erhebungen von Weizenpathogenen in Schleswig-Holstein unter Anwendung und Entwicklung des Integrierten Pflanzenschutzsystems (IPS-Modell Weizen) für einen minimierten, bedarfsgerechten Fungizideinsatz (1993 - 1996). Institut für Phytopathologie. Dissertation, Christian-Albrechts-Universität. Kiel.

68. KLUGE, E., JÖRG, E., ROSSBERG, D. (2006). SIMSEPT: Eine Entscheidungshilfe zur Bekämpfung von *Septoria tritici* und *Septoria nodorum*. Archives of Phytopathology and Plant Protection 39, 79-92.
69. KRANZ, J. (1996). Epidemiologie der Pflanzenkrankheiten - Eine Einführung in Grundlagen, Methoden und praktische Anwendung. Ulmer Verlag, Stuttgart.
70. KRANZ, J. (2002). Comparative epidemiology of plant diseases. Springer Verlag, Berlin.
71. KRANZ, J., HAU, B. (1980). Systems analysis in epidemiology. Annual Review of Phytopathology 18, 67-83.
72. LANCASHIRE, P., BLEIHOLDER, H., VAN DEN BOOM, T., LANGELÜDDEKE, P., STAUB, R., WEBER, E., WITZENBERGER, A. (1991). A uniform decimal code for growth stages of crops and weeds. Annals of Applied Biology 119, 561-601.
73. LOVELL, D. J., HUNTER, T., POWERS, S. J., PARKER, S. R., VAN DEN BOSCH, F. (2004). Effect of temperature on latent period of Septoria leaf blotch on winter wheat under outdoor conditions. Plant Pathology 53, 170-181.
74. LOVELL, D. J., PARKER, S. R., HUNTER, T., ROYLE, D. J., COKER, R. R. (1997). Influence of crop growth and structure on the risk of epidemics by *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) in winter wheat. Plant Pathology 46, 126-138.
75. LÜTKE ENTRUP, N., OEHMICHEN, J. (2000). Lehrbuch des Pflanzenbaus. Band 1: Grundlagen. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen.
76. MAGBOUL, A. M., GENG, S., GILCHRIST, D. G., JACKSON, L. F. (1992). Environmental influence on the infection of wheat by *Mycosphaerella graminicola*. Phytopathology 82, 1407-1413.
77. McDONALD, B. A., MARTINEZ, J. P. (1990). DNA Restriction Fragment Length Polymorphisms among *Mycosphaerella graminicola* (Anamorph *Septoria tritici*) isolates collected from a single wheat field. Phytopathology 80, 1368-1373.
78. MEIER, U. (2001). Entwicklungsstadien mono- und dikotyler Pflanzen. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin und Braunschweig.
79. METHA, Y. R. (1989). Occurrence of *Septoria tritici* and its perfect state in Brazil. 3. International Workshop on Septoria Diseases of Cereals, Zürich. 34-35.
80. MIELKE, H. (1981). Untersuchungen zur Schädigung von *Septoria tritici* Rob. an Winter- und Sommerweizen. Bauernblatt/Landpost 131, 26-28.
81. MORZFELD, J. (2004). Einfluss von Landschaftsstrukturen und landwirtschaftlicher Nutzung auf das Auftreten blattpathogener Pilze an Weizen und die genetische Diversität von *Mycosphaerella graminicola* (Anamorph *Septoria tritici*). Dissertation, Universität Göttingen.
82. MÜLLER, M., HABERMEYER, J. (2001). Bewertung der Wirksamkeit moderner Fungizide gegen *Septoria tritici* und *Drechslera tritici-repentis* unter epidemiologischen Gesichtspunkten. Gesunde Pflanzen 53, 7-14.
83. MURRAY, G. M., MARTIN, R. H., CULLIS, B. R. (1990). Relationship of the severity of *Septoria tritici* blotch of wheat to sowing time, rainfall at heading and average susceptibility of wheat cultivars in the area. Australian Journal of Agricultural Research 41, 307-315.
84. O'CALLAGHAN, J. R., DAHAB, M. H., HOSSAIN, A. H. M. S., WYSEURE, G. C. L. (1994). Simulation of *Septoria tritici*-winter wheat interactions. Computers and Electronics in Agriculture 11, 309-321.
85. OBST, A. (1993). Septoria und Rhynchosporium infektionsbezogen bekämpfen. Der Pflanzenarzt - Sonderteil Pflanzenschutz-Praxis 13-15.

86. OBST, A., GERING, K. (2002). Getreide. Krankheiten, Schädlinge, Unkräuter. Verlag Th. Mann. Gelsenkirchen-Buer.
87. PALMER, C.-L., SKINNER, W. (2002). *Mycosphaerella graminicola*: latent infection, crop devastation and genomics. *Molecular Plant Pathology* 3, 63-70.
88. PARKER, S. R., LOVELL, D. J., ROYLE, D. J. (1997). The importance of accurate risk prediction for reliable control of *Septoria tritici* leaf blotch in winter wheat. *Aspects of Applied Biology* 48, 143-151.
89. PIETRAVALLE, S., SHAW, M. W., PARKER, S. R., BOSCH, V. D. F. (2003). Modeling of relationships between weather and *Septoria tritici* epidemics on winter wheat: a critical approach. *Phytopathology* 93, 1329-1338.
90. PNINI-COHEN, S., ZILBERSTEIN, A., SCHUSTER, S., SHARON, A., EYAL, Z. (2000). Elucidation of *Septoria tritici* x wheat interactions using GUS- expressing isolates. *Phytopathology* 90, 297-304.
91. 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.
92. RACCA, P., JÖRG, E., FALKE, K., PETERSEN, H. J. (2006). Einfluss der Sortenresistenz von Zuckerrüben auf epidemiologische Parameter von *Cercospora beticola*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 400, 282-283.
93. RACCA, P., JÖRG, E., MITTLER, S., PETERSEN, J. (2002a). Blattkrankheiten bei Zuckerrüben - Prognoseansätze zur Optimierung des Fungizideinsatzes. *ZuckerIndustrie* 127, 949-958.
94. RACCA, P., JÖRG, E., MITTLER, S., PETERSEN, J. (2002b). CERCBET 3 - ein flexibles Modell zur Prognose von Bekämpfungsschwellenüberschreitungen bei *Cercospora beticola*. *Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft* 390, 218-219.
95. RACCA, P., ZEUNER, T., JUNG, J., KLEINHENZ, B. (2010). Model validation and use of geographic information systems in crop protection warning service. In: *Precision Crop Protection*. Springer Verlag, in Druck.
96. RAPILLY, F., JOLIVET, E. (1976). Construction d'un modele (EPISEPT) permettant la simulation d'une epidemie *Septoria nodorum* Berk. sur blé. *Revue de Statistique Appliquée* 24 24, 31-60.
97. RENFRO, B. L., YOUNG, H. C. (1956). Techniques for studying varietal response to *Septoria* leaf blotch of wheat. *Phytopathology* 46, 23-24.
98. ROBERT, C., BANCAL, M.-O., LANNOU, C., NEY, B. (2006). Quantification of the effects of *Septoria tritici* blotch on wheat leaf gas exchange with respect to lesion age, leaf number, and leaf nitrogen status. *Journal of Experimental Botany* 57, 225-234.
99. ROBERT, C., BANCAL, M.-O., NICOLAS, P., LANNOU, C., NEY, B. (2004). Analysis and modelling of effects of leaf rust and *Septoria tritici* blotch on wheat growth. *Journal of Experimental Botany* 55, 1079-1094.
100. ROßBERG, D., JÖRG, E., FALKE, K. (2005). SIMONTO - ein neues Ontogenesemodell für Wintergetreide und Winterraps. *Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst* 57, 74-80.
101. ROSSI, V., RACCA, P., GIOSUE, S., PANCALDI, D., ALBERTI, I. (1997). A simulation model for the development of brown rust epidemics in winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 103, 453-465.

102. ROYLE, D. J., LOVELL, D. J., COAKLEY, S. M., SHANER, G. (1993). Predicting the effects of climate change on *Septoria tritici* on winter wheat. In: Abstracts of the 6th International Congress of Plant Pathology, Montreal, Canada 97.
103. ROYLE, D. J., SHAW, M. W., COOK, R. J. (1986). Patterns of development of *Septoria nodorum* and *Septoria tritici* in some winter wheat crops in Western Europe, 1981-1983. *Plant Pathology* 35, 466-476.
104. SANDERSON, F. R. (1972). A *Mycosphaerella* species as the ascogenous state of *Septoria tritici* Rob. and Desm. *New Zealand Journal of Botany* 10, 707-710.
105. SCHUH, W. (1990). Influence of tillage systems on disease intensity and spatial pattern of *Septoria* leaf blotch. *Phytopathology* 80, 1337-1340.
106. SCOTT, P. R., SANDERSON, F. R., BENEDIKZ, P. W. (1988). Occurrence of *Mycosphaerella graminicola*, teleomorph of *Septoria tritici*, on wheat debris in the UK. *Plant Pathology* 37, 285-290.
107. SHANER, G. (1981). Effect of environment on fungal leaf blights of small grains. *Annual Review of Phytopathology* 19, 273-296.
108. SHANER, G., FINNEY, R. E., PATTERSON, F. L. (1975). Expression and effectiveness of resistance in wheat to *Septoria* leaf blotch. *Phytopathology* 65,
109. SHANER, G. R. E., FINNEY, R. E. (1976). Weather and epidemics of *Septoria* leaf blotch of wheat. *Phytopathology* 66, 781-785.
110. SHAW, M. W. (1990). Effects of temperature, leaf wetness and cultivar on the latent period of *Mycosphaerella graminicola* on winter wheat. *Plant Pathology* 39, 255-268.
111. SHAW, M. W., ROYLE, D. J. (1989). Airborne inoculum as a major source of *Septoria tritici* (*Mycosphaerella graminicola*) infections on winter wheat crops in the UK. *Plant Pathology* 38, 35-43.
112. SHAW, M. W., ROYLE, D. J. (1993). Factors determining the severity of epidemics of *Mycosphaerella graminicola* (*Septoria tritici*) on winter wheat in the U.K. *Plant Pathology* 42, 882-899.
113. SHEARER, B. L., ZADOKS, J. C. (1972). The latent period of *Septoria nodorum* in wheat. 1. The effect of temperature and moisture treatments under controlled conditions. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 78, 231-241.
114. SHEARER, B. L., ZADOKS, J. C. (1974). The latent period of *Septoria nodorum* in wheat. 2. The effect of temperature and moisture under field conditions. *Netherlands Journal of Plant Pathology* 80, 48-60.
115. SHETTY, N. P., DE NEERGAARD, E., JORGENSEN, H. J. L. (2003). Defence responses of wheat against *Septoria tritici*. In: *Global Insights into the Septoria and Stagonospora Diseases of Cereals*. Proceedings of the 6th Int. Symposium on *Septoria* and *Stagonospora* Diseases of Cereals. Eds. G.H.J. Kema, M. van Ginkel, M. Harrabi. Tunis, Tunisia (2003) December 8-12 21-24.
116. SHETTY, N. P., JENSEN, J. D., KNUDSEN, A., FINNIE, C., GESHI, N., BLENNOW, A., COLLINGE, D. B., JORGENSEN, J. L. (2009). Effectes of β -a,3-glucan from *Septoria tritici* on structural defence responses in wheat. *Journal of Experimental Botany* 60, 4287-4300.
117. SHIPTON, W. A., BOYD, W. R. J., ROSIELLE, A. A., SHEARER, B. L. (1971). The common *Septoria* diseases of wheat. *Botanical Review* 37, 231-262.

118. SILFHOUT VAN, C. H., ARAMA, P. F., KEMA, G. H. J. (1989). International survey of factors of virulence in *Septoria tritici*. Third International Septoria workshop of Septoria diseases of cereals. July 4-7, 1989, Zürich, Switzerland 36-38.
119. SIMÓN, M. R., PERELLÓ, A. E., CORDO, C. A., STRUIK, P. C. (2002). Influence of *Septoria tritici* on yield, yield components, and test weight of wheat under two nitrogen fertilization conditions. *Crop Science* 42, 1974-1981.
120. SIMÓN, M. R., WORLAND, A. J., STRUIK, P. C. (2004). Influence of plant height and heading date on the expression of resistance to *Septoria tritici* blotch in near isogenic lines of wheat. *Crop Science Society of America* 44, 2078-2085.
121. SIMÓN, M. R., WORLAND, A. J., STRUIK, P. C. (2005). Chromosomal location of genes encoding for resistance to *Septoria tritici* blotch (*Mycosphaerella graminicola*) in substitution lines of wheat. *Netherlands Journal of Agricultural Science* 53, 113-129.
122. STATISTISCHESBUNDESAMTDEUTSCHLAND (2008). Aussaatflächen 2008: Mehr Getreide, weniger Raps. Pressemitteilung Nr.192, Bonn.
123. TE BEEST, D. E., SHAW, M. W., PIETRAVALLE, S., VAN DEN BOSCH, F. (2009). A predictive model for early-warning of Septoria leaf blotch on winter wheat. *European Journal of Plant Pathology* 124,
124. TENG, P. S. (1981). Validation of computer models of plant disease epidemics: a review of philosophy and methodology. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz* 88, 49-63.
125. TENG, P. S. (1985). A comparison of simulation approaches to epidemic modeling. *Annual Review of Phytopathology* 23, 351-379.
126. THOMAS, M. R., COOK, R. J., KING, J. E. (1989). Factors affecting the development of *Septoria tritici* in winter wheat and its effect on yield. *Plant Pathology* 38, 246-257.
127. TYLDESLEY, J. B., THOMPSON, N. (1980). Forecasting *Septoria nodorum* on winter wheat in England and Wales. *Plant Pathology* 29, 9-20.
128. VANDERPLANK, J. E. (1963). *Plant Diseases: Epidemics and Control*. Academic Press, New York.
129. VĚCHET, L., VOJÁCKOVÁ, M. (2005). Use of detached seedling leaf test to evaluate wheat resistance to *Septoria tritici* blotch. *Czech Journal of Genetics and Plant Breeding* 41, 112-116.
130. VERREET, J. A., HOFFMANN, G. M., PORTNER, J. (1990). Nachweis des teleomorph *Mycosphaerella graminicola* (Fuckel) Schröter (Anamorph: *Septoria tritici* Rob. apud Desm.) in der Bundesrepublik Deutschland. *Journal of Phytopathology* 130, 105-119.
131. VILJANEN-ROLLINSON, S. L. H., MARRONI, M. V., BUTLER, R. C., DENG, Y., ARMOUR, T. (2005). Latent periods of *Septoria tritici* blotch on ten cultivars in wheat. *New Zealand Plant Protection* 58, 256-260.
132. WAGGONER, P. E., HORSFALL, J. G. (1969). EPIDEM, a simulator of plant disease written for computer. *Connecticut Agricultural Experiment Station* 698.
133. WAINSHILBAUM, S. J., LIPPS, P. E. (1991). Effect of temperature and growth stage of wheat on development of leaf and glume blotch caused by *Septoria tritici* and *Septoria nodorum*. *Plant Disease* 75, 993-998.
134. WEBER, G. F. (1922). II. Septoria diseases of wheat. *Phytopathology* 12, 537-585.

135. WITZENBERGER, A., VAN DEN BOOM, T., HACK, H. (1989). Erläuterungen zum BBCH-Dezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides mit Abbildungen. *Gesunde Pflanzen* 41, 384-388.
136. ZADOKS, J. C., CHANG, T. T., KONZAK, C. F. (1974). A decimal code for the growth stages of cereals. *Weed Research* 14, 415-421.
137. ZELIKOVITCH, N., EYAL, Z. (1991). Reduction in pycnidial coverage after inoculation of wheat with mixtures of isolats of *Septoria tritici*. *Plant Disease* 75, 907-910.
138. ZEUNER, T. (2007). Landwirtschaftliche Schaderregerprognose mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Johannes Gutenberg Universität. Mainz.
139. ZHANG, X., HALEY, S. D., JIN, Y. (2001). Inheritance of *Septoria tritici* blotch resistance in winter wheat. *Crop Science* 41, 323-326.
140. ZILLINSKY, F. J. (1983). Common Diseases of Small Grain Cereals: A Guide to Identification. Centro Internacional de Mejoramiento de Maíz y Trigo (CIMMYT), El Batán, Mexico.

Danksagung

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr. B. Hau für die sehr gute Betreuung, die gewährte Selbstständigkeit, die ständige Diskussionsbereitschaft und die kritische Durchsicht meiner Arbeit.

Herrn Prof. Dr. H. Kage danke ich für die Übernahme des Korreferates.

Ein ganz besonderer Dank gilt Dr. Paolo Racca für die ausgezeichnete Betreuung und die Unterstützung während der Erstellung dieser Arbeit. Meinem Vater, Diplom-Informatiker Wilhelm Erven, danke ich herzlich für die tatkräftige und unermüdliche Unterstützung bei der Programmierung des Modells.

Allen Mitarbeitern der ZEPP, insbesondere dem Geschäftsführer Dr. Benno Kleinhenz sowie Dr. Dagmar Heibertshausen, Dominique Richerzhagen und Nina Bodtländer danke ich für die stete Hilfsbereitschaft, den vielen Anregungen und die durchgeführten Befallserhebungen.

Ferner gilt mein Dank der Abteilung Landwirtschaft am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, insbesondere Herrn Bernd Lenhart, Uwe Preiss und allen Mitarbeitern des Pflanzenschutz-Labors für die große Hilfsbereitschaft und die freundliche Atmosphäre während meiner Promotionszeit.

Besonderer Dank gilt auch den Pflanzenschutzdiensten der Länder für die tatkräftige Unterstützung und Hilfsbereitschaft sowie die Bereitstellung der Erhebungsdaten.

Außerdem bedanke ich mich bei der Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, die diese Arbeit im Rahmen eines Projektes finanziell unterstützt hat.

Zum Schluss möchte ich ganz besonders meinen Eltern danken, die mir dies alles ermöglicht haben und mich immer bedingungslos unterstützt haben.

Curriculum vitae

Persönliche Daten	Name	Tobias Erven
	Geburtstag	01.06.1979
	Familienstand	ledig
	Nationalität	deutsch
Schulbildung	08/85 – 06/89	Johannesgrundschule Siersdorf
	08/89 – 05/98	Gymnasium Haus Oberbach in Jülich Abschluss: Abitur
Zivildienst	07/98 – 05/99	Zivildienst beim Deutsch Roten Kreuz in Jülich, Behindertenfahrdienst
Studium	10/99 – 08/03	Studium der Landwirtschaft an der Fachhochschule Bingen Fachrichtung: Intensivkulturen Abschluss: Dipl.- Ing. agr. (FH) Diplomarbeit: <i>Cercospora beticola</i> – Epidemiologische Untersuchungen zu Sortenunterschieden an Zuckerrüben
	03/05 – 09/06	Studium der Agrarwissenschaft an der Christian-Albrechts-Universität zu Kiel Fachrichtung: Nutzpflanzenwissenschaften Abschluss: Master of Science Masterarbeit: Wurzel- und Sprossentwicklung von Winterweizen im Jugendstadium
	05/07 – 05/10	Promotionsstudium Externer Doktorand an der Leibniz Universität Hannover Durchführung: Zentralstelle der Länder für EDV- gestützte Entscheidungshilfe und Programme im Pflanzenschutz und Dienstleistungszentrum ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück
Praktika und berufliche Tätigkeiten	05/99 – 07/99	Praktika, Landhof A. Wynands, Jülich
	08/00 – 12/00	Praxissemester, Hehlinger Hof, Westerwald
	06/03 – 08/03	Assistent im Versuchswesen, Landesanstalt für Pflanzenbau- und Pflanzenschutz, Mainz
	09/03 – 03/04	Mitarbeiter auf einem Ackerbaubetrieb, Linnich
	04/04 – 10/04	Mitarbeiter auf dem Lehr- und Versuchsbetrieb Queckbrunnerhof, Schifferstadt
	11/04 – 02/05	Mitarbeiter im Garten- und Landschaftsbaubetrieb D. David, Linnich
	05/05 – 08/05	Studentische Hilfskraft am Institut für Phytopathologie, Universität Kiel
	10/05 – 08/06	Studentische Hilfskraft am Institut für Acker- und Pflanzenbau, Universität Kiel
	10/06 – 04/07	Wissenschaftlicher Mitarbeiter bei der Zentralstelle der Länder für EDV- gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz, Bad Kreuznach

Curriculum vitae

Personal Information	Name	Tobias Erven
	Date of birth	01.06.1979
	Family status	single
	Nationality	German
School education	08/85 – 06/89	Primary school in Siersdorf
	08/89 – 05/98	Secondary school Haus Oberbach in Jülich School leaving examination
National service	07/98 – 05/99	Community service at the German Red Cross in Jülich
Studies	10/99 – 08/03	Study of agricultural at the University of Applied Science of Bingen Area of study: Fruit and vegetable growing Degree: Agricultural Engineer Thesis: <i>Cercospora beticola</i> – Epidemiological studies on different cultivars of sugar beet
	03/05 – 09/06	Study of agriculture at the Christian-Albrechts- University of Kiel Area of study: Crop science Dregree: Master of Science Master thesis: Pre-crop dependent root and shoot development of winter wheat in the juvenile stage
	05/07 – 05/10	Doctorate study at the Leibniz University of Hannover Institute of Plant Disease and Plant Protection Place of work: Central Institution for Decision Support Systems in Crop Protection and Agricultural Public Service Center Rheinhessen-Nahe-Hunsrück, Bad Kreuznach
Practical and work experience	05/99 – 07/99	Practical, Farm A. Wynands, Jülich
	08/00 – 12/00	Practical semester, Hehlinger Hof, Westerwald
	06/03 – 08/03	Assistant of the experiment section at the State Office for Agricultural and Plant Protection, Mainz
	09/03 – 03/04	Temporary work on a farm, Linnich
	04/04 – 10/04	Assistant at the teaching and testing laboratory Queckbrunnerhof, Schifferstadt
	11/04 – 02/05	Assistant at the gardening and landscaping company D. David, Linnich
	05/05 – 08/05	Student assistant at the Institute of Phytopathology, University of Kiel
	10/05 – 08/06	Student assistant at the Institute of Agronomy and Crop Science, University of Kiel
10/06 – 04/07	Research assistant at ZEPP (Central Institution for Decision Support Systems in Crop Protection), Bad Kreuznach	