

Möglichkeiten zur standortspezifischen Simulation der Bodenfeuchte und zur Integration von Bodenfeuchte- und Bodenartmodulen in Modelle zur Prognose des Auftretens von drei ausgewählten Schaderregern im Pflanzenschutz

Dissertation

Zur Erlangung des akademischen Grades eines
Doktors der Naturwissenschaften
Fachbereich 3: Mathematik/Naturwissenschaften
Universität Koblenz-Landau

Vorgelegt

am 22.06.2012

von Frau Jeanette Jung

geb. am 05. Dezember 1982 in Bad Kreuznach

Tag der mündlichen Prüfung: 21.11.2012

Referent: Herr Prof. Dr. Dieter König

Koreferent: Herr Prof. Dr. Rainer Graafen

Kurzfassung

In der hier vorliegenden Forschungsarbeit wurden die Auswirkungen der Bodenfeuchte und der Bodenart auf die ausgewählten Schaderreger *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, *Fusarium graminearum* Schwabe bzw. *F. culmorum* (W.G. Smith) Saccardo und die Larven der wichtigsten Elateridenarten *Agriotes lineatus* Linnaeus, *A. obscurus* Linnaeus, *A. sputator* Linnaeus, *A. sordidus* Illiger sowie *A. ustulatus* Schaller (im Folgenden als Drahtwürmer zusammengefasst) untersucht. Ziel war die Integration von Bodenmodulen in Prognosemodelle für landwirtschaftliche und gartenbauliche Schaderreger, um die Terminierung von Befallskontrollen weiter zu optimieren, die Bekämpfungsnotwendigkeit festzustellen und somit eine Reduzierung vorbeugender Pflanzenschutzmittelanwendungen zu erreichen.

Wegen des hohen Aufwandes zur Messung der Bodenfeuchte sowie ihrer kleinräumigen Variabilität fand dieser Parameter bisher in der Schaderregerprognose nur geringe Beachtung. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Möglichkeiten zur standortspezifischen Simulation der Bodenfeuchte überprüft. Dabei wurde das Bodenfeuchtesimulationsmodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) an landwirtschaftliche Problemstellungen angepasst und die standortspezifische Simulation der Bodenfeuchte auf Grundlage der Niederschlagsdaten des Radermessnetzes des Deutschen Wetterdienstes (DWD) sowie interpolierten Wetterdaten (ZEUNER 2007) durchgeführt. Mit einer hochsignifikanten Korrelation zum Signifikanzniveau $\alpha = 0,01$ und mittleren Abweichungen der simulierten Bodenfeuchte von Feldmessungen von 3,8 % kann diese zukünftig schlagspezifisch berechnet und in den Schaderregermodellen berücksichtigt werden.

Die Ergebnisse der Labor- und Freilandversuche und die durchgeführten Datenanalysen zeigten, dass der Einfluss von Bodenparametern auf die drei untersuchten Schaderreger unterschiedlich stark ausgeprägt ist. Während sich bei den Untersuchungen zum Einfluss der Bodenfeuchte auf *P. infestans* keine eindeutigen Korrelationen aufzeigen ließen, gab es deutliche Zusammenhänge zwischen der Bodenfeuchte bzw. Bodenart und dem Vorkommen von Drahtwürmern sowie von *F. graminearum* bzw. *F. culmorum*. Zur Prognose des Drahtwurmauftretens in den oberen 15 cm der Bodenschicht wurde das Modell SIMAGRIO-W entwickelt. In den durchgeführten Versuchen ergaben sich hochsignifikante Zusammenhänge der Bodenfeuchte und der Bodenart auf das Vorkommen der Drahtwürmer. Der Einfluss der Bodenart auf den Schaderreger *F. graminearum* bzw. *F. culmorum* wurde in das bestehende Modell FUS-OPT integriert. Eine Korrelation von aus der Luft gefangenen Sporen von *F. graminearum* mit dem simulierten Perithezienwachstum des veränderten Modells FUS-OPT ergab im Test nach PEARSON einen hochsignifikanten Zusammenhang.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die Integration von Bodenfeuchte- und Bodenartmodulen in die Schaderregermodelle möglich ist. Die entwickelten bzw. modifizierten Modelle werden den Pflanzenschutzdiensten der Länder zukünftig zur praktischen Beratung über das Internetportal www.isip.de zur Verfügung stehen.

Abstract

In this study the influence of soil moisture and soil type on the selected pests and diseases *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, *Fusarium graminearum* Schwabe and *F. culmorum* (W.G. Smith) Saccardo, respectively, as well as the larvae of the most important Elateridae *Agriotes lineatus* Linnaeus, *A. obscurus* Linnaeus, *A. sputator* Linnaeus, *A. sordidus* Illiger and *A. ustulatus* Schaller (called wireworms) was characterized. The aim was to integrate soil modules in prediction models for agricultural and horticultural pests and diseases, to optimise the scheduling of disease controls, to detect periods of high-intensity attacks and to reduce the number of preventive treatments.

The measurement of soil moisture is time intensive and additionally soil moisture is highly varying within small areas. Therefore this parameter did not have a high impact in the prediction models for agricultural and horticultural pests and diseases in the past. In this study the possibilities for a site-specific simulation of soil moisture was investigated. The soil moisture simulation model SIMPEL (HÖRMANN 1998) was adapted to agricultural conditions and the site-specific simulation of soil moisture was realised on the basis of radar measured precipitation data from the German Meteorological Service (DWD) and on interpolated weather data (ZEUNER 2007). The comparison of the simulated soil moisture data with the field measurements showed a highly significant correlation (Alpha = 0.01) and an average of 3.8 % differences. Therefore the site-specific simulation of soil moisture will be possible and can be included in the prediction models for agricultural and horticultural pests and diseases.

The results of laboratory and field experiments as well as analyses on monitoring data showed, that the influence of soil parameters on the three selected pests and diseases varied. Whereas the investigations on the influence of soil moisture on *P. infestans* identified no clear correlation, considerable correlations between soil moisture and soil type on wireworms as well as *F. graminearum* and *F. culmorum* could be detected. For the prediction of the appearance of wireworms in the upper soil level in relation to soil moisture and soil type the simulation model SIMAGRIO-W was developed. The validation of the new model showed highly significant correlations between soil moisture and soil type on the appearance of wireworms. The influence of soil type on *F. graminearum* and *F. culmorum* was integrated in the existing prediction model FUS-OPT. A correlation between air cached spores of *F. graminearum* and simulation results from the modified model FUS-OPT showed a high significance in PEARSON test.

The results of this study showed that the implementation of soil moisture and soil type in the prediction models for agricultural and horticultural pests and diseases can be realised. The developed and modified prediction models can be used by the Governmental Crop Protection Services in Germany through www.isip.de.

Inhaltsverzeichnis

<i>Abbildungsverzeichnis</i>	8
<i>Tabellenverzeichnis</i>	13
I. Einleitung	15
II. Bodenfeuchtesimulation	17
1. Einleitung	17
2. Material und Methoden	18
2.1 Überblick Bodenfeuchtesimulationsmodelle	18
2.2 Nutzung von Wetterstationsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation	21
2.3 Nutzung von Radarniederschlagsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation	23
2.3.1 Grundlagen	23
2.3.2 Validierung.....	26
2.4 Bilanzgleichung nach PASCHOLD 2002	30
2.5 Speichermodell SIMPEL	32
2.5.1 Aufbau des Modells	32
2.5.2 Eingabeparameter	34
2.5.3 Verdunstungsberechnung	36
2.6 Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle	37
2.6.1 Physiogeographische Grundlagen des Validierungsgebietes.....	37
2.6.2 Beprobungsmethodik	45
2.7 Statistische Auswertung	48
3. Ergebnisse	50
3.1 Nutzung von Radarniederschlagsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation	50
3.1.1 Vergleich der Niederschlagshöhen	52
3.1.2 Vergleich der Niederschlagsstunden	55
3.1.3 Zusammenfassung	57
3.2 Bilanzgleichung	58
3.2.1 Validierungsergebnisse nach Bodenarten	58
3.2.2 Zusammenfassung	61
3.3 Speichermodell SIMPEL	63
3.3.1 Modellberechnung	63
3.3.1.1 Validierungsergebnisse mit der Verdunstungsberechnung nach HAUDE und PENMAN für die Standorte des Jahres 2009	63
3.3.1.2 Validierungsergebnisse nach Bodenarten	63
3.3.1.3 Zusammenfassung	67
3.3.2 Standortspezifische Prognose	69
4. Diskussion	70
5. Zusammenfassung	76
III. Einfluss der Bodenfeuchte auf das Auftreten von <i>Phytophthora infestans</i> (Mont.) de Bary	79
1. Problemstellung und Ziele	79
2. Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden	80

3.	Arbeitshypothesen.....	84
4.	Material und Methoden	86
4.1	Prognosemodell SIMBLIGHT1	86
4.2	Laborversuche.....	88
4.2.1	Nachweisverfahren von <i>P. infestans</i>	88
4.2.1.1	Blattscheibentest (Biotest)	88
4.2.1.2	PCR-Nachweis (DNA-Nachweisverfahren)	89
4.2.2	Künstliche Infektion der Knollen	89
4.2.3	Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials.....	91
4.2.4	Untersuchungen zur Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials	93
4.2.5	Inkubationszeiten der Stängel	94
4.2.6	Isolation natürlich vorkommender Antagonisten – Antagonistentest	96
4.3	Freilandversuche.....	96
4.3.1	Feldversuch 2009.....	96
4.3.2	Feldversuch 2010 und 2011	97
4.4	Analysen von externen Felderhebungsdaten.....	99
4.5	Statistische Auswertung.....	100
5.	Ergebnisse.....	100
5.1	Laborversuche.....	100
5.1.1	Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials.....	100
5.1.2	Untersuchungen zur Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials	102
5.1.3	Inkubationszeiten der Stängel	103
5.1.4	Isolation natürlich vorkommender Antagonisten – Antagonistentest	105
5.2	Freilandversuche.....	105
5.2.1	Feldversuch 2009.....	105
5.2.1.1	Versuchsauswertung.....	105
5.2.1.2	Laboranalysen.....	107
5.2.2	Feldversuch 2010.....	107
5.2.2.1	Versuchsauswertung.....	107
5.2.2.2	Laboranalysen	110
5.2.3	Feldversuch 2011.....	112
5.2.3.1	Versuchsauswertung.....	112
5.2.3.2	Laboranalysen	114
5.3	Analysen von externen Felderhebungsdaten.....	114
6.	Bodenfeuchte in SIMBLIGHT1.....	117
7.	Diskussion.....	121
8.	Zusammenfassung.....	126
IV.	<i>Einfluss der Bodenfeuchte auf die Höhe des Inokulums von Fusarium spp.</i>	129
1.	Problemstellung und Ziele	129
2.	Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden	130
3.	Arbeitshypothesen.....	132
4.	Material und Methoden	134
4.1	Prognosemodell FUS-OPT.....	134
4.2	Laborversuche.....	136

4.2.1	Klimaschrankversuche zur Abtrocknung von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden.....	136
4.2.2	Untersuchungen zur Perithezienbildung auf Maisstoppeln in Bezug zur Maisstoppelfeuchte.....	139
4.2.3	Modellierung von Abtrocknungsfunktionen	140
4.2.4	Modellierung von täglichen Abtrocknungsraten	140
4.3	Statistische Auswertung.....	140
5.	Ergebnisse.....	141
5.1	Laborversuche.....	141
5.1.1	Klimaschrankversuche zur Abtrocknung von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden.....	141
5.1.2	Untersuchungen zur Perithezienbildung auf Maisstoppeln in Bezug zur Maisstoppelfeuchte.....	145
5.1.3	Modellierung von Abtrocknungsfunktionen	146
5.1.4	Modellierung von täglichen Abtrocknungsraten	150
6.	Integration eines Bodenmoduls in FUS-OPT	153
7.	Diskussion.....	159
8.	Zusammenfassung.....	165
V.	<i>Einfluss der Bodenfeuchte auf das Verhalten von Drahtwürmern.....</i>	<i>168</i>
1.	Problemstellung und Ziele	168
2.	Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden	169
3.	Arbeitshypothesen.....	171
4.	Material und Methoden	173
4.1	Laborversuche.....	173
4.2	Freilandkäfige	177
4.3	Statistische Auswertungen	180
5.	Ergebnisse.....	181
5.1	Laborversuche.....	181
5.1.1	Versuchsdaten	181
5.1.2	Modellansatz	184
5.2	Freilandkäfige	188
5.2.1	Versuchsdaten	188
5.2.2	Modellansatz	190
6.	SIMAGRIO-W – Prognose der Drahtwurmaktivität in Abhängigkeit der Temperatur und der Bodenfeuchte	194
7.	Diskussion.....	196
8.	Zusammenfassung.....	200
VI.	<i>Schlussfolgerungen und Ausblick</i>	<i>203</i>
	<i>Literatur.....</i>	<i>207</i>
	<i>Internetquellen</i>	<i>215</i>
	<i>Anhang</i>	<i>216</i>
	<i>Danksagung.....</i>	<i>219</i>
	<i>Lebenslauf.....</i>	<i>220</i>
	<i>Erklärung.....</i>	<i>221</i>

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Wetterstation.....	22
Abbildung 2: Niederschlagsituation am 24.05.2007 um 17 Uhr.....	23
Abbildung 3: Ombrometernetz in Deutschland.....	25
Abbildung 4: Schematische Darstellung der Fehlerquellen bei der Erfassung des Niederschlags.....	28
Abbildung 5: Lage der Validierungsgebiete sowie der Wetterstationen.....	29
Abbildung 6: Aufbau des Speichermodells SIMPEL.....	33
Abbildung 7: Höhe und jahreszeitlicher Verlauf des Blattflächenindexes von Winter- und Sommerweizen, Gerste, Kartoffeln sowie Zuckerrüben.....	35
Abbildung 8: Lage der Validierungsstandorte der Bodenfeuchtesimulation in Rheinland-Pfalz.....	37
Abbildung 9: Naturräumliche Gliederung von Rheinland-Pfalz basierend auf der Geographischen Landesaufnahme 1:200.000 der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumwesen (Bonn, 1952-1978) und Lage der Validierungsstandorte.....	39
Abbildung 10: Lage der Validierungsstandorte in der geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Rhein-Mosel-Raumes.....	40
Abbildung 11: Lage der Validierungsstandorte in der Übersichtskarte der Böden des Rhein-Mosel-Raumes.....	43
Abbildung 12: Lage der Validierungsstandorte in der Übersichtskarte der Klimatypen in Rheinland-Pfalz und im Saarland.....	44
Abbildung 13: Entnahme einer Bodenprobe zur Kalibrierung der Theta-Sonde.....	46
Abbildung 14: Box-Whisker-Plot (links) und Streudiagramm (rechts) der Abweichungen zwischen der gravimetrisch gemessenen Bodenfeuchte und den Messungen mit der Theta-Sonde in Vol. %.....	48
Abbildung 15: Prozentualer Anteil der Niederschlagsstunden an den Stunden des jeweiligen Monats im Verlauf von April bis Oktober 2007 in Deutschland.....	51
Abbildung 16: Box-Whisker-Plots (links) und Streudiagramm (rechts) der mittleren Abweichungen der Differenzen der Radarmesswerte abzüglich der Messwerte der Landesstationen während Niederschlagsstunden am Beispiel des Validierungsgebietes Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station].....	52
Abbildung 17: Box-Whisker-Plots (links) und Streudiagramm (rechts) der mittleren Abweichungen der Differenzen der Radarmesswerte abzüglich der Messwerte der Landesstationen während Niederschlagsstunden am Beispiel des Validierungsgebietes Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station].....	53
Abbildung 18: Maximale Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Werte der Landesstationen (mm) im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) (n=744/Station).....	55
Abbildung 19: Summe der Differenzen der Radardaten abzüglich der Werte der Landesstationen [mm] für das Validierungsgebiet Nord-Thüringen (August 2007) [n=744/Station].....	55
Abbildung 20: Prozentuale Übereinstimmung der Niederschlags- und Trockenstunden zwischen den Radolanwerten und den Daten der Landesstationen im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station].....	56
Abbildung 21: Prozentuale Übereinstimmung der Niederschlags- und Trockenstunden zwischen den Radolanwerten und den Daten der Bodenstationen im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) ab einer Niederschlagshöhe von 1 mm [n=744/Station].....	57
Abbildung 22: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit der Bilanzgleichung von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten nach Bodenarten getrennt.....	58
Abbildung 23: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart lehmiger Sand [n=56].....	59
Abbildung 24: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart stark lehmiger Sand [n=65].....	59
Abbildung 25: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart sandiger Lehm [n=116].....	60
Abbildung 26: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart Lehm [n=95].....	60
Abbildung 27: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart Schluff [n=99].....	61
Abbildung 28: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit der Bilanzgleichung von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten [n=431].....	62

Abbildung 29: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten [n=431].....	62
Abbildung 30: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den gravimetrischen Bodenfeuchtemessungen [n=70].....	63
Abbildung 31: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten nach Bodenarten getrennt.....	64
Abbildung 32: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart lehmiger Sand [n=56].....	65
Abbildung 33: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart stark lehmiger Sand [n=65].....	65
Abbildung 34: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart sandiger Lehm [n=116].....	66
Abbildung 35: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart Lehm [n=95].....	66
Abbildung 36: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart Schluff [n=99].....	67
Abbildung 37: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten [n=431].....	68
Abbildung 38: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten [n=431].....	68
Abbildung 39: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten der Validierungsstandorte der Jahre 2010 und 2011 mit der Datenbasis der Wetterdaten von den Wetterstationen bzw. den interpolierten Wetterdaten und den Radarniederschlagsdaten [n=357].....	69
Abbildung 40: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten auf Basis der Datengrundlage der interpolierten Werte und der Radardaten [n=357].....	70
Abbildung 41: Entwicklungszyklus von <i>P. infestans</i>	83
Abbildung 42: Lebenszyklus der Pilze.....	84
Abbildung 43: Pilzzyklus von <i>P. infestans</i> von latent befallenem Pflanzgut bis zum Erstaufreten.....	84
Abbildung 44: Strukturdiagramm von SIMBLIGHT1.....	86
Abbildung 45: Beispiel des Entwicklungsverlaufs des Phytophthora-Index des Prognosemodells SIMBLIGHT1.....	88
Abbildung 46: Fangmethode von Sporen von <i>P. infestans</i> im Wasser (links); Inkubation der Blattscheiben in feuchter Kammer (rechts).....	89
Abbildung 47: Knolleninfektion mit <i>P. infestans</i>	90
Abbildung 48: Künstlich mit <i>P. infestans</i> infizierte Kartoffelknollen.....	91
Abbildung 49: Dreieck der Bodenarten und ausgewählte Bodenarten der Becherglasversuche zur Bestimmung der Dauer des Vorgangs der Sporenkeimung bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials.....	92
Abbildung 50: Bodenstruktur der sterilen (autoklavierten) und der unsterilen Variante der Bodenart schwach toniger Lehm nach Wasserzugabe des Versuches vom 19. Juli 2010.....	93
Abbildung 51: Versuchsaufbau der 24 °C Varianten des Knollenversuchs.....	94
Abbildung 52: Künstliche Infektion der Keime in einer Sporensuspension von <i>P. infestans</i>	95
Abbildung 53: Inkubation der infizierten Keime bei unterschiedlichen Temperaturstufen in feuchter Kammer.....	95
Abbildung 54: Versuchsanlage des Freilandversuchs 2009 (links); gekeimte Knollen in einem Pflanzloch mit Doppelpflanzverfahren (rechts).....	97
Abbildung 55: Anordnung der Knollen bei dem Doppelpflanzverfahren des Freilandversuchs in 2010 und 2011.....	98
Abbildung 56: Situation im Freilandversuch in 2010 während der Bewässerung (Staunässe und Splash-Effekte wurden erzielt).....	99
Abbildung 57: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 09.06.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (steril) im Klimaschrank bei 12 °C.....	101
Abbildung 58: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 19.07.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (unsteril), schwach toniger Lehm (unsteril) und schwach toniger Lehm (steril) im Klimaschrank bei 15 °C.....	101
Abbildung 59: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 16.08.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (steril), schwach toniger Lehm (steril) und mittel toniger Schluff (steril) im Klimaschrank bei 15 °C.....	102
Abbildung 60: Anzahl der infizierten Keime nach Tagen nach der Inokulation.....	104

Abbildung 61: Vergleich der täglichen Raten der Inkubationszeit von <i>P. infestans</i> an Blättern (CROSIER 1934 und MIZUBUTI 1998) mit denen an Keimen (Boniturwerte)	104
Abbildung 62: Aufnahme des Antagonistentest nach vier Tagen – rechts auf jeder Agarplatte Myzel von <i>P. infestans</i> mit den jeweils unterschiedlichen Antagonisten auf der linken Seite der einzelnen Platten.....	105
Abbildung 63: Porengrößenverteilung im Freilandversuch 2009 und Ableitung des Infektionsschwellenwertes aus wöchentlichen Probenahmen.....	106
Abbildung 64: Infektionsschwellen und Bodenfeuchten der unbewässerten Parzelle (VP_0), der zwei Tage bewässerten Parzelle (VP_2), der vier Tage bewässerten Parzelle (VP_4) und der acht Tage bewässerten Parzelle (VP_8).....	107
Abbildung 65: Darstellung des Bodenfeuchteverlaufs der unterschiedlichen Versuchspartzen des Freilandversuchs in 2010.....	108
Abbildung 66: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität von Pflanzung bis sieben Tage nach Auflauf und Anteil latent befallener Stängel [%] des Freilandversuches im Jahr 2010.....	111
Abbildung 67: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität im Untersuchungszeitraum und Anteil latent befallener Stängel [%] des Freilandversuches im Jahr 2010.....	111
Abbildung 68: Darstellung des Bodenfeuchteverlaufs der unterschiedlichen Parzellen des Freilandversuchs in 2011.....	113
Abbildung 69: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Gütersloh 2007.....	115
Abbildung 70: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Winnigen 2007.....	115
Abbildung 71: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Gütersloh 2008.....	116
Abbildung 72: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität zwischen Pflanzung und 7 Tagen nach Auflauf und Tage Auflauf bis Erstbefall der untersuchten Standorte der Jahre 2002 bis 2008 [n=21].....	116
Abbildung 73: Anteil rechtzeitiger Prognosen von SIMBLIGHT1 in den Jahren 2006 bis 2011.....	117
Abbildung 74: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte der Jahre 2006 bis 2011 [n=143].....	118
Abbildung 75: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit niedriger Bodenfeuchte der Jahre 2006 bis 2011 [n=143].....	118
Abbildung 76: Darstellung der Varianz des Erstauftretens von <i>P. infestans</i> anhand der Monitoring-Daten der Jahre 2006 bis 2010 unterteilt in vier Kategorien und die sich aus dem Tukey-Test ergebenden signifikant unterschiedlichen Gruppen [n=510].....	119
Abbildung 77: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit unterschiedlichen Startwerten der Jahre 2006 bis 2011 [n=143].....	120
Abbildung 78: Box-Whisker-Plots der Abweichungen der Modellergebnisse vom tatsächlichen Erstauftreten in Tagen der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit unterschiedlichen Startwerten der Jahre 2006 bis 2011 [n=143].....	121
Abbildung 79: Relative Häufigkeiten von Proben mit kritischen DON-Werten in Abhängigkeit von Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Jahr.....	129
Abbildung 80: Entwicklungszyklus von <i>F. graminearum</i> bei Weizen.....	131
Abbildung 81: Relative Anfälligkeit der Weizenpflanzen in Abhängigkeit vom erreichten Entwicklungsstadium (BBCH).....	132
Abbildung 82: Zeitraum zur Ausbildung von Myzel und Perithezien in Bezug zur Regenmenge und Abtrocknung.....	133
Abbildung 83: Strukturdiagramm der Prozesse im Modell FUS-OPT.....	135
Abbildung 84: Feldsituation in einem Maisschlag nach Beerntung und Bodenbearbeitung (Oktober 2009).....	136
Abbildung 85: Getreideschlag im März 2010 mit Vorfrucht Mais.....	137
Abbildung 86: Dreieck der Bodenarten und ausgewählte Bodenarten der Klimaschrankversuche zur Abtrocknung der Maisstoppeln auf unterschiedlichen Bodenarten.....	138
Abbildung 87: Aufsättigung der Bodentöpfe bis zur maximalen Wasserkapazität (links) und anschließende Entwässerung der überkapillaren Hohlräume (rechts).....	138
Abbildung 88: Aufbau der Versuche zum Einfluss der Bodenfeuchte auf die Maisstoppelabtrocknung.....	139
Abbildung 89: Boxplots des relativen Wassergehaltes der Maisstoppeln in Prozent bei permanentem und kurzzeitig, während des Wiegens unterbrochenem Bodenkontakt [n=15].....	141

Abbildung 90: Boxplots der Varianz der Wassergehalte der Maisstoppeln in Prozent am Beispiel der Temperaturstufe 10 °C auf Boden der Sandgruppe bezogen auf die Tage nach Versuchsstart [n=20].....	142
Abbildung 91: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln und der entsprechenden mittleren Wassergehalte der Maisstoppeln auf Quarzsand bei 20 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20].....	145
Abbildung 92: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf den Böden der Bodenartenhauptgruppen Sand, Schluff und Ton und der entsprechende mittlere Wassergehalt der Maisstoppeln bei 25 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20].....	146
Abbildung 93: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf den Böden der Bodenartenhauptgruppen Sand, Schluff und Ton und der entsprechende mittlere Wassergehalt der Maisstoppeln bei 25 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20].....	146
Abbildung 94: Streudiagramm der mittleren Boniturwerte der Wassergehalte der Maisstoppeln gegenüber den stündlichen Temperatursummen (Sandgruppe/10°C) und die daraus modellierte Abtrocknungsfunktion	147
Abbildung 95: Vergleich der Steigungsparameter b der modellierten exponentialen Abtrocknungsfunktionen der Versuche bei 96 % relativer Luftfeuchte und 10 °C bzw. 25 °C	148
Abbildung 96: Vergleich der Abtrocknungsfunktionen am Beispiel des Bodens der Bodenartenhauptgruppe Sand bei 96 % relativer Luftfeuchte und 10 °C bzw. 25 °C – die Linie verdeutlicht den nahezu identischen Wassergehalt der Maisstoppeln bei erreichter Temperatursumme von 2.000 °C.....	149
Abbildung 97: Vergleich der Mittelwerte der Steigungsparameter b der gruppierten Luftfeuchtevarianten der modellierten exponentialen Abtrocknungsfunktionen nach Bodenartenhauptgruppen.....	150
Abbildung 98: Funktionen der linearen Regressionen der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln bezogen auf die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte nach Bodenartenhauptgruppen.....	153
Abbildung 99: Bisheriges Strukturdiagramm des Prognosemodells FUS-OPT – die Integration von Bodenparametern ergeben Veränderungen im rot markierten Bereich.....	154
Abbildung 100: Korrelation des aufsummierten modellierten Infektionspotentials vom 01.10. bis zum 30.04. mit der Summe der gefangenen Sporen im gesamten Boniturzeitraum und die daraus berechnete Exponentialfunktion.....	157
Abbildung 101: Validierungsschema der Einordnung der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30. April hinsichtlich der Überschreitung des kritischen Wertes von 0,1076 im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechneten Einordnung [n=14].....	158
Abbildung 102: Validierungsergebnis der Einordnung der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30.04. hinsichtlich des Risikos zur Überschreitung der kritischen Sporenkonzentrationen im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechneten Einordnung [n=14].....	159
Abbildung 103: Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung bei unterschiedlichen Bodenarten	162
Abbildung 104: Entwicklungszyklus der Schnellkäfer nach Jahren bzw. Monaten.....	170
Abbildung 105: Vertikale Wanderung von <i>A. ustulatus</i> über eine Periode von zwei Jahren	172
Abbildung 106: Dreieck der Bodenarten und ausgewählte Bodenarten der Rohrversuche zum Verhalten der Drahtwürmer in Bezug zur Bodenfeuchte und zur Bodenart.....	173
Abbildung 107: Sättigung der Bodensäulen bis zur maximalen Wasserkapazität.....	175
Abbildung 108: Einsetzen von 20 Drahtwürmern in die Bodenrohre (links) und Abtrocknung der Rohre zur Erzeugung eines Feuchtegradientens (rechts).....	175
Abbildung 109: Verfahren der Zerteilung in die einzelnen Rohrsegmente.....	177
Abbildung 110: Anlage der unterirdischen Käfigteile	178
Abbildung 111: Fertiggestellte Versuchsanlage	178
Abbildung 112: Einschlämmung der Watermarkensensoren und Position der Sensoren innerhalb des Messkäfigs.....	179
Abbildung 113: Drahtwurmfallen der Freilandkäfige.....	180
Abbildung 114: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurm-vorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart mittel lehmiger Sand [n=30]	181
Abbildung 115: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurm-vorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart stark sandiger Lehm [n=30]	182

Abbildung 116: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart schluffiger Lehm [n=45].....	182
Abbildung 117: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart mittel schluffiger Ton [n=45]	183
Abbildung 118: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart mittel lehmiger Sand	185
Abbildung 119: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart stark sandiger Lehm	186
Abbildung 120: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart schluffiger Lehm	186
Abbildung 121: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart mittel schluffiger Ton.....	187
Abbildung 122: Modellansätze der Prognose des Drahtwurmorkommens in Abhängigkeit der maximalen Wasserkapazität und der Bodenart	188
Abbildung 123: Drahtwurmauftreten in den Fallen sowie Messwerte der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte über einen Zeitraum von 2,5 Jahren.....	189
Abbildung 124: Box-Whisker-Plots der Differenzen der gemessenen Bodenfeuchte zwischen 15 und 80 cm Bodentiefe in der ersten bzw. der zweiten Jahreshälfte	189
Abbildung 125: Boniturdaten der Drahtwurmkäfige mit der daraus abgeleiteten Funktion zur Prognose einer Drahtwurmaktivität in der Fraßzone in der 1. Jahreshälfte [n=72]	192
Abbildung 126: Schnittfläche der Klasseneinteilung beim Vorkommen von 10 % der relativen aktiven Drahtwürmer in der Fraßzone – in Klasse 0 findet keine bzw. eine niedrige Aktivität in der Fraßzone statt, in Klasse 1 wird eine hohe Aktivität von Drahtwürmern in der Fraßzone prognostiziert	193
Abbildung 127: Validierung des Modellansatzes zur Prognose über eine Drahtwurmaktivität in der Fraßzone (Klasse 1) bzw. keiner Aktivität (Klasse 0).....	194
Abbildung 128: SIMAGRIO-W – Ablaufdiagramm der möglichen Drahtwurmprognose	195

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Gruppen der unterschiedlichen Ansätze der Bodenwasserhaushaltsmodelle und benötigte Eingabeparameter	19
Tabelle 2: Vergleich verschiedener Modellansätze zum Bodenwasser hinsichtlich Prozesse, Eingabeparameter und Anwendbarkeit	20
Tabelle 3: Validierungsgebiete und Anzahl der Wetterstationen	29
Tabelle 4: kc-Werte nach PASCHOLD (1992) nach Kultur und Entwicklungsstadium	30
Tabelle 5: Liste der Validierungsstandorte der Jahre 2009 bis 2011.....	38
Tabelle 6: Monatliche Statistik über die Regenstunden des Validierungszeitraums	50
Tabelle 7: Ergebnisse der Validierung in den Validierungsgebieten im Monat Mai	54
Tabelle 8: Ergebnisse der Validierung in den Validierungsgebieten im Monat August	54
Tabelle 9: statistische Validierung der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Bilanzgleichung nach Bodenarten	61
Tabelle 10: statistische Validierung der Bodenfeuchtesimulation mit SIMPEL nach Bodenarten.....	67
Tabelle 11: Charakteristika der Porengrößenklassen.....	81
Tabelle 12: Höhe des dimensionslosen hypothetisch angenommenen Initialbefalls in SIMBLIGHT1 der unterschiedlichen Klassenkombinationen aus Anbaudichte und Bodenfeuchte	87
Tabelle 13: Varianten der Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials	91
Tabelle 14: Varianten des Becherglasversuches zur Untersuchung der Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials	94
Tabelle 15: Beschreibung der Versuchspartellen der Freilandversuche in 2010 und 2011.....	98
Tabelle 16: Beschreibung und Ergebnisse der Versuchsglieder des Knollenversuchs	103
Tabelle 17: Tage über Feldkapazität und Anteile latent befallener Stängel in den unterschiedlichen Varianten des Freilandversuches 2010	110
Tabelle 18: Tage über Feldkapazität und Anteile latent befallener Stängel in den unterschiedlichen Varianten des Freilandversuches 2011	114
Tabelle 19: Ergebnis des Tukey-Tests - Analyse der Unterschiede zwischen den Kategorien mit einem 95% Konfidenzintervall (grau unterlegt: gleiche Kategorie der Anbaudichte und unterschiedliche Kategorie der Bodenfeuchte, sodass nur die Signifikanz des Einflusses der Bodenfeuchte überprüft ist).....	119
Tabelle 20: Tabelle der Höhen des hypothetischen Initialbefalls bei unterschiedlicher Bewertung des Einflusses der Bodenfeuchte in der Prognoseberechnung des Spritzstarts gegen <i>P. infestans</i> mit dem Modell SIMBLIGHT1	120
Tabelle 21: Temperatur- und Luftfeuchtevarianten der durchgeführten Klimaschrankversuche zur Abtrocknung der Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden.....	139
Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 5 °C und 57 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	142
Tabelle 23: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 10 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	143
Tabelle 24: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 18 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	143
Tabelle 25: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 20 °C und 79 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	143
Tabelle 26: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 20 °C und 83 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	144
Tabelle 27: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 25 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	144
Tabelle 28: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 25 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart].....	144

Tabelle 29: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf Quarzsand und Petrischalen nach Boniturtagen bei 20 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Variante].....	145
Tabelle 30: Vergleich der Steigungsparameter b der modellierten abnehmenden exponentialen Abtrocknungsfunktion bezogen auf die stündliche Temperatur- bzw. Luftfeuchtesumme	148
Tabelle 31: Vergleich der tägliche Abtrocknungsraten der Maisstoppeln der unterschiedlichen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten bis zur Unterschreitung des zur Perithezienbildung benötigten Wassergehaltes der.....	151
Tabelle 32: Parameter der linearen Regressionen zur Modellierung der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln auf verschiedenen Bodenarten	151
Tabelle 33: Parameter der Varianzanalyse der linearen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) nach Bodenarten	152
Tabelle 34: Validierungsergebnisse der durchgeführten linearen Regression der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des modellierten Infektionspotentials	156
Tabelle 35: prozentualer Anteil an der Feldkapazität bei unterschiedlichen charakteristischen pF-Werten der untersuchten Böden.....	174
Tabelle 36: Varianten der Rohrversuche zur Charakterisierung des Einflusses der Bodenfeuchte und der Bodenart auf den Aufenthaltsort der unterschiedlichen Drahtwurmartentypen	176
Tabelle 37: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in der Bodenart mittel lehmiger Sand - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %.....	183
Tabelle 38: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in der Bodenart stark sandiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %.....	184
Tabelle 39: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in der Bodenart schluffiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %	184
Tabelle 40: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in der Bodenart mittel schluffiger Ton - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %.....	184
Tabelle 41: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Kultur (ja/nein) auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in der Bodenart schluffiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %	184
Tabelle 42: Ergebnis des Tukey-Tests zum Einfluss der Kultur (mit/ohne) auf die Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in Bezug zur max. Wasserkapazität (%) - Analyse der Unterschied zwischen den Kategorien mit einem Konfidenzintervall von 95 %.....	184
Tabelle 43: Parameter der Varianzanalyse der logistischen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) nach Bodenarten	187
Tabelle 44: Parameter der logistischen Modellfunktionen zur Prognose der Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in Abhängigkeit der max. Wasserkapazität (%) für vier verschiedene Bodenarten	187
Tabelle 45: Parameter der nicht-linearen Regressionen zur Prognose des prozentualen Anteils aktiver Drahtwürmer in der ersten und zweiten Jahreshälfte	191
Tabelle 46: Parameter der Varianzanalyse der nicht-linearen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) für den Modellansatz zur Prognose aktiver Drahtwürmer in der ersten und der zweiten Jahreshälfte	191

I. Einleitung

Die Bekämpfung von Pflanzenkrankheiten und Schädlingen soll in der landwirtschaftlichen und gartenbaulichen Praxis nach dem Prinzip des integrierten Pflanzenschutzes erfolgen. Dieser umfasst die Auswahl geeigneter Standorte, die sachgerechte Bodenbearbeitung, die Wahl des geeigneten Saat- bzw. Pflanztermins sowie die Verwendung von gesundem Saat- und Pflanzgut einer gegenüber den vorherrschenden Schadorganismen widerstandsfähigen Sorte. In Kombination zu diesen Maßnahmen soll die Terminierung von Befallskontrollen und der Einsatz von biologischen Pflanzenschutzverfahren sowie von gezielten chemischen Pflanzenschutzmittelanwendungen, welche an Bekämpfungsschwellen zu orientieren sind, mithilfe von Prognosemodellen erfolgen. Dadurch soll die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln auf ein minimales Maß beschränkt werden (HEITEFUß 2000; KLEINHENZ und ROßBERG 2000).

Prognosemodelle basieren auf der Wechselwirkung zwischen Erreger, Wirt, Umweltfaktoren und menschlichen Eingriffen. Die Erforschung der zugrunde liegenden Wechselwirkungen waren Voraussetzungen für die Modellierung von Befallsverläufen und damit für die Entwicklung von Prognosemodellen (KRANZ 1996). Können Zusammenhänge zwischen dem Befallsverlauf einer Krankheit und dem Verlauf der Witterung ermittelt werden, lassen sich im Umkehrschluss Befallsverläufe aus vorherrschenden Wetterbedingungen ableiten (KRANZ 1996). Aus Freilandbeobachtungen und speziell angelegten Versuchen können relevante Beziehungen zwischen dem Erreger, dem Wirt, der Umweltfaktoren und den menschlichen Eingriffen ermittelt und in mathematische Beziehungen übertragen werden (KRANZ 1996).

Bei der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) werden Prognosemodelle für landwirtschaftliche und gartenbauliche Schaderreger gesammelt, geprüft und für den Einsatz in die Praxis weiterentwickelt sowie Prognosemodelle zu bisher nicht betrachteten Schaderregern erarbeitet (KLEINHENZ und ROßBERG 2000, www.zepp.info). Seit 1997 sind bei der ZEPP über 30 wetterbasierte Prognosemodelle für Schädlinge und Krankheiten erfolgreich entwickelt und validiert worden. Die Prognoseinformationen werden den Landwirten und Gartenbauern von den Pflanzenschutzdiensten der Länder zur Verfügung gestellt (www.zepp.info). Zusätzlich stehen Prognoseinformationen über das Internetportal www.isip.de bereit.

Die bei der ZEPP genutzten Prognosemodelle benötigen als Inputparameter aktuelle Wetterdaten sowie Schlagdaten, um aus diesen Daten das charakteristische Verhalten verschiedener Schaderreger modellieren zu können. Dabei kann davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit der Prognosemodelle zunimmt, je genauer die Inputwerte gemessen werden können. Insbesondere die Bodenfeuchte, welche bei vielen Schaderregern als befallsfördernder bzw. -auslösender Faktor erkannt wurde, findet bei der Prognose nur wenig Anwendung, da über den genauen Einfluss der Bodenparameter Bodenfeuchte und Bodenart noch Unklarheit herrscht und diese Daten in

Deutschland nicht flächendeckend zur Verfügung stehen (KLEINHENZ et. al 2007, BÄBLER 2005). Erwiesen ist aber, dass die Bodenfeuchte und die Bodenart neben meteorologischen Größen wie der relativen Luftfeuchte und der Temperatur ebenfalls einen Einfluss auf das Auftreten von Pflanzenkrankheiten haben. Ziel dieser Arbeit war es, diese beiden Faktoren zur Prognose ausgewählter Schaderreger in die Prognosemodelle der ZEPP zu integrieren. Durch die damit mögliche Verbesserung der Prognosemodelle kann die Terminierung der Pflanzenschutzmitteleinsätze weiter optimiert und somit eine Reduzierung vorbeugender Pflanzenschutzmittelanwendungen erreicht werden. Dies wird letztlich zu einer Verminderung der Umweltbelastung beitragen.

Als entscheidende Vereinfachung ist dabei zu bewerten, dass die Bodenfeuchtwerte, die in die Schaderregermodelle eingehen werden, nicht punktuell an einzelnen Wetterstationen oder auf der landwirtschaftlichen Produktionsfläche gemessen werden müssen. Sie sollen auf der Basis von Bodendaten und aktuellen Wetterdaten simuliert werden. Als Inputparameter sollen die vom Deutschen Wetterdienst (DWD) mit dem System RADOLAN mittels Radar und Ombrometern gemessenen Niederschläge und zwischen den Wetterstationen interpolierte Werte der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (ZEUNER 2007) genutzt werden. Damit stehen diese drei Eingangsparameter bundesweit in einem Raster von einem Quadratkilometer zur Verfügung, ohne dass teure Messnetze errichtet werden müssen.

Um die Integration der Bodenfeuchte in der Schaderregerprognose zu ermöglichen, wurden Untersuchungen durchgeführt, die eine genauere Charakterisierung ihres Einflusses auf die Schaderreger zum Ziel hatten. Für genauere Untersuchungen wurden die drei Schaderreger *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, *Fusarium graminearum* Schwabe bzw. *F. culmorum* (W.G. Smith) Saccardo und die Larven der wichtigsten Elateridenarten *Agriotes lineatus* Linnaeus, *A. obscurus* Linnaeus, *A. sputator* Linnaeus, *A. sordidus* Illiger sowie *A. ustulatus* Schaller (im weiteren als Drahtwürmer zusammengefasst) herangezogen.

Methoden der Geographie und der Agrarwissenschaften sind daher in dieser Arbeit eng miteinander verknüpft, wobei die Teildisziplinen Bodengeographie und Klimageographie im Zusammenhang mit phytomedizinischen Prozessen im Boden und an den Pflanzen relevant sind. „Die Phytomedizin befasst sich mit der Erforschung aller (abiotischen und biotischen) Schadfaktoren, die zu Beschädigungen an Pflanzen führen und entwickelt Maßnahmen zum vorbeugenden oder therapeutischen Schutz der Pflanzen vor solchen Einwirkungen“ (HALLMANN, QUADT-HALLMANN und von TIEDEMANN 2007). Über die abiotischen Faktoren, insbesondere Witterungseinflüsse und Bodenbedingungen, bestehen direkte Wechselwirkungen zwischen Forschungsfeldern der Geographie und den Agrarwissenschaften. Daraus resultierte die Interdisziplinarität der Arbeitsschritte dieser Forschungsarbeit.

II. Bodenfeuchtesimulation

1. Einleitung

Zur Integration von Bodenmodulen in die Schaderregermodelle spielt, neben den Kenntnissen über den Verbleib, die Übertragbarkeit und das Verhalten von Schaderregern, die flächendeckende Bestimmung bzw. Regionalisierung der Bodenfeuchte eine grundlegende Rolle. Anders als bei den meisten Klimaparametern wie zum Beispiel Niederschlag, relative Luftfeuchte oder Temperatur, welche in die Schaderregerprognosemodelle eingehen, gibt es aufgrund der aufwendigen und problematischen Messung der Bodenfeuchte keine flächendeckenden Informationen mithilfe von Messstationen. Vom Deutschen Wetterdienst (DWD) werden simulierte Bodenfeuchtwerte für die Bodenarten sandiger Lehm und lehmiger Sand unter Gras ausgegeben (www.dwd.de/agrarwetter 2011). Ein Problem von punktuellen Bodenfeuchtemessungen bzw. flächendeckenden Simulationen der Bodenfeuchte ist zusätzlich, dass der Bodenwassergehalt entscheidend von der jeweilig vorherrschenden Bodenart bestimmt wird. Deutschland weist ein kleinräumlich stark differenziertes Verbreitungsmuster der Bodenarten auf, das nach BILLWITZ (1997) vor allem aus der großen Bedeutung der „lithologischen Eigenschaften des Ausgangsmaterials für die Bodenbildung“ und der kleinräumig differenzierten Verbreitung dieser Ausgangssubstrate resultiert.

Bodendaten liegen in Deutschland bis auf wenige Ausnahmen bis zum Maßstab 1:200.000 vor. In Zusammenarbeit mit den staatlichen Geologischen Diensten der Länder ist bei der Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe (BGR) eine Flächendatenbank für die bundesweite Bodenübersichtskarte 1:200.000 (BÜK 200) eingerichtet. Diese Datenbank ist Grundlage für den Aufbau eines bundesweit einheitlichen bodenkundlichen Flächendatenbestandes. Die Daten der BÜK 200 bilden die bedeutendste flächendeckende Informationsgrundlage für Bodennutzung und Bodenschutz (BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 2008). Daten im Bereich von 1:25.000 stehen meist zusätzlich in den einzelnen Bundesländern zur Verfügung. Die Erarbeitung von Karten in großräumigerem Maßstab ist mit herkömmlichen Feldmethoden sehr aufwendig. Für standortspezifische Fragestellungen des Boden-, Wasser- und Naturschutzes sowie der Standortbewertung wäre allerdings eine großmaßstäbige digitale Kartengrundlage über die Bodeneigenschaften und -funktionen im Maßstab 1:5.000 ideal. Seit den dreißiger Jahren des 20. Jahrhunderts wurden im landwirtschaftlichen Bereich durch die Finanzverwaltung Bodenschätzungsdaten erhoben und in der Regel im Liegenschaftskataster in analoger Form in Büchern und Karten aufbewahrt. Diese Daten werden nach und nach in den einzelnen Bundesländern digitalisiert. Das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-Pfalz hat in Zusammenarbeit mit Hessen aus den Bodenschätzungsdaten eine Methode zur Bildung von Ableitungen entwickelt, mit der Karten im Maßstab 1:5.000 für große Teile von Rheinland-Pfalz und Hessen bereits erstellt wurden. Hierbei sind verschiedene thematische Karten entwickelt worden, zum Beispiel zur Feldkapazität, nutzbaren Feldkapazität, Durchwurzelbarkeit, etc. (LANDESAMT FÜR

GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2008). Ähnliche Entwicklungen bestehen auch in weiteren Bundesländern, wodurch mit einem zukünftigen Ausbau von Karten im Maßstab 1:5.000 zu rechnen ist. Als Grundlage für die flächendeckende Modellierung der Bodenfeuchte sind Daten in dieser Auflösung ideal.

Die Integration von im Gelände gemessenen Werten der Bodenfeuchte als Inputparameter in die Schaderregermodelle ist nicht flächendeckend umsetzbar. Der aufwendigen gravimetrischen Bestimmung der Bodenfeuchte stehen die Messungen mittels TDR-Sonde (Time Domain Reflectometry)/FDR-Sonde (Frequency-Domain-Response), Gipsblock, Watermark oder Tensiometer gegenüber (DIETRICH und SCHÖNIGER 2003). Alle Messmethoden haben den Nachteil, dass sich punktuelle Messwerte ergeben, die Bodenfeuchte jedoch über eine landwirtschaftlich einheitlich genutzte Fläche deutlich variieren kann. Um einen repräsentativen Wert zu ermitteln, müssten daher an allen Standorten mehrfache Wiederholungen durchgeführt werden. Alle Möglichkeiten sind aufwendig und je nach Heterogenität der Fläche nur für die unmittelbare Umgebung des Messpunktes repräsentativ. Aus diesen Gründen ist ein Ziel dieser Arbeit, die flächendeckende Simulation der Bodenfeuchte zu erproben und zu validieren sowie diese Daten in die Schaderregerprognose zu integrieren.

2. Material und Methoden

2.1 Überblick Bodenfeuchtesimulationsmodelle

Eine alternative Methode zur Nutzung von Messwerten der Bodenfeuchte in der Schaderregerprognose ist die Berechnung mittels Simulationsmodellen. Eine Literaturrecherche hierzu ergab, dass für die Berechnung der Bodenwasserflüsse als unterschiedliche Verfahren die klimatische Wasserbilanz, Speichermodelle oder Richards-Modelle zur Anwendung kommen.

„Die Versickerung von Niederschlägen in den ungesättigten Boden oder oberflächennahen Untergrund ist Teil des Wasserkreislaufs auf der Erde, unter dem laut DIN 4049 eine „ständige Folge der Zustands- und Ortsveränderung des Wassers“ in Form von Niederschlägen, Abfluss und Verdunstung zu verstehen ist“ (MENSE-STEFAN 2005). Nur ein Teil der Wassermassen der Erde nimmt ständig am Wasserkreislauf teil. Die beteiligten Wassermassen kommen wechselweise in verschiedenen Aggregatzuständen vor, sodass sie sich in einem Wechselspiel zwischen Verdunstung, Niederschlag und Abfluss befinden. Durch Verdunstung gelangt das Wasser aus dem Meer in die Atmosphäre. Dort besteht die Möglichkeit, dass es mittels Luftströmen über den Kontinent verfrachtet wird und an das Land abgegeben werden kann. Bei Betrachtung des Wasserkreislauf zeigt sich, dass er auf dem Festland im Wesentlichen durch die Wasserhaushaltsgrößen Niederschlag, Verdunstung und Abfluss bestimmt wird ($\text{Niederschlag} = \text{Verdunstung} + \text{Abfluss}$). Ein Teil des Niederschlags wird als Rücklage

im Boden gespeichert, bevor es über die Evapotranspiration wieder an die Atmosphäre zurückgegeben wird (MARCINEK 1997).

Ein großer Teil der Bodenfeuchtesimulationsmodelle beruht auf der genannten hydrologischen Grundgleichung. Diese bildet die Zusammenhänge des Wasserkreislaufes auf der Erde vereinfacht ab. „Bilanzmodelle des Bodenwasserhaushaltes betrachten dabei die ungesättigte Bodenzone häufig als einen Gesamtkomplex (Black- oder Grey-Box-Prinzip), der nicht weiter unterteilt wird. Sie unterscheiden sich in ihrer Komplexität, d.h. in der Berücksichtigung der hydrologischen Prozesse, in ihrer Wahl der Eingangsparameter sowie nach ihrer zeitlichen und räumlichen Auflösung“ (MENSE-STEFAN 2005). Die in der Literatur beschriebenen Modelle lassen sich nach den in Tabelle 1 untergliederten Ansätzen unterteilen.

Tabelle 1: Gruppen der unterschiedlichen Ansätze der Bodenwasserhaushaltsmodelle und benötigte Eingabeparameter (verändert nach: HÖRMANN et al. 2003)

	klimatische Wasserbilanz	Speichermodelle	Richards-Modelle
Niederschlag	x	x	x
Evapotranspiration	x	x	x
Wasserretentionsfunktion (pF-Kurve)		x ¹	x
Leitfähigkeitsfunktion			x
Wurzelverteilung		x ²	x

¹ nur einzelne Werte der Wasserretentionsfunktion benötigt (z.B. Feldkapazität, permanenter Welkepunkt)

² bei Ein-Schicht-Speichermodellen nur effektive Wurzeltiefe

Bei der Berechnung der Bodenwasserflüsse mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz wird versucht, die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufs mengenmäßig zu erfassen, um unbekannte Größen über mathematische Beziehungen berechnen zu können. Die Berechnung des Bodenwassers über die klimatische Wasserbilanz lässt sich weiterhin in einfache empirisch-mathematische Ansätze, z.B. von RENGER und STREBEL (1980) oder SCHRÖDER und WYRWICH (1990), und komplexere Bilanzmodelle, z.B. von GROSSMANN (1998), untergliedern. Während die einfache empirisch-mathematische Bilanzgleichung die Versickerung anhand einfacher korrelativer Beziehungen zwischen den einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufs ableitet, häufig langjährige Monats- oder Jahresmittel in die Berechnung eingehen und die Evapotranspiration als potenzielle Verdunstung eingegeben wird, nutzen komplexere Bilanzmodelle höhere räumliche und zeitliche Eingangsparameter. Oft erfolgt hierbei eine stärkere Differenzierung der Eingangsparameter zur Charakterisierung des Bodens, der Vegetation und der Landnutzung (MENSE-STEFAN 2005). Die Berechnungen über einfache empirisch-mathematische Beziehungen eignen sich damit nur für längere Zeiträume und unter der Voraussetzung, dass keine Einschränkung der Verdunstung auftritt.

In Computermodellen erfolgt die Berechnung des Bodenwasserhaushalts mit zwei Verfahren: mit Speichermodellen und der Darcy/Richards-Gleichung (RICHARDS 1931) (Tabelle 1). Hierfür werden unterschiedliche Eingangsparameter benötigt (Tabelle 1 und Tabelle 2). In Speichermodellen wird der

Bodenwasserfluss durch einen oder mehrere Speicher repräsentiert, wobei die Speicherkapazität durch die nutzbare Feldkapazität parametrisiert wird. Der Speicher wird durch Niederschlag bzw. Zufluss aus dem darüberliegenden Speicher gefüllt und durch Evapotranspiration oder Ausfluss in den folgenden Speicher entleert (HÖRMANN 1998). Bei der Simulation des Bodenwassergehalts mit Hilfe der Richards-Modelle wird über numerische Lösungsverfahren eine exakte Nachbildung der physikalischen Prozesse angestrebt (MENSE-STEUFAN 2005). Im Vergleich zu den anderen Modelltypen sind Richards-Modelle stärker prozessorientiert und haben höhere Anforderungen an die Eingangsparameter. In die Richards-Modelle LISEM (JETTEN 2002), SWAP (van DAM et al. 1997) und WHNSIM (HUWE 1992) gehen die Parameter Textur, Humusgehalt und Lagerungsdichte bzw. Wasserretentionsfunktion und hydraulische Leitfähigkeitsfunktion ein.

Tabelle 2: Vergleich verschiedener Modellansätze zum Bodenwasser hinsichtlich Prozesse, Eingabeparameter und Anwendbarkeit

Modellansätze Eigenschaften	Bewässerungsservice RLP (PASCHOLD 2002)	SIMPEL (HÖRMANN 1998)	GROSS-MANN (1998)	WAVES (TREPL 2000)	LISEM (JETTEN 2002)	SWAP (van DAM et al. 1997)	WHNSIM (HUWE 1992)
Konzept	Bilanzgleichung	Speichermodell	Bilanzgleichung	Speichermodell	Richards-Gleichung	Richards-Gleichung	Richards-Gleichung
Programmiersprache		MS-Excel	MS-Excel	dBase	PCRaster	FORTTRAN	FORTTRAN
Eingangsparameter	LT, rF, W, GS, VS, Kc-Wert, Nd.	LT, rF, W, GS, Nd., LAI, boden-phys. Parameter	Nd.+ETr, nFK, Zwe, ETf, Ief, nWmin, Kultur, Reliefenergie, Bodengruppe	LT, rF, W, GS, Nd., LAI, boden-phys. Parameter	Nd., I, Infl., A, viele weitere standort-spezif. Faktoren	meteor. Daten, bodenphy. Parameter	Nd., LT, rF, W, GS, Veg., Nutzung, bodenphy. Parameter
Anwendbarkeit	einfache Defizitberechnung	nur auf bestimmten Standorten anwendbar, einfache Anwendbarkeit	sehr komplex, daher oft nur für kleine Räume anwendbar, aufwendige Eingaben	wie SIMPEL	nur für kleine Räume, sehr komplexe Eingaben nötig, ET unberück., basierend auf PCRaster	komplex, vielseitige Simulationen möglich, hohe Anforderungen an Eingangsparameter	komplex, vielseitige Simulationen möglich, hohe Anforderungen an Eingangsparameter

LT: Lufttemperatur; rF: Luftfeuchte; W: Windgeschwindigkeit; GS: Globalstrahlung;
 I: Interzeptionsverdunstung; A: Abfluss; Infl.: Infiltration; Nd.: Niederschlag; LAI: Blattflächenindex;
 nFK: nutzbare Feldkapazität; ETr: Referenz-Evapotranspiration nach HAUDE; Zwe: effektiver Wurzelraum;
 ETf: Faktoren zur Umrechnung der Referenz-Evapotranspiration; nWmin: nutzbarer Wasservorrat; Ief: Faktoren zur Berechnung der Interzeption; VS: Verhältnis der mittleren zur maximal möglichen Sonnenscheindauer im betreffenden Monat; Kc-Wert: Korrekturfaktor, der aus der potentiellen Evapotranspiration einer kurz geschnittenen Grasfläche die potentielle Evapotranspiration einer bestimmten Kultur in einem bestimmten Entwicklungsstadium berechnet

Aufgrund der fehlenden oder aufwendig zu ermittelnden flächendeckenden Datenbasis dieser Parameter ist die Modellierung der Bodenfeuchte mit Richards-Modellen aufwendiger als bei den

anderen Verfahren (HÖRMANN et. al. 2003). Auch bei den Speichermodellen gibt es Unterschiede in der Komplexität. Bei einer Version des Speichermodells SIMPEL kann beispielsweise über die Boden- und Durchwurzelungstiefe ebenfalls die Bodenfeuchte in verschiedenen Tiefen errechnet werden (HÖRMANN 1998).

Ein Ziel dieser Arbeit war es, die Berechnungen standortspezifisch für ein entsprechendes Gebiet mit bekannter Bodenart sowie vorhandenen Wetterparametern durchzuführen. Hierbei kommt es vor allem auf die aktuelle Bodenfeuchte in den oberen 20 cm an, da sich dort die Prozesse der Schädigungen an der Kultur durch die unterschiedlichen Schaderreger abspielen. Bodenwasserverfrachtungen in tiefere Schichten oder Sickerwasserprozesse ins Grundwasser spielen bei den Betrachtungen keine Rolle. Da die spezifischen Eingangsparameter der Richards-Modelle nicht flächendeckend vorliegen und mit ihnen sehr komplexe Prozesse modelliert werden, die für die in dieser Arbeit betrachteten Prozesse irrelevant sind, wurden sie im weiteren Verlauf dieser Arbeit nicht berücksichtigt.

Der Ansatz der Bilanzgleichung wird in der Praxis unter Verwendung der sogenannten „Geisenheimer Bewässerungssteuerung“ (PASCHOLD 2002) von der Agrarmeteorologie in Rheinland-Pfalz zur Berechnung des Wasserdefizits im Boden genutzt. In der Bewässerungssteuerung hat sich dieser Ansatz, vor allem im Gemüseanbau, langjährig bewährt (ZIEGLER 2004), wodurch er sich ebenfalls zur kontinuierlichen Bodenfeuchtesimulation eignen könnte. Das Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) wurde zur Überprüfung seiner Genauigkeit mit dem Modell VAMOS (BORNHÖFT 1993), welches auf der Richards-Gleichung basiert, verglichen (HÖRMANN 1997). Aus einem achtjährigen Datensatz wurden zum Vergleich der beiden Modelle die Jahre 1989, 1991 und 1992 ausgewählt. „Im Allgemeinen weichen die Ergebnisse von SIMPEL und VAMOS um nicht mehr als 10 % der Jahressummen voneinander ab“ (HÖRMANN 1997). Nach HÖRMANN (1997) soll das Modell in der Praxis die Lücke zwischen klimatischer Wasserbilanz und Richards-Modell füllen. Aufgrund der Abweichungen von weniger als 10 % im Vergleich zu Modellergebnissen der komplexen Richards-Modelle und dem Anspruch an einen praktischen Einsatz wurden im Rahmen dieser Arbeit die Berechnung der Bodenfeuchte mit einer Bilanzgleichung und einem Speichermodell untersucht.

2.2 Nutzung von Wetterstationsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation

Die Wetterdatenbasis der benötigten Eingabeparameter zur Bodenfeuchtesimulation stammt von Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes und von Stationen der Pflanzenschutzdienste der Länder. Der ZEPP stehen Daten von 170 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes und von 396 Wetterstationen der Pflanzenschutzdienste der Länder zur Verfügung (KEIL & KLEINHENZ 2007). Die Wetterstationen der Pflanzenschutzdienste der Länder wurden unabhängig voneinander eingerichtet, sodass die Sensortypen von unterschiedlichen Herstellern stammen können. Zudem

werden sie durch die einzelnen Pflanzenschutzdienste der Länder betreut, sodass ebenfalls der Wartungszustand eine Heterogenität aufweist. Die gesammelten Daten der Wetterstationen werden in einer Datenbank durch die ZEPP bereitgestellt und sind über das Programm AGMEDAWIN (Agrarmeteorologische Datenbank für Windows) (KEIL & KLEINHENZ 2007) abruf- und auswertbar. Das Programm AGMEDAWIN wurde zur Verwaltung der Daten der Wetterstationen entwickelt, wobei die von den Ländern genutzten Versionen regionale, länderspezifische Unterschiede aufweisen. In einer zentralen Version bei der ZEPP kann auf alle gesammelten Daten zugegriffen werden.

Der Aufbau der Wetterstationen der Pflanzenschutzdienste der Länder ist im Folgenden exemplarisch an den Stationen des Pflanzenschutzdienstes von Rheinland-Pfalz skizziert. Die Standorte der Wetterstationen sind nach der VDI-Richtlinie 3786 für agrarmeteorologische Messstationen ausgewählt und mit der vorgeschriebenen Technik ausgestattet. Die Stationen sind mit den Sensoren Lufttemperatur in 2 m und 20 cm über dem Boden, relative Luftfeuchte, Blattnässe, Windgeschwindigkeit und Niederschlag grundausgestattet. Je nach Standort sind sie mit zusätzlichen Sensoren erweitert (Abbildung 1). Die Messwerte werden sekundlich erfasst und an der Station gespeichert. Diese können dann über Mobilfunk abgerufen werden. Nach einer Plausibilitätsprüfung werden die Werte in einer zentralen Datenbank stündlich (hh:00 bis hh:59) gespeichert. Sie liegen dann gesammelt in einer SQL-Datenbank vor (KÖHLER 2008). Mit dem Datenbanksystem AGMEDAWIN werden sie verwaltet und gespeichert.

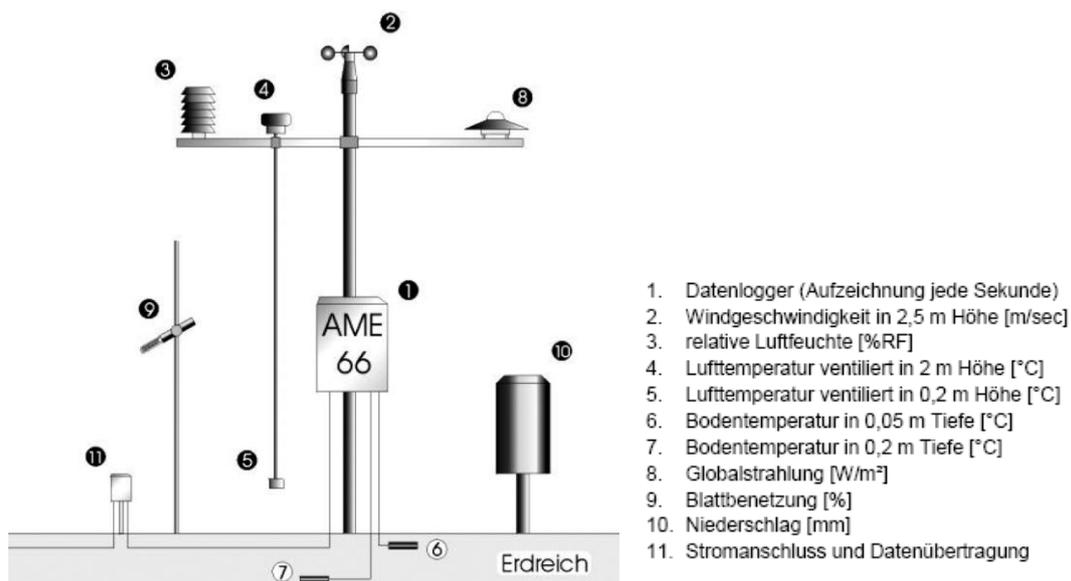
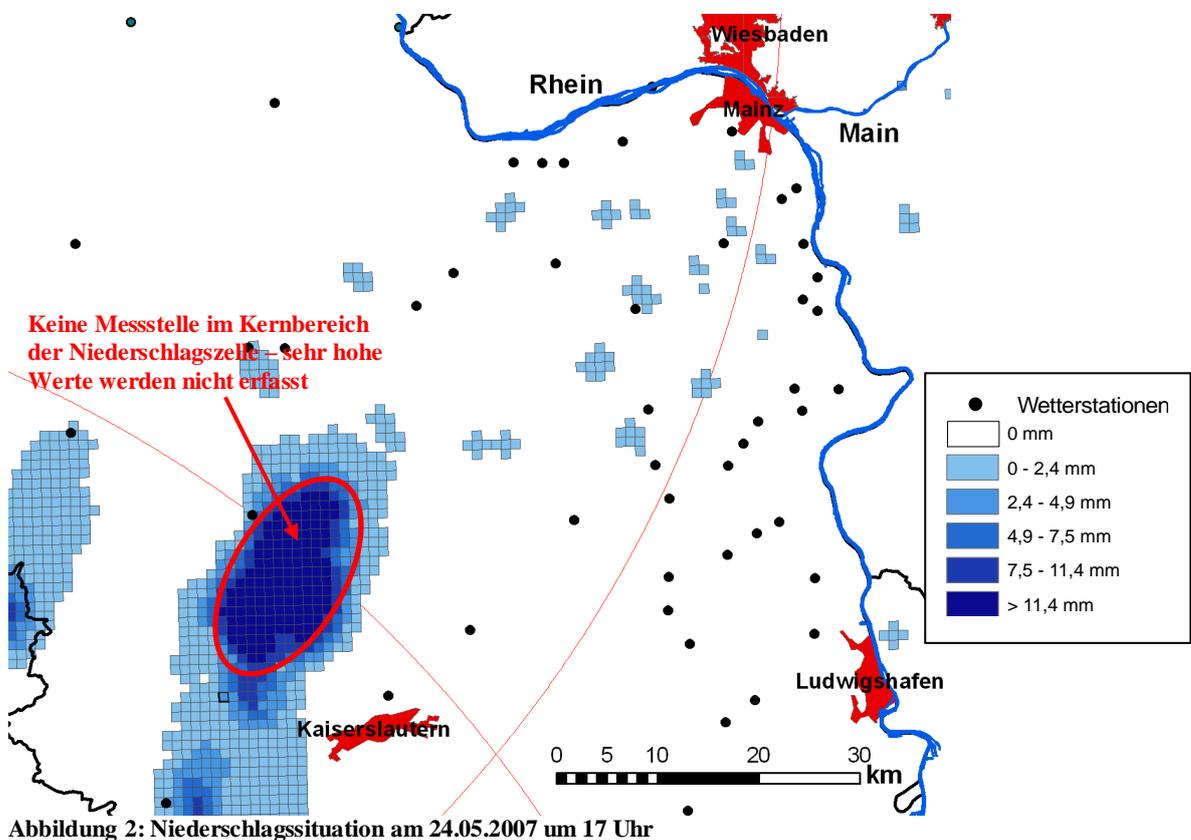


Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Wetterstation (Quelle: KÖHLER 2008)

2.3 Nutzung von Radarniederschlagsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation

2.3.1 Grundlagen

Eine Möglichkeit zur flächendeckenden Integration von Niederschlagswerten und damit zur schlagspezifischen Prognoseberechnung bieten die vom DWD aufgezeichneten deutschlandweiten Radarniederschlagsdaten, welche im DWD-Projekt Radolan-OP (Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatisierten Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer)) aufgezeichnet und angeeicht werden. Diese Daten liegen in stündlicher Auflösung ((hh-1):51 bis hh:50) für Deutschland flächendeckend im Raster von einem Quadratkilometer vor. Eine Nutzung dieser Werte hat den Vorteil, dass eine exakte räumliche Verteilung konvektiver Niederschlagszellen in die Modelle integriert werden kann. Bisher werden diese Zellen im Falle einer Lage zwischen zwei Wetterstationen häufig von keiner Wetterstation registriert (Abbildung 2). Bei Niederschlagsmessern ist die repräsentative Aufstellung zwar bekannt, sie bleibt allerdings bei konvektiven Zellsystemen bezogen auf die Niederschlagsfeldstruktur oft zufällig. Die Repräsentanz wird dann durch die kleinräumige Starkregenstruktur und weniger durch die allgemeine Netzdichte bestimmt (LANG 1997). Mit der Nutzung des Radarmessnetzes ist eine genauere Darstellung der Niederschlagsverteilung mit hoher räumlicher und zeitlicher Auflösung sowie genauerer Berechnung von Gebietsniederschlagshöhen und Bodenfeuchtesimulationswerten für die überregneten Flächen eines Einzugsgebiets zu erwarten.



Das Ziel von Radolan-OP ist es, flächendeckende, quantitative Niederschlagsmessungen aus Radardaten für die Wasserwirtschaft zur Verfügung zu stellen. Damit sollen Hochwasservorhersagen möglichst aktuell und genau berechnet werden (BARTELS 2004). Die Einrichtung und der operationelle Betrieb des DWD-Radarverbunds mit 16 Radarstandorten konnte im Jahr 2000 abgeschlossen werden. Jedes Radargerät liefert Niederschlagsdaten für einen Umkreis von 125 Kilometer (siehe Abbildung 5). Durch Überlagerung der Informationen aus den 16 Radarstandorten entsteht für Deutschland ein sogenanntes Radarkomposit mit einer weitgehenden Flächendeckung (BARTELS 2004).

Zeitgleich wurde am Aufbau eines automatisch abrufbaren Ombrometermessnetzes zur Aneichung der Radarrohdaten gearbeitet. Das Ombrometermessnetz besteht aus dem umgerüsteten Bodenniederschlagsmessnetz mit einem automatischen Grundmessnetz des DWD und den automatischen Verdichtungsmessnetzen der einzelnen Bundesländer (Abbildung 3). Seit dem Jahr 2007 steht ein Ombrometermessnetz von ca. 1.300 Stationen zur Aneichung der Radardaten zur Verfügung (BARTELS 2004).

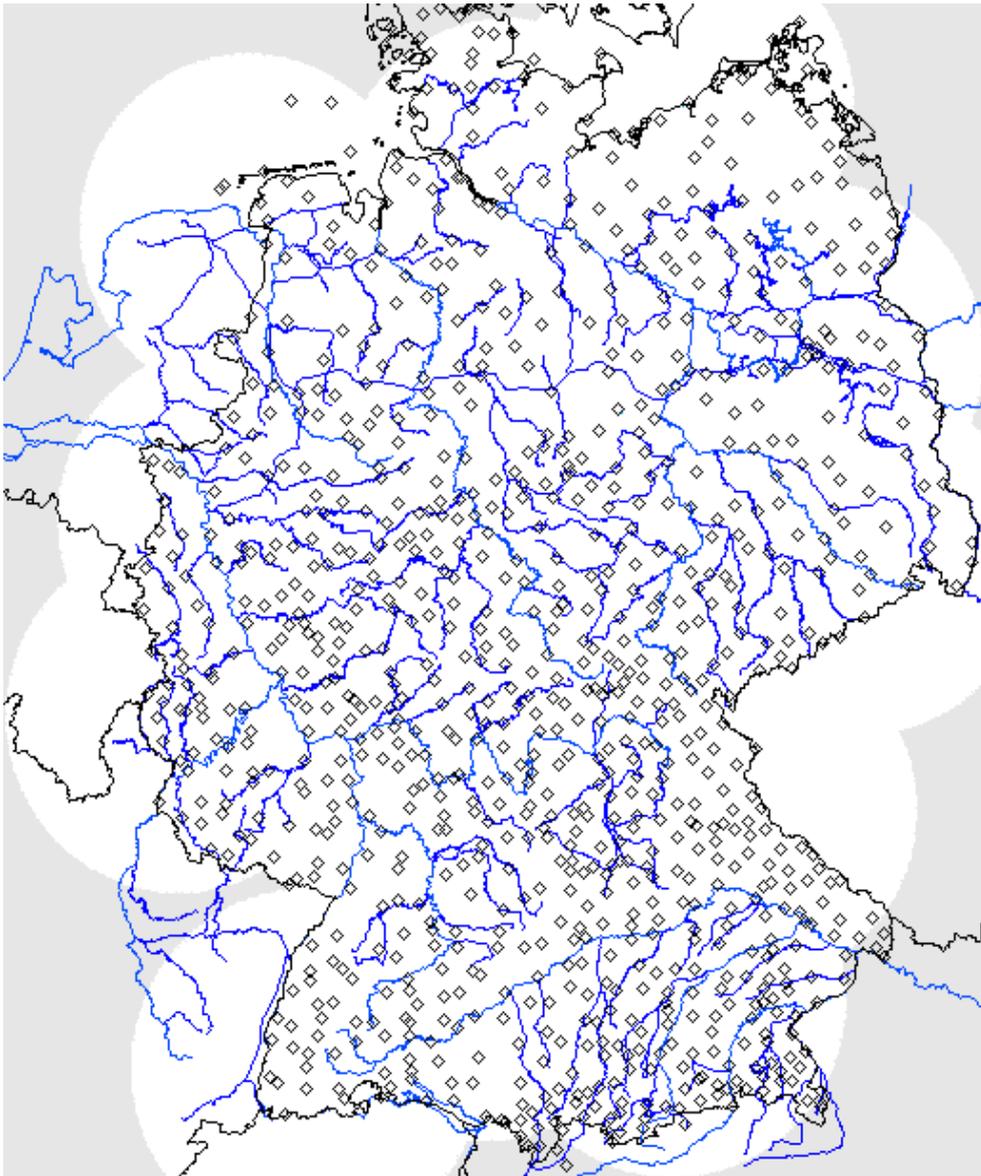


Abbildung 3: Ombrometermessnetz in Deutschland (Quelle: BARTELS 2004)

Bei der Bestimmung des Niederschlags über Radarmessungen wird der bodennahe Niederschlag nicht direkt gemessen, sondern die von Regen oder Schnee in höheren Schichten der Atmosphäre reflektierten Signale. Die Qualität der Radardaten ist daher ohne Aneicherung über Bodenstationen unbefriedigend. Das RADOLAN-Verfahren des DWD kombiniert die Vorteile zweier Messtechniken. Die Niederschlagsmesser der Bodenstationen erfassen bodennah den am Standort der Station gefallenen Niederschlag. Das Wetterradar liefert, angeeicht an die direkten Messungen der Bodenstationen, das Bild der flächenhaften Verteilung des Niederschlags. Angeeichte Radarniederschlagsdaten sind somit eine Synthese aus den beiden Datenquellen Radar- und Bodenmessnetz und werden als RADOLAN-Niederschlagsprodukt angezeigt.

Die Datengrundlage für das RADOLAN-Niederschlagsprodukt bildet damit einerseits der operationelle Wetterradarverbund des DWD mit 16 C-Band Dopplerradar Standorten und andererseits das gemeinsame Niederschlagsmessnetz des DWD und der Bundesländer mit automatisch abrufbaren Ombrometern (Abbildung 3). Dabei wird radarseits der „Precipitation Scan“ mit fünfminütigen

Radarniederschlagsdaten und einem maximalen Radius von 125 km um den jeweiligen Standort für die quantitative Niederschlagsbestimmung genutzt. Von derzeit 1.300 Ombrometerstationen wird zusätzlich der stündlich gemessene Niederschlagswert zur Aneichung herangezogen. Zur Online-Aneichung der Radarniederschlagsdaten nutzt der DWD vorrangig den Niederschlagssensor „PLUVIO“. Er dient zur automatischen Ermittlung der Niederschlagshöhe und der Niederschlagsintensität und entspricht im Wesentlichen der Bauform des Niederschlagsmessers nach „HELLMANN“. Im Gegensatz zu konventionellen Niederschlagssensoren arbeitet der „PLUVIO“ nach dem Wägeprinzip. Jedes Niederschlagsereignis wird durch eine Gewichtsbestimmung des Auffangtrichters erkannt. Der Niederschlagssensor ermittelt alle sechs Sekunden das Gewicht des Auffangbehälters einschließlich des Inhalts mit einer Auflösung von 0,01 mm. Aus der Differenz zwischen diesem Messwert und dem Gewicht des leeren Auffangbehälters ergibt sich der momentane Behälterinhalt bzw. die Niederschlagsmenge. Durch das Fehlen eines Auffangtrichters mit Kippwaageneinrichtung benötigt der „PLUVIO“ einen verhältnismäßig geringen Wartungsaufwand. Parallel zu diesen automatischen Ombrometerstationen betreibt der DWD konventionelle Niederschlagsmesser zur Qualitätsprüfung der automatischen Daten. Vor der eigentlichen Aneichung werden verschiedene Vorverarbeitungsschritte der quantitativen Radarniederschlagsdaten durchgeführt. Diese Schritte beinhalten die orographische Abschattungskorrektur, die verfeinerte Z/R-Beziehungen, die quantitative Kompositerstellung für Deutschland, statistische Unterdrückung von Falschechos (Clutter), Gradientenglättung und die Voraneichung (siehe BARTELS 2004). Die in der Atmosphäre ermittelten Radarwerte können auf dem Fallweg durch Verdunstung reduziert und mit dem horizontalen Windfeld verfrachtet werden. Diese Unterschiede sollen durch die Aneichung der Daten angeglichen werden (MARX 2007).

In einem sogenannten Kompositverfahren werden die zu einem Termin gemessenen Niederschlagsintensitäten der 16 Radarstandorte zu einer deutschlandweiten Niederschlagsverteilung kombiniert. Diese deutschlandweiten Radolandaten werden vom DWD in Form eines binären Kompositformats für den Benutzer zur Verfügung gestellt. Es können, je nach Verarbeitungsstandpunkt der Radardaten (von den Rohdaten bis zum fertig angeeichten Radarprodukt), verschiedene Kompositprodukte bezogen werden. Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde das sogenannte RW-Komposit verwendet. Die Daten des RW-Komposits liegen in stündlichen Intervallen vor. Es existiert für jedes Messintervall eine Datei mit einer Rasterung von einem Quadratkilometer für ganz Deutschland. Jeder Rasterpunkt trägt eine sogenannte RadoID, mit welcher die räumliche Verortung erfolgt (DWD 2005).

2.3.2 Validierung

Zur Verwendung der Radarniederschlagsdaten in der Bodenfeuchtesimulation war die Validierung der Radardaten erforderlich, da anders als bei herkömmlichen Wetterstationen der Niederschlag im Falle

der Radarerfassung nicht bodennah, sondern nach dem unter 2.3.1 beschriebenen Verfahren gemessen wird. Als Datenbasis wurden die Bodenstationen der Messnetze der Pflanzenschutzdienste der Länder verwendet, da diese Niederschlagsdaten nicht zur Aneicherung der Radolandaten verwendet werden und daher unabhängige Werte darstellen. Hierbei ist anzumerken, dass die Datengrundlage der stündlich angeeichten Radardaten von (hh-1):51 bis hh:50 und die der stündlichen Daten der Wetterstationen von hh:00 bis hh:59 in mm ist. Die Messzeiträume beider Verfahren sind somit um neun Minuten verschoben.

Der Vergleich der Niederschlagshöhen erfolgte mittels statistischer Auswertungen im Rahmen der deskriptiven Statistik, Korrelationstests und Box-Whisker-Plots. Die Darstellung der Niederschlagszellen und -verläufe fand mit dem Geographischen Informationssystem ArcMap statt.

Da das Vorhandensein von Niederschlag in über 90 % der Stunden von beiden Messverfahren identisch aufgezeichnet wurde, fand neben einer Auswertung aller Stunden des Untersuchungszeitraums zusätzlich nur ein Vergleich der Messwerte der Regenstunden statt. Hierbei war eine Niederschlagsstunde als Stunde, in welcher mindestens 0,1 mm Niederschlag gefallen war, definiert. Dies geschah, da die Übereinstimmung der Messergebnisse von 0 mm Niederschlag die Abweichungen im Mittel stark verringern würde und es somit zu einer geschönten Statistik käme.

Kritisch zu untersuchen war, im Falle von starken Niederschlagsabweichungen beider Verfahren, wodurch die Fehler zustande kamen. Fehlerquellen können neben denen bei der Radaraufzeichnung auch bei der Niederschlagsmessung mit konventionellen Messgeräten entstehen (Abbildung 4). Bekannte Fehler sind Windfelddeformationen über dem Auffangtrichter, Haftwasserverluste, Verdunstungsverluste, Spritzwasserverluste und Schneeverwehungen (DIETRICH und SCHÖNIGER 2003).

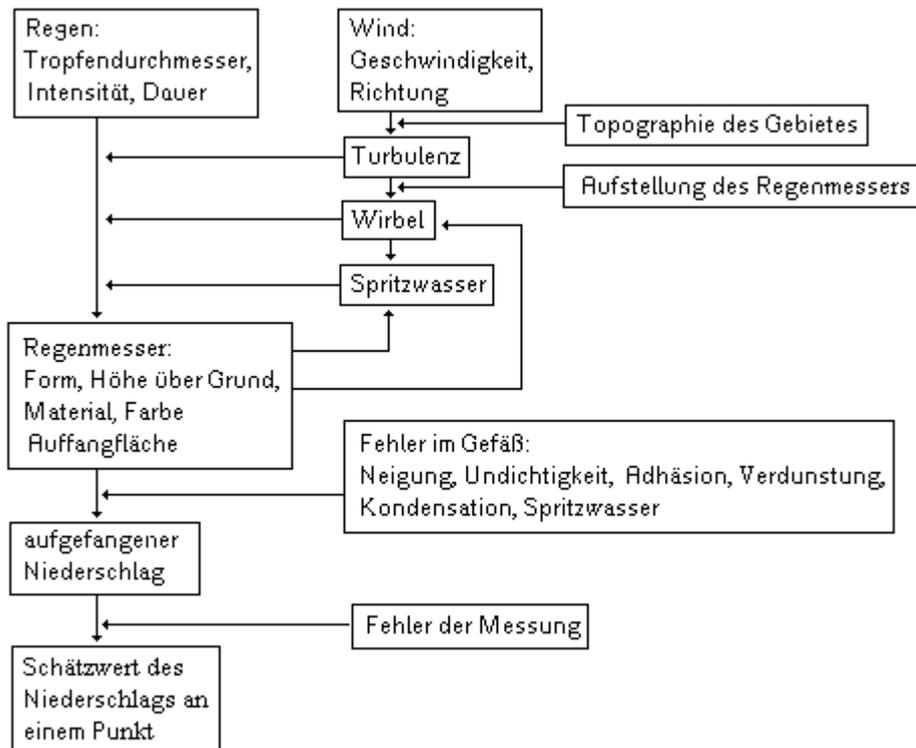


Abbildung 4: Schematische Darstellung der Fehlerquellen bei der Erfassung des Niederschlags (nach: RODDA 1968, aus: DIETRICH und SCHÖNIGER 2003)

Untersuchungsergebnisse von LANG (1997) zeigen zudem, dass es zu größeren Abweichungen zwischen Regenmessern kommen kann, die in unmittelbarer Nähe zueinander aufgestellt sind. Von Vergleichen auf engstem Raum sind mittlere Abweichungen der Tages-Regenhöhen von deutlich über 10 % bekannt, die überwiegend der Regenstruktur zugeschrieben werden (LANG 1997). Diese Tatsache sollte bei der Bewertung der Messverfahren berücksichtigt werden.

Zur Validierung der Daten wurden die Radardaten und das Wetterstationsnetz unter Verwendung eines Geographischen Informationssystems (GIS) miteinander verschnitten und somit die der Wetterstation zugehörige Radarrasterzelle bestimmt. Die Niederschlagswerte der Radarmessung der Rasterzelle und der Messwert der in ihr liegenden Wetterstation bildeten die Grundlage für den Vergleich der Niederschlagswerte und die Prüfung der Radolandaten. Es wurden sechs Validierungsgebiete festgelegt (Abbildung 5). Die Auswahl richtete sich nach der Dichte des vorhandenen Wetterstationsnetzes der Bundesländer. Die Niederschlagswerte der Validierungsgebiete wurden im Zeitraum vom 1. bis 31. Mai und vom 1. bis 31. August des Jahres 2007 verglichen, da der vom DWD zur Validierung zur Verfügung stehende Zeitraum die Monate April bis Oktober des Jahres 2007 abdeckte. Es wurden zwei niederschlagsreiche Monate dieses Datensatzes aus verschiedenen Jahreszeiten gewählt. Dies hatte den Vorteil, dass im Frühjahr eher stratiforme Niederschläge, im Sommer hingegen konvektive Regenschauer in die Betrachtungen eingingen. Die Prüfung der Radardaten erfolgt somit anhand von unterschiedlichen Niederschlagsarten. Insgesamt ergaben sich 1.488 Vergleichstunden pro Station. In einem Validierungsgebiet lagen zwischen 9 und 29 Wetterstationen, je nach Stationsdichte (Tabelle 3).

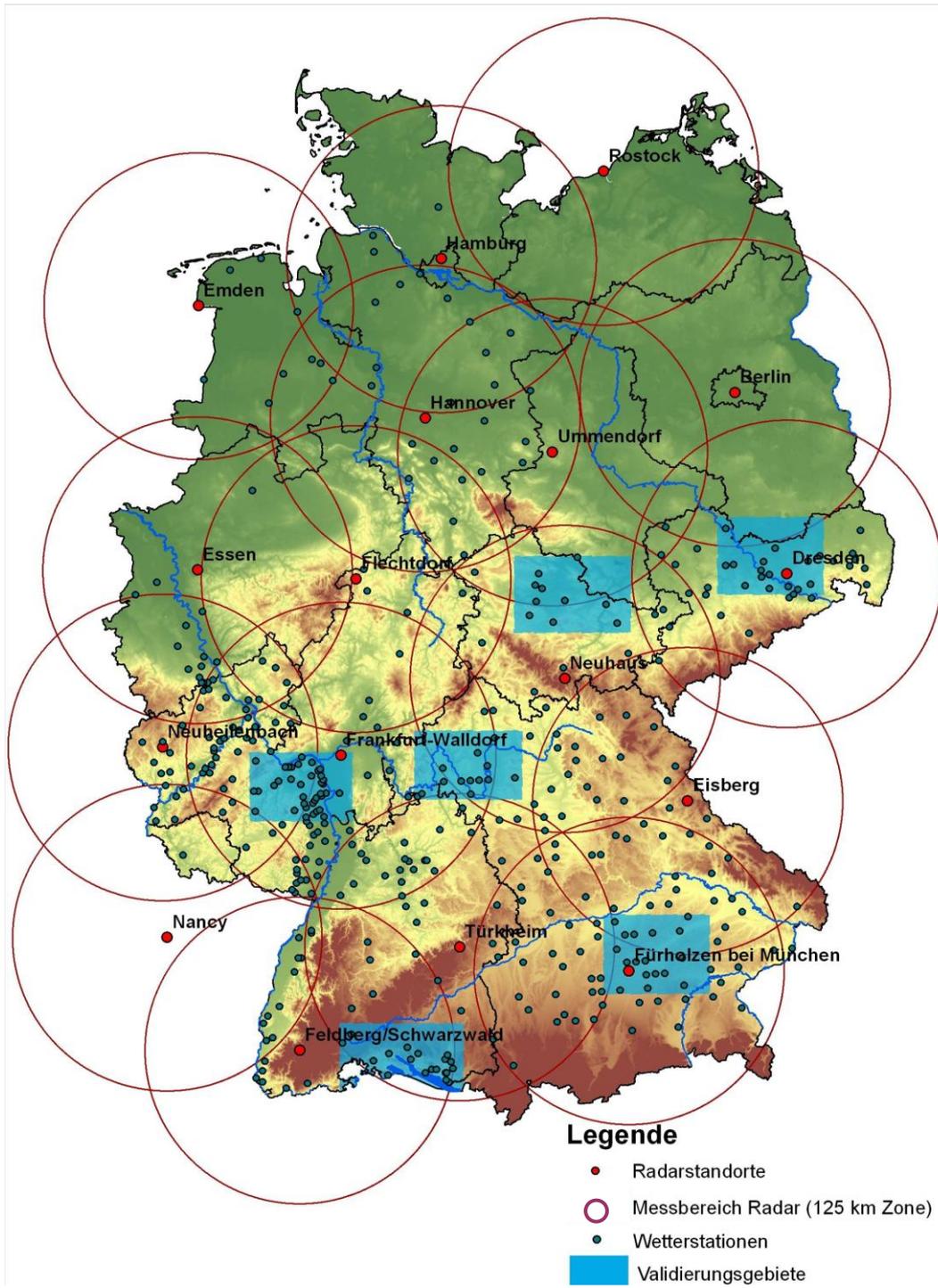


Abbildung 5: Lage der Validierungsgebiete sowie der Wetterstationen

Tabelle 3: Validierungsgebiete und Anzahl der Wetterstationen

Validierungsgebiete	Anzahl Stationen
Raum Bodensee	19
Raum München	15
Rhein-Main-Gebiet	29
Raum Dresden	15
Nord-Thüringen	9
Unterfranken	13

2.4 Bilanzgleichung nach PASCHOLD 2002

Bei der Simulation der Bodenfeuchte unter Verwendung der Bilanzgleichung diente der Ansatz von PASCHOLD 2002 als Grundlage. In Zusammenarbeit mit dem Deutschen Wetterdienst wurden seit 1992 von PASCHOLD, ZENGERLE, KLEBER und MAYER Untersuchungen zur Steuerungen der Bewässerung für landwirtschaftliche Kulturen auf Basis der klimatischen Wasserbilanz durchgeführt.

Elementarer Bestandteil der Bewässerungssteuerung ist die Berechnung des im Boden befindlichen Bodenwassers, um ein Überangebot an Wasser bei der Bewässerung zu vermeiden. Neben der Errechnung der täglichen Wasserbilanz spielt die durch die angebaute Kultur entzogene Wassermenge, je nach pflanzlicher Entwicklung, eine entscheidende Rolle. Bei der sogenannten Geisenheimer Steuerung wird diese entzogene Wassermenge entwicklungspezifisch nach den jeweiligen Pflanzenarten in einem Koeffizienten zusammengefasst. Diese Korrekturfaktoren (kc) wurden in Lysimeter- und Feldversuchen bestimmt. Die Korrekturfaktoren müssen drei- bis viermal in Abhängigkeit von definierten Entwicklungsstadien bei der Bodenfeuchteberechnung angepasst werden. Sie betragen zu Anfang des Wachstums 0,3 bis 0,5 und steigen bis zu 1,2 an (Tabelle 4). „Mit diesem Faktor wird die auf Grund meteorologischer Daten täglich errechnete potentielle Verdunstung von Boden und Pflanze (Evapotranspiration) multipliziert und somit eine Anpassung ... vorgenommen“ (PASCHOLD 2010).

Tabelle 4: kc-Werte nach PASCHOLD (1992) nach Kultur und Entwicklungsstadium

Kulturart	Stadium 1	Stadium 2	Stadium 3	Stadium 4
Kartoffeln früh	nach Legen 0,5	ab Blatt- und Stängelausbildung	Längenwachstum 1,0	Bestandesschluss 1,2
Kartoffeln spät	nach Legen 0,4	Triebe > 10 cm 0,6	Längenwachstum 0,9	Bestandesschluss 1,1
Körnermais	ab Auflaufen 0,4	ab 7-Blatt 0,7-1,1	Rispenschieben - Ende Blüte 1,2	Kornausbildung - Teigreife 0,8 - 1,0
Sommergetreide	ab Auflaufen 0,3	Bestandesschluss 0,4-0,6	Schossen - Milchreife 1,0	
Wintergetreide	ab Auflaufen 0,2	Bestandesschluss 0,4-0,6	Schossen - Milchreife 1,0	
Zuckerrüben	ab Auflaufen 0,3	ab 5-Blatt 0,4	Bestandesschluss 1,0	Rübe > 12 cm 0,5-0,8
Feldgras	ab 10 cm Wuchshöhe 1,0			

Zur Bestimmung der täglichen Wasserbilanz werden als Eingabeparameter die Verdunstung und die Niederschlagsmenge auf dem Schlag benötigt. Die tägliche Wasserbilanz kann dann mit der Formel

$$[1] \text{ Tägliche Wasserbilanz} = \text{Verdunstung nach PENMAN} \times \text{kc-Wert} - \text{Niederschlag}$$

errechnet werden. Ausgangspunkt zum Start dieser einfachen täglichen Defizitberechnung ist der 1. April unter der Annahme, dass der Wassergehalt des Bodens zu diesem Zeitpunkt dem Maximum entspricht. Somit kann der tägliche Wassergehalt mit der Formel

$$[2] \text{ Wassergehalt des Vortages} - (\text{Verdunstung nach PENMAN} \times \text{kc-Wert} - \text{Niederschlag}) = \text{aktueller Bodenwassergehalt}$$

errechnet werden. Da die maximale Wasseraufnahmemöglichkeit des Bodens bei andauernden Niederschlägen bzw. die maximale Austrocknung bei andauernder Trockenheit aufgrund der einfachen Defizitberechnung unrealistische Werte annehmen würde, wurde zusätzlich ein Grenzwert der maximalen Austrocknung und Sättigung des Bodenkörpers in die Wasserbilanzgleichung integriert, der sich in den unterschiedlichen Böden auf das Limit der Feldkapazität bzw. den Totwasseranteil bezieht.

Die Berechnung der Verdunstung (ET_p) nach PENMAN (1956) erfolgt nach folgender Gleichung:

$$[3] \text{ ET}_p = g(T) * ((0,6 * \text{GS}) / L + 0,66 * (1 + 1,08 * U) * (1 - (rF / 100)) * S_d)$$

wobei:

g(T)	=	dimensionslose Temperaturfunktion nach: $g(T) = s / (s + \gamma) \approx 2,3 * (T + 22) / (T + 123)$
GS	=	Globalstrahlung (J/cm ²)
L	=	Verdunstungs-Enthalpie nach: $L = 249,8 - 0,242 * T$
U	=	Windgeschwindigkeit (m/s)
rF	=	relative Luftfeuchte (%)
S _d	=	Sonnenscheindauer (h)
S	=	Steigung der Sättigungsdampfdruckkurve (hPa/K)
T	=	Temperatur (°C)
γ	=	Psychrometerkonstante (hPa/K)

Nach einem vereinfachten Ansatz wurde bei den Berechnungen die dimensionslose Temperaturfunktion durch die oben angegebene Näherungsformel ersetzt, um eine praktische Anwendung zu ermöglichen.

Damit werden für die Simulation die meteorologischen sowie boden- und kulturspezifischen Eingabegrößen

- Temperatur
- relative Luftfeuchte
- Sonnenscheindauer
- Globalstrahlung
- Windgeschwindigkeit
- Niederschlag
- nutzbare Feldkapazität bzw. Totwasseranteil und Feldkapazität
- kc-Werte der entsprechenden Kultur

benötigt. Der Bodenwassergehalt lässt sich mit diesen Parametern täglich für einen spezifischen Schlag berechnen.

2.5 Speichermodell SIMPEL

2.5.1 Aufbau des Modells

SIMPEL-Modelle eignen sich für 95 % der in Deutschland vorkommenden Böden. Sie eignen sich nicht für sehr schwere Böden mit geringer Infiltrationskapazität. Im Gegensatz zu komplexeren Modellen sind die Komponenten laterale Flüsse und Oberflächenabfluss bei Überschreitung der Infiltrationskapazität im Modell nicht enthalten (HÖRMANN 1998).

Bei dem Bodenfeuchtesimulationsmodell handelt es sich um ein sogenanntes Speichermodell. Es simuliert die Bodenfeuchte aus allgemein verfügbaren Daten. Speichermodelle berechnen den Wasserhaushalt mit verschiedenen Wasserspeichern, wobei im einfachsten Fall nur der durchwurzelte Porenraum berücksichtigt wird. Erweiterte Speichermodelle, sogenannte „Hydrologische Modelle“, arbeiten mit Interzeptionsspeicher (Blatt bzw. Pflanze sowie Streuschicht in Wäldern), einem oder mehreren Bodenspeichern und einem Grundwasserspeicher (HÖRMANN 1998).

Da ein Ziel dieser Arbeit die Bodenfeuchtesimulation auf Ackerflächen war, wurde mit einer Version des Speichermodells SIMPEL gearbeitet, die aus einem Blattinterzeptionsspeicher, einem Bodenspeicher und einem Grundwasserspeicher besteht. Da auf Ackerflächen keine Streuschicht

vorkommt, wurde dieser Speicher aus dem Modell entfernt. Zusätzlich wurde mit nur einem Bodenspeicher gearbeitet, da für die untersuchten Fragestellungen lediglich die Bodenfeuchte in der oberen Bodenschicht entscheidend ist.

Der Aufbau des daraus resultierenden Speichermodells ist in Abbildung 6 dargestellt. Als Eingabedaten werden der Niederschlag, die potentielle Verdunstung, der Blattflächenindex und die bodenphysikalischen Parameter Feldkapazität und der permanente Welkepunkt benötigt. Ausgegeben werden können die Flüsse zwischen den Speichern, die aktuelle Verdunstung (Summe von Interzeption, Evaporation und Transpiration) sowie die Sickerung in das Grundwasser (HÖRMANN 1998).

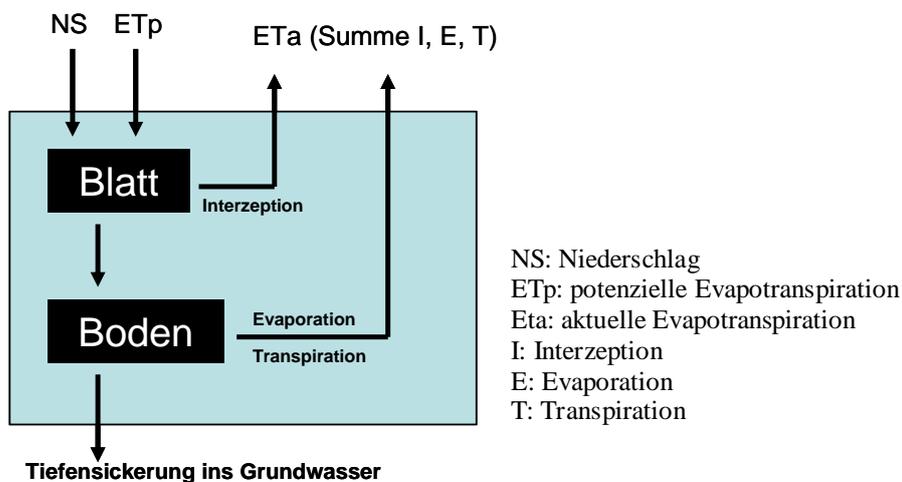


Abbildung 6: Aufbau des Speichermodells SIMPEL (verändert nach HÖRMANN 1998)

Aus den Eingabedaten des Blattflächenindex wird der maximale Speicherinhalt des Blattspeichers parametrisiert. Dieser liegt nach RENGER und STREBEL (1980) in Halm- und Blattfrüchten bei ca. 2 mm. Der Speicherinhalt wird nach folgendem Schema berechnet: dem aktuellen Speicherinhalt wird der Niederschlag addiert und die Verdunstung subtrahiert. Ist die Bilanz, also der Inhalt des Speichers, größer als die mögliche Aufnahmekapazität findet ein Fluss in den folgenden Speicher statt, d.h. aus dem Blattspeicher in den Bodenspeicher. Kann der Verdunstungsanspruch nicht aus dem Blattspeicher gedeckt werden, wird er ebenfalls an den Bodenspeicher weitergegeben.

Der einfache Ansatz hat zur Folge, dass nur bei Überschreiten der Feldkapazität ein Fluss aus dem Bodenspeicher in den Grundwasserspeicher auftritt. Rechnerisch ist es daher möglich, dass in den Sommermonaten kein Fluss in den Grundwasserspeicher stattfindet, obwohl im Bodenspeicher annähernd Feldkapazität erreicht ist. Daher wurde von HÖRMANN (1998) im Modell eine nicht-lineare Funktion nach dem Ansatz nach GLUGLA (1969) integriert, um auch bei nicht gesättigtem Boden einen Abfluss aus der durchwurzelten Zone in Abhängigkeit vom Bodenwassergehalt zu simulieren (HÖRMANN 1998).

Das Speichermodell SIMPEL von HÖRMANN (1998) ist mit dem Programm „Excel“ von Microsoft erstellt. Es besteht aus mehreren miteinander verknüpften Dateien:

- Eingabe Verdunstung (Zeitreihen der Wetterdaten und des Blattflächenindex sowie statistische Eingaben)
- „Bastelkasten Verdunstung“ (Berechnung der Verdunstung nach unterschiedlichen Verfahren)
- Speichermodell (Simulation des Bodenwasserhaushaltes)

2.5.2 Eingabeparameter

Die Daten, welche zur Verdunstungsberechnung benötigt werden, müssen in der Excel-Datei „Eingabe Verdunstung“ eingefügt werden. Diese sind:

- Zeitreihen (tägliche Klimadaten)
- Statistische Eingabedaten (z.B. geographische Lage)
- Pflanzenparameter
- Zeitanreihe Blattflächenindex
- Langjährige Monatsmittel der Klimadaten

Je nach angewandter Methode zur Verdunstungsberechnung werden unterschiedliche Eingabeparameter benötigt. Bei der Eingabe der Zeitanreihen können folgende Klimadaten zur Berechnungsgrundlage eingegeben werden:

- Tagesmittel der Lufttemperatur ($^{\circ}\text{C}$)
- Sonnenscheindauer (h) zur Berechnung der Globalstrahlung
- Globalstrahlung ($\text{J}\cdot\text{cm}^{-2}$), alternativ zur Sonnenscheindauer
- Relative Luftfeuchte im Tagesmittel (%)
- Tagesmittelwert der Windgeschwindigkeit ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
- Lufttemperatur um 14 Uhr ($^{\circ}\text{C}$)
- Relative Luftfeuchte um 14 Uhr (%)

Der Blattflächenindex muss als Zeitanreihe eingegeben werden, wobei die Abstände zwischen den Messungen beliebig gewählt werden können. Die für die Simulation benötigten täglichen Blattflächenindexdaten werden vom Modell mittels linearer Interpolation auf Tagewerte umgerechnet. Mindestens eingegeben werden müssen der Vegetationsbeginn bzw. der Auflauftermin, der Termin

des maximal erreichten Blattflächenindex und der Erntetermin bzw. Blattverlusttermin. Der Blattflächenindex dient als Steuergröße zur Berechnung des Blattspeichers (HÖRMANN 1996). Die Höhe und der Verlauf des Blattflächenindex wurden in dieser Arbeit anhand der Arbeiten von GEISLER (1988) abgeleitet. Sie sind für ausgewählte relevante landwirtschaftliche Kulturen in Abbildung 7 dargestellt.

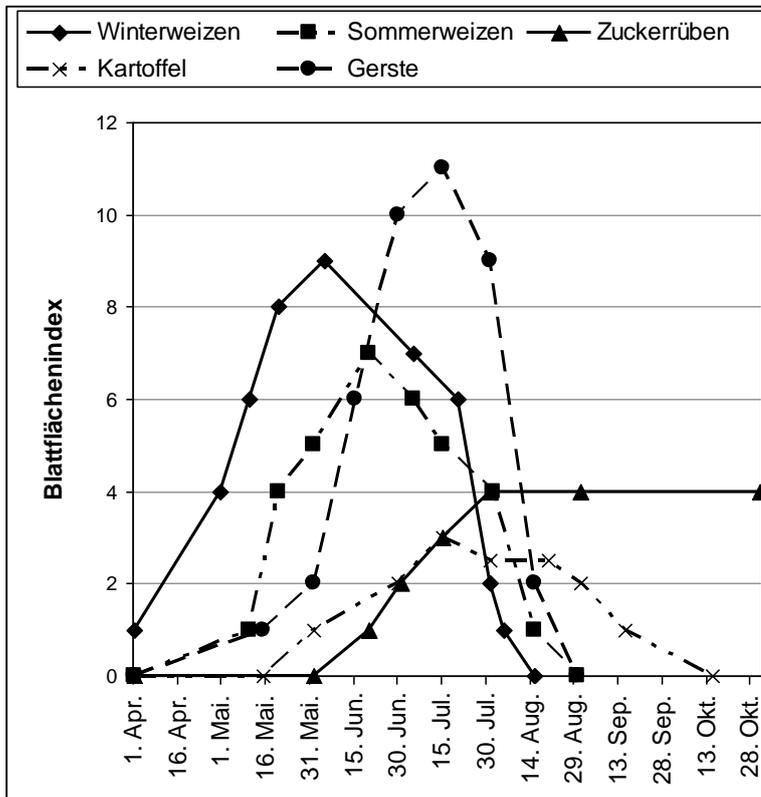


Abbildung 7: Höhe und jahreszeitlicher Verlauf des Blattflächenindexes von Winter- und Sommerweizen, Gerste, Kartoffeln sowie Zuckerrüben (GEISLER 1988)

Die bodenphysikalischen Daten werden getrennt von den Daten zur Verdunstungsberechnung eingegeben. Die Eingabe erfolgt in der Excel-Datei „Speichermodell“. Einzugeben sind:

- Feldkapazität (Vol. %)
- Permanenter Welkepunkt (Vol. %)
- Reduktionsbeginn (Vol. %) (Verhältnis der aktuellen zur potentiellen Evapotranspiration in Abhängigkeit vom pflanzennutzbaren Bodenwassergehalt in % der nutzbaren Wasserkapazität, nach: SPONAGEL, 1980)
- Länge der zu berechnenden Bodensäule
- Startwert Bodenspeicher (Vol. %)

Ausgegeben wird der Wassergehalt des Bodenspeichers in mm im täglichen Verlauf für den Zeitraum der eingegebenen klimatischen Datenreihe.

2.5.3 Verdunstungsberechnung

In der Excel-Datei „Bastelkasten Verdunstung“ sind Methoden zur Berechnung der potentiellen Verdunstung zusammengefasst. Es können folgende Methoden zur Verdunstungsberechnung ausgewählt werden:

- Haude
- Penman (vereinfacht nach Wendling)
- Penman
- Makkink
- Thornthwaite
- Blaney Criddle
- Turc
- Penman/Monteith

Alle Verfahren wurden aus der DVWK-Richtlinie von 1996 übernommen (HÖRMANN 1998).

Das Modell SIMPEL wurde in dieser Arbeit mit dem PENMAN-Verfahren und dem Verfahren nach HAUDE validiert.

Das PENMAN-Verfahren ist das weltweit bekannteste Verfahren. Das in SIMPEL verwendete Verfahren ist leicht vereinfacht und für landwirtschaftliche Zwecke empfohlen (HÖRMANN 1998). Die Berechnung der Verdunstung erfolgt nach Gleichung [3] siehe Absatz 2.4.

Im Gegensatz zum PENMAN-Verfahren fordert die Verdunstungsberechnung nach HAUDE andere Eingabeparameter:

- Relative Luftfeuchte (%) um 14 Uhr
- Temperatur (°C) um 14 Uhr
- Bewuchs / Kulturart der Fläche

Die Berechnung erfolgt nach der Formel:

$$[4] ET_p = \text{HAUDE Koeffizient } a * \text{Sättigungsdampfdruck um 14h (hPa)} * (1 - (rF \text{ 14 Uhr} / 100))$$

Der HAUDE Koeffizient a kann von Gras auf die entsprechenden Kulturen umgerechnet werden. Somit geht die Kultur direkt in die Verdunstungsberechnung ein, was für die Fragestellung dieser Arbeit einen wichtigen Vorteil bildete.

2.6 Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle

2.6.1 Physiogeographische Grundlagen des Validierungsgebietes

Die Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle fand auf landwirtschaftlichen Flächen in Rheinland-Pfalz statt. Die jährliche Auswahl der Flächen war in einer möglichst breiten Abdeckung des Bodenartenspektrums und der wöchentlichen Erreichbarkeit begründet. Die Lage der Standorte ist in Abbildung 8 dargestellt.

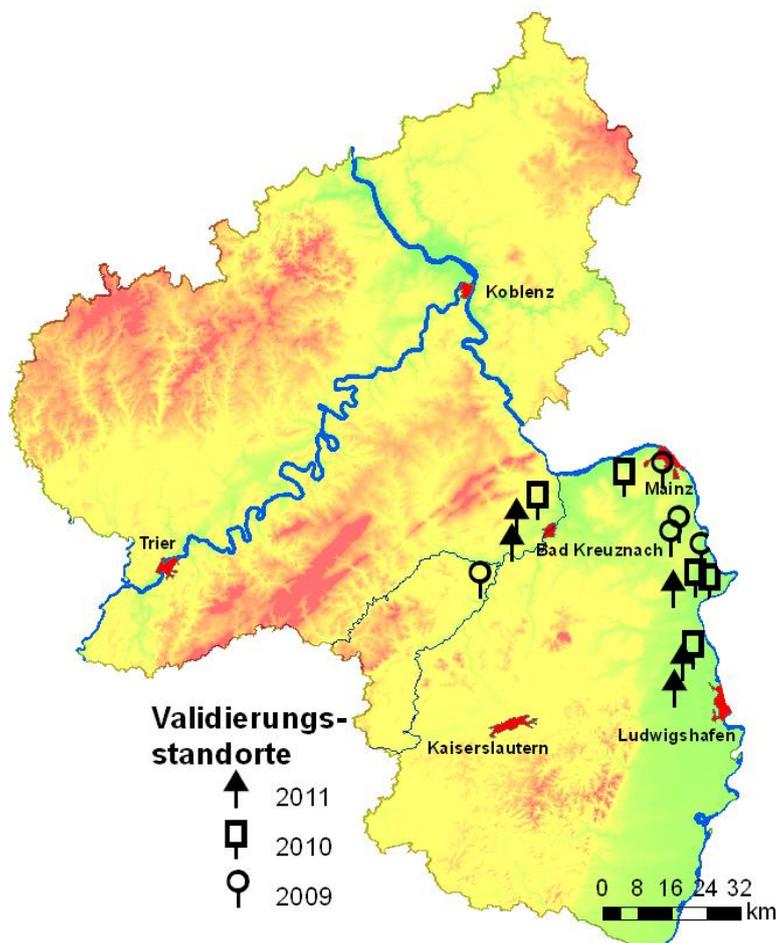


Abbildung 8: Lage der Validierungsstandorte der Bodenfeuchtesimulation in Rheinland-Pfalz

Daraus ergaben sich für die Jahre 2009 bis 2011 die in Tabelle 5 aufgelisteten Standorte:

Tabelle 5: Liste der Validierungsstandorte der Jahre 2009 bis 2011

Jahr	Standort	dez. Koordinaten WGS84 (nördl. Breite /östl. Länge)
2009	Abtweiler	49,743979° / 7,647987°
2009	Mainz-Bretzenheim	49,980336° / 8,232011°
2009	Gimbsheim	49,785288° / 8,400261°
2009	Friesenheim	49,836429° / 8,262901°
2009	Schwabsburg	49,867054° / 8,286995°
2010	Mettenheim	49,718361° / 8,368166°
2010	Bobenheim-Roxheim (1)	49,589003° / 8,364892°
2010	Bobenheim-Roxheim (2)	49,589003° / 8,364892°
2010	Gimbsheim	49,767976° / 8,357854°
2010	Groß-Winternheim	49,945756° / 8,098692°
2010	Windesheim	49,888138° / 7,809629°
2011	Weinsheim	49,834963° / 7,791967°
2011	Windesheim	49,888844° / 7,806852°
2011	Frankenthal	49,532616° / 8,321418°
2011	Bodenheim-Roxheim	49,589238° / 8,367281°
2011	Mettenheim (1)	49,746383° / 8,348573°
2011	Mettenheim (2)	49,746383° / 8,348573°

Nach FISCHER (1989) – basierend auf der Geographischen Landesaufnahme 1:200.000 der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumwesen (Bonn, 1952-1978) – umfasst die Lage der Validierungsstandorte die Naturräume „Nordpfälzer Bergland (193)“, „Vorderpfälzer Tiefland (221)“, „Rheinhessisches Tafel- und Hügelland (227)“ und „Nahe-Ebene (228)“ (Abbildung 9). Während der erste Naturraum „Nordpfälzer Bergland (193)“ als untergeordneter Raum dem „Saar-Nahe-Bergland (19)“ zuzurechnen ist, gehören die weiteren drei Naturräume dem „Nördlichen Oberrhein-Tiefland (22)“ an. Dies spiegelt sich in den geologischen Gegebenheiten wider.

Bereits die geologisch-petrographische Übersichtskarte von Rheinland-Pfalz lässt den Gegensatz zwischen dem relativ einheitlichen Norden und dem stark differenzierten Süden erkennen (Abbildung 10). Während der Norden in der überregionalen Gefügeordnung der Rheinisch-Ardennischen Masse zuzuordnen ist, gliedert sich der südlichere Teil dem Südwestdeutschen-Lothringer Schichtstufenland an (FISCHER 1989).

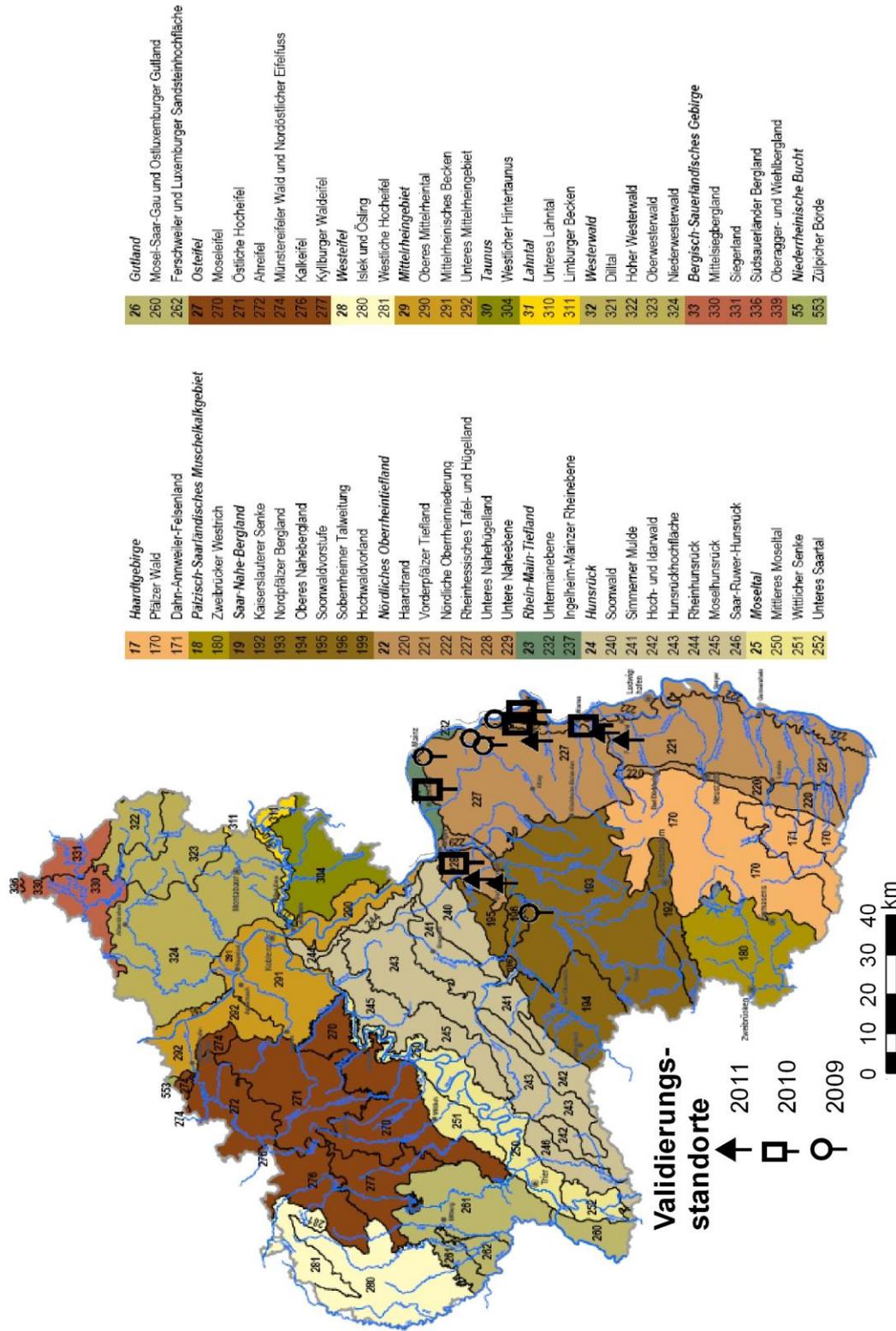


Abbildung 9: Naturräumliche Gliederung von Rheinland-Pfalz basierend auf der Geographischen Landesaufnahme 1:200.000 der Bundesforschungsanstalt für Landeskunde und Raumwesen (Bonn, 1952-1978) und Lage der Validierungsstandorte (Quelle: Landesamt für Umwelt, Wasserwirtschaft und Gewerbeaufsicht, Mainz; mit eigenen Veränderungen)

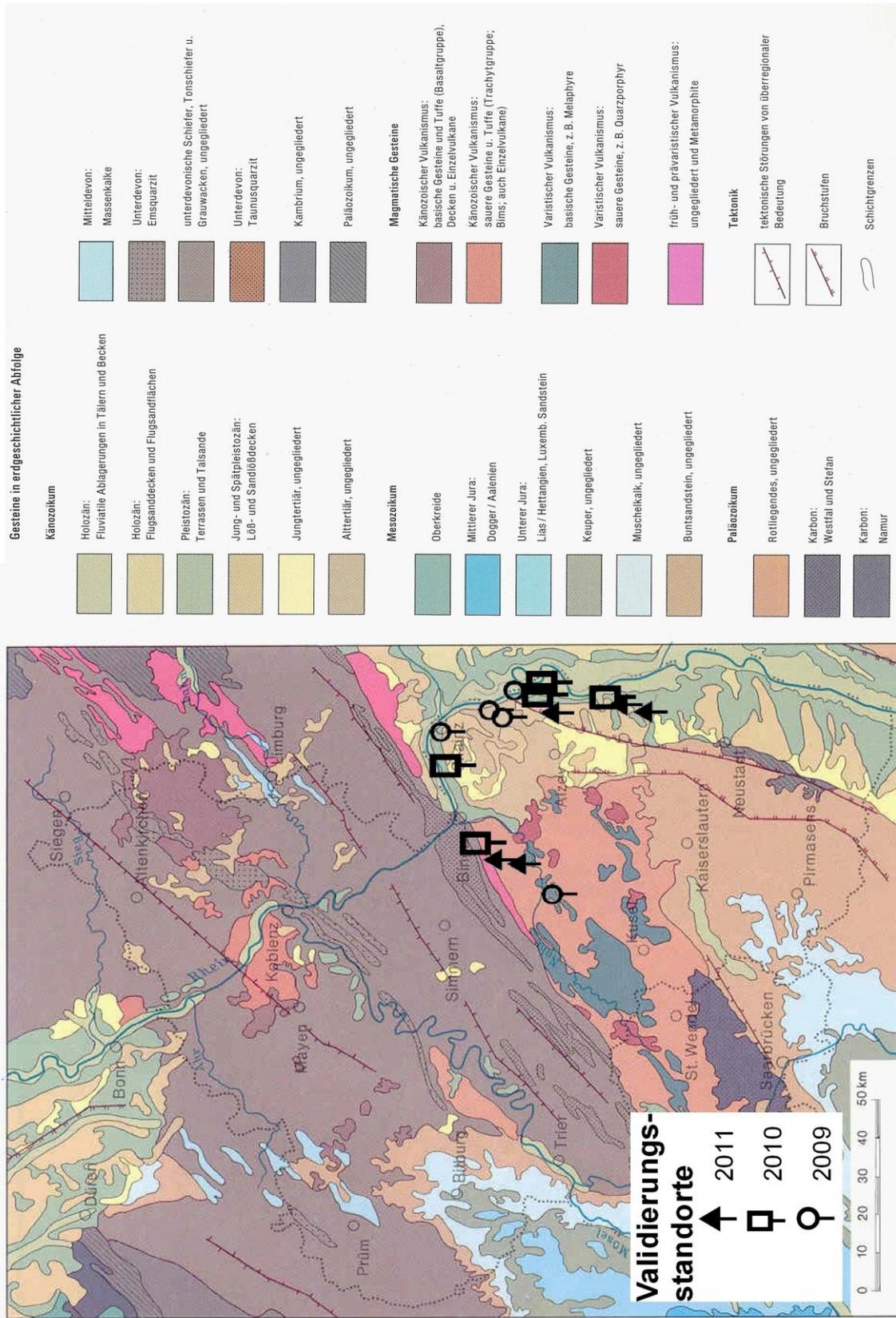


Abbildung 10: Lage der Validierungsstandorte in der geologisch-petrographischen Übersichtskarte des Rhein-Mosel-Raumes (Quelle: FISCHER (1989) nach GOHL (1967), Geol. Karte der Bundesrepublik Deutschland 1:1 Mill. (3. Auflage 1981) und RÜCKLIN (1976); mit eigenen Veränderungen)

Damit grenzt im Norden an den Raum des Validierungsgebietes der Naturraum „Hunsrück (24)“ an, welcher noch dem Rheinischen Schiefergebirge angehört. Die anstehenden Gesteine sind unterdevonischer Schiefer, Tonschiefer, Grauwacken und der Emsquarzit. Im Validierungsgebiet liegen dagegen mächtige limnische und terrestrische Sedimente des permokarbonischen „Saar-Nahe-Troges“ über dem Kristallin der mitteldeutschen Gebirgsschwelle (nach: ZÖLLER 1985). Der „Saar-Nahe-Trog“ entstand infolge der allmählichen Heraushebung des Hunsrücks während des Oberkarbons und der relativ dazu stattfindenden Absenkung der Mitteldeutschen Schwelle um mehrere tausend Meter. Besonders im Oberrotliegenden wurde während Phasen verstärkter Hebung des Hunsrücks Abtragungsschutt im Vorland abgelagert. „Die bräunliche bis rötliche Färbung der Sedimente, wie sie im Saar-Nahe-Bergland in der Regel anzutreffen ist, weist auf mechanische Verwitterung unter zumindest zeitweise oder periodisch ariden Klimaverhältnissen hin; es handelt sich daher weitgehend um klastische Sedimente“ (FISCHER 1989).

Der zweite sich im Validierungsgebiet befindliche übergeordnete Naturraum „Nördliches Oberrhein-Tiefland (22)“ wird an seiner Ostseite durch den Rhein und an seiner Westseite durch die geologische Struktur des Naturraums „Pfälzerwald (17)“ bestimmt. Dieser Raum ist durch die im Mesozoikum beginnende alpine Gebirgsfaltung geprägt. „Von der Oberkreide bis zum Altpliozän erfolgte ein süd-nördlich gerichteter Zusammenschub der Gesteinsschichten in mehreren Phasen, dem ab der Mitte des Alttertiärs unterschiedlich starke, zum Teil bis in die Gegenwart andauernde Hebungsperioden folgten“ (FISCHER 1989). In den, im Zuge der Gebirgsbildung der Alpen, schräggestellten und herausgehobenen Schichten des Bundsandsteins kommen besonders harte und weniger widerständige Schichten vor, sodass es zur Bildung von Verebnungen oder Landterrassen kam. Aus diesem Grund gehört der Pfälzerwald zu den Schichtstufenlandschaften. Die Bildung des oberrheinischen Grabens erfolgte durch Bildung einzelner Teilbecken entlang einer tektonisch vorgebildeten Schwächezone und dauerte vom Ausgang des Mitteleozäns bis ins Pliozän. In den entstandenen Senken kam es zur Ablagerung tertiärer Gesteine. Eine durchgehende Verbindung der einzelnen Teilbecken fand erst nach dem Beenden der Bewegungsphase und dem niveausgleichenden Ausräumen der Abflüsse der einzelnen Becken statt, wodurch der Rhein letztendlich seinen Lauf durch das heutige Oberrheintal finden konnte (FISCHER 1989). „Der eigentliche Graben aber entstand im Spätpliozän und Altpleistozän durch die von seitlichen Brüchen begleitete kräftige Hebung der mesozoischen Randgebirge“ (FISCHER 1989). Während der Kalt- und Warmzeiten des Quartärs entstanden durch ein Wechselspiel aus Akkumulation und Erosion die Flussterrassen.

Aufgrund der erdgeschichtlichen Entwicklung kam es im beschriebenen Validierungsgebiet zur Ausbildung unterschiedlicher Bodenarten auf kleinstem Raum (Abbildung 11). Der Bereich des Nahetals weist teilweise Tal- und Niederungsböden auf. Im Übergangsbereich des Hunsrücks zur Saar-Nahe-Senke kommen Braunerden mittlerer bis geringer Basenversorgung und Ranker vor. Die Bodenart wird in diesem Bereich von lehmigem Sand bis lehmigem Ton bestimmt und ist meist steinig (FISCHER 1989). Die Naturräume „Vorderpfälzer Tiefland (221)“ und „Rheinheinisches

Tafel- und Hügelland (227)“ zeigen ein kleinräumiges Mosaik, in welchem Niederungsböden, Podsole, Parabraunerden, Braunerden sowie Rendzinen vorkommen. Die Bodenarten reichen von Sand über lehmig-schluffige Böden bis zu Ton (Abbildung 11). Teilweise treten unterschiedliche Bodenarten innerhalb eines Schlags auf.

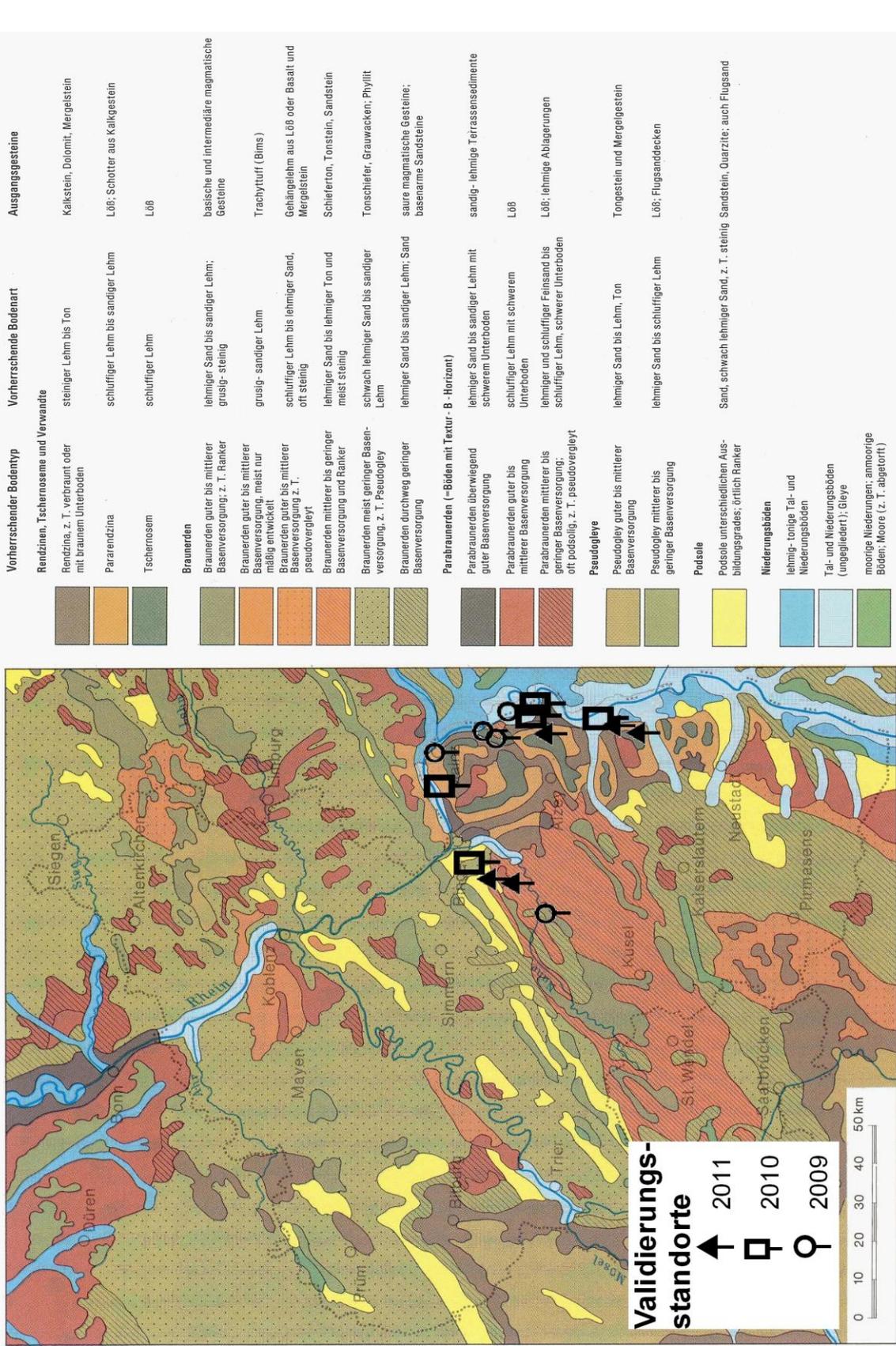


Abbildung 11: Lage der Validierungsstandorte in der Übersichtskarte der Böden des Rhein-Mosel-Raumes (Quelle: FISCHER (1989) nach HOLLSTEN (1963); mit eigenen Veränderungen)

Übergeordnet liegt das Validierungsgebiet klimatisch gesehen im westeuropäisch-atlantischen Klimabereich. Dieser wird durch milde Winter und gemäßigte Sommer charakterisiert. Das Gebiet wird hauptsächlich durch Westwinde beeinflusst. Eine kleinräumigere klimatische Gliederung bzw. eine Zusammenfassung von Klimabereichen zu bestimmten Raumtypen wurde von BÖHM (1964) vorgenommen bzw. von LIEDTKE (1973) zusammengefasst (Abbildung 12). Nach dieser Gliederung gehört das Validierungsgebiet einem einheitlichen klimatischen Raumtyp, dem Klimatyp „Kontinentales Klima der Becken und Täler“, an (Abbildung 12). Sie bilden die trockensten und wärmsten Gebiete in Deutschland. Die mittleren jährlichen Temperaturschwankungen liegen zwischen 17 bis 19 °C und die hauptsächlich im Sommer fallenden Niederschläge liegen zwischen 400 bis 700 mm. Die Winter dieses Typs charakterisiert BÖHM (1964) als relativ kalt und trocken.

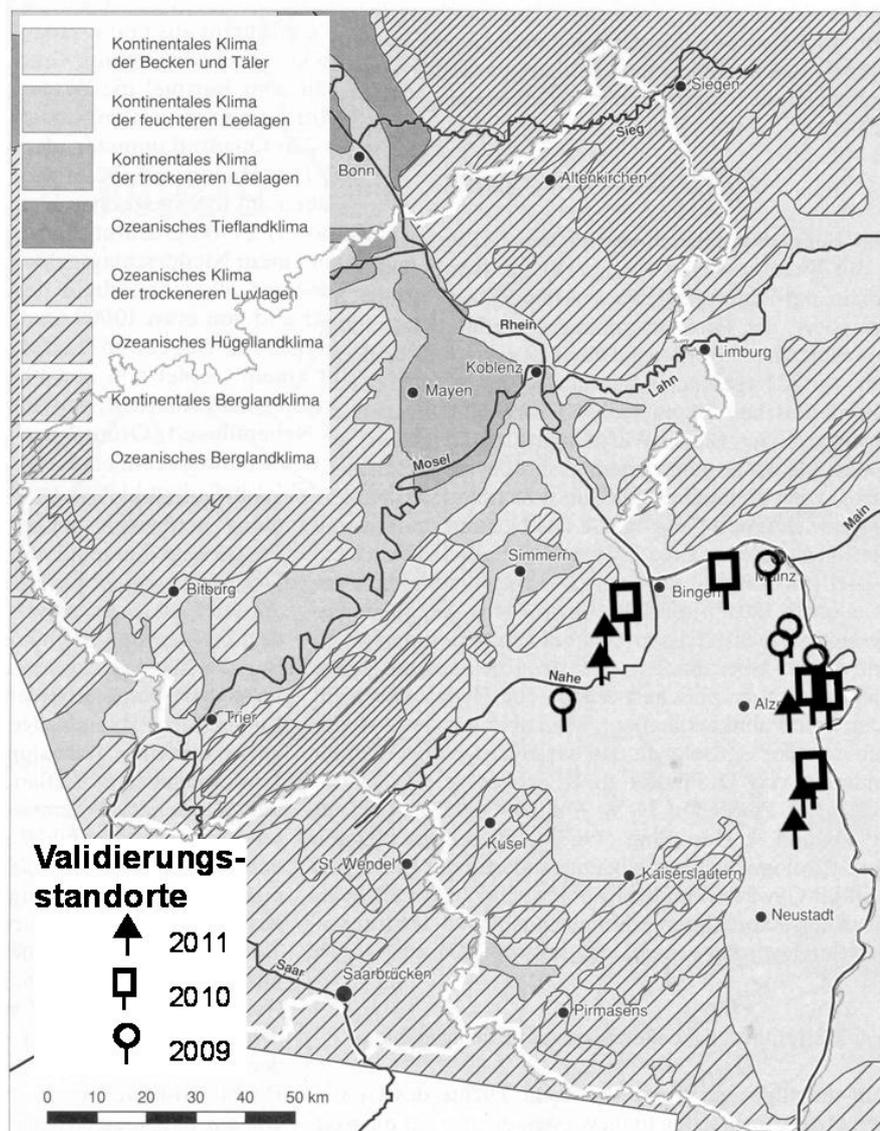


Abbildung 12: Lage der Validierungsstandorte in der Übersichtskarte der Klimatypen in Rheinland-Pfalz und im Saarland (Quelle: verändert nach FISCHER (1989) basierend auf BÖHM (1964) und LIEDTKE (1973))

Durch die klimatische Gunst des Raumes und die vorkommenden guten Bodenverhältnisse ist das Validierungsgebiet ein Raum mit intensiver Landwirtschaft (FISCHER 1989). Diese Tatsache und die

physiogeographischen Faktoren wie der kleinräumige Wechsel der Bodenarten oder das skizzierte Klima, welches durch längere Trockenphasen und hauptsächlich im Sommer fallende Niederschläge nahezu alle Zustände der Bodenfeuchte in ständigem Wechsel vorkommen lässt, lassen das ausgewählte Gebiet für die Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle als besonders geeignet erscheinen.

2.6.2 Beprobungsmethodik

Neben der gravimetrischen Bestimmung der Bodenfeuchte wurden zur Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle Messungen mittels FDR-Sonde (Frequency-Domain-Response-Sonde) durchgeführt. Die Messung mit FDR-Sonden hat ein dielektrisches Messverfahren zur Grundlage, bei welchem aus der Messung der dielektrischen Eigenschaften des Mediums zwischen zwei oder mehreren Elektroden die Bodenfeuchte abgeleitet wird. Die FDR-Technik bestimmt die Dielektrizitätskonstante des Mediums zwischen den Elektroden kapazitiv. Dabei wird die Ladezeit des Kondensators bestimmt, der durch die Elektroden und die Dielektrizität des Mediums gebildet wird. Eine Veränderung der Bodenfeuchte bewirkt eine Veränderung der Dielektrizitätskonstanten und wird im Ablesegerät in Vol. % Bodenfeuchte umgerechnet. Zur Umrechnung wurden die Sonden auf die jeweilige Bodenart geeicht. Die Hersteller garantieren eine Genauigkeit von ± 5 Vol. % ohne Eichung auf die entsprechende Bodenart bzw. Abweichungen von ± 1 Vol. % bei vorausgehender Kalibrierung.

Zum Einsatz kam die Theta-Sonde ML2x der Firma ecoTech. Zu Beginn wurde eine Eichung der Sonde entsprechend den Anweisungen des Herstellers durchgeführt. Hierzu wurde auf dem zu beprobenden Schlag eine „ungestörte“ Bodenprobe mit einem Volumen von 868,59 cm³ entnommen (Abbildung 13). Der Begriff „ungestört“ bezieht sich hierbei und im Folgenden immer auf die aktuelle Feldsituation, d.h. es fand keine Störung der Probe bei ihrer Entnahme im Vergleich zur Feldsituation statt. Grundsätzlich liegen im Bereich des Ackerbaus immer gestörte Böden im eigentlichen Sinne vor. An dieser Probe wurde eine Messung durchgeführt und die Leitfähigkeit bestimmt.



Abbildung 13: Entnahme einer Bodenprobe zur Kalibrierung der Theta-Sonde (eigene Aufnahme)

WHALLEY (1993), WHITE, KNIGHT, ZEGGELIN und TOPP (1994) konnten zeigen, dass es eine einfache lineare Beziehung zwischen der Wurzel der Dielektrizitätskonstante und dem volumetrischen Wassergehalt nach folgender Formel gibt:

$$[5] \sqrt{\epsilon} = a_0 + a_1 * WG$$

wobei:

$\sqrt{\epsilon}$ = Wurzel der Dielektrizitätskonstante

a_0, a_1 = dimensionslose Zwischengrößen

WG = Wassergehalt bei der Probenahme (Vol. %)

Die Beziehung zwischen der Dielektrizitätskonstanten und dem Output der Theta-Sonde in Volt ist ebenfalls bekannt und leitet sich nach folgender Formel ab:

$$[6] \sqrt{\epsilon} = 1,07 + 6,4 * V - 6,4 * V^2 + 4,7 * V^3$$

wobei:

V = Spannung in Volt

Durch diese beiden Beziehungen müssen für eine bodenspezifische Kalibrierung lediglich die dimensionslosen Parameter a_0 und a_1 berechnet werden. Die Kalibrierung erfolgte nach folgenden fünf Schritten:

- Es wurde, wie oben beschrieben, eine Bodenprobe auf dem Schlag in der gewünschten Messposition gezogen und eine Spannungsmessung mit der Theta-Sonde in Volt durchgeführt

($V/nass$). Mit Gleichung [6] konnte $\sqrt{\epsilon/nass}$ berechnet werden. Zudem wurde das Gewicht der Probe bestimmt und das Volumen berechnet.

- Die Bodenprobe wurde ungestört im Trockenschrank bei 105 °C getrocknet und an der vollständig getrockneten Probe ebenfalls eine Spannungsmessung in Volt durchgeführt, $V/trocken$. Mit Gleichung [6] wurde $\sqrt{\epsilon/trocken}$ berechnet. Dieser Wert ergab die Zwischengröße a_0 . Zudem wurde wiederum das Gewicht bestimmt.
- Mit folgender Formel konnte der volumetrische Wassergehalt der Probe bei der Probenahme bestimmt werden:

$$[7] \text{ WG} = (G/nass - G/trocken) / \text{VOL}$$

wobei:

$G/nass$	=	Ausgangsgewicht bei der Probenahme (g)
$G/trocken$	=	Gewicht der Probe nach Trocknung im Trockenschrank (g)
VOL	=	Volumen der Probe

- Mit den berechneten Parametern kann der dimensionslose Parameter a_1 berechnet werden:

$$[8] a_1 = (\sqrt{\epsilon/nass} - \sqrt{\epsilon/trocken}) / \text{WG}$$

- Der Bodenwassergehalt einer kalibrierten Sonde wird dann intern folgendermaßen berechnet und in Vol. % ausgegeben

$$[9] \text{ WG} = ((1,07 + 6,4 * V - 6,4 * V^2 + 4,7 * V^3) - a_0) / a_1$$

Nach der Eichung konnte eine Überprüfung der Genauigkeit des Messverfahrens in landwirtschaftlich genutzten Böden durchgeführt werden. Hierzu wurde eine Bodenprobe zur gravimetrischen Bestimmung der Bodenfeuchte entnommen und direkt neben der Entnahmestelle eine Messung mittels der FDR-Sonde durchgeführt. Die Mittelwerte eines Feldes wurden nach den Laboruntersuchungen verglichen und auf Abweichungen überprüft. Die mittleren Abweichungen zwischen der gravimetrischen Messung und den Messungen mit der Theta-Sonde betrugen 2 Vol. %. Allerdings liegen die Abweichungen zu ca. 25 % bei mehr als 5 Vol. % (Abbildung 14).

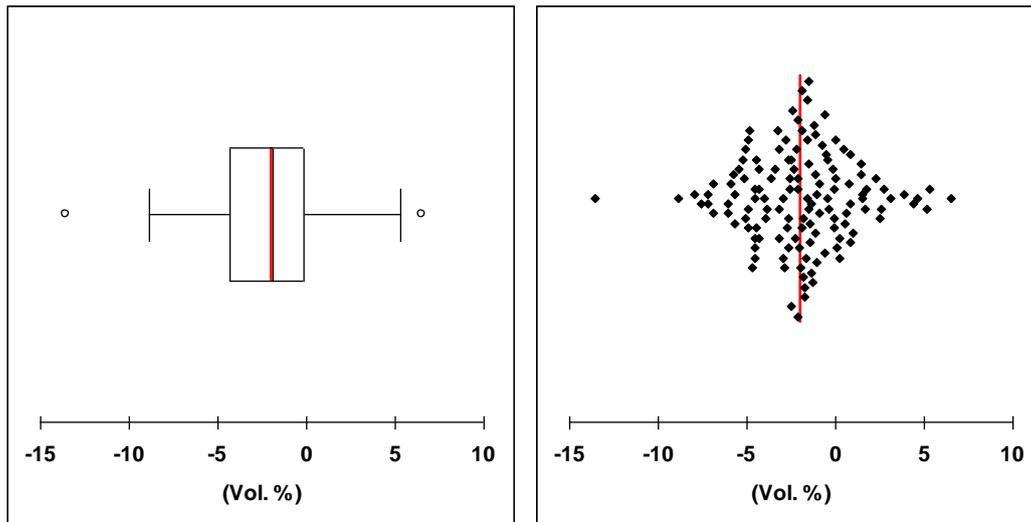


Abbildung 14: Box-Whisker-Plot (links) und Streudiagramm (rechts) der Abweichungen zwischen der gravimetrisch gemessenen Bodenfeuchte und den Messungen mit der Theta-Sonde in Vol. %

Daher wurde der überwiegende Teil der Bodenfeuchtemessungen zur Validierung der Simulationsmodelle durch gravimetrische Messungen erhoben. Zur Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle wurde eine Probe mittels Stechzylinder mit einem Volumen von 100 cm^3 auf dem Schlag entnommen und das Gewicht dieser Probe bestimmt. Im Anschluss erfolgte die Trocknung der Probe bei 105 °C bis zur vollständigen Gewichtskonstanz. Das Gewicht der Probe wurde erneut bestimmt, wobei der Gewichtsverlust mit dem vorher in der Probe vorhandenen Wasser gleichzusetzen ist. Über die Lagerungsdichte erfolgte eine Umrechnung von Gewichtsprozent in Volumenprozent.

Zur Validierung der Bodenfeuchte Modelle wurde im Rahmen der Versuche 2009 bis 2011 eine umfangreiche Bestimmung der Bodenfeuchte mithilfe der beschriebenen Verfahren durchgeführt. Hierzu wurden 321 direkte und 110 indirekte Messungen durchgeführt. Der Bodenfeuchtwert für ein Feld wurde hierbei immer aus einem Mittelwert von vier bis sechs Bodenproben errechnet. Die Validierung fand in den landwirtschaftlich relevanten Monaten von März bis September/Okttober statt.

2.7 Statistische Auswertung

Der Vergleich der modellierten und gemessenen Bodenfeuchtwerte erfolgte mittels statistischer Auswertungen im Rahmen der deskriptiven Statistik, Korrelationstests, Normalverteilungstests und Box-Whisker-Plots. Signifikanzen wurden zum Niveau $\alpha = 0,05$ mit * und zum Niveau $\alpha = 0,01$ mit ** gekennzeichnet. Die Auswertungen wurden mit dem Programm XLSTAT Version 2008.5.01 durchgeführt. Zur gesamthaften Vergleichbarkeit der Differenzen zwischen modellierten und gemessenen Bodenfeuchtwerten bei unterschiedlichen Bodenarten wurde die prozentuale Abweichung der Simulation von der Messung berechnet. Hierbei handelt es sich grundsätzlich um Prozent und nicht um Prozentpunkte.

Zusätzlich fand eine Auswertung hinsichtlich der im Folgenden erläuterten Methodik des gesamten Datensatzes und getrennt nach den einzelnen Bodenarten statt.

Um einen funktionalen linearen Zusammenhang zwischen den im Gelände gemessenen Bodenfeuchtwerten und den modellierten Werten feststellen zu können, wurde eine lineare Regression nach der Gleichung

$$[10] y = a + b * x$$

durchgeführt und die Modellparameter a und b auf Signifikanz gegenüber 0 bzw. 1 überprüft. Hierbei besteht ein funktionaler linearer Zusammenhang der im Gelände gemessenen Bodenfeuchtwerte mit den modellierten Werten, wenn der Modellparameter a nicht signifikant verschieden von 0 ist, d.h. der Achsenabschnitt korrekt getroffen ist. Zudem darf der Modellparameter b, der die Steigung modelliert, keine Signifikanz gegenüber 1 aufweisen. Würden die Modellparameter a und b die Werte 0 und 1 annehmen, ergäbe sich aus der Gleichung der linearen Regression

$$[11] y = 0 + 1 * x$$

bzw. eine Vereinfachung in

$$[12] y = x$$

d.h. es würde eine 100-prozentige Übereinstimmung der gemessenen und der modellierten Bodenfeuchtwerte bestehen. Diese Signifikanz wurde mit einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,01 überprüft.

3. Ergebnisse

3.1 Nutzung von Radarniederschlagsdaten als Eingabeparameter bei der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation

Die Charakterisierung des vom DWD zur Verfügung gestellten Datensatzes hinsichtlich der Anzahl der Messwerte sowie des Maximums und Minimums der Regenstunden ist in Tabelle 6 dargestellt.

Tabelle 6: Monatliche Statistik über die Regenstunden des Validierungszeitraums

	Stunden im Monat pro Zelle	maximale Anzahl Regenstunden einer Zelle		minimale Anzahl Regenstunden einer Zelle		durchschnittliche Anzahl Regenstunden pro Zelle		Summe aller Regenstunden aller Zellen
		absolut	prozentual	absolut	prozentual	absolut	prozentual	
April	720	118	16,39	0	0	11,05	1,53	4.384.373
Mai	744	431	57,93	0	0	115,7	15,55	45.908.175
Juni	720	688	95,56	0	0	93,59	13,00	37.135.098
Juli	744	688	92,47	12	1,61	118,22	15,89	46.906.674
August	744	693	93,15	1	0,13	74,45	10,01	29.541.063
September	720	686	95,28	5	0,69	87,31	12,13	34.643.877
Oktober	744	691	92,88	0	0	38,39	5,16	15.431.030

Die monatliche Aufsummierung der Niederschlagsstunden für alle Rasterzellen ergab einen guten Überblick über die flächendeckende Niederschlagsverteilung in Deutschland (Abbildung 15). Die Monate April und Oktober des Jahres 2007 stellten sich hierbei als die trockeneren Monate des Untersuchungszeitraums und die Monate Mai, Juni und Juli als niederschlagsreichere Monate dar. Anzumerken ist, dass die in allen Monaten auftretenden „dunklen Flecken“ im Bereich von Hannover, nord-westlich von Magdeburg, im Raum Dresden und westlich von Ulm auf Fehler im Radarsystem zurückgehen, an deren Behebung der DWD arbeitet.

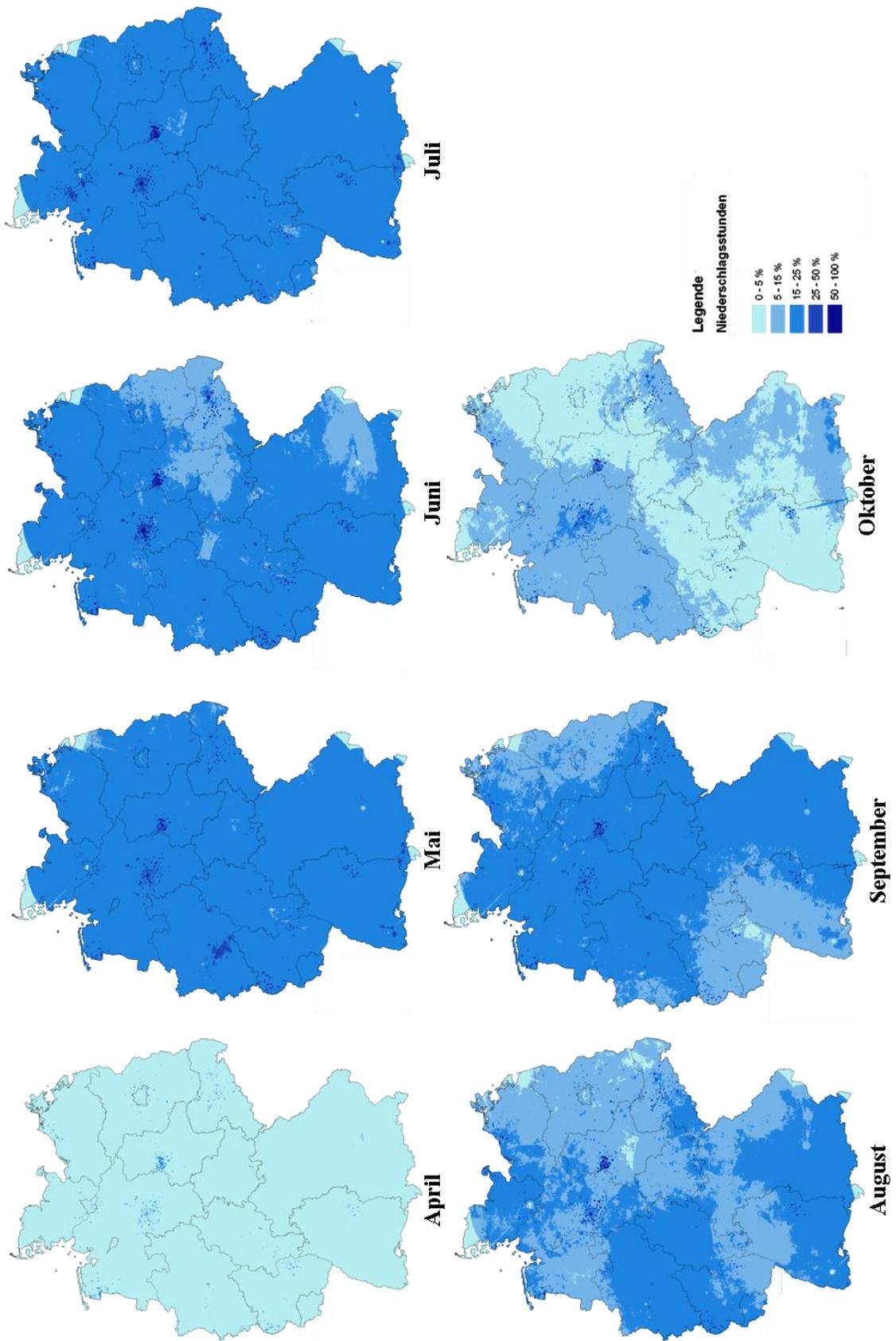


Abbildung 15: Prozentualer Anteil der Niederschlagsstunden an den Stunden des jeweiligen Monats im Verlauf von April bis Oktober 2007 in Deutschland

3.1.1 Vergleich der Niederschlagshöhen

Zum Vergleich der mittleren Abweichungen der Niederschlagshöhen wurden die Differenzen der Radolandaten mit den Werten der Landesstationen gebildet und mittels Box-Whisker-Plots dargestellt und verglichen. Anhand der kleinen Spannweite der Whisker war abzulesen, dass 95 % der Werte um den Nullpunkt konzentriert lagen. Dies wurde ebenfalls durch die Streudiagramme verdeutlicht, welche die Konzentration der Werte um den Nullpunkt aufzeigten (Abbildung 16).

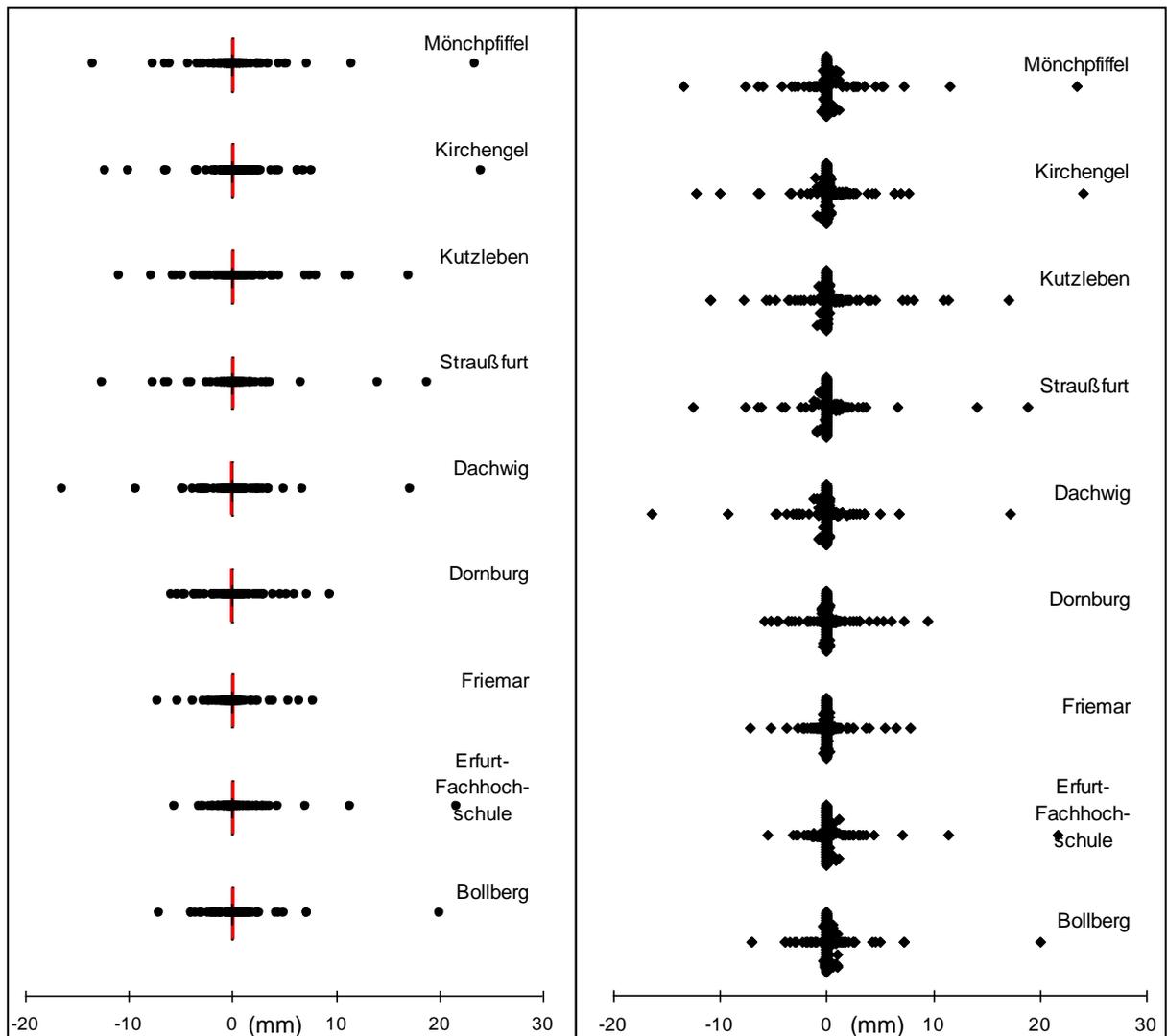


Abbildung 16: Box-Whisker-Plots (links) und Streudiagramm (rechts) der mittleren Abweichungen der Differenzen der Radarmesswerte abzüglich der Messwerte der Landesstationen während Niederschlagsstunden am Beispiel des Validierungsgebietes Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station]

Diese Ergebnisse hingen in erster Linie damit zusammen, dass eine sehr gute Übereinstimmung beider Messverfahren zur Aufzeichnung von Niederschlägen besteht. In den Validierungsgebieten lag diese Übereinstimmung durchgehend bei über 90 %. Die durchschnittlichen mittleren Abweichungen der stündlichen Differenzen aller Validierungsstationen zwischen Radolan und den Bodenstationen lagen zwischen -0,06 und 0,04 mm Niederschlag. Bei einigen der Validierungsgebiete lagen die Ergebnisse sogar deutlich unter diesem Durchschnitt. Im Gebiet Unterfranken lagen die mittleren Abweichungen

der Differenzen im August lediglich bei 0,01 mm Niederschlag. Allerdings kam es an allen Stationen zu maximalen Abweichungen von 10 bis teilweise 20 mm. Hierbei wurden sowohl von den Regenmessern am Boden wie auch von den Radarstationen höhere Niederschläge verzeichnet.

Aufgrund der hohen Übereinstimmung beider Messverfahren über das Vorhandensein von Niederschlag erfolgte ein zweiter Vergleich der mittleren Abweichungen. Dabei wurden nur die Regenstunden betrachtet. Hierbei ergaben sich analoge Ergebnisse, was die Streuung um den Nullpunkt betrifft (Abbildung 17).

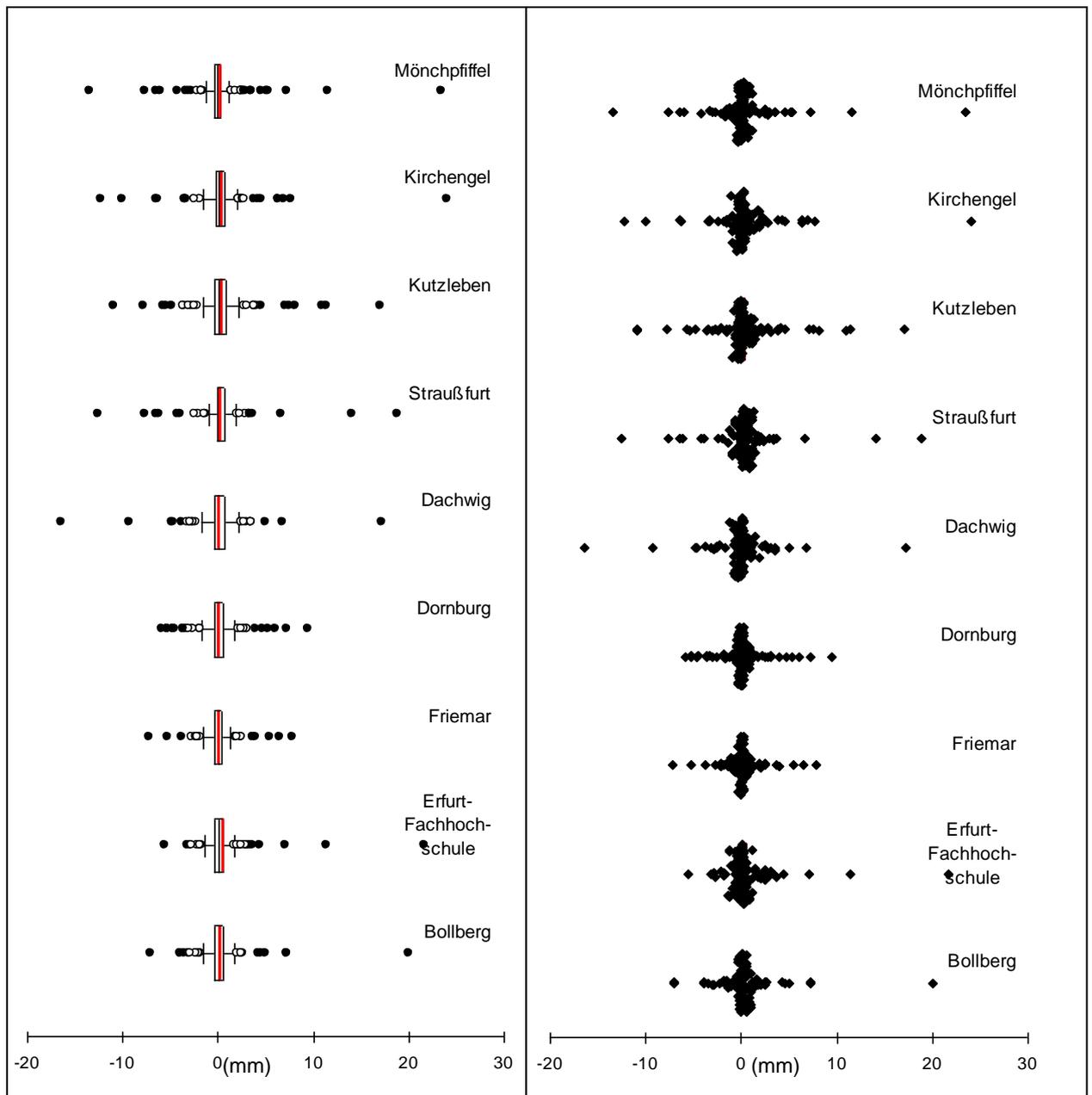


Abbildung 17: Box-Whisker-Plots (links) und Streudiagramm (rechts) der mittleren Abweichungen der Differenzen der Radarmesswerte abzüglich der Messwerte der Landesstationen während Niederschlagsstunden am Beispiel des Validierungsgebietes Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station]

Die Ausdehnung der Boxplots war größer als im gesamthaften Vergleich aller Stunden, lag jedoch unter 1 mm Niederschlagsdifferenz. Auch die Whisker hatten eine größere Spannbreite, insgesamt lagen aber 95 % der Werte unter 2 mm Niederschlagsabweichung (Abbildung 17). Wurden alle Stationen betrachtet, lagen die durchschnittlichen mittleren Abweichungen der Validierungsgebiete zwischen -0,25 und 0,36 mm Niederschlag (Tabelle 7 und Tabelle 8).

Tabelle 7: Ergebnisse der Validierung in den Validierungsgebieten im Monat Mai

Mai 07	Raum Dresden	Nord-Thüringen	Unterfranken	Rhein-Main-Gebiet	Raum Bodensee	Raum München
stündliche Abweichung im Mittel (mm)	0,04	0,04	0,02	0,04	-0,05	-0,06
Abweichungen im Mittel in Regenstunden (mm)	0,36	0,24	0,14	0,18	-0,21	-0,25
Übereinstimmung Niederschlag (%)	89,72	90,28	90,52	89,51	90,1	92,76
Übereinstimmung Blattnässe (%)	99,7	99,7	99,9	99,9	99,9	99,9

Tabelle 8: Ergebnisse der Validierung in den Validierungsgebieten im Monat August

August 07	Raum Dresden	Nord-Thüringen	Unterfranken	Rhein-Main-Gebiet	Raum Bodensee	Raum München
stündliche Abweichung im Mittel (mm)	0,02	0,02	0,01	0	0	0
Abweichungen im Mittel in Regenstunden (mm)	0,25	0,19	0,06	0	0	0,01
Übereinstimmung Niederschlag (%)	93,93	93,41	93,05	92,92	89,26	90,91
Übereinstimmung Blattnässe (%)	99,9	99,9	99,9	99,9	99,8	100

Die maximalen Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Messwerte der Landesstationen lagen im Mittel aller Stationen im Bereich zwischen 21,15 und -25,12 mm. Sie sind in Abbildung 18 beispielhaft für das Validierungsgebiet Nord-Thüringen im Mai 2007 dargestellt.

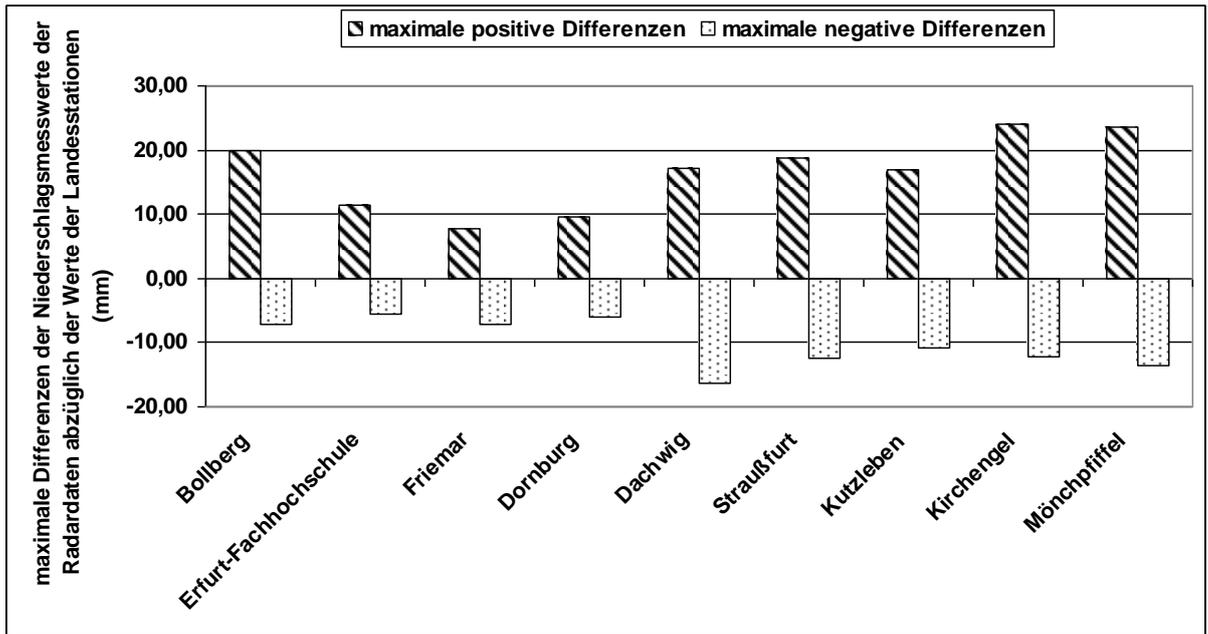


Abbildung 18: Maximale Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Werte der Landesstationen (mm) im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) (n=744/Station]

Die Abweichungen in der Summe betragen Werte bis zu 30 mm Niederschlagsdifferenz (Abbildung 19). An den Box-Whisker-Plots war zu sehen (Abbildung 17), dass sich die extremen Abweichungen auf einige wenige Ausreißer konzentrierten.

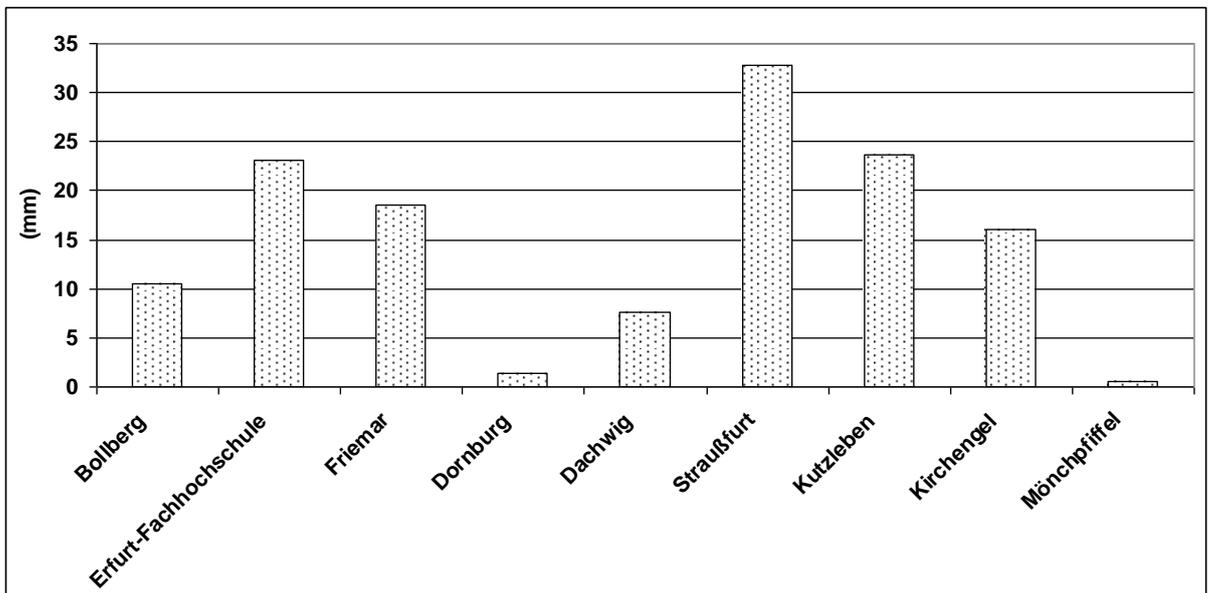


Abbildung 19: Summe der Differenzen der Radardaten abzüglich der Werte der Landesstationen [mm] für das Validierungsgebiet Nord-Thüringen (August 2007) [n=744/Station]

3.1.2 Vergleich der Niederschlagsstunden

Eine weitere Auswertung des Datensatzes erfolgte über den Vergleich der Niederschlagsstunden. Hierbei war eine Niederschlagsstunde als Stunde, in welcher mindestens 0,1 mm Niederschlag gefallen war, definiert. Mit diesem Verfahren wurde die Übereinstimmung von Niederschlags- und Trockenstunden zwischen den landeseigenen Wetterstationen und den Radolanwerten bestimmt.

Die Übereinstimmungen bei den Validierungsgebieten lagen durchgehend bei ca. 90 %, im August 2007 erreichte die Übereinstimmung bei den Gebieten Sachsen, Thüringen und Unterfranken Ergebnisse von über 93 % (Abbildung 20). Im Mittel aller Stationen lag die Übereinstimmung bei 91,36 % (siehe auch Tabelle 7 und Tabelle 8).

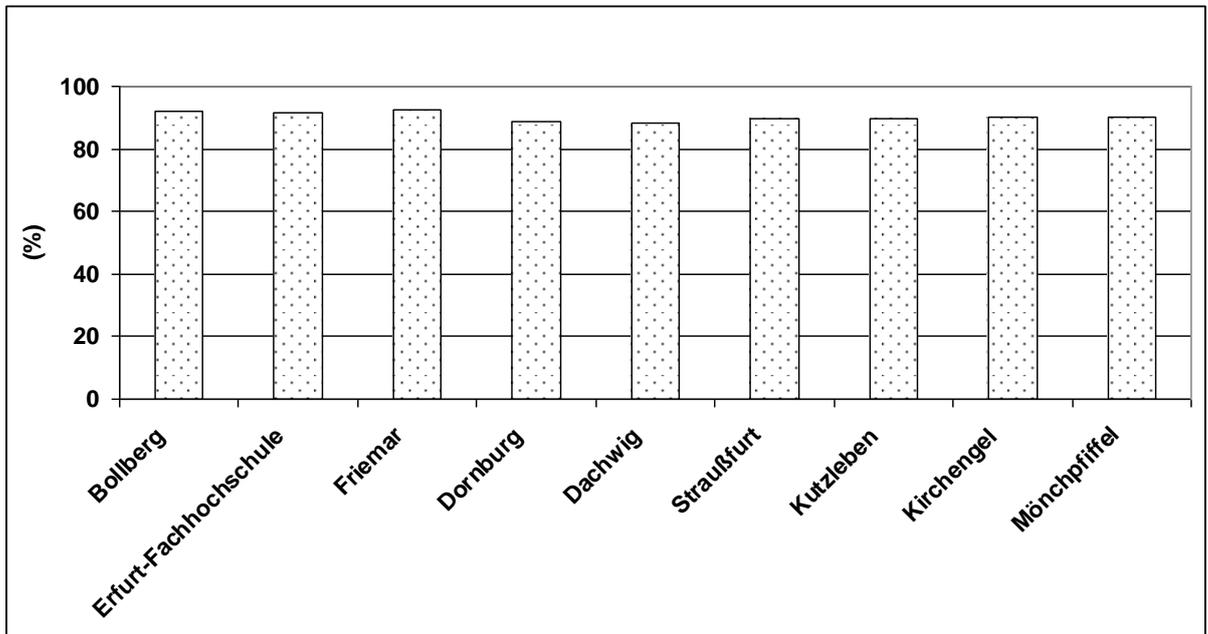


Abbildung 20: Prozentuale Übereinstimmung der Niederschlags- und Trockenstunden zwischen den Radolanwerten und den Daten der Landesstationen im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) [n=744/Station]

Ein zweiter Vergleich, in welchem eine Stunde erst als Niederschlagsstunde bezeichnet wurde, wenn mindestens 1 mm Niederschlag gefallen war, ergab höhere Übereinstimmungen beider Verfahren. Hier lagen die Werte der Validierungsgebiete bei einer prozentualen Übereinstimmung von 95,42 % (Abbildung 21). Dieses Ergebnis war in allen Validierungsgebieten ähnlich zu bewerten.

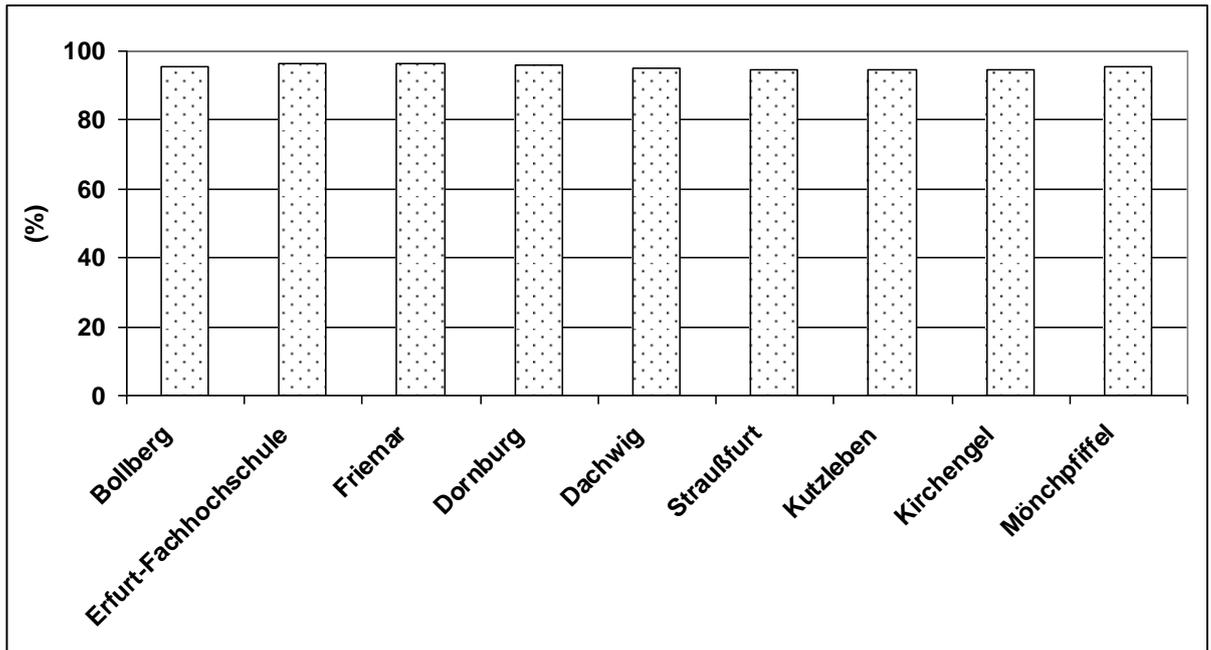


Abbildung 21: Prozentuale Übereinstimmung der Niederschlags- und Trockenstunden zwischen den Radolanwerten und den Daten der Bodenstationen im Validierungsgebiet Nord-Thüringen (Mai 2007) ab einer Niederschlagshöhe von 1 mm [n=744/Station]

3.1.3 Zusammenfassung

Im Vergleich der Niederschlagshöhen der Radolandaten und der Daten der Wetterstationen der Pflanzenschutzdienste der Länder ergaben sich hohe Übereinstimmungen, wodurch eine Nutzung als Eingangswerte in die Bodenfeuchtesimulationsmodelle in betracht gezogen werden kann.

Festzuhalten ist, dass die mittleren stündlichen Abweichungen bzw. die mittleren stündlichen Abweichungen während Regenstunden gering sind. Sie liegen im Vergleich aller Stunden zwischen -0,06 und 0,04 mm Niederschlagsdefizit. Bei reiner Betrachtung der Regenstunden liegen die Abweichungen im Mittel zwischen -0,25 und 0,36 mm Niederschlag.

Die niedrigen Abweichungen im Vergleich der Niederschlagshöhen sowie der Niederschlagsstunden bilden gute Voraussetzungen für eine zukünftige Verwendung der Niederschlagswerte aus Radarmessungen als Eingangsparameter bei der Bodenfeuchtesimulation. Mit einer hohen räumlichen und zeitlichen Auflösung für Deutschland im Raster von einem Quadratkilometer ermöglichen sie eine genauere Bodenfeuchtesimulation im Bereich zwischen den Wetterstationen.

Die Validierungsergebnisse aus den flächenhaften Radarniederschlagsdaten zeigen, dass die Nachteile der Niederschlagsmessung mit ungleichmäßig verteilten Wetterstationen ausgeglichen werden könnten. Durch die Integration der flächendeckenden Niederschlagsmessungen wäre eine schlagspezifische Bodenfeuchtesimulation möglich und in einem zweiten Schritt eine Verbesserung der Schaderregerprognose zu erwarten.

3.2 Bilanzgleichung

3.2.1 Validierungsergebnisse nach Bodenarten

Die Ergebnisse der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Bilanzgleichung von den Messungen im Gelände sind im Box-Whisker-Plot in Abbildung 22 nach Bodenarten getrennt dargestellt. Die mittleren Abweichungen liegen zwischen 0,65 % im Falle der Bodenart stark lehmiger Sand und 11,76 % bei der Bodenart Lehm, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigt. 50 % der Werte liegen im Bereich von -25 bis 27 % Abweichungen der Simulation von der Messung. Die mittleren Abweichungen liegen bei den unterschiedlichen Bodenarten im positiven Bereich. Ein Test auf Normalität der Daten ergab eine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$). Damit liegt eine signifikante Modellüberschätzung vor.

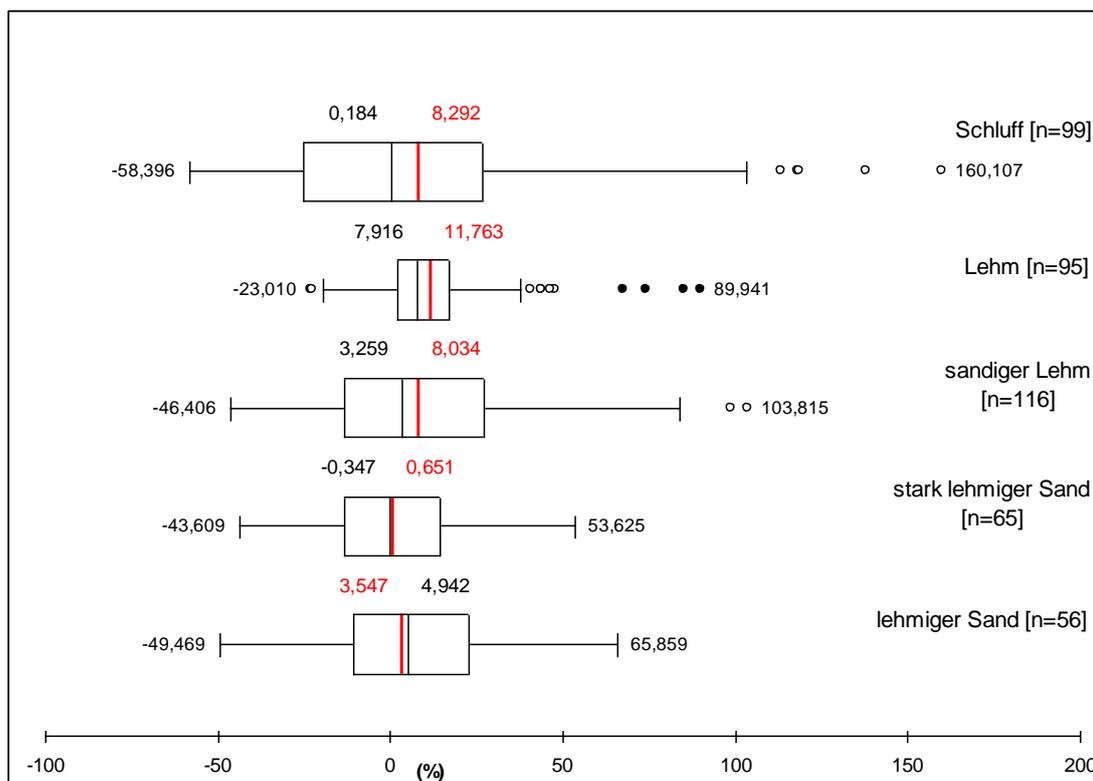
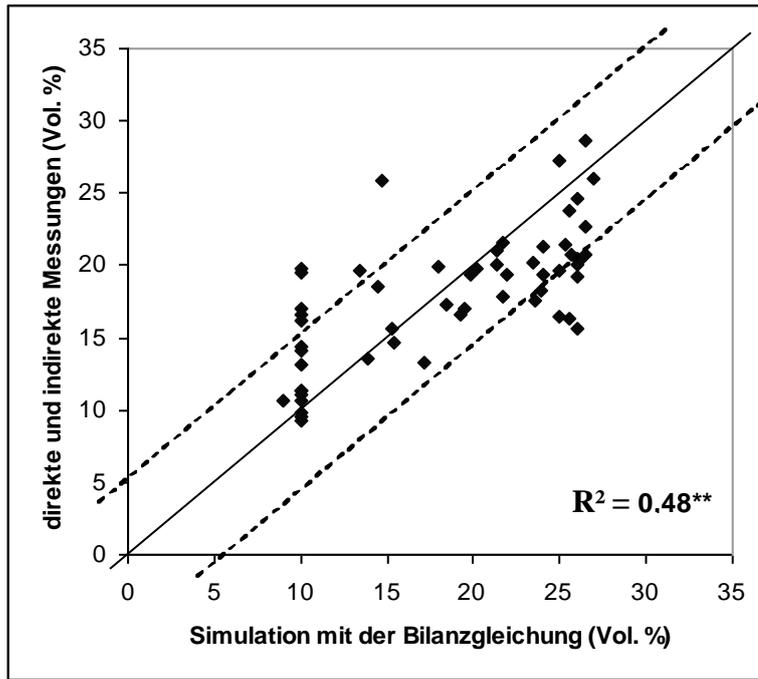


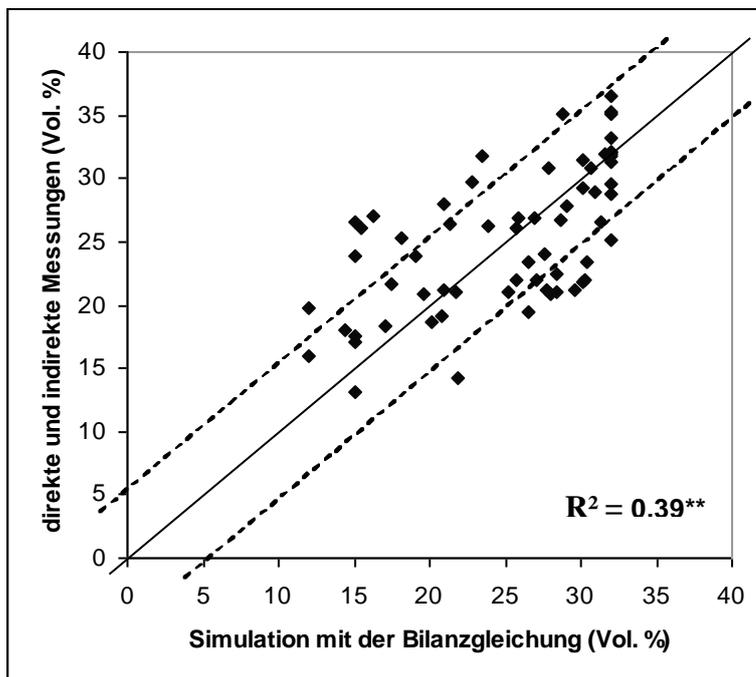
Abbildung 22: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit der Bilanzgleichung von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten nach Bodenarten getrennt

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ (Abbildung 23 bis Abbildung 27 und Tabelle 9). Die Korrelationskoeffizienten liegen bei den unterschiedlichen Bodenarten zwischen $0,28^{**}$ und $0,48^{**}$. Abbildung 23 bis Abbildung 27 zeigen, dass sich die korrelierten Wertepaare häufig außerhalb des Bereiches von ± 5 Vol. % Abweichungen von der 1:1-Linie befinden. Die Abweichungen liegen somit höher als der Varianzbereich bei den Probenahmen im Feld ist bzw. wie er bei indirekten Messverfahren vorkommt.



— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 23: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart lehmiger Sand [n=56]



— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 24: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart stark lehmiger Sand [n=65]

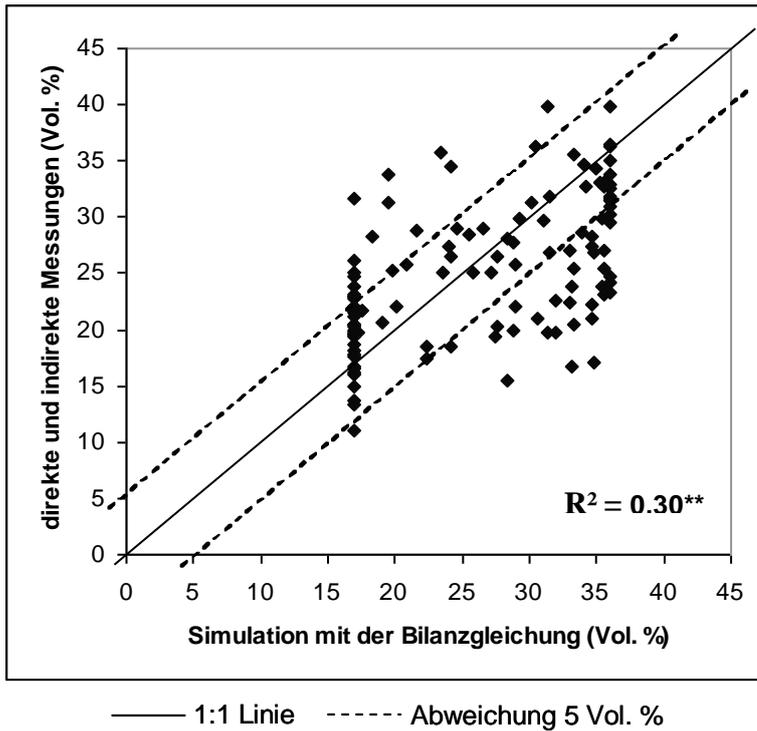


Abbildung 25: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart sandiger Lehm [n=116]

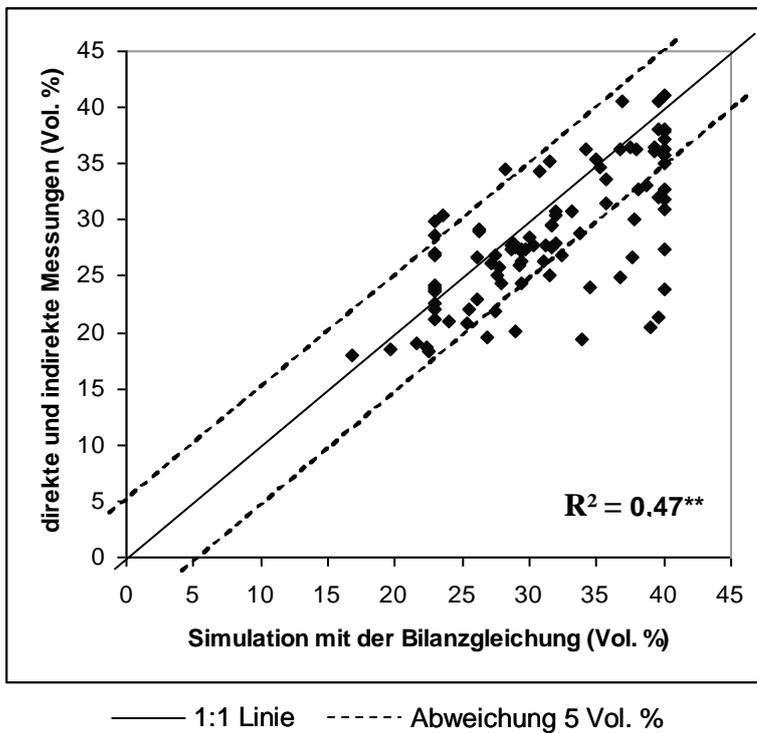


Abbildung 26: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart Lehm [n=95]

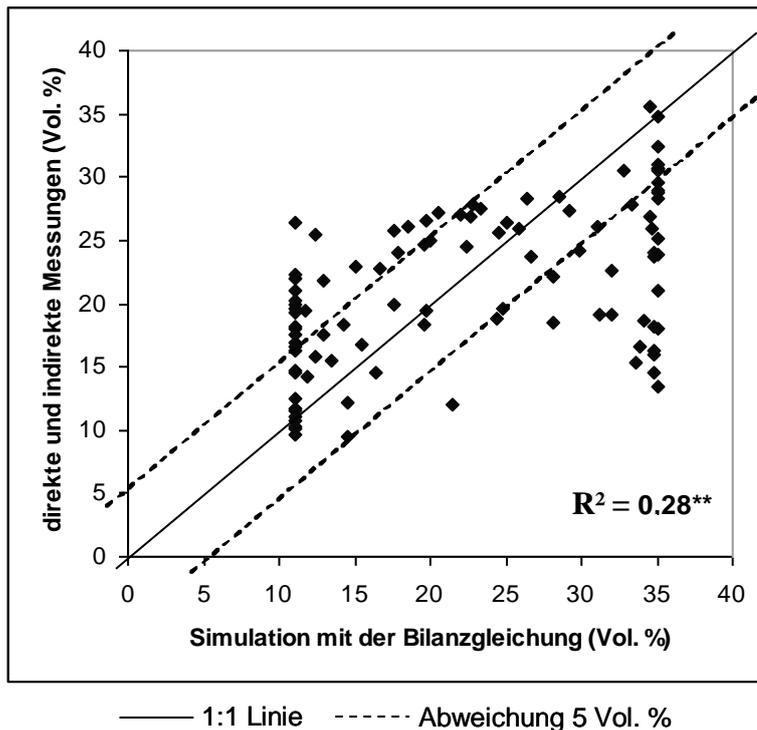


Abbildung 27: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten für die Bodenart Schluff [n=99]

Das Ergebnis der statistischen Auswertung der linearen Regressionen nach Bodenarten ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Signifikanzen wurden mit einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,01 überprüft. Der Modellparameter b der linearen Regressionsgleichung weist bei keiner der Bodenarten Signifikanzen gegenüber 1 auf, d. h. der funktionale Zusammenhang zwischen gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten besteht. Der Modellparameter a der linearen Regressionsgleichung weist in einem Fall, bei der Bodenart stark lehmiger Sand, eine Signifikanz gegenüber 0 auf, d. h. bei dieser Bodenart ist der Achsenabschnitt der linearen Regression nicht korrekt getroffen.

Tabelle 9: statistische Validierung der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Bilanzgleichung nach Bodenarten

	R ²	lineare Regression	
		Signifikanz Achsenabschnitt gegenüber 0	Signifikanz Steigung gegenüber 1
gesamt (n=431)	0,46**	n.s.	n.s.
lehmiger Sand (n=56)	0,48**	n.s.	n.s.
stark lehmiger Sand (n=65)	0,39**	s.	n.s.
sandiger Lehm (n=116)	0,30**	n.s.	n.s.
Lehm (n=95)	0,47**	n.s.	n.s.
Schluff (n=99)	0,28**	n.s.	n.s.

3.2.2 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation mit der Bilanzgleichung von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten sind im Box-Whisker-Plot gesamthaft für alle

431 Datenpaare in Abbildung 28 dargestellt. Die mittleren Abweichungen liegen bei 7,23 %. 50 % der Werte liegen im Bereich von -12 bis 21 % Abweichungen der Simulation von der Messung.

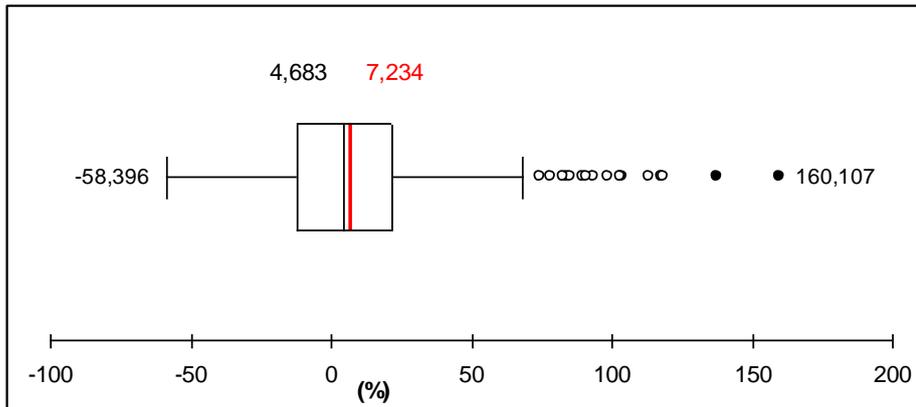


Abbildung 28: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit der Bilanzgleichung von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten [n=431]

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,01 und einem Korrelationskoeffizienten von 0,46** (Abbildung 29). Das Ergebnis der statistischen Auswertung der linearen Regressionen über den gesamten Datensatz ist in Tabelle 9 dargestellt. Die Signifikanzen wurden mit einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,01 überprüft. Die Modellparameter a und b der linearen Regressionsgleichung weisen keine Signifikanzen gegenüber 0 bzw. 1 auf, d. h. der funktionale Zusammenhang zwischen gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten besteht. Die Streuung um die 1:1-Linie liegt zu 50 % außerhalb des Bereichs von +/- 5 Vol. %.

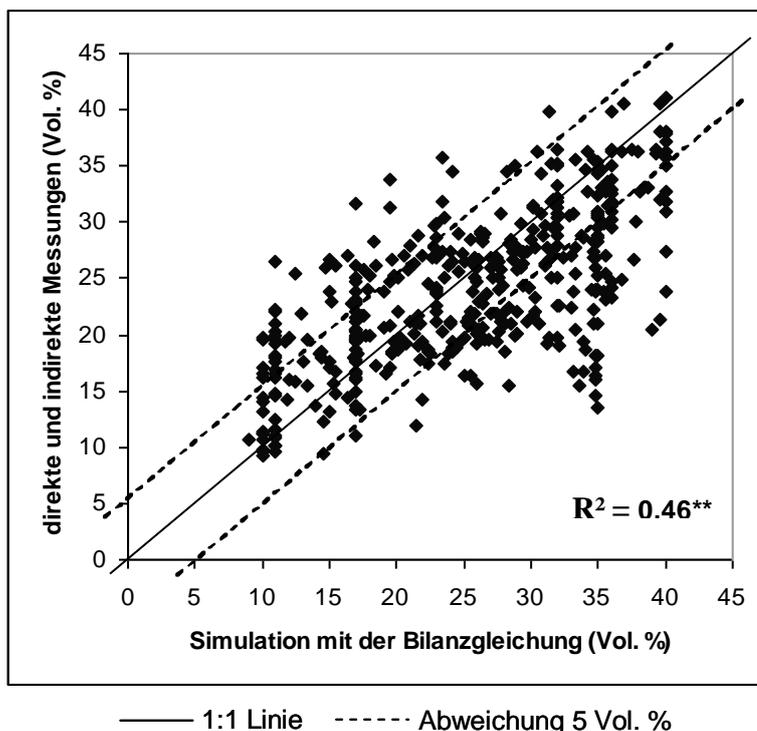


Abbildung 29: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit der Bilanzgleichung modellierten Werten [n=431]

3.3 SpeichermodeLL SIMPEL

3.3.1 Modellberechnung

3.3.1.1 Validierungsergebnisse mit der Verdunstungsberechnung nach HAUDE und PENMAN für die Standorte des Jahres 2009

Die Ergebnisse der Bodenfeuchtesimulation für die Standorte des Jahres 2009 mit den unterschiedlichen Verfahren zur Verdunstungsberechnung sind in Box-Whisker-Plots in Abbildung 30 dargestellt. Die Modellierung des Bodenwassergehaltes mit SIMPEL und der Verdunstungsberechnung nach PENMAN ergab eine mittlere Abweichung der Simulation von der Messung von 3,76 %. Bei diesem Verfahren liegen 50 % der Werte zwischen -5,32 und 15,47 % Abweichungen des Bodenwassergehaltes. Ein Test auf Normalität der Daten ergab eine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$). Somit liegt eine signifikante Modellüberschätzung bei der Simulation der Bodenfeuchte vor.

Bei der Modellierung mit SIMPEL und der Verdunstungsberechnung nach HAUDE kam es zu mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung von 0,81 %. 50 % der Werte liegen hier zwischen -4,66 und 11,30 % Abweichungen der Simulation von der Messung. Sowohl die mittleren Abweichungen, als auch die Lage der Abweichungen näher um den Nullpunkt geben damit in dieser Modellvariante die genauere Simulation im Vergleich zu den Geländeproben wieder.

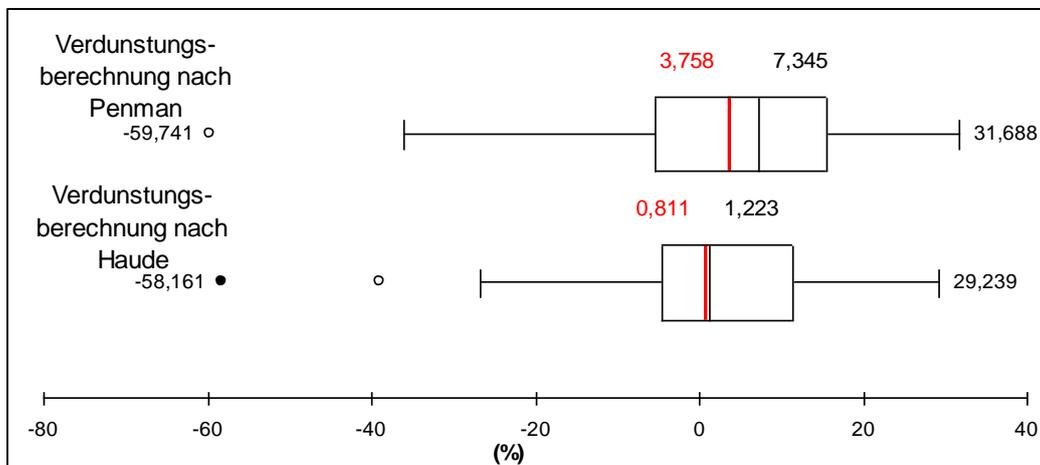


Abbildung 30: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den gravimetrischen Bodenfeuchtemessungen [n=70]

3.3.1.2 Validierungsergebnisse nach Bodenarten

Die Ergebnisse der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Verdunstungsberechnung nach HAUDE sind im Box-Whisker-Plot in Abbildung 31 nach Bodenarten getrennt dargestellt. Die mittleren Abweichungen liegen zwischen 0,39 im Falle der Bodenart Lehm und -7,89 bei der Bodenart lehmiger Sand, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigt. 50 % der Werte liegen im Bereich von -22 bis 15 % Abweichungen der Simulation von der Messung. Die mittleren Abweichungen liegen bei den unterschiedlichen Bodenarten sowohl im

positiven als auch im negativen Bereich. Ein Test auf Normalität der Daten ergab keine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$). Damit liegt keine systematische Modeluntererschätzung bzw. Modellüberschätzung vor.

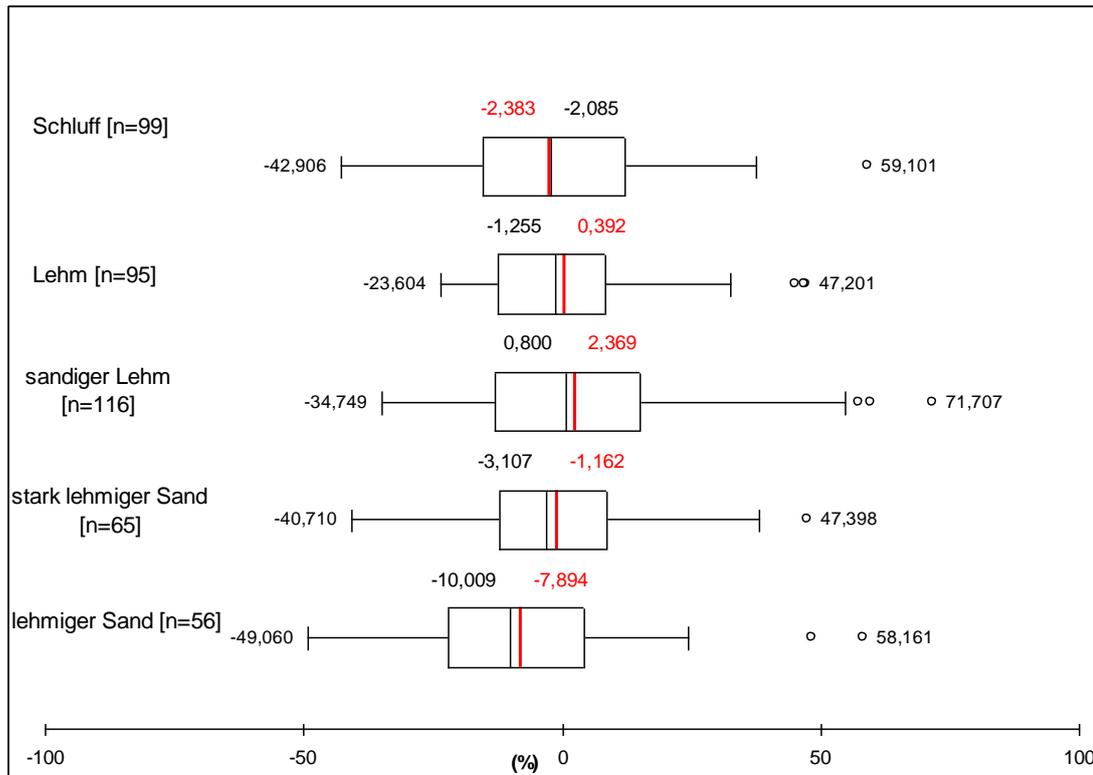
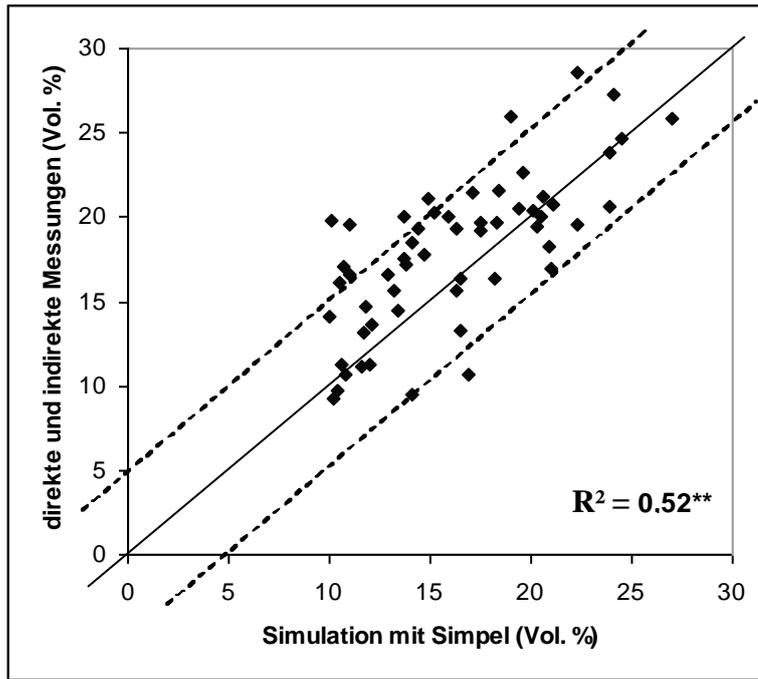


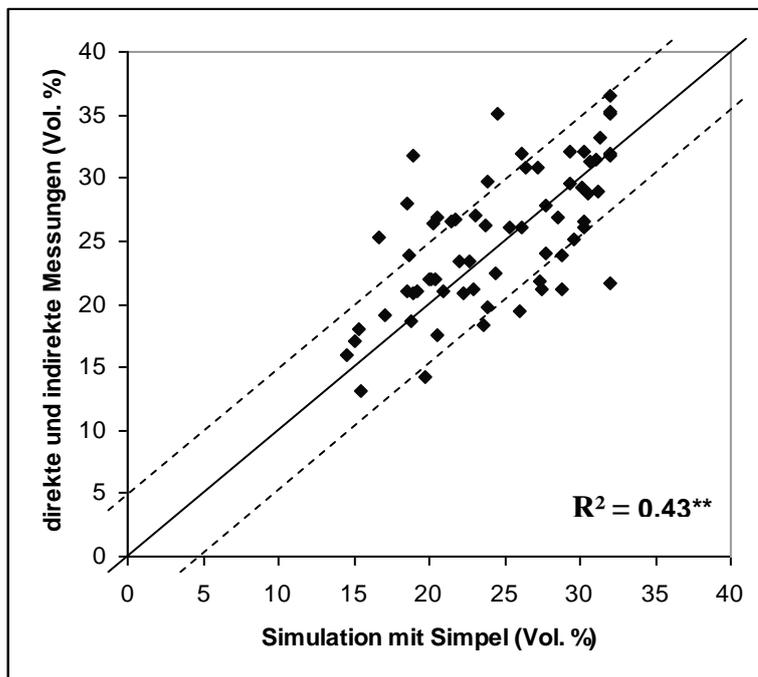
Abbildung 31: Box-Whisker-Plots der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten nach Bodenarten getrennt

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ (Abbildung 32 bis Abbildung 36 und Tabelle 10). Die Korrelationskoeffizienten liegen bei den unterschiedlichen Bodenarten zwischen $0,43^{**}$ und $0,66^{**}$. Abbildung 32 bis Abbildung 36 zeigen, dass sich die Mehrheit der Werte im Bereich von ± 5 Vol. % Abweichungen von der 1:1-Linie befindet. Die Abweichungen liegen somit in einem Varianzbereich, der auch bei der Probenahme im Feld vorzufinden ist bzw. der bei indirekten Messverfahren vorkommt.



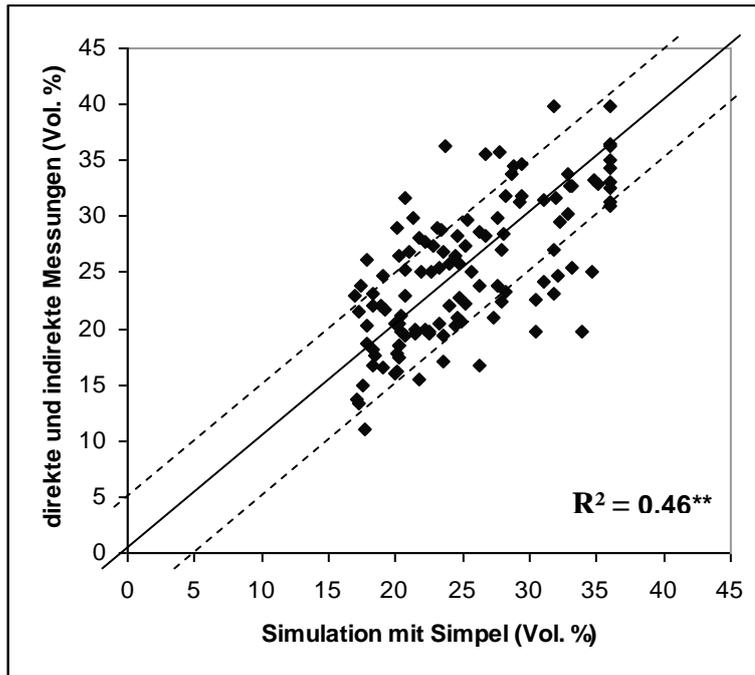
— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 32: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart lehmiger Sand [n=56]



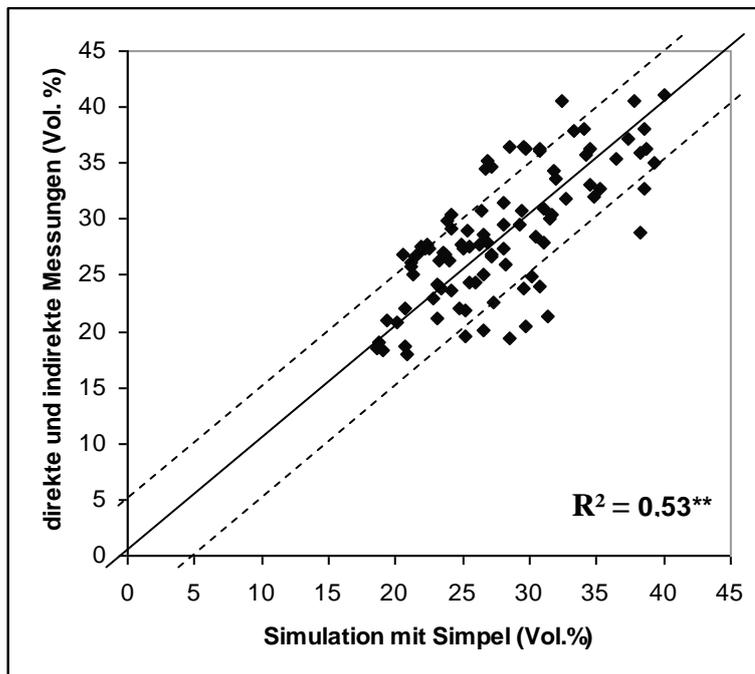
— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 33: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart stark lehmiger Sand [n=65]



— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 34: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart sandiger Lehm [n=116]



— 1:1 Linie - - - - - Abweichung 5 Vol. %

Abbildung 35: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart Lehm [n=95]

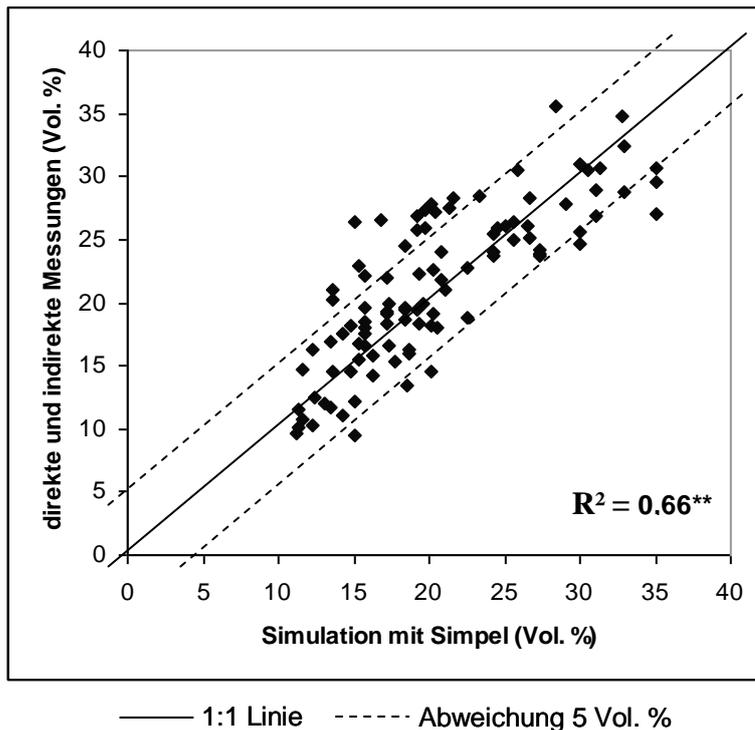


Abbildung 36: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten für die Bodenart Schluff [n=99]

Das Ergebnis der statistischen Auswertung der linearen Regressionen nach Bodenarten ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Signifikanzen wurden mit einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,01 überprüft. Die Modellparameter a und b der linearen Regressionsgleichung wiesen bei keiner der Bodenarten Signifikanzen gegenüber 0 bzw. 1 auf, d. h. der funktionale Zusammenhang zwischen gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten besteht.

Tabelle 10: statistische Validierung der Bodenfeuchtesimulation mit SIMPEL nach Bodenarten

	R ²	lineare Regression	
		Signifikanz Achsenabschnitt gegenüber 0	Signifikanz Steigung gegenüber 1
gesamt (n=431)	0,64**	n.s.	n.s.
lehmiger Sand (n=56)	0,52**	n.s.	n.s.
stark lehmiger Sand (n=65)	0,43**	n.s.	n.s.
sandiger Lehm (n=116)	0,46**	n.s.	n.s.
Lehm (n=95)	0,53**	n.s.	n.s.
Schluff (n=99)	0,66**	n.s.	n.s.

3.3.1.3 Zusammenfassung

Die Ergebnisse der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten sind im Box-Whisker-Plot gesamthaft für alle 431 Datenpaare in Abbildung 37 dargestellt. Die mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung liegen bei -1,24 %. 50 % der Werte liegen im Bereich von -15 bis 10 % Abweichungen der Simulation von der Messung.

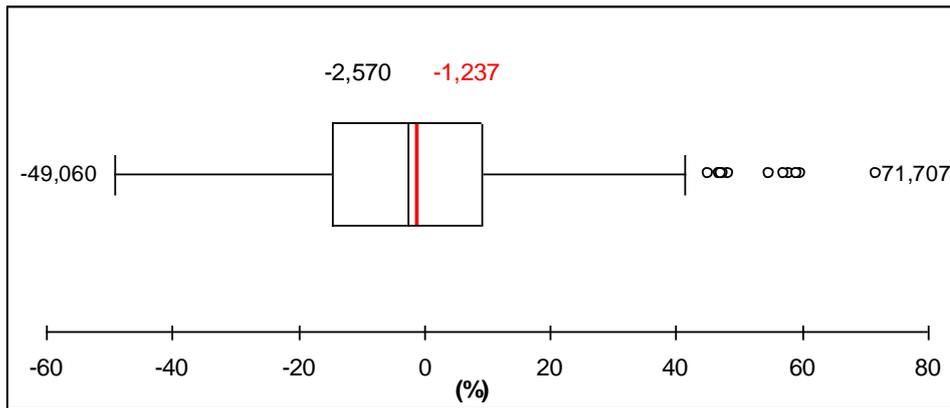


Abbildung 37: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten [n=431]

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ und einem Korrelationskoeffizienten von 0,64 (Abbildung 38). Das Ergebnis der statistischen Auswertung der linearen Regressionen über den gesamten Datensatz ist in Tabelle 10 dargestellt. Die Signifikanzen wurden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ überprüft. Die Modellparameter a und b der linearen Regressionsgleichung wiesen keine Signifikanzen gegenüber 0 bzw. 1 auf, d. h. der funktionale Zusammenhang zwischen gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten besteht. Ein Test auf Normalität der Daten ergab keine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$). Damit liegt keine systematische Modeluntererschätzung bzw. Modellüberschätzung vor.

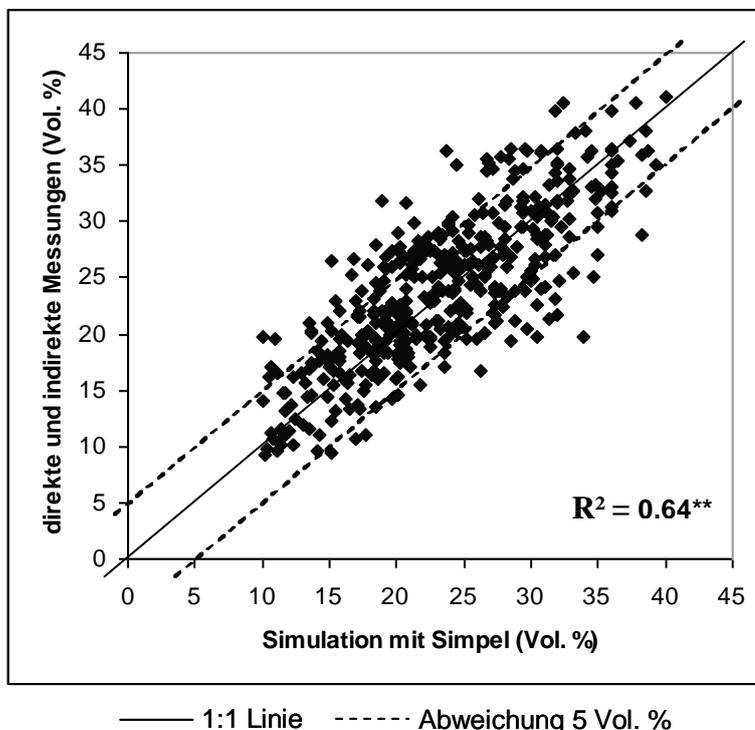


Abbildung 38: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten [n=431]

3.3.2 Standortspezifische Prognose

Zusätzlich wurde das Speichermodell SIMPEL hinsichtlich der Genauigkeit der standortspezifischen Bodenfeuchtesimulation mit den Radarniederschlagsdaten und den interpolierten Werten für Temperatur und relative Luftfeuchte als Inputparameter validiert. Mit diesen Inputparametern konnte die Bodenfeuchte spezifisch für die Validierungsstandorte der Jahre 2010 und 2011 bis auf einen Quadratkilometer genau berechnet werden. Der Vergleich der Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation mit den Daten der Wetterstationen (siehe 3.3.1.3) und der Simulation mit den interpolierten Wetterdaten sowie den Radarniederschlagsdaten gegenüber dem im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten ist in Abbildung 39 dargestellt. Die Ausdehnung der Whisker zeigt eine nahezu identische Spannweite. Während die Simulation auf Basis der Wetterdaten der Wetterstationen eher eine geringe Unterschätzung aufweist, ergaben sich bei der Simulation mit den interpolierten Daten eher geringfügige Überschätzungen, die mittleren prozentualen Abweichungen der Simulation von der Messung liegen bei -0,87 bzw. 3,82 %. Die Box der 50 % der Werte liegt bei der Simulation mit den interpolierten Daten zentriert über dem Nullpunkt. Bei der Simulation mit den Wetterstationsdaten ist die Box leicht in den negativen Bereich verschoben.

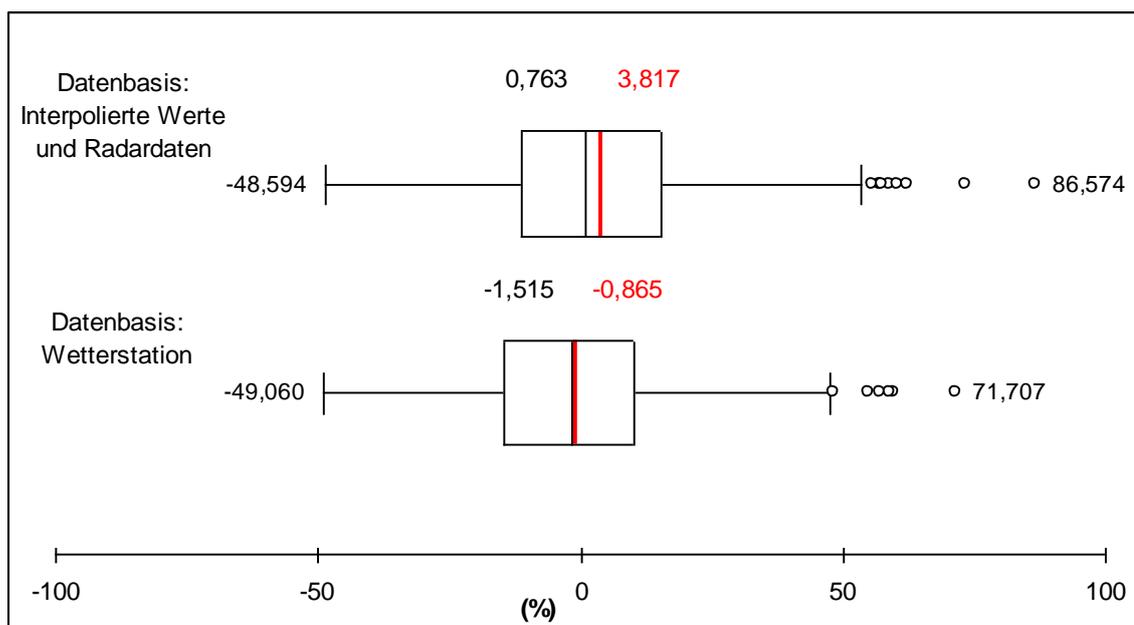


Abbildung 39: Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Bodenfeuchtesimulationen mit SIMPEL von den im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten der Validierungsstandorte der Jahre 2010 und 2011 mit der Datenbasis der Wetterdaten von den Wetterstationen bzw. den interpolierten Wetterdaten und den Radarniederschlagsdaten [n=357]

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich mit der Simulation auf Basis der interpolierten Wetterdaten und der Radarniederschlagsdaten ebenfalls eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$. Der Korrelationskoeffizient liegt mit $0,64^{**}$ auf gleicher Höhe wie bei der Simulation mit den Daten der Wetterstationen (Abbildung 38). Die durchgeführte lineare Regression mit den simulierten und den gemessenen Wertepaaren der Bodenfeuchte zeigte keine Signifikanz der Modellparameter a und b gegenüber 0 bzw. 1, d. h. der funktionale Zusammenhang

zwischen gemessenen und modellierten Bodenfeuchtwerten besteht. Die Signifikanzen wurden mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ überprüft.

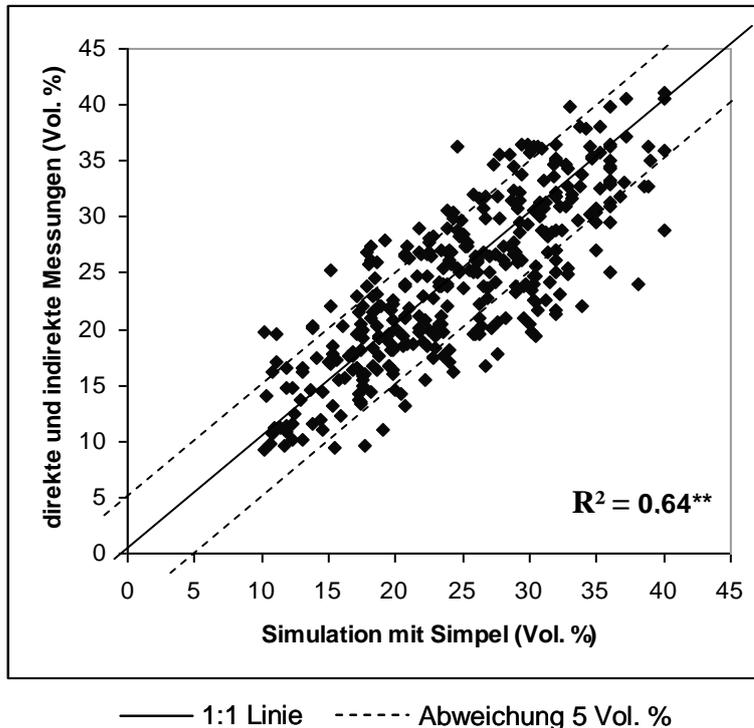


Abbildung 40: Korrelationsdiagramm zwischen den gemessenen Bodenfeuchtwerten und den mit SIMPEL modellierten Werten auf Basis der Datengrundlage der interpolierten Werte und der Radardaten [n=357]

4. Diskussion

Ziel dieser Arbeit war es, eine flächendeckende Integration von Bodenfeuchtwerten in die Schaderregermodelle zu ermöglichen. Um dies zu gewährleisten, war die Berechnung der Bodenfeuchte mittels Simulationsmodellen erforderlich, da flächendeckende Messnetze nicht zur Verfügung stehen. Für die Berechnung der Bodenfeuchte kommen als unterschiedliche Verfahren die klimatische Wasserbilanz, Speichermodelle oder Richards-Modelle zur Anwendung (MENSE-STEFAN 2005).

Die unterschiedlichen Ansätze unterscheiden sich vor allem hinsichtlich ihrer Komplexität. Bei der Berechnung der Bodenwasserflüsse mit Hilfe der klimatischen Wasserbilanz wird versucht, die einzelnen Komponenten des Wasserkreislaufs mengenmäßig zu erfassen, um unbekannte Größen über mathematische Beziehungen berechnen zu können (MENSE-STEFAN 2005). In Computermodellen erfolgt die Berechnung des Bodenwasserhaushalts mit zwei Verfahren: mit Speichermodellen und der Darcy/Richards-Gleichung. In Speichermodellen wird der Bodenwasserfluss durch einen oder mehrere Speicher repräsentiert, wobei die Speicherkapazität durch die nutzbare Feldkapazität parametrisiert wird. Der Speicher wird durch Niederschlag bzw. Zufluss aus dem darüberliegenden Speicher gefüllt und durch Evapotranspiration oder Ausfluss in den folgenden Speicher entleert (HÖRMANN 1998). Bei der Simulation des Bodenwassergehalts mit Hilfe der Richards-Modelle wird über numerische

Lösungsverfahren eine exakte Nachbildung der physikalischen Prozesse angestrebt (MENSE-STEUFAN 2005).

Ein Ziel dieser Arbeit war es, die Berechnungen standortspezifisch für ein entsprechendes Gebiet mit bekannter Bodenart sowie vorhandenen Wetterparametern durchzuführen. Hierbei kam es vor allem auf die aktuelle Bodenfeuchte in den oberen 20 cm an, da sich dort die Prozesse der Schädigungen an der Kultur durch die unterschiedlichen Schaderreger abspielen. Bodenwasserverfrachtungen in tiefere Schichten oder Sickerwasserprozesse ins Grundwasser spielten bei den Betrachtungen keine Rolle. Da die spezifischen Eingangsparameter der Richards-Modelle nicht flächendeckend vorliegen und mit ihnen sehr komplexe Prozesse modelliert werden können, die für die in dieser Arbeit betrachteten Prozesse irrelevant schienen, wurde im Verlauf dieser Forschungsarbeit die Möglichkeit der Berechnung der Bodenfeuchte mit einer Bilanzgleichung und dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) untersucht.

Bei der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Bilanzgleichung lagen die mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung zwischen 0,65 % im Falle der Bodenart stark lehmiger Sand und 11,76 % bei der Bodenart Lehm, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigte. 50 % der Werte lagen im Bereich von -25 bis 27 % Abweichungen der Simulation von der Messung. Die mittleren Abweichungen lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten im positiven Bereich. Ein Test auf Normalität der Daten ergab eine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$), damit lag eine Tendenz zur Modellüberschätzung vor (Abbildung 22).

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ (Abbildung 23 bis Abbildung 27 und Tabelle 9). Die Korrelationskoeffizienten lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten in einem niedrigen Bereich zwischen 0,28** und 0,48**. Damit ergab sich keine zufriedenstellende Korrelation. Das Streudiagramm der Wertepaare der mit der Bilanzgleichung berechneten Bodenfeuchte und der im Gelände gemessenen Werte (Abbildung 29) zeigt, dass sich die korrelierten Werte zu 50 % außerhalb des Bereiches von +/- 5 Vol. % Abweichungen von der 1:1-Linie befinden. Die Abweichungen liegen somit deutlich höher als der Varianzbereich bei den Probenahmen im Feld ist bzw. wie er bei indirekten Messverfahren vorkommt.

SAUER (2004) verglich in seinen Untersuchungen die Ergebnisse der Simulation der Bodenfeuchte mit dem Richards-Modell SWAP (siehe Tabelle 2) mit indirekten Feldmessungen an zwei Standorten. Bei der Korrelation der simulierten Bodenfeuchtwerte mit den indirekt gemessenen Werten in 10 bis 20 cm Tiefe ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,44 bzw. 0,61. Damit sind die Abweichungen der simulierten Bodenfeuchte mit der Bilanzgleichung mit den im Gelände gemessenen Bodenfeuchtwerten deutlich höher als die Abweichungen bei der Berechnung der Bodenfeuchte mit einem Richards-Modell. Das komplexe numerisch-deterministische Modell SWAP bildet somit die

Realität deutlich genauer ab als die einfache Berechnung der Bodenfeuchte mittels der Bilanzgleichung. Bestätigt werden diese Annahmen durch Untersuchungen von KREUTZIGER (2006). Sie errechnete mit dem Richards-Modell WAVE (VANCLOOSTER et al. 1994) im „Abgleich der Dynamik zwischen simulierten und gemessenen Wassergehalten“ in 10 bzw. 30 cm Tiefe ein mittleres Bestimmtheitsmaß von 0,79 bzw. 0,6.

Im Vergleich lagen die mittleren Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) unter Verwendung der Verdunstungsberechnung nach HAUDE zwischen 0,39 % im Falle der Bodenart Lehm und -7,89 % bei der Bodenart lehmiger Sand, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigte. 50 % der Werte lagen im Bereich von -22 bis 15 % Abweichungen der Simulation von der Messung. Die mittleren Abweichungen lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten sowohl im positiven als auch im negativen Bereich. Ein Test auf Normalität der Abweichungen ergab keine Signifikanz der Nicht-Normalität ($\alpha = 0,01$). Damit liegt keine systematische Modeluntererschätzung bzw. Modellüberschätzung vor.

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ (Abbildung 32 bis Abbildung 36 und Tabelle 10). Die Korrelationskoeffizienten lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten in einem mittleren Bereich zwischen 0,43** und 0,66**. Damit ergeben sich bei der Modellierung der Bodenfeuchte mit dem Speichermodell SIMPEL ähnliche Korrelationskoeffizienten wie bei den Auswertungen von SAUER (2004) mit dem komplexen Richards-Modell. Die Korrelationskoeffizienten der Auswertungen der Simulationen der Bodenfeuchte mit dem Modell WAVE in 10 cm Tiefe von KREUZIGER (2006) lagen im Vergleich hingegen höher.

Im Vergleich zur Simulation mit der Bilanzgleichung liegt die Mehrheit der korrelierten Wertepaare der mit SIMPEL modellierten Werte und der im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerte im Bereich von ± 5 Vol. % Abweichungen von der 1:1-Linie. Die Abweichungen liegen somit in einem Varianzbereich, der auch bei der Probenahme im Feld vorzufinden ist bzw. der bei indirekten Messverfahren vorkommt.

Somit scheint die Bodenfeuchtesimulation mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) die Realität genauer abzubilden als die Simulationen mit der Bilanzgleichung. Sowohl die Korrelationskoeffizienten nach Bodenarten als auch der Korrelationskoeffizient über den gesamten Datensatz der 431 Datenpaare liegt mit 0,64** höher als mit 0,46** bei den Datenpaaren der berechneten Bodenfeuchte mit der Bilanzgleichung. Im Box-Whisker-Plot liegen 50 % der Werte im Bereich von -15 bis 10 % Abweichungen der Simulation mit SIMPEL (HÖRMANN 1998) von der Messung, wohingegen 50 % der Werte im Bereich von -12 bis 21 % Abweichungen der Simulation von der Messung unter Verwendung der Bilanzgleichung lagen. Die Streuung der Abweichungen bei der Bilanzgleichung ist somit größer. Dies wird durch den Vergleich der Korrelationsdiagramme deutlich. Korreliert man die im Gelände gemessenen Bodenfeuchtwerte mit den mittels der

Bilanzgleichung simulierten Werten, ergeben sich deutlich höhere Abweichungen von der 1:1-Linie als bei der Korrelation mit den simulierten Werten mit dem Speichermodell SIMPEL. Es scheint, dass die einfache mathematische Berechnung der fehlenden Größen des Wasserkreislaufs, wie sie bei der Bilanzgleichung durchgeführt wird (MENSE-STEUFAN 2005), nicht komplex genug für die in dieser Forschungsarbeit untersuchte Fragestellung ist.

Die dargestellten Abweichungen bei der Berechnung der Bodenfeuchte mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) zeigen, dass auch dieses Modell Schwächen aufweist. Dennoch sind die Korrelationskoeffizienten vergleichbar mit komplexeren Ansätzen zur Bodenfeuchtemodellierung (SAUER 2004). In der Praxis stehen Daten von Bodenfeuchtemessungen an einem Teil der Wetterstationen zur Verfügung. Diese Wetterstationen befinden sich allerdings häufig in größeren Entfernungen zu den Flächen, für welche eine Schaderregerprognose zu berechnen ist. Untersuchungen zur räumlichen Variabilität der Bodenfeuchte (KREUTZIGER 2006) zeigen hohe Unterschiede bereits in Parzellen mit einer Größe von 20 x 20 m. Die Variabilität ist häufig auf Veränderungen der Bodeneigenschaften (Textur, Gehalt an organischer Substanz, hydraulische Durchlässigkeit) und Unterschiede in der Vegetationsbedeckung zurückzuführen (KREUTZIGER 2006). Daraus lässt sich folgern, dass zwischen der gemessenen Bodenfeuchte an einer Wetterstation und der landwirtschaftlichen Fläche, für die die Schaderregerprognose gerechnet werden soll, ebenfalls mit Abweichungen zu rechnen ist. Problematisch ist hierbei, dass die Wetterstationen teilweise in Entfernungen von bis zu 20 km liegen können. Hinzu kommt, dass die Bodenfeuchte an der Wetterstation nur unter Gras gemessen wird. Sie wird daher zwangsläufig von den landwirtschaftlichen Flächen, auf denen sich unterschiedliche Kulturen befinden, abweichen. Der Vorteil der hier untersuchten Ansätze zur Bodenfeuchtesimulation zeigt sich in der Integration des Einflusses des Wasserentzugs aus dem Boden durch verschiedene Kulturen. Alternativen zur Nutzung von simulierten Werten der Bodenfeuchte in der Schaderregerprognose stehen daher derzeit nicht zur Verfügung.

Die Bodenfeuchtesimulation für die Standorte des Jahres 2009 wurde mit unterschiedlichen Verfahren zur Verdunstungsberechnung im Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) berechnet. Die Modellierung des Bodenwassergehaltes mit SIMPEL und der Verdunstungsberechnung nach PENMAN ergab eine mittlere Abweichung der Simulation von der Messung von 3,76 %. Bei diesem Verfahren lagen 50 % der Werte zwischen -5,32 und 15,47 % Abweichungen des Bodenwassergehaltes. Bei der Modellierung mit SIMPEL und der Verdunstungsberechnung nach HAUDE kam es zu mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung von 0,81 %. 50 % der Werte lagen hier zwischen -4,66 und 11,30 % Abweichungen. Sowohl die mittleren Abweichungen als auch die Lage der Abweichungen näher um den Nullpunkt zeigten damit in dieser Modellvariante die genauere Simulation im Vergleich zu den Geländeprobe. Vorteil der Verdunstungsberechnung nach HAUDE scheint zusätzlich, dass die Eingangsparameter von jeder Wetterstation gemessen werden und für den

Bereich zwischen den Wetterstationen interpoliert werden können. Somit könnten die Wetterinputparameter als Quadratmeter genauer Wert in die Modellierung eingehen.

Daher wurden in einem weiteren Schritt die Radarniederschlagsdaten und die interpolierten Werte für Temperatur und relativer Luftfeuchte (ZEUNER 2007) in die Bodenfeuchtesimulation integriert, welche in einer Auflösung von einem Quadratmeter vorliegen. Mit diesen Inputparametern könnte die Bodenfeuchte spezifisch für jeden Quadratkilometer berechnet werden. Zur Verwendung der Radarniederschlagsdaten in der Bodenfeuchtesimulation war die Validierung der Radardaten erforderlich. Als Datenbasis zur Validierung wurden die Bodenstationen der Messnetze der Pflanzenschutzdienste der Länder verwendet, da diese Niederschlagsdaten nicht zur Anreicherung der Radardaten genutzt werden und daher unabhängige Niederschlagswerte darstellen.

Zum Vergleich der mittleren Abweichungen der Niederschlagshöhen wurden die Differenzen der Radolandaten mit den Werten der Landesstationen gebildet und mittels Box-Whisker-Plots verglichen. Anhand der kleinen Spannweite der Whisker war abzulesen, dass 95 % der Werte um den Nullpunkt konzentriert lagen. Dies wurde ebenfalls durch die Streudiagramme verdeutlicht, welche die Konzentration der Werte um den Nullpunkt aufzeigten (Abbildung 16). Diese Ergebnisse können allerdings als statistisch geschönt angesehen werden, da eine sehr gute Übereinstimmung beider Messverfahren zum Vorhandensein von Niederschlag besteht. In den Validierungsgebieten lag diese Übereinstimmung durchgehend bei über 90 %. Die durchschnittlichen mittleren Abweichungen der stündlichen Differenzen aller Validierungsstationen zwischen Radolan und den Bodenstationen lagen zwischen -0,06 und 0,04 mm Niederschlag. Bei einigen der Validierungsgebiete lagen die Ergebnisse deutlich unter diesem Durchschnitt. Im Gebiet Unterfranken lagen die mittleren Abweichungen der Differenzen im August bei 0,01 mm Niederschlag.

Aufgrund der hohen Übereinstimmung beider Messverfahren über das Vorhandensein von Niederschlag erfolgte ein weiterer Vergleich der mittleren Abweichungen, wobei nur die Regenstunden betrachtet wurden. Hierbei ergaben sich analoge Ergebnisse, was die Streuung um den Nullpunkt betrifft (Abbildung 17). Die Ausdehnung der Boxplots war größer als im gesamthaften Vergleich aller Stunden, lag jedoch unter 1 mm Niederschlagsdifferenz. Auch die Whisker hatten eine größere Spannbreite, insgesamt lagen aber 95 % der Werte unter 2 mm Niederschlagsabweichung (Abbildung 17). Wurden alle Stationen betrachtet, lagen die durchschnittlichen mittleren Abweichungen der Validierungsgebiete zwischen -0,25 und 0,36 mm Niederschlag (Tabelle 7 und Tabelle 8).

Beim Vergleich der maximalen Differenzen des Niederschlags ergaben sich vereinzelt höhere Abweichungen (Abbildung 18). Zwar wäre es durchaus möglich, dass ein konvektiver Starkregenschauer genau über einer Wetterstation niedergeht und der vom Radar erfasste durchschnittliche Wert für den gesamten Quadratkilometer niedriger liegt. In diesem Fall wäre der punktuelle Wert der Wetterstation zwar genauer, aber für die umliegenden Gebiete wenig

repräsentativ. Die maximalen Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Messwerte der Landesstationen lagen im Mittel aller Stationen im Bereich zwischen 21,15 und -25,12 mm. Bei der Interpretation des Vergleichs von Stations- und Radardaten muss berücksichtigt werden, dass die Daten auf verschiedenen Messprinzipien basieren. Die Radardaten werden in der Atmosphäre ermittelt, wodurch die aus einem gemessenen Signal berechneten Niederschlagshöhen auf dem Fallweg reduziert werden können bzw. am Boden zeitverzögert auftreten. Hinzu kommt, dass die Datengrundlage der stündlich angeeichten Radardaten von (hh-1):51 bis hh:50 und die der stündlichen Daten der Wetterstationen von hh:00 bis hh:59 in mm ist. Die Messzeiträume beider Verfahren sind somit um neun Minuten verschoben. Da ein stündlicher Vergleich beider Daten damit keine identische Datenbasis zur Grundlage hat, kann es insbesondere zu Anfang und Ende eines Niederschlagsereignisses zu einer größeren Messdifferenz zwischen beiden Verfahren kommen. Dies ist ein möglicher Erklärungsansatz der Ausreißer.

Wie an den Boxplots zu erkennen war (Abbildung 17), bildeten diese Ausreißer die Ausnahme. Sie sind daher kein ausschlaggebender Faktor für eine mögliche zukünftige Verwendung der Radarniederschlagsdaten. Hinzu kommt, dass sich die maximalen Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Messwerte der Landesstationen in der gesamthaften Monatsbilanz in den meisten Fällen ausglich. Dies kann teilweise in dem neunminütigen Versatz der Daten begründet sein. Da die Niederschlagsdaten in keiner höheren zeitlichen Auflösung vorliegen, konnte der Versatz nicht herausgerechnet und anschließend bewertet werden. Aufgrund dieser Tatsache sind die Abweichungen in der Summe ebenfalls kritisch zu betrachten, da die Aufsummierung der wenigen Ausreißer zu erhöhten Abweichungen führte.

Die Ergebnisse der Validierung der Radarniederschlagsdaten lassen daher eine Nutzung in der Bodenfeuchtesimulation sinnvoll erscheinen. Aufgrund der Inputparameter war es für das Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) und der Verdunstungsberechnung nach HAUDE möglich, die Bodenfeuchtesimulation mit den interpolierten Werten für Temperatur und Luftfeuchte (ZEUNER 2007) und den Radarniederschlagsdaten in einer Auflösung von einem Quadratkilometer zu berechnen. Diese Validierungsergebnisse zeigten, dass die Nutzung der interpolierten Wetterdaten und der Radarniederschlagsdaten für die Bodenfeuchtesimulation möglich wäre. In der Darstellung der Abweichungen der Simulation von der Messung in Box-Whisker-Plots zeigte die Ausdehnung der Whisker eine nahezu identische Spannweite im Vergleich zu den Berechnungen mit den Inputdaten der Wetterstationen. Während die Simulation auf Basis der Wetterdaten der Wetterstationen eher eine geringe Unterschätzung aufwies, ergaben sich bei der Simulation mit den interpolierten Daten eher geringfügige Überschätzungen, die mittleren prozentualen Abweichungen der Simulation von der Messung lagen bei -0,87 bzw. 3,82 %. Die Box der 50 % der Werte der prozentualen Abweichungen der Simulation von den Messungen lag bei der Simulation mit den interpolierten Daten zentriert über dem Nullpunkt. Bei der Simulation mit den Wetterstationsdaten war die Box ein wenig in den negativen Bereich verschoben (Abbildung 39). Da sich das Ergebnis der Bodenfeuchtemodellierung

auf Basis der Niederschlagsdaten der Radarmessung im Vergleich zur Simulation der Bodenfeuchte auf Basis der Wetterstationsdaten nicht verschlechterte, kann in diesem Zusammenhang von einer Eignung der Radardaten zur Nutzung in der Bodenfeuchtesimulation bzw. in der Schaderregerprognose ausgegangen werden. Die teilweise hohen Differenzen der Niederschlagsmesswerte der Radardaten abzüglich der Messwerte der Landesstationen zeigten keine Auswirkungen bei der Verrechnung in der Bodenfeuchtesimulation.

Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich mit der Simulation auf Basis der interpolierten Wetterdaten und der Radarniederschlagsdaten ebenfalls eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$. Der Korrelationskoeffizient lag mit $0,64^{**}$ auf gleicher Höhe wie bei der Simulation mit den Daten der Wetterstationen. Es scheint, dass sich durch die Verwendung der standortspezifischen Inputparameter weder Verbesserungen noch Verschlechterungen der modellierten Bodenfeuchtwerte gegenüber den im Gelände erhobenen Werten erzielen lassen. Damit scheint die Grundlage geschaffen, die Bodenfeuchte flächendeckend und standortspezifisch modellieren zu können. Sollten zukünftig Bodenkarten im Maßstab 1:5000, wie sie bisher zum Beispiel in weiten Teilen von Rheinland-Pfalz und Hessen vorliegen, bundesweit zu Verfügung stehen, ist es möglich, flächendeckende Bodenfeuchtwerte in einer Auflösung von einem Quadratkilometer simulieren zu können.

5. Zusammenfassung

Die Messung der Bodenfeuchte im Gelände als Inputparameter in die Schaderregermodelle ist nicht flächendeckend umsetzbar. Der aufwendigen gravimetrischen Bestimmung der Bodenfeuchte stehen die Messungen mittels TDR-/FDR-Sonde, Gipsblock, Watermark oder Tensiometer gegenüber (DIETRICH und SCHÖNIGER 2003). Da die Bodenfeuchte, stärker als andere Inputparameter der Schaderregermodelle wie beispielsweise die Temperatur, über ein kleines Gebiet wie ein Feld deutlich variieren kann (KREUTZIGER 2006), sind punktuelle Bodenfeuchtemesswerte für ihre Umgebung wenig repräsentativ. Um einen repräsentativen Wert für ein Feld zu ermitteln, müssten mehrfache Wiederholungen durchgeführt werden.

Eine alternative Methode zur direkten Messung der Bodenfeuchte ist die Berechnung mittels Simulationsmodellen. Für die Berechnung der Bodenwasserflüsse kommen als unterschiedliche Verfahren die klimatische Wasserbilanz, Speichermodelle oder Richards-Modelle zur Anwendung (MENSE-STEFAN 2005). Ein Ziel dieser Arbeit war es, die Berechnungen der Bodenfeuchte standortspezifisch für ein entsprechendes Gebiet mit bekannter Bodenart sowie vorhandenen Wetterparametern durchzuführen. Da die spezifischen Inputparameter der Richards-Modelle nicht flächendeckend vorliegen und mit ihnen sehr komplexe Prozesse modelliert werden können, die für die in dieser Arbeit betrachteten Prozesse irrelevant schienen, wurde im Verlauf dieser

Forschungsarbeit die Genauigkeit der Berechnung der Bodenfeuchte mit einer Bilanzgleichung und dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) untersucht.

Die Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle fand auf landwirtschaftlichen Flächen in Rheinland-Pfalz statt. Die jährliche Auswahl der Flächen war in einer möglichst breiten Abdeckung des Bodenartenspektrums und der wöchentlichen Erreichbarkeit begründet. Neben der gravimetrischen Bestimmung der Bodenfeuchte wurden zur Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle Messungen mittels FDR-Sonde durchgeführt. Zum Einsatz kam die Theta-Sonde ML2x der Firma ecoTech. Der überwiegende Teil der Bodenfeuchtemessungen wurde durch gravimetrische Messungen erhoben. Zur Validierung der Bodenfeuchtemodelle wurde im Rahmen der Versuche 2009 bis 2011 eine umfangreiche Bestimmung der Bodenfeuchte mithilfe beider Verfahren durchgeführt. Hierzu wurden 321 direkte und 110 indirekte Messungen durchgeführt. Der Bodenfeuchtwert für ein Feld wurde hierbei immer aus einem Mittelwert von vier bis sechs Bodenproben errechnet. Die Validierung fand in den landwirtschaftlich relevanten Monaten von März bis September/Oktober statt.

Bei der Bodenfeuchtesimulation unter Verwendung der Bilanzgleichung lagen die mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung zwischen 0,65 % im Falle der Bodenart stark lehmiger Sand und 11,76 % bei der Bodenart Lehm, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigte. Im Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Simulation von der Messung lagen 50 % der Werte im Bereich von -25 bis 27 %. Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$. Die Korrelationskoeffizienten lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten zwischen 0,28** und 0,48**.

Die Abweichungen der Bodenfeuchtesimulation mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) unter Verwendung der Verdunstungsberechnung nach HAUDE lagen zwischen 0,39 % im Falle der Bodenart Lehm und -7,89 % bei der Bodenart lehmiger Sand, welche die höchsten mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung aufzeigte. Im Box-Whisker-Plot der prozentualen Abweichungen der Simulation von der Messung lagen 50 % der Werte im Bereich von -22 bis 15 %. Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich bei allen Bodenarten eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$. Die Korrelationskoeffizienten lagen bei den unterschiedlichen Bodenarten zwischen 0,43** und 0,66**. Damit ergaben sich bei der Modellierung der Bodenfeuchte mit dem Speichermodell SIMPEL ähnliche Korrelationskoeffizienten wie bei den Auswertungen von SAUER (2004) mit einem komplexen Richards-Modell, bei welchen sich Korrelationskoeffizienten von 0,61 bzw. 0,44 ergaben.

Die Ergebnisse der Validierung der Radarniederschlagsdaten ließen eine Nutzung in der Bodenfeuchtesimulation zu. Aufgrund der Inputparameter war es für das Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) und der Verdunstungsberechnung nach HAUDE möglich, die Bodenfeuchtesimulation mit den interpolierten Werten für Temperatur und Luftfeuchte (ZEUNER

2007) und den Radarniederschlagsdaten in einer Auflösung von einem Quadratkilometer zu berechnen. In der Darstellung der Abweichungen der Simulation von der Messung in Box-Whisker-Plots zeigte die Ausdehnung der Whisker eine nahezu identische Spannweite im Vergleich zu den Berechnungen mit den Inputdaten der Wetterstationen. Während die Simulation auf Basis der Wetterdaten der Wetterstationen eher eine geringe Unterschätzung aufwies, ergaben sich bei der Simulation mit den interpolierten Daten eher geringfügige Überschätzungen, die mittleren prozentualen Abweichungen der Simulation von der Messung lagen bei -0,87 bzw. 3,82 %. Die Box der 50 % der Werte der prozentualen Abweichungen der Simulation von den Messungen lag bei der Simulation mit den interpolierten Daten zentriert über dem Nullpunkt, während sie bei der Simulation mit den Wetterstationsdaten leicht in den negativen Bereich verschoben war. Im Korrelationstest nach PEARSON ergab sich mit der Simulation auf Basis der interpolierten Wetterdaten und der Radarniederschlagsdaten ebenfalls eine hochsignifikante Korrelation mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$. Der Korrelationskoeffizient lag mit 0,64 auf gleicher Höhe wie bei der Simulation mit den Daten der Wetterstationen.

Die getesteten Verfahren der Bodenfeuchtesimulation versprechen eine gute Eignung für eine flächendeckende Simulation. Die mittleren Abweichungen liegen in einem niedrigen Bereich. Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Verwendung der standortspezifischen Inputparameter in der Bodenfeuchtesimulation mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) keine Verschlechterungen der modellierten Bodenfeuchtwerte gegenüber den im Gelände erhobenen Werten entstehen. Ein wichtiger Faktor ist weiterhin, dass ein Modell gewählt werden kann, für welches die Wettereingabeparameter flächendeckend vorliegen. Liegen Bodenkarten in hoher räumlicher Auflösung vor, kann die Bodenfeuchte flächendeckend und standortspezifisch in der Auflösung eines Quadratmeters modellieren werden.

III. Einfluss der Bodenfeuchte auf das Auftreten von *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary

1. Problemstellung und Ziele

Der Erreger der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, kann bei feucht-warmer Witterung während der Vegetationszeit große Schäden verursachen (HÄNNI 1949). Nach HOFFMANN und SCHMUTTERER (1999) kann er ohne Bekämpfung zu einem Totalverlust des Kartoffelkrautes führen und verursacht damit einen erheblichen Ertrags- und Qualitätsverlust. Des Weiteren schätzen sie die Ernteverluste durch *P. infestans* in Deutschland auf durchschnittlich acht bis zehn Prozent der Gesamternte. Neben der Erntereduktion durch Blattverlust muss auch der Qualitätsverlust durch die Braunfäule in der Knolle in direktem Zusammenhang mit dem Pilz gesehen werden. ADLER (2000) stellte die These auf, dass latent mit Braunfäule befallene Pflanzknollen eine größere Bedeutung für den sichtbaren Primärbefall haben als vor der Einführung der Kaltlagerung. Während früher von Abfallhaufen und Durchwuchskartoffeln ausgehend der erste sichtbare Befall im Kartoffelbestand vor allem durch sekundäre Infektionen hervorgerufen wurde, hat die Bedeutung von primären Infektionen durch latent infiziertes Pflanzgut aufgrund moderner Lagertechnik (Kaltlagerung) deutlich zugenommen. Nach ADLER (2000) bedingt dies ein früheres Auftreten der Krankheit in Form von massivem Stängelbefall, vor allem in Jahren mit nasser Frühjahrswitterung. Eine Fokussierung der Forschung auf das unterirdische Infektionsgeschehen von der Pflanzung bis zum Auflauf und die Entwicklung von Methoden zur Verringerung der frühen Stängelinfektionen seien deswegen dringend notwendig.

BÄßLER (2005) kam bei seinen Untersuchungen zum Einfluss der Bodenart und Bodenfeuchte auf den Primärbefall der Kartoffeln mit *P. infestans* zu dem Schluss, dass „aufgrund der deutlichen Beziehung zwischen Bodenart und Bodenfeuchte ein „Bodenmodul“ für die Prognosemodelle dringend notwendig ist, wofür die bodenphysikalischen Parameter Bodenart und Bodenfeuchte allerdings intensiver zu untersuchen wären“. An diesen Kenntnisstand wurde mit dieser Arbeit angeknüpft und die genauen Zusammenhänge zwischen Bodenart und Bodenfeuchte auf den Primärbefall der Kartoffel mit *P. infestans* weiterführend untersucht. Ein Ziel dieser Arbeit war es, ein Bodenfeuchtemodul in das bestehende Modell SIMBLIGHT 1 (KLEINHENZ et al. 2007), welches das Erstauftreten von *P. infestans* prognostiziert, zu integrieren. Bisher geht die Bodenfeuchte und in dieser Verbindung die Bodenart nur in indirekter Form in das Modell ein. Dabei wird von einer hohen Bodenfeuchte und in diesem Zusammenhang von einem erhöhten Risiko für frühen Stängelbefall ausgegangen, wenn zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf eine viertägige Periode lag, in welcher der Schlag nicht befahrbar war. Der Zustand muss subjektiv vom Modellnutzer eingeschätzt werden. Diese Zusammenhänge gilt es zukünftig genauer zu modellieren.

2. Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden

Frühere Ansichten von einer saprophytischen Lebensweise des Pilzes im Boden haben aktuell keine Bedeutung mehr, da gezeigt werden konnte, dass der Pilz selbst in sterilem Boden maximal 2 cm von der infizierten Knolle wegwachsen kann (ULLRICH 1957). ZAN (1962) konnte nachweisen, dass die Existenz von Sporangien des Pilzes in sterilem Boden maximal 77 Tage bei optimalen Bedingungen möglich ist. Die in die Erdoberfläche eingetragenen Sporangien eines infizierten Kartoffelbestands verlieren in praktischen Feldversuchen bereits nach zwei bis drei Wochen ihre Infektiosität, da eine saprophytische Lebensweise nicht möglich ist (HÄNNI 1949).

„Die Überdauerung des Mycels in Knollen, welche als Ernterückstände im Boden verbleiben, ist möglich. Sollten solche Knollen nicht vollständig durchfrieren, können sie in manchen Gebieten in Form von Durchwuchskartoffeln im Folgejahr eine beachtliche Infektionsquelle darstellen“ (BÄBLER 2005). Die häufigste Form der Überdauerung des Erregers in der Vegetationspause ist in den eingelagerten Knollen. CROSIER (1934) und ZAN (1962) beobachteten das Wachstum von *P. infestans* noch bei Temperaturen um die 5 °C mit einem Optimum bei 20 °C und einem Maximum bei 30 °C. HÄNNI (1949) zeigte, dass bei Knollenlagerungen zwischen 0 °C und 3 °C zwar keine Verbräunung der Knollen stattfindet, das Myzel aber dennoch überdauert. Niedrige Temperaturen bei der Lagerung gestatten es dem Pilz, sich während langer Zeit in der Knolle zu erhalten, da das Wachstum nur langsam voranschreitet. Im Bereich der Optimumtemperatur von 20 °C durchwuchert er hingegen in etwa einem Monat die ganze Knolle und „verhungert“ dann. Temperaturen unter 10 °C hemmen zudem die Entwicklung verschiedener Konkurrenz-Mikroorganismen von *P. infestans* (BÄBLER 2005 und HÄNNI 1949).

Zeigen kranke Knollen bei der Auslagerung im Frühjahr Krankheitssymptome, werden sie häufig auf Abfallhaufen entsorgt. Von diesen ausgehend, kann es durch Sporenfreisetzung auf den Knollen bzw. durch Infektion des an ihnen gebildeten Kartoffelkrautes und anschließender Windverbreitung der Sporangien zu Primärbefall mit *P. infestans* in nahegelegenen Beständen kommen (HOFFMANN und SCHMUTTERER 1999).

Zu einem gewissen Anteil gelangen immer infizierte Knollen zur Auspflanzung. ADLER (2000) wies im Labor mittels PCR (Polymerase-Chain-Reaction) in unterschiedlichen Pflanzpartien einen Anteil latent infizierter Knollen zwischen 0 und 12,3 % nach. Ähnliche Ergebnisse stammen von ZELLNER et al. (2009), er wies in seinen Untersuchungen einen Anteil latent infizierter Knollen im Pflanzgut zwischen 0 und 17 % nach.

Diskutiert werden in diesem Zusammenhang mehrere Wege einer Infektion von gesundem Pflanzmaterial. Nach ULLRICH (1957) und ADLER (2000) kann der Pilz von einer kranken Knolle direkt in den eigenen Trieb einwachsen und auf diesem Weg in den oberirdischen Raum gelangen. Diese These wird von HOFFMANN und SCHMUTTERER (1999) bestätigt. Der infizierte Aufwuchs

bewirkt damit im Bestand, durch einzelne Primärherde ausgelöst, den Beginn der Phytophthora-Epidemie.

Eine zweite Hypothese wird u. a. von HÄNNI (1949) und BÄBLER (2005) vertreten. Eine infizierte Knolle kann zusätzlich, bei für den Pilz günstigen Bedingungen, Sporen in den sie umgebenden Boden freisetzen und gesunde Pflanzen unterirdisch infizieren. Die Sporenbewegung im Boden hängt mit der Porengrößenverteilung und dem Anteil wassergefüllter Poren zusammen, wobei die Wassersättigung eines Bodens innerhalb der Feinporen, welche ein hohes Wasserpotential besitzen, beginnt (siehe Tabelle 11). Mit einer Größe von ca. 36 µm Länge und 22 µm Breite ist es den Sporangien von *P. infestans* nur in seltenen Fällen möglich, durch die Bodenporen zu gelangen. Zoosporen, welche bei der indirekten Keimung der Sporangien entstehen, besitzen nur eine Größe von ca. 15 µm Länge und 8,5 µm Breite (ERWIN und RIBEIRO 1996). Ihnen ist es damit leichter möglich, durch die wassergefüllten Grobporen des Bodens zu schwimmen und gesunde Stängel der Nachbarpflanzen zu infizieren. Für eine Zoosporenfreisetzung bzw. -bewegung müssen nach STOLZY et al. (1965) und PORTER (2005) alle Poren mit einem Porenvolumen von mindestens 40 bis 60 µm mit Wasser gefüllt sein, also alle Poren, die kleiner als die weiten Grobporen sind (Tabelle 11). Nach MACDONALD und DUNIWAY (1978) geht die Zoosporenfreisetzung aus Sporangien von *Phytophthora spp.* bereits ab einer Saugspannung von 5 hPa deutlich zurück und ist bereits bei 25 hPa in Laborversuchen nicht mehr zu beobachten.

Eine unterirdische Sporulation führt zu einer Erregerausbreitung in der Knollenumgebung und legt bei hohem Wassergehalt des Bodens, nach horizontaler Verbreitung, den Grundstein für massive Stängelverseuchungen auf kleinstem Raum (PORTER et al. 2005).

Tabelle 11: Charakteristika der Porengrößenklassen (nach: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE 2005)

Porengrößenklasse	weite Grobporen (wGP)	enge Grobporen (eGP)	Mittelporen (MP)	Feinporen (FP)
Porenäquivalentdurchmesser (µm)	>50	50 bis >10	10 bis >0,2	ab 0,2
Saugspannung(hPa)	<60	60 bis <300	300 bis <15000	ab 15000
pF-Wert	<1,8	1,8 bis <2,5	2,5 bis <4,2	ab 4,2
Bezeichnung des Bodenwassers	schnell bewegliches Sickerwasser	langsam bewegliches Sickerwasser	pflanzenverfügbares Haftwasser	nicht pflanzenverfügbares Haftwasser

HÄNNI (1949) vertritt zusätzlich die These, dass kranke Triebe vor dem Durchstoßen der Erdoberfläche absterben und es dem Pilz *P. infestans* in unserem Klima und mit unseren Pflanzmethoden nur selten gelingt an die Bodenoberfläche zu wachsen. In den durchgeführten

Gewächshausversuchen konnte er an keiner der 200 gepflanzten infizierten Knollen kranke oberirdische Triebe feststellen.

Neben diesen beiden Infektionswegen ist es zusätzlich möglich, dass Sporen, die sich im Boden befinden, bei Niederschlag über Splash-Effekte direkt an die Blätter geschleudert werden und die Infektion oberirdisch stattfindet. Nach BOYD (1980) ist dies der ausschlaggebende Weg der Primärinfektion. Er beobachtete in seinen Freilandversuchen, dass mehr kranke Triebe ohne Häufelung der Kartoffeldämme an die Oberfläche durchdringen (15 kranke Triebe von 500 Pflanzknollen (3 %) bzw. 17 kranke Triebe von 320 Pflanzknollen (5,3 %)) als mit Häufelung (3 kranke Triebe von 500 Pflanzknollen (0,6 %) bzw. 0 kranke Triebe von 320 Pflanzknollen (0 %)).

Sind erfolgreiche Infektionen im oberirdischen Raum entstanden, werden an befallenen Pflanzen Sporangien gebildet. Diese werden durch Wind im Bestand bzw. in andere Bestände verbreitet und setzen weitere Infektionsherde, welche eine polyzyklische Epidemie einleiten. Bei feucht-kühlen Bedingungen (10 bis 15 °C) entlassen die Sporangien Zoosporen. Diese können sich chemotaktisch im Wasser orientieren und mehrfach encystieren, bevor sie mit einem Infektionsschlauch das Pflanzengewebe infizieren (indirekte Keimung). Bei höheren Temperaturen (> 18 °C) keimen die Sporangien direkt mit einem Infektionsschlauch aus (direkte Keimung). Auf befallenem Kraut bilden sich unter feuchten Witterungsverhältnissen erneut Sporangien aus. Knollen können dann wiederum, über in den Boden eingewaschene Sporangien, infiziert werden (Abbildung 41). Kommt es zur erfolgreichen Infektion von Tochterknollen, bietet sich dem Pilz erneut die Möglichkeit zur Überwinterung. Neben der beschriebenen asexuellen Vermehrung existiert die sexuelle Vermehrung des Pilzes. Bei Kontakt zweier kompatibler Kreuzungstypen (A1 und A2) erfolgt eine Oosporenbildung. Diese wird allerdings eher selten beobachtet und spielt daher eine untergeordnete Rolle (SCHÖBER-BUTIN 2001 und AGRIOS 2005).

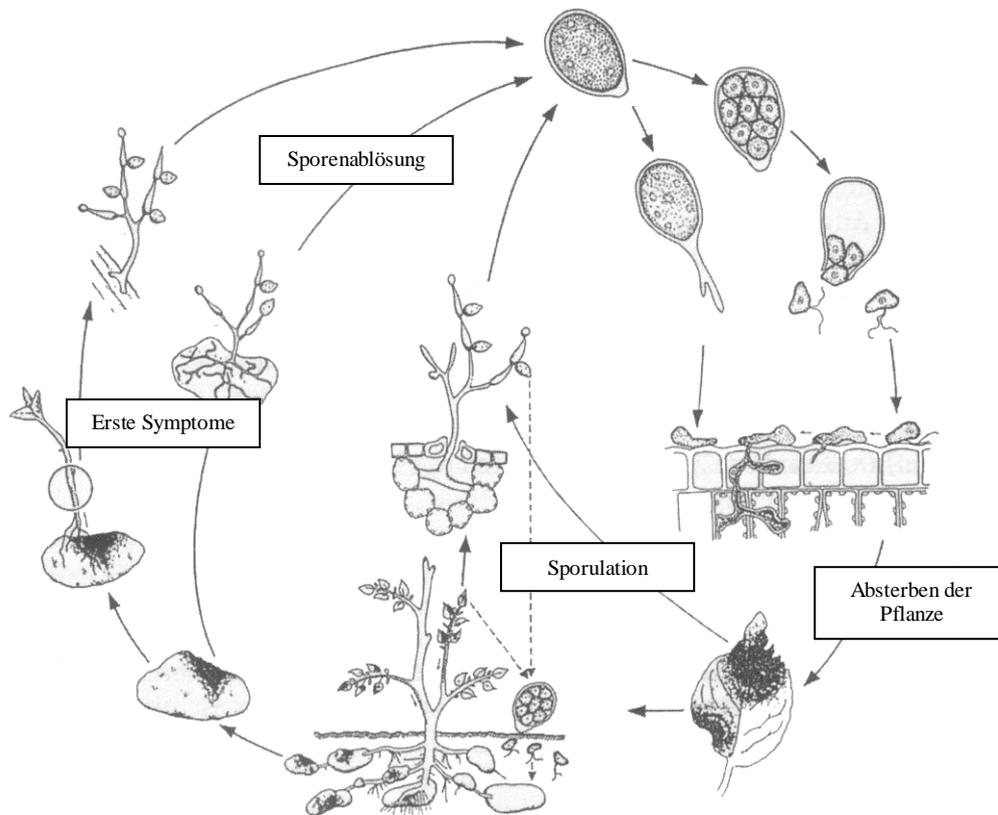


Abbildung 41: Entwicklungszyklus von *P. infestans* (verändert nach HALLMANN et. al 2007, basierend auf AGRIOS 2005)

Der Entwicklungszyklus der Pilze ist zur Veranschaulichung schematisch in Abbildung 42 auf einer Zeitachse dargestellt. Er gliedert sich in die Inkubationszeit, die Latenzperiode und die infektiöse Zeit. Die Inkubationszeit bildet die Zeitspanne von Beginn des Infektionsvorgangs bis zum Sichtbarwerden der ersten Symptome. Die Zeitspanne zwischen Beginn der Infektion und der frühesten möglichen Weiterverbreitung wird als Latenzperiode bezeichnet. Bei Pilzen ist diese von der Infektion bis zum Beginn der Sporulation. Die infektiöse Zeit ist die Zeitspanne, in der eine Läsion oder Teile einer Läsion sporulieren. Die Epidemie setzt sich dann polyzyklisch mit einer erneuten Infektion fort, bis es letztendlich zum vollständigen Absterben der Pflanze kommt (nach RACCA, mündliche Mitteilung).

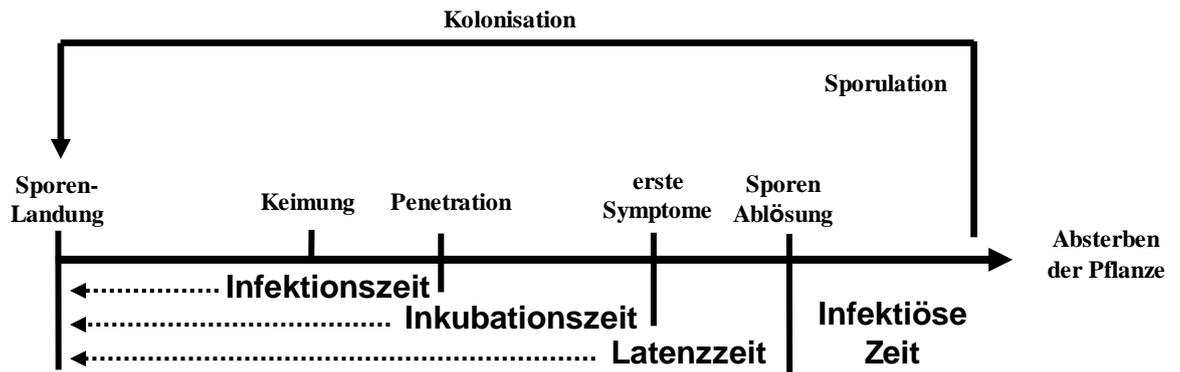


Abbildung 42: Lebenszyklus der Pilze (nach RACCA 2011, mündliche Mitteilung)

3. Arbeitshypothesen

Die aufgestellten Arbeitshypothesen beziehen sich u. a. auf die Theorien von HÄNNI (1949), PORTER (2005) und BÄBLER (2005), die davon ausgehen, dass infizierte Knollen, bei für den Pilz günstigen Bedingungen, Sporen in den umgebenden Boden freisetzen und gesunde Pflanzen unterirdisch infiziert werden sowie die Annahme von BOYD (1980), dass unterirdisch freigesetzte Sporen über Splash-Effekte gesundes Pflanzenmaterial oberirdisch infizieren (siehe Kapitel III Absatz 2). Zur genaueren Charakterisierung des Einflusses der Bodenfeuchte auf *P. infestans* mussten Teile des Entwicklungszyklus des Pilzes *P. infestans* näher eingegrenzt werden, in welchen die Bodenfeuchte einen Einfluss darstellen könnte (Abbildung 42). Da das Erstauftreten von *P. infestans* in Bezug zur Bodenfeuchte genauer untersucht werden sollte, spielte für die Betrachtungen lediglich der Teil des Zyklus bis zum Auftreten erster Symptome eine Rolle, dieser entspricht der Inkubationszeit. Um den unterirdischen Bereich der Übertragung aus latent befallenem Pflanzgut über das Bodenwasser an gesunde Stängel in den Zyklus zu integrieren, war eine Erweiterung des Zyklus erforderlich. Die Sporenlandung ist gleichzusetzen mit der (unterirdischen) Infektion der gesunden Stängel, sodass der Freisetzungsprozess der Sporen aus infizierten Knollen ins Bodenwasser zuvor stattfinden muss. Daher wurde die Darstellung von Abbildung 42 erweitert (Abbildung 43).

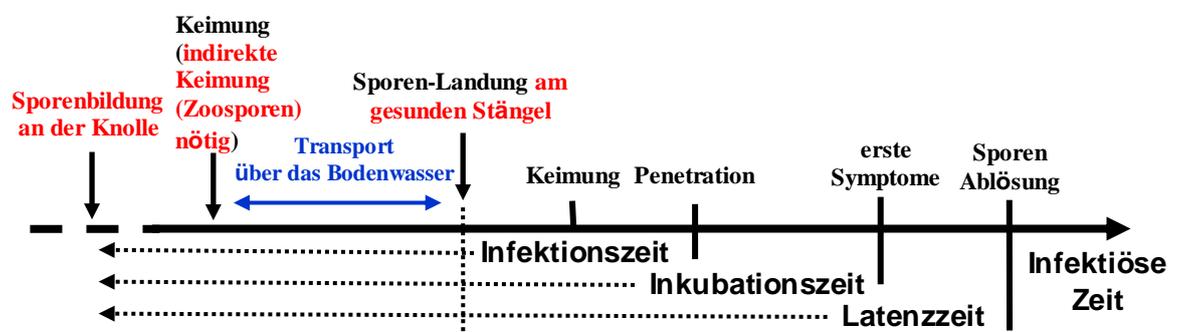


Abbildung 43: Pilzzyklus von *P. infestans* von latent befallenem Pflanzgut bis zum Erstauftreten (verändert nach RACCA 2011, mündliche Mitteilung)

Im ersten Schritt ist die Sporangienbildung an der äußeren Schale von latent infizierten Knollen erforderlich. Diese müssen in einem zweiten Schritt keimen. Hierfür ist im Falle der unterirdischen

Übertragung durch den Boden eine indirekte Keimung in Form von Zoosporen nötig, da nur diese die Bodenporen passieren können (siehe Kapitel III Absatz 2). Nach einer erfolgreichen indirekten Keimung kann bei günstigen Bodenwasserbedingungen der Transport von Zoosporen durch das Bodenwasser stattfinden, d. h. für die Zoosporenfreisetzung und den Bereich zwischen indirekter Keimung und Sporen-Landung am gesunden Stängel ist die Bodenfeuchte entscheidend (siehe Abbildung 43). Die aufgestellte Hypothese ist, dass während dieses Zeitraums die Bodenfeuchte über Feldkapazität liegen muss. Diese Annahme ist auf die Theorien von MACDONALD und DUNIWAY (1978) zurückzuführen, die feststellen konnten, dass die Zoosporenfreisetzung bei Sporangien von *Phytophthora spp.* bereits ab einer Saugspannung im Boden von 5 hPa deutlich zurückgeht und bereits bei 25 hPa in Laborversuchen nicht mehr zu beobachten war (siehe Kapitel III Absatz 2). Nach STOLZY et. al (1965) und PORTER (2005) müssen für eine Zoosporenbewegung alle Poren mit einem Porenvolumen von mindestens 40 bis 60 µm mit Wasser gefüllt sein. Um diese Arbeitshypothese zu bestätigen, wurden Versuche zur Übertragung von Zoosporen durch den Boden durchgeführt.

Im Boden spielen sich zusätzlich viele unüberschaubare Interaktionen zwischen den Sporen von *P. infestans* und anderen Bodenorganismen ab. LACEY (1965) stellte gravierende Unterschiede beim Myzelwachstum von *P. infestans* in sterilem bzw. unsterilem Boden fest. Er belegte ein gutes Wachstum in sterilem bzw. ein schlechtes Wachstum in unsterilem Boden. Diese Ergebnisse sprechen für die Unterlegenheit des Pilzes *P. infestans* gegenüber anderen Bodenmikroorganismen. Um Interaktionen mit Bodenorganismen auszuschließen, wurde in den Laborversuchen mit unsterilen und sterilen Böden gearbeitet. BÄBLER (2005) arbeitete in seinen Versuchen zur unterirdischen Übertragung von Sporen von *P. infestans* mit sterilen Böden.

In der Literatur (VAN DER ZAAG 1956, HÄNNI 1949 und SCHLENZIG 1997) und in Vorversuchen konnte bestätigt werden, dass bei künstlich infizierten Knollen bei zu feuchter Lagerung Wachstumsrisse entstehen, aus denen es zur Bildung von Myzel kommt. Dieses war in eigenen Vorversuchen optisch erstmals nach ca. 32 Stunden sichtbar. In einer weiteren Arbeitshypothese war zu prüfen, ob dieses auswachsende Myzel Sporen außerhalb der Knolle bilden kann, wodurch Inokulum in den Boden eingetragen wird. Dieses Inokulum kann sich mit dem Bodenwasser im Boden verbreiten und andere Knollen bzw. Stängel infizieren. Die Dauer des Prozesses von der Sporangienbildung an einer infizierten Knolle über den Sporentransport im Bodenwasser bis hin zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials (siehe Abbildung 43) sollte in Versuchen genauer untersucht werden.

Damit waren in den Labor- und Freilandversuchen die folgenden Arbeitshypothesen zu prüfen:

- Zur äußeren Sporenbildung an infizierten Knollen müssen geeignete Bodenfeuchtebedingungen vorliegen, welche genauer zu definieren sind.

- Der Sporentransport von Sporen aus infizierten Knollen an gesundes Pflanzenmaterial kann nur über das Bodenwasser bei ausreichender Wassersättigung, mindestens bis zur Füllung der Grobporen, stattfinden.
- Zur Integration des Parameters Bodenfeuchte und damit der unterirdischen Verbreitung von Sporen des Pilzes *P. infestans* in die Schaderregerprognose muss die Dauer der jeweiligen Prozesse genauer definiert werden.

4. Material und Methoden

4.1 Prognosemodell SIMBLIGHT1

SIMBLIGHT1 ist ein empirisch analytisches Modell, welches das Risiko des Ausbruchs einer Phytophthora-Epidemie berechnet. Die Modellstruktur ist in Abbildung 44 dargestellt. Als Startwert wird ein hypothetischer Initialbefall angenommen, welcher durch die Parameter Bodenfeuchte und Anbaudichte berechnet wird. Unter Eingang der Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und einem Sortenfaktor werden zwei Raten berechnet, die Infektionsrate und die Entwicklungsrate. Die Entwicklungsrate berechnet hierbei den Fortschritt der Latenzperiode. Die aus den Raten berechneten zwei Zustandsvariablen „Latent befallene Fläche“ und „Infektiös befallene Fläche“ bilden in Summe den täglich berechneten Befallsindex (KLEINHENZ et al. 2006).

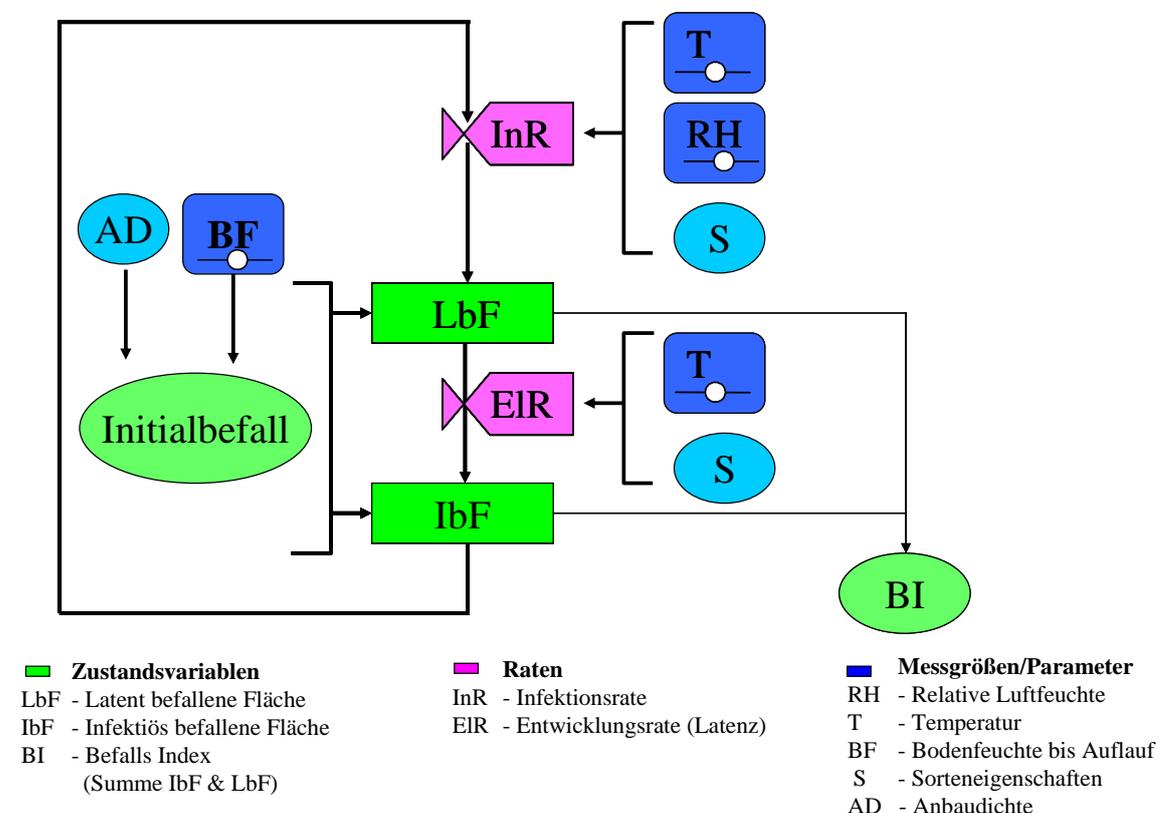


Abbildung 44: Strukturdiagramm von SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2006)

Als Inputparameter gehen die stündliche Temperatur und die stündliche relative Luftfeuchte in das Modell ein. Neben diesen meteorologischen Daten werden die Parameter Bodenfeuchte, Anbaudichte und Kartoffelsorte benötigt. Der Einfluss der Sorten erfolgt in zwei Kategorien, einer normalen und einer stark anfälligen Gruppe, die sich unterschiedlich stark auf die Höhe der berechneten Raten auswirken. Die zwei Kategorien werden aus der Sortenbewertung des Bundessortenamtes bezüglich ihrer Anfälligkeit für Krautfäule abgeleitet. Die Anbaudichte wird ebenfalls in zwei Gruppen unterteilt, Regionen mit hoher Anbaudichte $\geq 10\%$ und Regionen mit einer Anbaudichte $< 10\%$. Zusammen mit der Bodenfeuchte hat sie Auswirkungen auf die angenommene Höhe des dimensionslosen hypothetischen Initialbefalls (Tabelle 12). Hierbei findet auch bei der Bodenfeuchte eine Klasseneinteilung statt. Dabei wird von einer hohen Bodenfeuchte ausgegangen, wenn das Feld an mindestens vier aufeinanderfolgenden Tagen zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf nicht befahrbar war (KLEINHENZ et al. 2006). Diese Angabe wird individuell nach subjektiver Einschätzung vom Modellnutzer eingegeben.

Tabelle 12: Höhe des dimensionslosen hypothetisch angenommenen Initialbefalls in SIMBLIGHT1 der unterschiedlichen Klassenkombinationen aus Anbaudichte und Bodenfeuchte

		Bodenfeuchte	
		niedrig	hoch
Anbaudichte	niedrig	0,000002	0,00005
	hoch	0,000008	0,00005

Mit den dargestellten Grundlagen wird vom Modell das Risiko des Ausbruchs einer Phytophthora-Epidemie berechnet. Hierbei nimmt der Befallsindex Werte zwischen 0 und 100 an (Abbildung 45). Erreicht der Befallsindex den Schwellenwert von 100, wird ein Ausbruch der Krankheit vorhergesagt und vom Modell die erste Fungizidmaßnahme empfohlen.

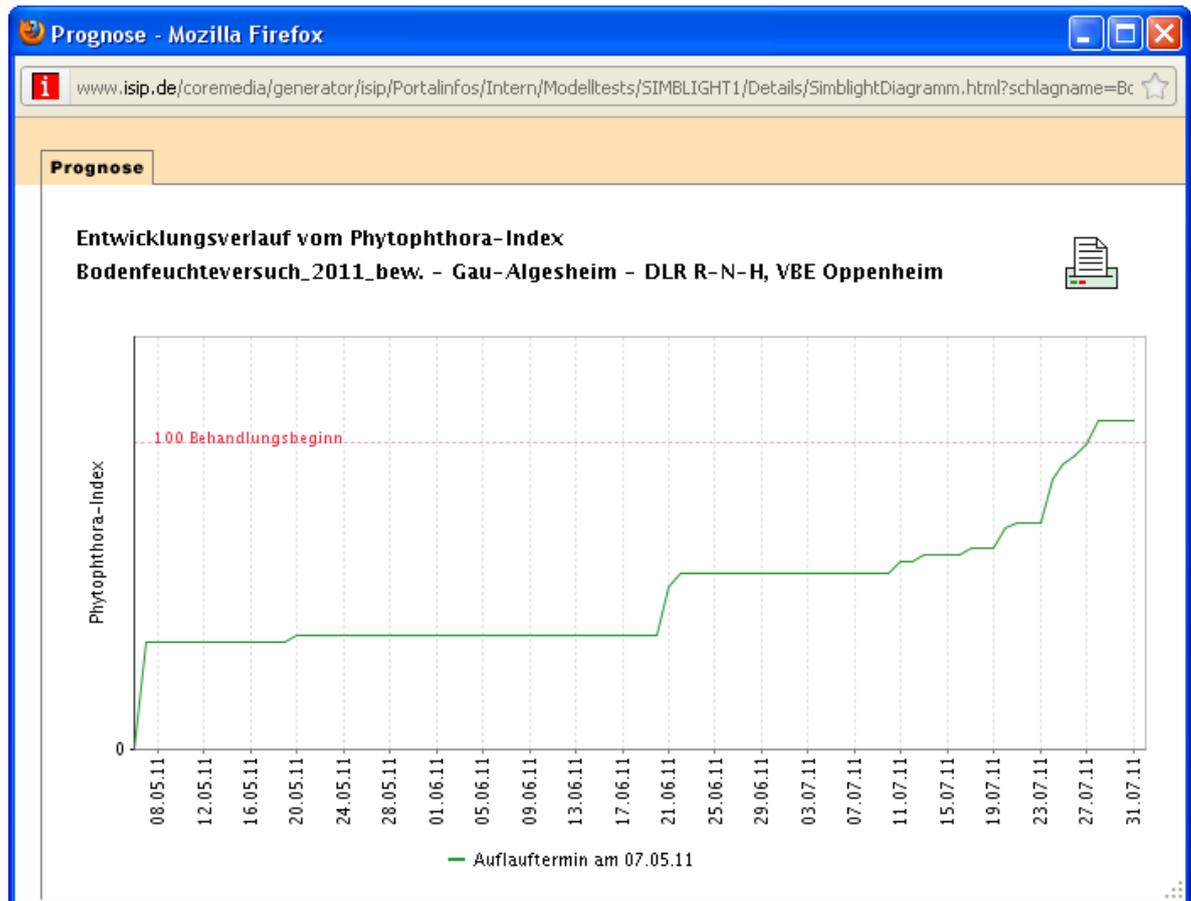


Abbildung 45: Beispiel des Entwicklungsverlaufs des Phytophthora-Index des Prognosemodells SIMBLIGHT1

4.2 Laborversuche

4.2.1 Nachweisverfahren von *P. infestans*

4.2.1.1 Blattscheibentest (Biotest)

Zum Nachweis von vitalen Sporen des Pilzes *P. infestans* im Wasser eignet sich ein Biotest. Dieser wird im Labor am Dienstleistungszentrum Ländlicher Raum Rheinhessen-Nahe-Hunsrück (DLR RNH) genutzt und kam in den Laborversuchen zur Anwendung. Hierfür wurden 15 Kartoffelblattscheiben der anfälligen Sorte Berber mit einem Korkbohrer (11 mm Durchmesser) ausgestanzt und mit der Blattunterseite als „Fangfläche“ auf die jeweilige zu untersuchende Wasseroberfläche aufgelegt (Abbildung 46). Je nach Versuch verblieb das Pflanzenmaterial in unterschiedlich definierten Längen auf dem zu testenden Wasser. Die abgenommenen Blattscheiben wurden im Anschluss in einer feuchten Kammer bei 15 °C für mehrere Tage inkubiert, wobei die Blattunterseite nach oben gewandt wurde. Die feuchte Kammer bestand aus einer Petrischale mit Gaze und 15 ml destilliertem Wasser, sodass ein leichter Wasserfilm auf den Blattscheiben verblieb, diese aber nicht vollständig eintauchten. Bei erfolgreicher Infektion zeigten sich nach ca. fünf Tagen Myzel und Sporen von *P. infestans* auf den Blattscheiben (Abbildung 46).

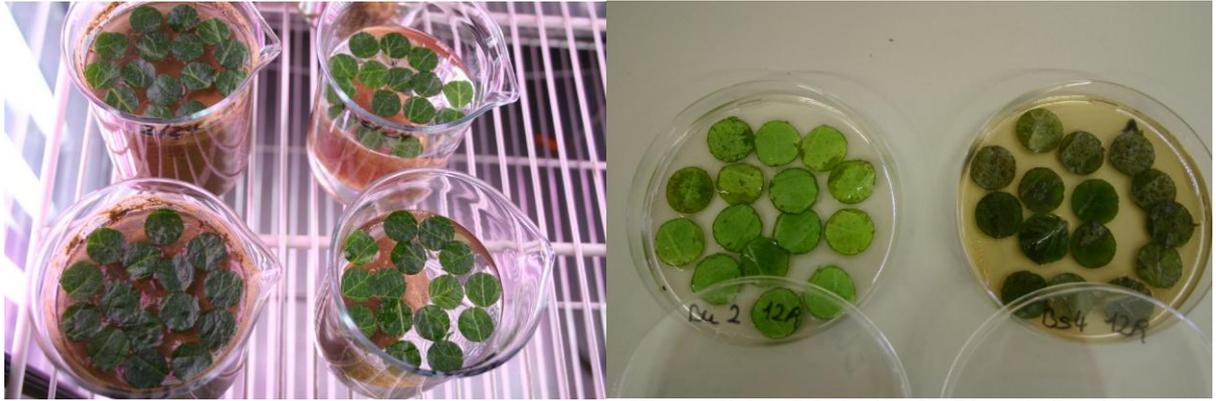


Abbildung 46: Fangmethode von Sporen von *P. infestans* im Wasser (links); Inkubation der Blattscheiben in feuchter Kammer (rechts) (eigene Aufnahmen)

4.2.1.2 PCR-Nachweis (DNA-Nachweisverfahren)

Um eine mögliche Stängelinfektion bereits vor dem sichtbaren Erstaufreten festzustellen, eignet sich eine molekularbiologische Untersuchung des Stängels auf latenten Befall. Hierbei wurde auf den PCR-Nachweis zurückgegriffen, bei welchem es sich um die Vervielfältigung einer über große Teile bekannten DNA-Sequenz und dem anschließenden DNA-Nachweis mit einer herkömmlichen Analyseverfahren handelt. Im Labor wurde die an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, genutzte DNA-Extraktion nach KEIL (2007) und die Gel-Elektrophorese modifiziert nach KRAUTHAUSEN (mündliche Mitteilung; verändert nach: JUDELSON und TOLLEY 2000) etabliert. Auf *P. infestans* positiv getestete Proben zeigten nach der Gel-Elektrophorese eine Bande bei 258 bp (PCR Protokoll siehe Anhang).

4.2.2 Künstliche Infektion der Knollen

Um in den durchgeführten Labor- und Freilandversuchen von einem sicheren Befall der Knollen mit *P. infestans* auszugehen, war eine künstliche Infektion der Knollen erforderlich. Hierfür wurde ein bereits von BÄBLER (2005) etabliertes Verfahren verwendet. Ein von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, zur Verfügung gestelltes Isolat des Pilzes *P. infestans* mit der Isolatnummer 31 wurde von einer Petrischale durch eine Lösung mit destilliertem Wasser in ein Becherglas überführt. „Zur Abtrennung der Hyphenfäden von den Sporangien wurde der jeweilige Pilzrasen durch Mull filtriert. Die Inokulumdichte konnte durch Auszählung der Sporangien in einer Thoma-Zählkammer bestimmt werden. Um die gewünschte Inokulumkonzentration von $5,5 \times 10^4$ Sporangien/ml zu erhalten, musste die Suspension mit der entsprechenden Menge an destilliertem Wasser verdünnt werden“ (BÄBLER 2005). Um das Schlüpfen von Zoosporen zu gewährleisten, erfolgte die Lagerung der Sporangiensuspension bei 4 °C im Kühlschrank. Mit der gewonnenen Zoosporensuspension wurden im Anschluss Knollen der Sorte Laura künstlich infiziert. Diese Sorte wird an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, verwendet und

hat sich in vielfältigen Versuchen als geeignet erwiesen (ZELLNER et al. 2009). Für die Infektion wurden die Knollen mit einer Spritze neben einem „Auge“ angestochen und die Kanüle zur Mitte hin eingeführt (Abbildung 47). Während des Herausziehens der Kanüle konnte die Lösung in die Knollen injiziert und somit die Zoosporen in das Kartoffelgewebe eingebracht werden.

Je nach Knollengröße wurde an mehreren Stellen inokuliert, um einen größeren Infektionserfolg zu erreichen. Zur Vermeidung einer Sporulation von *P. infestans* auf der Knollenoberfläche wurde ausgetretene Infektionslösung mit einem Papier abgetupft. Im Anschluss an die Inokulation wurden die Knollen bei 10 °C dunkel gelagert (Methode nach BÄßLER 2005).

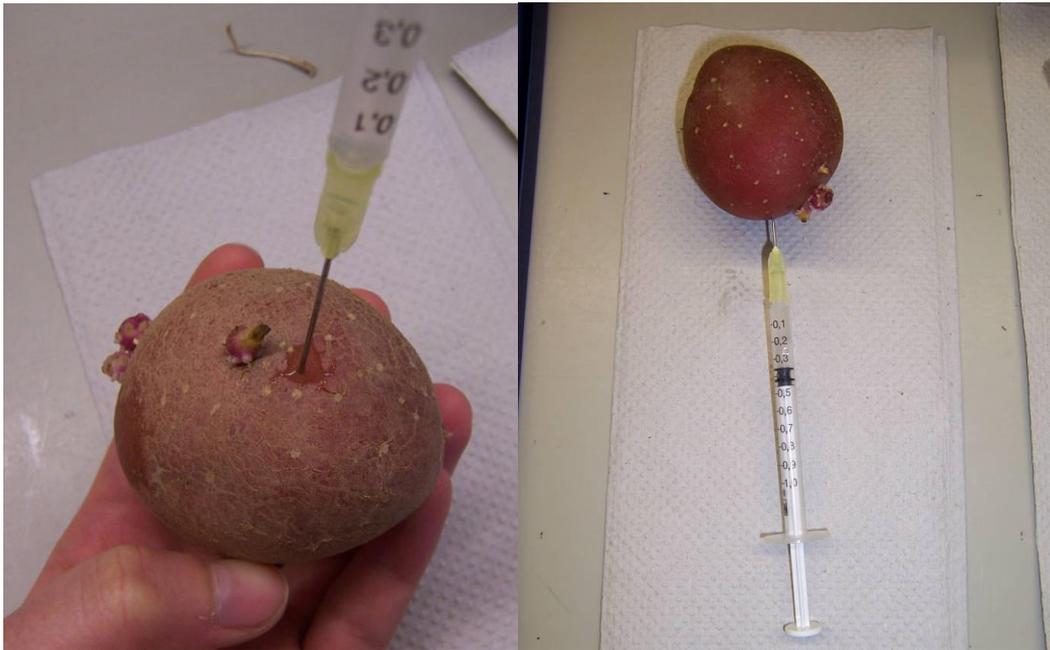


Abbildung 47: Knolleninfektion mit *P. infestans* (eigene Aufnahme)

Nach dreiwöchiger Lagerung musste die künstliche Infektion überprüft werden. Hierfür wurden fünf zufällig ausgewählte Knollen in der Mitte halbiert und im Anschluss in eine feuchte Kammer gelegt. Oft waren bereits Verbräunungen der Knollen festzustellen (Abbildung 48). Um eine erfolgreiche Infektion sicher zu überprüfen, mussten die Knollen nach einigen Tagen Lagerung in einer feuchten Kammer auf Myzel- und Sporenbildung untersucht werden. In Abbildung 48 ist das Ergebnis einer erfolgreichen Infektion sichtbar.

Dieses Verfahren der Knolleninfektion bildete die Grundlage für den unter Kapitel III Absatz 4.2.4 beschriebenen Laborversuch und die unter Absatz 4.3 dargestellten Freilandversuche.



Abbildung 48: Künstlich mit *P. infestans* infizierte Kartoffelknollen (eigene Aufnahmen)

4.2.3 Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Der Arbeitshypothese zufolge kann der Sporentransport von infizierten Knollen an gesundes Pflanzenmaterial nur über das Bodenwasser bei ausreichender Füllung des Porenraumes, mindestens bis zur Füllung einschließlich der engen Grobporen, stattfinden. Im Laborversuch war daher die Dauer des Prozesses von der Sporenablösung an einer infizierten Knolle, bis zur Sporenlandung an gesundem Pflanzenmaterial zu untersuchen (Abbildung 43). Mit den Ergebnissen sollten Rückschlüsse über die benötigte Zeitdauer der Füllung der Grobporen des Bodens mit Wasser gewonnen werden. Als Inokulum wurden vollständig mit sporulierendem Myzel bewachsene Gemüsesaftagarplatten (Rezept Agar pro 500 ml: 100 ml Pölz Bio Gemüsesaft, 400 ml H₂O, 1 g CaCO₂ und 7,5 g Agar; 15 ml / Agarplatte) verwendet. Mit diesem Verfahren sollten jegliche Unterschiede im Ausgangsinokulum durch verschieden starke Sporenbildung an der Knolle ausgeschlossen werden. Die Versuche wurden mit den in Tabelle 13 aufgelisteten Varianten und Wiederholungen durchgeführt.

Tabelle 13: Varianten der Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Medium	Zustand	Temperatur	Wiederholungen
Wasser	steril	12°C	4
Wasser	steril	15°C	8
mittel lehmiger Sand	steril	12°C	4
mittel lehmiger Sand	unsteril	15°C	4
schwach toniger Lehm	steril	15°C	8
schwach toniger Lehm	unsteril	15°C	4
mittel lehmiger Sand	steril	15°C	4
mittel toniger Schluff	steril	15°C	4

Alle drei durchgeführten Versuchsdurchläufe (09. Juni, 19. Juli und 16. August 2010) beinhalteten Wasservarianten. Diese sollten einen staunassen Boden, in dem das komplette Porenvolumen des Bodens mit Wasser gefüllt ist und sich die Sporen frei bewegen können, simulieren. Jegliche Interaktionen mit Bodenantagonisten und die Filterwirkung der Bodenteilchen sollten ausgeschlossen

Das Wasser wurde über den Rand des Becherglases vorsichtig auf das Myzel gegossen. In den Bodenvarianten wurden 340 g des jeweiligen Bodens über die Agarplatte geschichtet und im Anschluss 250 ml Wasser zugegeben (ca. 5 cm Bodensäule und 1,5 cm Wasserüberstand). Die optischen Unterschiede der sterilen und unsterilen Variante sind in Abbildung 50 ersichtlich.



Abbildung 50: Bodenstruktur der sterilen (autoklavierten) und der unsterilen Variante der Bodenart schwach toniger Lehm nach Wasserzugabe des Versuches vom 19. Juli 2010 (eigene Aufnahme)

Die Versuchsansätze wurden bei 12 °C bzw. 15 °C im Klimaschrank inkubiert. Der Nachweis von frei verfügbaren Sporen im Wasser erfolgte mittels Biotest. Die untersuchten Zeitintervalle nach Versuchsstart waren 2, 5, 12, 24, 48 und teilweise 72 und 96 Stunden, wobei die Blattscheiben jeweils zwei Stunden vor Ende des Zeitintervalls auf die Wasseroberfläche aufgelegt und mit Ende des Intervalls abgenommen wurden.

4.2.4 Untersuchungen zur Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Nachdem im Kapitel III Absatz 4.2.3 beschriebenen Versuch die Dauer von der Sporenablösung bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials eingegrenzt werden sollte, war es das Ziel mit einem weiteren Versuch, die Knolle, also das natürlich vorkommende Inokulum, wieder in den Versuchsaufbau zu integrieren. In einem Versuch sollte die Dauer der Sporenfreisetzung aus der Knolle bis zur Sporenlandung an einem gesunden Stängel (siehe Abbildung 43) nachvollzogen und damit eine weitere Arbeitshypothese untersucht werden. Der Versuch beinhaltete vier Varianten mit je vier Wiederholungen (Tabelle 14). In den ersten beiden Varianten sollte im Vergleich zum in Kapitel III Absatz 4.2.3 beschriebenen Versuch nur der Faktor Knolle integriert werden, allerdings noch nicht der Faktor Boden. Daraus folgten zwei Wasservarianten bei 12 °C und 24 °C. Die Temperaturstufen wurden aus dem Maximum der indirekten Keimung (Zoosporenfreisetzung) und der direkten Keimung (Sporangienkeimung) abgeleitet (CROSIER 1934). Die Knollen wurden zur äußeren Desinfektion mit 70-prozentigem Ethanol abgerieben, um mögliche bereits an der Schale entstandene Sporen abzutöten und alle Knollen auf ein einheitliches Startniveau zu führen. Das

Gewicht der Knollen lag zwischen 41,15 und 90,14 g. Die Anzahl der bereits gebildeten Triebe lag zwischen einem und vier.

Tabelle 14: Varianten des Becherglasversuches zur Untersuchung der Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Variante	Temperatur	Wiederholungen
Boden	12 °C	4
Boden	24 °C	4
Wasser	12 °C	4
Wasser	24 °C	4

Nach der Ethanolbehandlung wurden die Knollen in Bechergläser gelegt. Alle Gläser wurden in dem jeweiligen Klimaschrank platziert und autoklaviertes Wasser zugegeben, sodass der Wasserpegel ca. 3 bis 4 cm über der Knolle lag. Der Nachweis von freigesetzten Sporen im Wasser erfolgte mittels Blattscheibentest (siehe Kapitel III Absatz 4.2.1.1). Die Blattscheiben wurden nach 24 Stunden abgenommen und durch 15 frische Blattscheiben ersetzt. Das Verfahren wurde zehn Tage lang täglich wiederholt.

Die Knollen der Bodenvarianten wurden ebenfalls in Bechergläsern im Klimaschrank platziert und mit Boden der Bodenart mittel lehmiger Sand bedeckt. Anschließend wurden diese Bechergläser ebenfalls mit Wasser befüllt, sodass ein Wasserüberstand über der Bodenoberfläche von ca. 1 bis 2 cm zu verzeichnen war (Abbildung 51). Auch in diesen Varianten erfolgte der Nachweis von Sporen von *P. infestans* mittels Blattscheibentest. Die Blattscheiben wurden zehn Tage lang täglich gewechselt.



Abbildung 51: Versuchsaufbau der 24 °C Varianten des Knollenversuchs (eigene Aufnahme)

4.2.5 Inkubationszeiten der Stängel

Um die Dauer der Inkubationszeit von *P. infestans* an den Blattscheiben mit derer von Stängelinfektionen vergleichen zu können, war eine Untersuchung der Latenzzeiten von *P. infestans* an Kartoffelstängeln nötig. Zusätzlich sollten die aus der Literatur verwendeten Inkubationszeiten von Kartoffelblättern (CROSIER 1934) verifiziert werden.

Im Labor wurden Kartoffelknollen der Sorte Laura zum Keimen gebracht. Nachdem die Knollen ca. 5 bis 10 cm lange Triebe entwickelt hatten, wurden sie am Ansatz der Knolle entfernt. Für den Versuch wurde eine Sporensuspension mit 20.000 Sporangien pro ml hergestellt. Hierfür wurde das Myzel einer mit *P. infestans* bewachsenen Agarplatte mit destilliertem Wasser gelöst und die gewonnene Flüssigkeit über Mull filtriert. Die Anzahl der Sporen der Suspension wurde mit Hilfe einer Thoma-Zählkammer ausgezählt und bis zur gewünschten Anzahl verdünnt. Im Anschluss wurden die Keime mit den Schnittstellen nach oben, sodass kein Kontakt mit der Suspension zustande kam, für zwei Stunden bei 15 °C in die Suspension gestellt (Abbildung 52).



Abbildung 52: Künstliche Infektion der Keime in einer Sporensuspension von *P. infestans* (eigene Aufnahme)

Nach zwei Stunden wurden die Keime aus der Suspension entnommen und in feuchte Kammern (Petrischalen mit Gaze und 25 ml destilliertem Wasser) verteilt, sodass in jeder Petrischale 20 Keime verblieben. Die Petrischalen wurden in Klimaschränken mit den Temperaturstufen 10, 15, 20 und 25 °C inkubiert (Abbildung 53). Im Anschluss wurden die Keime täglich unter dem Binokular auf Sporangien untersucht. War bei einem Keim *P. infestans* festzustellen, wurde dieser aus der Petrischale entfernt, um sekundäre Infektionen zwischen den Keimen zu vermeiden.



Abbildung 53: Inkubation der infizierten Keime bei unterschiedlichen Temperaturstufen in feuchter Kammer (eigene Aufnahme)

4.2.6 Isolation natürlich vorkommender Antagonisten – Antagonistentest

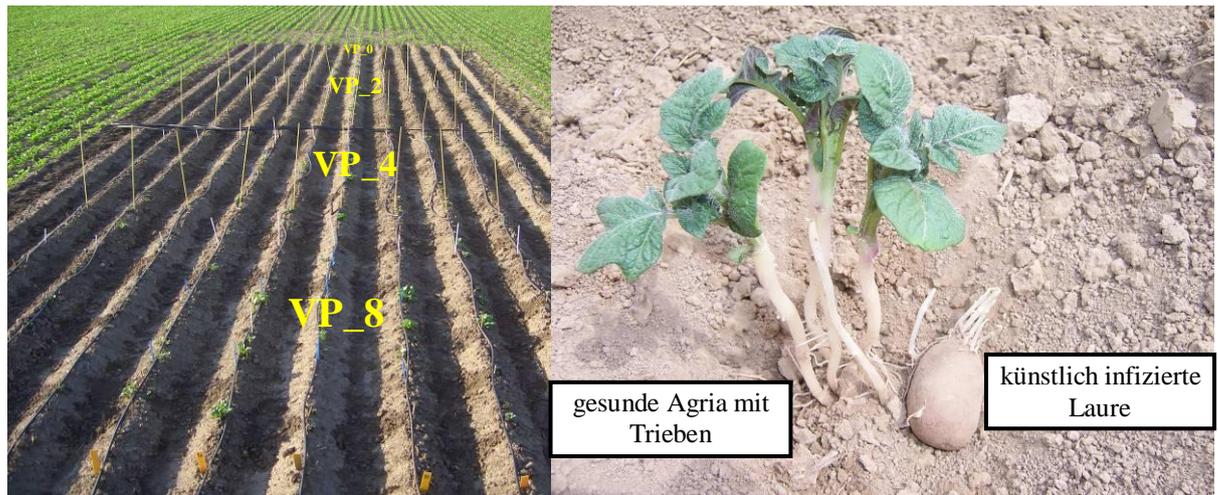
Bei der Beerntung des in 2010 durchgeführten Freilandversuches konnten Reste der mit *P. infestans* infizierten Pflanzknollen gewonnen werden. Von diesen Rückständen wurden im Labor mittels eines Dreiösenausstriches verschiedene Pilze auf Gemüsesaftagarplatten isoliert. Zusätzlich konnten Pilze aus dem umliegenden Boden auf Agarplatten isoliert werden. Mit den gewonnenen unterschiedlichen Pilzisolaten wurden Antagonistentests mit Myzel von *P. infestans* durchgeführt. Hierfür wurde jeweils ein ca. 0,5 cm² großes bewachsenes Agarstück der gewonnenen Pilzisolat mit einem gleichgroßen Agarstück mit Myzel von *P. infestans* im Abstand von ca. 3 cm auf eine Gemüsesaftagarplatte gebracht und bei 15 °C im Klimaschrank inkubiert. Das Wachstum bzw. die Interaktion der beiden Pilze wurde nach vier Tagen dokumentiert.

4.3 Freilandversuche

4.3.1 Feldversuch 2009

Im Freiland sollte der bei BÄßLER (2005) im Labor festgestellte Einfluss der Bodenfeuchte auf den Primärbefall von *P. infestans* untersucht werden (siehe Kapitel III Absatz 2). Um die Theorie einer stärkeren Übertragung von infizierten Knollen auf gesundes Pflanzgut bei länger andauernder Bodenfeuchte im Freiland zu bestätigen (BÄßLER 2005), wurden Parzellen kurz vor Auflauf der Kartoffeln unterschiedlich lange mit einem Tröpfchenbewässerungssystem bewässert. Dies waren acht, vier, zwei Tage Bewässerung und eine Parzelle ohne Bewässerung (Abbildung 54). In den Bewässerungsparzellen wurde täglich mit 50 mm/m² bewässert, wobei das Wasser gleichmäßig über den Tag verteilt ausgebracht wurde.

Für die Versuchsdurchführung wurden am 22. April in der Mitte eines Zuckerrübenschlags vier Parzellen angelegt. Der Versuch bestand aus 10 Kartoffeldämmen mit einer Länge von ca. 31 Metern, welche in die vier Parzellen unterteilt wurden. Außer in den Randbereichen wurde im ganzen Versuch mit einem Doppelpflanzverfahren gearbeitet. In den Kernbereichen einer jeden Parzelle wurde eine künstlich infizierte Knolle der Sorte Laura und eine gesunde Knolle der Sorte Agria gepflanzt, sodass sich in 20 Pflanzlöchern jeder Parzelle ein Bereich mit infizierten Knollen befand. Der restliche Bereich aller Parzellen wurde mit jeweils einer gesunden Knolle der Sorte Laura und Agria bepflanzt (Abbildung 54).



VP_0	VP_2	VP_4	VP_8
keine Bewässerung	2 Tage Bewässerung (50 l/m ² pro Tag)	4 Tage Bewässerung (50 l/m ² pro Tag)	8 Tage Bewässerung (50 l/m ² pro Tag)

Abbildung 54: Versuchsanlage des Freilandversuchs 2009 (links); gekeimte Knollen in einem Pflanzloch mit Doppelpflanzverfahren (rechts) (eigene Aufnahmen)

Die Bodenfeuchte in jeder Versuchsparzelle wurde ab Pflanzung alle zwei Tage gravimetrisch bestimmt. Hierfür wurden mit einem Stechzylinder von 100 cm³ Volumen in jeder Parzelle zu Beginn sechs, im späteren Verlauf vier Bodenproben gezogen und der Mittelwert bestimmt. Parallel dazu wurde das Erstauftreten von *P. infestans* bonitiert. Zusätzlich wurde jede Woche die Porengrößenverteilung bzw. die Wasserspannungskurve jeder Parzelle vom Bodenlabor der Universität Mainz nach DIN 19683, Teil 5 bestimmt. Dies war nötig um die Veränderung der Porengrößenverhältnisse und den mit Wasser gefüllten Porenbereich zu bestimmen. Somit konnten die Tage, an denen eine Übertragung von *P. infestans* stattfinden konnte, bestimmt werden. Am 25. Juni wurden aus jeder Parzelle sieben Stängel der Sorte Agria entnommen und eine Mischprobe jedes Stängels auf latenten Befall mit *P. infestans* mittels PCR-Nachweis an der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, untersucht.

4.3.2 Feldversuch 2010 und 2011

In den Jahren 2010 und 2011 wurde erneut der Einfluss der Bodenfeuchte auf den primären Befall mit *P. infestans* im Freiland mit einem etwas veränderten Versuchsaufbau untersucht. In einem Getreideschlag wurden sechs Versuchspartellen mit jeweils fünf Reihen und einer Länge von vier Metern sowie einem Abstand zwischen den unterschiedlich bewässerten Partellen von zwei Metern angelegt. Drei der Partellen wurden mit einer Lochfolie abgedeckt (siehe Tabelle 15).

Tabelle 15: Beschreibung der Versuchspartzen der Freilandversuche in 2010 und 2011

Versuchspartzen	Pflanzung		Bewässerung (tägliche je 20 l/m ²)		Stängelentnahme zur PCR- Untersuchung	
	2010	2011	2010	2011	2010	2011
Parzelle 1 (unbewässert ohne Folie)	15. April	12. April	keine	keine	28. Juni	6. Juni
Parzelle 2 (unbewässert mit Folie)						
Parzelle 3 (bewässert vor Auflauf ohne Folie)			10./11. Mai	2. bis 5. Mai		
Parzelle 4 (bewässert vor Auflauf mit Folie)						
Parzelle 5 (bewässert nach Auflauf ohne Folie)			27. Mai	17. bis 20. Mai		
Parzelle 6 (bewässert nach Auflauf mit Folie)						

In jede Variante wurde ein Messgerät zur stündlichen Bodenfeuchtemessung eingeschlämmt. Hierbei handelte es sich um ein Watermark-Monitor-Paket mit sechs Messsensoren der Firma Irrrometer. Die Watermark-Sensoren messen die Saugspannung im Boden. Wie in 2009 wurde die Versuchsfläche mit dem Doppelpflanzverfahren bepflanzt, sodass sich in jedem Pflanzloch eine künstlich infizierte Knolle der Sorte Laura und eine gesunde Knolle der Sorte Agria befanden. Die Randbereiche wurden mit zwei gesunden Knollen bepflanzt. Der Abstand zwischen den beiden Knollen betrug ca. 1 cm (Abbildung 55). In jeder Variante befanden sich somit 48 infizierte Knollen.



Abbildung 55: Anordnung der Knollen bei dem Doppelpflanzverfahren des Freilandversuchs in 2010 und 2011 (eigene Aufnahme)

Die Bewässerung erfolgte mittels Beregnung. Die Partzen wurden in drei unterschiedlichen Varianten beregnet: zwei Partzen blieben unbewässert, zwei Partzen wurden vor Auflauf bewässert und zwei Partzen zehn Tage nach Auflauf. Der Versuch startete am 15. bzw. 12. April (siehe Tabelle 15). Die bewässerten Partzen wurden an den Bewässerungstagen täglich mit 20 l/m² beregnet, wobei das Wasser in einem Zeitintervall von einer Stunde ausgebracht wurde. Mit den angegebenen Mengen konnte ein Starkniederschlagsereignis mit Splash-Effekten simuliert und

kurzzeitig Staunässe erreicht werden (Abbildung 56). Vorgesehen war in allen zu bewässernden Parzellen eine Bewässerung von vier aufeinanderfolgenden Tagen. Aufgrund der starken Niederschläge im Mai 2010 wurde die Bewässerung in diesem Jahr auf zwei bzw. einen Tag verkürzt (siehe Tabelle 15). Die Bonitur des Erstauftritts von *P. infestans* fand zweimal wöchentlich statt. Am 28. bzw. 6. Juni (siehe Tabelle 15) wurden aus jeder Parzelle 20 Stängel der Sorte Agria entnommen. Aufgrund der außergewöhnlich warmen Witterungsverhältnisse im April/Mai 2011 fand die Probenentnahme deutlich früher als in 2009 und 2010 statt. Dies gewährleistete ein relativ identisches Entwicklungsstadium der Kartoffelpflanzen zum jeweiligen Probenahmetermin. Aus jedem Stängel wurde eine Mischprobe hergestellt. Material dieser Mischprobe wurde mittels PCR-Nachweis auf *P. infestans* im Gewebe untersucht.



Abbildung 56: Situation im Freilandversuch in 2010 während der Bewässerung (Staunässe und Splash-Effekte wurden erzielt) (eigene Aufnahmen)

4.4 Analysen von externen Felderhebungsdaten

Der ZEPP stehen im Rahmen der Modellvalidierung vielfältige Boniturdaten zum Erstauftritt von *P. infestans* zur Verfügung. Diese Daten wurden in den letzten zehn Jahren von den jeweiligen Pflanzenschutzdiensten der Länder erhoben. Zusätzlich sind Wetterdaten über das Programm AgmedaWin abruf- und auswertbar (siehe Kapitel II Absatz 2.2). Damit ist es über die in Kapitel II beschriebenen Bodenfeuchtesimulationsmodelle möglich, die Bodenfeuchte nachträglich für die entsprechenden Standorte über allgemein verfügbare Wetterdaten zu modellieren. Aus den externen Felderhebungsdaten wurden 21 Fälle, bei welchen eine primäre Stängelinfektion bonitiert wurde, aus

verschiedenen Jahren ausgewählt. Mit dieser Datengrundlage konnten die bonitierten Erstaufretenstermine in Relation zur Bodenfeuchte am jeweiligen Standort des jeweiligen Jahres gesetzt werden. Hierfür fanden Korrelationsberechnungen zwischen der Anzahl der Tage über Feldkapazität und der Anzahl der Tage zwischen Auflauf und Erstaufreten statt.

4.5 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen der deskriptiven Statistik, Varianzanalysen sowie Korrelation- und Signifikanztests. Im Rahmen der deskriptiven Statistik fand die Auswertung mittels Box-Whisker-Plots zum Vergleich der Mittelwerte sowie der Verteilung der Ergebnisse statt. Zur Überprüfung von Signifikanzen fand der Friedman-Test, der Pearson-Test sowie der Post-Hoc-Test nach Tukey Anwendung. Signifikanzen wurden zum Niveau Alpha = 0,05 mit * und zum Niveau Alpha = 0,01 mit ** gekennzeichnet.

Die Auswertungen wurden mit dem Programm XLSTAT Version 2008.5.01 durchgeführt.

5. Ergebnisse

5.1 Laborversuche

5.1.1 Becherglasversuche zur Bestimmung des Zeitraums zwischen Sporenkeimung und der Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Die durchgeführten Becherglasversuche ergaben die in Abbildung 57 bis Abbildung 59 dargestellten Ergebnisse. In allen drei Versuchsdurchläufen kam es in allen Wiederholungen der Wasservarianten zu erfolgreichen Infektionen mit *P. infestans* an den Blattscheiben. Sie unterschieden sich allerdings in dem prozentualen Anteil infizierter Blattscheiben.

Die einzelnen Wiederholungen der Wasservarianten zeigten innerhalb eines Versuchsdurchlaufs deutliche Unterschiede in ihren Maxima der infizierten Blattscheiben im zeitlichen Verlauf nach Stunden. In allen Wiederholungen zeigte sich, dass eine deutliche Abnahme der Anzahl infizierter Blattscheiben nach 48 Stunden zu verzeichnen war. Diese war im FRIEDMAN-Test signifikant im Vergleich zu den Zeitintervallen 2, 5 und 12 Stunden (Signifikanzniveau Alpha = 0,05) bzw. im Vergleich zu den Zeitintervallen 2, 5, 12 und 24 Stunden bei einem Signifikanzniveau von Alpha = 0,1. Ab 96 Stunden waren keine infizierten Blattscheiben in den Wasservarianten mehr zu verzeichnen (Abbildung 59). Ein Zeitintervall von 2 Stunden reichte in allen Wiederholungen der Wasservarianten aus, um erfolgreiche Infektionen an den Blattscheiben zu erzielen.

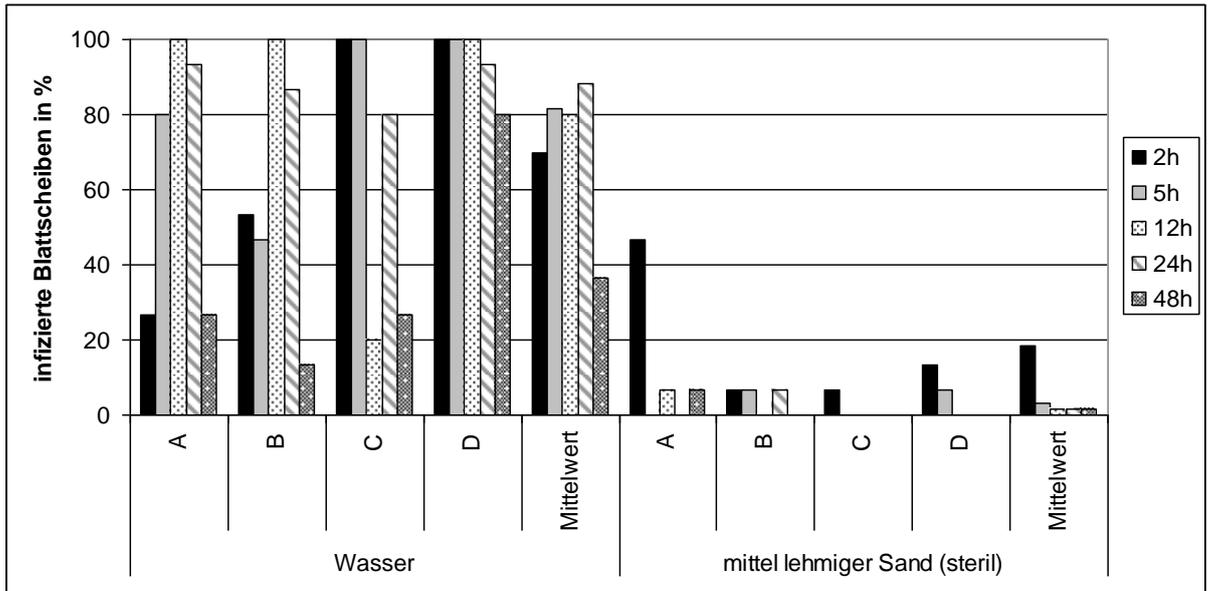


Abbildung 57: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 09.06.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (steril) im Klimaschrank bei 12 °C

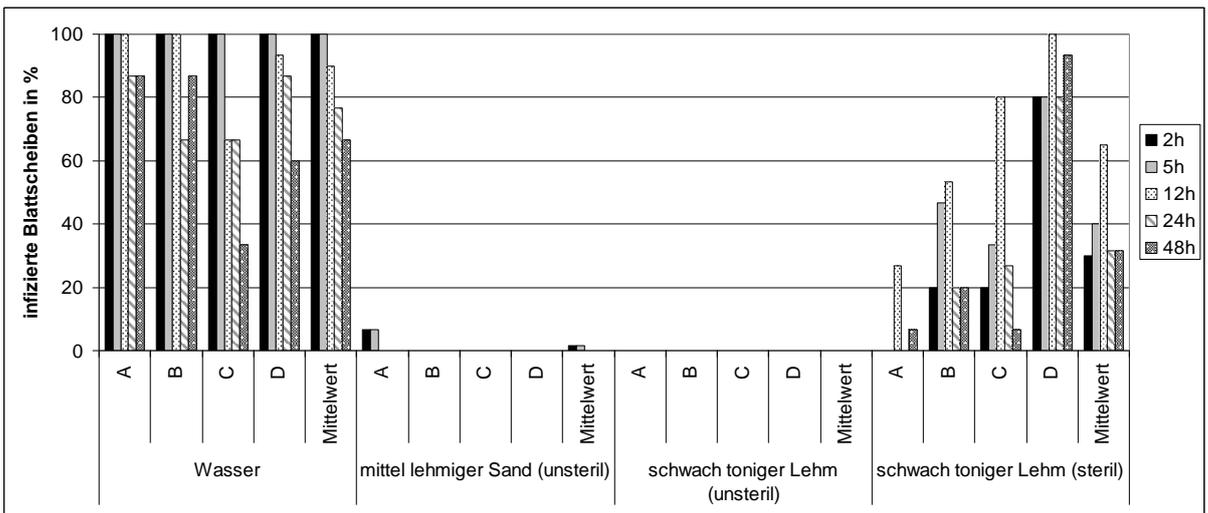


Abbildung 58: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 19.07.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (unsteril), schwach toniger Lehm (unsteril) und schwach toniger Lehm (steril) im Klimaschrank bei 15 °C

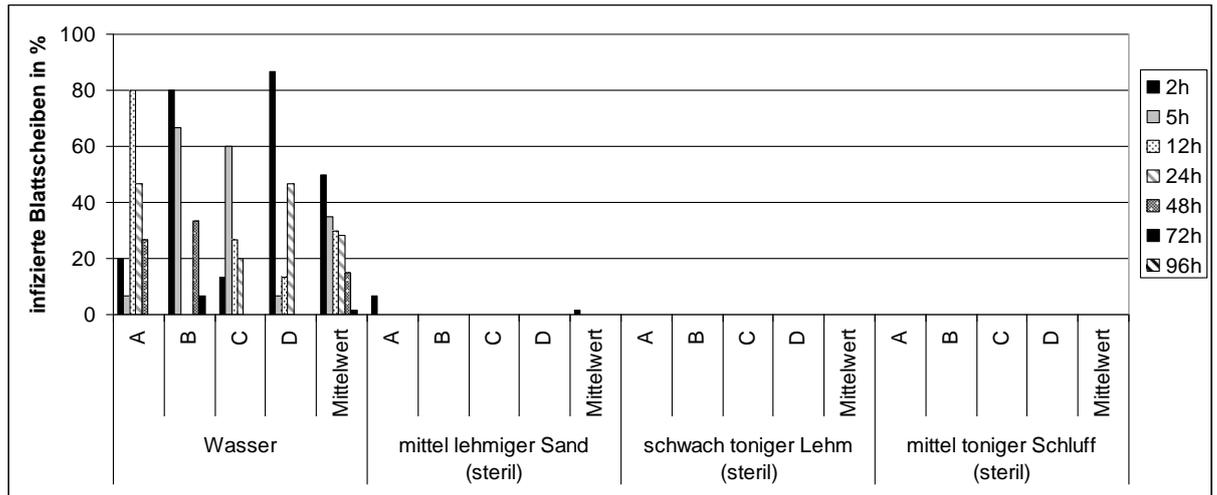


Abbildung 59: Prozentualer Anteil der infizierten Blattscheiben im Becherglasversuch vom 16.08.2010 in den Varianten Wasser und mittel lehmiger Sand (steril), schwach toniger Lehm (steril) und mittel toniger Schluff (steril) im Klimaschrank bei 15 °C

Der Vergleich der Bodenvarianten stellte sich schwieriger dar, da deutliche Unterschiede zwischen den einzelnen Versuchsdurchläufen auftraten. Im Versuch vom 19. Juli 2010 wurde deutlich, dass es zu gravierenden Unterschieden im Anteil der infizierten Blattscheiben zwischen den sterilen und den unsterilen Bodenvarianten kam. Während es in der Bodenart schwach toniger Lehm in den sterilen Varianten zu einem Maximum der infizierten Blattscheiben bis zu 100 % kam, waren in der unsterilen Variante keine Infektionen zu verzeichnen (Abbildung 58). In der zusätzlich getesteten unsterilen Bodenart mittel lehmiger Sand kam es lediglich zu einem infizierten Anteil an Blattscheiben von 7 %. In der sterilen Variante dieser Bodenart waren im Versuchsdurchlauf vom 09. Juni bis zu 45 % der Blattscheiben einer Variante infiziert (Abbildung 57).

Rückschlüsse auf eine unterschiedlich starke Übertragung von Zoosporen in Bezug auf die zwei Bodenarten, zumindest unter sterilen Bedingungen, konnten in einer Wiederholung des Versuches nicht bestätigt werden. Im Versuchsdurchlauf vom 16. August 2010 kam lediglich an einer Wiederholung der Bodenvariante mittel lehmiger Sand nach 2 Stunden eine Infektion mit einem Anteil von sieben Prozent vor (Abbildung 59). Alle anderen Zeitintervalle dieser Bodenart und alle Wiederholungen der anderen zwei Bodenarten schwach toniger Lehm und mittel toniger Schluff zeigten keine Infektionen an den Blattscheiben trotz steriler Böden.

5.1.2 Untersuchungen zur Dauer der Freisetzung von Sporen aus Kartoffelknollen in das Bodenwasser bis zur Infektion gesunden Pflanzenmaterials

Die dem Versuch zugrundeliegenden Hypothesen einer erfolgreichen Blattinfektion in allen Wasservarianten und in den Bodenvarianten nur bei 12 °C, dem Maximum der indirekten Keimung, konnte im Versuch nicht bestätigt werden. Der Blattscheibentest ergab nur eine Infektion in der

Wasservariante 4 bei 12 °C nach zehn Tagen. Alle anderen Varianten blieben im Blattscheibentest negativ (Tabelle 16).

Tabelle 16: Beschreibung und Ergebnisse der Versuchsglieder des Knollenversuchs

	Ergebnisse 2-9 Tage	Ergebnisse 10 Tage
Boden 1 (12 °C)	neg.	neg.
Boden 2 (12 °C)	neg.	neg.
Boden 3 (12 °C)	neg.	neg.
Boden 4 (12 °C)	neg.	neg.
Boden 1 (24 °C)	neg.	neg.
Boden 2 (24 °C)	neg.	neg.
Boden 3 (24 °C)	neg.	neg.
Boden 4 (24 °C)	neg.	neg.
Wasser 1 (12 °C)	neg.	neg.
Wasser 2 (12 °C)	neg.	neg.
Wasser 3 (12 °C)	neg.	neg.
Wasser 4 (12 °C)	neg.	pos. (3 Blätter)
Wasser 1 (24 °C)	neg.	neg.
Wasser 2 (24 °C)	neg.	neg.
Wasser 3 (24 °C)	neg.	neg.
Wasser 4 (24 °C)	neg.	neg.

Myzelwachstum an den Knollen konnte an weiteren Varianten beobachtet werden. Dies waren die Wasservariante 1 und 3 bei 24 °C und die Wasservariante 4 bei 12 °C (auch positiv im Blattscheibentest). Bei den 24 °C Varianten kam es während des Versuchs zu Bakterienbildung.

5.1.3 Inkubationszeiten der Stängel

Das Ergebnis des Inkubationsversuches ist in Abbildung 60 dargestellt. Während bei 15 °C die Mehrheit der Keime bereits nach fünf Tagen infiziert war, war die Inkubationszeit bei 10 °C fast doppelt so lange. Die ersten Symptome traten bei 20 und 25 °C bereits nach drei Tagen auf.

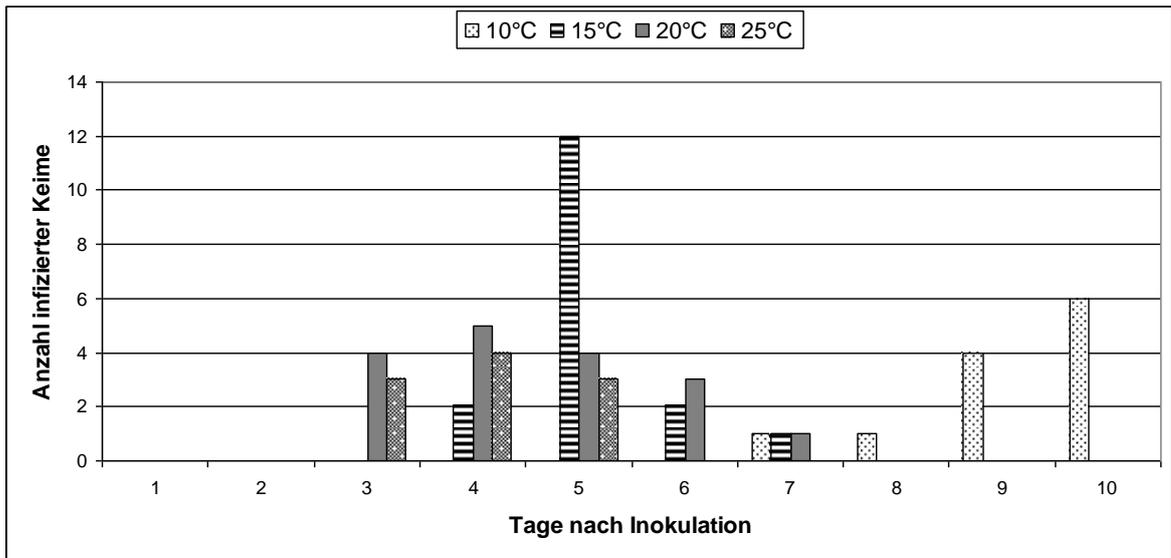


Abbildung 60: Anzahl der infizierten Keime nach Tagen nach der Inokulation

Die Inkubationszeit der Keime wurde im Anschluss mit der Inkubationszeit von Kartoffelblättern aus Literaturangaben (CROSIER 1934 und MIZUBUTI 1998) verglichen. Hierfür wurde eine täglich Rate der Inkubationszeit bei den unterschiedlichen Temperaturstufen berechnet (Abbildung 61). Die Werte der Rate können dann täglich in Bezug zum Tagesmittelwert der Temperatur aufsummiert werden. Erreicht die Summe 1, ist die Inkubationszeit abgelaufen und es kommt zu einem Ausbruch der Krankheit.

Im Vergleich der Raten der Keime mit den Raten der Literaturangaben zu Inkubationszeiten von Blättern zeigte sich, dass die Inkubationszeit der Keime länger ist. Betrachtet man den Temperaturbereich von 15 °C verlängert sich die Inkubationszeit um einen Tag, von vier Tage auf fünf Tage. Bei 10 °C liegt die Differenz zwischen Blättern und Keimen bei zwei Tagen, bei 20 °C liegt sie unter einem Tag. Es liegen somit Unterschiede im Vergleich der Inkubationszeiten zwischen Keimen und Stängeln vor.

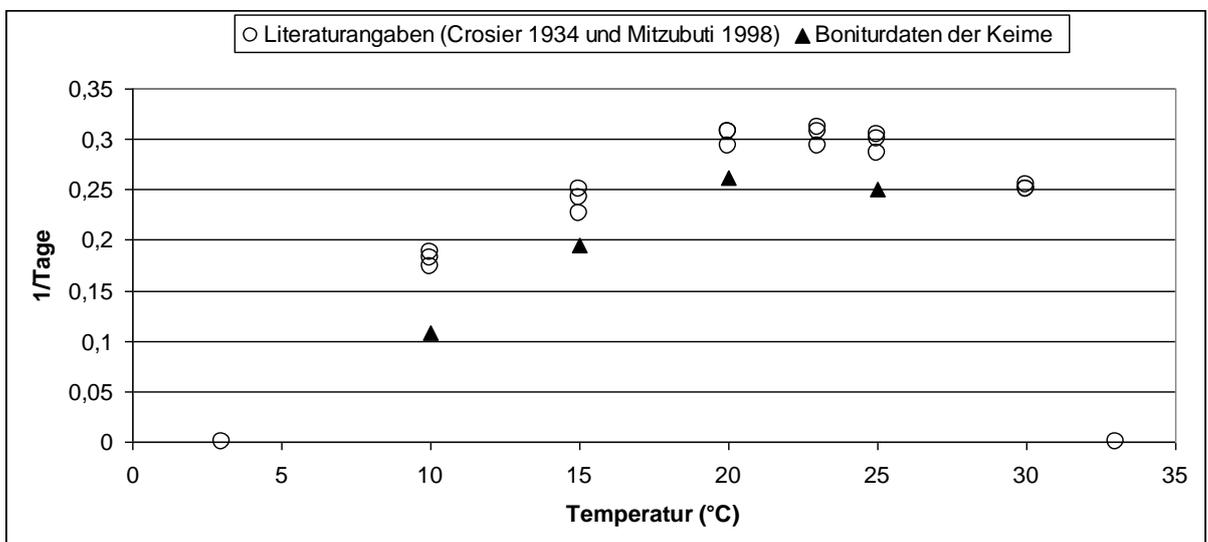


Abbildung 61: Vergleich der täglichen Raten der Inkubationszeit von *P. infestans* an Blättern (CROSIER 1934 und MIZUBUTI 1998) mit denen an Keimen (Boniturwerte)

5.1.4 Isolation natürlich vorkommender Antagonisten – Antagonistentest

Die Auswertung des Antagonistentests ergab, mit einer Ausnahme, ein einheitliches Ergebnis. Außer dem Test auf Agarplatte 4, zeigten alle Antagonisten ein schnelleres Wachstum als das Myzel von *P. infestans* (Abbildung 62). Innerhalb von einem bis vier Tagen war das Myzel von *P. infestans* vollständig von den entsprechenden Antagonisten überwuchert und das Wachstum gehemmt. Auf Agarplatte 5 wurde die Hemmung des Wachstums optisch sichtbar, dort wuchs das Myzel nach dem Zusammentreffen mit dem Antagonisten nur noch in die entgegengesetzte Richtung. Da die Wachstumsgeschwindigkeit des Antagonisten die von *P. infestans* deutlich überstieg, konnte sich der Pilz nur über einen kurzen Zeitraum am Leben erhalten. Die Bestimmung der Antagonisten wurde aus Kapazitätsgründen im Rahmen dieser Arbeit nicht durchgeführt.



Abbildung 62: Aufnahme des Antagonistentest nach vier Tagen – rechts auf jeder Agarplatte Myzel von *P. infestans* mit den jeweils unterschiedlichen Antagonisten auf der linken Seite der einzelnen Platten (eigene Aufnahme)

5.2 Freilandversuche

5.2.1 Feldversuch 2009

5.2.1.1 Versuchsauswertung

Aus den unter Kapitel III Absatz 2 aufgeführten Literaturangaben konnte ein „Infektionsschwellenwert“ definiert werden. Dieser leitet sich aus der aktuellen Porengrößenverteilung

im Boden und der zur Sporenkeimung bzw. Zoosporenbewegung benötigten Wasserfüllung des Porenbereiches ab. Er befindet sich an der Grenze zwischen engen und weiten Grobporen, im Bereich der Feldkapazität des Bodens (siehe Tabelle 11).

In Abbildung 63 ist die Ableitung des Infektionsschwellenwertes im Versuch dargestellt. Er wurde für jede Parzelle aus den wöchentlich bestimmten pF-Kurven erstellt und veränderte sich damit zeitlich gesehen während des Versuchsverlaufs durch die Veränderung der Bodenstruktur.

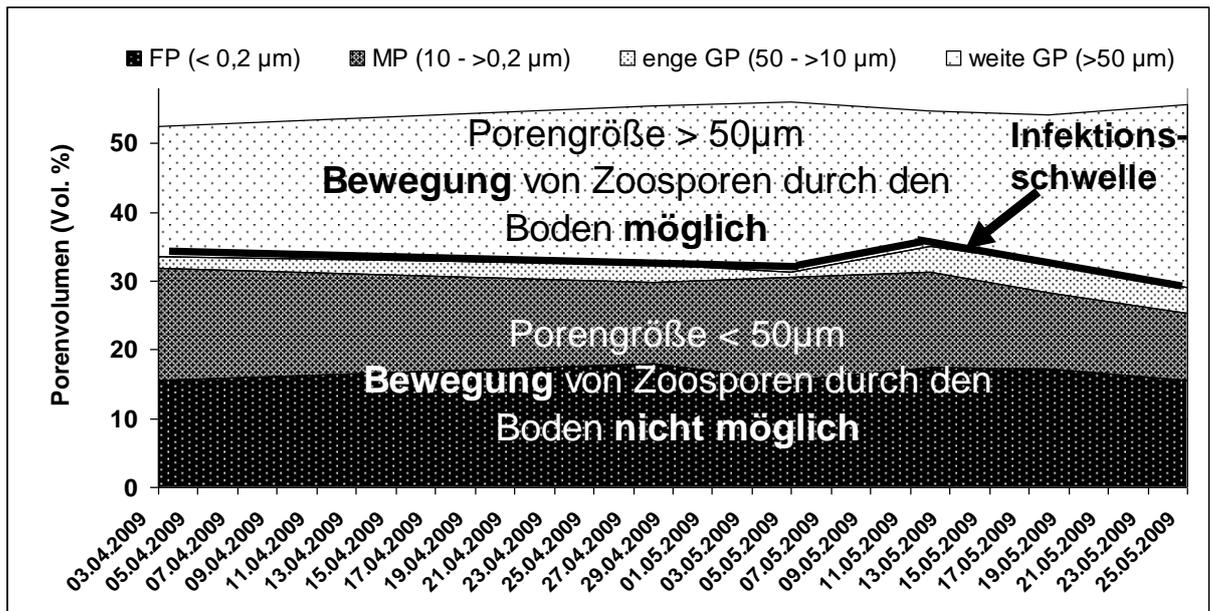


Abbildung 63: Porengrößenverteilung im Freilandversuch 2009 und Ableitung des Infektionsschwellenwertes aus wöchentlichen Probenahmen

Aus den im Feldversuch wöchentlich bestimmten pF-Kurven wurden für alle Parzellen die Infektionsschwellen abgeleitet. Dabei konnte festgestellt werden, dass sich aufgrund der Veränderung der Bodenstruktur infolge der Bewässerung auch die Infektionsschwelle in allen Parzellen anders verhält. Die Unterschiede sind in Abbildung 64 dargestellt.

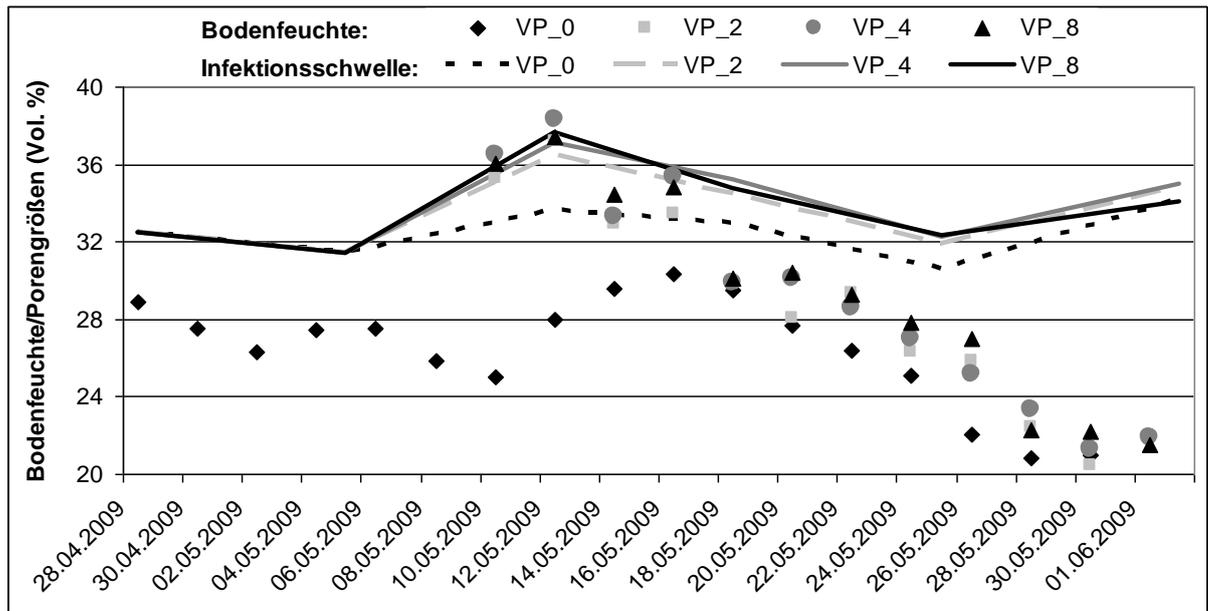


Abbildung 64: Infektionsschwellen und Bodenfeuchten der unbewässerten Parzelle (VP_0), der zwei Tage bewässerten Parzelle (VP_2), der vier Tage bewässerten Parzelle (VP_4) und der acht Tage bewässerten Parzelle (VP_8)

In den drei bewässerten Versuchspartzen wurde der Infektionsschwellenwert mindestens zum Messtermin am 10. Mai überschritten. Es kam in keiner Parzelle zu einer Stängelinfektion. In der zwei Tage bewässerten Parzelle kam es an einer Pflanze im infizierten Bereich am 1. Juli erstmals zu einer sichtbaren Infektion am Blatt. Von dort breitete sich die Infektion rasant im Bestand aus.

5.2.1.2 Laboranalysen

Lediglich eine Stängelprobe aus der zwei Tage bewässerten Parzelle zeigte einen positiven Befund in der PCR-Untersuchung auf latenten Befall mit *P. infestans*. Dies entsprach einem Anteil von 14 %. In allen anderen Parzellen konnte kein positiver Befund festgestellt werden. Da der positive Anteil so gering war, wurde auf statistische Auswertung verzichtet. Der Probenumfang wurde in den darauffolgenden Jahren deutlich erhöht.

5.2.2 Feldversuch 2010

5.2.2.1 Versuchsauswertung

Mit Hilfe der in 2010 verwendeten Watermark-Sensoren, die die Saugspannung im Boden erfassen, war es möglich, die aktuelle Füllung der Porengrößenklassen direkt am Messgerät abzulesen und stündliche Messwerte zu erhalten. Somit konnte gewährleistet werden, dass der für die Übertragung der Zoosporen von *P. infestans* angenommene relevante Porengrößenbereich (siehe Kapitel III Absatz 5.2.1) während den Bewässerungsintervallen auch tatsächlich mit Wasser gefüllt war. Der Bodenfeuchteverlauf der einzelnen Parzellen ist in Abbildung 65 sichtbar.

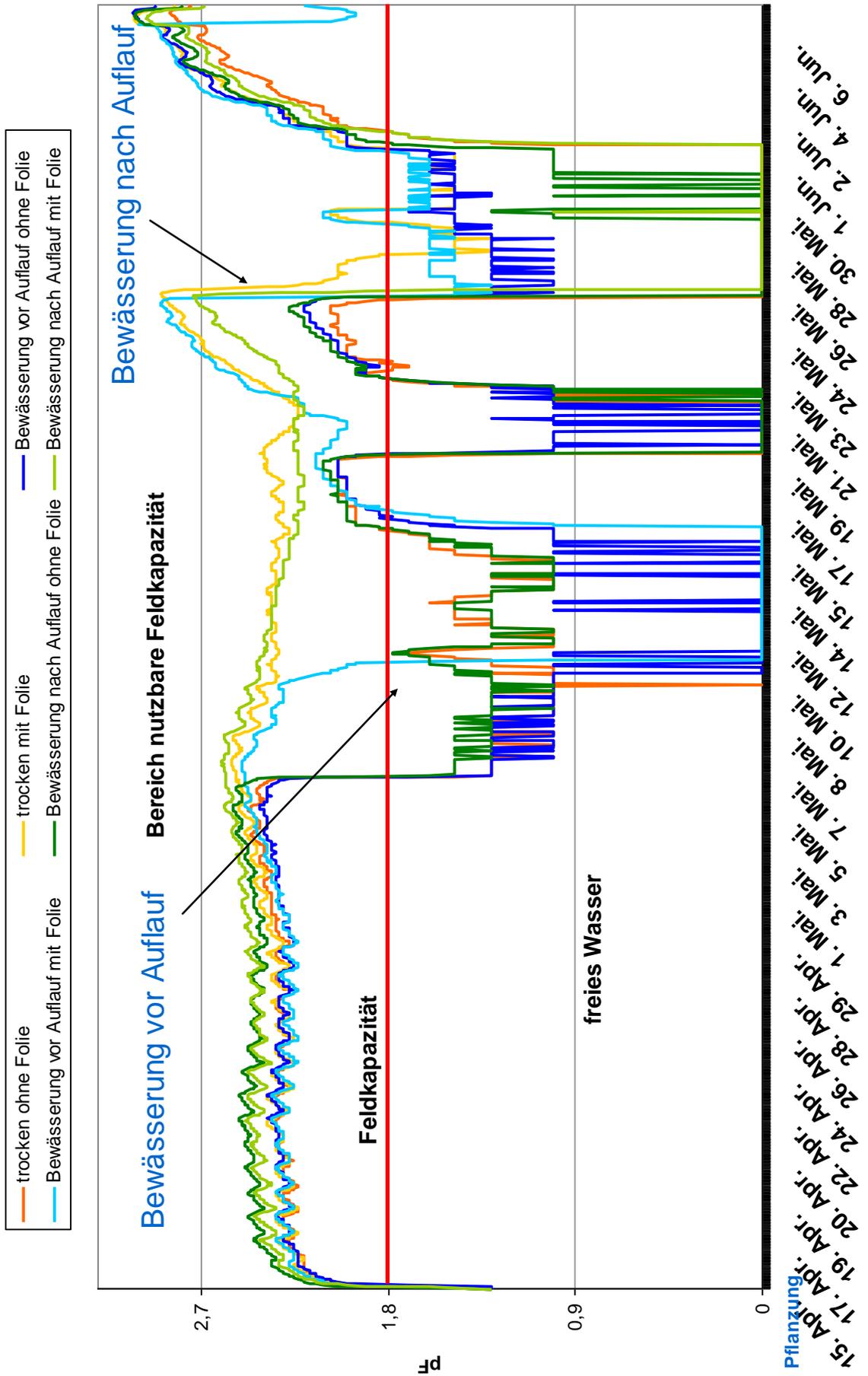


Abbildung 65: Darstellung des Bodenfeuchteverlaufs der unterschiedlichen Versuchspartzen des Freilandversuchs in 2010

Die in Abbildung 65 dargestellten Daten lassen sich wie folgt beschreiben. Aufgrund von hohen Niederschlagsmengen ab Anfang Mai lassen sich keine Unterschiede im Verlauf der Bodenfeuchtemesswerte zwischen den Parzellen ohne Folie herauslesen. Trotz unterschiedlicher Bewässerung können sie als ein Versuchsglied in Bezug auf die Höhe der Bodenfeuchte angesehen werden. In allen Parzellen ohne Folie kam es in den Tagen um den Auflauf (23. Mai) zu einer Periode von zehn Tagen, in der die Bodenfeuchte deutlich über Feldkapazität lag.

In den Parzellen mit Folie lassen sich die Unterschiede der Bewässerungsvarianten besser herauslesen. Bis zum Start der ersten Bewässerungsperiode am 10. Mai befanden sich alle Parzellen mit Folie im Feuchtebereich von 2,5 pF. Sie lagen somit an der Grenze zwischen der Füllung der engen Grobporen und der Mittelporen. Die Parzellen, welche vor Auflauf bewässert wurden, unterschieden sich ab dem 10. Mai deutlich in ihrem Bodenfeuchteverlauf von den übrigen Versuchspartzen. Die Bodenfeuchte lag ab der Bewässerung für sieben Tage über Feldkapazität. Nach Abnahme der Folie am 21. Mai zeigten sich im Bodenfeuchteverlauf ab dem 29. Mai keine Unterschiede zwischen den Parzellen mehr. Daher waren keine starken Unterschiede zwischen den nach Auflauf bewässerten und den restlichen Parzellen zu verzeichnen. Allerdings traten in den nach Auflauf bewässerten Parzellen aufgrund der durchgeführten Beregnung Splash-Effekte auf.

Der in Kapitel III Absatz 5.2.1 definierte Infektionsschwellenwert wurde in allen Parzellen über unterschiedlich lange Perioden überschritten (Abbildung 65). In allen Parzellen kam es zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf (bisher in SIMBLIGHT1 angenommener relevanter Bereich für die unterirdische Übertragung) zu einer Überschreitung der Feldkapazität und damit zur Möglichkeit der Übertragung von Zoosporen über das Porensystem des Bodens. Allerdings wurde die Überschreitung in zwei der sechs Parzellen nur über einen Zeitraum von unter fünf Stunden erreicht (Tabelle 17). Es gab keine Unterschiede in der Anzahl der Tage über Feldkapazität in den Parzellen ohne Folie. In den Parzellen mit Folie unterschied sich die vor Auflauf bewässerte Parzelle in der Anzahl der Tage über Feldkapazität um sechs Tage von den beiden anderen Parzellen mit Folie. Ähnlich sieht das Ergebnis bei Betrachtung der gesamten Untersuchungsperiode aus (Tabelle 17). Auch dort gab es keine Unterschiede in der Anzahl der Tage über Feldkapazität in den Parzellen ohne Folie, allerdings unterlagen die Parzellen mit Folie größeren Unterschieden. Ein visueller Befall mit *P. infestans* konnte bis zur Beerntung am 3. August 2010 in keiner Parzelle beobachtet werden.

Tabelle 17: Tage über Feldkapazität und Anteile latent befallener Stängel in den unterschiedlichen Varianten des Freilandversuches 2010

	Tage über Feldkapazität von Pflanzung bis 7 Tage nach Auflauf	Tage über Feldkapazität des gesamten Untersuchungszeitraums (70 Tage)	Anzahl positive PCR-Proben (von 20/Parzelle)	prozentualer Anteil latent infizierter Stängel
unbewässert ohne Folie	18,5	21,0	4	20,0
unbewässert mit Folie	0,2	4,0	1	5,0
bewässert vor Auflauf ohne Folie	18,5	20,2	3	15,0
bewässert vor Auflauf mit Folie	6,4	11,8	3	15,0
bewässert nach Auflauf ohne Folie	17,9	19,9	3	15,0
bewässert nach Auflauf mit Folie	0,1	6,7	2	10,0

5.2.2.2 Laboranalysen

Von den mittels PCR-Technik untersuchten 120 Proben der Stängel der Sorte Agria (20 pro Parzelle) zeigten 16 einen positiven Befund, also ein Anteil von 13 %. Sie waren somit bereits zum Zeitpunkt der Entnahme am 28. Juni 2010 latent befallen. Der prozentuale Anteil latent befallener Stängel lag in den Parzellen zwischen 5 und 20 % (Tabelle 17). Der Zusammenhang zwischen den Tagen über Feldkapazität zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf und dem prozentualen Anteil latent befallener Stängel ist in Abbildung 66 dargestellt. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,67* ist eine positive Korrelation zwischen dem Anteil latent befallener Stängel und den Tagen über Feldkapazität zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf zu erkennen. Betrachtet man den gesamten Untersuchungszeitraum bis zur Stängelentnahme, verbessert sich das Bestimmtheitsmaß der Korrelation auf 0,78* (Abbildung 67). Die Korrelation war im Korrelationstest nach PEARSON in beiden Fällen signifikant (Signifikanzniveau von Alpha = 0,05). Allerdings ergeben sich die prozentualen Unterschiede auf Grundlage einer geringen Anzahl latent befallener Stängel (Tabelle 17).

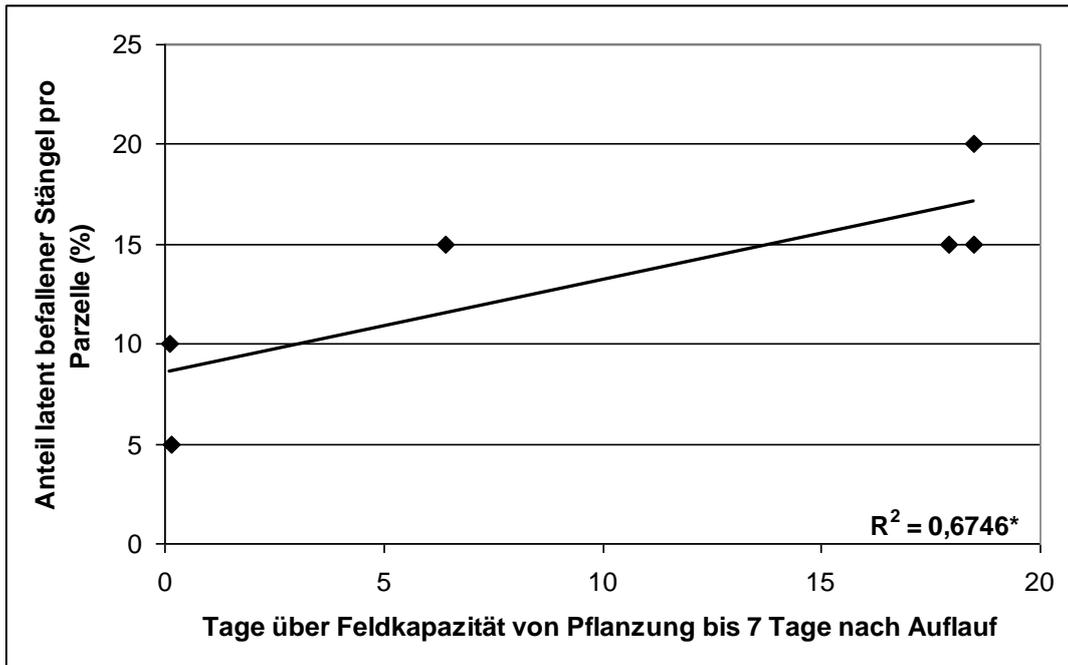


Abbildung 66: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität von Pflanzung bis sieben Tage nach Auflauf und Anteil latent befallener Stängel [%] des Freilandversuches im Jahr 2010

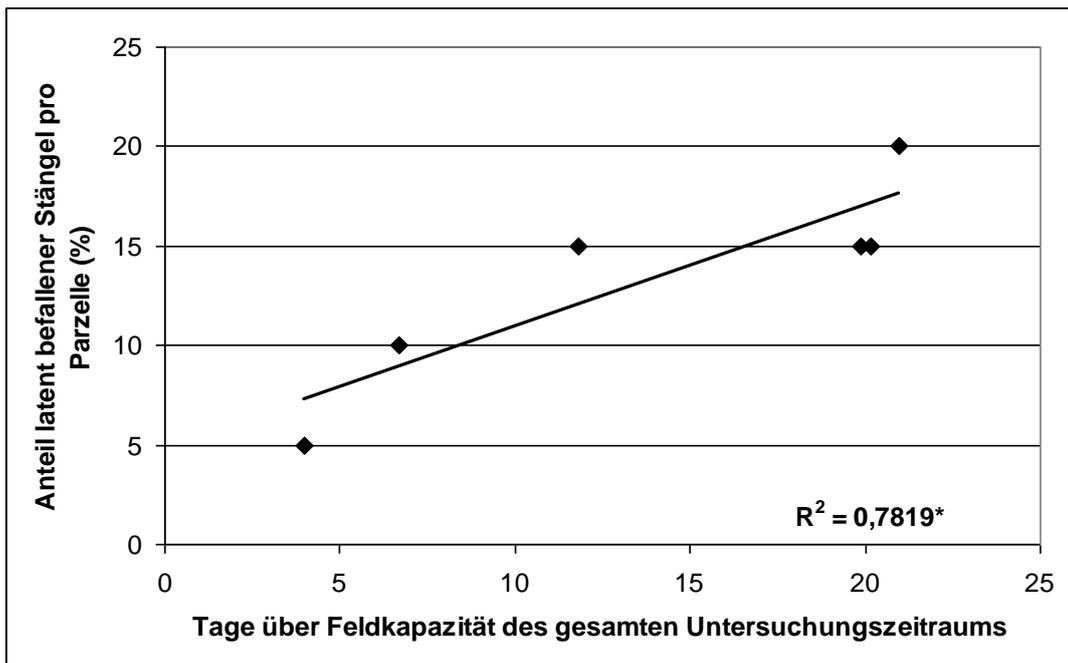


Abbildung 67: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität im Untersuchungszeitraum und Anteil latent befallener Stängel [%] des Freilandversuches im Jahr 2010

5.2.3 Feldversuch 2011

5.2.3.1 Versuchsauswertung

Der Verlauf, der in 2011 ebenfalls mit den Watermark-Sensoren stündlich gemessenen Bodenfeuchte in den sechs Versuchspartzen, ist in Abbildung 68 dargestellt.

Die Daten aus Abbildung 68 lassen sich wie folgt beschreiben. Aufgrund der fast vollständig ausbleibenden Niederschläge im April/Mai 2011 sind die Unterschiede der Bodenfeuchte in den verschiedenen Versuchspartzen ausschließlich auf die durchgeführte Bewässerung zurückzuführen. Von der Pflanzung bis zum Beginn des ersten Bewässerungsintervalls (12. April bis 2. Mai) lag die Bodenfeuchte in allen Versuchspartzen im Bereich von 2,5 pF. Sie lag somit an der Grenze zwischen der Füllung der engen Grobporen und der Mittelporen. In der unbewässerten Partze erfolgte bis zur Probenahme der Stängel für die PCR-Untersuchungen am 6. Juni eine kontinuierliche Abnahme der Bodenfeuchte.

Infolge der Bewässerung der Partzen 3 und 4 (siehe Tabelle 15), welche vor Auflauf bewässert wurden, unterschieden sich diese ab dem 2. Mai von den anderen Partzen. Die Bodenfeuchte lag ab der Bewässerung für drei bzw. vier Tage über Feldkapazität. Da die vor Auflauf bewässerte Partze ohne Folie aufgrund der Trockenheit etwas stärker ausgetrocknet war als die vor Auflauf bewässerte Partze mit Folie, dauerte das Erreichen der Wassersättigung des Bodens länger, sodass infolge der Bewässerung die Bodenfeuchte drei Tage über Feldkapazität lag. In der vor Auflauf bewässerten Partze mit Folie lag sie für vier Tage über Feldkapazität. Nach Bewässerungsende erfolgte eine kontinuierliche Abtrocknung der Partzen bis zur Probenahme der Stängel zur PCR-Untersuchung am 6. Juni.

In den nach Auflauf bewässerten Partzen erfolgte ab Pflanzung eine Abnahme der Bodenfeuchte bis zum Start der Bewässerung am 17. Mai. Infolge der Bewässerung lag die Bodenfeuchte, sowohl in der Partze mit als auch ohne Folie, für vier Tage über Feldkapazität. Aufgrund der durchgeführten Berechnung traten Splash-Effekte auf. Nach Abschluss der Bewässerung trocknete der Boden kontinuierlich ab.

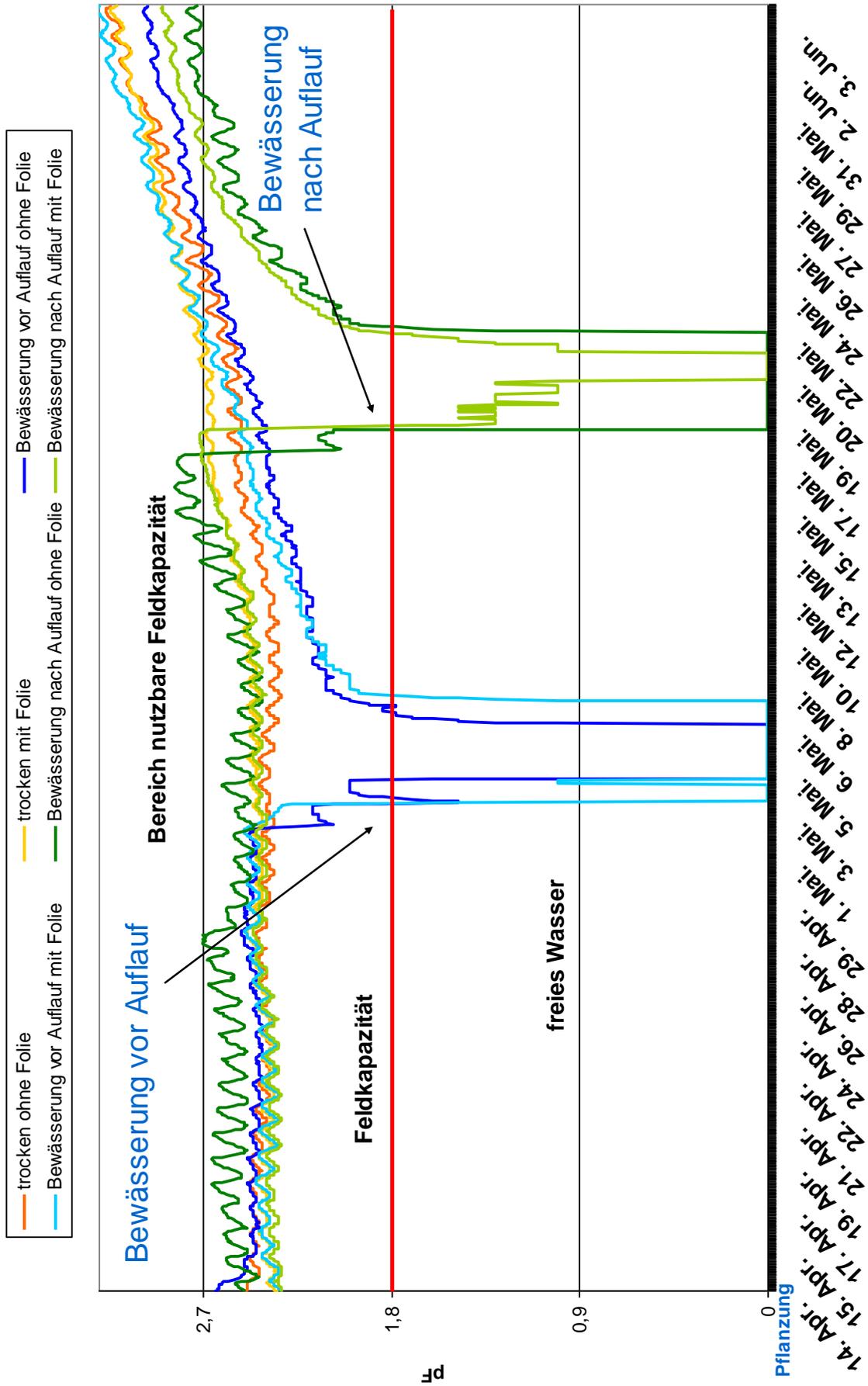


Abbildung 68: Darstellung des Bodenfeuchteverlaufs der unterschiedlichen Parzellen des Freilandversuchs in 2011

Der in Kapitel III Absatz 5.2.1 definierte Infektionsschwellenwert wurde in den unbewässerten Varianten zu keinem Zeitpunkt überschritten (Abbildung 68). In den vor Auflauf bewässerten Versuchsvarianten kam es zwischen Pflanzung und sieben Tagen nach Auflauf (bisher in SIMBLIGHT1 angenommener relevanter Bereich für die unterirdische Übertragung) zu einer Überschreitung der Feldkapazität und damit zur Möglichkeit der Übertragung von Zoosporen über das Porensystem des Bodens (Tabelle 18). Bei Betrachtung der gesamten Untersuchungsperiode kam es zusätzlich in den nach Auflauf bewässerten Parzellen zu einer Überschreitung der Feldkapazität (Tabelle 18). Ein visueller Befall mit *P. infestans* konnte in keiner Parzelle beobachtet werden.

Tabelle 18: Tage über Feldkapazität und Anteile latent befallener Stängel in den unterschiedlichen Varianten des Freilandversuches 2011

	Tage über Feldkapazität von Pflanzung bis 7 Tage nach Auflauf	Tage über Feldkapazität des gesamten Untersuchungszeitraums (56 Tage)	Anzahl positive PCR-Proben (von 20/Parzelle)	prozentualer Anteil latent infizierter Stängel
unbewässert ohne Folie	0	0	0	0
unbewässert mit Folie	0	0	0	0
bewässert vor Auflauf ohne Folie	3,0	3,0	0	0
bewässert vor Auflauf mit Folie	4,3	4,3	0	0
bewässert nach Auflauf ohne Folie	0	4,1	1	5,0
bewässert nach Auflauf mit Folie	0	3,8	0	0

5.2.3.2 Laboranalysen

Von den mittels PCR-Technik untersuchten 120 Proben der Stängel der Sorte Agria zeigte eine Probe einen positiven Befund, also ein Anteil von 0,8 %. Der positive Befund stammte aus der nach Auflauf bewässerten Parzelle ohne Folie. In allen anderen Parzellen konnte kein positiver Befund festgestellt werden. Da der positive Anteil so gering war, fand mit den Daten keine statistische Auswertung statt.

5.3 Analysen von externen Felderhebungsdaten

Für alle 21 betrachteten Fälle wurde die simulierte Bodenfeuchte in Bezug zum Zeitpunkt des primären Stängelbefalls verglichen. Beispielhaft dargestellt ist der Standort Gütersloh 2007 mit 39 Tagen zwischen Auflauf und Erstbefall (Abbildung 69) und Winnigen 2007 mit 37 Tagen zwischen Auflauf und Erstbefall (Abbildung 70), also einer fast identischen Periode.

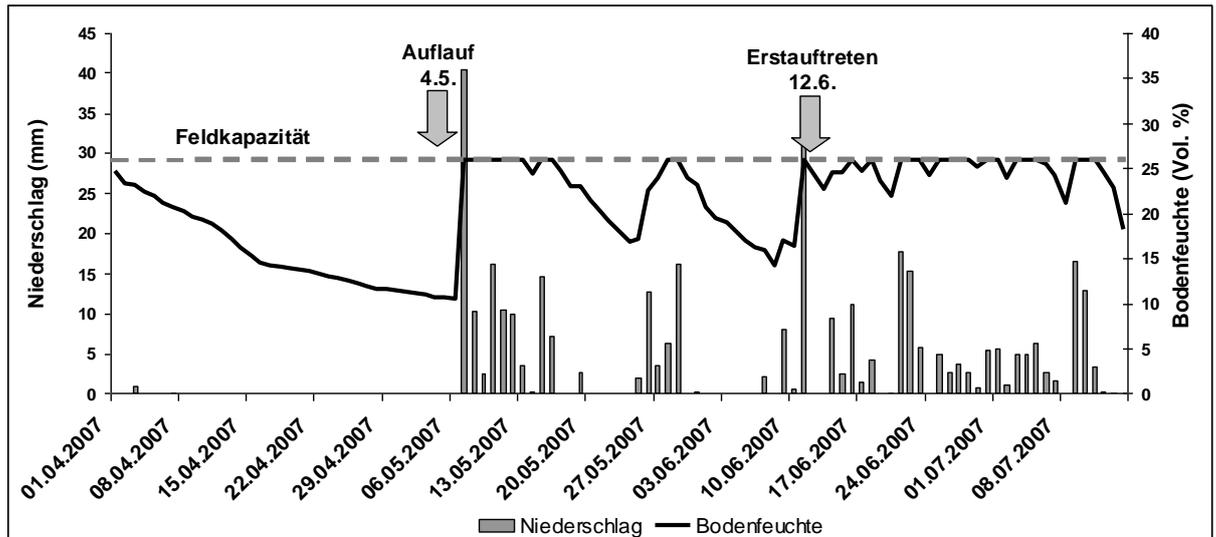


Abbildung 69: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Gütersloh 2007

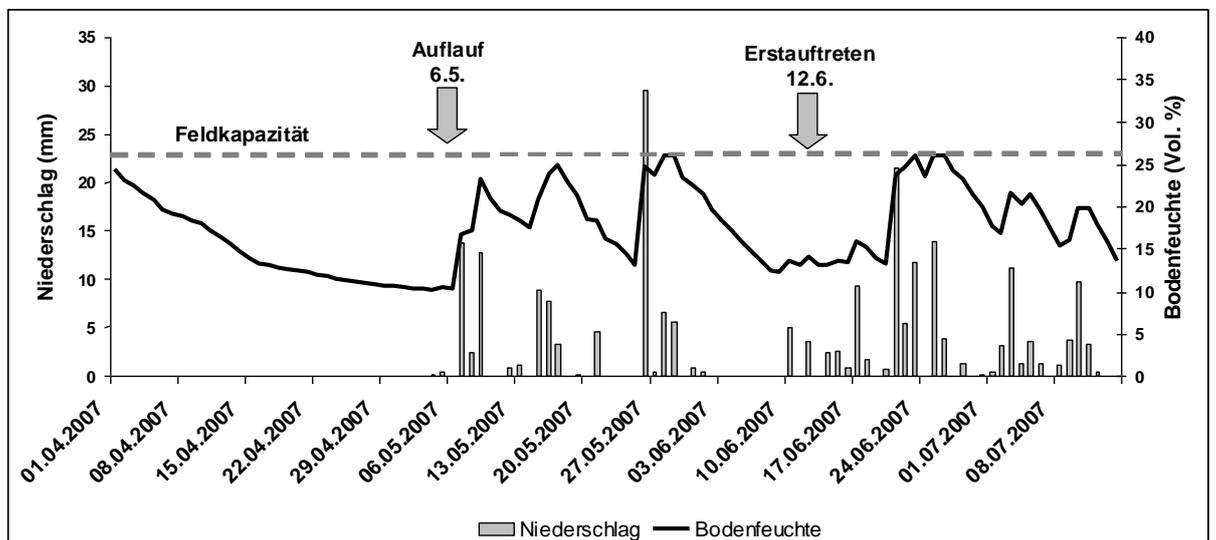


Abbildung 70: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Winnigen 2007

Hierbei wird deutlich sichtbar, dass die Feldkapazität zwischen dem Legen bis sieben Tage nach Auflauf am Standort Gütersloh an fünf aufeinanderfolgenden Tagen überschritten wurde und damit der für die Übertragung von Zoosporen angenommene relevante Porengrößenbereich mit Wasser gefüllt war. Es kam allerdings erst nach 39 Tagen zum Erstbefall mit *P. infestans*. Am Standort Winnigen war die Feldkapazität im relevanten Zeitraum zu keinem Termin überschritten, die Dauer bis zum Erstaufreten betrug dort 37 Tage. Unterschiede eines besonders trockenen oder nassen Jahres hinsichtlich des Erstauftretens können nicht abgeleitet werden.

Bei Betrachtung eines weiteren Standortes, Gütersloh 2008 (Abbildung 71), fällt auf, dass die Feldkapazität lediglich zu zwei Terminen überschritten wurde. Trotzdem kam es bereits nach elf Tagen zum Erstaufreten, deutlich früher als im Jahr 2007 am selben Standort, an dem die Bodenfeuchte fünf Tage über Feldkapazität lag.

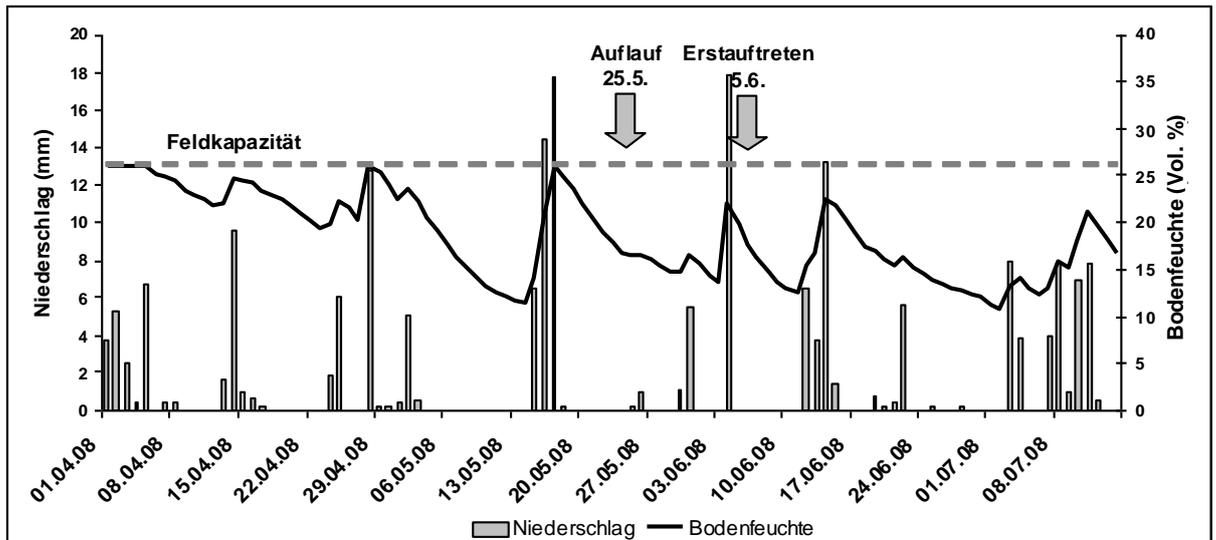


Abbildung 71: Mit SIMPEL simulierte Bodenfeuchte, Niederschlag und Felddaten für den Standort Gütersloh 2008

Die Auswertung der Jahre 2002 bis 2008 der Standorte Puch und Straßmoos sowie weiterer Datensätze der Standorte Börry, Gütersloh, Bodenheim, Eich, Winnigen und Meddersheim der Jahre 2007 und 2008 sind in Abbildung 72 in einem Streudiagramm dargestellt. Korreliert sind dort die Tage zwischen Auflauf und visuellem Befall mit der Anzahl der Tage von Legen bis sieben Tage nach Auflauf, die über Feldkapazität lagen. Mit einem Korrelationskoeffizienten von $R^2 = 0,1051$ konnte für den genannten Zeitraum und die dargestellten Parameter keine Korrelation festgestellt werden.

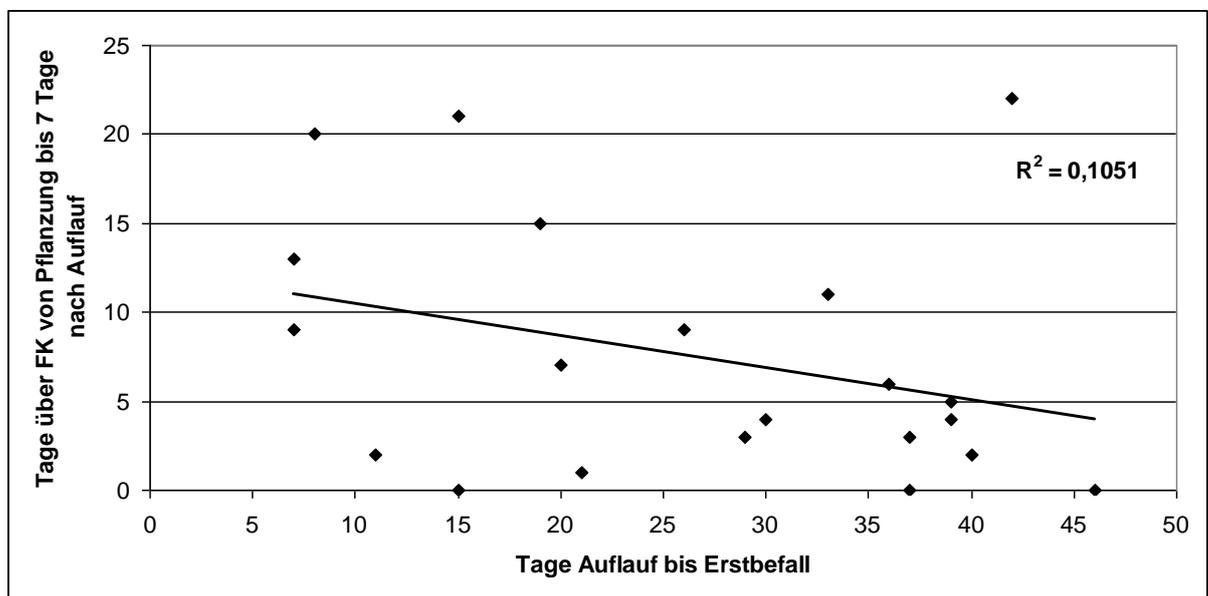


Abbildung 72: Streudiagramm der Parameter Tage über Feldkapazität zwischen Pflanzung und 7 Tagen nach Auflauf und Tage Auflauf bis Erstbefall der untersuchten Standorte der Jahre 2002 bis 2008 [n=21]

Eine Auswertung hinsichtlich Bodenfeuchte und primärem Stängelbefall gab somit keine eindeutigen Aufschlüsse zu einer gegenseitigen Wechselwirkung. Der Zeitpunkt des visuellen Befalls mit *P. infestans* war an den untersuchten Standorten nicht mit der Bodenfeuchte korrelierbar.

6. Bodenfeuchte in SIMBLIGHT1

Die Modellvalidierung erfolgt bei der ZEPP jährlich in den wichtigsten Kartoffelanbaugebieten über Deutschland verteilt. In Abbildung 73 sind die Prognosen der Jahre 2006 bis 2011 in drei Klassen unterteilt dargestellt. Die mehr als 14 Tage zu frühen Prognosen und die 0 bis 14 Tage zu frühen Prognosen sowie die zu späten Prognosen. Der gesamte Anteil rechtzeitiger Prognosen liegt in allen Jahren um die 90 %. Von den rechtzeitigen Prognosen wird allerdings bei einem hohen Anteil der Spritzstart mehr als 14 Tage zu früh ausgegeben (TSCHÖPE et al. 2010). Der sehr hohe Anteil mindestens 14 Tage zu früher Prognosen fällt besonders in Jahren mit sehr nassen Bodenverhältnissen im Frühjahr auf (zum Beispiel im Jahr 2010).

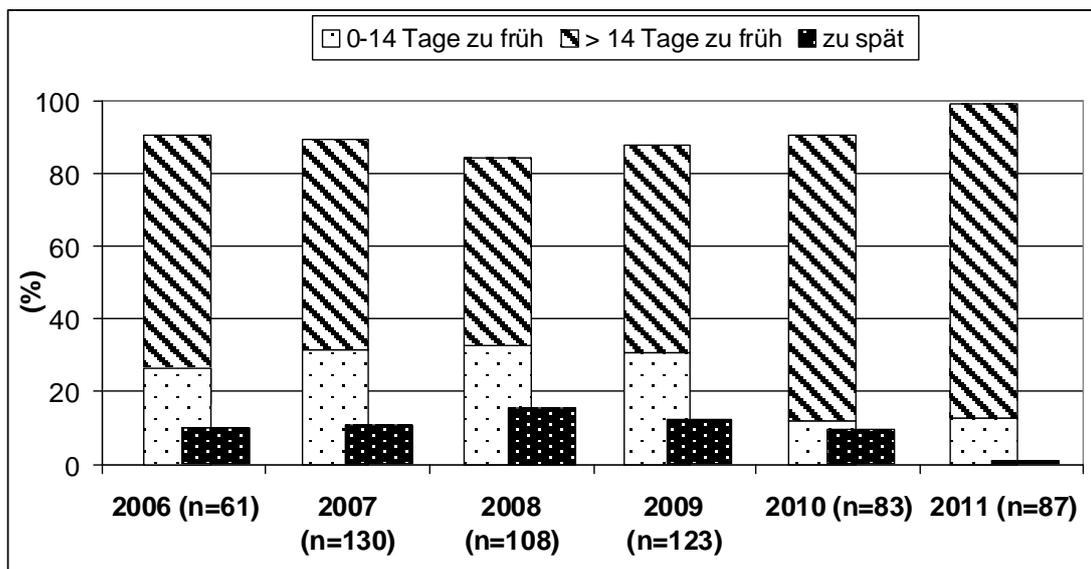


Abbildung 73: Anteil rechtzeitiger Prognosen von SIMBLIGHT1 in den Jahren 2006 bis 2011

Aus diesen Gründen wurden die Schläge der Jahre 2006 bis 2011, auf denen die Bodenfeuchte vom Modellnutzer als hoch eingestuft wurde, gesondert betrachtet und ausgewertet. Dort lag der Anteil rechtzeitiger Prognosen zwar mit 99 % besonders hoch, allerdings zeigte der Anteil zu früher Prognosen von mehr als 14 Tagen einen sehr hohen Anteil von 86 % (Abbildung 74). Der Anteil der Prognosen, die zwischen 0 und 14 Tage zu früh lagen und damit das Erstauftreten am Besten abbildeten, lag lediglich bei 12 %. Somit erfolgte der vom Modell prognostizierte Spritzstart deutlich zu früh.

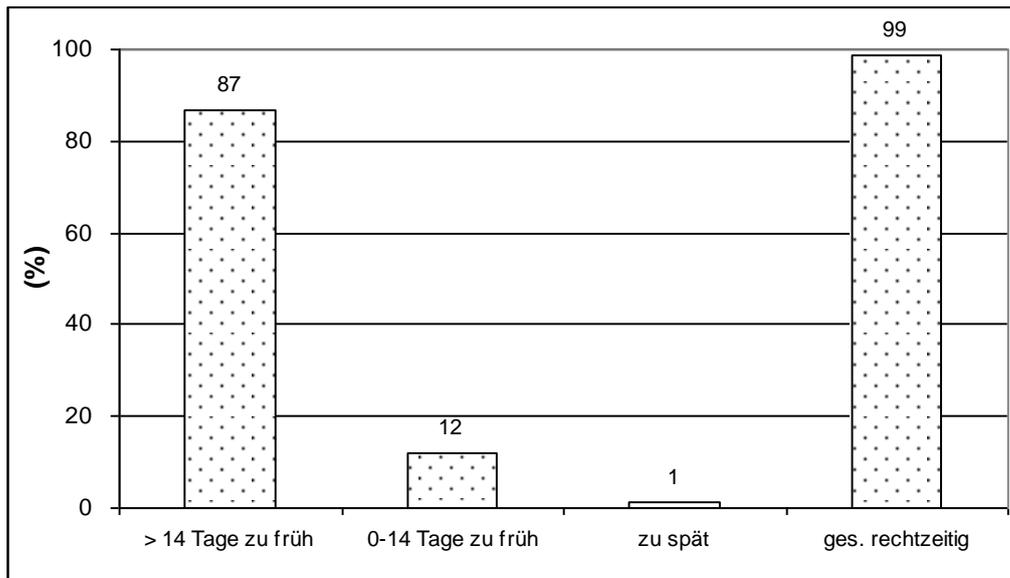


Abbildung 74: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte der Jahre 2006 bis 2011 [n=143]

Wurde für die Modellprognose dieser Schläge die Bodenfeuchte als niedrig definiert (Anbaudichte blieb weiterhin berücksichtigt, siehe Tabelle 12), verbesserte sich der Anteil im Bereich 0 bis 14 Tage zu früher Prognosen deutlich. Dieser Anteil stieg auf 45 % an. Der gesamte Anteil rechtzeitiger Prognosen verringerte sich lediglich um 8 % und wies mit 91 % weiterhin ein gutes Prognoseergebnis auf. Der Spritzstart wurde damit vom Modell besser abgebildet, der Anteil zu später Prognosen erhöhte sich leicht (Abbildung 75).

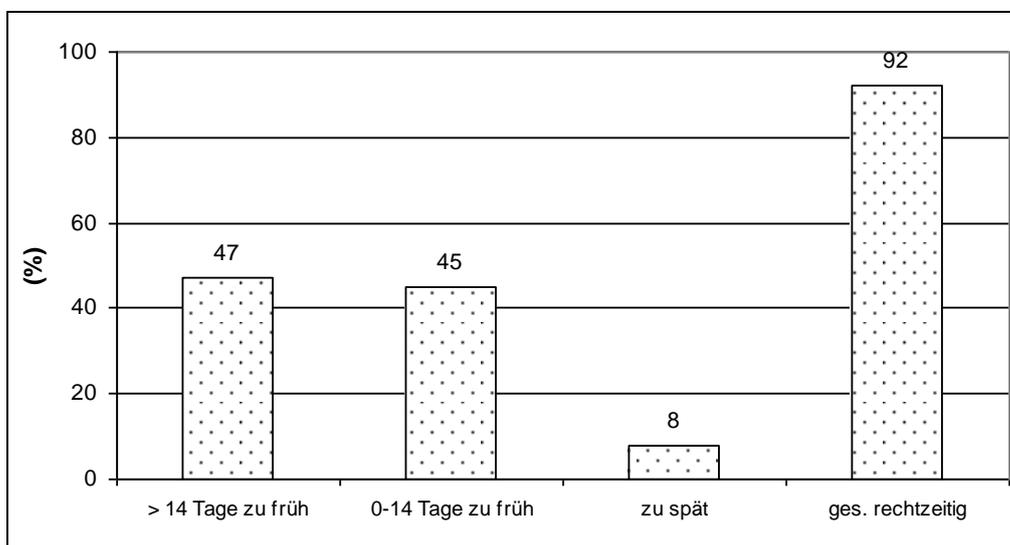


Abbildung 75: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit niedriger Bodenfeuchte der Jahre 2006 bis 2011 [n=143]

Im Rahmen des bundesweiten Monitorings wird die Anbaudichte (hoch/niedrig) und die Bodenfeuchte (hohe Bodenfeuchte ja/nein) abgefragt. Aufgrund der deutlich zu frühen Prognosen auf den Schlägen, auf denen die Bodenfeuchte mit hoch eingestuft wurde, wurde eine Auswertung der Phytophthora-Erstauftretensdaten, die jährlich zur Modellvalidierung erhoben werden, hinsichtlich der Varianz des Erstauftretens nach den vier Gruppen

- geringe Anbaudichte (AD) und keine Bodenfeuchte (BF)
- geringe Anbaudichte (AD) und hohe Bodenfeuchte (BF)
- hohe Anbaudichte (AD) und keine Bodenfeuchte (BF)
- hohe Anbaudichte (AD) und hohe Bodenfeuchte (BF)

durchgeführt. Die Ergebnisse sind in Box-Whisker-Plots in Abbildung 76 dargestellt. Im Vergleich der Mittelwerte fiel auf, dass die Gruppe der Fälle mit hoher Anbaudichte und hoher Bodenfeuchte mit dem Termin 28. Juni das früheste mittlere Erstaufreten und die Gruppe mit geringer Anbaudichte und hoher Bodenfeuchte mit dem mittleren Termin am 11. Juli das späteste mittlere Erstaufreten aufwies. Zur Überprüfung von signifikanten Unterschieden hinsichtlich des Erstaufretenstermins von *P. infestans* fand der Post-Hoc-Test nach Tukey mit einem Konfidenzintervall von 95 % Anwendung. Die Signifikanzen der gegeneinander getesteten Gruppen und die unterschiedliche Gruppeneinteilung sind in Abbildung 76 und Tabelle 19 dargestellt.

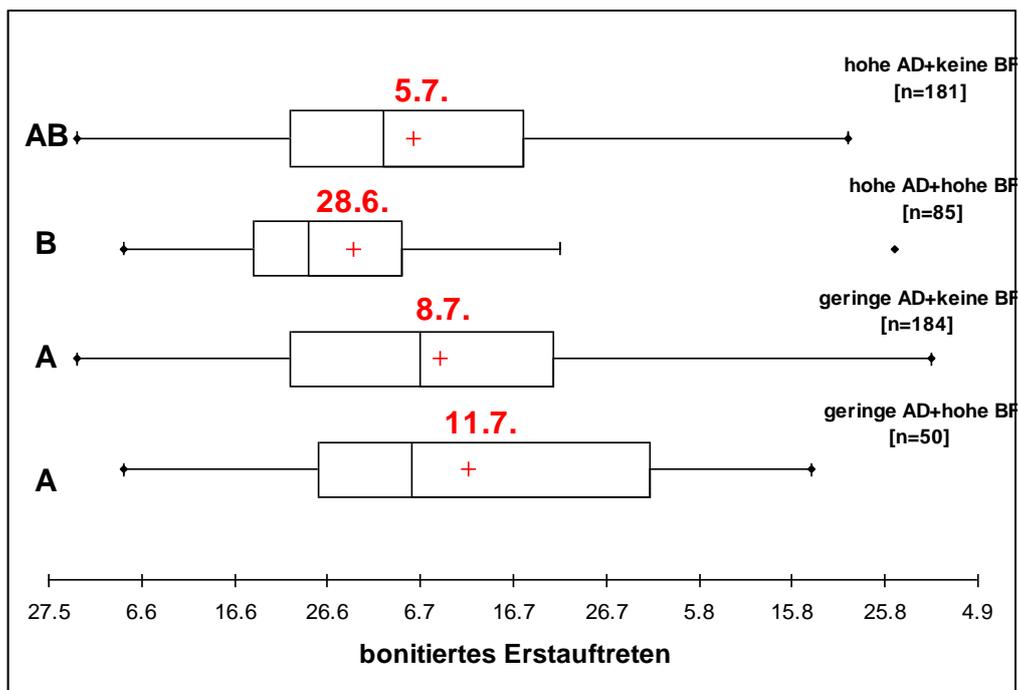


Abbildung 76: Darstellung der Varianz des Erstaufreitens von *P. infestans* anhand der Monitoring-Daten der Jahre 2006 bis 2010 unterteilt in vier Kategorien und die sich aus dem Tukey-Test ergebenden signifikant unterschiedlichen Gruppen [n=510]

Tabelle 19: Ergebnis des Tukey-Tests - Analyse der Unterschiede zwischen den Kategorien mit einem 95% Konfidenzintervall (grau unterlegt: gleiche Kategorie der Anbaudichte und unterschiedliche Kategorie der Bodenfeuchte, sodass nur die Signifikanz des Einflusses der Bodenfeuchte überprüft ist)

Kontrast	Signifikanz
geringeAD+hoheBF gegen hoheAD+hoheBF	Ja
geringeAD+hoheBF gegen hoheAD+keineBF	Nein
geringeAD+hoheBF gegen geringeAD+keineBF	Nein
geringeAD+keineBF gegen hoheAD+hoheBF	Ja
geringeAD+keineBF gegen hoheAD+keineBF	Nein
hoheAD+keineBF gegen hoheAD+hoheBF	Nein

Aus den Ergebnissen des Tukey-Tests in Tabelle 19 wurde ersichtlich, dass sich keine signifikanten Unterschiede im Vergleich der Gruppen mit gleicher Anbaudichte und unterschiedlichen Bodenfeuchtebedingungen ergaben. Daraus resultierte, dass bei variierender Bodenfeuchte und sonstigen konstanten Bedingungen keine signifikanten Unterschiede hinsichtlich des Erstaufretenstermins zu erwarten sind. Erst unter dem Einfluss einer unterschiedlich hohen Anbaudichte ergaben sich signifikante Unterschiede im Zeitpunkt des Erstaufretens.

Aufgrund dieser Ergebnisse wurden unterschiedliche Startwerte für den hypothetisch angenommenen Initialbefall für die Berechnung der Prognose verwendet und der Bodenfeuchteeinfluss im Modell somit deutlich abgeschwächt (Tabelle 20). Das Ergebnis der Anteile zu früher, rechtzeitig und zu später Prognosen ist in Abbildung 77 dargestellt.

Tabelle 20: Tabelle der Höhen des hypothetischen Initialbefalls bei unterschiedlicher Bewertung des Einflusses der Bodenfeuchte in der Prognoseberechnung des Spritzstarts gegen *P. infestans* mit dem Modell SIMBLIGHT1

Varianten des Bodenfeuchteeinflusses in der Modellberechnung	hypothetischer Initialbefall
Variante 1 - hohe Bodenfeuchte	0,00005
Variante 2 - niedrige Bodenfeuchte und Anbaudichte berücksichtigt	0,000008 oder 0,000002
Variante 3 - um 50 % abgeschwächter Einfluss einer hohen Bodenfeuchte	0,000025
Variante 4 - um 76 % abgeschwächter Einfluss einer hohen Bodenfeuchte	0,000012
Variante 5 - um 84 % abgeschwächter Einfluss einer hohen Bodenfeuchte	0,000008

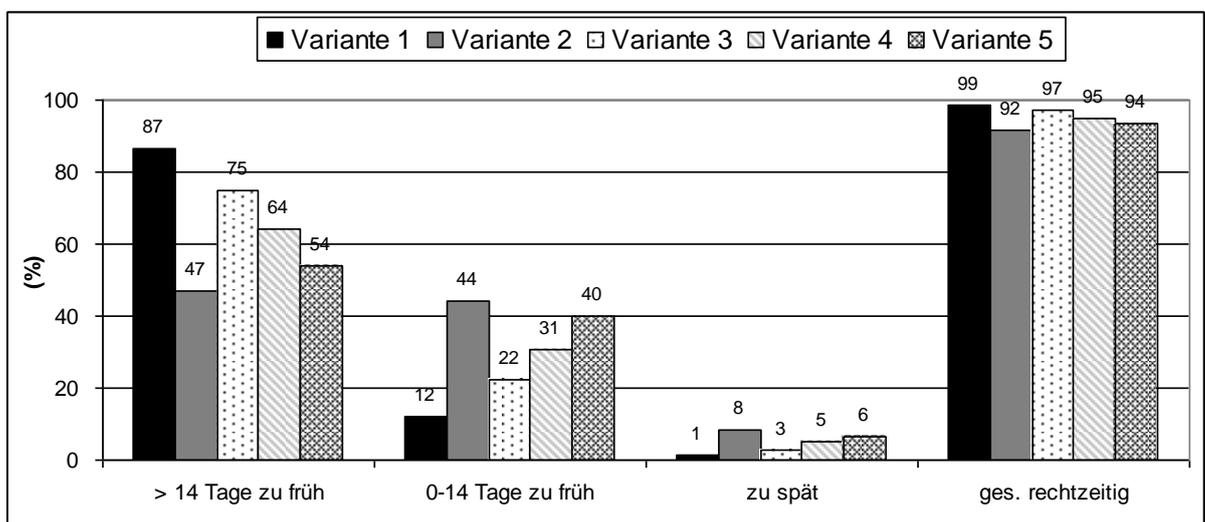


Abbildung 77: Modellergebnis der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit unterschiedlichen Startwerten der Jahre 2006 bis 2011 [n=143]

Die Reduzierung des Startwertes bei hoher Bodenfeuchte um 50 % hatte lediglich eine Verschlechterung der rechtzeitigen Prognosen um zwei Prozent zur Folge, während sich der Anteil der 0 bis 14 Tage zu frühen Prognosen knapp verdoppelte. Bei einer Reduzierung des Startwertes bei hoher Bodenfeuchte um 84 % verschlechterte sich der Anteil rechtzeitiger Prognosen auf 94 %, allerdings vervierfachte sich der Anteil der Prognosen im Bereich zu früher Prognosen von 0 bis 14 Tage auf 40 %. Der Termin des Spritzstarts wurde damit genauer vom Modell prognostiziert.

In Abbildung 78 sind die Ergebnisse der Modellberechnungen mit reduzierten Startwerten in Box-Whisker-Plots dargestellt. Aufgetragen sind dort die Abweichungen des Modellergebnisses vom tatsächlichen Erstaufreten in Tagen. Mit der Reduzierung der Startwerte wurde die Box, die 50 % der Werte beinhaltet, zunehmend nach links, d.h. zum tatsächlichen Termin des Erstauftretens verschoben. Während bei den Berechnungen mit dem Startwert für hohe Bodenfeuchte auch die Whisker, also 90 % der Werte, vollständig im Bereich rechtzeitiger Prognosen lagen, lagen die Whisker der Prognosen mit reduzierten Startwerten zu einem kleinen Anteil im negativen Bereich, d.h. im Bereich zu später Prognosen. Allerdings wurde mit den reduzierten Startwerten die mittlere Abweichung zwischen Prognose und tatsächlichem Erstaufreten von 26 Tagen auf 17 Tage verringert.

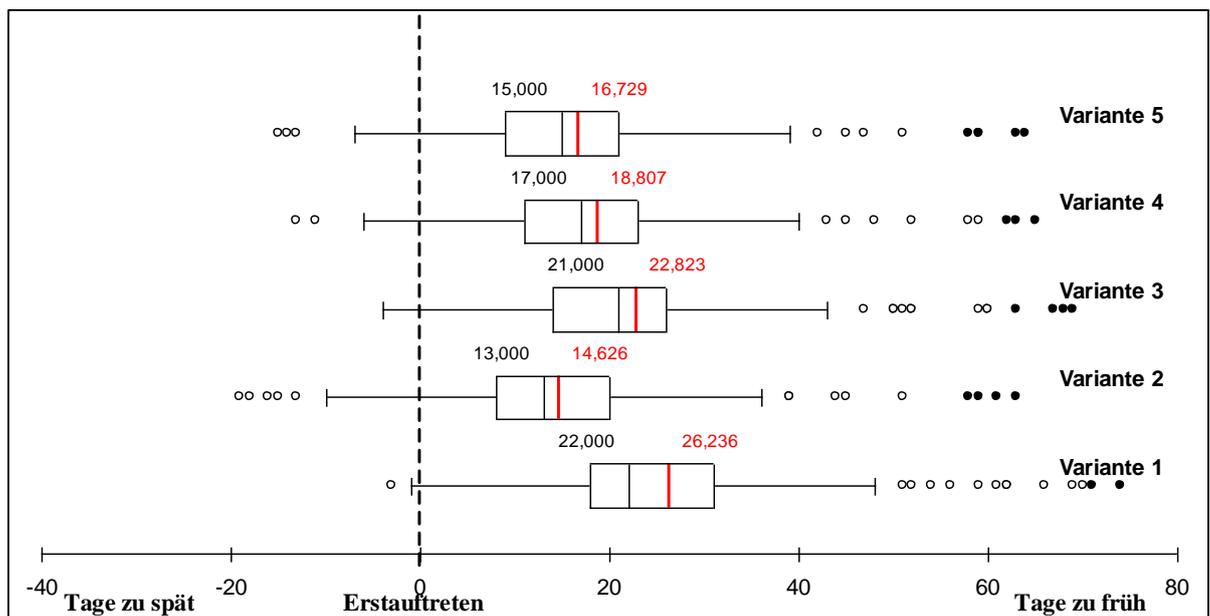


Abbildung 78: Box-Whisker-Plots der Abweichungen der Modellergebnisse vom tatsächlichen Erstaufreten in Tagen der Schläge mit hoher Bodenfeuchte gerechnet mit unterschiedlichen Startwerten der Jahre 2006 bis 2011 [n=143]

Dass der Bodenfeuchteinfluss in der bisherigen Modellberechnung deutlich überschätzt ist, zeigte die Tatsache, dass trotz einer Reduzierung des Startwertes von 0,0005 auf 0,000008 der Anteil rechtzeitiger Prognosen bei über 90 % bestehen blieb. Zudem lag das Modellergebnis im Mittel neun Tage näher am tatsächlichen Erstaufreten.

7. Diskussion

Mit dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, den Zusammenhang zwischen einem frühen Erstbefall von *P. infestans* mit Perioden hoher Bodenfeuchte näher zu charakterisieren. Seit einigen Jahren bestehen verbreitet Hypothesen einer unterirdischen Übertragung von Sporen des Pilzes aus latent infizierten Pflanzknollen auf gesunde Triebe der Nachbarpflanzen (SCHLENZIG 1997, ADLER 2000 und BÄBLER 2005). In diesem Zusammenhang wurden die Forderungen laut, bodenphysikalische Parameter wie Bodenart und Bodenfeuchte in die Prognosemodelle zur Bestimmung des Zeitpunktes des Erstauftretens von *P. infestans* zu integrieren (Bäbler 2005). Mit den Grundlagen dieser Arbeit

sollte daher ein Bodenmodul in das bei der ZEPP bestehende Modell SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007) integriert werden. Hierbei war ausschlaggebend, dass die im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Versuche nicht unter streng kontrollierten Laborbedingungen durchgeführt wurden, sondern eine ins Freiland übertragbare Situation darstellen sollten. Die benötigte Wassersättigung des Bodens sowie die Dauer des Übertragungsvorgangs von Zoosporen an einer latent infizierten Mutterknolle bis zu einem gesunden Stängel wurden in Labor- und Freilandversuchen untersucht. Die Hypothese der unterirdischen Übertragung sollte damit geprüft und genauer charakterisiert werden.

Im Labor wurden Versuche zur Übertragung von Sporen von *P. infestans* durch Wasser sowie Säulen unterschiedlicher Bodenarten mit Inokulum von Agarplatten durchgeführt. Während in den Wasservarianten eine Säule von 7 cm durch die Sporen überwunden werden konnte und die sich an der Oberfläche befindlichen Blattscheiben zu einem hohen prozentualen Anteil infiziert werden konnten, zeigten die Varianten mit Bodensäulen gegenteilige Ergebnisse. Da in allen Versuchsdurchläufen und Wiederholungen der Wasservarianten Infektionen stattfanden, scheint von einem ausreichend vorhandenen Inokulum von *P. infestans* auch in den Bodenvarianten ausgegangen werden zu können.

Das Ergebnis der Wasservarianten lässt folgenden Interpretationsansatz zu: bei für den Pilz optimalen Bedingungen (optimale Temperatur zur Zoosporenfreisetzung, grobkörnige Bodenstruktur, keine Konkurrenz durch Antagonisten) reicht eine Periode von zwei Stunden über Feldkapazität aus, um eine Bodenübertragung zu ermöglichen. Eine Periode über Feldkapazität, die länger als 72 Stunden anhält, scheint keine zusätzlichen Infektionen mehr hervorrufen zu können. Es scheint, dass das Ausgangsinokulum zeitlich begrenzt ist und sich unter anaeroben Bedingungen keine neuen Sporen mehr bilden können (siehe auch: STOLZY et al. 1965). Diese Interpretation begründet sich auf der Tatsache, dass in allen Wiederholungen ab 96 Stunden keine infizierten Blattscheiben in den Wasservarianten mehr zu verzeichnen waren (Abbildung 59).

In den sterilen Bodenvarianten kam es lediglich in einer Versuchsreihe zu stärkeren Übertragungen von *P. infestans*. Alle anderen sterilen sowie die unsterilen Varianten zeigten sporadische Übertragungen durch den Boden und Infektionen an den Blattscheiben. In den unsterilen Varianten kam es lediglich zu einer einzelnen Infektion. Da die Böden unmittelbar vor Versuchsbeginn im Freiland entnommen wurden, war ihre Struktur aufgrund der aktuell vorherrschenden Bodenfeuchtebedingungen heterogen. Es scheint, dass diese Unterschiede trotz Siebung nicht vollständig ausgeglichen werden konnten. Diese Tatsache könnte vor allem Auswirkungen auf den Versuchsdurchlauf vom 19. Juli 2010 gehabt haben, denn zu diesem Entnahmezeitpunkt war der Boden extrem feucht und die sterile Versuchsvariante unterschied sich deutlich von den sterilen Varianten der anderen Versuchsdurchgänge. Bei genauerer Betrachtung ergaben sich optische Unterschiede zwischen dem sterilen Boden der Bodenart schwach toniger Lehm und der unsterilen

Variante der identischen Bodenart, obwohl die Probe erst unmittelbar vor dem Autoklavieren geteilt wurde (Abbildung 50).

In den Versuchen konnte beobachtet werden, dass es in dem sterilen Boden durch das Autoklavieren zu einer deutlichen Veränderung der Bodenstruktur gekommen zu sein scheint (Abbildung 50). Diese könnte durch den Ausgangszustand der Bodenprobe bedingt sein. Möglich scheint, dass in einer feuchten Ausgangsprobe der Bodenart schwach toniger Lehm die Tonminerale in stark gequollener Form vorlagen. In gequollenem Zustand sind Tonminerale formbar und plastisch. Durch Vermischung mit anderen Bodenteilchen können Teilchen verkitten (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010). Möglich wäre, dass die verkitteten Teilchen des feuchten Bodens durch die Hitze und den Druck beim Autoklavieren permanent verkittet wurden und ein größerer Porenraum für den Transport von Zoosporen entstand. Ist der Boden hingegen trocken, liegen die Schichtpakete der Tonminerale eng zusammen (SCHEFFER und SCHACHTSCHABEL 2010) und die Verkittung ist weniger stark ausgeprägt, sodass durch das Erhitzen beim Autoklavieren der Porenraum fein bleibt. Die unterschiedliche Bodenstruktur der Versuchsglieder wird auf den in Abbildung 50 dokumentierten Fotos ersichtlich. Während der unsterile Boden nach Wasserzugabe an der Oberfläche verschlammte und sich die größeren Porenräume durch kleinere Teilchen schlossen, blieb die krümelige Struktur der sterilen Variante nach Wasserzugabe weitgehend erhalten. Dies war auch in der Höhe der Bodensäule ersichtlich. Diese war vor der Wasserzugabe identisch. Da die krümelige Struktur aufgrund der angenommenen permanenten Verkittung der Bodenteilchen während dem Autoklavieren erhalten blieb, kam es zu keiner Sackung wie in der unsterilen Variante. Im Versuchsdurchlauf vom 16. August 2010 war der Boden vor dem Autoklavieren sehr trocken, sodass es zu keiner Verkittung zu größeren Teilchen kam. Der optische Vergleich der Bodenoberfläche glich mehr den unsterilen Varianten im Versuchsdurchlauf vom 19. Juli 2010. Möglich wäre, dass es dort aufgrund der fehlenden, für den Zoosporentransport begünstigenden, größeren Porenräume zu keiner Infektion der Blattscheiben durch die Bodensäule kam.

Die Übertragung von Laborversuchen mit sterilen Böden ins Freiland scheint somit mehr als fraglich. Festzuhalten ist, dass es in den unsterilen Varianten lediglich ein Mal zu einer Infektion einer Blattscheibe mit *P. infestans* kam. Damit ist eine erfolgreiche Übertragung von einem vorhandenen Inokulum im Boden möglich, aber scheint auf wenige Ausnahmen beschränkt zu bleiben.

Unter Verwendung eines natürlichen Inokulums in Form von infizierten Pflanzknollen fiel das Ergebnis deutlicher aus. Es kam an keiner der Varianten, in denen eine Übertragung über den Boden nötig gewesen wäre, zu einer Infektion der Blattscheiben. Durch eine fortschreitende Zersetzung der Mutterknollen unter den feuchten Bedingungen kam es zu starkem Bakterienvorkommen. Die Vermutung liegt damit nahe, dass es den Sporen von *P. infestans* nicht gelang, mit den Bakterien um die Nahrungsgrundlage zu konkurrieren (LACEY 1965). Aus diesem Grund wurden aus den Resten

der Mutterknollen des Freilandversuches natürliche Antagonisten isoliert und Konkurrenztests durchgeführt. Hierbei war *P. infestans* allen Antagonisten unterlegen.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigen, dass eine Übertragung von Sporen des Pilzes *P. infestans* durch den Boden lediglich in Ausnahmefällen erfolgreich verläuft. Unter unsterilen Bedingungen scheint der Pilz in den meisten Fällen seinen Antagonisten unterlegen. Dieses Ergebnis unterstreicht die von LACEY (1965) aufgestellte Theorie, dass es gravierende Unterschiede im Wachstum von *P. infestans* in sterilem und unsterilem Boden gibt. Die von BÄBLER (2005) aufgestellten Hypothesen, die in seinen Versuchen unter sterilen Bedingungen erarbeitet wurden, scheinen sich im Hinblick auf diese Ergebnisse nicht ohne weiteres ins Freiland übertragen zu lassen.

In den Freilandversuchen wurde der Einfluss der Tage mit hoher Bodenfeuchte auf den Zeitpunkt des Erstauftretens untersucht. Es konnten Bodenfeuchtebereiche definiert werden, in denen es aufgrund ihrer Porengrößenklasse bzw. des vorhandenen frei verfügbaren Wassers zur Übertragung von Zoosporen über das Bodenmedium kommen kann. Obwohl in den drei bewässerten Versuchspartzen in 2009 der Infektionsschwellenwert für zwei bis vier Tage überschritten wurde und somit eine wie von BÄBLER (2005), PORTER (2005) und STOLZY et. al (1965) postulierte unterirdische Übertragung von den künstlich infizierten Knollen hätte stattfinden können, kam es in keiner Parzelle zu einer primären Stängelinfektion. Auch die PCR-Untersuchungen der Stängel auf latenten Befall ergaben lediglich einen positiven Befund. In der zwei Tage bewässerten Parzelle kam es an einer Pflanze im infizierten Bereich am 1. Juli erstmals zu einer sichtbaren Infektion am Blatt. Von dort breitete sich die Infektion rasant im Bestand aus. Da es sich allerdings nicht um einen Primärbefall am Stängel handelte, konnte nicht mit Sicherheit von einem bodenbürtigem Inokulum ausgegangen werden.

Daher könnte der von HÄNNI (1949) vertretenen These, dass unterirdisch infizierte Stängel unter unseren klimatischen Bedingungen und Anbaumethoden nicht bis an die Erdoberfläche durchdringen können, mehr Bedeutung zukommen. Zudem sollte der von BOYD (1980) dargestellte starke Einfluss von Splash-Effekten intensiver untersucht werden, denn ein Splash-Effekt fand bei der im Versuch 2009 durchgeführten Bewässerungsmethode nicht statt.

Auch in 2010 konnte im Freilandversuch kein visueller Stängelbefall bonitiert werden. Allerdings zeigten 13 % der entnommenen Stängelproben ein positives Ergebnis beim PCR-Nachweis. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,78* konnte eine positive Korrelation zwischen dem Anteil latent befallener Stängel und der Anzahl der Tage über Feldkapazität erkannt werden. Allerdings war der Stichprobenumfang sehr gering, da der statistischen Auswertung ein geringer Anteil latent befallener Stängel zu Grunde lag.

Ein mit dem Versuch von 2009 vergleichbares Ergebnis zeigte sich im Freilandversuch 2011. Auch dort wurde der Infektionsschwellenwert in den bewässerten Partzen an mindestens drei Tagen überschritten. Es kam auch in diesem Jahr zu keinem visuellen Befall eines Stängels mit *P. infestans*.

Mittel PCR-Nachweis war lediglich eine latente Infektion feststellbar, was einem Anteil von 0,8 % entspricht. Der positive Befund stammte aus der nach Auflauf bewässerten Parzelle ohne Folie.

In den Jahren 2009 und 2011 wurde die Feldkapazität infolge der geringen Niederschläge im Zeitraum von Pflanzung bis Auflauf der Kartoffeln nur während der Bewässerungsintervalle überschritten. In 2010 hingegen kam es in den Versuchspartzen ohne Folie schon im Vorfeld der Bewässerung zu feuchteren Perioden, in welchen die Bodenfeuchte im Bereich der Feldkapazität lag (Abbildung 65). Die unbewässerte Variante mit Folie des Jahres 2010 kann hingegen eher mit den Versuchen von 2009 und 2011 verglichen werden. Nach MACDONALD und DUNIWAY (1978) werden Sporangien von *Phytophthora* spp. im Boden bei einer Saugspannung von 150 hPa und dem Temperaturoptimum innerhalb von drei bis vier Tagen gebildet. Aufgrund der anaeroben Bedingungen findet bei vollständiger Wassersättigung des Bodens keine weitere Sporangienbildung statt. Die besten Bedingungen zur Zoosporentlassung liegen bei einer Saugspannungen von 0 bis 1 hPa, also vollständiger Wassersättigung des Bodens. Große Mengen an Zoosporen werden dann bereits nach 60 bis 90 Minuten freigesetzt (MACDONALD und DUNIWAY 1977).

In allen drei Versuchsjahren wurden durch die Bewässerungsintervalle optimale Bedingungen zur Zoosporenfreisetzung sowie zum Zoosporenttransport durch die Bodenporen geschaffen. Unterschiede in den Bodenfeuchteverläufen sind vor Bewässerungsstart zu verzeichnen. In 2010 lag die Bodenfeuchte aufgrund von Niederschlägen für ca. fünf Tage vor Bewässerungsbeginn in einem Bereich knapp über Feldkapazität, jedoch war keine vollständige Wassersättigung erreicht (Abbildung 65). Es scheint, dass diese fünf Tage zur Sporangienbildung an den infizierten Knollen geeignet waren, welche dann im Folgenden während der Bewässerung und einer Absenkung der Saugspannung auf 0 hPa ihre Zoosporen in das Bodenwasser entlassen und Stängel der Nachbarpflanzen infizieren konnten. In 2009, 2011 und der unbewässerten Parzelle mit Folie in 2010 lag die Bodenfeuchte vor den Bewässerungsintervallen deutlich unter Feldkapazität. Die Vermutung liegt nahe, dass keine geeigneten Bedingungen zur Sporangienbildung vorlagen.

Damit lässt sich schlussfolgern, dass eine Übertragung von Sporen aus latent befallenen Mutterknollen möglich ist. Aus den Versuchen lässt sich allerdings aufzeigen, dass für eine erfolgreiche unterirdische Infektion ein optimal terminierter Wechsel zwischen den Bedingungen zur Sporangienbildung und zur Zoosporenfreisetzung bzw. -übertragung vorliegen muss. Zudem zeigte sich, dass latenter Befall keine direkten Auswirkungen auf das Auftreten des tatsächlichen visuellen Befalls haben muss, denn trotz einem Anteil von 13 % latent befallener Stängel in 2010 kam es zu keinem Ausbruch der Krankheit. Der Zeitpunkt des Ausbruchs der Krankheit scheint von anderen Faktoren geprägt zu sein. Hierzu gibt es bisher keine eindeutigen wissenschaftlichen Erkenntnisse. Weiterer Forschungsbedarf in dieser Richtung wäre daher dringend nötig. Die Bodenfeuchte scheint zumindest eher eine Rolle für die Stärke der Ausbreitung und damit für den prozentualen Anteil latent infizierter Stängel, als für den Termin des Erstauftretens zu spielen.

Diese Theorie scheint sich in der Auswertung der externen Felderhebungsdaten zu bestätigen. Im Vergleich der unterschiedlichen Standorte in Bezug zur Bodenfeuchte zwischen Pflanzung bis sieben Tage nach Auflauf und dem Zeitpunkt des Erstbefalls kam es zu keiner Korrelation. Sowohl in Jahren mit nasser Frühjahrswitterung als auch mit sehr trockenen Bodenbedingungen kam es zu einem frühen bzw. späten Erstbefall.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit stellt sich die Frage, ob der Bodenfeuchteinfluss auf den Zeitpunkt des Erstauftretens von *P. infestans* nicht deutlich überschätzt wird. Bereits HÄNNI (1949) hat in seinen durchgeführten Versuchen festgestellt, dass es sehr unwahrscheinlich ist, dass kranke Triebe bis an die Oberfläche durchbrechen. Er vertritt die These, dass „*P. infestans* in unserem Klima und mit unseren Pflanzmethoden nur selten an die Bodenoberfläche wächst“. Hierzu passen Ergebnisse von BOYD (1980), der feststellte, dass die Anzahl kranker Triebe an der Oberfläche ohne Häufelung um ein Vierfaches höher liegt.

Interessante Ansätze zeigten sich hierbei auch bei der Abschwächung des Startwertes in SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007), der aufgrund einer hohen Bodenfeuchte in die Prognose eingeht. Hierbei ergaben sich im Bereich des Anteils der zwischen 0 und 14 Tage zu frühen Prognosen deutliche Verbesserungen. Dass der Bodenfeuchteinfluss in der bisherigen Prognose deutlich überschätzt zu sein scheint, zeigt die Tatsache, dass trotz einer Reduzierung des Startwertes um 84 % der Anteil rechtzeitiger Prognosen bei über 90 % bestehen bleibt und das Modellergebnis im Mittel neun Tage näher am tatsächlichen Erstauftreten lag.

Festzuhalten ist, dass eine Übertragung von Sporen des Pilzes *P. infestans* unter natürlichen Bedingungen im Boden möglich ist, aber scheinbar viele begünstigende Faktoren zusammen treffen müssen. Zusätzlich sind die Faktoren, die zum Ausbruch eines latenten Befalls führen, ungeklärt. Da latent infizierte Pflanzen keine visuellen Symptome zeigen müssen, wäre weiterer Forschungsbedarf hinsichtlich der genauen Faktoren, die zum Ausbruch eines latenten Befalls führen, von elementarer Bedeutung.

Aufgrund der Ergebnisse, war die Integration eines Bodenmoduls in SIMBLIGHT1 nicht wie geplant durchzuführen. Infolge der durchgeführten Analysen zur Höhe des Startwertes wird empfohlen, den Einfluss hoher Bodenfeuchte auf das Erstauftreten deutlich zu reduzieren. Somit könnte der Termin des Erstauftretens von *P. infestans* und damit ein sinnvoller rechtzeitiger Spritzstart vom Modell besser prognostiziert werden.

8. Zusammenfassung

Der Erreger der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, *P. infestans* (Mont.) de Bary, 1876, kann bei feucht-warmer Witterung während der Vegetationszeit sehr große Schäden verursachen (HÄNNI 1949). Nach HOFFMANN und SCHMUTTERER (1999) kann er ohne Bekämpfung zu einem

Totalverlust des Kartoffelkrautes führen und verursacht damit einen erheblichen Ertrags- und Qualitätsverlust. ADLER (2000) stellte die These auf, dass latent mit Braunfäule befallene Pflanzknollen eine größere Bedeutung für den sichtbaren Primärbefall haben als früher. Während früher von Abfallhaufen und Durchwuchskartoffeln ausgehend der erste sichtbare Befall im Kartoffelbestand, vor allem durch sekundäre Infektionen, hervorgerufen wurde, hat die Bedeutung von primären Infektionen durch latent infiziertes Pflanzgut aufgrund moderner Lagertechnik (Kaltlagerung) deutlich zugenommen. Nach ADLER (2000) bedingt dies ein früheres Auftreten der Krankheit in Form von massivem Stängelbefall, vor allem in Jahren mit nasser Frühjahrswitterung. BÄßLER (2005) kam bei seinen Untersuchungen zum Einfluss der Bodenart und Bodenfeuchte auf den Primärbefall der Kartoffeln mit *P. infestans* zu dem Schluss, dass „aufgrund der deutlichen Beziehung zwischen Bodenart und Bodenfeuchte ein „Bodenmodul“ für die Prognosemodelle dringend notwendig ist, wofür die bodenphysikalischen Parameter Bodenart und Bodenfeuchte allerdings intensiver zu untersuchen wären“. Ein Ziel dieser Arbeit war es, ein Bodenfeuchtemodul in das bestehende Modell SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007), das das Erstaufreten von *P. infestans* prognostiziert, zu integrieren.

Zur genaueren Parametrisierung der Bodenfeuchte wurden Versuche zur Sporenbildung an der äußeren Schale von latent infizierten Knollen, zur unterirdischen Übertragung von Zoosporen durch den Boden und zur Infektion von gesunden Stängeln durchgeführt. Die aufgestellte Hypothese, dass während des unterirdischen Sporentportes mindestens der Porenbereich des Bodens bis einschließlich der engen Grobporen mit Wasser gefüllt sein muss, um eine Bewegung durch die Bodenporen zu ermöglichen (STOLZY et al. 1965 und PORTER 2005), sollte mit den durchgeführten Labor- und Freilandversuchen bewiesen werden.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigten, dass eine Übertragung von Sporen des Pilzes *P. infestans* durch den Boden in Ausnahmefällen erfolgreich verlief. Unter unsterilen Bedingungen war der Pilz seinen Antagonisten unterlegen.

In den Freilandversuchen wurde der Einfluss der Tage mit hoher Bodenfeuchte auf den Zeitpunkt des Erstaufretens untersucht. Es konnten Bodenfeuchtebereiche definiert werden, in denen es aufgrund ihrer Porengrößenklasse bzw. des vorhandenen frei verfügbaren Wassers zur Übertragung von Zoosporen über das Bodenmedium kommen kann. In keinem Jahr konnte ein visueller Stängelbefall bonitiert werden. Allerdings zeigten im Jahr 2010 13 % der entnommenen Stängelproben ein positives Ergebnis beim PCR-Nachweis. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,78* konnte eine positive Korrelation zwischen dem Anteil latent befallener Stängel und der Anzahl der Tage über Feldkapazität erkannt werden. Die erfolgreiche unterirdische Infektion hatte allerdings keine Auswirkungen auf das Auftreten des tatsächlichen visuellen Befalls.

Der ZEPP stehen im Rahmen der Modellvalidierung vielfältige Boniturdaten zum Erstaufreten von *P. infestans* zur Verfügung. Zusätzlich sind Wetterdaten für die vergangenen Jahre in einer Datenbank

vorhanden. Damit war es über Bodenfeuchtesimulationsmodelle möglich, die Bodenfeuchte nachträglich über allgemein verfügbare Wetterdaten zu modellieren. Somit wurden bonitierte Erstauftritten in Relation zur Bodenfeuchte gesetzt. Hierfür fanden Korrelationsberechnungen zwischen der Anzahl der Tage über Feldkapazität und der Anzahl der Tage zwischen Auflauf und Erstauftritten statt. In der Auswertung der Jahre 2002 bis 2008 der Standorte Puch und Straßmoos sowie weiterer Datensätze der Standorte Börry, Gütersloh, Bodenheim, Eich, Winnigen und Meddersheim der Jahre 2007 und 2008 wurden die Tage zwischen Auflauf und visuellem Befall mit der Anzahl der Tage zwischen Legen bis sieben Tage nach Auflauf, die über Feldkapazität lagen, korreliert. Mit einem Korrelationskoeffizienten von 0,1051 konnte für den genannten Zeitraum und die dargestellten Parameter keine Korrelation festgestellt werden.

In das empirisch analytische Modell SIMBLIGHT1 sollte der Einfluss der Bodenfeuchte als genaue Messgröße integriert werden. Als Startwert wird ein hypothetischer Initialbefall angenommen, welcher durch die Parameter Bodenfeuchte und Anbaudichte berechnet wird. Unter Eingang der Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und einem Sortenfaktor werden vom Modell zwei Raten berechnet, die Infektionsrate und die Entwicklungsrate. Die Entwicklungsrate berechnet hierbei den Fortschritt der Latenzperiode. Die aus den Raten berechneten zwei Zustandsvariablen „Latent befallene Fläche“ und „Infektiös befallene Fläche“ bilden in ihrer Summe den täglich berechneten Befallsindex. Vom Modell wird das Risiko des Ausbruchs einer Phytophthora-Epidemie ausgegeben. Hierbei nimmt der Befallsindex Werte zwischen 0 und 100 an. Erreicht der Befallsindex den Schwellenwert von 100, wird vom Modell die erste Fungizidmaßnahme empfohlen und damit ein Ausbruch der Krankheit vorhergesagt (KLEINHENZ et al. 2007).

Mit den aus den Versuchen erarbeiteten Ergebnissen, war die Integration eines Bodenmoduls in SIMBLIGHT1 nicht wie geplant durchzuführen. Durchgeführte Analysen zur Höhe des Startwertes ergaben, den Einfluss hoher Bodenfeuchte auf das Erstauftritten deutlich zu reduzieren. Die mit einem abgeschwächten Einfluss der Bodenfeuchte berechneten Prognosen ergaben im Mittel ein um neun Tage näheres Prognoseergebnis am tatsächlichen Erstauftrittenstermin.

IV. Einfluss der Bodenfeuchte auf die Höhe des Inokulums von *Fusarium spp.*

1. Problemstellung und Ziele

Die Infektion der Getreideähren durch *Fusarium graminearum* Schwabe bzw. *F. culmorum* (W.G. Smith) Saccardo führt neben Ertragsausfällen zu einer erheblichen Verminderung der Erntegutqualität. Dabei kommt vor allem der Produktion und Anreicherung von Mykotoxinen im Korn durch die Schadpilze die größte Bedeutung zu, da diese mit einer gesundheitlichen Gefährdung für Mensch und Tier einhergeht (PETTERSON 1995). Das am häufigsten und in den mit Abstand höchsten Konzentrationen festgestellte Mykotoxin Deoxynivalenol (DON) wird nur von den beiden *Fusarium*-Arten *F. culmorum* und *F. graminearum* produziert. Im Zuge der gesundheitlichen Gefährdung bestehen in der Europäischen Union zulässige Höchstmengenverordnungen der Mykotoxinbelastung (DON-Grenzwerte) in Mahlgetreide, im Getreideanteil von Brot sowie Säuglings- und Kleinkindernahrung (Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission).

In dem bei der ZEPP vorliegenden Modell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006), zur Prognose des Befallsrisikos von Ährenfusarium, wird das Inokulum indirekt über die Faktoren Vorfrucht und Bodenbearbeitung berücksichtigt, da die häufigsten Inokulumquellen für eine *Fusarium*-Epidemie befallene Ernterückstände darstellen. Die Belastung von Ernteproben von Weizenflächen mit dem Mykotoxin Deoxynivalenol hängt von ackerbaulichen Rahmenbedingungen ab (WEINERT et al. 2006). Nach WEINERT et al. (2006) spielt die Vorfrucht und die Bodenbearbeitung eine entscheidende Rolle auf den Befall mit Ährenfusarium an Weizen. In seinen durchgeführten Untersuchungen der Jahre 2003 bis 2005 wiesen im Mittel 41 % der Proben von Flächen mit Vorfrucht Mais und einer pfluglosen Bodenbearbeitungen DON-Werte über 600 µg/kg auf (Abbildung 79). Im Vergleich zeigten nur 5,1 % der Proben von Flächen mit einer Vorfrucht, die nicht Mais war, und einer Bodenbearbeitung mit Pflug DON-Werte über 600 µg/kg.

		% Proben über 600 µg DON*/ kg Korn				
Vorfrucht	Bearbeitung	2003	2004	2005	Mittel	rel.
Mais	oP	49	61	12,2	40,7	100
Mais	P	17,9	30,3	3,2	17,1	42
Nicht Mais	oP	19,7	11,5	1,9	11,0	27
Nicht Mais	P	10,7	2,6	2,1	5,1	13

Abbildung 79: Relative Häufigkeiten von Proben mit kritischen DON-Werten in Abhängigkeit von Vorfrucht, Bodenbearbeitung und Jahr (WEINERT et al. 2006)

In Arbeiten von BURGESS 1981, BECK und LEPSCHY 2000 wurde ebenfalls festgestellt, dass besonders die Vorfrucht Mais in Verbindung mit einer nicht-wendenden Bodenbearbeitung zu hohem Befall führen kann. Sie alle treffen die Aussage, dass die Vermehrung der Pilzfruchtkörper (Perithezien) bei *F. graminearum* überwiegend auf Maisstoppeln erfolgt, wobei zur Vermehrung der Perithezien auf diesen Stoppelresten längere Feuchteperioden nötig sind. Folgt eine Periode mit hoher

Luftfeuchtigkeit oder Regenereignissen werden die Fruchtkörper zum Platzen gebracht und die Ascosporen von den Maisstoppeln freigesetzt (BAUER 2008). Die Ascosporen werden über die Luft windverbreitet. Eine Infektion der Ähre ist möglich, wenn sich an diesen Vorgang erneut eine feuchte Periode anschließt, denn zur Ähreninfektion sind mindestens 24 Stunden Nässe erforderlich (SUTTON 1982).

An diesen Kenntnisstand anknüpfend, war der Fokus der Versuche im Rahmen dieser Arbeit auf die Bedingungen zur Ausbildung von Perithezien auf Maisstoppeln ausgerichtet. Ein Ziel war, mit Hilfe der Integration des Parameters Boden in das bestehende Modell FUS-OPT zukünftig genauer zu prognostizieren, wie hoch die Vermehrungsrate der Perithezien auf den Maisstoppeln in Bezug zu den Feuchteperioden angelegt werden konnte. Somit soll das von infizierten Vorfruchtresten ausgehende Infektionspotential genauer berechnet werden können, um eine bessere Risikoabschätzung für Ähreninfektionen treffen zu können.

2. Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden

Die zur Ähreninfektionen und Toxinbildung beteiligten Faktoren lassen sich in Vorgänge auf der Bodenoberfläche und an der Ähre der Weizenpflanzen untergliedern. Die Vorfrucht, die Form der Bodenbearbeitung und die Art und Menge der organischen Vorfruchtreste auf der Bodenoberfläche, die die Quelle einer möglichen Sporenbildung darstellen, bestimmen das Ausgangsinokulum auf der Fläche (SUTTON 1982). Durch einen intensiven Befall mit *Fusarium* im Stängelbereich an der Vorfrucht Mais kann Ährenfusarium ohne wendende Bodenbearbeitung besonders häufig und intensiv auftreten. Nach anderen Vorfrüchten kommen Befallsereignisse deutlich seltener und auf einem niedrigeren Befallsniveau vor (BECK und LEPSCHY 2000, WEINERT et al. 2006). Auf den infizierten Maisstoppelresten kann es bei geeigneter Witterung zur Ausbildung von Myzel und Perithezien kommen. Voraussetzung hierfür ist eine Befeuchtung des Materials durch Regenereignisse (SUTTON 1982). Die Menge der Perithezien, welche durch Temperatur und Feuchte beeinflusst ausgebildet wurden, stellen das Infektionspotential dar, wobei relative Luftfeuchten von mehr als 90 % und Temperaturen von 18 bis 22 °C das Optimum bilden (AMELS 2006).

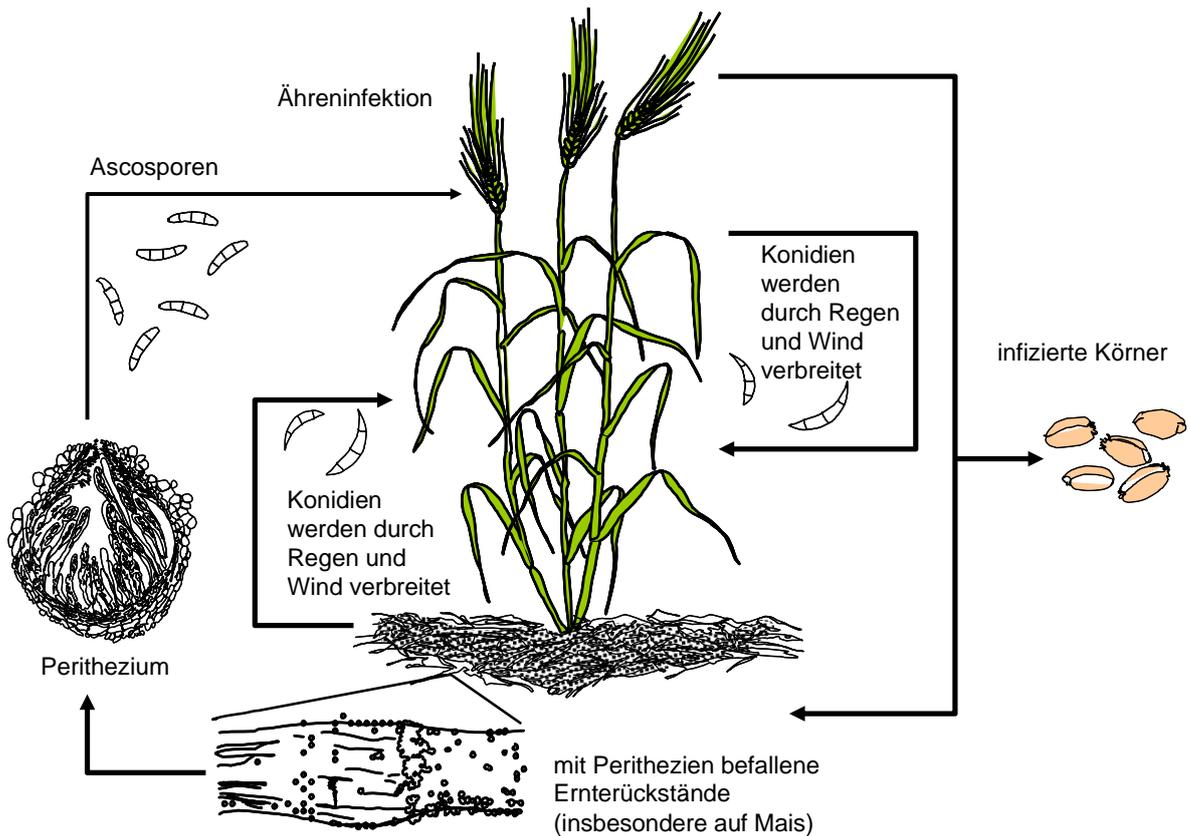


Abbildung 80: Entwicklungszyklus von *F. graminearum* bei Weizen (Racca 2012, nicht veröffentlicht)

Aus den auf den Vorfruchtresten gebildeten Perithezien werden bei feucht-warmer Witterung die Ascosporen freigesetzt. Diese werden über die Luft bis zur Getreideähre verbreitet (BAUER 2008). Die erläuterten Prozesse sind in Abbildung 80 schematisch dargestellt. Für eine Fusariuminfektion auf der Ähre ist der Witterungsverlauf von Mitte Ährenschieben bis Ende der Blüte entscheidend (BBCH 55 bis 69). In Abhängigkeit der Entwicklungsstadien (BBCH) der Weizenpflanzen (WITZENBERGER et al. 1989) ist die Anfälligkeit der Ähre für Fusariuminfektionen unterschiedlich stark (Abbildung 81) (WEINERT et al. 2006).

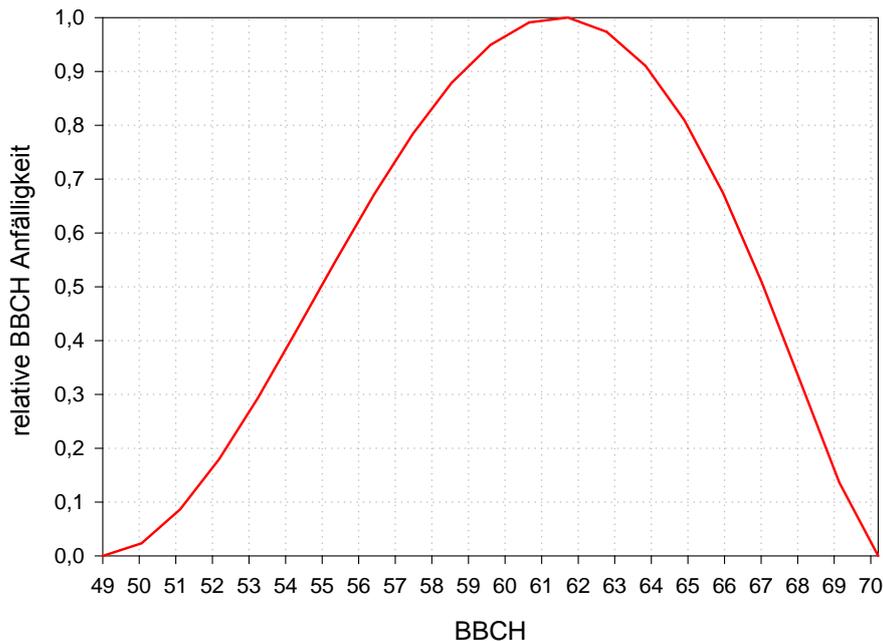


Abbildung 81: Relative Anfälligkeit der Weizenpflanzen in Abhängigkeit vom erreichten Entwicklungsstadium (BBCH) (WEINERT et al. 2006)

Eine Infektion der Ähre ist nur dann möglich, wenn sich an den Vorgang der Ascosporenfreisetzung eine nasse Periode anschließt, da zur Ähreninfektion mindestens 24 Stunden Nässe erforderlich sind. Zusätzlich stellen Temperaturen zwischen 25 bis 32 °C optimale Bedingungen für Infektionen dar, allerdings liegen die Grenzwerte für diese Prozesse innerhalb eines größeren Temperaturspektrums von 15 bis 32 °C (WEINERT et al. 2006).

Nach Inokulation der Ähre wächst der Pilz inter- und intrazellulär, wobei er „die Zellwand des Wirtes abbaut und dadurch das Eindringen in die Zelle bzw. das Wirtsgewebe erleichtert“ (BAUER 2008). Die oberhalb der Infektion liegenden Bereiche der Ähre werden infolge von der Wasser- und Nährstoffversorgung abgeschnitten und es kommt zur typischen Ausprägung von Weißährigkeit ohne Kornbildung. Der erkrankte Bereich der Ähre breitet sich zunehmend nach unten aus. Dies führt während der Entwicklung der Körner zur Bildung von Mykotoxinen und Schmachtkörnern (BAUER 2008).

Über Konidiosporen besteht eine weitere Infektionsmöglichkeit der Weizenpflanze (Abbildung 80). Konidiosporen können von Ernterrückständen bei Niederschlägen über Splash-Effekte von Blattetage zu Blattetage bis zur Ähre transportiert werden oder direkt bis an die Ähre geschleudert werden (PAUL et al. 2004).

3. Arbeitshypothesen

Zur Beantwortung der Fragestellung des Einflusses des Bodens auf den Fusariumbefall spielen in erster Linie die Vorgänge auf den infizierten Vorfruchtresten eine Rolle. Dort kommt es zur Ausbildung von Myzel und nachfolgend von Perithezien, solange das Material ausreichend befeuchtet

ist. Die Menge der Perithezien stellt das Inokulationspotential für eine Ähreninfektion dar. Der relative Wassergehalt der Maisstoppel wird vom Modell bisher aus der Menge und Verteilung der Niederschläge am Standort gegenüber der täglichen Abtrocknung der Maisstoppel in Abhängigkeit von der Temperatur berechnet. Die Zeit in welcher der relative Wassergehalt der Maisstoppel demnach über 60 % liegt, bildet den Zeitraum für die Myzel- und Perithezienbildung (Abbildung 82) (WEINERT et al. 2006). Die Bodenoberfläche als „Feuchtelieferant“ spielt bisher keine Rolle bei der Berechnung der Abtrocknung.

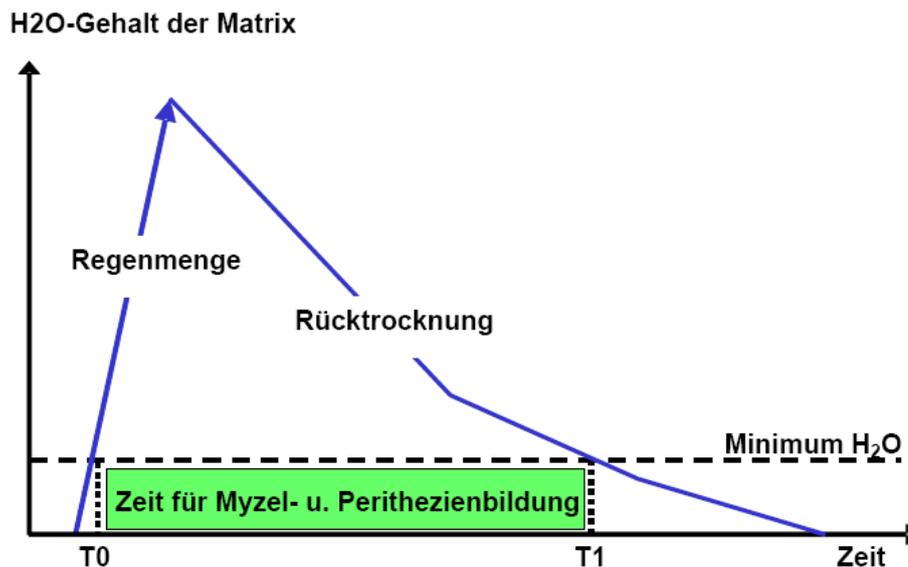


Abbildung 82: Zeitraum zur Ausbildung von Myzel und Perithezien in Bezug zur Regenmenge und Abtrocknung (WEINERT et al. 2006)

Die Abtrocknung der Maisstoppeln wird vom Modell FUS-OPT auf Grundlage des Mollier-Diagramms (MOLLIER 1932) berechnet, wobei die Temperatur den entscheidenden Einflussfaktor bildet. Nach jedem Regenereignis wird der Wassergehalt der Stoppeln auf 100 % erhöht. In einem ersten Schritt war zu prüfen, ob der Wassergehalt der Maisstoppeln tatsächlich nach jedem Regenereignis auf 100 % erhöht werden sollte bzw. welche Mengen an Niederschlag erreicht werden müssen.

In Laborversuchen waren Untersuchungen zum Abtrocknungsverhalten von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden durchzuführen. Mit den Versuchen wurde das Ziel verfolgt, die Abtrocknung der Maisstoppeln zukünftig genauer abbilden zu können. Die Einflussfaktoren Temperatur, Luftfeuchte und die Bodenart kamen zur Auswertung. Der Einfluss unterschiedlicher Bodenarten bei der Abtrocknung der aufliegenden Stoppeln sollte untersucht und in das Modell FUS-OPT integriert werden. Die aufgestellte These einer schnelleren Abtrocknung der Maisstoppeln auf sandigen als auf tonig/lehmigen Böden, die an der Oberfläche länger feucht bleiben, sollte geprüft werden. Die bisherige, aus dem Mollier-Diagramm (MOLLIER 1932) berechnete Abtrocknung sollte mit den aus den Versuchen abgeleiteten Abtrocknungsraten für verschiedene Bodenarten (als Resultat einer länger anhaltenden höheren Bodenfeuchte) ausgetauscht werden.

Eine Validierung des neu entwickelten Ansatzes war mit Versuchsdaten zum Ascosporenflug und damit zum Infektionspotential durchzuführen. Infolge eines positiven Validierungsergebnisses war es das Ziel, mit Hilfe der Integration der Bodenparameter den Zeitraum der Myzel- und Perithezienbildung genauer abbilden und die Prognose des Infektionspotentials verfeinern zu können. Das berechnete und verifizierte Infektionspotential könnte dann in Form von Risikokarten dargestellt und für eine Ähreninfektion gefährdete Gebiete klassifiziert ausgegeben werden.

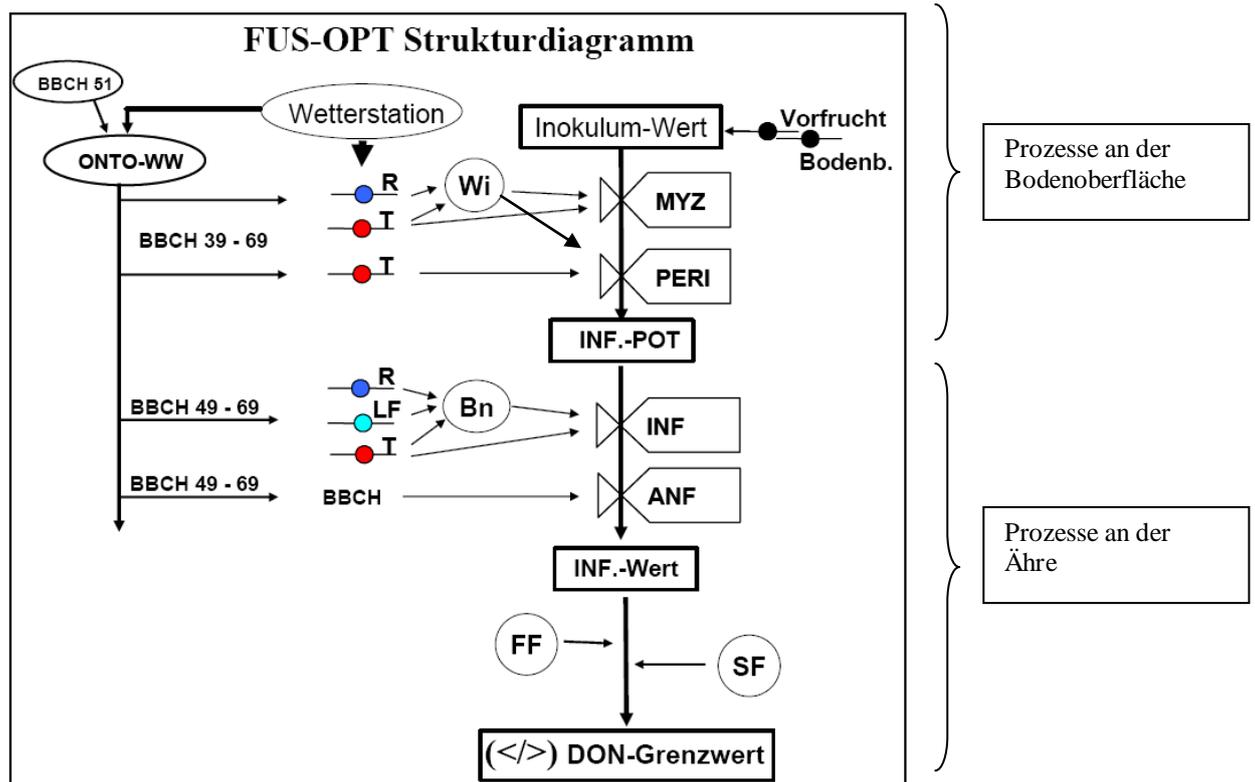
Daraus ergaben sich folgende Arbeitshypothesen:

- Die Abtrocknung der Maisstoppeln erfolgt in Abhängigkeit des Bodens, der Temperatur und Luftfeuchte und kann in deren Abhängigkeit modelliert werden.
- Die Aufsättigung der Maisstoppeln mit Wasser erfolgt infolge von Niederschlagsereignissen und ist genauer zu definieren.
- Die neuen Ansätze spielen eine entscheidende Rolle für die Ausbildung von Perithezien auf Maisstoppeln und können in das Modell FUS-OPT integriert werden.
- Hierdurch ergibt sich eine verfeinerte Prognose des Infektionspotentials.

4. Material und Methoden

4.1 Prognosemodell FUS-OPT

In dem Modell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006) zur Prognose des Befallsrisikos von Ährenfusarium (Abbildung 83) wird das Inokulum indirekt über die Faktoren Vorfrucht und Bodenbearbeitung berücksichtigt, da die häufigsten Inokulumquellen für eine Fusarium-Epidemie befallene Ernterückstände darstellen. In Arbeiten von BURGESS (1981) sowie BECK und LEPSCHY (2000) wurde festgestellt, dass besonders die Vorfrucht Mais in Verbindung mit einer nicht-wendenden Bodenbearbeitung zu hohem Befall führen kann. Im Modell werden auf diesen Grundlagen aufbauend unterschiedlich hohe Inokulum-Werte als Startwert für die Prognose angenommen.



Faktoren: FF = Fungizidfaktor, SF = Sortenfaktor - Prozesse: MYZ = Myzel-Bildungsrate, PERI = Perithezien-Bildungsrate, INF = Infektionsrate, ANF = Anfälligkeitsrate
 Zwischengrößen: Wi = Wassergehalt des Inokulums - Bn = Blattnässe
 Wetterparameter: R = Regenmenge, T = Temperatur, LF = rel. Luftfeuchte
 ONTO-WW = Ontogenesemodell für Winterweizen, BBCH = Entwicklungsstadium

Abbildung 83: Strukturdiagramm der Prozesse im Modell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006)

Bei *F. graminearum* und *F. culmorum* erfolgt die Vermehrung des Inokulums auf Maisstoppeln. Zur Vermehrung der Perithezien auf diesen Stoppelresten sind längere Feuchteperioden nötig. Auf den infizierten Vorfruchtresten kommt es zur Ausbildung von Myzel und nachfolgend von Perithezien solange das Material ausreichend befeuchtet ist (SUTTON 1982). Der relative Wassergehalt der Maisstoppel wird vom Modell bisher aus der Menge und Verteilung der Niederschläge am Standort gegenüber der täglichen Abtrocknung der Maisstoppel in Abhängigkeit von der Temperatur mathematisch unter Verwendung des Mollier-Diagramms (MOLLIER 1932) berechnet. Die Periode in welcher der relative Wassergehalt der Maisstoppel demnach über 60 % liegt, bildet den Zeitraum für Myzel- und Perithezienbildung (WEINERT et al. 2006). Der Wassergehalt der Maisstoppeln geht als Schwellenwert in die Modellrechnung ein (Abbildung 83). Liegt der Wassergehalt zwischen 60 und 90 % wird aus der während der Abtrocknung erreichten Temperatursumme der Anteil gebildeter Perithezien berechnet. Liegt der Wassergehalt über 90 % wird aus der stündlichen Temperatur die Myzelbildungsrate abgeleitet. Die berechnete Myzel- und Perithezienbildungsrate ergeben in Multiplikation das Infektionspotential (WEINERT et al. 2006).

Die oben dargelegten Modellprozesse spielen sich an der Bodenoberfläche ab. Im weiteren Modellverlauf werden die an der Ähre stattfindenden Prozesse simuliert (Abbildung 83). Hierbei bildet eine Periode von 24 Stunden ausreichender Blatt- bzw. Ährennässe die Bedingung zur Ausgabe der Infektionsrate. Diese wird aus den Parametern Niederschlag, relative Luftfeuchte und Temperatur simuliert. Der täglich ausgegebene Infektionswert berechnet sich aus einer Kombination des Infektionspotentials an der Bodenoberfläche, der temperaturabhängig berechneten Infektionsrate und der von den Entwicklungsstadien der Weizenpflanzen abhängigen Anfälligkeitsrate (siehe Kapitel IV Absatz 2). Über einen Fungizid- und Sortenfaktor wird vom Modell FUS-OPT ausgegeben, ob bestimmte DON-Grenzwerte im Getreide erreicht werden (Abbildung 83) (WEINERT et al. 2006). Der Fungizideinfluss geht hierbei klassifiziert nach Wirkstoffgruppen als Faktor in die Modellrechnung ein. Ähnlich verhält es sich mit dem Sortenfaktor. Dieser findet klassifiziert nach BSA-Noten (BUNDESSORTENAMT 2011) einen Einfluss bei der Modellrechnung (WEINERT et al. 2006). Die Klassifizierung der Sorten wird mittels Versuchen vom Bundessortenamt festgelegt und in Form einer „Beschreibenden Sortenliste“ herausgegeben. Die Ausprägung einer Eigenschaft wird jeweils mit den Noten 1 bis 9 ausgedrückt (BUNDESSORTENAMT 2011).

Für die in dieser Arbeit untersuchte Fragestellung zum Einfluss von Bodenfaktoren war daher der erste Modellteil bis zur Berechnung des Infektionspotentials relevant (siehe Abbildung 83).

4.2 Laborversuche

4.2.1 Klimaschrankversuche zur Abtrocknung von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden

Die Feldsituation von Maisschlägen nach der Ernte und einer Bodenbearbeitung ist in Abbildung 84 dokumentiert. Erfolgt auf dem Schlag eine nicht-wendende Bodenbearbeitung, ist die Schlagsituation im darauffolgenden Frühjahr wie in Abbildung 85 dargestellt. Maisstoppeln zur Ausbildung von Perithezien sind somit in ausreichender Masse an der Oberfläche vorhanden.



Abbildung 84: Feldsituation in einem Maisschlag nach Beerntung und Bodenbearbeitung (Oktober 2009, eigene Aufnahme)



Abbildung 85: Getreideschlag im März 2010 mit Vorfrucht Mais (eigene Aufnahme)

Aus Feldbeobachtungen konnte abgeleitet werden, dass sich die Maisstoppeln zu über 95 % in einer horizontalen Lage befinden und die abgestorbenen Wurzeln keinen Bodenanschluss mehr aufweisen. Diese Grundlagen bildeten die Voraussetzungen zu der im Folgenden beschriebenen Versuchsanlage der durchgeführten Laborversuche.

Für die Versuche wurden nach der Beerntung im Jahr 2009 Maisstoppeln gesammelt. Diese wurden am untersten Knoten auf 10 cm Länge (5cm links und rechts des Knotens) gekürzt. Dieses Verfahren sollte eine einheitliche Ausgangssituation der Stoppeln schaffen und eine Vergleichbarkeit der Wiederholungen gewährleisten.

Die Stoppeln wurden für zwölf Stunden komplett mit Wasser gesättigt. Dies sollte den Zeitpunkt T0 in Abbildung 82 simulieren, also die vollständige Durchfeuchtung der Maisstoppeln nach einer stärkeren bzw. längeren Regenperiode. Zur Wassersättigung wurden die Stoppeln in einem Eimer mit Wasser aufbewahrt und unter der Wasseroberfläche gehalten.

Die Versuche wurden mit drei Böden aus verschiedenen Bodenartenhauptgruppen durchgeführt. Aus den Bodenartenhauptgruppen Sande, Tone und Schluffe wurde jeweils ein Vertreter ausgewählt (Abbildung 86). Die Böden stammten von den Validierungsstandorten Abtweiler, Mainz-Bretzenheim und Schwabsburg der Bodenfeuchtesimulation aus dem Jahr 2009 (Tabelle 5). Die Bodenartanalyse wurde vom Bodenlabor der Universität in Mainz durchgeführt. In einer zusätzlichen Variante wurde der Boden gegen Quarzsand bzw. gegen eine Plastikunterlage (Petrischale) getauscht.

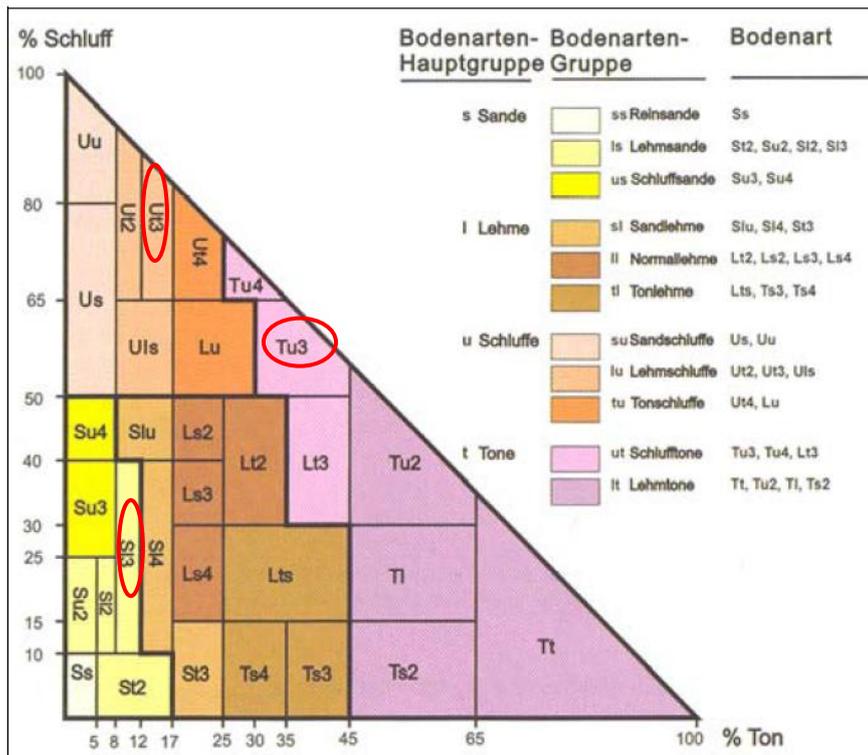


Abbildung 86: Dreieck der Bodenarten und ausgewählte Bodenarten der Klimaschrankversuche zur Abtrocknung der Maisstoppeln auf unterschiedlichen Bodenarten (Quelle: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2005))

Rundtöpfe mit einem oberen Durchmesser von 13 cm und einem unteren Durchmesser von 10 cm wurden mit den entsprechenden Böden befüllt und eine 100-prozentige Wassersättigung herbeigeführt. Hierfür wurden die Töpfe mit der Unterkante in ein 2 cm angestautes Wasserbad gestellt. Nach vollständiger Wasseraufsättigung wurden die Töpfe aus dem Wasserbad entnommen und mit einem Deckel an der Oberseite bedeckt, um Verdunstung zu verhindern. Die so bedeckten Töpfe wurden für zwölf Stunden zum Abtropfen der überkapillaren Hohlräume in eine Wanne mit Quarzsand gestellt (Abbildung 87). Das Abtropfen auf Sand war nötig, um die Versickerung des überschüssigen Wassers aufgrund hängender Menisken nicht zu hemmen (Verfahren nach SCHALLER 2000). Alle so behandelten Töpfe hatten damit zu Versuchsstart einen Ausgangszustand von 100 % maximaler Wasserkapazität.



Abbildung 87: Aufsättigung der Bodentöpfe bis zur maximalen Wasserkapazität (links) und anschließende Entwässerung der überkapillaren Hohlräume (rechts)

Anschließend wurden die Stoppeln horizontal in die Töpfe eingebracht (Abbildung 88). Die unterschiedliche Abtrocknung der Stoppeln und des Bodens wurde durch wiegen und spätere Trocknung des Bodens bei 105 °C im Trockenschrank und der Stoppeln bei 30 °C berechnet.



Abbildung 88: Aufbau der Versuche zum Einfluss der Bodenfeuchte auf die Maisstoppelabtrocknung

Der Versuch wurde nach den in Tabelle 21 aufgelisteten Temperatur- und Luftfeuchtevarianten im Klimaschrank mit jeweils 20 Wiederholungen durchgeführt. Zu Beginn wurde zusätzlich untersucht, ob es Unterschiede in der Abtrocknung der Maisstoppel durch die kurzzeitige Unterbrechung des Bodenkontaktes während des Wiegens zu Varianten mit permanentem Bodenkontakt gab. Hierfür wurden die Stoppeln in fünf Wiederholungen permanent auf dem Boden belassen und nach 14 Tagen erstmalig zum Wiegen abgenommen. Mögliche Unterschiede der Wassergehalte zu diesem Termin konnten im Anschluss verglichen werden.

Tabelle 21: Temperatur- und Luftfeuchtevarianten der durchgeführten Klimaschrankversuche zur Abtrocknung der Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden

Temperatur	Luftfeuchte	Wiederholungen
5 °C	57 %	20 je Bodenart
10 °C	96 %	20 je Bodenart
18 °C	94 %	20 je Bodenart
20 °C	79 %	20 je Bodenart
20 °C	83 %	20 je Bodenart
25 °C	94 %	20 je Bodenart
25 °C	96 %	20 je Bodenart
20 °C	96 %	20 auf Quarzsand
20 °C	96 %	20 auf Petrischale

4.2.2 Untersuchungen zur Perithezienbildung auf Maisstoppeln in Bezug zur Maisstoppelfeuchte

Zusätzlich zur Untersuchung der Abtrocknung der Maisstoppeln wurde in den Versuchsdurchläufen bei 25 °C und einer 20 °C Variante, die zusätzlich mit Quarzsand durchgeführt wurde, eine Bonitur der Maisstoppeln hinsichtlich der Perithezienbildung durchgeführt, um Rückschlüsse über die Länge der möglichen Perithezienbildung in Bezug zur aktuellen Maisstoppelfeuchte erlangen zu können. Die Bonituren zur Perithezienbildung wurden bei den hohen Temperaturstufen durchgeführt, da das

Optimum zum Myzelwachstum und in Folge zur Perithezienbildung bei 25 °C liegt. Im zweitägigen Boniturintervall wurde der Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln bonitiert. Eine künstliche Inokulation der Maisstoppeln wurde nicht durchgeführt. Der sich entwickelnde Befall stammte aus natürlichen Infektionen, die vor dem Sammeln der Stoppeln auf dem Feld passiert waren.

Mit diesen Versuchen sollte untersucht werden, ob die Perithezienbildung wie im Modell abgebildet bis zu einem Wassergehalt der Maisstoppeln bis 60 % stattfindet, oder ob die Grenzwerte neu zu definieren waren.

4.2.3 Modellierung von Abtrocknungsfunktionen

Die aus den Versuchen gewonnenen Daten zur Abtrocknung der Maisstoppeln auf den unterschiedlichen Bodenarten wurden hinsichtlich der Varianz der 20 Wiederholungen im Box-Whisker-Plot ausgewertet. Zur Vergleichbarkeit der Ergebnisse der verschiedenen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten wurden die Wassergehalte der Maisstoppeln mit den stündlichen Temperatur- bzw. Luftfeuchtesummen korreliert.

Entlang der Mittelwerte wurden Abtrocknungsfunktionen unter Verwendung von Exponentialfunktionen modelliert. Der Vergleich der Steigungswerte der Funktionen der unterschiedlichen Temperatur-, Luftfeuchte- und Bodenvarianten gab Aufschluss über den Einfluss der unterschiedlichen Parameter auf die Abtrocknung der Stoppeln.

4.2.4 Modellierung von täglichen Abtrocknungsraten

Durch die Verknüpfung der unter Kapitel IV Absatz 4.2.2 gewonnenen Ergebnissen zur Perithezienbildung in Abhängigkeit des Wassergehaltes der Maisstoppeln und der unter Absatz 4.2.4 abgeleiteten Ergebnissen zur Abtrocknung der Maisstoppeln konnte über eine lineare Regression eine tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln in Bezug zur Temperatur und Luftfeuchte bis zum Erreichen des Grenzwertes der Perithezienbildung berechnet werden (Abtrocknungsrate abgelaufen). Über tägliche Luftfeuchte- und Temperaturwerte soll prognostiziert werden, wann der Wassergehalt der Maisstoppeln unter den Grenzwert zur Perithezienbildung fällt und sich kein weiteres Infektionspotential ausbilden kann. Die Raten wurden getrennt nach Bodenarten modelliert.

4.3 Statistische Auswertung

Die statistische Auswertung der Ergebnisse erfolgte im Rahmen der deskriptiven Statistik, Varianzanalysen sowie Korrelation- und Signifikanztests. Im Rahmen der deskriptiven Statistik fand die Auswertung mittels Box-Whisker-Plots zum Vergleich der Mittelwerte sowie der Verteilung der

Ergebnisse statt. Die Überprüfung eines funktionalen linearen Zusammenhangs zwischen den bonitierten Sporenfängen und dem modellierten Infektionspotential fand unter Durchführung einer linearen Regression nach dem in Kapitel II Absatz 2.7 erläuterten Prinzip statt. Die Signifikanzen wurden im Korrelationstest nach PEARSON und im FRIEDMAN-Test überprüft. Sie sind zum Niveau Alpha = 0,05 mit * und zum Niveau Alpha = 0,01 mit ** gekennzeichnet.

Die Auswertungen wurden mit den Programmen SigmaPlot für Windows, Version 10.0 und XLSTAT Version 2008.5.01 durchgeführt.

5. Ergebnisse

5.1 Laborversuche

5.1.1 Klimaschrankversuche zur Abtrocknung von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden

Der Vergleich der Wassergehalte zwischen den Stoppeln mit permanentem Bodenkontakt zu denen der zweitägig gewogenen Stoppeln des ersten Versuchsdurchgangs bei 20 °C und 83 % relativer Luftfeuchte ist in Abbildung 89 dargestellt. Die Box-Whisker-Plots zeigen, dass die kurzzeitige Abnahme keinen Einfluss auf das Abtrocknungsverhalten der Stoppeln hatte. Die Spannweite des relativen Wassergehaltes der Stoppeln beider Varianten unterscheidet sich geringfügig. Gleiches gilt für den Mittelwertvergleich mit einer Differenz von 0,1 % des relativen Wassergehaltes der Maisstoppeln.

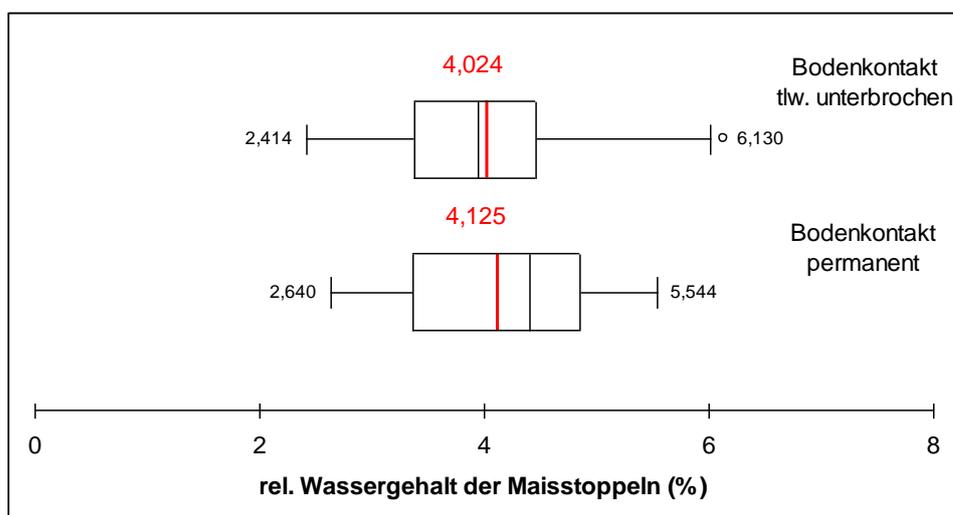


Abbildung 89: Boxplots des relativen Wassergehaltes der Maisstoppeln in Prozent bei permanentem und kurzzeitig, während des Wiegens unterbrochenem Bodenkontakt [n=15]

In allen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten der durchgeführten Versuche konnte festgestellt werden, dass die Varianz der Wassergehalte der Maisstoppeln während der Abtrocknungsphase zwischen den 20 Wiederholungen hoch ist. Sie ist beispielhaft für die Temperaturstufe 10 °C und

96 % relative Luftfeuchte und die Abtrocknung auf Sandboden dargestellt (Abbildung 90). Die Mittelwerte der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln aller 20 Wiederholungen sind für die unterschiedlichen Böden der jeweiligen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten in Tabelle 22 bis Tabelle 28 dargestellt.

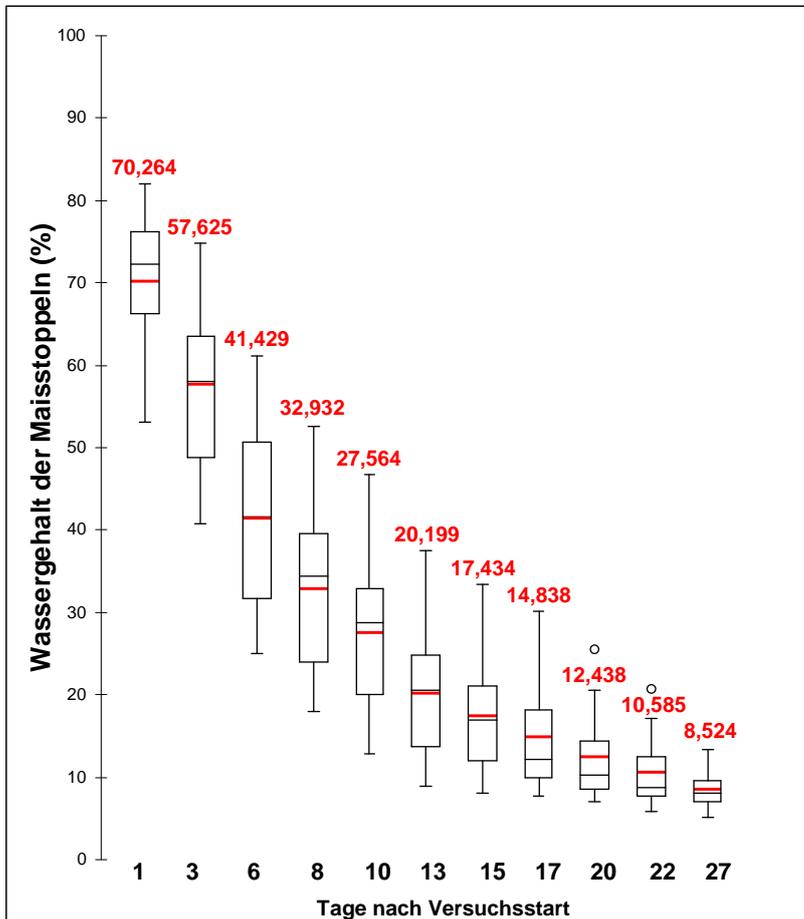


Abbildung 90: Boxplots der Varianz der Wassergehalte der Maisstoppeln in Prozent am Beispiel der Temperaturstufe 10 °C auf Boden der Sandgruppe bezogen auf die Tage nach Versuchsstart [n=20]

Tabelle 22: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 5 °C und 57 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	61,05 ± 7,08	58,55 ± 7,69	50,85 ± 10,56
3	39,29 ± 9,05	28,97 ± 8,90	29,49 ± 7,29
6	21,85 ± 5,78	14,12 ± 7,40	15,72 ± 4,84
8	14,95 ± 4,17	10,02 ± 4,73	11,00 ± 3,78
10	11,23 ± 2,95	7,60 ± 2,91	8,83 ± 2,86
13	9,03 ± 1,69	6,78 ± 2,05	7,80 ± 2,27
15	8,29 ± 1,05	6,26 ± 1,65	7,23 ± 1,98
20	7,57 ± 0,93	5,31 ± 1,36	6,42 ± 1,77

Tabelle 23: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 10 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	70,26 ± 7,85	76,25 ± 5,37	67,69 ± 8,38
3	57,62 ± 9,93	53,06 ± 7,48	51,84 ± 10,26
6	41,43 ± 11,11	31,54 ± 8,76	32,04 ± 9,42
8	32,93 ± 9,36	23,76 ± 8,81	25,46 ± 9,00
10	27,56 ± 8,72	18,58 ± 7,59	19,63 ± 7,81
13	20,20 ± 7,60	13,55 ± 6,21	14,19 ± 7,46
15	17,43 ± 6,64	11,65 ± 5,42	10,49 ± 4,66
17	14,84 ± 6,18	10,8 ± 4,66	9,13 ± 3,45
20	12,44 ± 5,03	10,02 ± 4,29	8,20 ± 2,65
22	10,59 ± 3,96	9,50 ± 4,09	7,75 ± 2,33
27	8,52 ± 2,17	8,88 ± 3,96	6,62 ± 1,84

Tabelle 24: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 18 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	59,09 ± 8,08	60,62 ± 8,32	58,19 ± 7,41
2	47,95 ± 8,90	49,90 ± 10,23	46,33 ± 7,99
3	35,69 ± 8,72	36,31 ± 10,22	34,60 ± 10,90
4	28,80 ± 8,41	28,81 ± 9,49	26,65 ± 7,77
7	14,70 ± 5,45	13,79 ± 5,98	13,07 ± 4,64
9	10,08 ± 3,24	9,63 ± 4,10	9,78 ± 3,18
15	6,28 ± 1,15	6,43 ± 1,77	7,10 ± 1,83

Tabelle 25: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 20 °C und 79 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
2	52,59 ± 8,97	49,76 ± 7,74	50,86 ± 9,58
4	32,83 ± 7,71	27,34 ± 8,33	29,91 ± 8,21
6	18,30 ± 6,12	13,38 ± 5,74	14,98 ± 6,49
8	11,37 ± 4,48	7,77 ± 3,23	7,96 ± 3,48
10	8,09 ± 2,74	5,81 ± 1,87	5,62 ± 1,79
13	4,47 ± 1,29	4,29 ± 0,69	4,72 ± 1,17
15	3,82 ± 0,73	3,90 ± 0,65	4,27 ± 1,00

Tabelle 26: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 20 °C und 83 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	59,68 ± 6,00	62,08 ± 8,78	57,08 ± 8,52
2	48,57 ± 7,03	51,84 ± 8,94	49,01 ± 9,94
5	24,08 ± 6,42	27,74 ± 6,93	23,95 ± 10,8
7	14,57 ± 4,71	17,74 ± 5,90	14,37 ± 9,09
9	9,62 ± 2,72	11,62 ± 4,27	10,33 ± 6,01

Tabelle 27: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 25 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	66,65 ± 10,03	74,00 ± 5,67	66,97 ± 10,20
2	49,87 ± 13,40	56,78 ± 5,53	51,37 ± 9,48
3	39,99 ± 12,12	42,78 ± 8,18	38,49 ± 9,09
4	31,69 ± 10,44	31,82 ± 8,78	28,54 ± 8,17
7	17,20 ± 6,13	15,66 ± 5,75	13,56 ± 5,65
9	12,02 ± 3,39	10,45 ± 2,95	9,05 ± 3,42
11	12,25 ± 3,21	10,27 ± 1,71	8,96 ± 2,29
14	9,34 ± 1,09	8,73 ± 1,23	7,03 ± 1,33
16	8,66 ± 0,96	8,14 ± 1,34	6,13 ± 1,24
19	7,68 ± 0,89	7,09 ± 0,90	5,19 ± 1,11

Tabelle 28: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf den unterschiedlichen Böden nach Boniturtagen bei 25 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Bodenart]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Sand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Schluff in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Ton in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0	100 ± 0
1	53,60 ± 13,57	54,63 ± 18,88	53,65 ± 8,75
2	40,07 ± 16,53	41,92 ± 16,40	41,71 ± 10,8
3	30,18 ± 14,81	30,19 ± 15,37	29,70 ± 11,09
4	25,81 ± 12,19	25,45 ± 12,92	22,26 ± 11,69
7	14,90 ± 7,68	14,18 ± 7,36	11,99 ± 8,37
9	10,52 ± 4,91	9,43 ± 4,83	9,95 ± 5,90
11	11,78 ± 3,15	8,99 ± 2,98	8,39 ± 3,77
14	7,99 ± 2,18	6,59 ± 2,22	7,05 ± 2,60

Tabelle 29: Mittelwerte und Standardabweichung der relativen Wassergehalte der Maisstoppeln (%) auf Quarzsand und Petrischalen nach Boniturtagen bei 20 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20/Variante]

Boniturtage	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Quarzsand in % (Mittelwert ± Standardabweichung)	relativer Wassergehalt der Maisstoppeln auf Petrischale in % (Mittelwert ± Standardabweichung)
0	100 ± 0	100 ± 0
2	85,17 ± 13,15	42,54 ± 14,64
5	51,00 ± 21,00	16,48 ± 8,26
7	38,66 ± 18,05	6,18 ± 2,94
9	30,66 ± 15,09	3,03 ± 1,16
12	22,49 ± 11,81	3,00 ± 1,05
14	18,31 ± 10,25	2,84 ± 1,10
16	13,56 ± 8,58	2,81 ± 0,97
19	10,48 ± 6,59	2,34 ± 1,23

5.1.2 Untersuchungen zur Perithezienbildung auf Maisstoppeln in Bezug zur Maisstoppelfeuchte

Die Bonitur der Maisstoppeln hinsichtlich Perithezienbildung ergab die in Abbildung 91, Abbildung 92 und Abbildung 93 dargestellten Ergebnisse. In den Grafiken dargestellt sind der prozentuale Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln und der jeweilige mittlere Wassergehalt der Maisstoppeln zu den entsprechenden Boniturterminen. Auffällig war, dass die Perithezienbildung nicht ausschließlich, wie vom Modell bisher abgebildet, im Bereich von 90 bis 60 % Wassergehalt der Maisstoppeln stattfand, sondern dass die Zunahme der befallenen Maisstoppeln bis zu einem Wassergehalt der Maisstoppeln von um die 10 % voranschritt. Der Zeitraum, in welchem Perithezien gebildet werden, war somit deutlich länger als bisher angenommen.

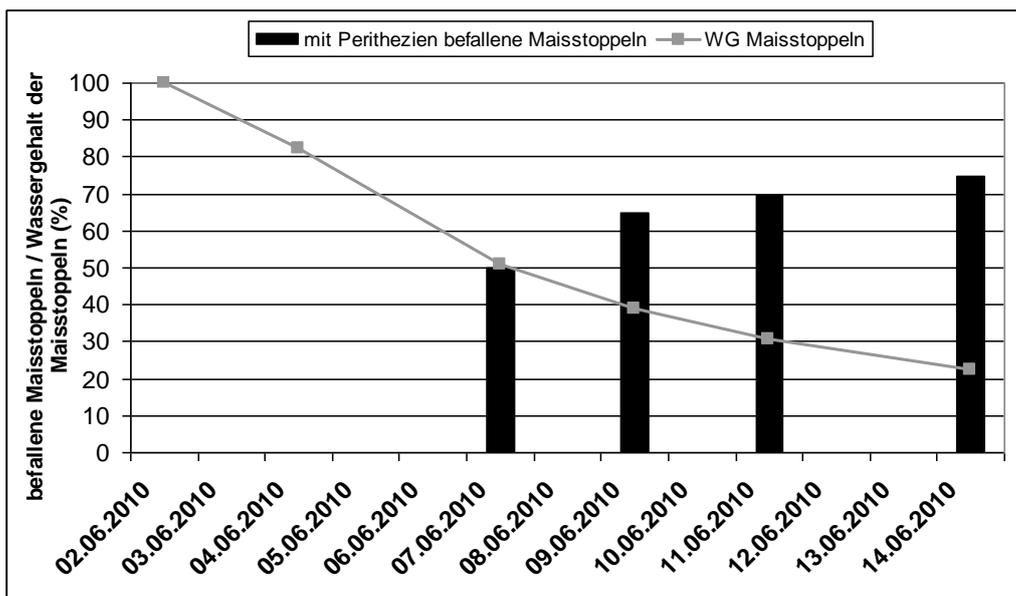


Abbildung 91: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln und der entsprechenden mittleren Wassergehalte der Maisstoppeln auf Quarzsand bei 20 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20]

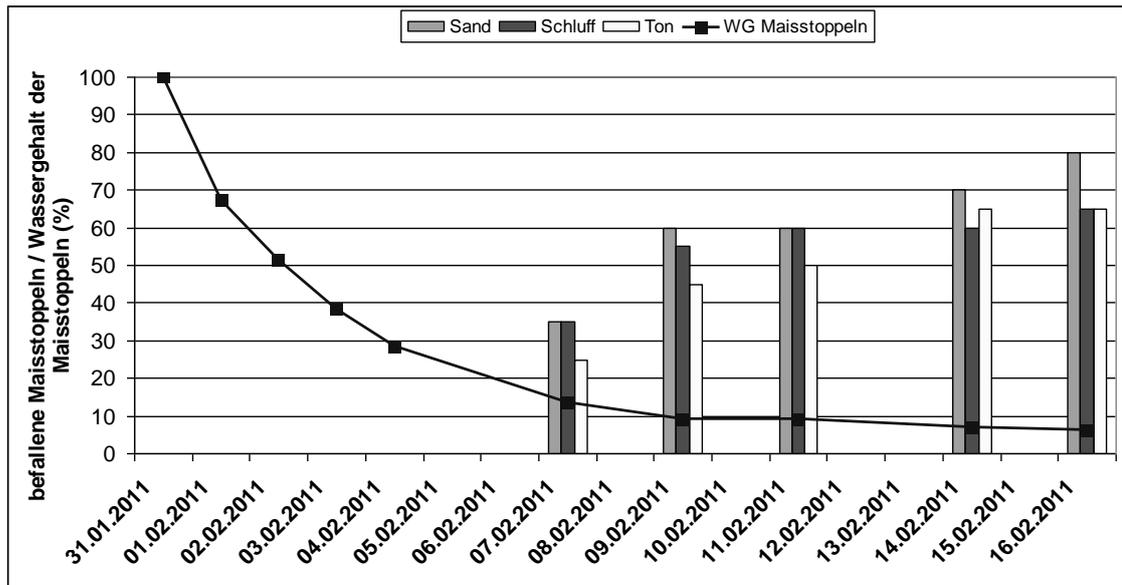


Abbildung 92: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf den Böden der Bodenartenhauptgruppen Sand, Schluff und Ton und der entsprechende mittlere Wassergehalt der Maisstoppeln bei 25 °C und 94 % relativer Luftfeuchte [n=20]

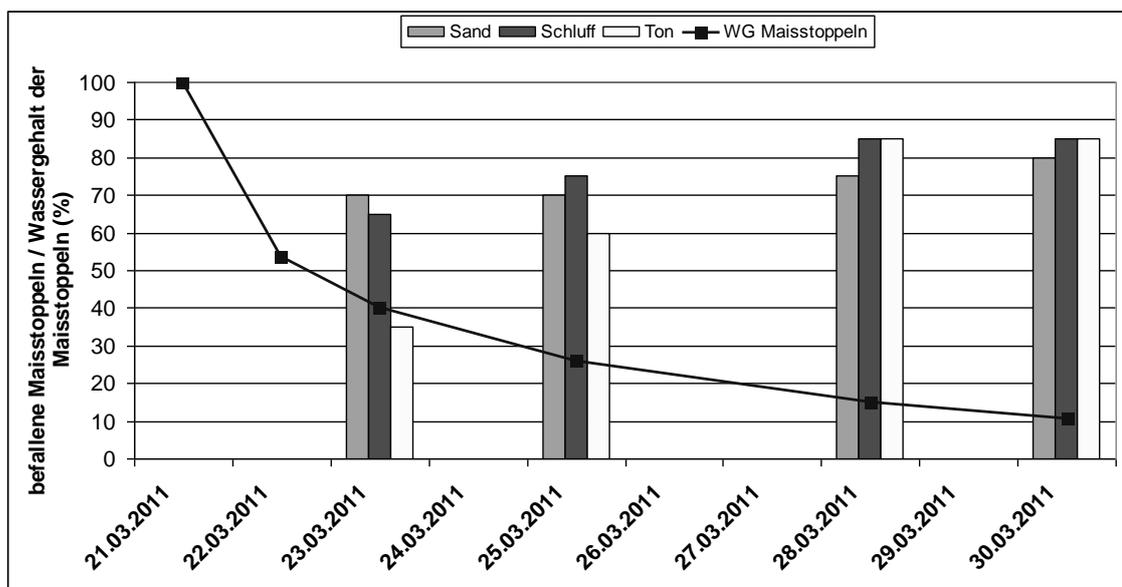


Abbildung 93: Prozentualer Anteil der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf den Böden der Bodenartenhauptgruppen Sand, Schluff und Ton und der entsprechende mittlere Wassergehalt der Maisstoppeln bei 25 °C und 96 % relativer Luftfeuchte [n=20]

Zusätzlich zeichnete sich die Tendenz ab, dass die Anzahl der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf Sandböden länger zunimmt als auf den Böden der Schluff- und Tongruppe (Abbildung 92 und Abbildung 93).

5.1.3 Modellierung von Abtrocknungsfunktionen

Zur statistischen Auswertung des Einflusses der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Bodenart auf die unterschiedliche Abtrocknung der Maisstoppeln wurden Abtrocknungsfunktionen bezogen auf die stündlichen Temperatur- und Luftfeuchtesummen modelliert. Die Funktionen wurden

hierbei entlang der Mittelwerte der 20 Wiederholungen angepasst. Die bonitierten Wassergehalte der Maisstoppeln jeder Temperatur-, Luftfeuchte und Bodenvariante wurden gegenüber den stündlichen Temperatursummen bzw. Luftfeuchtesummen zur Korrelation aufgetragen (Abbildung 94). Mit den entstandenen Wertepaaren wurde eine Regression durchgeführt, sodass für jede Temperatur-, Luftfeuchte- und Bodenvariante eine abnehmende exponentiale Abtrocknungsfunktionen mit der Gleichung

$$[13] f = a * \exp(-b * x)$$

wobei:

x = stündliche Temperatursumme

a, b = Modellparameter

modelliert werden konnten (Abbildung 94).

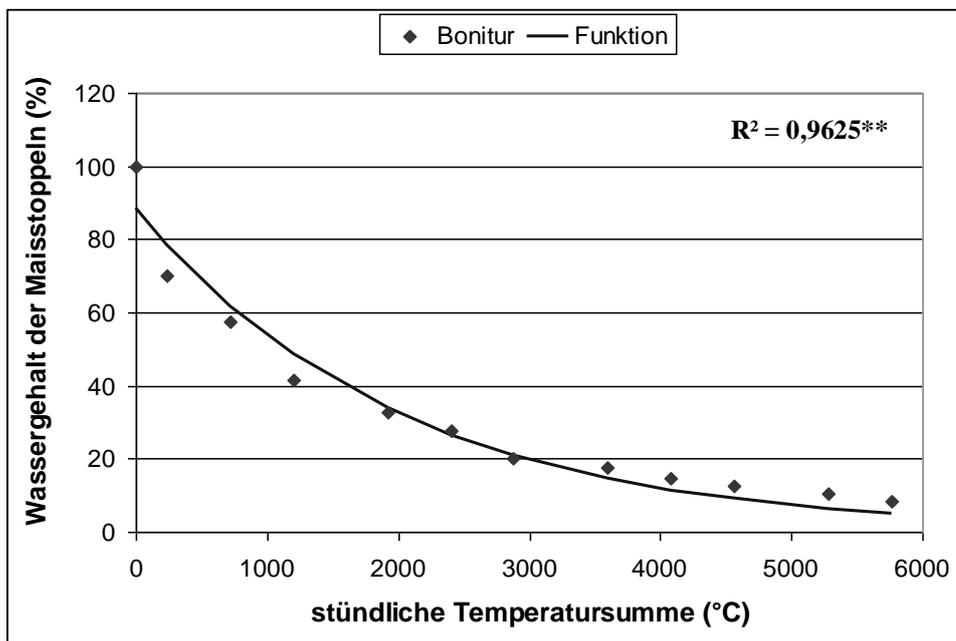


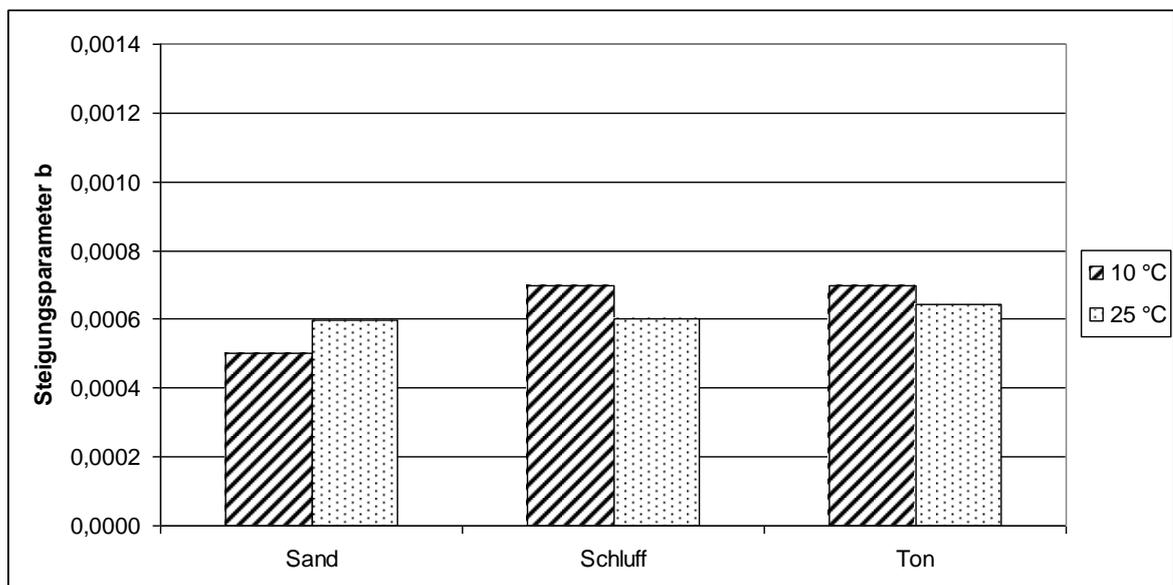
Abbildung 94: Streudiagramm der mittleren Boniturwerte der Wassergehalte der Maisstoppeln gegenüber den stündlichen Temperatursummen (Sandgruppe/10°C) und die daraus modellierte Abtrocknungsfunktion

Ein Vergleich der aus Gleichung [13] hervorgehenden Steigungsparameter b der modellierten abnehmenden exponentiellen Abtrocknungsfunktionen (Tabelle 30) zeigte auf, wie stark der Einfluss des korrelierten Parameters auf die Abnahme des Wassergehaltes der Maisstoppeln war. Da es sich bei der Modellierung um abnehmende Exponentialfunktionen handelte, wurde der Steigungsparameter b in der Gleichung negativ gesetzt (siehe Gleichung [13]). Daraus resultierte, je höher der Parameter b, desto schneller fällt die Funktion, d.h. desto stärker ist die Abtrocknung der Maisstoppeln.

Tabelle 30: Vergleich der Steigungsparameter b der modellierten abnehmenden exponentialen Abtrocknungsfunktion bezogen auf die stündliche Temperatur- bzw. Luftfeuchtesumme

Temperatur	rel. LF	Steigungsparameter b (bezogen auf Temperatursumme)			Steigungsparameter b (bezogen auf Luftfeuchtesumme)		
		Sand	Schluff	Ton	Sand	Schluff	Ton
5 °C	57 %	0,00208	0,00310	0,00314	0,00020	0,00030	0,00030
10 °C	96 %	0,00050	0,00070	0,00070	0,00015	0,00017	0,00016
18 °C	94 %	0,00073	0,00072	0,00078	0,00015	0,00013	0,00015
20 °C	79 %	0,00058	0,00068	0,00065	0,00014	0,00014	0,00015
20 °C	83 %	0,00064	0,00055	0,00064	0,00013	0,00013	0,00013
25 °C	94 %	0,00049	0,00048	0,00049	0,00005	0,00007	0,00007
25 °C	96 %	0,00060	0,00060	0,00064	0,00016	0,00016	0,00017

Ein Vergleich der Steigungsparameter der beiden Versuchsvarianten mit identischer relativer Luftfeuchte von 96 % und unterschiedlichen Temperaturstufen von 10 und 25 °C zeigte geringe Unterschiede (Abbildung 95). Die stündlichen Temperatursummen hatten somit bei identischer Luftfeuchte einen geringen Einfluss auf die modellierte Abtrocknung der Stoppeln. Zusätzlich wurde im Vergleich der Steigungsparameter ersichtlich, dass die Abtrocknung der Maisstoppeln auf der Bodenart aus der Sandgruppe bei der niedrigeren Temperaturstufe langsamer voranschreitet. Im Vergleich der Steigungsparameter bei 25 °C ergaben sich keine unterschiedlichen Werte und die Abtrocknung wurde für alle drei Bodenartenhauptgruppen gleich modelliert (Abbildung 95).

Abbildung 95: Vergleich der Steigungsparameter b der modellierten exponentialen Abtrocknungsfunktionen der Versuche bei 96 % relativer Luftfeuchte und 10 °C bzw. 25 °C

Ein Vergleich beider Funktionen machte die nahezu identische Abnahme des Wassergehaltes der Maisstoppeln bei identischer Luftfeuchte und unterschiedlichen Temperaturen, bezogen auf die stündliche Temperatursumme, ersichtlich (Abbildung 96). Damit bestand keine unterschiedliche Abtrocknung der Maisstoppeln bei gleicher Luftfeuchte und unterschiedlichen Temperaturstufen bezogen auf die stündliche Temperatursumme. Der Einfluss der Temperatur zeigte sich lediglich in

der Dauer der Abtrocknung. Während bei 25 °C die stündliche Temperatursumme von 2.000 °C bereits nach ca. 3,3 Tagen erreicht war, betrug der Zeitraum bei 10 °C 8,3 Tage.

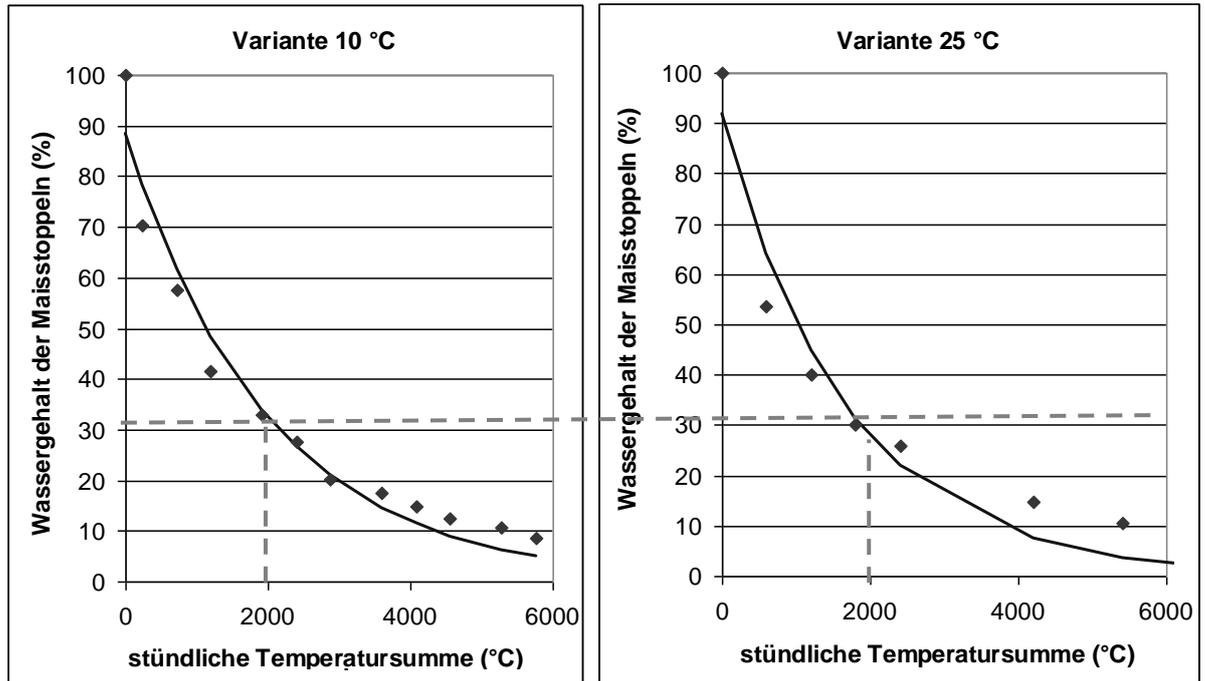


Abbildung 96: Vergleich der Abtrocknungsfunktionen am Beispiel des Bodens der Bodenartenhauptgruppe Sand bei 96 % relativer Luftfeuchte und 10 °C bzw. 25 °C – die Linie verdeutlicht den nahezu identischen Wassergehalt der Maisstoppeln bei erreichter Temperatursumme von 2.000 °C

Unter der oben dargestellten Voraussetzung des geringen Einflusses der Temperatur auf den Steigungsparameter b bei vergleichbaren relativen Luftfeuchtebedingungen, war ein Vergleich der unterschiedlichen Steigungsparameter, bezogen auf die stündliche Summe der Luftfeuchte, mit unterschiedlichen Temperaturvarianten möglich. Hierfür wurden Gruppierungen der Luftfeuchtevarianten gebildet, da die genaue Reproduzierung der Luftfeuchte schwierig war. Eine statistisch durchgeführte Anpassung der Verteilung, teilte die Varianten in drei Kategorien. Eine erste Kategorie, in der die Variante 57 % relative Luftfeuchte lag, eine zweite Kategorie, die die Varianten 79 und 83 % relativer Luftfeuchte beinhaltet und eine weitere mit den Varianten der relativen Luftfeuchten über 90 %. Zum Vergleich der Kategorien wurden die Mittelwerte der Steigungsparameter berechnet. Sie sind in Abbildung 97 grafisch dargestellt.

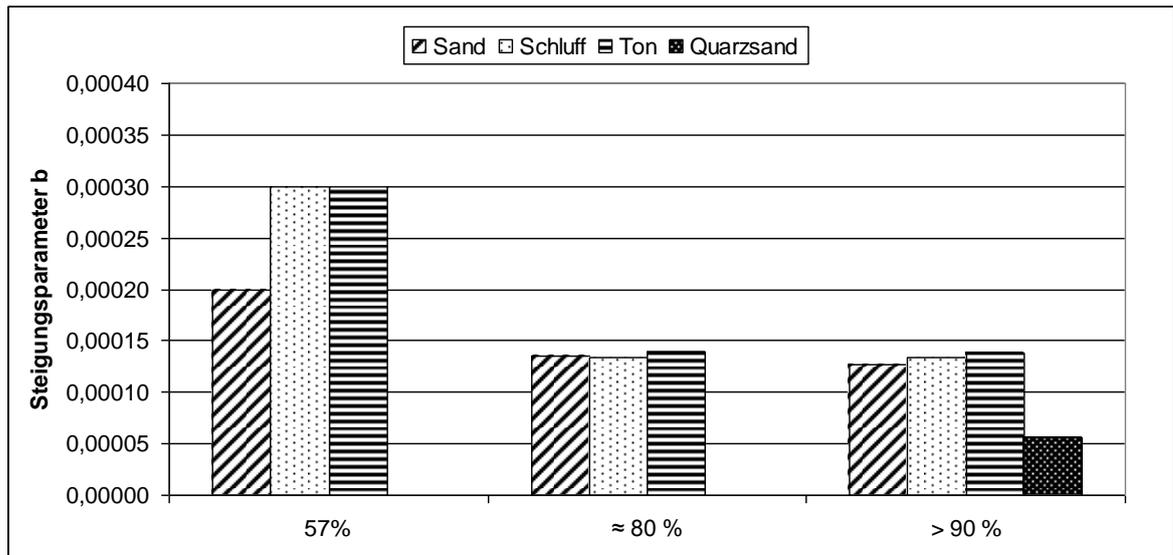


Abbildung 97: Vergleich der Mittelwerte der Steigungsparameter b der gruppierten Luftfeuchtevarianten der modellierten exponentiellen Abtrocknungsfunktionen nach Bodenartenhauptgruppen

Ein Vergleich der Steigungsparameter der verschiedenen Luftfeuchtegruppierungen ergab deutliche Unterschiede zwischen der Kategorie mit 57 % relativer Luftfeuchte und den höheren Luftfeuchtevarianten. Die Steigungsparameter der Bodenartenhauptgruppen Schluff und Ton lagen bei 57 % relativer Luftfeuchte doppelt so hoch wie bei den beiden anderen Kategorien. Ein Vergleich der Steigungsparameter der Gruppierungen 80 % relativer Luftfeuchte und über 90 % relativer Luftfeuchte zeigte sehr geringfügige Abweichungen. Zusätzlich wurde ersichtlich, dass der Steigungsparameter der Bodenartenhauptgruppe Sand bei der Kategorie mit geringer relativer Luftfeuchte deutlich niedriger lag, als derer der beiden anderen Bodenartenhauptgruppen. Bei hohen Luftfeuchten war dieser Trend nur noch schwach ausgeprägt. Dort zeigte sich diese Ausprägung bei der zusätzlich durchgeführten Variante mit Quarzsand. Im FRIEDMAN-Test ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der Abtrocknung der Maisstoppeln auf dem Boden aus der Bodenartenhauptgruppe Sand im Vergleich zu der Abtrocknung der Maisstoppeln auf dem Boden aus der Bodenartenhauptgruppe Ton ($\text{Alpha} = 0,1$).

5.1.4 Modellierung von täglichen Abtrocknungsraten

Aus den unter Kapitel IV Absatz 5.1.1, 5.1.2 und 5.1.3 erläuterten Versuchsergebnissen gelang die Modellierung einer täglichen Abtrocknungsrate der Maisstoppeln bezogen auf die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und Bodenartenhauptgruppe.

Die Ergebnisse aus Kapitel IV Absatz 5.1.2 ergaben, dass eine Perithezienbildung bis zu einem Wassergehalt der Maisstoppeln von 10 % beobachtet werden konnte. Mittels der Boniturergebnisse der Abtrocknung der Maisstoppeln auf den unterschiedlichen Bodenartenhauptgruppen (siehe Kapitel IV Absatz 5.1.1) konnte für die verschiedenen Luftfeuchte- und Temperaturvarianten berechnet werden, nach wie vielen Tagen der Wassergehalt der Maisstoppeln unter 10 % fällt und

keine Perithezienbildung mehr möglich war. Daraus ergaben sich die unter Tabelle 31 dargestellten täglichen Abtrocknungsraten. Die täglich aufsummierte Rate gibt demzufolge Auskunft über den zur Perithezienbildung zur Verfügung stehenden Zeitraum. Erreicht der Summenwert der täglichen Raten den Wert 1, ist die Rate abgelaufen und es kann keine Perithezienbildung mehr stattfinden.

Tabelle 31: Vergleich der tägliche Abtrocknungsraten der Maisstoppeln der unterschiedlichen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten bis zur Unterschreitung des zur Perithezienbildung benötigten Wassergehaltes der Maisstoppel von 10 %

Temperatur	rel. Luftfeuchte	tägliche Abtrocknungsraten		
		Sand	Schluff	Ton
5 °C	57 %	0,07692308	0,11111111	0,11111111
10 °C	96 %	0,04347826	0,05000000	0,06250000
18 °C	94 %	0,10000000	0,12500000	0,12500000
20 °C	79 %	0,11111111	0,14285714	0,14285714
20 °C	83 %	0,12500000	0,10000000	0,10000000
25 °C	94 %	0,11111111	0,12500000	0,12500000
25 °C	96 %	0,08333333	0,12500000	0,12500000

Eine über alle Versuchsvarianten hinweg durchgeführte lineare Regression mit den unter Tabelle 31 aufgelisteten Werten, ergab für die drei Bodenartenhauptgruppen die in Tabelle 32 aufgelisteten Modellparameter. Damit kann die tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln auf den unterschiedlichen Böden mit folgender Funktion berechnet werden:

$$[14] f = y_0 + a * x + b * y$$

wobei:

f = tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln

x = mittlere Tagestemperatur

y = mittlere tägliche rel. Luftfeuchte

y₀, a, b = Modellparameter

Tabelle 32: Parameter der linearen Regressionen zur Modellierung der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln auf verschiedenen Bodenarten

Bodenart	Parameter	p	R ²	
Sand	y ₀	0,1446	0,0362	0,7112
	a	0,0039	0,0352	
	b	-0,0014	0,0995	
Schluff	y ₀	0,186	0,0232	0,7016
	a	0,0042	0,0398	
	b	-0,0017	0,0776	
Ton	y ₀	0,1717	0,0228	0,6608
	a	0,0035	0,0513	
	b	-0,0014	0,105	

Mit den errechneten Funktionen kann über die täglichen Mittelwerte der relativen Luftfeuchte und der Temperatur berechnet werden, wann der Wassergehalt der Maisstoppeln unter 10 % fällt und keine Perithezienbildung mehr stattfinden kann. Dieser Zeitpunkt ist erreicht, wenn die täglich aufsummierte Rate einen Wert größer 1 erreicht. Aus Tabelle 33 ergibt sich, dass die Regressionen für die Bodenartenhauptgruppen Sand und Schluff Signifikanzen zum Niveau von $\alpha = 0,1$ aufweisen.

Tabelle 33: Parameter der Varianzanalyse der linearen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) nach Bodenarten

Bodenart		DF	Mittel der Quadratsumme	F	p
Sand	Regression	2	0,0016	4,9261	0,0834
	Residuen	4	0,0003		
	gesamt	6	0,0008		
Schluff	Regression	2	0,0019	4,7027	0,089
	Residuen	4	0,0004		
	gesamt	6	0,0009		
Ton	Regression	2	0,0013	3,8958	0,1151
	Residuen	4	0,0003		
	gesamt	6	0,0007		

Abbildung 98 verdeutlicht die Lage der drei Funktionen zueinander. Die tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln auf dem Boden aus der Bodenartenhauptgruppe Sand liegt bei allen Temperaturen und relativen Luftfeuchten geringer, als bei den Maisstoppeln auf den beiden anderen Bodenartenhauptgruppen. Hierbei sind die Unterschiede insbesondere bei den niedrigen Raten (bei hoher Luftfeuchte und geringen Temperaturen) hoch. Die tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln auf der Bodenartenhauptgruppe Sand beträgt dort nur die Hälfte derer auf der Bodenartenhauptgruppe Ton. Während die Fläche der Funktion der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln auf der Bodenartenhauptgruppe Sand keinen Schnittpunkt mit den Flächen der Funktionen der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln auf den beiden anderen Bodenartenhauptgruppen aufweist, lässt sich bei der Abtrocknung der Maisstoppeln auf den Böden der Bodenartenhauptgruppen Schluff und Ton kein Trend einer langsameren bzw. schnelleren Abtrocknung der Maisstoppeln aufzeigen. Bei hohen relativen Luftfeuchten und niedrigen Temperaturen liegen die täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln auf dem Boden der Tongruppe höher, bei hohen Temperaturen und niedrigen relativen Luftfeuchten kehrt sich dieser Trend um.

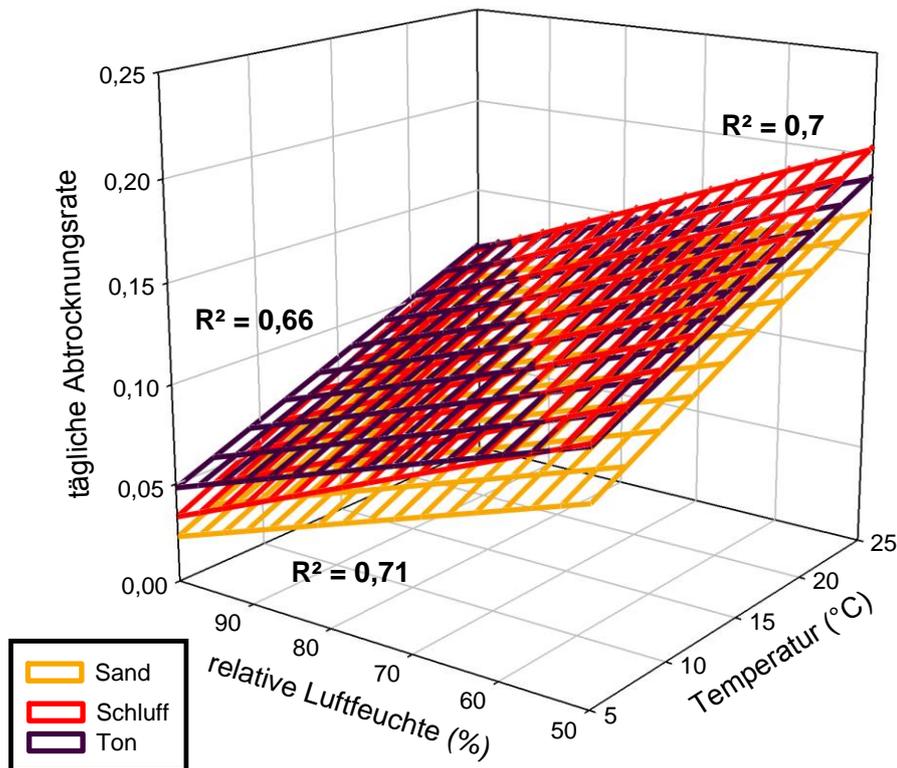


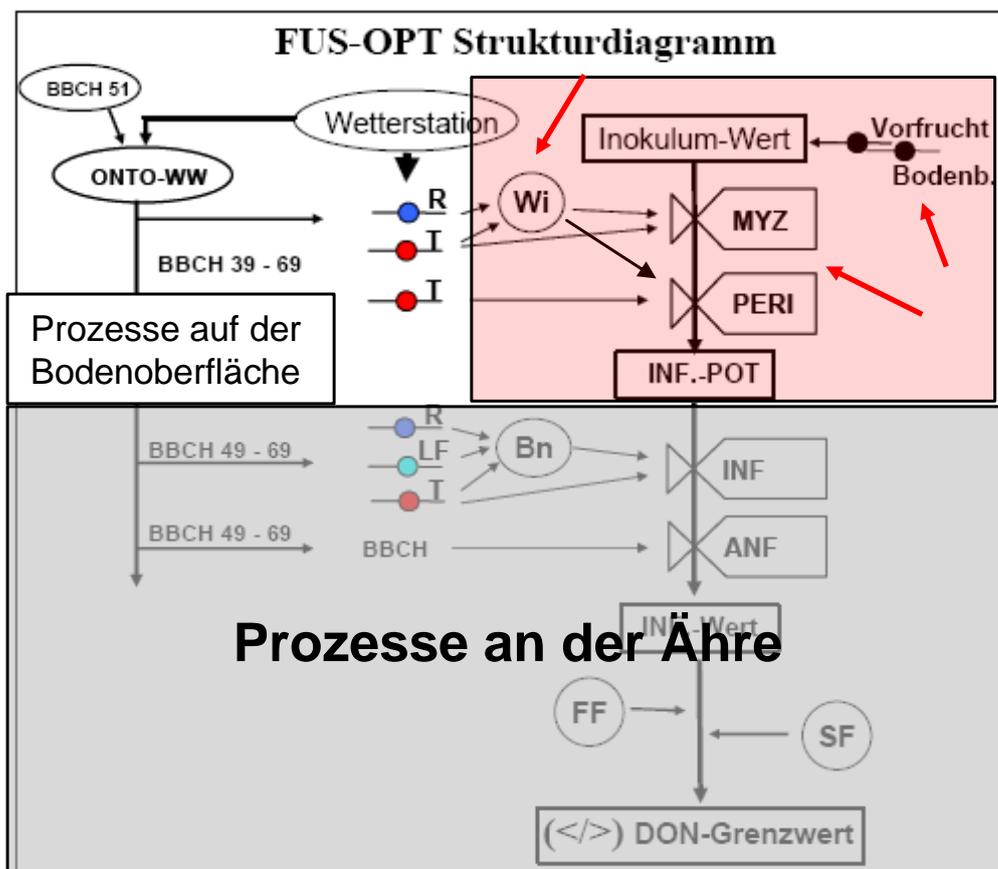
Abbildung 98: Funktionen der linearen Regressionen der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln bezogen auf die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte nach Bodenartenhauptgruppen

6. Integration eines Bodenmoduls in FUS-OPT

Die unter Kapitel IV Absatz 5 dargestellten Ergebnisse bildeten die Grundlage der durchgeführten Veränderungen in dem Prognosemodell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006). Die Änderungen betrafen den in Abbildung 99 rot markierten Bereich. Aufgrund der bonitierten Perithezienbildung auf den Maisstoppeln bis zu einem Grenzwert von 10 % Wassergehalt wurde der zur Verfügung stehende Zeitraum im bisherigen Modell deutlich erweitert. Dies geschah in der Definition eines neuen Schaltpunktes in Form einer Erweiterung des bisherigen Grenzwertes von 60 % Wassergehalt des Stoppelmaterials bis auf 10 % Wassergehalt. Die vorherige Berechnung des aktuellen Wassergehaltes auf Grundlage des Mollier-Diagramms (MOLLIER 1932) wurde durch die Berechnung des Wassergehaltes der Maisstoppeln mittels der modellierten Funktionen der täglichen Abtrocknungsraten ersetzt. Hierbei wurde zusätzlich als weiterer Startfaktor die Bodenartenhauptgruppe in das Modell integriert. Dies gewährleistet bei der Berechnung der Abtrocknung der Maisstoppeln die zutreffende Rate der jeweiligen Bodenartenhauptgruppe zu verwenden.

Der tägliche Wassergehalt des Stoppelmaterials wird in Folge aus dem täglichen Wert der mittleren Temperatur und der mittleren relativen Luftfeuchte berechnet. Da der Wassergehalt des Stoppelmaterials als Schaltpunkt in das Modell eingebaut ist, findet die Berechnung der

Perithezienbildungsrate bis zum Summenwert der Rate von 1 statt. Ist der Summenwert größer 1, liegt der Wassergehalt des Stoppelmaterials unter 10 % und es wird keine weitere Perithezienbildung berechnet. Die Versuchsergebnisse ergaben, dass von den Maisstoppeln, im Verhältnis zu ihrer Oberfläche, 4 mm Niederschlag aufgenommen werden kann. Da allerdings davon auszugehen ist, dass ein Teil des Niederschlags an der Maisstoppel abläuft und nicht direkt aufgenommen wird, wurde eine rein rechnerische Anpassung zur Aufnahme des Niederschlags von der Maisstoppel durchgeführt. Die statistische Auswertung der modellierten Infektionspotentiale gegenüber der bonitierten Sporenfänge ergab die besten Ergebnisse, wenn der Wassergehalt der Maisstoppeln infolge einer Tagesniederschlagssumme von mindestens 8 mm auf 100 % gesetzt wurde. Während in der bisherigen Modellversion von FUS-OPT der Wassergehalt der Maisstoppeln infolge jedes Niederschlagsereignisses auf 100 % gesetzt wurde, wurde dieser Wert in der veränderten Version deutlich angehoben.



Faktoren: FF = Fungizidfaktor , SF = Sortenfaktor - Prozesse: MYZ = Myzel-Bildungsrate, PERI = Perithezien-Bildungsrate, INF = Infektionsrate, ANF = Anfälligkeitsrate
 Zwischengrößen: Wi = Wassergehalt des Inokulums – Bn = Blattnässe
 Wetterparameter: R = Regenmenge, T = Temperatur, LF = rel. Luftfeuchte
 ONTO-WW = Ontogenesemodell für Winterweizen, BBCH = Entwicklungsstadium

Abbildung 99: Bisheriges Strukturdiagramm des Prognosemodells FUS-OPT – die Integration von Bodenparametern ergeben Veränderungen im rot markierten Bereich (verändert nach WEINERT et al. 2006)

Eine weitere Veränderung in der Modellstruktur bestand darin, dass die Myzelbildungsrate mit der Perithezienbildungsrate zusammengefasst wurde, da in den Versuchen die Myzelbildung und die Perithezienbildung gemeinsam beobachtet wurden. Die Berechnung der Perithezienbildungsrate setzt

zukünftig bereits ab 100 % Wassergehalt der Maisstoppeln ein und beginnt nicht wie in der bisherigen Modellversion bei 90 % Wassergehalt.

Der Teil des Modells FUS-OPT, welcher die Prozesse an der Bodenoberfläche abbildet, wurde nach erfolgter Integration, der aus den Versuchen entwickelten Ansätze, validiert. Von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, wurden der ZEPP zu diesem Zweck Boniturdaten von Ascosporenfängen des Pilzes zur Verfügung gestellt. Die Sporen wurden mit einer Burkard-Sporenfalle aus der Luft gefangen und tägliche Bonitурwerte zur Anzahl der geflogenen Sporen bonitiert. Aufgestellt waren die Sporenfallen in einem Weizenbestand, in welchem bei Versuchsanlage im Vorjahr mindestens eine Maisstoppel pro Quadratmeter ausgestreut wurde. Der zur Verfügung gestellte Datensatz umfasste zwei Standorte. Für den Standort Osterseeon standen die Jahre 2004 bis 2010 zur Validierung zur Verfügung und für den Standort Frankendorf die Jahre 2002 bis 2008. Die Fallen wurden jeweils in der zweiten Maihälfte an den Standorten aufgestellt.

Die aus der Luft gefangenen Sporen bilden das Infektionspotential für eine Ähreninfektion. Zur Validierung der neuen Ansätze im Prognosemodell FUS-OPT wurde das täglich berechnete Infektionspotential mit den aus der Luft gefangenen Sporen korreliert. Zur Gewährleistung der Vergleichbarkeit beider Werte wurden die täglich bonitierten Sporenfänge und das modellierte Infektionspotential über den gesamten Bonitурzeitraum aufsummiert und an dem jeweiligen Maximum relativiert. Mit den Wertepaaren konnte eine lineare Regression durchgeführt und das Bestimmtheitsmaß sowie statistische Signifikanzen berechnet werden (siehe Kapitel II Absatz 2.7). Zusätzlich wurde die Korrelation der beiden Werte im Test nach PEARSON auf Signifikanzen geprüft.

Die Ergebnisse der durchgeführten linearen Regressionen der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des modellierten Infektionspotentials sind hinsichtlich des Bestimmtheitsmaßes und der Signifikanzen der Modellparameter a und b gegenüber 0 bzw. 1 in Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 34: Validierungsergebnisse der durchgeführten linearen Regression der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des modellierten Infektionspotentials

Standort	Jahr	Bestimmtheitsmaß der linearen Regression (R ²)	Signifikanz Achsenabschnitt gegenüber 0	Signifikanz Steigung gegenüber 1
Frankendorf	2002	0,94**	n.s.	n.s.
Frankendorf	2003	0,93**	n.s.	n.s.
Frankendorf	2004	0,79**	n.s.	n.s.
Frankendorf	2005	0,97**	s.	n.s.
Frankendorf	2006	0,85**	n.s.	n.s.
Frankendorf	2007	0,89**	s.	n.s.
Frankendorf	2008	0,96**	s.	n.s.
Osterseeon	2004	0,92**	n.s.	n.s.
Osterseeon	2005	0,69**	n.s.	n.s.
Osterseeon	2006	0,90**	s.	n.s.
Osterseeon	2007	0,91**	n.s.	n.s.
Osterseeon	2008	0,76**	n.s.	n.s.
Osterseeon	2009	0,79**	n.s.	n.s.
Osterseeon	2010	0,91**	s.	n.s.
gesamt	2002 - 2010	0,71**	n.s.	n.s.

Das Bestimmtheitsmaß der linearen Regression aller Standorte und Jahre lag zwischen 0,69** und 0,97**, wobei der Mittelwert bei 0,87** festzulegen war. Die Korrelation zwischen den bonitierten Werten und dem Modellergebnis war im Korrelationstest nach PEARSON in allen Fällen hochsignifikant (Alpha = 0,01).

Von einem funktionalen linearen Zusammenhang der bonitierten und der modellierten Werte kann ausgegangen werden, wenn der modellierte Achsenabschnitt nicht signifikant verschieden von 0 ist und die modellierte Steigung keine Signifikanz gegenüber 1 aufweist (siehe Kapitel II Absatz 2.7). Dies war in 60 bzw. 100 % der Fälle gegeben. Damit war die Steigung in allen Fällen korrekt modelliert, lediglich der Achsenabschnitt war in einigen Jahren nicht korrekt getroffen. Die Signifikanz wurden mit einem Alpha von 0,05 geprüft. Eine gesamthaft durchgeführte lineare Regression mit den Daten aller Standorte ergab keinen signifikanten Unterschied des Achsenabschnittes gegenüber 0 sowie keine signifikanten Unterschiede der Steigung gegenüber 1. Das Bestimmtheitsmaß zeigte ein R² von 0,71**.

Nach Integration der Änderungen in die bisherige Modellstruktur von FUS-OPT und die durchgeführte Validierung der Ansätze ergaben sich weitere Änderungen hinsichtlich des Modelloutputs. Zukünftig soll mittels einer sogenannten Vorprognose bereits im Frühjahr eine Aussage über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential auf den Stoppeln getroffen werden können.

Zu diesem Zweck durchgeführte Berechnungen wurden ebenfalls mit den Daten der Sporenfänge verglichen. Der Berechnungsstart von FUS-OPT wurde auf den 1. Oktober der Vorsaison vorgezogen. Der Zeitpunkt wurde gewählt, da die Maisernte um diesen Termin abgeschlossen ist und die Maisstoppeln als Ernterückstände bereits auf der Bodenoberfläche liegen. Die Aufsummierung der

täglichen Perithezienbildungsrate erfolgte bis zum 30. September des Folgejahres. Damit entstand innerhalb eines Jahres ein mögliches Perithezienpotential von 365/366, da ein tägliches Potential im günstigsten Falle 1 betragen würde. Die täglich aufsummierten Perithezienbildungsraten konnten dann zum Vergleich an dem maximal möglichen Potential relativiert werden. Als Basistemperatur zur Perithezienbildung wurden 4 °C festgelegt (SUTTON 1982). Eine Aufsummierung der täglichen Abtrocknungsraten der Maisstoppeln fand nur bei Temperaturen im positiven Bereich statt. Anderenfalls wurde davon ausgegangen, dass der aktuelle Wassergehalt der Stoppeln in Form von Eis bestehen bleibt. Die Aufsummierung der täglichen Raten setzte sich bei Errechnung positiver Raten von diesem Wassergehalt aus fort.

Das Perithezienpotential, welches bis zum 30. April vom Modell berechnet wurde, konnte im Anschluss mit der Summe der gefangenen Sporen der Boniturdaten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, korreliert werden. Daraus ergaben sich die in Abbildung 100 dargestellte Korrelation und Exponentialfunktion. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,76** konnte eine Korrelation der beiden Parameter festgestellt werden. Im Korrelationstest nach PEARSON war die Korrelation signifikant (Alpha = 0,01).

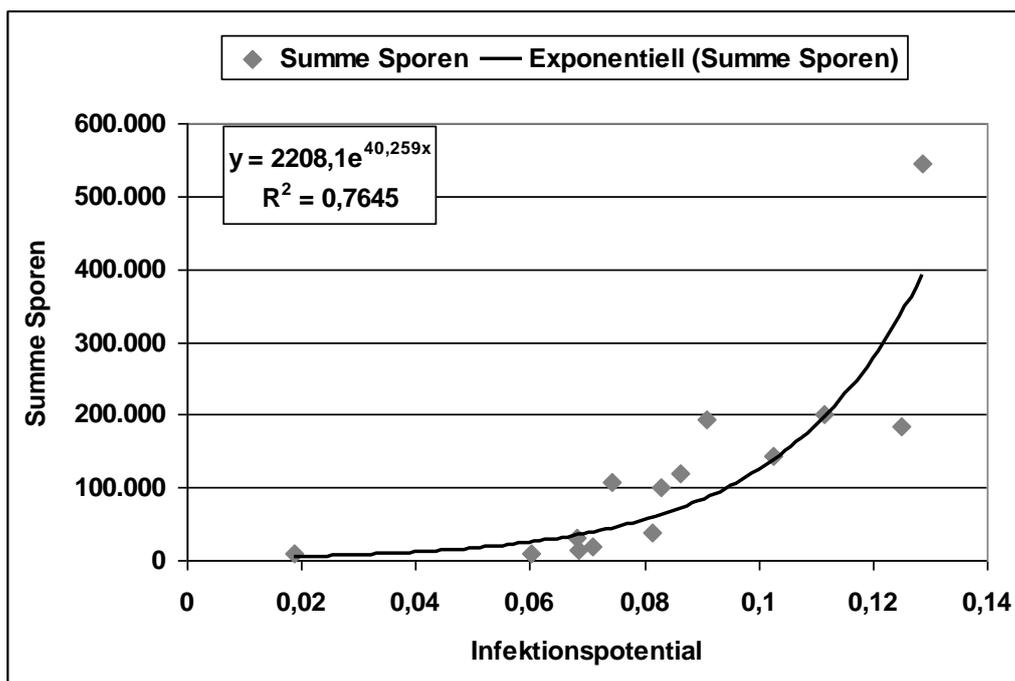


Abbildung 100: Korrelation des aufsummierten modellierten Infektionspotentials vom 01.10. bis zum 30.04. mit der Summe der gefangenen Sporen im gesamten Boniturzeitraum und die daraus berechnete Exponentialfunktion

Damit lässt sich mit den Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT eine Vorprognose bereits im Frühjahr über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential treffen. STEIN et al. (2009) ordnete den relevanten DON-Grenzwerten (Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission) benötigte Sporenkonzentrationen zu. Sie gehen von einer benötigten Sporenkonzentration von 125.000 Sporen zur Ausbildung von 500 µg des Mykotoxins Deoxynivalenol pro kg Korn aus, von 50.000 Sporen zur Ausbildung von 200 µg Deoxynivalenol und von 185.000 Sporen zur Ausbildung von

750 µg Deoxynivalenol. Aus der abgeleiteten Exponentialfunktion ergibt sich demzufolge ein hohes Risiko einer Überschreitung des DON-Grenzwertes von 500 µg Deoxynivalenol bei einem erreichten Infektionspotential zum 30. April von 0,0974, von 0,1076 zur Überschreitung des DON-Grenzwertes von 750 µg Deoxynivalenol bzw. von 0,0775 zur Überschreitung des DON-Grenzwertes von 200 µg Deoxynivalenol.

Validiert wurde die Einordnung der korrelierten Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30. April hinsichtlich der Überschreitung der kritischen Werte 0,0775, 0,0974 und 0,1076 im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechneten Einordnung (siehe Abbildung 101). Der Anteil korrekter Prognosen sowie die Über- und Unterschätzungen sind in Abbildung 102 für alle DON-Grenzwerte dargestellt. Der korrekte Anteil liegt bei allen drei Grenzwerten bei über 90 %.

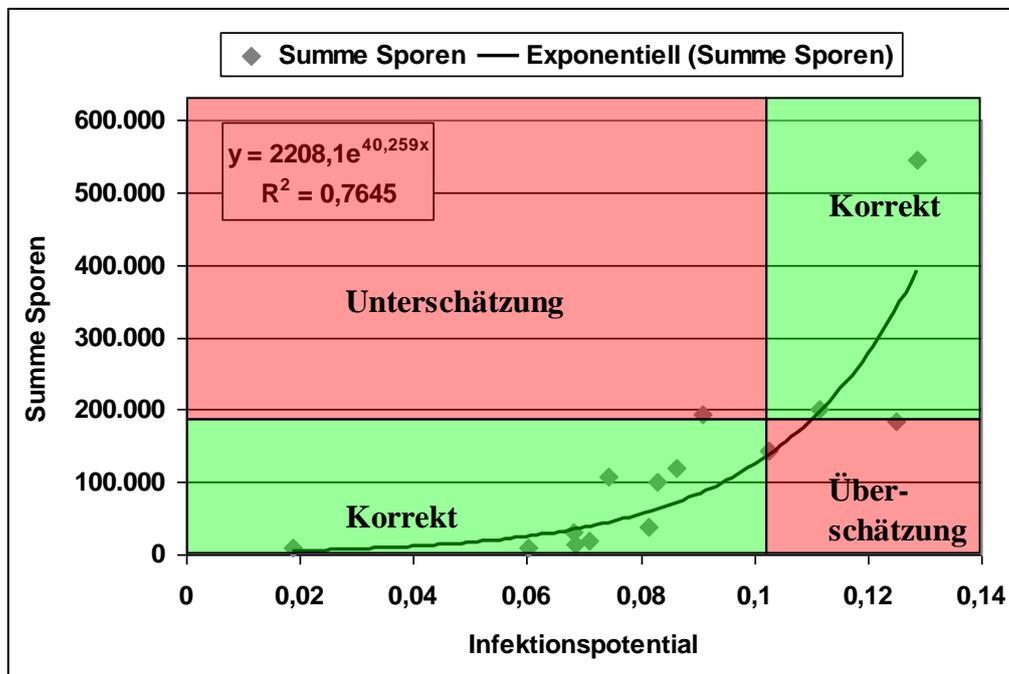


Abbildung 101: Validierungsschema der Einordnung der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30. April hinsichtlich der Überschreitung des kritischen Wertes von 0,1076 im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechneten Einordnung [n=14]

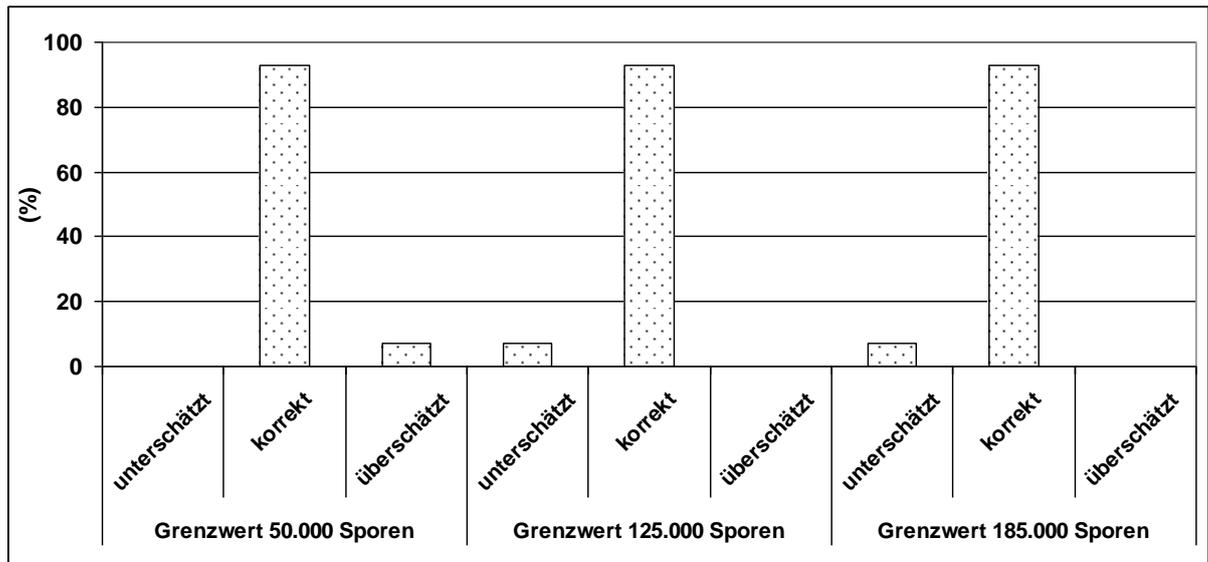


Abbildung 102: Validierungsergebnis der Einordnung der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30.04. hinsichtlich des Risikos zur Überschreitung der kritischen Sporenkonzentrationen im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechneten Einordnung [n=14]

Als neuer Modelloutput kann damit eine Vorprognose bereits im Frühjahr über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential getroffen werden. Das Ergebnis soll in Form einer Risikokarte für die drei berechneten Bodenartenhauptgruppen ausgegeben werden.

7. Diskussion

Im Rahmen dieser Arbeit wurde das Ziel verfolgt, durch die Integration von Bodenparametern in das bestehende Modell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006), die Vermehrung von Perithezien auf Maisstoppeln genauer charakterisieren zu können. Bei der Prognose von Ährenfusarium wird das Inokulum zurzeit indirekt über die Faktoren Vorfrucht und Bodenbearbeitung berücksichtigt, da die häufigsten Inokulumquellen für eine Fusarium-Epidemie befallene Ernterückstände darstellen. Zur Vermehrung der Perithezien auf Stoppelresten sind längere Feuchteperioden nötig (SUTTON 1982). AMELS (2006) führte Untersuchungen zur Perithezienbildung auf Haferkörnern auf einer Wasseragarunterlage und einer feuchten Sandunterlage durch. Sie konnte zeigen, dass eine größere Menge an Perithezien auf der Sandunterlage auch bei niedrigen relativen Luftfeuchten gebildet werden konnte, was sie auf eine höhere Wassernachlieferung des Sandes an die Haferkörner zurückführte. Daher war davon auszugehen, dass unterschiedliche Bodenarten ebenfalls einen unterschiedlichen Einfluss auf die Wassernachlieferung an die Ernterückstände und damit die Vermehrung der Perithezien haben. Durch die Integration des Parameters Boden sollte genauer prognostiziert werden, wie hoch die Vermehrungsrate der Perithezien in Bezug zu den Feuchteperioden angelegt werden konnte.

In Laborversuchen wurden Untersuchungen zum Abtrocknungsverhalten von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden durchgeführt, wobei die Einflussfaktoren Temperatur, Luftfeuchte und die

Bodenart zur Auswertung kamen. Hierfür wurde die Abtrocknung von 10 cm langen Maisstoppelstücken in Rundtöpfen bei unterschiedlichen Temperatur- und relativen Luftfeuchtestufen auf Böden aus verschiedenen Bodenartenhauptgruppen untersucht. Der Wassergehalt der Stoppeln wurde durch Abnahme der Stoppeln von der Bodenoberfläche und Wiegen der Stoppeln bestimmt. In einem ersten Versuch wurde ein Teil der Stoppeln erstmals nach einer Periode von 14 Tagen gewogen und der aktuelle Wassergehalt der Stoppeln mit dem Wassergehalt der Stoppeln, die durch den Wiegevorgang keinen permanenten Bodenkontakt hatten, verglichen. Der Vergleich der Wassergehalte zwischen den Stoppeln mit permanentem Bodenkontakt und denen der zweitägig gewogenen Stoppeln zeigte, dass das kurzzeitige Entfernen scheinbar keinen Einfluss auf das Abtrocknungsverhalten der Stoppeln hatte. Die Spannweite des relativen Wassergehaltes der Stoppeln beider Varianten unterschied sich geringfügig. Gleiches galt für den Mittelwertvergleich mit einer Differenz von 0,1 % Wassergehalt der Maisstoppeln, sodass von einem zu vernachlässigendem Einfluss auf die Abtrocknung der Maisstoppeln durch den Wiegevorgang auszugehen war.

In allen Temperatur- und Luftfeuchtevarianten der durchgeführten Versuche konnte festgestellt werden, dass die Varianz der Wassergehalte der Maisstoppeln während der Abtrocknungsphase zwischen den 20 Wiederholungen sehr hoch war. Obwohl die Stoppeln zu Versuchsbeginn einheitlich für 24 Stunden mit Wasser gesättigt wurden und jede Stoppel zu Versuchsstart einen Wassergehalt von 100 % aufwies, machte der Unterschied in der Abtrocknung in den ersten 10 Boniturtagen nach Versuchsbeginn bis zu 30 % Wassergehalt der Maisstoppel aus. Ein entscheidender Grund hierfür scheint die Heterogenität der Maisstoppeln zu sein. Zwar wurden die Maisstoppeln zur Vereinheitlichung um den untersten Knoten auf jeweils 10 cm gekürzt, trotzdem unterschieden sie sich hinsichtlich ihres Umfangs bzw. in ihrer fortgeschrittenen Zersetzung. Da durch diese beiden Parameter auch die Größe der Oberfläche der Maisstoppeln bedingt ist, könnte dies einen entscheidenden Einfluss auf die Abtrocknung der Stoppeln gehabt haben. Anzumerken ist allerdings, dass durch die willkürliche Zusammensetzung der auf dem Feld gesammelten Stoppeln die natürliche Situation abgebildet wurde. Eine vorsätzliche, weitere Festlegung von Auswahlkriterien der Stoppeln hätte eventuell zu einer einheitlicheren Abtrocknung geführt, allerdings hätte auch die natürliche Feldsituation fehlerhaft abgebildet werden können. Aus diesen Gründen wurde bevorzugt mit der heterogenen Zusammensetzung und im Verlauf der Ergebnisauswertung mit den Mittelwerten der 20 Wiederholungen gearbeitet.

Zur statistischen Auswertung des Einflusses der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Bodenart auf die unterschiedliche Abtrocknung der Maisstoppeln wurden Abtrocknungsfunktionen bezogen auf die stündlichen Temperatur- und Luftfeuchtesummen modelliert. Im Vergleich der Steigungsparameter der modellierten abnehmenden Exponentialfunktionen ergab sich, dass die Steigungsparameter der beiden Versuchsvarianten mit identischer relativer Luftfeuchte und unterschiedlichen Temperaturstufen geringe Unterschiede aufzeigten (Abbildung 95). Der Einfluss der Temperatur wirkte sich auf die Dauer der Abtrocknung aus. Während bei 25 °C die stündliche

Temperatursumme von 2.000 °C bereits nach ca. 3,3 Tagen erreicht war, betrug der Zeitraum bei 10 °C 8,3 Tage. Es scheint, dass die aus der Temperatur benötigte Energiemenge zur Verdunstung des Wassers aus den Maisstoppeln in Bezug auf das Erreichen einer bestimmten Temperatursumme gewonnen werden konnte. Die Verdampfungsenthalpie für Wasser liegt bei einer Temperatur von 0 bis 40 °C zwischen 45 und 43 kJ mol⁻¹ (LÜDECKE und LÜDECKE 2000). Damit ist die zur Verdunstung des Wassers benötigte Energie in den relevanten Temperaturbereichen sehr ähnlich. Somit scheint sich lediglich ein zeitlicher Einfluss bis zum Erreichen der benötigten Temperatursumme in Bezug auf die Abtrocknung der Maisstoppeln zu ergeben.

Der Vergleich der Steigungsparameter der verschiedenen Luftfeuchtevarianten ergab hingegen deutliche Unterschiede zwischen der Kategorie mit niedriger relativer Luftfeuchte und den höheren relativen Luftfeuchtevarianten. Die Steigungsparameter lagen im Vergleich teilweise doppelt so hoch (Abbildung 97). Anzunehmen ist, dass bei niedrigen relativen Luftfeuchten stärkere Austauschprozesse zwischen den Wassermolekülen an den Maisstoppeln und der Luft stattfanden und dadurch in kürzerer Zeit mehr Wassermoleküle von der Luft aufgenommen werden konnten. Ein ähnliches Verhalten kann bei anderen organischen Materialien wie beispielsweise bei der Belüftungstrocknung von Getreide beobachtet werden. Bei dem Verfahren der Belüftungstrocknung wird die Tatsache genutzt, dass der Feuchtegehalt des Getreides durch Zufuhr von Luft mit geringen relativen Luftfeuchten reduziert wird (KOMKA und HERDOVICS 2003). Eine entscheidende Rolle spielen die hygroskopischen Eigenschaften der organischen Substanzen, also die Fähigkeit der Materialien Wasser aus der Luftfeuchtigkeit aufzunehmen bzw. an die Luft abzugeben. Der Vorgang der Wasseraufnahme aus der Luft wird Adsorption genannt, der Vorgang der Wasserabgabe an die Luft wird Desorption genannt (KRICK 2008). In Abhängigkeit der Höhe der Luftfeuchte sind „Wassermoleküle aus der Umgebungsluft an die Porenwandungen hygroskopischer, kapillarporöser Stoffe angelagert“ (KRICK 2008). Mit steigenden Luftfeuchten werden die Moleküle in mehreren Schichten angelagert (KRICK 2008). Da die Maisstoppeln zu Versuchsstart zu 100 % mit Wasser gesättigt waren, muss die maximal mögliche Menge an angelagerten Wassermolekülen erreicht gewesen sein, sodass von einer zunehmend stärkeren Wasserabgabe an die Luft bei niedrigeren Luftfeuchten ausgegangen werden kann. KRICK (2008) führte seine Untersuchungen mit unterschiedlichen Strohsorten durch und stellte geringe Unterschiede fest. Daher kann von ähnlichen Prozessen beim Verhalten der Maisstoppeln ausgegangen werden.

Zusätzlich wurde ersichtlich, dass der Steigungsparameter der Bodenartenhauptgruppe Sand bei den Kategorien mit geringer relativer Luftfeuchte bzw. niedrigen Temperaturen deutlich niedriger lag als derer der beiden anderen Bodenartenhauptgruppen (Abbildung 97). Bei hohen Luftfeuchten und hohen Temperaturen war dieser Trend nur noch schwach ausgeprägt. Besonders stark zeigte sich diese Ausprägung bei der zusätzlich durchgeführten Variante mit Quarzsand. Damit verlief die Abnahme der Wassergehalte der Maisstoppeln auf Sandböden deutlich langsamer als auf den schwereren Böden. Im FRIEDMAN-Test ergaben sich signifikante Unterschiede zwischen der Abtrocknung der

Maisstoppeln auf dem Boden aus der Bodenartenhauptgruppe Sand und der Abtrocknung der Maisstoppeln auf dem Boden aus der Bodenartenhauptgruppe Ton ($\alpha = 0,1$). Zu erwähnen ist hierbei, dass es sich bei den Ergebnissen um das Resultat der Laborversuche handelt, es kann nicht ausgeschlossen werden, dass sich die Abtrocknung der Stoppeln im Freiland anders verhalten würde.

Den Maisstoppeln scheint es möglich, aus einem Boden mit hohem Sandanteil länger Wasser aufzunehmen als aus einem Boden mit geringem Sandanteil. Aus Tabelle 29 wird ersichtlich, dass die Abtrocknung der Maisstoppeln auf Petrischalen deutlich schneller voranschreitet als auf Quarzsand bzw. den anderen Bodenvarianten. Diese Tatsache lässt den Schluss zu, dass in den Klimaschrankversuchen eine Aufnahme von Bodenwasser durch die Maisstoppeln existierte. Ein Erklärungsansatz für die langsamere Abnahme des Wassergehaltes der Maisstoppeln auf Sandböden könnte die deutlich langsamere Zunahme der Wasserbindungskräfte im Sandboden bei einsetzender Abtrocknung darstellen (Abbildung 103). In den Topfversuchen zur Abtrocknung der Maisstoppeln war zu Versuchsstart eine maximale Wasserkapazität von 100 % erreicht. Dieser Zustand entsprach in etwa Feldkapazität in ungestörten Böden, also einer Wasserspannung von 1,8 pF. Ein Vergleich der Wasserspannungskurven von Sand- und Tonböden (Abbildung 103) zeigt, dass bei einsetzender Abtrocknung im Bereich 1,8 pF die Wasserspannung in einem Tonboden deutlich schneller zunimmt als im Vergleich zu einem Sandboden. Es wäre möglich, dass das Wasser in einem Sandboden den Maisstoppeln länger zur Verfügung steht, da die Wasserbindungskräfte länger überwunden werden können.

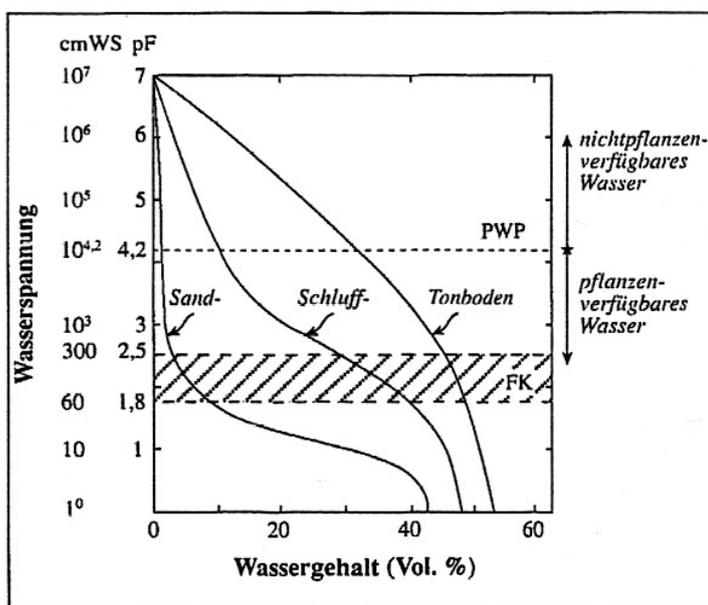


Abbildung 103: Beziehung zwischen Wassergehalt und Wasserspannung bei unterschiedlichen Bodenarten (SCHACHTSCHABEL et al. 1989)

Zusätzlich zu den Untersuchungen des Abtrocknungsverhaltens der Maisstoppeln wurde eine Bonitur der Maisstoppeln auf Perithezienbildung durchgeführt. Auffällig war, dass die Perithezienbildung nicht ausschließlich, wie vom Modell bisher abgebildet, im Bereich von 90 bis 60 % Wassergehalt der Maisstoppeln stattfand (WEINERT et al. 2006), sondern dass die Zunahme des Anteils der befallenen

Maisstoppeln bis zu einem Wassergehalt der Maisstoppeln von ca. 10 % voranschritt. AMELS (2006) beobachtete eine Perithezienbildung auf Maisstroh bis zu einer relativen Luftfeuchte von 58 % bei 22 °C. Aus den von KRICK (2008) ermittelten Sorptionsisothermen für unterschiedliche Stroharten errechnet sich ein Feuchtegehalt von ca. 10 %, ab welchem ein Pilzbefall ausgeschlossen werden kann. Geht man davon aus, dass die ermittelten Sorptionsisothermen auf Maisstroh übertragbar sind, deckt sich diese Angabe mit dem in den Versuchen ermittelten Grenzwert.

Der Zeitraum, in welchem Perithezien gebildet wurden, war somit deutlich länger als bisher angenommen. Eine Besonderheit zeigte sich wiederum bei der Perithezienbildung auf den Maisstoppeln auf der Bodenarthauptgruppe der Sande. Es zeichnete sich die Tendenz ab, dass die Anzahl der mit Perithezien befallenen Maisstoppeln auf Sandboden länger zunimmt als auf den Böden der Schluff- und Tongruppe (Abbildung 92 und Abbildung 93). Dieses Ergebnis bestätigte die Annahme einer langsameren Abtrocknung der Maisstoppeln auf Sandböden. Es scheint, dass durch die langsamere Abtrocknung der Maisstoppeln ein längerer Zeitraum zur Perithezienbildung zur Verfügung stand.

Aus den Versuchsergebnissen konnten über lineare Regressionen tägliche Abtrocknungsraten der Maisstoppeln bezogen auf die Parameter Temperatur, relative Luftfeuchte und Bodenartenhauptgruppe modelliert werden. Die täglich aufsummierte Rate soll zukünftig Auskunft über den zur Perithezienbildung zur Verfügung stehenden Zeitraum geben. Erreicht der Summenwert der täglichen Raten den Wert 1, ist die Rate abgelaufen und es kann keine Perithezienbildung mehr stattfinden. Lineare Modellfunktionen weisen den Nachteil auf, dass sie keine Grenzwerte besitzen und daher auch negative bzw. sehr hohe tägliche Abtrocknungsraten berechnet werden könnten. Bei der Integration der Abtrocknungsraten in FUS-OPT wurde daher ein unterer Grenzwert bei 0 °C festgelegt, unter der Annahme, dass das in den Stoppeln enthaltene Wasser bei Temperaturen unter 0 °C gefriert und keine weitere Abtrocknung stattfindet. Der obere Grenzwert ergibt sich aus der begrenzten Höhe der Tagesmitteltemperaturen in Deutschland. Damit wird die lineare Abtrocknungsfunktion der Maisstoppeln nur in einem eingegrenzten Temperaturbereich berechnet und kann keine unnatürlichen Werte annehmen.

Die abgeleiteten linearen Regressionen waren für die Böden Sand und Schluff signifikant ($\text{Alpha} = 0,1$) (Tabelle 33). Die lineare Regression der Abtrocknungsraten auf Tonböden war nicht signifikant. Rein statistisch betrachtet kann damit die abhängige Variable (tägliche Abtrocknungsrate der Maisstoppeln) nicht durch die unabhängigen Variablen (Tagesmitteltemperatur und mittlere tägliche relative Luftfeuchte) erklärt werden. Das Fehlen der Signifikanz könnte durch den geringen Stichprobenumfang bedingt sein ($n=7$). Eine Erhöhung des Stichprobenumfangs war aus Kapazitätsgründen nicht durchzuführen. Die Hauptursache lag in der angesprochenen Varianz der Wassergehalte der Maisstoppeln während der Abtrocknung. Daher konnten zur Modellierung lediglich die Mittelwerte der 20 Wiederholungen eines Versuchsdurchlaufs verwendet werden.

Mit einem p-Wert von 0,1151 ist das Signifikanzniveau von 10 % knapp überschritten. Daher wurden die Funktionen der täglichen Abtrocknungsraten zur Validierung in das Prognosemodell FUS-OPT integriert. Von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, wurden der ZEPP zur Validierung Boniturdaten von Ascosporenfängen des Pilzes zur Verfügung gestellt. Zur Validierung der neuen Ansätze im Prognosemodell FUS-OPT wurde das täglich berechnete Infektionspotential (siehe Kapitel IV Absatz 4.1) mit den aus der Luft gefangenen Sporen korreliert. Das Bestimmtheitsmaß der mit den Wertepaaren durchgeführten linearen Regressionen aller Standorte und Jahre lag zwischen 0,69** und 0,97**. Die Korrelation zwischen den bonitierten Werten und dem Modellergebnis war im Korrelationstest nach PEARSON in allen Fällen hochsignifikant ($\alpha = 0,01$). Damit ergaben sich, trotz der fehlenden Signifikanz bzw. des hohen Signifikanzniveaus von 10 % der linearen Modellfunktionen der täglichen Abtrocknungsraten, nach Integration in das Prognosemodell FUS-OPT signifikante Korrelationen mit einem mittleren Bestimmtheitsmaß von 0,87**. Das tägliche Infektionspotential wird damit scheinbar gut vom Modell abgebildet. Dies zeigt sich auch im Vergleich des Validierungsergebnisses zu Literaturdaten. ANDRIES et al. (2000) untersuchten die Korrelation zwischen Niederschlag bzw. Temperatur auf die Perithezienbildung. Sie entwickelten eine temperaturbasierte Berechnung der Perithezienbildung und erreichten ein Bestimmtheitsmaß von 0,73**. Damit sind die Validierungsergebnisse des Prognosemodells FUS-OPT vergleichbar mit anderen Modellansätzen. Das mittlere Bestimmtheitsmaß der linearen Regression des täglich berechneten Infektionspotentials durch FUS-OPT mit den aus der Luft gefangenen Sporen lag im Vergleich höher. Die fehlende Signifikanz bzw. das hohe Signifikanzniveau der entwickelten Abtrocknungsraten könnte daher in der Größe des Stichprobenumfangs bedingt sein.

Die Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT scheinen eine gute Prognose des täglichen Infektionspotentials zu ermöglichen. Damit könnte es möglich werden, eine Vorprognose bereits im Frühjahr über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential zu treffen. Das aufsummierte tägliche Infektionspotential, welches vom 1. Oktober bis zum 30. April des Folgejahrs vom Modell berechnet wurde, konnte mit der Summe der gefangenen Sporen der Boniturdaten der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, korreliert und eine Exponentialfunktion abgeleitet werden. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,76** konnte eine Korrelation der beiden Parameter festgestellt werden. Im Korrelationstest nach PEARSON war die Korrelation hochsignifikant ($\alpha = 0,1$). Mit den Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT kann bereits im Frühjahr eine Aussage über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential getroffen werden. STEIN et al. (2009) ordnen den relevanten DON-Grenzwerten benötigte Sporenkonzentrationen zu. Sie gehen von einer benötigten Sporenkonzentration von 50.000 Sporen zur Ausbildung von 200 μg des Mykotoxins Deoxynivalenol pro kg Korn aus. Aus der abgeleiteten Exponentialfunktion ergibt sich demzufolge ein hohes Risiko einer Überschreitung des DON-Grenzwertes von 200 μg Deoxynivalenol bei einem erreichten Infektionspotential zum 30. April von

0,0775 bzw. von 0,0974 zur Überschreitung des DON-Grenzwertes von 500 µg Deoxynivalenol und von 0,1076 zur Überschreitung des DON-Grenzwertes von 750 µg Deoxynivalenol. Die Einordnung der korrelierten Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30. April hinsichtlich der Überschreitung der kritischen Werte 0,0775, 0,0974 und 0,1076 im Vergleich zu der durch die abgeleitete Exponentialfunktion berechnete Einordnung ergab einen Anteil korrekter Einschätzungen bei allen drei Grenzwerten von über 90 %. Vergleichbare Ergebnisse zeigt das Prognosemodell DONcast (HOOKER und SCHAAFSMA 2003). Das Modell gibt ebenfalls eine Überschreitung von speziellen DON-Grenzwerten aus und wurde in den Jahren 2001 und 2002 in Kanada validiert, wobei sich der Anteil korrekter Prognosen auf bis zu 86 % belief (HOOKER und SCHAAFSMA 2003).

Über die abgeleitete Exponentialfunktion könnte es damit zukünftig möglich sein, anhand des berechneten Infektionspotentials die Summe der in der Saison zu erwarteten Sporen zu prognostizieren und damit die Gefahr des Risikos zur Überschreitung relevanter DON-Grenzwerte auszugeben. Kritisch anzumerken bleibt, dass die durchgeführte Validierung auf zwei Standorten in Bayern basiert und sie daher kein repräsentatives Ergebnis für Deutschland darstellen kann. Bonituren zu Flugverläufen von Ascosporenfängen lagen allerdings für keine weiteren Standorte vor und waren im Rahmen dieser Arbeit nicht durchführbar.

Ein entscheidender Vorteil der Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT wäre ein neuer Modelloutput, der eine Risikokarte des Infektionspotentials ausgibt. Das Risiko von Ähreninfektionen könnte somit besser eingeschätzt werden. Zusätzlich könnte eine Vorprognose bereits im Frühjahr über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential getroffen werden. Das Ergebnis könnte ebenfalls in Form einer Risikokarte zum Risiko einer Überschreitung relevanter DON-Grenzwerte für die drei berechneten Bodenartenhauptgruppen ausgegeben werden.

8. Zusammenfassung

Die Infektion der Getreideähren durch *Fusarium graminearum* Schwabe bzw. *Fusarium culmorum* (W.G. Smith) Saccardo führt neben Ertragsausfällen zu einer erheblichen Verminderung der Erntegutqualität. Dabei kommt vor allem der Produktion und Anreicherung von Mykotoxinen im Korn die größte Bedeutung zu, da diese mit einer gesundheitlichen Gefährdung für Mensch und Tier einhergeht (PETTERSON 1995). Das am häufigsten und in den mit Abstand höchsten Konzentrationen festgestellte Mykotoxin Deoxynivalenol (DON) wird nur von den beiden *Fusarium*-Arten *F. culmorum* und *F. graminearum* produziert. Im Zuge der gesundheitlichen Gefährdung bestehen zulässige Höchstmengenverordnungen (Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 der Kommission) der Mykotoxinbelastung (DON-Grenzwerte) in Mahlgetreide sowie im Getreideanteil von Brot sowie Säuglings- und Kleinkindernahrung.

Die Vorfrucht, die Form der Bodenbearbeitung, die Art und Menge der organischen Vorfruchtreste auf der Bodenoberfläche, die die Quelle einer möglichen Sporenbildung darstellen, bestimmen das Ausgangsinokulum auf der Fläche (SUTTON 1982). Auf infizierten Vorfruchtresten kann es bei geeigneter Witterung zur Ausbildung von Myzel und Perithezien des Pilzes kommen. Voraussetzung hierfür ist eine Befeuchtung des Materials durch Regenereignisse. Die Menge der Perithezien, welche durch Temperatur und Feuchte beeinflusst, ausgebildet wurden, stellen das Infektionspotential dar, wobei relative Luftfeuchten von 100 % und Temperaturen von 18 bis 22 °C das Optimum bilden (AMELS 2006). Für eine Infektion der Ähre ist das Vorhandensein von ausreichend freiem Wasser auf der Pflanzenoberfläche Voraussetzung, welches zum Quellen und Auskeimen der von den Perithezien ausgeschleuderten Ascosporen benötigt wird. Liegt eine Periode mit ausreichend freiem Wasser vor, wird die Intensität der Ähren-Infektion durch die vorherrschende Temperatur und das Entwicklungsstadium der Pflanzen (BBCH-Stadium) bestimmt, da die Anfälligkeit entscheidend vom Entwicklungsstadium abhängig ist (WEINERT et al. 2006).

In dem Modell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006) erfolgt die Prognose des Befallsrisikos von Ährenfusarium, wobei das Inokulum indirekt über die Faktoren Vorfrucht und Bodenbearbeitung berücksichtigt wird. Zur Integration des Parameters Boden in das bestehende Modell FUS-OPT wurde das Abtrochnungsverhalten von Vorfruchtresten untersucht. In Laborversuchen wurden Untersuchungen zum Abtrochnungsverhalten von Maisstoppeln auf unterschiedlichen Böden durchgeführt, wobei die Einflussfaktoren Temperatur, Luftfeuchte und die Bodenart zur Auswertung kamen. Hierfür wurde die Abtrochnung von 10 cm langen Maisstoppelstücken in Rundtöpfen bei unterschiedlichen Temperatur- und relativen Luftfeuchtestufen auf Böden aus verschiedenen Bodenartenhauptgruppen untersucht. Zusätzlich zu den Untersuchungen des Abtrochnungsverhaltens der Maisstoppeln wurde eine Bonitur der Maisstoppeln auf Perithezienbildung durchgeführt. Die Ergebnisse bildeten die Basis zur Modellierung von Abtrochnungsfunktionen der Maisstoppeln in Abhängigkeit der Temperatur, der relativen Luftfeuchte und der Bodenart.

Die Abnahme der Wassergehalte der Maisstoppeln auf Sandböden verlief deutlich langsamer als auf den schwereren Böden. Den Maisstoppeln schien es möglich, aus einem Boden mit hohem Sandanteil länger Wasser aufzunehmen, als aus einem Boden mit geringem Sandanteil. Zusätzlich zeigte sich, dass die Perithezienbildung auf den Maisstoppeln auf der Bodenarthauptgruppe der Sande tendenziell länger zunimmt als auf den Böden der Schluff- und Tongruppe. Perithezien konnten bis zu einem Wassergehalt der Maisstoppeln von 10 % gebildet werden. Der Wassergehalt der Maisstoppeln lag auf dem Sandboden über einen längeren Zeitraum über 10 %. Durch die langsamere Abtrochnung der Maisstoppeln stand ein längerer Zeitraum zur Perithezienbildung zur Verfügung.

Die aus den Versuchsergebnissen errechneten Funktionen der täglichen Abtrochnungsraten wurden zur Validierung in das Prognosemodell FUS-OPT integriert. Von der Bayerischen Landesanstalt für Landwirtschaft, Institut für Pflanzenschutz, wurden der ZEPP zu diesem Zweck Boniturdaten von

Ascosporenfängen des Pilzes zur Verfügung gestellt. Zur Validierung der neuen Ansätze im Prognosemodell FUS-OPT wurde das täglich berechnete Infektionspotential (siehe Kapitel IV Absatz 4.1) mit den aus der Luft gefangenen Sporen korreliert. Das Bestimmtheitsmaß der mit den Wertepaaren durchgeführten linearen Regressionen aller Standorte und Jahre lag zwischen 0,69** und 0,97**. Die Korrelation zwischen den bonitierten Werten und dem Modellergebnis war im Korrelationstest nach PEARSON in allen Fällen hochsignifikant ($\alpha = 0,01$).

Die Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT scheinen eine gute Prognose des täglichen Infektionspotentials zu ermöglichen. Damit kann das Infektionspotential als tägliche Risikokarte als zusätzlicher Modelloutput, zur Abschätzung einer möglichen Ähreninfektion, ausgegeben werden. Zudem könnte es möglich werden, eine Vorprognose bereits im Frühjahr über das in der Herbst-/Wintersaison aufgebaute Infektionspotential zu treffen. Eine Validierung der Einordnung der Wertepaare der bonitierten Sporenfänge und des errechneten Infektionspotentials zum 30. April hinsichtlich des Risikos zur Überschreitung kritischer DON-Grenzwerte im Vergleich zu der durch die Modellfunktion berechnete Einordnung ergab eine Trefferquote von über 90 % korrekter Vorhersagen. Den relevanten DON-Grenzwerten wurden hierzu benötigte Sporenkonzentrationen aus Literaturangaben (STEIN et al. 2009) zugeordnet.

Ein entscheidender Vorteil der Anpassungen im Prognosemodell FUS-OPT Zeitraum besteht in der genauer abgebildeten Berechnung der Myzel- und Perithezienbildung. Damit konnte die Prognose des Infektionspotentials verfeinert werden. Die Ausgabe von Risikokarten als neuer Modelloutput, gibt weitere Chancen der Erkennung von Gebieten mit einem hohen Risiko zur Überschreitung relevanter DON-Grenzwerte.

V. Einfluss der Bodenfeuchte auf das Verhalten von Drahtwürmern

1. Problemstellung und Ziele

Drahtwürmer sind in den letzten Jahren zu einem großen Problem im Acker- und Gartenbau geworden. Die polyphagen Larven benötigen während ihrer Entwicklung im Boden lebendes Pflanzenmaterial (FURLAN 1998). Daher können Schäden an vielen der angebauten Kulturen auftreten. Während sich die Schäden an Mais und im Getreide vor allem in Form eines verminderten Auflaufs durch zerfressenes Saatgut auswirken, verursachen die Drahtwürmer durch Fraßschäden im Kartoffel- und Gemüseanbau einen Qualitätsverlust der Ernte. Da der Drahtwurmfraß im Spätsommer kontinuierlich zunimmt, erklärt sich, weshalb Kartoffeln als eine der letzten Feldfrüchte besonders stark betroffen sind (SCHEPL und PAFFRATH 2005a; 2005b; SCHEPL 2008). Verschärft wird das Problem durch gestiegene Qualitätsanforderungen an die Kartoffelproduktion seitens der Vermarkter (PARKER und HOWARD 2001). In den letzten Jahren mussten dadurch vermehrt Deklassierungen von Speisekartoffeln wegen Fraßschäden durch Drahtwürmer hingenommen werden (JOSSI und BILGER 1997).

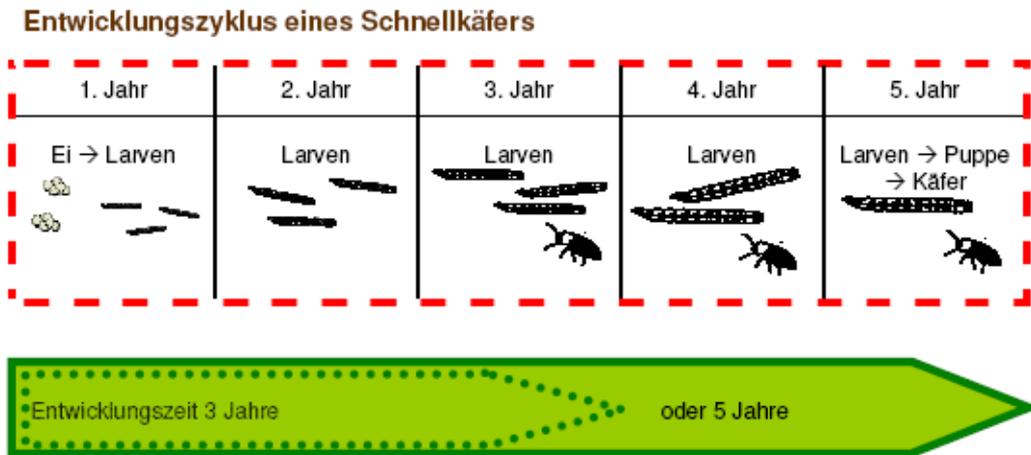
Drahtwürmer haben jährlich mehrere fraßaktive Phasen, die von Temperatur und Bodenfeuchte abhängig sind (FURLAN 1998). Während sie in den Winter- und Sommermonaten aufgrund der Temperatur in tiefere Bodenschichten abwandern, sind sie im Frühjahr und Herbst auf eine höhere Bodenfeuchte angewiesen. Je nach Bodenwassergehalt bewegen sie sich bei Austrocknung in tiefere, feuchtere Schichten und bei Durchfeuchtung des Bodens in Folge von Niederschlägen wieder in höhere Schichten, dies ist entscheidend für den möglichen Schaden an der Kultur (FURLAN 1998). Nur wenn sich die Larven in den oberen Bodenschichten aufhalten, kann es zu Schäden an der Kultur kommen. Die genauen Grenzbereiche der Feuchteverhältnisse waren bisher unklar. Häufig war lediglich bekannt, ab welchen Temperaturen die Aktivität im Boden einsetzt (PARKER und HOWARD 2001).

Da sich die Bodenfeuchte im Falle der Fraßschäden durch Drahtwürmer auf das vertikale Migrationsverhalten der Larven und somit ihre Nähe bzw. Entfernung zur Kultur auswirkt, wurde in dieser Arbeit zunächst eine Untersuchung und nachfolgend eine Modellierung der vertikalen Wanderung in Bezug zur Bodenfeuchte angestrebt. FURLAN (2005) wies auf bedeutsame Lücken im Wissen über Drahtwürmer hin. Als geradezu dramatisch bezeichnete er die Lücken im biologischen Grundlagenwissen. Die Reaktionen der Drahtwürmer auf Veränderungen ihres Feuchteumfelds wurden daher in Labor- und Halfreilandversuchen genauer untersucht, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf den durch die Larven verursachten Schaden deuten und prognostizieren zu können.

2. Biologie des Erregers unter besonderer Berücksichtigung des Parameters Boden

Der Lebenszyklus der häufigsten in Deutschland verbreiteten Schnellkäferarten (Coleoptera: Elateridae) der Gattung *Agriotes* (*A. lineatus* Linnaeus, *A. obscurus* Linnaeus, *A. sputator* Linnaeus, *A. sordidus* Illiger, und *A. ustulatus* Schaller) dauert vom Ei über verschiedene Larvenstadien bis zum vollentwickelten Käfer drei bis fünf Jahre. Nach der erfolgten Winterruhe im Boden erscheinen die ersten männlichen Käfer je nach Witterungsbedingungen Anfang bis Mitte April. Die weiblichen Käfer folgen ca. 10 bis 14 Tage später. Unmittelbar nach erfolgreicher Paarung erfolgt die Eiablage. Diese werden dicht unter der Bodenoberfläche oder in kleinen Bodenspalten abgelegt. Pro Weibchen werden je nach Art bis zu 160 Eier abgelegt. Gute Voraussetzung für die Eiablage stellen dichte, feuchte und ungestörte Bestände dar, daher werden meist Wiesen, Weiden, stillgelegte Flächen oder dicht bewachsene Ackerflächen bevorzugt (GOUGH und EVANS 1942; SCHEPL und PAFFRATH 2010). Die Larven, die sogenannten Drahtwürmer, schlüpfen vier bis sechs Wochen nach der Eiablage in Abhängigkeit der Temperatur (FURLAN 1996) und sind zu diesem Zeitpunkt ca. 1,5 mm lang. Sie durchlaufen während ihrer Entwicklung im Boden 8 bis 14 Larvenstadien und wachsen auf eine Länge von 3 cm an. Im Gegensatz zu Schnellkäfern, die keine Kulturschäden verursachen, fressen Drahtwürmer an den acker- und gartenbaulichen Kulturen (SCHEPL und PAFFRATH 2010). Das bei der Keimung von Saatgut bzw. während des Pflanzenwachstums entstehende Kohlenstoffdioxid besitzt eine lockende Wirkung auf die Larven (PARKER 1994).

Die Larven verpuppen sich nach drei bis fünf Jahren zwischen Ende Juni und Anfang August. Die Käfer schlüpfen ca. drei bis vier Wochen später und überwintern im Boden in einer Tiefe von 20 bis 30 cm, sodass im darauffolgenden Frühjahr die Paarung und Eiablage erfolgen kann (SCHEPL und PAFFRATH 2010). Der komplette Entwicklungszyklus ist in Abbildung 104 dargestellt.



Biologische Kenndaten im Jahresverlauf

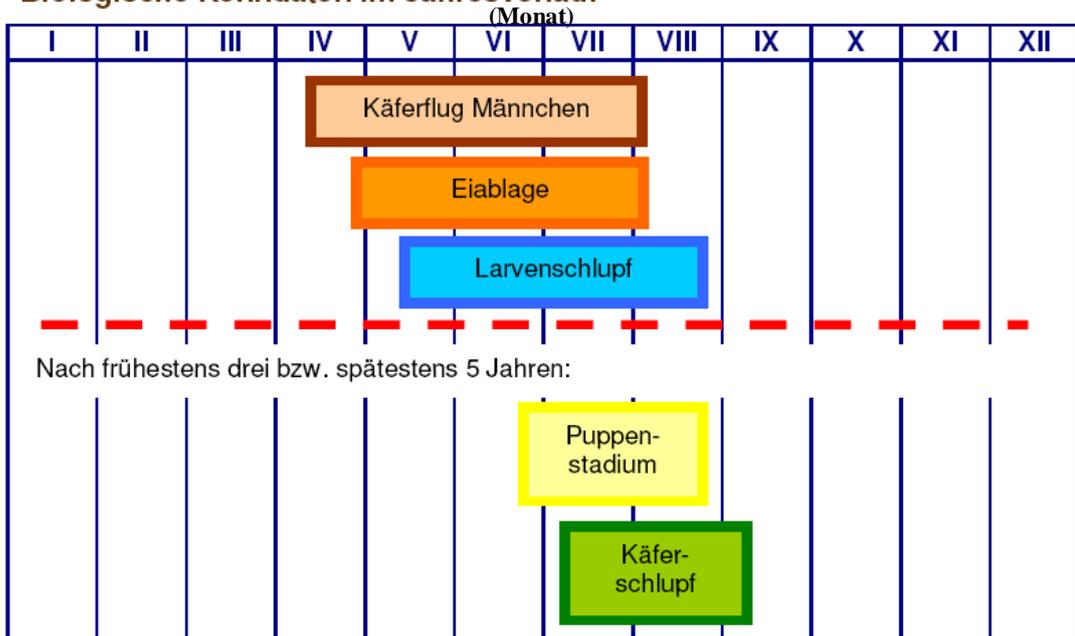


Abbildung 104: Entwicklungszyklus der Schnellkäfer nach Jahren bzw. Monaten (verändert nach: SCHEPL und PAFFRATH 2010)

Die polyphagen Larven benötigen während ihrer Entwicklung im Boden lebendes Pflanzenmaterial (FURLAN 1998). Junge Larven sterben bei Nahrungsmangel innerhalb von 30 Tagen, während ältere Larven länger ohne Nahrung auskommen (FURLAN 1998), da es ihnen möglich ist, tote organische Bodenbestandteile aufzunehmen und zu verarbeiten (GOUGH und EVANS 1942).

Es ist nachgewiesen worden, dass mehrere Phasen existieren, in denen Drahtwürmer durch intensiven Fraß die Kultur schädigen. Nach GRATWICK (1989) kommt es in Großbritannien zu einer ersten jährlichen Fraßphase im März bis April und zu einer zweiten im September und Oktober. DOANE (1981) beobachtete in Nordamerika drei Aktivitätspeaks pro Jahr, einen im Juni, einen zweiten im August und einen dritten im September. Er führte seine Untersuchungen mit Larven der Gattung *Selatosomus destructor* Brown, 1935 durch.

FURLAN (1998) konnte aufzeigen, dass die Nahrungsaufnahme der Larven während bis zu 20 % ihrer Entwicklungszeit im Boden stattfindet und die Phasen mit erhöhter Fraßaktivität jahreszeitenabhängig und in dem Zusammenhang mit der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte korrelierbar sind. Ist die Bodenfeuchte oder die Bodentemperatur für die Larven nicht komfortabel, besitzen sie die Tendenz in Bodenschichten mit geeigneteren Bedingungen abzuwandern (McCOLLOCH and HAYES 1923). Während sie sich im Winter und Sommer aufgrund niedriger bzw. hoher Temperaturen in tieferen Bodenschichten aufhalten, sind sie bei den von ihnen bevorzugten Temperaturen im Frühjahr und Herbst zusätzlich auf eine geeignete Bodenfeuchte angewiesen. Infolge eines abtrocknenden Bodens bewegen sie sich in tiefere, feuchtere Bodenschichten und in Verbindung mit einer erneuten Durchfeuchtung des Bodens bewegen sie sich wieder in höhere Bodenzonen (FURLAN 1998).

CAMPBELL (1937) konnte in Laborversuchen mit Larven der Gattung *Cardiophorus californicus* Mannerheim, 1843 feststellen, dass die Larven trockenen Boden meiden und bei andauernder Trockenheit sterben. Zudem stellte er fest, dass sie ebenfalls ihre Aktivität in wassergesättigtem Boden einstellen. Zusätzlich verursachten extreme Temperaturen von unter 2 °C bzw. über 30 °C eine hohe Sterblichkeit. Ähnliche Ergebnisse ergaben Untersuchungen von LAFRANCE (1968). Er stellte eine einsetzende Aktivität einer aus verschiedenen Gattungen bestehenden Drahtwurmpopulation in den oberen 10 cm der Bodenschicht ab einer Temperatur von 3 °C fest. Der Peak lag bei einer Temperatur von 13 °C. Seine Versuche führte er in Quebec, Canada durch. FURLAN (1998) stellte fest, dass Larven der Gattung *A. ustulatus* bei 2 bis 3 °C nur einige Tage überlebensfähig sind. Sie alle beobachteten eine Abwanderung der Larven infolge eines abtrocknenden Bodens. Während die optimale Bodentemperatur beispielsweise von LAFRANCE (1968) mit 13 °C in 10 cm Bodentiefe charakterisiert wurde, fanden bisher wenige Untersuchungen zur Quantifizierung der optimalen Bodenfeuchte in unterschiedlichen Bodenarten statt. LAFRANCE (1968) gibt in seinen Ausführungen einen undefinierten Index von 200 % als optimale Bodenfeuchte an. Einige frühe Laborversuche zum Einfluss der Bodenfeuchte wurden von CAMPBELL (1937) durchgeführt. Er charakterisierte eine Bodenfeuchte von 8 bis 16 Gewichtsprozent in einem sandigen Lehm als von den Drahtwürmern der Gattung *C. californicus* favorisierte Bodenfeuchte. FURLAN (2005) wies auf die weiterhin bestehenden großen Lücken in den Informationen über die Biologie der Drahtwürmer hin.

3. Arbeitshypothesen

Die aufgestellten Arbeitshypothesen beziehen sich u. a. auf die Untersuchungen von GRATWICK (1989), DOANE (1981) und FURLAN (1998), die davon ausgehen, dass Drahtwürmer jährlich mehrere fraßaktive Phasen aufzeigen sowie die Annahmen von CAMPBELL (1937) und LAFRANCE (1968) zu einer vertikalen Verteilung der Drahtwürmer im Boden in Abhängigkeit der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte.

Es ist davon auszugehen, dass die vertikale Verteilung der Larven entscheidend für den möglichen Schaden an der Kultur ist. Nur wenn sich die Larven im Bereich der sogenannten „Fraßzone“ von ca. 0 bis 15 cm Tiefe aufhalten, kann es durch die Nähe zu der angebauten Kultur überhaupt zu Schäden kommen (Abbildung 105). Die genauen Grenzbereiche der von den Drahtwürmern bevorzugten Feuchteverhältnisse waren bisher unklar (siehe Kapitel V Absatz 2). Lediglich bekannt war, ab welchen Temperaturen die Aktivität im Boden einsetzt bzw. ab welchen kritischen Bodenfeuchtwerten sich die Larven aus den oberen Schichten in den Unterboden zurückziehen (PARKER und HOWARD 2001). Wie in Abbildung 105 von FURLAN (1998) dargestellt, lassen sich keine Rückschlüsse allein über die Temperatur auf die Aufenthaltstiefe der Larven im Boden nachvollziehen. Vergleicht man die Monate Januar der Jahre 1994 und 1995 sind die Larven trotz ähnlicher Temperaturen auf völlig unterschiedlichen Tiefen vorzufinden. Bei ungünstigen Lebensbedingungen können ältere Larven bis zu einem Jahr ohne Nahrung überstehen (FURLAN 1998).

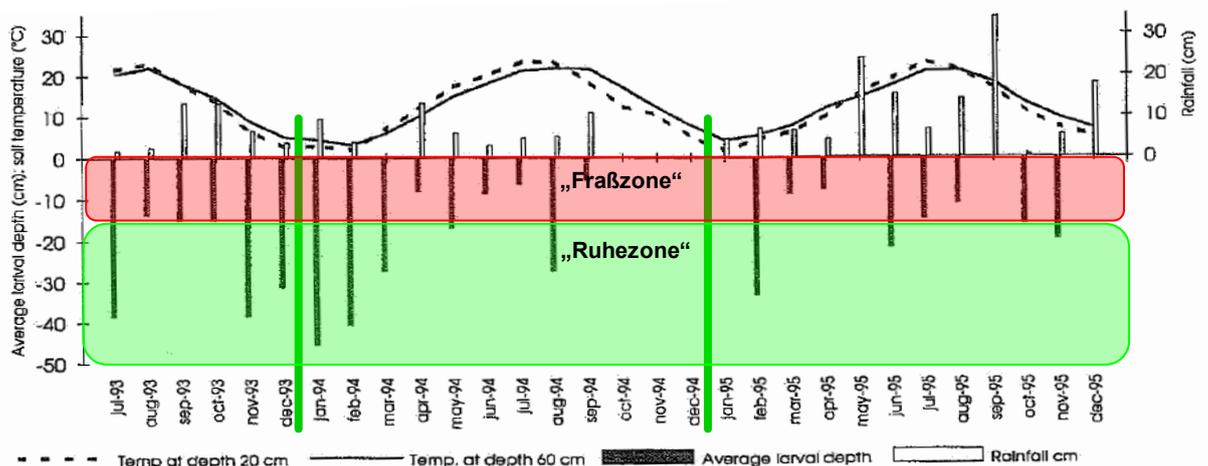


Abbildung 105: Vertikale Wanderung von *A. ustulatus* über eine Periode von zwei Jahren (verändert nach FURLAN 1998)

Aus den dargelegten Grundlagen ergaben sich folgende Arbeitshypothesen:

- Die Bodenfeuchte hat einen Einfluss auf den Aufenthalt der Larven in der Fraßzone, welcher genauer zu charakterisieren ist.
- Die Bodentemperatur hat zusätzlich einen Einfluss auf den Aufenthalt der Larven in der Fraßzone, welcher genauer zu charakterisieren ist.
- Die bevorzugte Bodenfeuchte ist in unterschiedlichen Bodenarten verschieden und ist genauer zu charakterisieren.
- Aus den Versuchsergebnissen kann ein Modellansatz zum Auftreten der Drahtwürmer in der Fraßzone in Abhängigkeit der Bodentemperatur, der Bodenfeuchte und der Bodenart abgeleitet werden.

4. Material und Methoden

4.1 Laborversuche

In Laborversuchen sollte geklärt werden, wie sich unterschiedliche Bodenfeuchten auf die vertikale Verteilung von Drahtwürmern im Boden auswirken. Hierzu wurde mit Kunststoffrohren mit einer Länge von 50 cm und einem Durchmesser von 10 cm gearbeitet. Vor Versuchsbeginn wurde jedes der Rohre in fünf 10 cm lange Segmente unterteilt. Die einzelnen Segmente wurden im Anschluss mit Klebeband wieder zu einem 50 cm langen Rohr verbunden. Die so vorbereiteten Rohre wurden mit Boden unterschiedlicher Bodenarten befüllt. Aus jeder Bodenartenhauptgruppe wurde ein Vertreter ausgewählt: ein mittel lehmiger Sand, ein stark sandiger Lehm, ein schluffiger Lehm und ein mittel schluffiger Ton (Abbildung 106). Die Böden stammten von den Validierungsstandorten der Bodenfeuchtesimulationsmodelle aus dem Jahr 2009 (mittel lehmiger Sand (Abtweiler), schluffiger Lehm (Mainz-Bretzenheim), mittel schluffiger Ton (Schwabsburg)) bzw. 2010 (stark sandiger Lehm (Mettenheim)) (Abbildung 8 und Tabelle 5). Die Böden wurden jeweils vor Versuchsbeginn im Freiland entnommen. Die Bodenartanalyse wurde vom Bodenlabor der Universität in Mainz durchgeführt. Der mittel lehmige Sand, der schluffige Lehm und der mittel lehmige Ton wiesen die in Tabelle 35 dargestellten Charakteristika bezüglich der Wassergehalte bei unterschiedlichen pF-Werten auf. Die ausgewählten Bodenarten sollten im Rahmen der Laborversuche Vertreter für die jeweilige Bodenart darstellen.

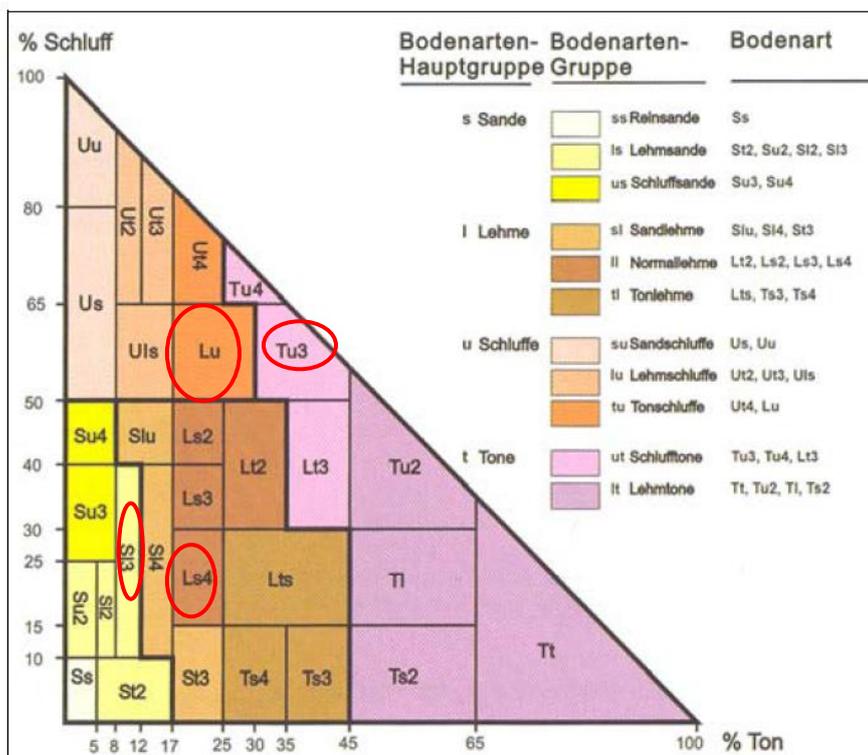


Abbildung 106: Dreieck der Bodenarten und ausgewählte Bodenarten der Rohrversuche zum Verhalten der Drahtwürmer in Bezug zur Bodenfeuchte und zur Bodenart (Quelle: BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2005))

Tabelle 35: prozentualer Anteil an der Feldkapazität bei unterschiedlichen charakteristischen pF-Werten der untersuchten Böden

Bodenart	pF 1,8	pF 2,5	pF 4,2	pF 7,0
mittel lehmiger Sand	100 %	84,6 %	35,4 %	0 %
schluffiger Lehm	100 %	91,2 %	62,8 %	0 %
mittel schluffiger Ton	100 %	95,3 %	45,0 %	0 %

Alle Rohre wurden von unten mit einem feinmaschigen Netz bespannt. Mit einem zusätzlichen feinmaschigen Drahtnetz wurden sie mit dem unteren Drittel in ein Wasserbad gesetzt (Abbildung 107). Nach Wassersättigung infolge kapillaren Aufstiegs wurden die Rohre aus dem Wasserbad entnommen und mit einem Deckel von oben bedeckt, um Verdunstung zu verhindern. Die so bedeckten Rohre wurden im Anschluss an die Aufsättigung zum Abtropfen der überkapillaren Hohlräume in eine Wanne mit grobem Sand gestellt (Abbildung 107). Das Abtropfen in Sand war nötig, damit die Versickerung des überschüssigen Wassers aufgrund hängender Menisken nicht gehemmt wurde (Verfahren nach SCHALLER 2000). Der Boden aller so vorbereiteten Rohre hatte damit zu Versuchsstart einen Wassergehalt, der 100 % der maximalen Wasserkapazität entsprach.

Bei der Bodenart schluffiger Lehm wurde in einige der obersten Segmente der Rohre zusätzlich Mais ausgesät, der durch die erzielte Feuchtigkeit in den Rohren zu keimen begann. Somit hatten sich zu Versuchsstart kleine Maispflanzen entwickelt. Literaturquellen besagen, dass das bei der Keimung von Saatgut entstehende Kohlenstoffdioxid eine lockende Wirkung auf die Larven besitzt (PARKER 1994). In den Rohrvarianten mit Maispflanzen sollte daher untersucht werden, ob die Lockwirkung des Kohlenstoffdioxides die Wanderung der Larven in den Rohren beeinflusst. Eine mögliche Beeinflussung durch die angebaute Kultur sollte mit diesen Varianten quantifiziert werden.



Abbildung 107: Sättigung der Bodensäulen bis zur maximalen Wasserkapazität (eigene Aufnahmen)

Nach der Vorbereitung der Rohre wurden in jedes Rohr 20 Drahtwürmer eingesetzt (Abbildung 108). Verwendet wurden die Arten *A. obscurus*, *A. sordidus*, *A. ustulatus* sowie *A. lineatus* und *A. sputator*. Die Bestimmung der beiden letztgenannten Arten wies große Schwierigkeiten auf, sodass sie in einer unbestimmten Zusammensetzung in die Rohre eingebracht wurden. Der Versuch wurde mit den in Tabelle 36 aufgelisteten Varianten durchgeführt.



Abbildung 108: Einsetzen von 20 Drahtwürmern in die Bodenrohre (links) und Abtrocknung der Rohre zur Erzeugung eines Feuchtgradientens (rechts) (eigene Aufnahmen)

Tabelle 36: Varianten der Rohrversuche zur Charakterisierung des Einflusses der Bodenfeuchte und der Bodenart auf den Aufenthaltsort der unterschiedlichen Drahtwurmart

Bodenart		stark sandiger Lehm	schluffiger Lehm	mittel schluffiger Ton	schluffiger Lehm
Art	mittel lehmiger Sand				----- bepflanzt
<i>A. sordidus</i>	2	3	3	7	2
<i>A. ustulatus</i>	2	-	3	2	2
<i>A. obscurus</i>	-	3	-	-	-
unbestimmt	2	-	3	-	2

Nachdem sich alle Larven in die Bodensäule eingraben konnten, wurden die Rohre für vier bis sechs Wochen, in Abhängigkeit der untersuchten Bodenart, unter Ventilatoren gestellt. So sollte eine Abtrocknung von oben erreicht werden und ein Feuchtegradient innerhalb des Bodens der Rohre von trocken bis feucht erzielt werden (Abbildung 108). Ziel war, den durch die Larven bevorzugten Feuchtebereich innerhalb des Bodens der Rohre zu bestimmen.

Nach der Abtrocknung erfolgte eine Auswertung der einzelnen Rohre. Hierzu wurde jedes Rohr in die fünf einzelnen Segmente zerlegt. Die Bodensäule wurde entlang der Rohrsegmente geteilt (Abbildung 109) und das Gewicht des Bodens bestimmt. Alle Segmente wurden auf Drahtwürmer untersucht und die Drahtwürmer je Segment ausgezählt. Im Anschluss wurde der Boden bei 105 °C im Trockenschrank bis zur Gewichtskonstanz getrocknet und somit der Wassergehalt des Bodens jedes Rohrsegmentes gravimetrisch bestimmt. Somit konnte die Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil der Drahtwürmer und dem Wassergehalt jedes einzelnen Segmentes untersucht werden.



Abbildung 109: Verfahren der Zerteilung in die einzelnen Rohrsegmente (eigene Aufnahmen)

4.2 Freilandkäfige

Nach dem Vorbild der Versuche von FURLAN (1998) wurden im April 2009 Freilandkäfige installiert. Hierfür wurden Löcher von einem Kubikmeter Bodenvolumen ausgebagert und ein unterirdischer Käfigteil eingegraben (Abbildung 110). Der unterirdische Käfigteil bestand aus vier Hartschaumplatten von jeweils einem Quadratmeter. Die vier Platten wurden durch Winkel an den Seiten zusammengehalten und mit Silikon an den Nahtstellen abgedichtet. Am Boden waren die Käfige offen, sodass die Versickerung von Bodenwasser in größere Tiefen nicht beeinträchtigt wurde. Nach dem Eingraben der unterirdischen Käfigteile wurden diese mit dem zuvor ausgebagerten Boden verfüllt und ein oberirdischer Aufsatz aufgebracht. Dieser umfasste ebenfalls ein Volumen von einem Kubikmeter. Die Kanten des oberirdischen Aufsatzes bestanden aus Quadratrohr aus Stahl und die Seiten wurden mit einer feinmaschigen Gaze bespannt (Abbildung 111).



Abbildung 110: Anlage der unterirdischen Käfigteile (eigenen Aufnahme)



Abbildung 111: Fertiggestellte Versuchsanlage (eigene Aufnahme)

In den Käfigen sollte die Wanderung der Larven im Boden in Abhängigkeit der Bodenfeuchte und der Bodentemperatur im Halbfreilandversuch untersucht und die Laborversuche mit diesen Daten überprüft und validiert werden. Ein Käfig diene als reiner Messkäfig der Bodenfeuchte- und Temperaturmessungen. Dort wurde nach der Käfiginstallation ein Watermark Komplettpaket der Firma Irrometer mit sieben Watermarksensoren, einem Temperaturfühler und einem Datenlogger installiert. Die Watermarksensoren wurden in folgenden Tiefen eingeschlämmt: je zwei Sensoren in 15, 40 und 60 cm (zur Bildung von Mittelwerten) und ein Sensor auf 80 cm Tiefe (Abbildung 112). In 15, 40 und 60 cm wurden zudem Temperaturlogger eingegraben. Zusätzlich wurde ein Regenschirm nach HELLMANN angebracht und vom Bodenzentrum der Universität Mainz eine Bodenanalyse durchgeführt.

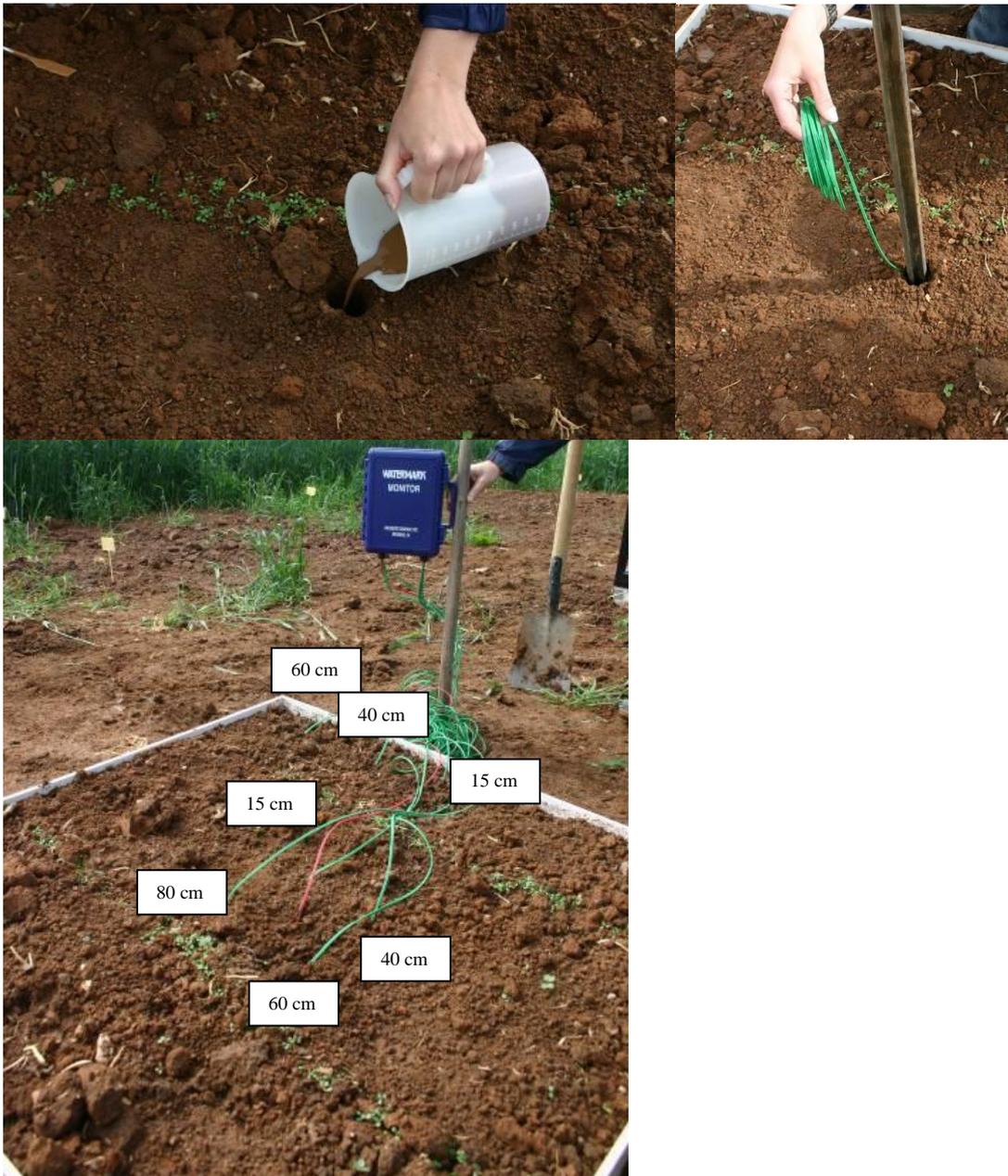


Abbildung 112: Einschlämmung der Watermarksensoren und Position der Sensoren innerhalb des Messkäfigs (eigene Aufnahmen)

Unmittelbar nach dem Bau der Käfige sollte sich der Boden über einen längeren Zeitraum setzen. Aus diesem Grund wurde der erste Käfig erst im Oktober 2009 mit Larven bestückt. Es wurden 500 Larven der Art *A. obscurus* eingesetzt. Aufgrund der extremen Trockenheit zum Zeitpunkt des Einsetzens wurden die Käfige für fünf Tage täglich bewässert, bis in 80 cm Tiefe Feldkapazität erreicht war. Dieser Vorgang sollte es den Larven ermöglichen, während der sich anschließenden Abtrocknung des Bodens in größere Tiefen abwandern zu können.

Um die Wanderung der Larven zu untersuchen, wurden Köderfallen nach dem Schema von FURLAN (mündliche Mitteilung, 2008) in 15 cm Tiefe eingegraben. Es sollte festgestellt werden, bei welcher Bodenfeuchte und Temperatur sich die Larven im für die Kulturen gefährlichen Bereich aufhalten bzw. Fraßaktivität zeigen. Bei den Fallen handelte es sich um Topffallen mit einem Durchmesser von

10 cm. Diese wurden mit Schichten von Vermiculit, Mais, Getreide und Vermiculit befüllt (Abbildung 113) und mit Wasser durchtränkt. Zur Vorkeimung blieben die Fallen einige Tage im Labor. Das bei der Keimung entstehende Kohlenstoffdioxid besitzt eine lockende Wirkung auf die Larven (PARKER 1994). Jeweils zwei entsprechend vorbereitete Fallen wurden in den Käfig eingegraben, nach drei bis vier Tagen gewechselt und auf Drahtwürmer untersucht. Die Larven aus den Fallen wurden nach Fallenleerung in den Käfig zurückgesetzt. Dabei wurden sie in der gegenüberliegenden Ecke der neu eingegrabenen Fallen positioniert, um eine kontinuierliche Anlockung derselben Larven zu vermeiden.

Mit der erhobenen Datenbasis sollten Korrelationen zwischen dem Auftreten der Larven in der oberen Bodenschicht und der Bodenfeuchte bzw. der Bodentemperatur abgeleitet werden.



Abbildung 113: Drahtwurmfallen der Freilandkäfige

4.3 Statistische Auswertungen

Zur statistischen Auswertung wurden die Programme SigmaPlot für Windows, Version 10.0 und XLSTAT Version 2008.5.01 genutzt. Logistische und nicht-lineare Regressionen wurden mit der aus den Labor- und Halbfreilandversuchen gewonnenen Datenbasis durchgeführt.

Zur Überprüfung der Signifikanzen der Regressionen wurden Varianzanalysen durchgeführt. Zusätzlich wurden Kovarianzanalysen mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%), Drahtwurmart sowie Kultureinfluss auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) durchgeführt. Die Kovarianzanalyse testet hierbei die Interaktionen zwischen quantitativen Variablen und Faktoren aufgrund eines Steigungsvergleichs. Dies diente zur Erarbeitung von signifikanten Unterschieden zwischen den Faktoren Drahtwurmart bzw. Kultureinfluss auf die Summe des

Drahtwurmorkommens (%) unter Berücksichtigung der quantitativen Variable maximale Wasserkapazität (%). Überprüfung von signifikanten Unterschieden zwischen den Arten und des Kultureinflusses wurde zusätzlich mit dem Post-Hoc-Test nach Tukey mit einem Konfidenzintervall von 95 % durchgeführt. Signifikanzen wurden zum Niveau Alpha = 0,05 mit * und zum Niveau Alpha = 0,01 mit ** gekennzeichnet.

5. Ergebnisse

5.1 Laborversuche

5.1.1 Versuchsdaten

Die in Tabelle 36 aufgelisteten Wiederholungen der Rohrversuche wurden getrennt nach Bodenarten ausgewertet. Zur Auswertung wurde der prozentuale Anteil des Drahtwurmorkommens ab dem obersten Segment jedes Rohres kumuliert, sodass erfasst werden konnte, bis zu welchem Anteil an der maximalen Wasserkapazität welcher Anteil an Drahtwürmern aufgetreten war. Somit ergab sich ein Wertepaar pro Rohrsegment. Die Korrelationen dieser Wertepaare sind in Abbildung 114 bis Abbildung 117 getrennt nach Bodenarten dargestellt.

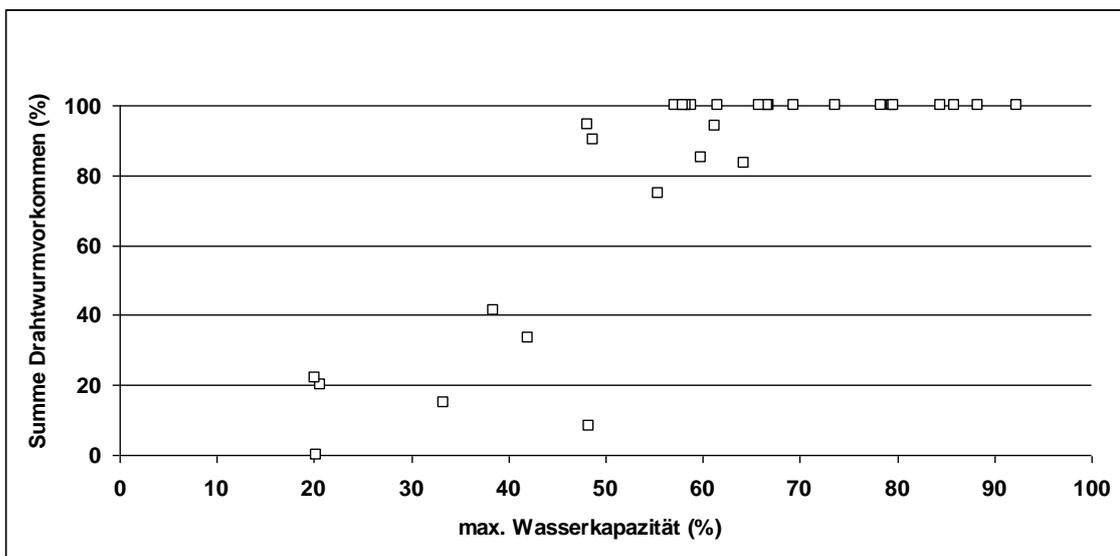


Abbildung 114: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart mittel lehmiger Sand [n=30]

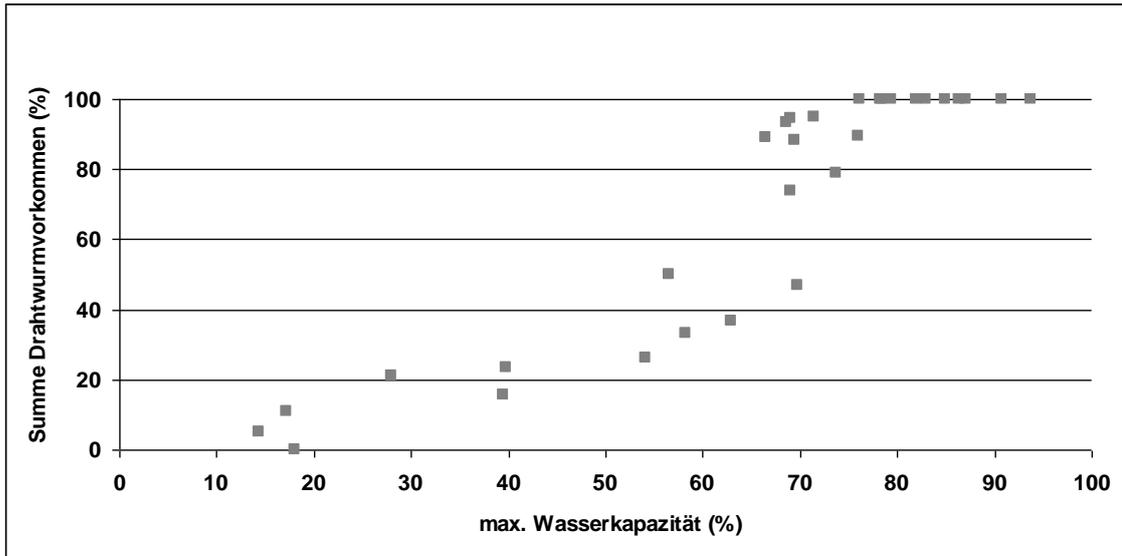


Abbildung 115: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart stark sandiger Lehm [n=30]

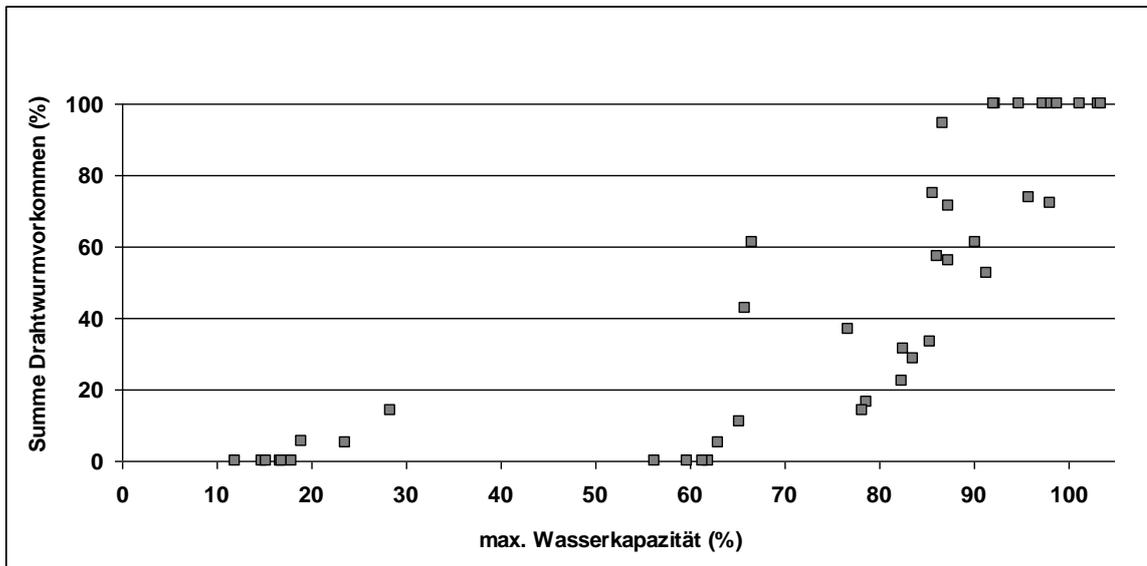


Abbildung 116: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart schluffiger Lehm [n=45]

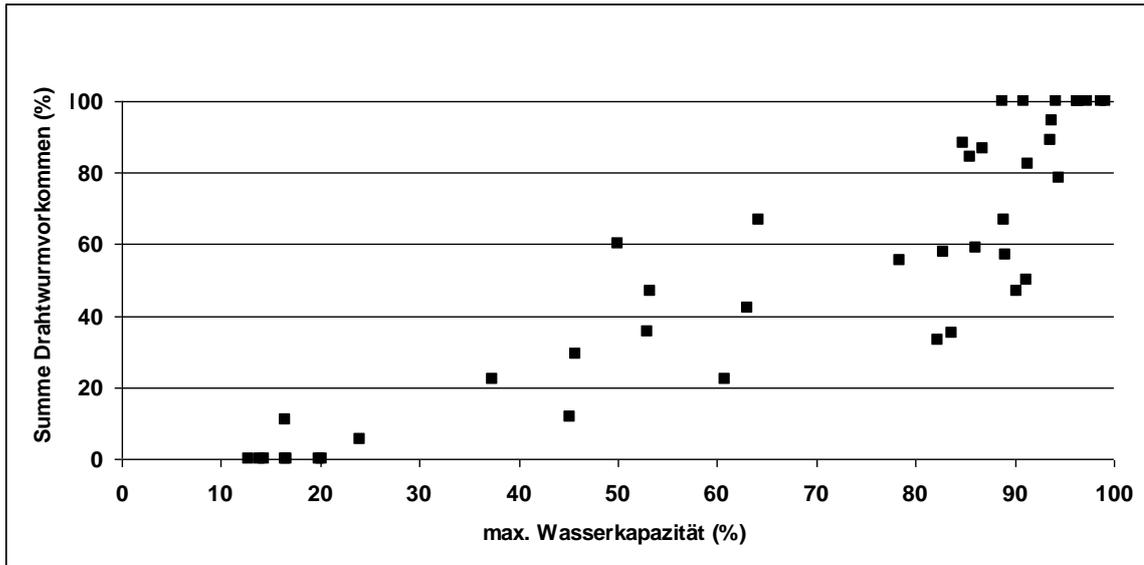


Abbildung 117: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität in der Bodenart mittel schluffiger Ton [n=45]

Eine durchgeführte Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) ergab innerhalb einer Bodenart keine signifikanten Unterschiede im Verhalten der Drahtwurmarten in Bezug zur Bodenfeuchte (Tabelle 37 bis Tabelle 40). Das war das Ergebnis der Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %. Das gleiche Ergebnis ergab sich bei der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Kultur (mit/ohne) auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%). Dort ergaben sich keine signifikanten Differenzen zwischen den Steigungen der Regressionen der Summe des Drahtwurmorkommens (%) in Bezug zur maximalen Wasserkapazität (%) in den Varianten mit bzw. ohne Kultur mit einem Konfidenzintervall von 95 % (Tabelle 41). Das Ergebnis wurde durch den Post-Hoc-Test nach Tukey mit einem Konfidenzintervall von 95 % bestätigt (Tabelle 42).

Tabelle 37: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in der Bodenart mittel lehmiger Sand - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kategorie	t	Pr > t	signifikant
max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord. gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.ust.	1,682	0,104	nein
max. Wasserkapazität (%)*Species unbestimmt gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.ust.	1,396	0,175	nein
max. Wasserkapazität (%)*Species unbestimmt gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord.	-0,281	0,781	nein

Tabelle 38: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in der Bodenart stark sandiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kategorie	t	Pr > t	signifikant
max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord. gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.obs.	-0,316	0,754	nein

Tabelle 39: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in der Bodenart schluffiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kategorie	t	Pr > t	signifikant
max. Wasserkapazität (%)*Species unbestimmt gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord.	-1,821	0,076	nein
max. Wasserkapazität (%)*Species unbestimmt gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.ust.	-0,998	0,324	nein
max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord. gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.ust.	-0,839	0,406	nein

Tabelle 40: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Drahtwurmart auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in der Bodenart mittel schluffiger Ton - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kategorie	t	Pr > t	signifikant
max. Wasserkapazität (%)*Species A.sord. gegen max. Wasserkapazität (%)*Species A.ust.	1,209	0,234	nein

Tabelle 41: Ergebnis der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Kultur (ja/nein) auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in der Bodenart schluffiger Lehm - Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kategorie	t	Pr > t	signifikant
max. Wasserkapazität (%)*Kultur (ohne) gegen max. Wasserkapazität (%)*Kultur (mit)	0,678	0,501	nein

Tabelle 42: Ergebnis des Tukey-Tests zum Einfluss der Kultur (mit/ohne) auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%) in Bezug zur max. Wasserkapazität (%) - Analyse der Unterschied zwischen den Kategorien mit einem Konfidenzintervall von 95 %

Kontrast	Differenz	Standardisierte Differenz	Kritischer Wert	Pr > Diff	signifikant
ohne Kultur gegen mit Kultur	-3,681	-0,501	2,003	0,619	nein

Tukeys d kritischer Wert:

2,833

5.1.2 Modellansatz

Korreliert wurde der Anteil der maximalen Wasserkapazität (%) des jeweiligen Segmentes mit dem kumulierten Drahtwurmorkommen (%). Mithilfe dieser Wertepaare konnte eine logistische Regression durchgeführt werden. Die Summe des Drahtwurmorkommens kann damit in Bezug zur maximalen Wasserkapazität des Bodens in der Bodenart mittel lehmiger Sand mit der logistischen Funktion

$$[15] f = 100 / (1 + \exp(-(x - 43,652) / 6,5638))$$

wobei:

f = Summe Drahtwurmorkommen (%)

x = prozentualer Anteil der max. Wasserkapazität (%)

modelliert werden (Abbildung 118). Hierbei ergab sich ein Bestimmtheitsmaß von 0,81**. Die Varianzanalyse ergab einen hochsignifikanten Zusammenhang (Tabelle 43).

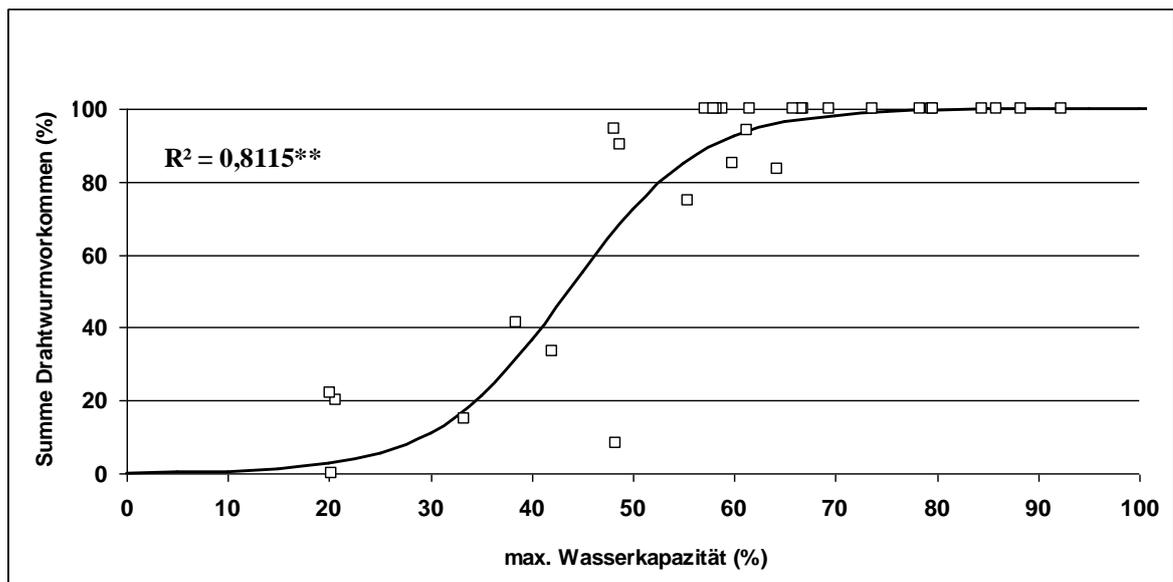


Abbildung 118: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart mittel lehmiger Sand

Nach dem gleichen Verfahren wurden die Bodenarten stark sandiger Lehm, schluffiger Lehm und mittel schluffiger Ton ausgewertet. Für jede Bodenart konnte mittels einer logistischen Regression eine Modellfunktion errechnet werden. Die Modellparameter sind in Tabelle 44 aufgeführt. Das Bestimmtheitsmaß lag bei den berechneten Funktionen zwischen 0,81** und 0,89** (Abbildung 119 bis Abbildung 121). Die Varianzanalyse zeigte in allen Bodenarten einen hochsignifikanten Zusammenhang (Tabelle 43).

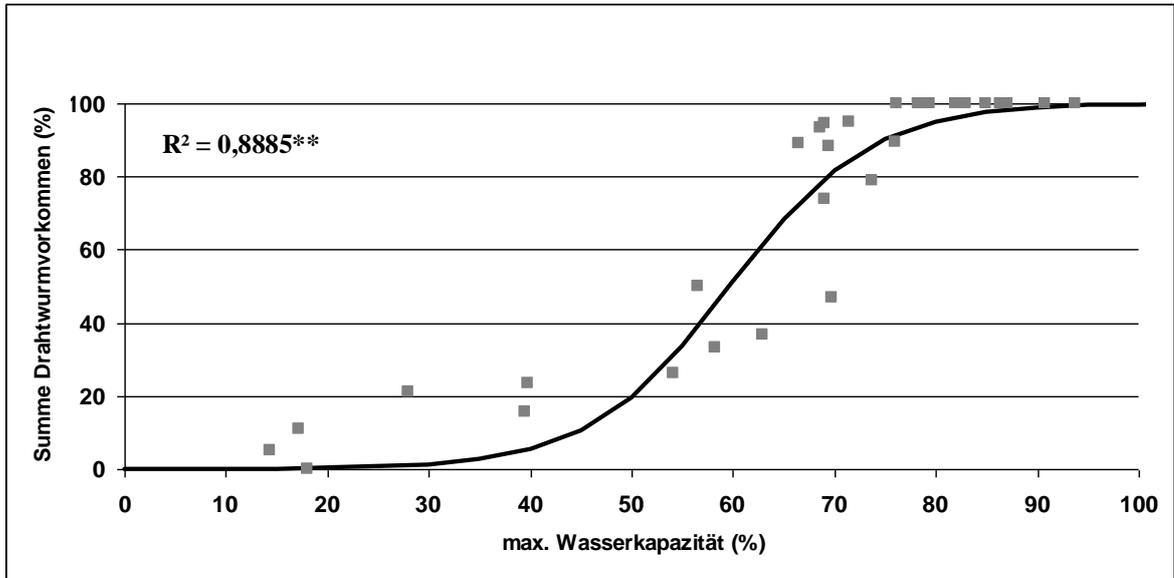


Abbildung 119: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmvorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart stark sandiger Lehm

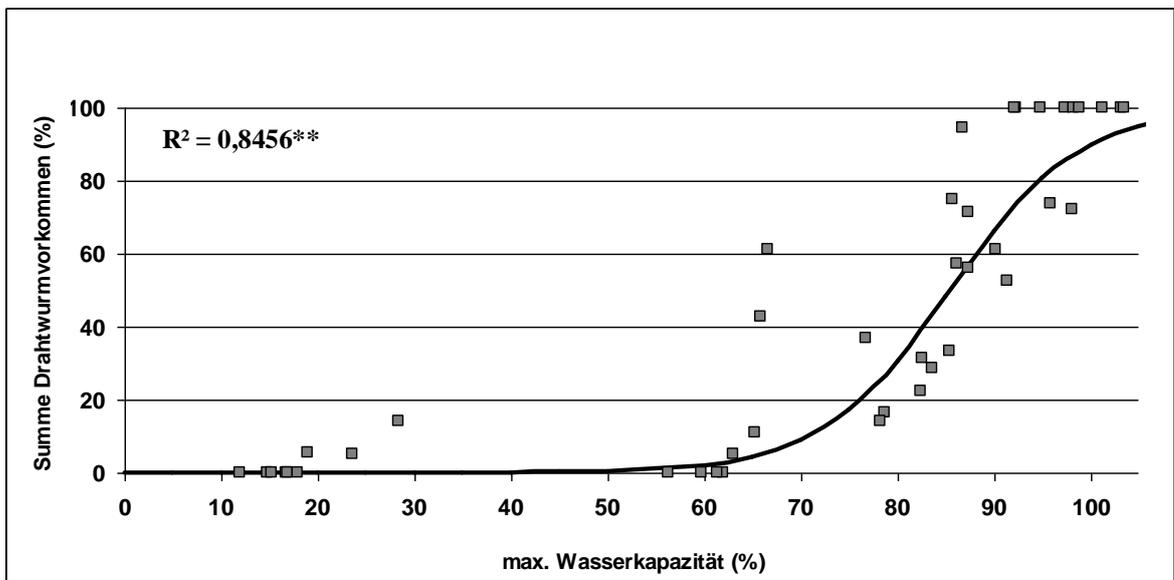


Abbildung 120: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmvorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart schluffiger Lehm

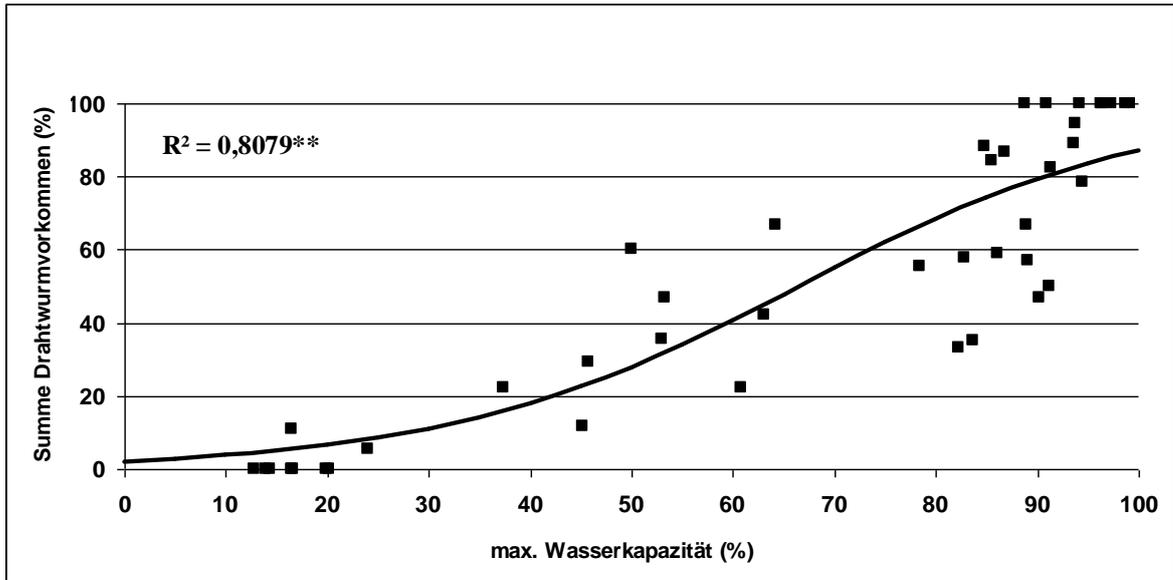


Abbildung 121: Darstellung der Korrelation zwischen der Summe des Drahtwurmvorkommens und dem zugehörigen Anteil der max. Wasserkapazität sowie die aus der logistischen Regression abgeleitete Funktion für die Bodenart mittel schluffiger Ton

Tabelle 43: Parameter der Varianzanalyse der logistischen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) nach Bodenarten

Bodenart		DF	Mittel der Quadratsumme	F	P
mittel lehmiger Sand	Regression	2	13675,3397	58,1052	<0,0001**
	Residuen	27	235,3547		
	gesamt	29	1162,2502		
stark sandiger Lehm	Regression	2	16934,9745	107,5503	<0,0001**
	Residuen	27	157,461		
	gesamt	29	1314,5309		
schluffiger Lehm	Regression	2	30555,0242	115,0183	<0,0001**
	Residuen	42	265,6536		
	gesamt	44	1642,4431		
mittel schluffiger Ton	Regression	2	24757,3933	88,2916	<0,0001**
	Residuen	42	280,4049		
	gesamt	44	1392,9953		

Tabelle 44: Parameter der logistischen Modellfunktionen zur Prognose der Summe des Drahtwurmvorkommens (%) in Abhängigkeit der max. Wasserkapazität (%) für vier verschiedene Bodenarten

Bodenart	Parameter	p	R²
mittel lehmiger Sand	a	100	0,8115
	b	6,5638	
	x0	43,652	
stark sandiger Lehm	a	100	0,8885
	b	6,8471	
	x0	59,7092	
schluffiger Lehm	a	100	0,8456
	b	5,0243	
	x0	85,0794	
mittel schluffiger Ton	a	100	0,8079
	b	17,4165	
	x0	66,5178	

Der Vergleich der Modellansätze zur Prognose der Summe des Drahtwurmorkommens (%) in Abhängigkeit der maximalen Wasserkapazität (%) für die vier Bodenarten ist in Abbildung 122 dargestellt. Der tolerierte Feuchtebereich zeigte in dem mittel lehmigen Sand eine deutlich größere Spannweite als in den schwereren Bodenarten.

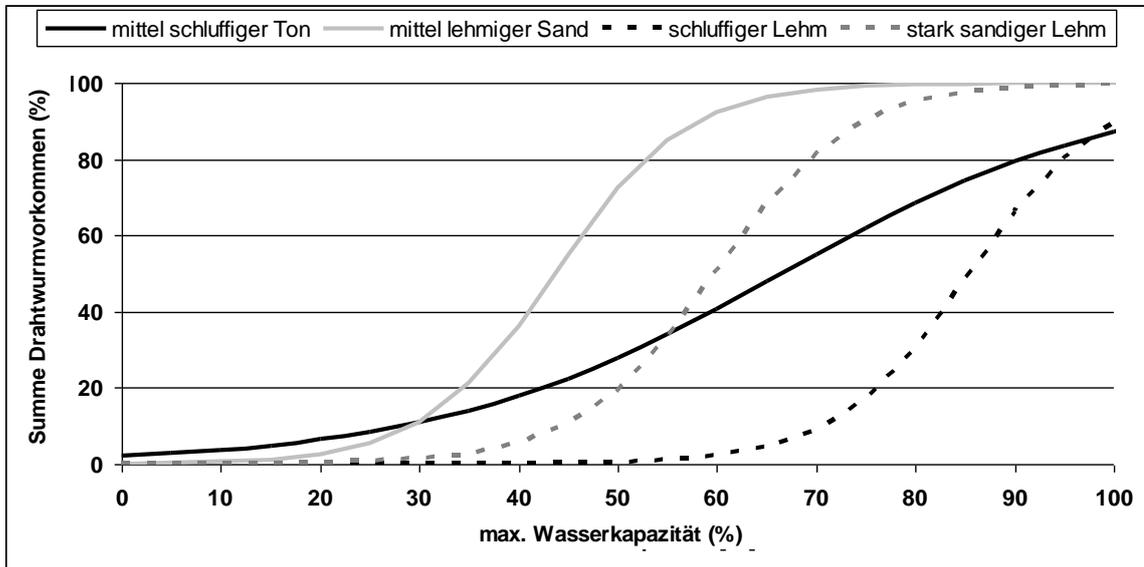


Abbildung 122: Modellansätze der Prognose des Drahtwurmorkommens in Abhängigkeit der maximalen Wasserkapazität und der Bodenart

5.2 Freilandkäfige

5.2.1 Versuchsdaten

Die Änderung der Bodenfeuchteverhältnisse, der Bodentemperatur und die Drahtwurmfallenfänge pro Fallentag sind im Überblick über einen Zeitraum von zwei Jahren in Abbildung 123 dargestellt. Es konnte ein Maximum von 32 Drahtwürmern pro Tag in den Fallen im Frühjahr 2010 beobachtet werden. Ein deutlich geringeres Drahtwurmorkommen mit einem Maximum von vier Drahtwürmern pro Tag in den Fallen wurde im Frühjahr 2011 verzeichnet. Im Herbst kam es nur zu vereinzelt Drahtwurmfallen.

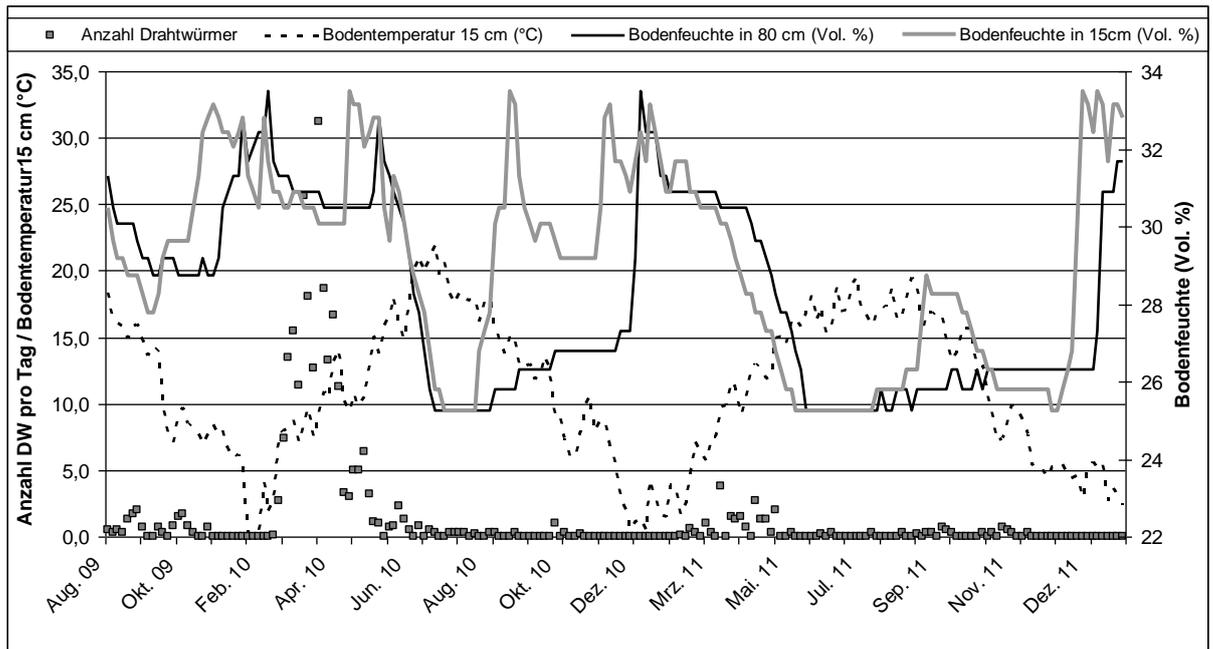


Abbildung 123: Drahtwurmaufreten in den Fallen sowie Messwerte der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte über einen Zeitraum von 2,5 Jahren

Im Verlauf der gemessenen Bodenfeuchte in 15 und 80 cm Bodentiefe konnte beobachtet werden, dass sich die Charakteristika jahreszeitlich verändern. Während sich die erste Jahreshälfte durch einen homogenen Verlauf der Bodenfeuchtwerte im Vergleich zwischen 15 und 80 cm auszeichnete, differiert diese in der zweiten Jahreshälfte stärker. Die Differenzen der gemessenen Bodenfeuchtwerte zwischen 15 und 80 cm Bodentiefe sind in Box-Whisker-Plots für die ersten und die zweiten Jahreshälften in Abbildung 124 dargestellt. Die mittleren Differenzen der Bodenfeuchte zwischen 15 und 80 cm Bodentiefe lagen in der ersten Jahreshälfte bei 0,5 Vol. % und einem Maximum der Abweichungen bei 2,7 Vol. %, wohingegen sie in der zweiten Jahreshälfte auf im Mittel 2,3 Vol. % und einem Maximum von 7,7 Vol. % anstiegen.

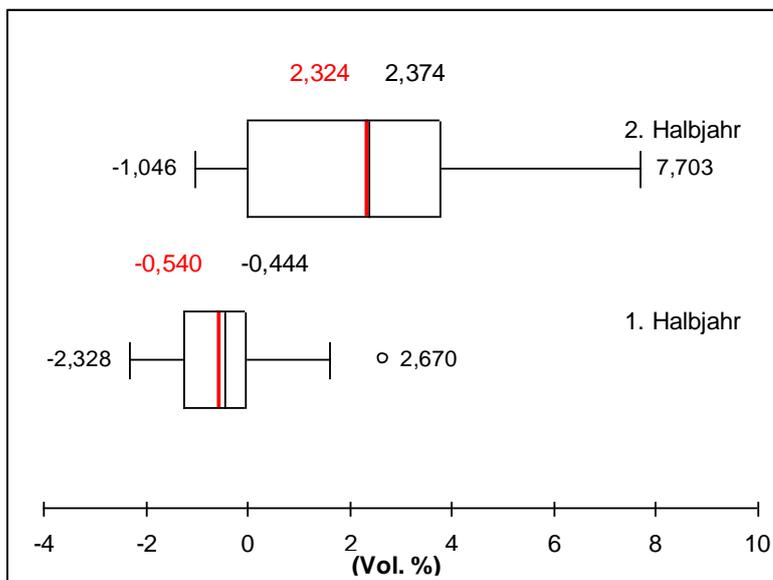


Abbildung 124: Box-Whisker-Plots der Differenzen der gemessenen Bodenfeuchte zwischen 15 und 80 cm Bodentiefe in der ersten bzw. der zweiten Jahreshälfte

5.2.2 Modellansatz

Mit der in den Drahtwurmkäfigen erhobenen Datenbasis wurden nicht-lineare Regressionen berechnet, wobei für die erste und die zweite Jahreshälfte die Einflussfaktoren differenzierten. Ausschlaggebend für die Prognose aktiver Drahtwürmer in der oberen Bodenzone in der ersten Jahreshälfte waren die Faktoren Bodentemperatur und Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe und für die zweite Jahreshälfte die Bodentemperatur in 15 cm und die Bodenfeuchte in 80 cm Tiefe. Die Differenzierung der Einflussfaktoren war nötig, da die Höhe der Bodenfeuchte nach der Sommerperiode zwischen 15 und 80 cm stark variierte (Abbildung 124). Da sich die Larven während der warmen und trockenen Sommerperiode in tiefere Bodenschichten zurückziehen, muss die Durchfeuchtung des Bodens bis in diese tiefen Schichten stattfinden. Unter der Annahme, dass Drahtwürmer erst infolge optimaler Bodenfeuchte- und Bodentemperaturbedingungen in den sie umgebenden Bodenschichten mit einer erneuten Tendenz Richtung Bodenoberfläche reagieren, wurde mit der gesamten Datenbasis und der Bodenfeuchte in 80 cm Tiefe eine Modellgleichung für die Prognose der Drahtwurmaktivität in den oberen 15 cm Bodentiefe in der zweiten Jahreshälfte abgeleitet. Vor der Durchführung der nicht-linearen Regressionen wurden die Drahtwurmfangzahlen am Maximum des Drahtwurmauftretens relativiert.

Daraus resultierte folgende Modellgleichung für die Prognose aktiver Drahtwürmer in der Fraßzone:

$$[16] \quad f = a * \exp (-0,5 * (((T - T_{opt}) / b)^2 + ((BF - BF_{opt}) / c)^2))$$

wobei:

f = prozentualer Anteil aktiver Drahtwürmer (%)

T = Temperatur (°C)

BF = Bodenfeuchte (Vol. %)

a, b, c = Modellparameter

T_{opt} = geschätztes Optimum der Bodentemperatur zur Drahtwurmaktivität (°C)

BF_{opt} = geschätztes Optimum der Bodenfeuchte zur Drahtwurmaktivität (Vol. %)

Die Modellparameter sind in Tabelle 45 aufgelistet. Mit den errechneten Funktionen kann eine Vorhersage zur Drahtwurmaktivität in der Fraßzone in Bezug zur Bodenfeuchte und zur Bodentemperatur mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,54** in der ersten Jahreshälfte und 0,66** in

der zweiten Jahreshälfte angegeben werden. Sie zeigen ein Maximum der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone bei 11 °C und 31 Vol. % Bodenfeuchte in dem vorliegenden Boden der Drahtwurmkäfige (Bodenart schluffiger Lehm) (Abbildung 125). Die Varianzanalyse ergab einen hochsignifikanten Zusammenhang (Tabelle 46).

Tabelle 45: Parameter der nicht-linearen Regressionen zur Prognose des prozentualen Anteils aktiver Drahtwürmer in der ersten und zweiten Jahreshälfte

Modellansatz	Parameter	Standardfehler	p	R ²	
erste Jahreshälfte	Topt	11,3456	0,3431	<0,0001	0,5402
	BFopt	30,8765	0,1263	<0,0001	
	a	1	0,3152	0,0023	
	b	2,2777	0,2658	<0,0001	
	c	-0,6649	0,1071	<0,0001	
zweite Jahreshälfte	Topt	10,93	0,271	<0,0001	0,6637
	BFopt	31,0125	0,0413	<0,0001	
	a	1	0,1441	<0,0001	
	b	2,0878	0,1501	<0,0001	
	c	0,3021	0,0221	<0,0001	

Tabelle 46: Parameter der Varianzanalyse der nicht-linearen Regressionen und des zugehörigen Varianzquotiententests (F-Test) für den Modellansatz zur Prognose aktiver Drahtwürmer in der ersten und der zweiten Jahreshälfte

Modellansatz		DF	Mittel der Quadratsumme	F	p
erste Jahreshälfte	Regression	4	0,4086	19,6821	<0,0001**
	Residuen	67	0,0208		
	gesamt	71	0,0426		
zweite Jahreshälfte	Regression	4	0,5808	82,8807	<0,0001**
	Residuen	168	0,007		
	gesamt	172	0,0204		

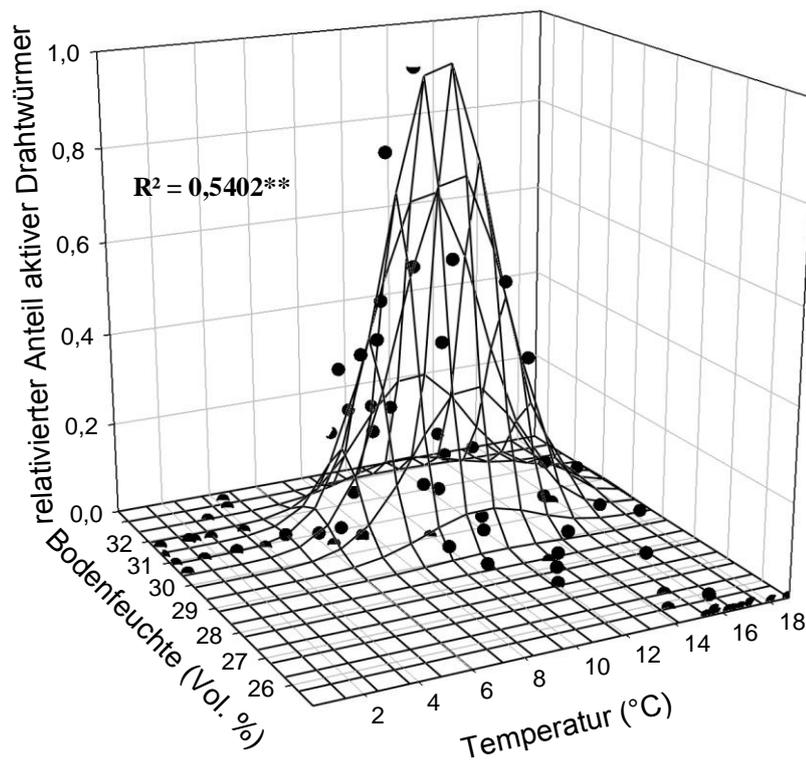


Abbildung 125: Boniturdaten der Drahtwurmkäfige mit der daraus abgeleiteten Funktion zur Prognose einer Drahtwurmaktivität in der Fraßzone in der 1. Jahreshälfte [n=72]

Da die bisherige Datenbasis noch nicht umfassend genug für eine prozentuale Prognose der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone war, wurde in einem ersten Ansatz eine einfache binäre Modellentscheidung validiert. Die Drahtwurmaktivität in der Fraßzone wurde mit einem Vorkommen von mindestens 10 % der relativen Aktivität definiert (Klasse 1), andernfalls wurde von keiner bzw. einer niedrigen Aktivität in der Fraßzone ausgegangen (Klasse 0) (Abbildung 126). Es wurde angenommen, dass ab 10 % aktiver Drahtwürmer in der Fraßzone eine Gefahr für die Kultur besteht. Aufgrund der Größe der Datenbasis musste die Validierung in diesem ersten Schritt mit abhängigen Daten durchgeführt werden.

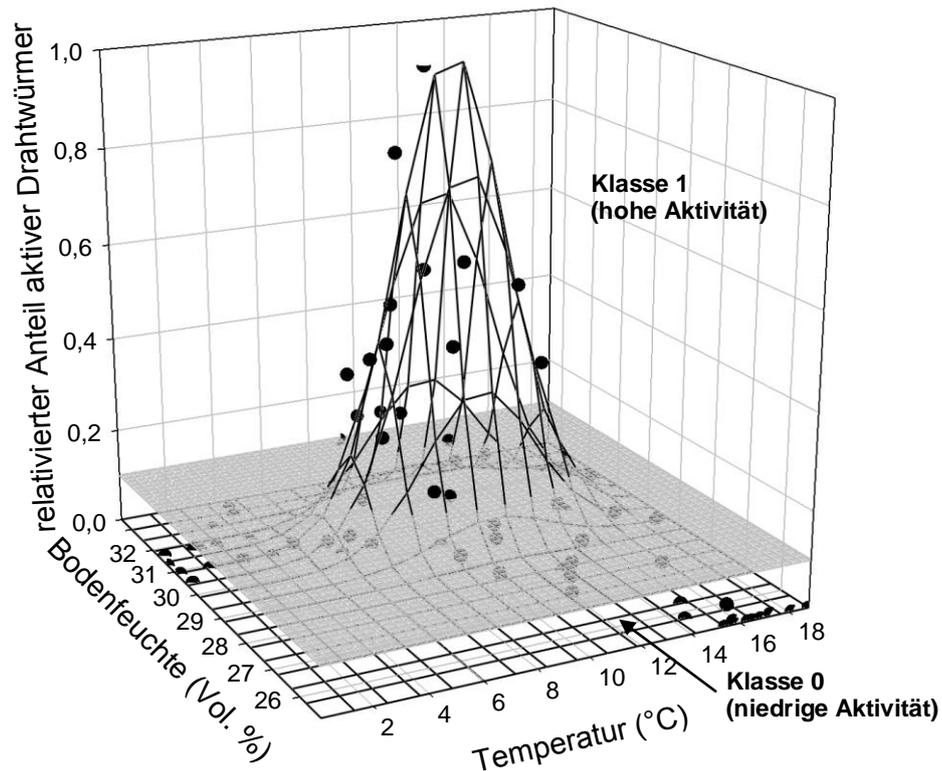


Abbildung 126: Schnittfläche der Klasseneinteilung beim Vorkommen von 10 % der relativen aktiven Drahtwürmer in der Fraßzone – in Klasse 0 findet keine bzw. eine niedrige Aktivität in der Fraßzone statt, in Klasse 1 wird eine hohe Aktivität von Drahtwürmern in der Fraßzone prognostiziert

Die Übereinstimmung der Klasseneinteilung der Boniturwerte mit den Werten der errechneten Funktionen ergab insgesamt eine Trefferquote über 90 % korrekter Prognosen. In Klasse 0 lag die Trefferquote mit ca. 90 % korrekter Prognosen etwas höher, in Klasse 1 erreichte der Anteil korrekter Prognosen ca. 80 % (Abbildung 127). Damit liegt ein erster Ansatz zur Prognose einer Drahtwurmmaktivität in der Fraßzone in Abhängigkeit von Bodentemperatur und Bodenfeuchte vor.

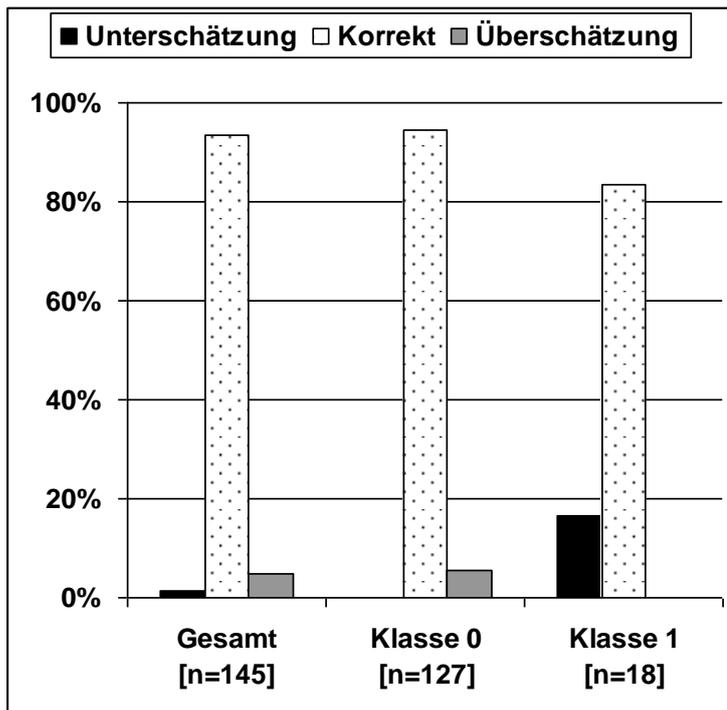


Abbildung 127: Validierung des Modellansatzes zur Prognose über eine Drahtwurmaktivität in der Fraßzone (Klasse 1) bzw. keiner Aktivität (Klasse 0)

6. SIMAGRIO-W – Prognose der Drahtwurmaktivität in Abhängigkeit der Temperatur und der Bodenfeuchte

Aus den durchgeführten Versuchen und den erarbeiteten Ergebnissen wurde ein Ansatz für das Prognosemodell SIMAGRIO-W erstellt (Abbildung 128). Geplant sind zwei Modellausgaben, die in einem zeitlichen Ablauf miteinander verknüpft sind. Ausgehend von einem unquantifizierbaren Drahtwurmpotential auf einem Feld soll in einem ersten Entscheidungspunkt überprüft werden, ob in der Fraßzone für eine Drahtwurmaktivität nötige Schwellenwerte von Temperatur und Bodenfeuchte überschritten sind. Wie in Kapitel V Absatz 5.2.2 erläutert, wurde davon ausgegangen, dass eine Gefährdung für die Kultur ab einem Anteil von 10 % aktiver Drahtwürmer ausgeht. Mit dem entwickelten Modellansatz zur Prognose der Drahtwurmaktivität in Abhängigkeit der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte kann berechnet werden, ab welcher Bodentemperatur bzw. Bodenfeuchte der Anteil von 10 % aktiver Drahtwürmer überschritten wird. Diesem Entscheidungspunkt ist unter Verwendung von Wetterdaten und Bodenparametern das validierte Bodenfeuchtesimulationsmodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) vorgeschaltet (siehe Kapitel II Ansatz 3.3), sodass das überschreiten der Grenzwerte flächendeckend überprüft werden kann. Sind die Grenzwerte nicht überschritten, bricht die Prognose ab und startet am folgenden Tag erneut. Andernfalls erfolgte die Prognose einer Drahtwurmaktivität in der Fraßzone. In diesem Fall folgt eine zweite Modellausgabe, welche die Stärke des Drahtwurmauftretens in Bezug zur Bodenfeuchte in der jeweiligen Bodenart des Standortes ausgibt. Dieses Modell wurde aus den Daten der Laborversuche entwickelt und nutzt ebenfalls die simulierten Bodenfeuchtwerte als Inputparameter (Abbildung 128).

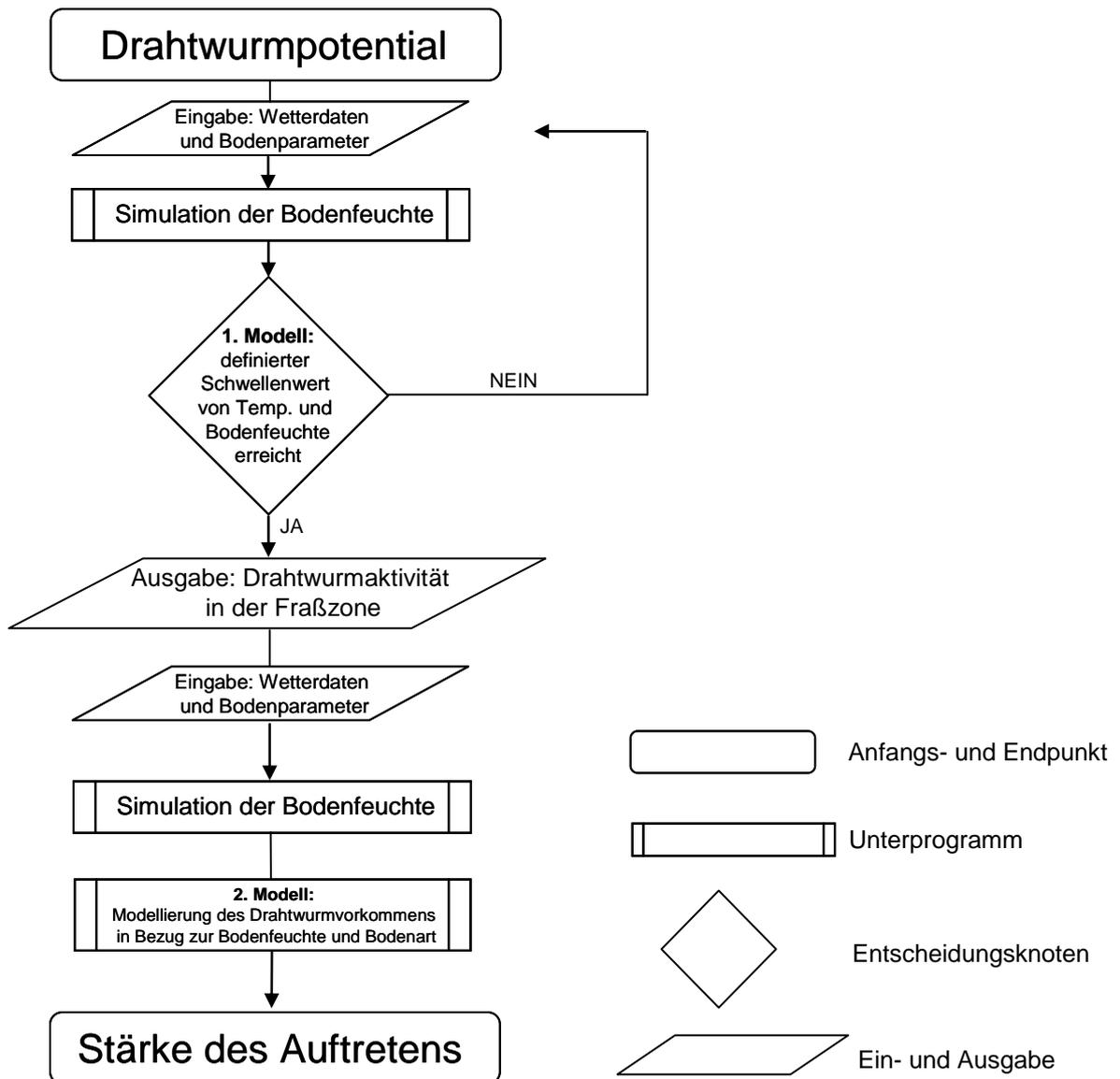


Abbildung 128: SIMAGRIO-W – Ablaufdiagramm der möglichen Drahtwurmprognose

Die Verknüpfung zwischen den beiden entwickelten Modellansätzen war möglich, da die Ergebnisse der Freilandkäfige zur von den Larven bevorzugten Bodenfeuchte in der Bodenart schluffiger Lehm in den Laborversuchen mit gleicher Bodenart bestätigt wurden. Die Feldkapazität in den Freilandkäfigen lag bei 32 Vol. % und entspricht damit in etwa einem Wassergehalt von 100 % der maximale Wasserkapazität in den Rohren der Laborversuche. Das Optimum der Drahtwurmaktivität in den Freilandkäfigen wurde bei einer Bodenfeuchte von 31 Vol. % beobachtet. Eine hohe Aktivität wurde zwischen 29 und 32 Vol. % Bodenfeuchte beobachtet. Das entspricht einem Wassergehalt von 90 bis 100 % der maximalen Wasserkapazität des Bodens in den Rohren der Laborversuche (Abbildung 120). Damit kann angenommen werden, dass der favorisierte Bereich der Bodenfeuchte für die Bodenart schluffiger Lehm zwischen den Freilandkäfigen und den Laborversuchen vergleichbar ist. Darauf aufbauend wurden die Ergebnisse zum Drahtwurm-vorkommen in den weiteren Bodenarten ins Freiland übertragen.

Am Ende des Prognoseablaufes soll das Modell SIMAGRIO-W einen täglichen Wert des prozentualen Auftretens des Drahtwurmpotentials eines Feldes ausgegeben.

7. Diskussion

Eines der Ziele dieser Arbeit war, das Grundlagenwissen über die Biologie der Drahtwürmer, speziell über den Einfluss der Parameter Bodenfeuchte und Bodentemperatur, zu erweitern. Ein weiterführendes Ziel bestand in der Entwicklung eines Prognosemodells zur Drahtwurmaktivität und zum Drahtwurmauftreten in den oberen 15 cm der Bodenschicht, um zukünftig eine Risikoabschätzung zum Auftreten von möglichen Fraßschäden treffen zu können. FURLAN (2005) wies auf die bestehenden großen Lücken in den Kenntnissen über die Biologie der Drahtwürmer hin. Seiner Meinung nach ist die Schließung dieser Lücken ein elementarer Bestandteil bei der Entwicklung von Modellen zur Drahtwurmprognose. PARKER und HOWARD (2001) hoben ebenfalls die Erarbeitung weiterer Datengrundlagen im Bereich Populationsdynamik und Biologie als Forschungsgebiete im Bereich Drahtwurm hervor.

Die Ergebnisse der durchgeführten Labor- und Freilandversuche zeigten, dass das Verhalten der Larven im Boden im Zusammenhang mit der Bodentemperatur, der Bodenfeuchte sowie der Bodenart steht. Während in den Laborversuchen die Verteilung der Larven in Bezug zur Bodenfeuchte untersucht wurde, konnte im Freiland die Aktivität der Larven in Bezug zur Bodenfeuchte und zur Bodentemperatur beobachtet werden. Diese Unterschiede ergeben sich aufgrund des Versuchsaufbaus. Im Labor wurde die Verteilung der Larven in Bezug zur Bodenfeuchte durch Sichtung des kompletten Bodenvolumens festgestellt, es können daher keine Aussagen hinsichtlich der Fraßaktivität der Larven getroffen werden. Im Freiland hingegen wurde die Fraßaktivität bestimmt, da das Auftreten der Drahtwürmer in den Köderfallen untersucht wurde.

In den Freilandversuchen wurde die Aktivität der Drahtwürmer in Beziehung zur Bodenfeuchte und Bodentemperatur über einen Zeitraum von zwei Jahren untersucht. Hierfür wurden Köderfallen in 15 cm Tiefe im Boden vergraben und das Auftreten der Larven in den Fallen untersucht. Ein Nachteil dieses Versuchsaufbaus bestand in der Tatsache, dass eine Lockwirkung der Fallen auf die Drahtwürmer existierte, welche durch das bei der Keimung des Mais und des Getreides in den Fallen ausströmende Kohlenstoffdioxid entsteht (PARKER 1994). Allerdings ist anzumerken, dass die Köderfallen ganzjährig in den Freilandversuchen eingegraben wurden und somit von einem relativ konstanten Einfluss des Kohlenstoffdioxides auf die Larven auszugehen ist. Die Veränderung des Verhaltens der Larven hinsichtlich ihrer Fraßaktivität, kann daher nicht auf diesen konstanten Einflussfaktor zurückzuführen zu sein. Zusätzlich ist anzumerken, dass das bei der Keimung und dem Pflanzenwachstum ausströmende Kohlenstoffdioxid einer natürlichen Feldsituation entspricht. Bei der Prognose des Risikos von Fraßschäden ist ebenfalls von einem Einfluss der Kultur auf die

Fraßaktivität der Drahtwürmer auszugehen. Durch den konstant vorhandenen Kohlenstoffdioxideinfluss in den Freilandkäfigen kann angenommen werden, dass die Lockwirkung bei ungünstigen Überlebensbedingungen aufgrund der Bodenfeuchte bzw. der Bodentemperatur keinen übergeordneten Einfluss darstellt. Damit schien der Versuchsaufbau für die untersuchte Fragestellung geeignet zu sein.

Im Verlauf der Versuchsdurchführung wurde festgestellt, dass die Charakteristika des vertikalen Verlaufs der Bodenfeuchte über das Jahr hinweg differieren. Während sich die erste Jahreshälfte durch einen homogenen vertikalen Verlauf der Bodenfeuchtwerte im Vergleich zwischen 15 und 80 cm Tiefe auszeichnete, differierte dieser in der zweiten Jahreshälfte stärker. Die mittleren Differenzen der Bodenfeuchte zwischen 15 und 80 cm Bodentiefe lagen in der ersten Jahreshälfte bei 0,5 Vol. % und einem Maximum der Abweichungen bei 2,7 Vol. %, wohingegen sie in der zweiten Jahreshälfte auf im Mittel 2,3 Vol. % und einem Maximum von 7,7 Vol. % anstiegen. Diese Werte ergaben sich bei der Messung der Bodenfeuchte in den Freilandkäfigen über einen Zeitraum von zweieinhalb Jahren. Hinsichtlich dieses Aspektes war zu analysieren, welche Parameter in einem Modellansatz zur Prognose der Drahtwurmaktivität in den oberen 15 cm Bodenschicht Relevanz finden sollten. Aus der Literatur (CAMPBELL (1937), LEES (1943), LAFRANCE (1968) und FURLAN (1998)) war herauszuarbeiten, dass die Larven hohe Temperaturen und niedrige Bodenfeuchten meiden (siehe Kapitel V Absatz 2). Diese Annahmen konnten im Hinblick auf die durchgeführten Freilandversuche bestätigt werden. Da niedrige Bodenfeuchtwerte auch in 80 cm Bodentiefe gemessen wurden (Abbildung 123), ist davon auszugehen, dass sich die Larven über trockene und warme Sommerperioden in großen Bodentiefen befinden. Davon ausgehend kann angenommen werden, dass Larven, welche sich in tiefen Bodenschichten befinden, natürlicherweise nicht reagieren, wenn die oberen Bodenschichten aufgrund niedrigerer Temperaturen und höheren Bodenfeuchtwerten ab Ende des Sommers wieder geeignete Bedingungen aufweisen. Erst wenn sich auch auf der Bodentiefe des Aufenthaltsortes der Larven geeignete Bedingungen einstellen, haben sie die Möglichkeit wieder in Schichten nahe der Bodenoberfläche zu migrieren, was ihnen den Zugang zu lebendem Pflanzenmaterial zur Nahrungsaufnahme ermöglicht.

Aufgrund dieser Überlegungen wurden zur Entwicklung einer Prognose zur Drahtwurmaktivität in den oberen 15 cm der Bodenschicht zwei Modellansätze entwickelt, einer für die erste Jahreshälfte und einer für die zweite Jahreshälfte, wobei die Einflussfaktoren hinsichtlich der Bodenfeuchte differierten. Nicht-lineare Regressionen wurden zur Erstellung eines Modells für die erste Jahreshälfte mit den Bodenfeuchtemesswerten in 15 cm Bodentiefe und zur Erstellung eines Modells für die zweite Jahreshälfte mit den Bodenfeuchtemesswerten in 80 cm Bodentiefe durchgeführt. In beiden Fällen ergab sich aus den berechneten Regressionen eine erwartete optimale Bodentemperatur in 15 cm Tiefe von 11 °C und eine optimale Bodenfeuchte von 31 Vol. % zur Vorhersage der relativen Drahtwurmaktivität. LAFRANCE (1968) erarbeitete in seinen Versuchen eine optimale Temperatur zur Drahtwurmaktivität von 13 °C in 10 cm Bodentiefe. Damit kann das erarbeitete Prognosemodell

zur Drahtwurmaktivität in den oberen 15 cm der Bodenschicht mit Literaturangaben verifiziert werden. Die Ergebnisse der Drahtwurmkäfige zeigen somit vergleichbare Ergebnisse zu weiteren durchgeführten Untersuchungen, wodurch die Methode als geeignet angesehen werden kann.

Da die bisherige Datenbasis noch nicht umfassend genug für eine Prognose des prozentualen Anteils aktiver Drahtwürmer in der Fraßzone war, wurde in einem ersten Ansatz eine einfache binäre Modellentscheidung der erarbeiteten Modellansätze validiert. Die Drahtwurmaktivität in der Fraßzone wurde mit einem Vorkommen von mindestens 10 % der relativen Aktivität definiert (Klasse 1), andernfalls wurde von keiner bzw. einer niedrigen Aktivität in der Fraßzone ausgegangen (Klasse 0) (Abbildung 126). Die Übereinstimmung der Klasseneinteilung der Boniturwerte mit den Werten der errechneten Funktionen ergab insgesamt eine Trefferquote über 90 % korrekter Prognosen. In Klasse 0 lag die Trefferquote mit ca. 90 % korrekten Prognosen etwas höher, in Klasse 1 erreichte der Anteil korrekter Prognosen ca. 80 %. Damit liegt ein erster Ansatz zur Prognose einer Drahtwurmaktivität in der Fraßzone in Abhängigkeit von Bodentemperatur und Bodenfeuchte vor.

Kritisch anzumerken ist, dass die Datenbasis derer Daten der Freilandkäfige, die Klasse 1 zugeordnet werden können, bisher wenige Boniturwerte aufweist. Während im Frühjahr 2010 am Standort der Freilandkäfige scheinbar geeignete Bedingungen zur Drahtwurmaktivität vorgeherrscht haben, mit einem Maximum von 32 Drahtwürmern in den Fallen pro Tag, scheinen im Frühjahr 2011 und ebenfalls im Herbst 2010 und 2011 keine geeigneten Bedingungen dominiert zu haben, da kaum Drahtwürmer in den Fallen vorzufinden waren. Aus Abbildung 123 wird deutlich, dass am Standort der Freilandkäfige im Herbst 2010 und 2011 sowie im Frühjahr 2011 im Vergleich zum Frühjahr 2010 niedrige Bodenfeuchtwerte gemessen wurden. Laut DWD (2011) war sowohl der März als auch der April 2011 deutlich trockener als das langjährige Monatsmittel, das Gleiche gilt für die Niederschlagsverhältnisse im Herbst des Jahres 2011, jeweils auf den Standort der Freilandkäfige bezogen. Damit liegt ein Erklärungsansatz für die niedrigen Fallenfangzahlen im Jahr 2011 vor. Infolge dessen, ließen sich nur wenige Werte dieses Jahres der Klasse 1 zuordnen. Die Ableitung der Optimalwerte für Bodentemperatur und Bodenfeuchte hinsichtlich der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone beruhen daher im Wesentlichen auf den Boniturdaten eines Jahres. Als positiv kann allerdings bewertet werden, dass sich die abgeleitete Optimaltemperatur mit den Ergebnissen von LAFRANCE (1968) deckt und sich auch hinsichtlich des entwickelten Modellansatzes keine Widersprüche in der Prognose der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone im Vergleich der beiden Jahre ergeben. Eine längerfristige Validierung des Modellansatzes wäre allerdings von elementarer Bedeutung.

Mit den in den Laborversuchen gewonnenen Parametern prozentualer Anteil der Summe des Drahtwurmorkommens korreliert mit dem Anteil an der maximalen Wasserkapazität je Rohrsegment wurden logistische Regressionen durchgeführt. Daraus ergaben sich Modellansätze zur Prognose des prozentualen Vorkommens von Drahtwürmern in Abhängigkeit der Bodenfeuchte in unterschiedlichen

Bodenarten. Mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,81** bis 0,92** kann der prozentuale Anteil an Drahtwürmern in der oberen Bodenschicht in verschiedenen Bodenarten vorhergesagt werden. Aufgrund des Versuchsaufbaus muss von einem Drahtwurm vorkommen und nicht von einer Drahtwurmmaktivität gesprochen werden. Während in den Freilandkäfigen tatsächlich die Fraßaktivität mithilfe der Köderfallen untersucht wurde, wurde im Labor das Vorkommen der Drahtwürmer in den Segmenten festgestellt, ohne das Nahrung in den Rohren angeboten wurde. Daraus ergibt sich ein möglicher Unterschied, denn es könnte sein, dass die Larven zwar bei einer bestimmten Bodenfeuchte vorkommen, aber die Bodenfeuchteverhältnisse so suboptimal sind, dass sie keine Fraßaktivität mehr zeigen. Aus den Laborversuchen ergeben sich daher die äußersten Grenzbereiche des Drahtwurm vorkommens und es muss davon ausgegangen werden, dass die Grenzbereiche der Fraßaktivität etwas innerhalb dieser äußeren Grenzen liegen können. Dieser Aspekt wäre zu bedenken, wenn sich im späteren Verlauf bei der Modellvalidierung Modellüberschätzungen ergeben.

Der von den Drahtwürmern tolerierte Bodenfeuchtebereich unterschied sich bei den verschiedenen getesteten Bodenarten (Abbildung 122). In der Bodenart mittel lehmiger Sand wurde ein geringerer Wasseranteil an der maximalen Wasserkapazität als in den schwereren Böden von den Larven akzeptiert. Demzufolge scheint es, dass das Risiko von Kulturschäden auf leichten Böden über einen größeren Bodenfeuchtebereich besteht. Zur Interpretation dieses Ergebnisses wurden charakteristische Werte der pF-Kurve der getesteten Böden bestimmt. Der Vergleich dieser Werte mit den Versuchsergebnissen der Laborversuche lässt den Schluss zu, dass das Drahtwurm vorkommen vom permanenten Welkepunkt bzw. der Saugspannung im Boden abhängig zu sein scheint. Im mittel lehmigen Sand wurde der permanente Welkepunkt bzw. eine Saugspannung von 4,2 pF bei einer Bodenfeuchte ermittelt, die 35 % der Feldkapazität entspricht (Tabelle 35). Ein hoher prozentualer Anteil der Drahtwürmer kam in den Laborversuchen bereits ab einem niedrigen Anteil Bodenwasser von der maximalen Wasserkapazität vor (Abbildung 122). Der permanente Welkepunkt in der Bodenart schluffiger Lehm lag bei einer Bodenfeuchte, die 65 % der Feldkapazität entspricht. Das Drahtwurm vorkommen in den Laborversuchen setzte bei dieser Bodenart erst ab einem erreichten Anteil an Bodenwasser von 65 % der maximalen Wasserkapazität ein (Abbildung 122). Der tolerierte Bodenfeuchtebereich scheint somit vom permanenten Welkepunkt bzw. des Bereiches der nutzbaren Feldkapazität abhängig zu sein. Dahingehend können Fraßschäden auf Feldern mit einer Bodenart, welche einen geringen Totwasseranteil an der Feldkapazität besitzen, innerhalb eines größeren Bodenfeuchtebereichs auftreten.

Eine Verknüpfung zwischen den Labor- und den Freilandversuchen war möglich, da die Ergebnisse der Freilandkäfige zu den von den Larven bevorzugten Bodenfeuchte in der Bodenart schluffiger Lehm in den Laborversuchen mit gleicher Bodenart bestätigt wurden. Die Feldkapazität in den Freilandkäfigen lag bei 32 Vol. % und entspricht damit in etwa 100 % der maximalen Wasserkapazität in den Rohren der Laborversuche. Das Optimum der Drahtwurmmaktivität in den Freilandkäfigen wurde bei einer Bodenfeuchte von 31 Vol. % beobachtet. Eine hohe Aktivität bestand zwischen 29

und 32 Vol. % Bodenfeuchte. Das entspricht einem Wassergehalt von 90 bis 100 % der maximalen Wasserkapazität des Bodens in den Rohren der Laborversuche (Abbildung 120). Damit ist der favorisierte Bereich der Bodenfeuchte für die Bodenart schluffiger Lehm zwischen den Freilandkäfigen und den Laborversuchen vergleichbar und die Ergebnisse zum Drahtwurmvorkommen in den weiteren Bodenarten können ins Freiland übertragen werden.

Aus dem Versuchsaufbau der Laborversuche lassen sich keine Rückschlüsse über das Drahtwurmvorkommen bei Bodenfeuchten über Feldkapazität schließen. Die Ergebnisse der Freilandkäfige und aus Literaturangaben (CAMPBELL 1937) zeigten, dass Bodenfeuchten über Feldkapazität von den Larven gemieden werden. Es ist davon auszugehen, dass dies in allen Bodenarten, aufgrund der Zunahme anaerober Bedingungen bei Bodenwasserübersättigung, einen einschränkenden Faktor darstellt. Somit scheint dieser Grenzwert für alle Bodenarten ins Freiland übertragbar.

PARKER und HOWARD (2001) sowie FURLAN (2005) forderten weitere Forschungsarbeit im Bereich der Biologie von Drahtwürmern. Ein Schritt die existierenden Lücken im biologischen Grundlagenwissen von Drahtwürmern zu schließen, wurde mit dieser Forschungsarbeit erzielt. Der mit dem Modell SIMAGRIO-W entwickelte Modellansatz zum Drahtwurmvorkommen und zur Drahtwurmaktivität in den oberen 15 cm der Bodenschicht bildet einen Schritt Richtung Risikoabschätzung bzw. die Umsetzung von integrierten Bekämpfungsmöglichkeiten in der Drahtwurmbekämpfung. Die in dieser Arbeit untersuchten Böden bildeten Vertreter für die jeweiligen Bodenartengruppen. Die Korrelation des von den Larven tolerierten Feuchtebereichs mit dem Bereich der nutzbaren Feldkapazität der jeweiligen Böden scheint plausibel. Allerdings kann im Rahmen dieser Arbeit nicht ausgeschlossen werden, dass sich weitere Bodenparameter wie beispielsweise Humusgehalt oder pH-Wert der Böden auf den tolerierten Feuchtebereich der Larven auswirken. Hierfür wäre weiterer Forschungsbedarf des von den Larven tolerierten Bodenfeuchtebereichs in identischen Bodenartengruppen von verschiedenen Standorten nötig. In diesem Rahmen könnten weitere Einflussfaktoren in der Drahtwurmprognose berücksichtigt bzw. ausgeschlossen werden.

8. Zusammenfassung

Der Lebenszyklus der häufigsten in Deutschland verbreiteten Schnellkäferarten (Coleoptera: Elateridae) der Gattung *Agriotes* (*A. lineatus* Linnaeus, 1767, *A. obscurus* Linnaeus, 1758, *A. sputator* Linnaeus, 1758, *A. sordidus* Illiger, 1807 und *A. ustulatus* Schaller, 1783) dauert vom Ei über verschiedene Larvenstadien bis zum vollentwickelten Käfer drei bis fünf Jahre. Die Larven, die sogenannten Drahtwürmer, durchlaufen während ihrer Entwicklung im Boden 8 bis 14 Larvenstadien und wachsen auf eine Länge von 3 cm an. Im Gegensatz zu Schnellkäfern, die keine Kulturschäden verursachen, fressen Drahtwürmer an den ackerbaulichen Kulturen (SCHEPL und PAFFRATH 2010).

Drahtwürmer sind in den letzten Jahren zu einem großen Problem im Ackerbau und hier vor allem in der Kartoffelproduktion geworden. Zusätzlich treten auch Schäden an Mais und im Getreide auf (PARKER und HOWARD 2001).

Die polyphagen Larven benötigen während ihrer Entwicklung im Boden lebendes Pflanzenmaterial (FURLAN 1998). Es ist bewiesen, dass Drahtwürmer durch intensiven Fraß mehrere, die Kultur schädigende Phasen besitzen (GRATWICK 1989 und DOANE 1981). FURLAN (1998) konnte aufzeigen, dass die Zeit, welche zur Nahrungsaufnahme genutzt wird, bis zu 20 % der Entwicklungszeit der Larven im Boden betragen kann. Die schädigenden Phasen sind jahreszeitenabhängig und in dem Zusammenhang mit der Bodentemperatur und der Bodenfeuchte korreliert. Ist die Bodenfeuchte oder die Bodentemperatur für die Larven nicht komfortabel, besitzen sie die Tendenz in Bodenschichten mit geeigneteren Bedingungen abzuwandern (McCOLLOCH and HAYES 1923). Nur wenn sich die Larven in den oberen Bodenschichten aufhalten, kann es zu Schäden an der Kultur kommen. Die genauen Grenzbereiche der Feuchteverhältnisse waren bisher unklar. Häufig war lediglich bekannt, ab welchen Temperaturen die Aktivität im Boden einsetzt (PARKER und HOWARD 2001).

Da sich die Bodenfeuchte im Falle der Fraßschäden durch Drahtwürmer auf das vertikale Migrationsverhalten der Larven und somit ihre Nähe bzw. Entfernung zur Kultur auswirkt, wurde in dieser Arbeit eine Modellierung der vertikalen Wanderung in Bezug zur Bodenfeuchte angestrebt. Die Reaktionen der Drahtwürmer auf Veränderungen ihres Feuchteumfelds wurde in Labor- und Halbfreilandversuchen genauer untersucht, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf den durch die Larven verursachten Schaden deuten und prognostizieren zu können.

Die Ergebnisse der Laborversuche zeigten, dass eine hochsignifikante Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil an der maximalen Wasserkapazität und der Summe des Drahtwurmorkommens besteht. Mithilfe der korrelierten Wertepaare konnte eine logistische Regression durchgeführt werden. Die Summe des Drahtwurmorkommens kann damit in Bezug zur maximalen Wasserkapazität des Bodens in den vier untersuchten Bodenarten modelliert werden. Das Bestimmtheitsmaß lag bei den berechneten Funktionen zwischen 0,81 und 0,92 (Abbildung 119 bis Abbildung 121).

Eine Kovarianzanalyse ergab keine signifikanten Unterschiede im Verhalten der Drahtwurmart in Bezug zur Bodenfeuchte. Das war das Ergebnis der Analyse der Differenzen zwischen den Steigungen mit einem Konfidenzintervall von 95 %. Das gleiche Ergebnis ergab sich bei der Kovarianzanalyse mit den Einflussfaktoren maximale Wasserkapazität (%) und Kultur (mit/ohne) auf die Summe des Drahtwurmorkommens (%). Im Post-Hoc-Test nach Tukey mit einem Konfidenzintervall von 95 % ergaben sich ebenfalls keine signifikanten Unterschiede im Verhalten der Drahtwurmart in Bezug zur Bodenfeuchte.

Im Freilandversuch wurden die Änderung der Bodenfeuchteverhältnisse, der Bodentemperatur und die Drahtwurmfallenfänge pro Fallentag über einen Zeitraum von zwei Jahren untersucht. Mit der in den

Drahtwurmkäfigen erhobenen Datenbasis wurden nicht-lineare Regressionen berechnet, wobei für die erste und die zweite Jahreshälfte die Einflussfaktoren differierten. Ausschlaggebend für die Prognose aktiver Drahtwürmer in der ersten Jahreshälfte waren die Faktoren Bodentemperatur und Bodenfeuchte in 15 cm Tiefe und für die zweite Jahreshälfte die Bodentemperatur in 15 cm und die Bodenfeuchte in 80 cm Tiefe. Die Differenzierung der Einflussfaktoren war nötig, da die Höhe der Bodenfeuchte nach der Sommerperiode zwischen 15 und 80 cm stark variierte. Da sich die Larven während der warmen und trockenen Sommerperiode in tiefere Bodenschichten zurückziehen, muss die Durchfeuchtung des Bodens bis in diese tiefen Schichten stattfinden, um eine Reaktion der Larven auf ihr Feuchteumfeld zu bewirken.

Mit den errechneten Funktionen kann eine Vorhersage zur Drahtwurmaktivität in der Fraßzone in Bezug zur Bodenfeuchte und zur Bodentemperatur mit einem Bestimmtheitsmaß von 0,54** in der ersten Jahreshälfte und 0,66** in der zweiten Jahreshälfte angegeben werden. Sie zeigen ein Maximum der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone bei 11 °C und 31 Vol. % Bodenfeuchte in dem vorliegenden Boden der Drahtwurmkäfige (Bodenart schluffiger Lehm). Die Varianzanalyse ergab einen hochsignifikanten Zusammenhang. Da die bisherige Datenbasis noch nicht umfassend genug für eine prozentuale Prognose der Drahtwurmaktivität in der Fraßzone ist, wurde in einem ersten Ansatz eine einfache binäre Modellentscheidung validiert. Die Drahtwurmaktivität in der Fraßzone wurde mit einem Vorkommen von mindestens 10 % der relativen Aktivität definiert (Klasse 1), andernfalls wurde von keiner bzw. einer niedrigen Aktivität in der Fraßzone ausgegangen (Klasse 0) (Abbildung 126). Die Validierung ergab in 90 % der Fälle eine korrekte Klassifizierung im Vergleich mit den Boniturdaten der Freilandkäfige.

PARKER und HOWARD (2001) sowie FURLAN (2005) forderten weitere Forschungsarbeit im Bereich der Biologie von Drahtwürmern. Ein Schritt die existierenden Lücken im biologischen Grundlagenwissen von Drahtwürmern zu schließen, wurde mit dieser Forschungsarbeit erzielt. Der entwickelte Modellansatz SIMAGRIO-W bildet einen Schritt in Richtung Risikoabschätzung bzw. die Umsetzung von integrierten Bekämpfungsmöglichkeiten in der Drahtwurmbekämpfung.

VI. Schlussfolgerungen und Ausblick

Im Rahmen dieser Forschungsarbeit wurde die Integration von Bodenfeuchte- und Bodenartmodulen in Modelle zur Prognose der Schaderreger *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, *Fusarium graminearum* Schwabe bzw. *F. culmorum* (W.G. Smith) Saccardo und der Larven der wichtigsten Elateridenarten *Agriotes lineatus* Linnaeus, *A. obscurus* Linnaeus, *A. sputator* Linnaeus, *A. sordidus* Illiger sowie *A. ustulatus* Schaller angestrebt. Ziel war es, eine Möglichkeit zur flächendeckenden Simulation der Bodenfeuchte zu erarbeiten. Hierbei war zu beachten, dass keine komplexe Modellierung von Sickerwasserprozessen angestrebt war, da sich die schädigenden Prozesse an der Kultur durch die unterschiedlichen Schaderreger hauptsächlich in den oberen 20 cm der Bodenschicht abspielen. Zusätzlich war es das Ziel, die gewonnenen Erkenntnisse zum Einfluss der Bodenparameter auf die Schaderreger in der Praxis in den Prognosemodellen nutzen zu können. Aus diesen Gründen war es sinnvoll, ein Verfahren zur Simulation der Bodenfeuchte zu nutzen, welches Eingangsparameter benötigt, die flächendeckend bzw. dem Modelnutzer als Eingabewerte zur Verfügung stehen. In Kapitel II wurde daher die Modellierung der Bodenfeuchte mit der Bilanzgleichung (PASCHOLD 2002) und einem Speichermodell (HÖRMANN 1998) validiert. In beiden Ansätzen wird ein mittlerer Wassergehalt des Bodens, bezogen auf die gewünschte Bodenschicht, auf Grundlage aktueller Wetterdaten und Angaben zur Bodenart bzw. zur Feldkapazität und dem Totwasseranteil berechnet.

Bei Simulationsmodellen kann davon ausgegangen werden, dass die Genauigkeit der Prognose zunimmt, je genauer die Inputwerte gemessen werden. Aus diesem Grund soll die Simulation der Bodenfeuchte im praktischen Einsatz in der Schaderregerprognose unter Verwendung hochaufgelöster Wetterdaten erfolgen. Als Eingangsparameter wurde auf interpolierte Wetterdaten (ZEUNER 2007) sowie Radarniederschlagsdaten des DWD, beide im Raster von einem Quadratkilometer, zurückgegriffen.

Die Validierung der beiden getesteten Bodenfeuchtesimulationsverfahren mit im Gelände erhobenen Bodenfeuchtwerten ergab im Korrelationstest nach PEARSON mit einem Signifikanzniveau von $\alpha = 0,01$ in allen Fällen eine hochsignifikante Korrelation. Die mittleren Abweichungen der Simulation von der Messung lagen mit dem Speichermodell SIMPEL (HÖRMANN 1998) niedriger als bei der Berechnung der Bodenfeuchte unter Verwendung der Bilanzgleichung (siehe Kapitel II). Während die Wetterdaten als Inputparameter aus den Messnetzen der 170 Wetterstationen des Deutschen Wetterdienstes und den 396 Wetterstationen der Pflanzenschutzdienste der Länder (KEIL & KLEINHENZ 2007) bzw. dem Radarmessnetz des DWD automatisiert zur Verfügung standen, wurden zur Validierung der Bodenfeuchtesimulationsmodelle die Angaben zur Bodenart bzw. zur Feldkapazität und dem Totwasseranteil aus den Schlagdaten entnommen.

Großmaßstäbige digitale Kartengrundlagen über Bodeneigenschaften stehen momentan nicht flächendeckend für Deutschland zur Verfügung. Das Landesamt für Geologie und Bergbau Rheinland-

Pfalz hat in Zusammenarbeit mit dem Bundesland Hessen aus den Bodenschätzungsdaten eine Methode zur Bildung von Ableitungen entwickelt. Aus diesen Daten stehen für Teile von Rheinland-Pfalz und Hessen thematische Karten, zum Beispiel zur Bodenart, im Maßstab 1:5000 zur Verfügung (LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ 2008). Ähnliche Arbeiten gibt es in weiteren Bundesländern. Allerdings geben diese Karten gemittelte Werte auf den durchwurzelbaren Bodenraum an (VORDERBRÜGGE 2006). Dadurch können Unterschiede zum Oberboden, also dem für die Schaderregerprognose relevanten Bereich, auftreten. Für den praktischen Einsatz der Bodenfeuchtesimulation in der Schaderregerprognose sollte dem Modellnutzer daher eine manuelle Möglichkeit der Eingabe von Bodenparametern zur Verfügung stehen bzw. das Prognoseergebnis für verschiedene Bodenarten ausgegeben werden können. Landwirte besitzen häufig Angaben zu Bodenparametern aus Bodenanalysen ihrer Schläge. Solange geeignete großmaßstäbige Bodenartenkarten in Deutschland nicht flächendeckend zur Verfügung stehen, empfiehlt sich daher für den praktischen Einsatz der Bodenfeuchtesimulationsmodelle in der Schaderregerprognose eine manuelle Möglichkeit zur Auswahl der Berechnungsgrundlage hinsichtlich der Bodenart anzubieten. Sollte sich die Verfügbarkeit großmaßstäbiger Bodenkarten innerhalb der nächsten Jahre deutlich verbessern, ist lediglich eine technische Verknüpfung der Bodenart bzw. der Feldkapazität und dem Totwasseranteil zu den quadratkilometergroßen Rasterzellen der Wetterdaten erforderlich, um eine komplett automatisierte Berechnung der Bodenfeuchte in der Schaderregerprognose erzielen zu können.

In Kapitel III wurden die Untersuchungen zum Einfluss der Bodenfeuchte auf den Schaderreger *P. infestans* dargestellt. Die Ergebnisse der Laborversuche zeigten, dass die Übertragung von Sporen des Pilzes durch den Boden bei hoher Bodenfeuchte erfolgreich verlaufen kann, der Pilz allerdings unter unsterilen Bedingungen seinen Antagonisten häufig unterlegen ist. In den Freilandversuchen wurde der Einfluss der Tage mit hoher Bodenfeuchte auf den Zeitpunkt des Erstauftretens untersucht. Es konnten Bodenfeuchtebereiche definiert werden, in denen es aufgrund ihrer Porengrößenklasse bzw. des vorhandenen frei verfügbaren Wassers zur Übertragung von Zoosporen über das Bodenmedium kommen kann. Mittels eines DNA-Nachweises konnte festgestellt werden, dass es eine positive Korrelation zwischen dem Anteil latent befallener Stängel und der Anzahl der Tage über Feldkapazität gibt. Die erfolgreiche unterirdische Infektion hatte allerdings keine Auswirkungen auf das Auftreten des visuellen Befalls. Auch aus einer Analyse von Boniturdaten der Jahre 2006 bis 2010 zum Erstauftreten von *P. infestans* ergaben sich keine Zusammenhänge zu Perioden mit hoher Bodenfeuchte. Die erarbeiteten Ergebnisse lassen die Integration eines Bodenmoduls im Modell SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007), welches das Erstauftreten von *P. infestans* prognostiziert, nicht sinnvoll erscheinen. Analysen zur Höhe des Startwertes in SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007) ergaben hingegen, den Einfluss hoher Bodenfeuchte auf das simulierte Erstauftreten deutlich zu reduzieren. Die mit einem abgeschwächten Einfluss der Bodenfeuchte berechneten Prognosen ergaben im Mittel ein um neun Tage näher am Erstauftretenstermin liegendes Prognoseergebnis.

Somit ergab sich, trotz der nicht durchzuführenden Integration eines Bodenmoduls in SIMBLIGHT1 (KLEINHENZ et al. 2007), ein grundlegender Nutzen des validierten Bodenfeuchtesimulationsmodells SIMPEL (HÖRMANN 1998). Durch die Möglichkeit der nachträglichen Berechnung der Bodenfeuchte aus historischen Wetterdaten für die relevanten Standorte konnte ein großer Datensatz von Bonituren zum Erstauftreten von *P. infestans* nutzbar gemacht werden, obwohl in der Vergangenheit keine Messungen der Bodenfeuchte an den relevanten Standorten durchgeführt wurden. Mit dem zur Verfügung stehenden Bodenfeuchtesimulationsmodell auf Grundlage allgemein verfügbarer Wetterdaten steht zukünftig ein Instrument zur Verfügung, um den Einfluss der Bodenfeuchte auf andere Schaderreger auch auf Grundlage historischer Boniturdaten deuten zu können.

Aus den Ergebnissen in Kapitel IV ergab sich die Möglichkeit, ein Bodenmodul in das bereits existierende Prognosemodell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006), zur Prognose des Befallsrisikos von Ährenfusarium, integrieren zu können. Die Ergebnisse der Laborversuche zeigten, dass das Abtrocknungsverhalten von Vorfruchtresten in Abhängigkeit der Temperatur, der relativen Luftfeuchte sowie der Bodenart erfolgt. Aus den Versuchsergebnissen konnten bodenartspezifische Abtrocknungsfunktionen errechnet werden, wobei das Bestimmtheitsmaß der Regressionen zwischen 0,66 und 0,71 lag. Zur Verwendung der korrekten Funktionen muss zukünftig als Startwert im Modell die Bodenartenhauptgruppe angegeben werden. Die Validierungsergebnisse zeigten, dass die Integration der Bodenparameter im Prognosemodell FUS-OPT (WEINERT et al. 2006) eine gute Prognose des täglichen Infektionspotentials ermöglicht. Ein entscheidender Vorteil der Anpassungen besteht in der genauer abgebildeten Berechnung der möglichen Perithezienbildung und Sporenausschleuderung auf den Vorfruchtresten. Durch die genauere Berechnung des auf den Vorfruchtresten ausgebildeten Infektionspotentials kann eine bessere Abschätzung des Risikos einer möglichen Ähreninfektion bei geeigneten Witterungsbedingungen ausgegeben werden. Durch die Ausgabe von Risikokarten als neuer Modelloutput steht eine weitere Möglichkeit zur frühzeitigen Erkennung von Gebieten mit einem hohen Risiko zur Überschreitung relevanter DON-Grenzwerte zu Verfügung.

Die Erarbeitung des neuen Prognosemodells SIMAGRIO-W, zum Auftreten der Drahtwürmer in der oberen Bodenzone, erfolgte in Kapitel V. In den Versuchen wurde der Einfluss der Bodentemperatur, der Bodenfeuchte und der Bodenart untersucht. In dem neu erarbeiteten Modell geht die Bodenfeuchte als grundlegender Faktor in die Schaderregerprognose ein, da sich die schädigenden Prozesse an den Pflanzen komplett auf den unterirdischen Bereich beziehen. Das beobachtete Migrationsverhalten der Drahtwürmer war entscheidend von der Bodenfeuchte abhängig. Die Laborversuche zeigten hierbei, dass eine hochsignifikante Korrelation zwischen dem prozentualen Anteil an der maximalen Wasserkapazität eines Bodens und dem Drahtwurmvorkommen besteht. Im Freiland zeigten die Drahtwürmer ihre höchste Aktivität in der Fraßzone bei einer Bodentemperatur von 11 °C und einer Bodenfeuchte von 31 Vol. % bzw. 95 % Feldkapazität in der Bodenart schluffiger Lehm. Eine

Varianzanalyse ergab ebenfalls einen hochsignifikanten Zusammenhang der Parameter. Da sich die Larven während der Sommerperiode in tiefere Bodenschichten zurückziehen (FURLAN 1998), ergab sich aus den Versuchen allerdings, dass die Durchfeuchtung des Bodens bis in tiefere Bodenschichten, bis 80 cm Tiefe, stattfinden muss, um eine Reaktion der Larven auf ihr Feuchteumfeld zu bewirken. Die Entwicklung des Prognosemodells SIMAGRIO-W fand auf Grundlage von Messwerten zur Bodenfeuchte und Bodentemperatur statt. Die Validierung des Bodenfeuchtesimulationsmodells SIMPEL (HÖRMANN 1998) wurde in einer Tiefe von 20 cm durchgeführt. Eine Validierung zusätzlich in 80 cm Tiefe war im Rahmen dieser Arbeit nicht durchzuführen. SIMPEL berechnet den mittleren Bodenwassergehalt bezogen auf die angegebene Bodensäule. Da das Bodenfeuchteoptimum zur Drahtwurmakktivität bei ca. 95 % Feldkapazität lag, kann davon ausgegangen werden, dass bei einem von SIMPEL ausgegebenen mittleren Wassergehalt von annähernd 100 % Feldkapazität die komplette in die Berechnung eingegangene Bodensäule durchfeuchtet ist. Damit kann angenommen werden, dass für diesen speziellen Fall das Modell SIMPEL auch für die Berechnung des Bodenwassergehaltes bezogen auf eine Bodensäule von 80 cm genutzt werden kann. Allerdings wäre, vor allem bei niedrigen Trefferquoten des Prognosemodells SIMAGRIO-W, eine aufwendige Validierung des Modells SIMPEL in 80 cm Tiefe empfehlenswert. Eine weitere Möglichkeit zur Integration solch komplexer Einflüsse der Bodenfeuchte auf die Schaderreger wäre die Überprüfung der Eignung eines Mehrschichtspeichermodells mit mehreren Bodenspeichern (siehe Kapitel II Absatz 2.5). Für die praktische Schaderregerprognose stellt sich dann wiederum das Problem fehlender Inputwerte der Bodenparameter in verschiedenen Bodentiefen.

Im Rahmen dieser Arbeit konnte der Einfluss der Bodenfeuchte und der Bodenart auf die Schaderreger *Phytophthora infestans*, *Fusarium graminearum* bzw. *F. culmorum* und die Larven der fünf Elateridenarten *Agriotes lineatus*, *A. obscurus*, *A. sputator*, *A. sordidus* sowie *A. ustulatus* genauer parametrisiert werden. Somit konnte eine Verfeinerung bzw. Optimierung der Prognosemodelle erreicht werden. Dies kann die Terminierung von Befallskontrollen weiter optimieren, die Feststellung der Bekämpfungsnotwendigkeit verbessern und somit langfristig zu einer Reduzierung vorbeugender Pflanzenschutzmittelanwendungen und damit zu verminderten Umweltbelastungen führen. Die hohe Übereinstimmung der Validierungsergebnisse der simulierten Bodenfeuchtwerte mit den im Gelände gemessenen Werten ermöglicht zukünftig eine einfachere Integration der Bodenfeuchte als befallsfördernder bzw. -auslösender Faktor auch in anderen Schaderregermodellen. Prinzipiell muss davon ausgegangen werden, dass weitere als die hier untersuchten abiotischen Faktoren Auswirkungen auf Schaderreger und damit die schädigenden Prozesse an den Pflanzen haben können. Hierbei kommen Bodenparameter wie Lagerungsdichte oder die Zusammensetzung der mineralischen und organischen Bestandteile des Bodens, aber auch der Faktor Relief und in diesem Zusammenhang der Oberflächenabfluss in Betracht. Die Erforschung zusätzlicher Parameter könnte zu einer weiteren Verfeinerung der Schaderregermodelle beitragen.

Literatur

- ADLER, N. (2000): Untersuchungen zum Befall von Kartoffeln mit *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary mittels visueller Bonituren und PCR-Methoden. Dissertation, Technische Universität München
- AGRIOS, G.N. (2005): Plant Pathology, London
- AMELS, L. (2006): Einfluss von Umweltfaktoren auf das Inokulumpotential vom *Gibberella zeae* (*Fusarium graminearum*) und die Infektion von Weizenähren. Masterarbeit, Göttingen
- ANDRIES, C., JAROSZ, J. und Trail, F. (2000): Effects of Rainfall and Temperature on Production of Perithecia by *Gibberella Zeae* in Field Debris in Michigan. In: 2000 National Fusarium Head Blight (NFHB) Forum, Michigan State University: Department of Botany and Plant Pathology, S. 118-122
- BARTELS, H., WEIGL, E., REICH, T., LANG, P., WAGNER, A., KOHLER, O. und GERLACH, N. (2004): Projekt RADOLAN - Routineverfahren zur Online-Aneicherung der Radarniederschlagsdaten mit Hilfe von automatischen Bodenniederschlagsstationen (Ombrometer), Offenbach
- BÄßLER, R. (2005): Primärbefall der Kartoffeln (*Solanum tuberosum* L.) mit *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary unter Berücksichtigung zweier physikalischer Bodenparameter und einer Pflanzgutbeizung. Dissertation, München
- BAUER, A. (2008): Untersuchungen zur epidemiologischen Entwicklung von *Fusarium* sp. in Weizen während der Vegetationsperiode und im Erntegut mit Hilfe molekularer Methoden. Dissertation, München
- BECK, R. und LEPSCHY, J. (2000): Ergebnisse aus dem Fusarium-Monitoring 1989-1999 – Einfluss der produktionstechnischen Faktoren Fruchtfolge und Bodenbearbeitung. In: LBP „Risiken durch den Ährenparasiten *Fusarium graminearum* – Ergebnisse eines LBP-Forschungsverbands“, München, S. 39-47
- BILLWITZ, K. (1997): Allgemeine Bodengeographie. In: HENDL, M. und LIEDTKE, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie, Gotha. S. 233-327
- BÖHM, H. (1964): Eine Klimakarte der Rheinlande. In: Erdkunde Band 18, S. 202-206
- BOYD, A.E.W. (1980): Development of potato blight (*Phytophthora infestans*) after planting infected seed tubers. In: Annals of Applied Biology 95, S. 301-309
- BUNDESSORTENAMT (Hrsg.) (2011): Beschreibende Sortenliste 2011 - Getreide, Mais, Ölfrüchte, Leguminosen, Rüben, Zwischenfrüchte, Hannover
- SCHICK, R. und KLINKOWSKI, M. (Hrsg.) (1961): Die Kartoffel (Ein Handbuch), VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin
- BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE, GEOLOGISCHE LANDESÄMTER IN DER BUNDESREPUBLIK DEUTSCHLAND (2005): Bodenkundliche Kartieranleitung, Hannover
- BURGESS, L.W. (1981): General ecology of the fusaria. In: Fusarium: Diseases, Biology and Taxonomy, Pennsylvania State, S. 225-235
- CAMPBELL, R.E. (1937): Temperature and moisture preference of wireworms. In: Ecology 18, S. 479-489

- CROSIER, W. (1934): Studies on the Biology of *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary, Cornell University
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2005): RADOLAN/RADVOR-OP – Beschreibung des Kompositformats Version 2.0, Offenbach
- DEUTSCHER WETTERDIENST (2009): RADOLAN Kurzzusammenfassung, Offenbach
- DIETRICH, J. und SCHÖNIGER, M. (2003): Hydroskript: Online-Skript zur Hydrologie, <http://www.hydroskript.de>, 10.10.2010
- DIN – Deutsches Institut für Normung e. V. (Hrsg.) (2007): DIN 19683. Bodenbeschaffenheit – Physikalische Laboruntersuchungen
- DOANE, J.F., LEE, Y.W., KLINGLER, J. und WESCOTT, N.D. (1975): The orientation response of *Ctenicera destructor* and other wireworms (Coleoptera: Elateridae) to germinating grain and carbon dioxide. In: The Canadian Entomologist 107, S. 1233-1252
- DOANE, J.F. (1981): Evaluation of a larval trap and baits for monitoring the seasonal activity of wireworms in Saskatchewan. In: Environmental Entomology 10, S. 335-342
- DVWK - Deutscher Verband für Wasserwirtschaft und Kulturbau e.V. (1996): Ermittlung der Verdunstung von Land- und Wasserflächen. Merkblätter zur Wasserwirtschaft, Bonn
- FABIG, I. (2007): Die Niederschlags- und Starkregenentwicklung der letzten 100 Jahre im Mitteldeutschen Trockengebiet als Indikatoren möglicher Klimaänderung, Halle-Wittenberg
- FELD, S.J., MENGE, J.A. und STOLZY, L.H. (1990): Influence of drip and furrow irrigation on *Phytophthora* root rot of citrus under field and greenhouse conditions. In: Plant Disease 74, S. 21-27
- FISCHER, H. (1989): Rheinland-Pfalz und Saarland: eine geographische Landeskunde, Darmstadt
- FURLAN, L. (1996): The biology of *Agriotes ustulatus* Schaller (Col., Elateridae). I. Adults and oviposition. In: Journal of Applied Entomology 120, S. 269-274
- FURLAN, L. (1998): The biology of *Agriotes ustulatus* Schaller (Col., Elateridae). II. Larval development, pupation, whole cycle description and practical implications. In: Journal of Applied Entomology 122, S. 71-78
- FURLAN, L. (2005): An IPM approach targeted against wireworms: What has been done and what has to be done. In: IOBC – Bulletin 28, S. 91-100
- GEISLER, G. (1988): Pflanzenbau: Ein Lehrbuch; biologische Grundlagen und Technik der Pflanzenproduktion, Berlin
- GISI, U., ZENTMYER, G. A. und KLURE, L. J. (1980): Production of sporangia by *Phytophthora cinnamomi* and *P. palmivora* in soils at different matric potentials. In: Phytopathology 70, S. 301-306
- GLUGLA, G. (1969): Berechnungsverfahren zur Ermittlung des aktuellen Wassergehalts und Gravitationswasserabflusses im Boden. In: Albrecht-Thaer-Archiv 13, S. 371-376
- GOUGH, H.C. und EVANS, A.C. (1942): Some notes on the biology of the click beetles. *Agriotes obscurus* (L.) and *A. sputator* (L.). In: Annals of Applied Biology 29, S. 275-279
- GRATWICK, M. (Hrsg.) (1989): Potato Pests. MAFF Reference Book 187. London: HMSO, London.

- HALLMANN, J., QUADT-HALLMANN, A. und von TIEDEMANN, A. (2007): Phytomedizin – Grundwissen Bachelor, Stuttgart
- HÄNNI, H. (1949): Beitrag zur Biologie und Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule der Kartoffel, verursacht durch *Phytophthora infestans* (Mont.) de By.. In: *Phytopathologische Zeitschrift* 15, S. 209-286
- HAUDE, W. (1955): Zur Bestimmung der Verdunstung auf möglichst einfache Weise. In: *Mitteilungen Deutscher Wetterdienst* 11, S. 1-24
- HEITFUß, R. (2000): Pflanzenschutz – Grundlagen der praktischen Phytomedizin. Stuttgart
- HENDL, M. und LIEDTKE, H. (Hrsg.) (1997): *Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie*, Gotha
- HEUEL, E.-M. (2004): *Quantitative Niederschlagsbestimmung aus Radardaten – Ein Vergleich von unterschiedlichen Verfahren unter Einbeziehung der Statistischen Objektiven Analyse*, Bonn
- HOFFMANN, G.M. und SCHMUTTERER, H. (1999): *Parasitäre Krankheiten und Schädlinge an landwirtschaftlichen Kulturpflanzen*, Stuttgart
- HOOKER, D. C. und SCHAAFSMA, A. W. (2003): The DONcast model: using weather variables pre- and post-heading to predict Deoxynivalenol content in winter wheat. In: *Aspects of Applied Biology* 68, S. 117-122
- HÖRMANN, G. (1997): SIMPEL – ein einfaches, benutzerfreundliches Bodenwassermodell zum Einsatz in der Ausbildung. In: *Deutsche Gewässerkundliche Mitteilungen* 41, S. 67-72
- HÖRMANN, G. (1998): SIMPEL – Speichermodell zum Bodenwasserhaushalt, Kiel
- HÖRMANN, G. et al. (2003): *Methodenleitfaden zur Bestimmung der Wasserhaushaltskomponenten auf Level II-Flächen*, Kiel
- HUWE, B. (1992): *WHNSIM - A Model to Simulate the Water, Heat and Nitrogen Budget of Agricultural Fields*, Bayreuth
- JETTEN, V. (2002): *LISEM user manual - version 2.x. (Draft version)*, Utrecht
- JOSSI, W. und BILGER, F. (1997): Auftreten und Schadenprognose von Drahtwürmern in Feldkulturen. In: *Agraforschung* 4, S. 157-160
- JUDELSON, H. und TOOLEY, P. (2000): Enhanced Polymerase Chain Reaction Methods for Detecting and Quantifying *Phytophthora infestans* in Plants. In: *Phytopathology* 90, S. 1112-1118
- KEIL, B. und KLEINHENZ, B. (2007): AgmedaWin – a tool for easy and flexible management of meteorological data. In: *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 37, S. 335-338
- KEIL, S. (2007): *Entscheidungskonzept zur Bewertung der epidemiologischen Relevanz eines Befallsereignis bei der Rebenperonospora*. Dissertation, Universität Hohenheim
- KLEINHENZ, B. und ROßBERG, D. (2000): Structure and development of decision-support systems and their use by the State Plant Protection Services in Germany. In: *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 30, S. 93-97
- KLEINHENZ, B., FALKE, K., KAKAU, J. und ROßBERG, D. (2007): SIMBLIGHT1 - A new model to predict first occurrence of potato late blight. In: *Bulletin OEPP/EPPO Bulletin* 37, S. 339-343

- KÖHLER, H. (2008): Einsatz von Wetterstationen im Gartenbau und Landwirtschaft. In: Monatsschrift 96, S. 192-193
- KOMKA, G. und HERDOVICS, M. (2003): Qualitätserhaltung von Weizen im Laufe der Lagerung. In: Landtechnik in den Ackerbaugebieten in Ungarn, Slowakei und Österreich, S. 77-80
- KRANZ, J. (1996): Epidemiologie der Pflanzenkrankheiten - Eine Einführung in Grundlagen, Methoden und praktische Anwendung, Stuttgart
- KREUTZIGER, Y. (2006): Rückkopplungseffekte verschieden diverser Grünlandökosysteme auf die Komponenten des Bodenwasserhaushalts an einem Auestandort der Saale – Ergebnisse des Jenaer Biodiversitätsexperiments. Dissertation, Friedrich-Schiller-Universität Jena
- KRICK, B. (2008): Untersuchung von Strohballen und Strohballenkonstruktionen hinsichtlich ihrer Anwendung für ein energiesparendes Bauen unter besonderer Berücksichtigung der lasttragenden Bauweise. Dissertation, Universität Kassel
- LACEY, J. (1965): The infectivity of soils containing *Phytophthora infestans*. In: Annals of Applied Biology 56, S. 363-380
- LAFRANCE, J. (1968): The seasonal movements of wireworms (Coleoptera: Elateridae) in relation to soil moisture and temperature in the organic soils of southwestern Quebec. In: The Canadian Entomologist 100, S. 801-807
- LANG, P. (1997): Niederschlagsquantifizierung auf der Basis von Radardaten. In: promet – metrologische fortbildung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), 26. Jahrgang, Heft 1/2, S. 22-31
- LANG, P. (1997): Zellentwicklung und konvektive Niederschlagsprozesse aus Sicht eines Radars. In: promet – metrologische fortbildung. Deutscher Wetterdienst (Hrsg.), 26. Jahrgang, Heft 1/2, S. 43-52
- LEES, A.D. (1943): On the behaviour of wireworms of the genus *Agriotes* Esch. (Coleoptera, Elateridae) I. Reactions to humidity. In: Journal of Experimental Biology 20, S. 43-53
- LIEDTKE, H. (1973): Klimatypen in Rheinland-Pfalz. In: Topographischer Atlas Rheinland-Pfalz, S. 24-25
- LÜDECKE, D. und LÜDECKE, C. (2000): Thermodynamik: Physikalisch-chemische Grundlagen der thermischen Verfahrenstechnik, Berlin
- MACDONALD, J. D. und DUNIWAY, J. M. (1978): Influence of the matric and osmotic components of water potential on zoospore discharge in *Phytophthora*. In: Phytopathology 68, S. 751-757
- MARCINEK, J. (1997): Allgemeine Hydrogeographie. In: HENDL, M. und LIEDTKE, H. (Hrsg.): Lehrbuch der Allgemeinen Physischen Geographie, Gotha. S. 449-509
- MARX, A. (2007): Einsatz gekoppelter Modelle und Wetterradar zur Abschätzung von Niederschlagsintensitäten und zur Abflussvorhersage. Dissertation, Universität Stuttgart: Institut für Wasserbau
- MCCOLLOCH, J.W. und HAYES, W.P. (1923): Soil temperature and its influence on white grub activities. In: Ecology 4, S. 29-36
- MENSE-STEFAN, A. (2005): Standortdifferenzierte Abschätzung von Sickerwasserraten in Hessen – Ein Beitrag zur Ermittlung von Stofffrachten aus dem Boden, Mainz

- MITZUBUTI, E.S.G. und FRY, W.E. (1998): Temperature Effects on Developmental Stages of Isolates from Three Clonal Lineages of *Phytophthora infestans*. In: *Epidemiology*, S. 837-843
- MOLLIER, R. (1932): *Neue Tabellen und Diagramme für Wasserdampf*, Berlin
- PARKER, W.E. (1994): Evaluation of the use of food baits for detecting wireworms (*Agriotes* spp., Coleoptera: Elateridae) in fields intended for arable crop production. In: *Crop Protection* 13, S. 271-276
- PARKER, W.E. und J.J. HOWARD (2001): The biology and management of wireworms (*Agriotes* spp.) on potato with particular reference to the UK. In: *Agricultural and Forest Entomology* 3, S. 85-98
- PASCHOLD, P.-J., KLEBER, J. und MAYER, N. (2002): Geisenheimer Bewässerungssteuerung. In: *Zeitschrift für Bewässerungswirtschaft* 37, S. 5-15
- PASCHOLD, P.-J. und KLEBER, J. (2006): Vergleich von Bodenfeuchtesensoren. Tagung "Bewässerung im Gartenbau" (26.9.2006), Geisenheim
- PASCHOLD, P.-J., KLEBER, J. und MAYER, N. (2010): *Geisenheimer Bewässerungssteuerung*, Geisenheim
- PAUL, P.A., EL-ALLAF, S.M., LIPPS, P.E. und MADDEN, L.V. (2004): Rain Splash Dispersal of *Gibberella zeae* Within Wheat Canopies in Ohio. In: *Phytopathology* 94, S. 1342-1349
- PENMAN, H.L. (1956): Estimating evaporation. In: *Transactions - American Geophysical Union* 37, S. 43-46
- PETTERSON, H. (1995): Trichothecene occurrence in european cereals - a review. In: *Proceedings 17. Mykotoxin-Workshop*, S. 155-158
- PORTER, L.D., DASGUPTA, N. und JOHNSON, D.A. (2005): Effects of Tuber Depth and Soil Moisture on Infection of Potato Tubers in Soil by *Phytophthora infestans*. In: *Plant Disease* 89, S. 146-152
- RACCA, P. (2011): mündliche Mitteilung
- RACCA, P. (2012): mündliche Mitteilung
- RENGER, M. und STREBEL, O. (1980): Beregnungsbedarf landwirtschaftlicher Kulturen in Abhängigkeit vom Boden. In: *Wasser und Boden* 12, S. 572-575
- RICHARDS, L.A. (1931): Capillary conduction of liquids through porous mediums. In: *Physics* 1, S. 318-333
- RÖHRIG, M. und SANDER, R. (2004): ISIP – online plant protection information in Germany. In: THYSEN, I. und HOČEVAR, A. (Hrsg.): *Online Agrometeorological Applications with Decision Support on the Farmer Level. Cost Action 718: Meteorological Applications for Agriculture. Dina Research Report 109*, S. 41-47
- ROßBERG, D., GUTSCHE, V., ENZIAN, S. und WICK, M. (2000): *NEPTUN 2000 – Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Ackerbau Deutschlands*, Braunschweig

- SAUER, A. (2004): Vergleichende Untersuchungen zur Anwendbarkeit von physikalisch basierten Bodenerosionsmodellen – Einsatz von EROSION 2D/3D und LISEM auf weinbaulich genutzten Testflächen im Rheingau. Diplomarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz
- SCHALLER, K. (2000): Praktikum zur Bodenkunde und Pflanzenernährung, Geisenheim
- SCHACHTSCHABEL, P. (1989): Lehrbuch der Bodenkunde, Heidelberg
- SCHEFFER, F. und SCHACHTSCHABEL, P. (2010): Lehrbuch der Bodenkunde, Heidelberg
- SCHEPL, U. und PAFFRATH, A. (2004): Drahtwürmer im ökologischen Kartoffelanbau. In: Bundesprogramm Ökologischer Landbau, S. 1-8
- SCHEPL, U. und PAFFRATH, A. (2005a): Strategies to regulate the infestation of wireworms (*Agriotes* spp.) in organic potato farming: Results. In: IOBC – Bulletin 28, S. 101-104
- SCHEPL, U. und PAFFRATH, A. (2005b): Status-Quo-Analysis and development of strategies to regulate the infestations of wireworms (*Agriotes* spp. L.) in organic potato farming. In: IOBC – Bulletin 28, S. 105-108
- SCHEPL, U. (2008): Löcher in Kartoffeln – Problem Drahtwurm. In: Kartoffelanbau 4, S. 124-127
- SCHEPL, U. und PAFFRATH, A. (2010): Der Drahtwurm...ein Schädling auf dem Vormarsch – Möglichkeiten der Regulierung, Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, Bonn
- SCHLENZIG, A. (1997): Epidemie und latenter Primärbefall von *Phytophthora infestans* an Kartoffeln sowie Charakterisierung von Freilandisolaten des Erregers. Dissertation, München
- SCHÖBER-BUTIN, B. (2001): Die Kraut- und Braunfäule der Kartoffel und ihr Erreger *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary. In: Mitteilungen Biologische Bundesanstalt Land-Forstwirtschaft 384, S. 1-64
- SPONAGEL, H. (1980): Zur Bestimmung der realen Evapotranspiration landwirtschaftlicher Kulturpflanzen. In: Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe und die Geologischen Landesämter in Deutschland (Hrsg.): Geologisches Jahrbuch, Reihe F, Heft 9, S. 3-87
- STEIN, J. M., OSBORNE, L. E., BONDALAPATI, K. D., GLOVER, K. D. und NELSON, C. A. (2009): Fusarium Head Blight Severity and Deoxynivalenol Concentration in Wheat in Response to *Gibberella zae* Inoculum Concentration. In: Phytopathology 99, S. 759-764
- STOLZY, L. H., LETEY, J., KLOTZ, L. J. und LABANAUSKAS, C. R. (1965): Water and aeration as factors in root decay of *Citrus sinensis*. In: Phytopathology 55, S. 270-275
- SUTTON, J. C. (1982): Epidemiology of wheat head blight and maize ear rot caused by *Fusarium graminearum*. In: Canadian Journal of Plant Pathology 4, S. 195-209
- TREPL, L. (2000): Verbundprojekt WAVES - Statusbericht der ersten Hauptphase, Freising-Weihenstephan
- TSCHÖPE, B., KLEINHENZ, B., FALKE, K., ROßBERG, D. und KAKAU, A. (2010): Erstaufretensmodelle SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 – Funktion, Validierung und Umsetzung im Warndienst. Vortrag: DPG Arbeitskreis Integrierter Pflanzenschutz – Projektgruppe Kartoffel (04.03.2010), Braunschweig
- TURC, L. (1961): Evaluation des besoins en eau d'irrigation evapotranspiration potentielle. In: Annals of Agronomy 12, S. 13-49

- ULLRICH, J. (1957): Die Biologie und Epidemiologie von *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. In: Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes 9, S. 129-137
- VANCLOOSTER, M., VIANE, P., DIELS, J. und CHRISTIAENS, K. (1994): WAVE a mathematical model for simulating water and agrochemicals in the soil and vadose environment, Belgien
- VAN DAM, J. C., HUYGEN, J., WESSELING, J. G., FEDDES, R. A., KABAT, P., VAN WALSUM, P. E. V., GROENENDIJK, P. und VAN DIEPEN, C. A. (1997): Theory of SWAP version 2.0 - Simulation of water flow, solute transport and plant growth in the Soil-Water-Atmosphere-Plant environment, Wageningen
- VAN DER ZAAG, D.E. (1956): Overwintering en Epidemiologie van *Phytophthora infestans*, tevens einige nieuwe bestrijdingsmogelijkheden. In: Tijdschr. Planteziekten 62, S. 69-156
- VERORDNUNG (EG) Nr. 1881/2006 DER KOMMISSION vom 19. Dezember 2006 zur Festsetzung der Höchstgehalte für bestimmte Kontaminanten in Lebensmitteln. In: Amtsblatt der Europäischen Union L364/5
- VON HOYNINGEN-HUENE, J. (1983): Die Interzeption des Niederschlags in landwirtschaftlichen Pflanzenbeständen. In: DVWK (Hrsg.): Einfluß der Landnutzung auf den Gebietswasserhaushalt, S. 1-53
- VORDERBRÜGGE, T. (2006): Methodendokumentation – Ableitung der nFK für Acker aus dem Klassenzeichen der Bodenschätzung, Mainz
- WEINERT, A., VON TIEDEMANN, A., BRANDFAß, C. und BRAUN, C. (2006): Entwicklung einer Computer gestützten Entscheidungshilfe zur Minimierung des Befallsrisikos durch Ährenfusariosen und der Toxinbelastung sowie zur Optimierung der Bekämpfung, <http://download.ble.de/02HS023.pdf>, 30.05.2009
- WENDLING, U., SCHELLIN, H.-G. und THOMÄ, M. (1991): Bereitstellung von täglichen Informationen zum Wasserhaushalt des Bodens für die Zwecke der agrarmeteorologischen Beratung. In: Zeitschrift für Meteorologie 41, S. 468-475
- WHALLEY, W. R. (1993): Considerations on the use of time-domain reflectometry (TDR) for measuring soil moisture content. In: Journal of Soil Science 44, S. 1-9
- WHITE, I., KNIGHT, J. H., ZEGELIN, S. J. und TOPP, G. C. (1994): Comments on `Considerations on the use of time-domain Reflectometry (TDR) for measuring soil water content` by W. R. Whalley. In: Journal of Soil Science 45, S. 503-508
- WITZENBERGER, A., HACK, H. und VAN DEN BOOM, T. (1989): Erläuterungen zum BBCHDezimal-Code für die Entwicklungsstadien des Getreides – mit Abbildungen. In: Gesunde Pflanzen 41, S. 384-388.
- ZAN, K. (1962): Activity of *Phytophthora infestans* in soil in relation to tuber infection. In: Transactions of the British Mycological Society 45, S. 205-221
- ZELLNER, M., KEIL, S., BANGEMANN, L.-W., ZWERGER, P., KLEINHENZ, B., und TSCHÖPE, B. (2009): Entwicklung, Überprüfung und Praxiseinführung des Prognosemodells ÖKO-SIMPHYT zur gezielten Bekämpfung der Kraut- und Knollenfäule (*P. infestans*) im ökologischen Kartoffelanbau mit dem Ziel, den Einsatz kupferhaltige Fungizide auf ein Minimum zu reduzieren. Abschlussbericht, Freising
- ZEUNER, T. (2007): Landwirtschaftliche Schaderregerprognose mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen. Dissertation, Mainz

ZEUNER, T. und KLEINHENZ, B. (2008): Schlaggenaue Prognosen. In: DLG-Mitteilungen 2, S. 68

ZIEGLER, J. und KÖHLER, H. (2004): Jeden Tag Regen - aber stimmt die Wasserbilanz? Berechnung ist im Gemüsebau unverzichtbar. In: Der Landbote 31, S. 26-27

ZÖLLNER, L. (1985): Geomorphologische und quartärgeologische Untersuchungen im Hunsrück-Saar-Nahe-Raum, Trier

Internetquellen

BUNDESANSTALT FÜR GEOWISSENSCHAFTEN UND ROHSTOFFE (2008): www.bgr.bund.de, 15.08.2008

DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): Pressebericht vom 13.12.2011: <http://www.dwd.de/presse>, 13.12.2011

DEUTSCHER WETTERDIENST (2011): www.dwd.de/agrarwetter, 13.12.2011

ISIP (Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e.V): www.isip.de, 08.09.2008

LANDESAMT FÜR GEOLOGIE UND BERGBAU RHEINLAND-PFALZ (2008): <http://www.lgb-rlp.de/bodenschaetzung.html>, 15.08.2008

LANDESAMT FÜR UMWELT, WASSERWIRTSCHAFT UND GEWERBE RHEINLAND-PFALZ (2011): <http://www.luwg.rlp.de/icc/c/Aufgaben/Naturschutz/Grund-lagendaten/Naturraeumliche-Gliederung/>, 31.05.2011

ZENTRALSTELLE DER LÄNDER FÜR EDV-GESTÜTZTE ENTSCHEIDUNGSHILFEN UND PROGRAMME IM PFLANZENSCHUTZ (ZEPP) (2012): www.zepp.info, 18.01.2012

Anhang

Zusammensetzung der verwendeten Puffer und Ansätze	
Extraktionspuffer	pH 7,5 0,35M Sorbitol 0,1M Tris 0,005M EDTA 0,02M Na ₂ SO ₄
Kernlysispuffer	pH 7,5 0,2M Tris 0,05M EDTA 2M NaCl 2% CTAB
N-Laurylsarcosine	5%
Phasentrennlösung	24 Anteile Chloroform 1 Teil Isoamylalkohol
TBE-Laufpuffer	pH 8,3 0,89M TRIS-Borat 0,022M EDTA
PCR-Mix	10µl REExtract-N-Amp [™] PCR ReadyMix [™] (Fa. Sigma-Aldrich /Artikel-Nummer R 4775) 0,8µl Primer 08-3 (Sequenz: GAA AGG CAT AGA AGG TAG A) 0,8µl Primer 08-4 (Sequenz: TAA CCG ACC AAG TAG TAA A) 0,4µl steriles Millipore-Wasser
Extraction Solution	Fa. Sigma-Aldrich (Artikel-Nummer E 7526)

Probenaufarbeitung und DNA-Extraktion

Aus dem Kartoffelstängel wurde durch Mörsern eine Mischprobe hergestellt. 100µl der Probe wurden im Anschluss mit 150µl Extraktionspuffer versetzt und gemischt. Nach Zugabe von 150 µl Kernlysispuffer und 60µl der 5-prozentigen N-Laurylsarcosine-Lösung wurde erneut durch Schütteln gemischt und die Lösung für 30 Minuten bei 65 °C schüttelnd inkubiert. Im Anschluss wurden 360µl Phasentrennlösung zugesetzt, gemischt und bei 13.000rpm und 5 °C zentrifugiert. Die obere Phase wurde in ein neues Reaktionsgefäß überführt und mit 150µl Isopropanol versetzt sowie im Anschluss zehnmal invertiert. In einem weiteren Zentrifugationsschritt (13.000rpm, 5 °C für 5 Minuten) wurde die DNA gefällt und pelletiert. Die Flüssigkeit wurde komplett abgegossen und das Pellet mit 200µl eiskaltem Ethanol (100%) versetzt und für mindestens 12 Stunden bei -20 °C inkubiert. Danach erfolgte ein weiterer Zentrifugationsschritt (13.000rpm, 5 °C für 5 Minuten), in dessen Anschluss die Flüssigkeit abgeschüttet und das Reaktionsgefäß bis zum vollständigen Verdampfen des Ethanols offen gelagert wurde. Die vorliegende DNA wurde dann in sterilem Wasser gelöst.

PCR-Ansatz:

4µl aufgearbeitete Probe, 12µl PCR-Mix und 4µl Extraction Solution

PCR-Lauf:

Start	30 sec bei 94 °C
35 Zyklen je	30 sec bei 94 °C 30 sec bei 50 °C 1 min bei 72 °C
Abschluss	4 min bei 72 °C
Ende	bei 4 °C bis Probeentnahme

Elektrophorese:

- Agarose-Gel herstellen (1,6 g Agarose, 80 ml TBE-Puffer und 6 Tropfen Ethidiumbromid)
- Je 12 μ l Amplifikat in Geltasche füllen und auftrennen (6 μ l 100bp-Ladder als Marker)
- Laufzeit: 1 Stunde bei 80 V
- Positive Proben zeigen nach Auftrennung eine Band bei 258 bp

Danksagung

Die vorliegende Arbeit wurde in den Jahren 2009 bis 2012 bei der ZEPP erstellt. Das Forschungsvorhaben wurde durch die Deutsche Bundesstiftung Umwelt (DBU) finanziell unterstützt.

An dieser Stelle möchte ich mich bei einigen Personen bedanken, ohne welche diese Arbeit nicht zustande gekommen wäre. Ein ganz besonderer Dank gilt Dr. Benno Kleinhenz für die Idee und die Ermöglichung dieser Arbeit, für die ausgezeichnete Betreuung und die ständige Unterstützung. Danke, dass Du immer ein offenes Ohr für Fragen, Probleme und entstandene Zweifel hattest. Danke für das große Maß an Selbstständigkeit bei der Ausarbeitung der Projekthinhalte und das Zutrauen in meine Arbeit.

Mein aufrichtiger Dank gilt Herrn Prof. Dr. Dieter König für die Betreuung dieser Arbeit, die gewährte Eigenständigkeit sowie die kritische Diskussion und die damit geleistete Unterstützung.

Herrn Prof. Dr. Rainer Graafen danke ich für die Übernahme des Koreferates.

Mein weiterer besonderer Dank geht an Dr. Paolo Racca, welcher mich immer wieder aufs Neue bei der Auswertung der erhobenen Daten unterstützt hat. Wir haben viele Stunden über unzähligen Zahlen gegessen, um letztendlich, über eine statistische Auswertung, zu einem neuen Modellansatz zu gelangen. Danke, dass ich so viel von Dir lernen konnte und für Deine Unterstützung.

Danke an alle Mitarbeiter der ZEPP und von ISIP, insbesondere Beate Tschöpe, Cornelia Braun und Dr. Thorsten Zeuner, für die stete Hilfsbereitschaft sowie die Anregungen und Unterstützung bei der Versuchsdurchführung. Als ich im September 2007 an meinem ersten Tag als Praktikantin bei Euch begonnen habe, habt Ihr mich alle sehr herzlich in Euer Team aufgenommen. Ich habe mich von diesem ersten Tag an sehr wohl gefühlt. Ich glaube, es ist etwas ganz Besonderes zu wissen, dass man sich hundertprozentig auf seine Kollegen verlassen kann. Auch wenn man sich gerade am anderen Ende der Welt befindet, keine Sorge um die „Urlaubsvertretung“ bei der Betreuung der Versuchspflanzen oder der „liebgewonnenen kleinen Haustiere“ (der Drahtwürmer) haben muss. Ihr habt einen großen Anteil daran, dass ich drei wunderbare Jahre während der Ausarbeitung dieser Arbeit erlebt habe.

Ferner gilt mein Dank der Abteilung Landwirtschaft am DLR RNH. Vielen Dank für die freundliche Atmosphäre, die Hilfsbereitschaft und Unterstützung während meiner Promotionszeit.

Besonderer Dank gilt auch den Pflanzenschutzdiensten der Länder für die Unterstützung und Bereitstellung von Erhebungsdaten.

Nicht zuletzt gilt mein ganz großer Dank meiner Familie und meinen Freunden. Mo und Papa, vielen Dank für die jederzeit bedingungslose Unterstützung, die Ihr mir auf meinen bisherigen Lebensweg gegeben habt. Vielen Dank, dass ich auf eine wundervolle Kindheit zurückblicken kann. Papa, ich vermisse Dich an jedem Tag. Jens, danke dass Du mich während der Anfertigung dieser Arbeit immer unterstützt hast. Danke, dass Du mir immer über kleine und größere Zweifel und Krisen hinweg geholfen hast, dass Du zu meinem Wochenendhelfer beim Kartoffelblattausstechen und -austauschen geworden bist, dass Du hunderte von Drahtwürmern über die Weihnachtsfeiertage bei uns beherbergt hast und danke, dass Du einfach immer da bist, wenn ich Dich brauche. Meli, danke dass Du auch in hochschwangerem Zustand bei der Korrektur dieser Arbeit geholfen hast. Der kleine Leon wird bestimmt einmal ein ganz großer Drahtwurmforscher!

Lebenslauf

Persönliche Daten

Name: Jeanette Jung
Geburtsdatum: 05.12.1982
Geburtsort: Bad Kreuznach
Familienstand: ledig
Staatsangehörigkeit: deutsch

Schulausbildung

Grundschule: August 1989 bis Juli 1994 – Grundschule Bretzenheim
Gymnasium: August 1994 bis März 2002 – Gymnasium am Römerkastell, Bad Kreuznach
Abschluss: Abitur

Studium:

Oktober 2002 bis Mai 2007
Studium an der Universität Koblenz-Landau, Campus Koblenz
Hauptfach: Geographie
Nebenfächer: Pädagogik, Kunstwissenschaften
Abschluss: Magistra Artium (M.A.)
Magisterarbeit: Die Naturparke in Rheinland-Pfalz

seit Mai 2008 Promotionsstudium, Geographie
externe Doktorandin an der Universität Koblenz-Landau, Campus Koblenz
Durchführung: Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte
Entscheidungshilfe und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP)

Praktika und berufliche Tätigkeiten

Praktika: September 2005
Geoökologisches Praktikum in Ruanda (im Rahmen der Länderpatenschaft)

März 2006
Praktikum am Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz in
der Abteilung „Nachhaltige Entwicklung, Naturschutz, Länderübergreifende
Umweltpolitik“

September 2007 bis Mai 2008
Praktikum bei der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte
Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP)

Berufliche Tätigkeiten: seit Juni 2008
Wissenschaftliche Mitarbeiterin bei der Zentralstelle der Länder für EDV-
gestützte Entscheidungshilfe und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), Bad
Kreuznach (Angestellte im öffentlichen Dienst der Länder)

Erklärung

Hiermit erkläre ich,

- dass ich die eingereichte Dissertation selbstständig verfasst habe und alle von mir für die Arbeit benutzten Hilfsmittel in der Arbeit angegeben sowie die Anteile etwaig beteiligter Mitarbeiter sowie anderer Autoren klar gekennzeichnet sind;
- dass ich die Dissertation oder Teile von ihr nicht als Prüfungsarbeit für eine staatliche oder andere wissenschaftliche Prüfung eingereicht habe;
- dass ich die gleiche oder eine andere Abhandlung in einem anderen Fachbereich oder einer anderen wissenschaftlichen Hochschule nicht als Dissertation eingereicht habe.

Bad Kreuznach, den 05.12.2012

Jeanette Jung