

Landwirtschaftliche Schaderregerprognose mit Hilfe von Geographischen Informationssystemen

Dissertation
zur Erlangung des Grades
„Doktor der Naturwissenschaften“

am Fachbereich 09:
Chemie, Pharmazie und Geowissenschaften
der Johannes Gutenberg – Universität Mainz

von
Thorsten Zeuner
geboren am 24. Februar 1978 in Bad Kreuznach

Mainz, 2007

Dekan:

1. Berichterstatter:

2. Berichterstatter:

Tag der mündlichen Prüfung:

Kurzfassung

In der hier vorliegenden Arbeit wurde am Beispiel der Kraut- und Knollenfäule an Kartoffeln *Phytophthora infestans* und des Kartoffelkäfers *Leptinotarsa decemlineata* untersucht, ob durch den Einsatz von Geographischen Informationssystemen (GIS) landwirtschaftliche Schaderregerprognosen für jeden beliebigen Kartoffelschlag in Deutschland erstellt werden können. Um dieses Ziel zu erreichen, wurden die Eingangsparameter (Temperatur und relative Luftfeuchte) der Prognosemodelle für die beiden Schaderreger (SIMLEP1, SIMPHYT1, SIMPHYT3 and SIMBLIGHT1) so aufbereitet, dass Wetterdaten flächendeckend für Deutschland zur Verfügung standen.

Bevor jedoch interpoliert werden konnte, wurde eine Regionalisierung von Deutschland in Interpolationszonen durchgeführt und somit Naturräume geschaffen, die einen Vergleich und eine Bewertung der in ihnen liegenden Wetterstationen zulassen. Hierzu wurden die Boden-Klima-Regionen von SCHULZKE und KAULE (2000) modifiziert, an das Wetterstationsnetz angepasst und mit 5 bis 10 km breiten Pufferzonen an der Grenze der Interpolationszonen versehen, um die Wetterstationen so häufig wie möglich verwenden zu können.

Für die Interpolation der Wetterdaten wurde das Verfahren der multiplen Regression gewählt, weil dieses im Vergleich zu anderen Verfahren die geringsten Abweichungen zwischen interpolierten und gemessenen Daten aufwies und den technischen Anforderungen am besten entsprach. Für 99 % aller Werte konnten bei der Temperaturberechnung Abweichungen in einem Bereich zwischen -2,5 und 2,5 °C erzielt werden. Bei der Berechnung der relativen Luftfeuchte wurden Abweichungen zwischen -12 und 10 % relativer Luftfeuchte erreicht. Die Mittelwerte der Abweichungen lagen bei der Temperatur bei 0,1 °C und bei der relativen Luftfeuchte bei -1,8 %.

Zur Überprüfung der Trefferquoten der Modelle beim Betrieb mit interpolierten Wetterdaten wurden Felderhebungsdaten aus den Jahren 2000 bis 2007 zum Erstauftreten der Kraut- und Knollenfäule sowie des Kartoffelkäfers verwendet. Dabei konnten mit interpolierten Wetterdaten die gleichen und auch höhere Trefferquoten erreicht werden, als mit der bisherigen Berechnungsmethode. Beispielsweise erzielte die Berechnung des Erstauftretens von *P. infestans* durch das Modell SIMBLIGHT1 mit interpolierten Wetterdaten im Schnitt drei Tage geringere Abweichungen im Vergleich zu den Berechnungen ohne GIS.

Um die Auswirkungen interpretieren zu können, die durch Abweichungen der Temperatur und der relativen Luftfeuchte entstanden wurde zusätzlich eine Sensitivitätsanalyse zur Temperatur und relativen Luftfeuchte der verwendeten Prognosemodelle durchgeführt. Die Temperatur hatte bei allen Modellen nur einen geringen Einfluss auf das Prognoseergebnis. Veränderungen der

relativen Luftfeuchte haben sich dagegen deutlich stärker ausgewirkt. So lag bei SIMBLIGHT1 die Abweichung durch eine stündliche Veränderung der relativen Luftfeuchte ($\pm 6\%$) bei maximal 27 Tagen, wogegen stündliche Veränderungen der Temperatur ($\pm 2\text{ }^{\circ}\text{C}$) eine Abweichung von maximal 10 Tagen ausmachten.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass durch die Verwendung von GIS mindestens die gleichen und auch höhere Trefferquoten bei Schaderregerprognosen erzielt werden als mit der bisherigen Verwendung von Daten einer nahegelegenen Wetterstation. Die Ergebnisse stellen einen wesentlichen Fortschritt für die landwirtschaftlichen Schaderregerprognosen dar. Erstmals ist es möglich, bundesweite Prognosen für jeden beliebigen Kartoffelschlag zur Bekämpfung von Schädlingen in der Landwirtschaft bereit zu stellen.

Abstract

This study shows that it is possible to obtain results with higher accuracy for agricultural forecasting models for Late Blight and Colorado Beetle by using Geographic Information Systems (GIS). To achieve this aim spatial weather data (temperature and relative humidity) for Germany are needed to calculate the forecasting models (SIMLEP1, SIMPHYT1, SIMPHYT3 and SIMBLIGHT1).

First the landscape was divided into geographic regions, to make it possible to interpret the met. data of each region. Therefore the Soil-Climate-Regions by SCHULZKE und KAULE (2000) were modified and optimised to the network of met. stations. Around each region, a buffer of five to ten kilometres was built in order to use every met. station as often as possible in different regions.

Then the multiple regression method was chosen to calculate the interpolation of met. data because it gave the best results by the shortest calculation time of all tested interpolation methods. To validate the results of the interpolation some met. stations were left out of the interpolation process. The deviation between calculated values and measured data was between -2.5 and 2.5 for temperature and -12 and 10 % for relative humidity. The mean of the deviation was for temperature 0.1 °C and for relative humidity -1.8 %.

Next the results of the forecasting models with calculated met. data were validated against a set of field data collected from 2000 to 2007. The calculations of the forecasting model with interpolated data resulted in the same or higher accuracy compared to calculation with measured data. For example the mean results of the forecasting model SIMBLIGHT1 using GIS lead to a five to eight days higher accuracy than the calculations without GIS.

Finally the effects of the temperature and the relative humidity on the forecasting models were interpreted by a weather sensitivity test. For all models it was shown that the temperature on the model result was less than the effect of relative humidity. A modification of the hourly relative humidity (± 6 %) for the model SIMBLIGHT1 resulted in a deviation of 27 days. The deviation for the modification of temperature (± 2 °C) of the same model was 10 days.

With the combination of forecasting models and the use of analyses and methods from GIS a significant advance in the advising of farmers can be reached. The methods and analyses with GIS will help to obtain more detailed calculations and results with higher validity as before. GIS and forecasting models will lead to easier control of Late Blight and of the Colorado Beetle.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungsverzeichnis

1	Einleitung	1
2	Stand des Wissens	7
2.1	Die Kartoffel und ihre Schaderreger	7
2.1.1	Die Kartoffel	7
2.1.2	Die Kraut- und Knollenfäule	7
2.1.3	Der Kartoffelkäfer	11
2.2	Anbauggebiete und Anbaubedingungen	13
2.3	Untersuchungsgebiete	16
2.4	Schaderregerprognosen	20
2.5	Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft	21
2.6	Naturräumliche Gliederung	23
2.7	Regionalisierungen	25
2.8	Interpolationsparameter	28
3	Material und Methoden	29
3.1	Hardware	29
3.2	Geobasisdaten	29
3.2.1	ATKIS Basis-DLM	31
3.2.2	CORINE Land Cover	31
3.2.3	Wetterdaten	33
3.2.4	DGM-D	34
3.2.5	Digitale Orthophotos	34
3.2.6	Digitale Topographische Karte 25	35
3.3	Geodateninfrastruktur	36
3.3.1	Datenbank für interpolierte Wetterdaten	36
3.3.2	ArcGIS und ArcObjects	40
3.4	Boden-Klima-Regionen	42
3.5	Reliefenergie	43
3.6	Interpolationsparameter	45
3.6.1	Temperatur	45
3.6.2	Relative Luftfeuchtigkeit	46
3.7	Interpolationsmethoden	48
3.7.1	Quadrantenmethode IDW	48
3.7.2	Spline	49
3.7.3	Kriging	50
3.7.4	Multiple Regression	52
3.7.4.1	Rechnung der multiplen Regression	54
3.7.4.2	Prädiktoren	57
3.8	Auswertungen der Interpolationsergebnisse	58
3.9	Prognosemodelle	58
3.9.1	SIMLEP1, SIMLEP2 und SIMLEP3	58
3.9.2	SIMPHYT3	60
3.9.3	SIMBLIGHT1	62
3.9.4	SIMPHYT1	63
3.10	Auswertung der Prognoseberechnungen	65

4	Ergebnisse	69
4.1	Regionalisierung der Interpolationszonen	69
4.1.1	Regionalisierung auf Basis der Boden-Klima-Regionen	70
4.1.2	Regionalisierung in Interpolationskreise	77
4.1.3	Zusammenführung von Interpolationszonen und Interpolationskreisen.....	80
4.2	Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte	82
4.2.1	Verworfenen Interpolationsverfahren	82
4.2.2	Kriging	84
4.2.2.1	Temperaturinterpolation mit K in Brandenburg	84
4.2.2.2	Temperaturinterpolation mit K in Rheinland-Pfalz	88
4.2.2.3	Luftfeuchteinterpolation mit K in Brandenburg	91
4.2.2.4	Luftfeuchteinterpolation mit K in Rheinland-Pfalz	95
4.2.3	Multiple Regression	99
4.2.3.1	Prädiktorenanalyse	99
4.2.3.2	Temperaturinterpolation mit MR in Brandenburg.....	101
4.2.3.3	Temperaturinterpolation mit MR in Rheinland-Pfalz	104
4.2.3.4	Luftfeuchteinterpolation mit MR in Brandenburg.....	108
4.2.3.5	Luftfeuchteinterpolation mit MR in Rheinland-Pfalz	111
4.2.4	Ausschluss der Verfahren	115
4.3	Prognoseberechnung	118
4.3.1	SIMLEP3	118
4.3.1.1	Validierung mit Boniturdaten aus Brandenburg und Rheinland-Pfalz	118
4.3.2	SIMPHYT3	121
4.3.2.1	Statistische Auswertung der Prognoseergebnisse von SIMPHYT3	121
4.3.2.2	Darstellung der Verteilung des Infektionsdrucks in Eich 2003	129
4.3.3	SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1	132
4.3.3.1	Schlagspezifische Betrachtung an der Wetterstation Eich 2001 und 2002	132
4.3.3.2	Schlagspezifische Betrachtung an der Wetterstation Schifferstadt 2002 und 2003.....	134
4.3.3.3	Validierung mit deutschlandweiten Boniturdaten von 2001 bis 2006.....	136
4.4	Sensitivitätsanalyse der Prognosemodelle	141
4.4.1	Sensitivität von SIMLEP3	141
4.4.2	Sensitivität von SIMPHYT3	143
4.4.2.1	PEW-Wert.....	143
4.4.2.2	Infektionsdruck	144
4.4.3	Sensitivität von SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1	145
4.4.4	Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse	147
5	Diskussion.....	149
6	Fazit und Ausblick	171
7	Literatur	175
8	Datenquellen	185
9	Abbildungsverzeichnis.....	187
10	Tabellenverzeichnis.....	193
11	Anhang	195

Abkürzungsverzeichnis

°C	Grad Celsius
°F	Grad Fahrenheit
AE	Kartoffelkäfer – Alter der Eier
AGMEDAWIN	Agrarmeteorologische Datenbank für Windows
ATKIS	Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem
AW	Kartoffelkäfer – Alter Weibchen
B	Brandenburg
BBA	Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft
BH	Befallshäufigkeit
BKG	Bundesamt für Kartographie und Geodäsie
BKR	Boden Klima Regionen
BLE	Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung
BLUE	best linear unbiased estimator
BMELV	Bundesministerium für Landwirtschaft, Ernährung, und Verbraucherschutz
BS	Befallsstärke
CLC	CORINE Land Cover
CMS	Content Management Sytem
COM	Component Object Model
D	Deutschland
DB	Datenbank
DTK	Digitale Topographische Karte
IBM DB2	RelationalesDatenbankmanamentsystem der Firma IBM
DGM	Digitales Geländemodell
DHM	Digitales Höhenmodell
DIW	Datenbank für interpolierte Wetterdaten
DLL	Dynamic Link Library
DLM	Digitale Landschaftsmodell
DOP	Digitales Orthophoto
DWD	Deutscher Wetterdienst
EA	Erstauftreten
ESRI	Environmental Systems Research Institute
EU	Europäische Union
FAO	Food and Agriculture Organisation
GG	Gefährdungsgruppen

GIS	Geographisches Informationssystem
GPS	Global Positioning System
ha	Hektar
HTML	HyperText Markup Language
IBM	International Business Machines Corporation
ID	Identifikationsbezeichnung
ISIP	Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion
J2EE	Java 2 Enterprise Edition
JSP	Java Server Pages
K	Kriging
km	Kilometer
L1/L2	Junglarven des Kartoffelkäfers
L3/L4	Altlarven des Kartoffelkäfers
LIS	Landschaftsinformationssystem
LPG	Landwirtschaftliche Produktionsgenossenschaft
Lvermgeo	Landesamt für Vermessung und Geobasisinformation Rheinland-Pfalz
m	Meter
MA	Massenauftreten
MR	Multiple Regression
NIS	Netzinformationssystem
NN	Niederschlag
PASO	Prognose agrarischer Schadorganismen (Software)
PDA	Personal Digital Assistant
PGD	Personal Geodatabase
PSD	Pflanzenschutzdienst
PSM	Pflanzenschutzmittel
RIS	Rauminformationssystem
RP	Rheinland-Pfalz
UIS	Umweltinformationssystem
VBA	Visual Basic for Applications
WMO	World Meteorological Organisation
XML	Extensible Markup Language
ZEPP	Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz

1 Einleitung

Kartoffeln sind für die Ernährung der Bevölkerung von großer Bedeutung. Sie dienen als Grundnahrungsmittel und werden außerhalb tropischer, arktischer und subarktischer Klimazonen weltweit angebaut. Ursprünglich stammt die Kartoffel aus Südamerika, wo sie in den Hochanden, den Kordilleren und den Küstenregionen von Peru angebaut wurde. Sie war den Inkas schon vor 2000 Jahren als Nahrungsmittel bekannt und wurde 1533 von einem Spanier entdeckt und als Zierpflanze nach Europa gebracht (PUTZ 1989).

Weltweit wird auf 18,6 Millionen Hektar Kartoffelfläche eine jährliche Ernte von rund 323 Millionen Tonnen Kartoffeln erzielt. In Europa werden pro Jahr etwa 129 Millionen Tonnen Kartoffeln geerntet, was 47 % der weltweiten Produktion (FAO 2005, STBA 2006) entspricht.

Optimierte Anbauverfahren und Risikominimierung durch den Einsatz von chemischen Pflanzenschutzmitteln (PSM) haben dazu geführt, dass Hungersnöte, wie in Irland 1845 beim Ausbruch der ersten Phytophthoraepidemie, nicht mehr vorstellbar sind. Damals wurde die gesamte Kartoffelernte innerhalb von 10 Wochen zerstört. 1,6 Millionen Iren wanderten in die USA aus und 500.000 Iren starben an den Folgen dieser Katastrophe (PUTZ 1989). *Phytophthora infestans*, die Kraut- und Knollenfäule ist bis heute der bedeutendste Schaderreger der Kartoffel.

Die Entwicklung und der Einsatz von PSM haben weltweit zu einer Verlustminderung durch Schäden landwirtschaftlicher Schaderreger geführt. OERKE und STEINER (1996) haben gezeigt, dass bei den acht wichtigsten Nutzpflanzen eine Verlustminderung durch PSM von bis zu 56% möglich war. Bei der Kartoffel, einer der wichtigsten Kulturpflanzen in Mitteleuropa, wurde eine Verlustminderung von bis zu 43 % festgestellt (OERKE und STEINER 1996).

Der PSM-Einsatz im Kartoffelanbau ist intensiv. In der im Jahr 2000 durchgeführten NEPTUN-Studie zur Ermittlung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes in unterschiedlichen Naturräumen Deutschlands wurde festgestellt, dass mit einer berechneten Behandlungshäufigkeit von 5,37 der Fungizideinsatz bei Kartoffeln den höchsten Wert aller Kulturen aufweist (ROßBERG et al. 2002). Dies liegt unter anderem daran, dass im Kartoffelanbau zur Minimierung des Schaderregerauftretens oft häufiger behandelt wird als notwendig.

Ziel der Anwendung von PSM ist es, den erforderlichen Wirkstoff zum richtigen Zeitpunkt an oder in den Zielorganismus zu bringen. Wird zum falschen Zeitpunkt oder unter ungeeigneten Witterungsbedingungen appliziert, bleibt die Wirkung aus. Zudem besteht die Gefahr der Schädigung der Kulturpflanzen oder die Kontamination der Umwelt (HALLMANN et al. 2007).

Durch die Nutzung eines Prognosemodells kann der Zeitpunkt des Erstauftritts von Schaderregern bestimmt sowie Behandlungstermine von PSM-Maßnahmen optimiert werden. In den letzten elf Jahren wurden bei der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) mehr als 20 wetterbasierte Prognosemodelle für Schädlinge und Krankheiten erfolgreich entwickelt und validiert (www.zepp.info). Diese wurden dann mit Hilfe der Officialberatung in die landwirtschaftliche Praxis eingeführt (KLEINHENZ 2001, RACCA et al. 2001). Prognosemodelle berechnen mit großer Treffsicherheit Termine zum Auftreten bestimmter Schaderreger, sowie Perioden mit hohem Befallsdruck und bewirken somit eine hohe Bekämpfungssicherheit. Des Weiteren wird die Bekämpfungsintensität reduziert, was ein wesentlicher Beitrag zur umweltschonenden Landbewirtschaftung ist. Die Reduzierung des Einsatzes von PSM ist eine Forderung der Vereinten Nationen, der EU-Kommission, der Bundesregierung, der Umwelt- und der Verbraucherverbände (FAO 2005).

Der Einsatz wetterbasierter Prognosemodelle war bis zum aktuellen Zeitpunkt nur für den Geltungsbereich einer meteorologischen Wetterstation möglich. Das bedeutet, dass auf Basis der Stationsdaten alle Felder im Geltungsbereich einer Wetterstation gleich bewertet wurden. Der Abstand zwischen den Wetterstationen beträgt in Deutschland aber bis zu 60 km. Eine Berechnung von Prognoseergebnissen für Schläge, die zwischen den Stationen liegen war bisher nicht möglich.

Mit Hilfe Geographischer Informationssysteme (GIS) sollen nun Wetter- und Prognosedaten den Feldern genau zugewiesen werden. Damit können deutlich besser angepasste Ergebnisse als bisher erzielt werden.

Die anschaulichen Informations- und Präsentationsmöglichkeiten ausgereifter Geoinformationssysteme führen darüber hinaus dazu, dass Ergebnisse von Prognosemodellen einfacher interpretiert und verwendet werden können.

Die Entwicklung und Erprobung von GIS-basierten Prognosemodellen wurde am Beispiel der Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans*) und des Kartoffelkäfers (*Leptinotarsa decemlineata*) durchgeführt.

In Deutschland hat sich die Krautfäuleprognose mit den Prognosemodellen SIMPHYT und SIMBLIGHT etabliert (KLUGE und GUTSCHE 1984, GUTSCHE et al. 1999, KLEINHENZ und JÖRG 2000, ROßBERG et al. 2001, HANSEN et al. 2002, KLEINHENZ et al. 2006). Die wetterbasierten Modelle SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 prognostizieren das Erstauftreten (EA) des Schaderregers, während SIMPHYT3 den täglichen Infektionsdruck der Krankheit anzeigt.

Mit Hilfe des Prognosemodells SIMLEP3 kann die Populationsdynamik des Kartoffelkäfers (*Leptinotarsa decemlineata*) von seinem Erscheinen aus dem Winterlager bis zum Auftreten von Jungkäfern simuliert werden. Hierdurch können die optimalen Zeitpunkte für eine Befallserhebung und für Insektizideinsätze berechnet werden (KURTH et al. 1984, ROßBERG et al. 1999). Repräsentative Ergebnisse aller Modelle waren dabei bisher nur für die direkte Umgebung der Messstationen möglich.

Um Prognosen für Kartoffelschläge, die zwischen den Wetterstationen liegen berechnen zu können, müssen die Eingabeparameter (Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit) der Prognosemodelle separat zusammengestellt und mit GIS interpoliert werden. Hierdurch wird es möglich die räumlichen und zeitlichen Prozesse beim Erstauftreten von Schaderregern flächendeckend berechnen und darstellen zu können. Zu berücksichtigen waren dabei beispielsweise die Parameter Höhenlage, Exposition, Hangneigung und vorherrschende Bodenart (ZEUNER 2003).

Abbildung 1 zeigt das Ablaufschema der durchzuführenden Berechnungen. Mit Hilfe von Geodaten erfolgt die Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Die Ergebnisse werden anschließend zur Berechnung der Prognoseergebnisse verwendet, um schlagspezifische Prognosen zu erstellen. Die neue Methode ermöglichte es, bestehende Prognosemodelle für jeden beliebigen Kartoffelschlag in Deutschland anzuwenden und in schaderregerspezifischen Risikokarten darzustellen. Auf diesen Karten ist genau dokumentiert, welche räumliche und zeitliche Verteilung ein Schaderreger hat. Unter Einbeziehung der Wirkungsgrade einzelner PSM wird dadurch erreicht, die Anzahl der notwendigen Pflanzenschutzmitteleinsätze abzuschätzen.

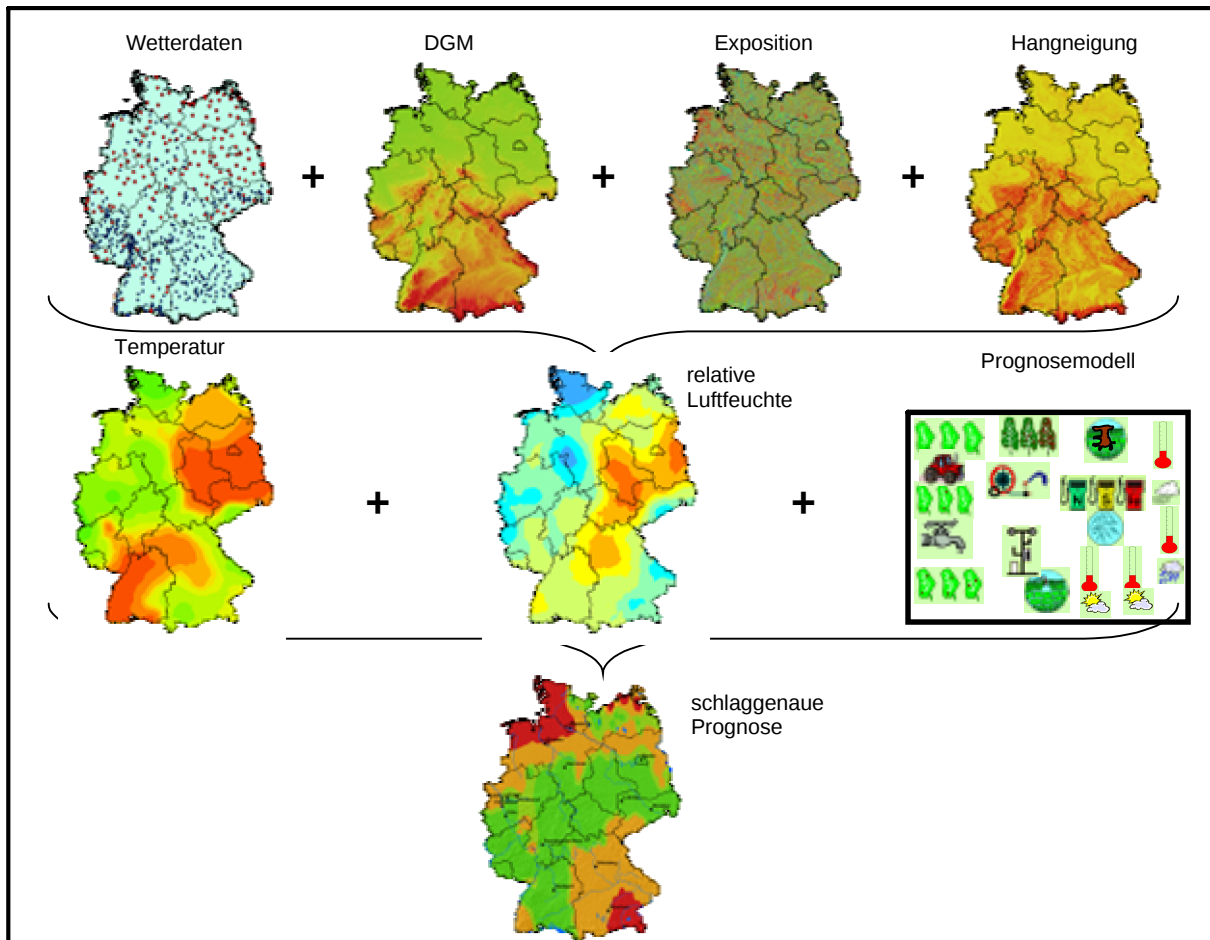


Abbildung 1: Ablaufschema zur Erstellung von Schaderregerprognosen mit GIS.

Ziel dieser Arbeit war es zu prüfen, welche Auswirkungen die Bereitstellung von flächendeckenden Eingabeparametern auf die Treffsicherheit der Prognosemodelle hat.

Zur erfolgreichen Durchführung waren einige Schritte notwendig. Dabei kam insbesondere dem Management der Geodaten eine entscheidende Bedeutung zu. Hochauflösende Daten stellen einen hohen Anspruch an die zu Grunde liegende Geodatenstruktur, die Hardwarearchitektur und die Effizienz der für eine angepasste Datenanalyse zu entwickelnden Softwaretools (BILL und FRITSCH 1996). Damit die Berechnungen schnell und effizient durchgeführt werden konnten, wurde speziell für diesen Bedarf eine IT-Infrastruktur geschaffen.

Des Weiteren wurde für die Interpolation der Wetterdaten nach Verfahren gesucht, mit denen auf Basis der Geländeabhängigkeit der Wetterdaten die Temperatur und die relative Luftfeuchte simuliert werden konnten. Um die Daten der Wetterstationen miteinander vergleichen und deren Geländeabhängigkeit ermitteln zu können, war es notwendig der Interpolation der Wetterdaten eine naturräumliche Gliederung voranzustellen. Anschließend konnten die Interpolationsverfahren getestet und bewertet werden.

Ein Vergleich von Prognoseberechnungen auf Grundlage interpolierten Wetterdaten und herkömmlich gemessenen Wetterdaten gab Aufschluss über die Verbesserungsmöglichkeiten, die sich durch flächendeckende Berechnung von Wetterdaten als Inputparameter ergeben sollten. Dabei wurden Felderhebungen der letzten sieben Jahren aus Deutschland eingesetzt. Um den Einfluss der Temperatur und der relativen Luftfeuchte auf die Ergebnisse der Prognosemodelle abschätzen zu können, wurde eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt (BATTILANI et al. 1993). Die einzelnen Arbeitsschritte lassen sich demnach wie folgt zusammenfassen:

- Erstellung einer Geodateninfrastruktur zur Datenhaltung,
- Erstellung einer naturräumlichen Gliederung für die Interpolation,
- Durchführung der Interpolation der Wetterdaten,
- Rechnung und Validierung der Prognosemodelle mit interpolierten Wetterdaten,
- Durchführung einer Sensitivitätsanalyse für die verwendeten Prognosemodelle.

Aufgrund der großen Interdisziplinarität der einzelnen Arbeitsschritte ist diese Arbeit als Schnittstelle zwischen den Wissenschaften Geographie, Meteorologie und Epidemiologie einzuordnen (Abbildung 2). Die fachübergreifende Betrachtung war bei dieser Arbeit notwendig um die Fragestellungen und Ziele erreichen zu können. Dabei bestand die Schwierigkeit jeder Wissenschaft ausreichend Bedeutung zu kommen zu lassen.

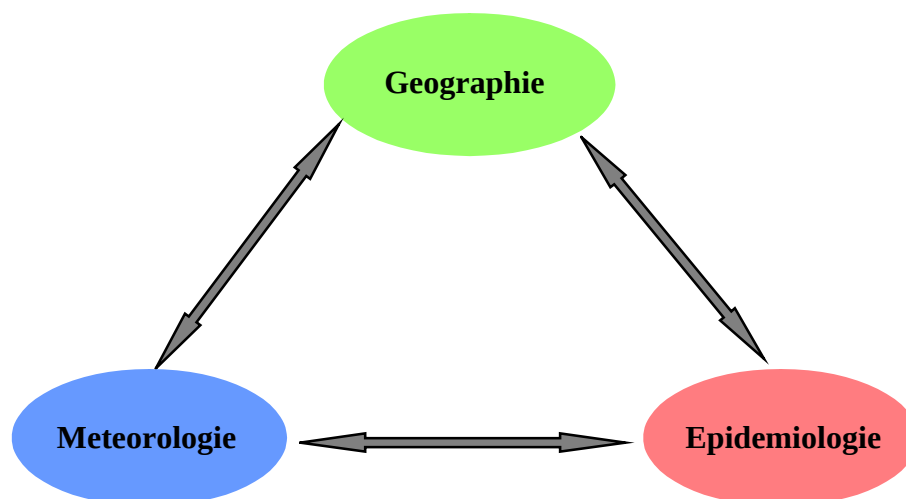


Abbildung 2: Beziehungsdreieck zwischen Geographie, Meteorologie und Epidemiologie.

2 Stand des Wissens

2.1 Die Kartoffel und ihre Schaderreger

2.1.1 Die Kartoffel

Die Kartoffel (*Solanum tuberosum*) zählt heute noch zu den wichtigsten Hackfrüchten in der landwirtschaftlichen Produktion. Sie gehört zur Familie der Nachtschattengewächse (*Solanaceae*). Die Vermehrung im Feldbau erfolgt vegetativ, d. h. ungeschlechtlich über die Kartoffelknollen (FRANKE 1976). Pro gesetzte Kartoffelknolle können sortenabhängig bis zu 15 Knollen geerntet werden. Dabei stellt die Pflanze keine hohen Ansprüche an Klima und Boden und gilt somit als besonders anpassungsfähig. Günstig wirken sich warme Frühjahrswitterung, gleichmäßige Wasserversorgung sowie warme Tages- und kühle Nachttemperaturen bei der Abreife aus. Die Kartoffel wächst an fast allen Standorten, wird aber bevorzugt auf sandigen, leichten Böden in Dammkultur angebaut. Dies fördert eine stärkere Bodenerwärmung im Frühjahr, verbessert die Kultivierung und ermöglicht eine einfache Ernte (BRICE 1985).

2.1.2 Die Kraut- und Knollenfäule

Die Kraut- und Knollenfäule (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) ist weltweit der bedeutendste Schaderreger der Kartoffel und verursacht alljährlich in Deutschland Verluste in Millionenhöhe. Die Kraut- und Knollenfäule wird durch den Pilz *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary verursacht, der zur Klasse der Oomyceten gehört, Ordnung Peronosporales (Familie: Falscher Mehltau (*Peronosporales*)). Bei feuchtwarmer Witterung ist ein Primärbefall an einzelnen Stauden im Bestand festzustellen (Abbildung 3). Typische Symptome sind Verbräunungen, die zumeist vom Blattrand oder der Blattspitze ausgehen. Die Blätter färben sich von gelblichgrün bis hin zu schokoladenbraun. Ein klares Indiz für *P. infestans*-Befall ist ein typischer weißer Saum (Myzel). Dieses Myzel ist auf der Unterseite der Blätter in den frühen Morgenstunden und späten Abendstunden am Übergang vom kranken zum gesunden Gewebe zu sehen. Generell wird zwischen Blatt- und Stängelbefall unterschieden (SCHÖBER-BUTIN 2001, RADTKE et al. 2000). Bei günstiger Witterung verbreitet sich die Krankheit sehr schnell, wodurch ganze Bestände vernichtet werden können (Abbildung 4).



Abbildung 3: Primärbefall durch *P. infestans* am Blatt (ZEPP 2004).



Abbildung 4: Abgestorbener Bestand durch *P. infestans* (ZEPP 2004).

In Abbildung 5 sind vier Möglichkeiten für die Herkunft des Inokulums abgebildet (KLEINHENZ et al.2006). Die Infektion kann von Nachbarfeldern, von Durchwuchskartoffeln aus dem Vorjahr, von Abfallhaufen, auf dem Kartoffeln entsorgt wurden, verursacht werden oder aufgrund infizierten Pflanzguts ausbrechen.

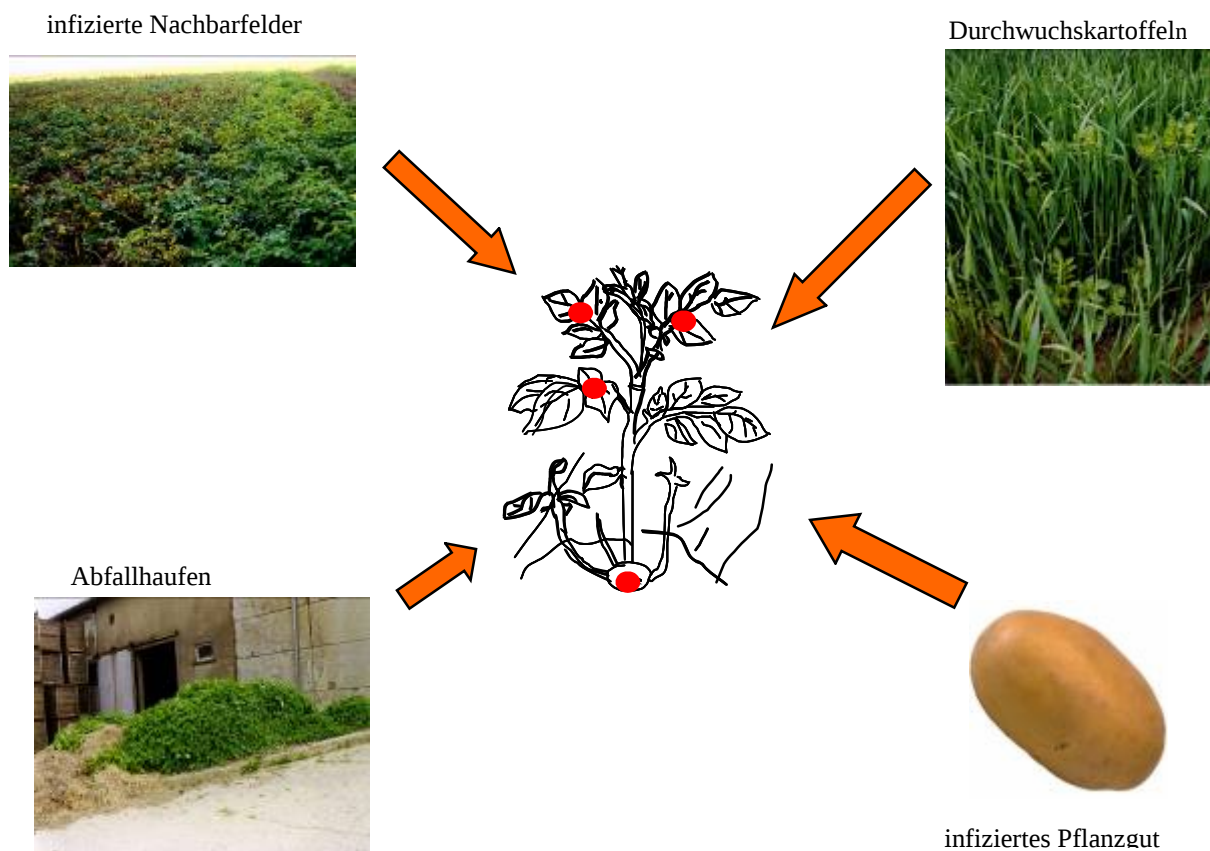


Abbildung 5: Infektionsherde für *P. infestans* (KLEINHENZ et al. 2006).

Der Lebenszyklus von *P. infestans* ist in Abbildung 6 dargestellt. Durch Wind, Wassertropfen oder auch Blattläuse werden die Sporen des Erregers verbreitet. Sobald eine Primärinfektion stattgefunden hat, bildet der Pilz in intaktem Pflanzengewebe ein Myzel aus, an dem sich Sporangienträger entwickeln. Auf diesen Trägern entstehen farblose, zitronenförmige Sporangien, die eine polyzyklische Epidemie einleiten. Bei kühl-feuchten Bedingungen (16-18 °C) entlassen die Sporangien Zoosporen. Diese benötigen einen Wasserfilm auf der Blattoberfläche um zu enzystieren, bevor sie mit einem Keimschlauch das Pflanzengewebe infizieren (HALLMANN et al. 2007). Bei Temperaturen über 18 °C keimen die Sporangien direkt mit einem Keimschlauch aus (Abbildung 6) und es bilden sich neue Sporangien auf dem befallenen Kraut. Eine Infektion der Knollen kann auch direkt über den Spross oder durch im Boden eingewaschene Sporangien erfolgen.

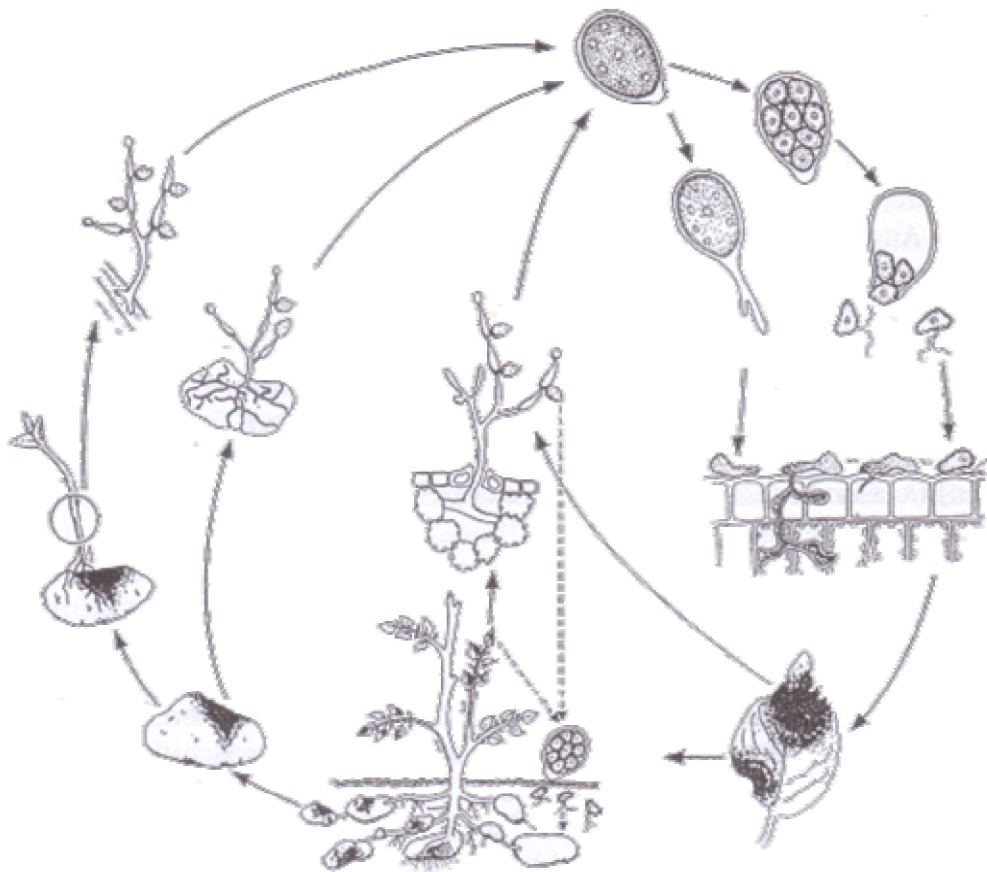


Abbildung 6: Lebenszyklus von *P. infestans* (geändert nach ERWIN et al. 1983).

Die Kardinaltemperaturen der beschriebenen asexuellen Entwicklungsphasen von *P. infestans* wurden in Tabelle 1 dargestellt. Die sexuelle Entwicklung mittels Oosporen tritt selten auf. Damit es zu einer sexuellen Vermehrung des Pilzes kommt werden zwei kompatible Kreuzungstypen (A1 und A2) in befallenen Pflanzenresten benötigt. Die Oosporen als langlebige Dauerorgane des Pilzes besitzen eine widerstandsfähige Hülle und können im

Boden bis zu vier Jahre überleben. Die Keimung wiederholt sich im Laufe der Vegetationsperiode mehrfach, so dass bei günstigem Witterungsverlauf eine schnelle, epidemieartige Vermehrung des Pilzes stattfindet, bei der ein ganzer Bestand innerhalb von zwei bis drei Wochen zerstört werden kann (ERWIN et al. 1983).

Tabelle 1: Biologische und ökologische Kardinalwerte für *P. infestans* (GUTSCHE et al. 1999).

Kardinalwerte	Temperatur [°C]		Erfordernisse an relative Luftfeuchte [%]
	Optimum	Grenzbereich	Grenzbereich
Sporangienbildung	18-22	8-25	> 90
Sporangienkeimung	20-24	4-30	> 90
Zoosporenkeimung, Zoosporenfreisetzung	9-15	2-25	> 90
Infektion	15-19	4-25	> 90
Myzelwachstum	18-23	3-30	> 90

Im Entwicklungszyklus von Pflanzenkrankheiten, so auch bei *P. infestans*, können verschiedene Phasen unterschieden werden:

- Der Zeitraum von der Übertragung bis zur erfolgreichen Infektion und bis zum Auftreten der ersten Symptome wird als Inkubationszeit bezeichnet. Werden dabei trotz Infektion keine Symptome ausgebildet, wird von einer latenten Infektion gesprochen.
- Die Latenzzeit ist die Zeitspanne, bei der die Vermehrung des Erregers auf der Oberfläche des Blattes beginnt bis zur erneuten Sporulation. Sie bestimmt die Anzahl der Zyklen während einer Vegetationsperiode.
- Die Zeitspanne, in der Keime und sonstige infektionsgünstige Strukturen gebildet und ausgestreut werden, wird als Sporulationsdauer bezeichnet. Durch die neugebildeten Sporen können sekundäre Infektionen entstehen (ERWIN et al. 1983, HALLMANN et al. 2007).

Die aktuelle Befallsintensität der Krankheit wird anhand von Stichproben an Einzelpflanzen, Versuchsparzellen oder Untersuchung großräumiger Anbaugelände ermittelt. Durch Bonitierung der Schadsymptome erfolgt die Quantifizierung des Befalls. Dabei werden die Parameter Befallshäufigkeit (BH) und Befallsstärke (BS) bonitiert. Die BH ist der Anteil der befallenen Blätter in einer Stichprobe, und die BS ist der Anteil des befallenen Pflanzengewebes in Prozent (HALLMANN et al. 2007).

2.1.3 Der Kartoffelkäfer

Der Kartoffelkäfer (*Leptinotarsa decemlineata* Say) (Abbildung 7) ist der wichtigste tierische Schädling der Kartoffel. Er stammt ursprünglich aus Nordamerika und hat sich seit 1936 von Frankreich aus in Deutschland und heute in fast ganz Europa verbreitet.



Abbildung 7: Kartoffelkäfer und die ersten Frassschäden (ZEPP 2006).



Abbildung 8: Kahlfrass durch den Kartoffelkäfer und seine Larven (ZEPP 2006).

Der Kartoffelkäfer ist etwa 10-12 mm lang, erscheint in der Seitenansicht abgeplattet und ist von oben stark aufgewölbt. Sein markantes Merkmal ist das schwarz-gelb gestreifte Elytron. Die Larven des Käfers sind hell- bis dunkelrot mit hochgewölbtem Hinterleib und werden bis zu 15 mm lang. Bei der Entwicklung werden vier Larvenstadien (L1 bis L4) durchlaufen.

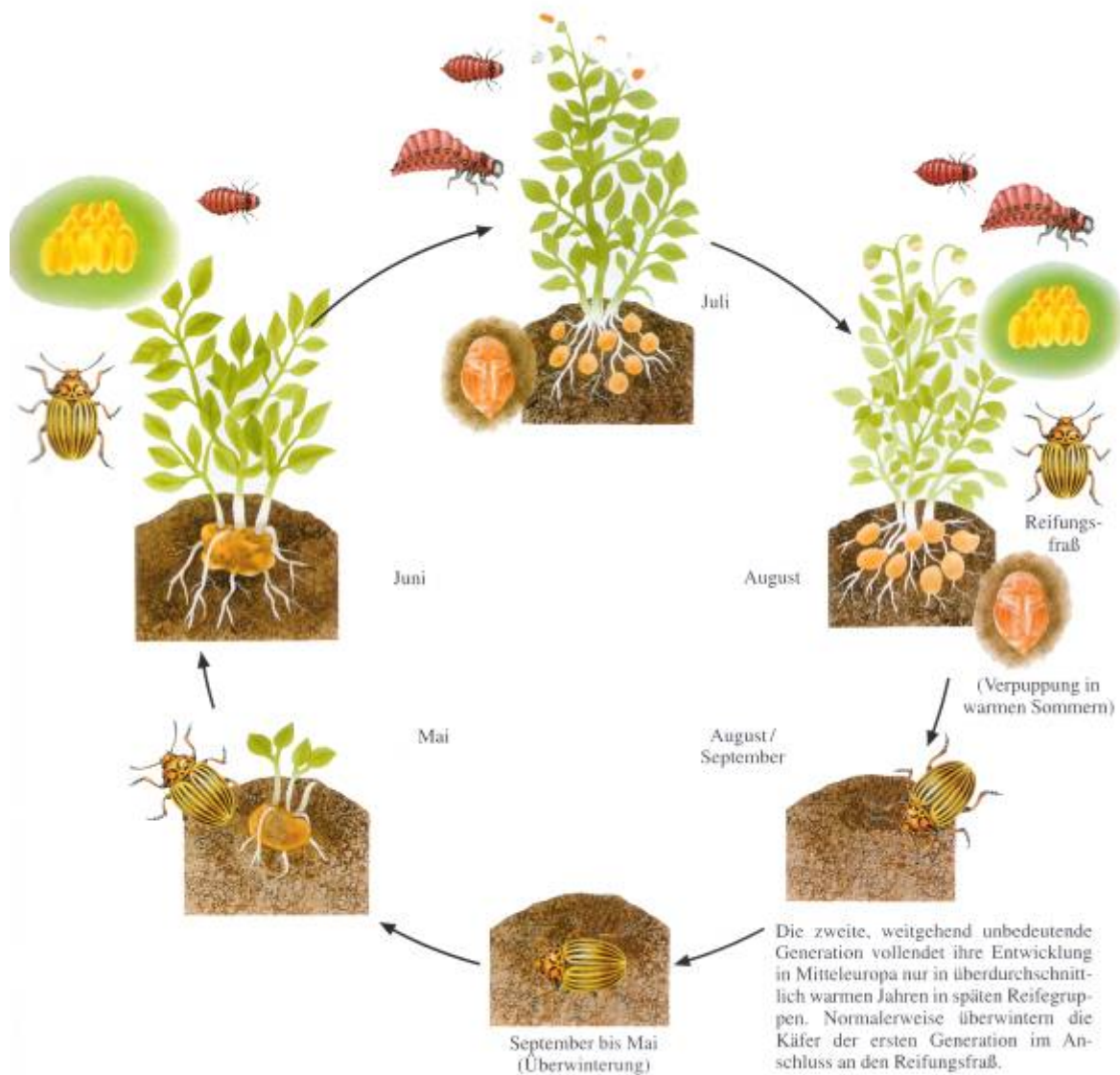


Abbildung 9: Lebenszyklus des Kartoffelkäfers (RADTKE et al. 2000).

In Abbildung 9 ist der Entwicklungszyklus des Kartoffelkäfers dargestellt. In den kalten Monaten von September bis Mai überwintern die ausgewachsenen Käfer im Boden (Abbildung 9). Kurz nach Auflaufen der Kartoffeln im Mai, ab einer mittleren Temperatur von 14 °C, erscheinen die Käfer aus dem Winterlager. Nach der Immigration auf einen Kartoffelschlag erfolgen die Paarung und die Ablage von orangefarbenen Eiern (etwa 10 bis 30 pro Gelege) an der Blattunterseite. Erste Larven schlüpfen nach vier, die letzten nach 25 Tagen. Je nach Temperatur und Nahrungsangebot benötigen die Larven 14 bis 30 Tage um vier Stadien zu durchlaufen. Anschließend erfolgt eine Verpuppung für 12 bis 20 Tage im Boden. Nach dem Schlupf benötigen die Jungkäfer einen zwei bis dreiwöchigen Reifungsfraß, bevor sie sich zwecks Überwinterung 20 bis 40 cm in den Boden eingraben. Unter günstigen Bedingungen kommt es zu einer Eiablage der Jungkäfer, so dass sich eine zweite Generation

von Jungkäfern im selben Jahr entwickeln kann. Die Kardinaltemperaturen für die einzelnen Entwicklungsphasen des Kartoffelkäfers wurden in Tabelle 2 zusammengestellt (KURTH et al. 1984).

Tabelle 2: Biologische und ökologische Kardinalwerte des Kartoffelkäfers (KURTH et al. 1984).

Ereignisse	Temperatur [°C]	
	Optimum	Grenzwerte
Erscheinen aus dem Winterlager		>14
Eiablage	29	14-38
Larvenentwicklung	28	14-38

Typische Symptome für einen Befall sind Rand- und Lochfraßschaden an den Kartoffelblättern. Später ist auch Skelettier- und Kahlfraß ganzer Kartoffelstauden festzustellen (Abbildung 8). Jede Larve verzehrt bei Ihrer Entwicklung bis zur Puppe im Durchschnitt 38 cm² Kartoffelblattfläche (RADTKE et al. 2000).

Um Schäden durch den Kartoffelkäfer entgegenzuwirken, sind zu engen Kartoffel Fruchtfolgen zu vermeiden und entsprechende Pflanzenschutzmaßnahmen durchzuführen. Bei der Anwendung von PSM wurden in den letzten Jahren jedoch vermehrt Insektizidresistenzprobleme beobachtet, die zu einer Steigerung der Behandlungsintensität geführt haben (PREIB et al. 2004, FALKE et al. 2006). Dies liegt auch daran, dass die Bekämpfung durch Insektizide oft ungerichtet erfolgt, da sie gemeinsam mit der Bekämpfung der Krautfäule appliziert wird und die sichere Bekämpfung der Krautfäule Priorität hat.

2.2 Anbauggebiete und Anbaubedingungen

Die Anbaufläche von Kartoffeln lag weltweit im Jahr 2005 bei rund 18,6 Mio. ha, dabei wurden 323 Mio. t Kartoffeln geerntet. Die Schwerpunkte des Kartoffelanbaus liegen in Europa und in Asien mit jeweils mehr als 7 Mio. ha Kartoffelfläche. Die Anbaufläche in Europa konzentriert sich auf die russische Föderation mit 3,1 Mio. ha, die Europäische Union mit 1,9 Mio. ha und die Ukraine mit 1,5 Mio. ha Kartoffeln (Tabelle 3). In der Europäischen Union ist das bedeutendste kartoffelerzeugende Land Polen mit rund 0,6 Mio. ha (LfL 2006). Nordamerika und Europa weisen mit über 30 t/ha die höchsten Erträge pro Fläche auf, wogegen in Afrika die niedrigsten Erträge mit 18 t/ha erzielt werden. (LfL 2006).

Tabelle 3: Die weltweite Erzeugung von Kartoffeln im Jahr 2005 (LFL 2006).

Anbauregion	Anbaufläche 1.000 ha	Hektarertrag dt/ha	Erntemenge 1000t
Europa	7.566	171	129.234
EU-25	1.971	295	58.169
EU-15	1.166	377	43.898
Russland	3.134	119	36.462
Ukraine	1.514	129	19.462
Weißrussland	462	177	8.185
Asien	7.381	170	125.938
China	4.400	166	73.000
Indien	1.400	179	25.000
Nord- und Zentralamerika	708	374	26.501
USA	439	435	19.091
Kanada	165	294	4850
Südamerika	874	157	13.749
Peru	264	124	3.281
Kolumbien	153	172	2.623
Ozeanien	48	380	1.804
Welt	18.622	174	323.103

In Deutschland werden auf einer Fläche von 0,27 Mio. ha Kartoffeln angepflanzt. Abbildung 10 zeigt die Kartoffelfläche in Hektar (ha) pro Landkreis in Deutschland. Die Schwerpunkte des Kartoffelanbaus liegen in Niedersachsen, Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg und Sachsen-Anhalt. Während in diesen Bundesländern auf den Flächen des Norddeutschen Tieflandes große Schläge von 5 bis 300 ha zu finden sind, ist die Schlaggröße im Süden von Deutschland mit Schlägen zwischen 1 und 4 ha erheblich kleiner (KLEINHENZ und PREIß 2004). In Mittel- und Süddeutschland hat der Kartoffelanbau dennoch einen hohen Stellenwert, und Kartoffeln sind mit über 300 ha pro Kreis eine der wichtigsten Kulturen. Dementsprechend unterscheiden sich auch die Anbauziele in diesen Gebieten. Auf den kleineren Schlägen in den Mittelgebirgsregionen und in Süddeutschland werden Kartoffeln vorrangig für die Eigen- oder Direktvermarktung produziert. Auf den großen Schlägen im Norden dominiert der Vertragsanbau für die industrielle Stärkeproduktion aus Kartoffeln (PUTZ 1989).

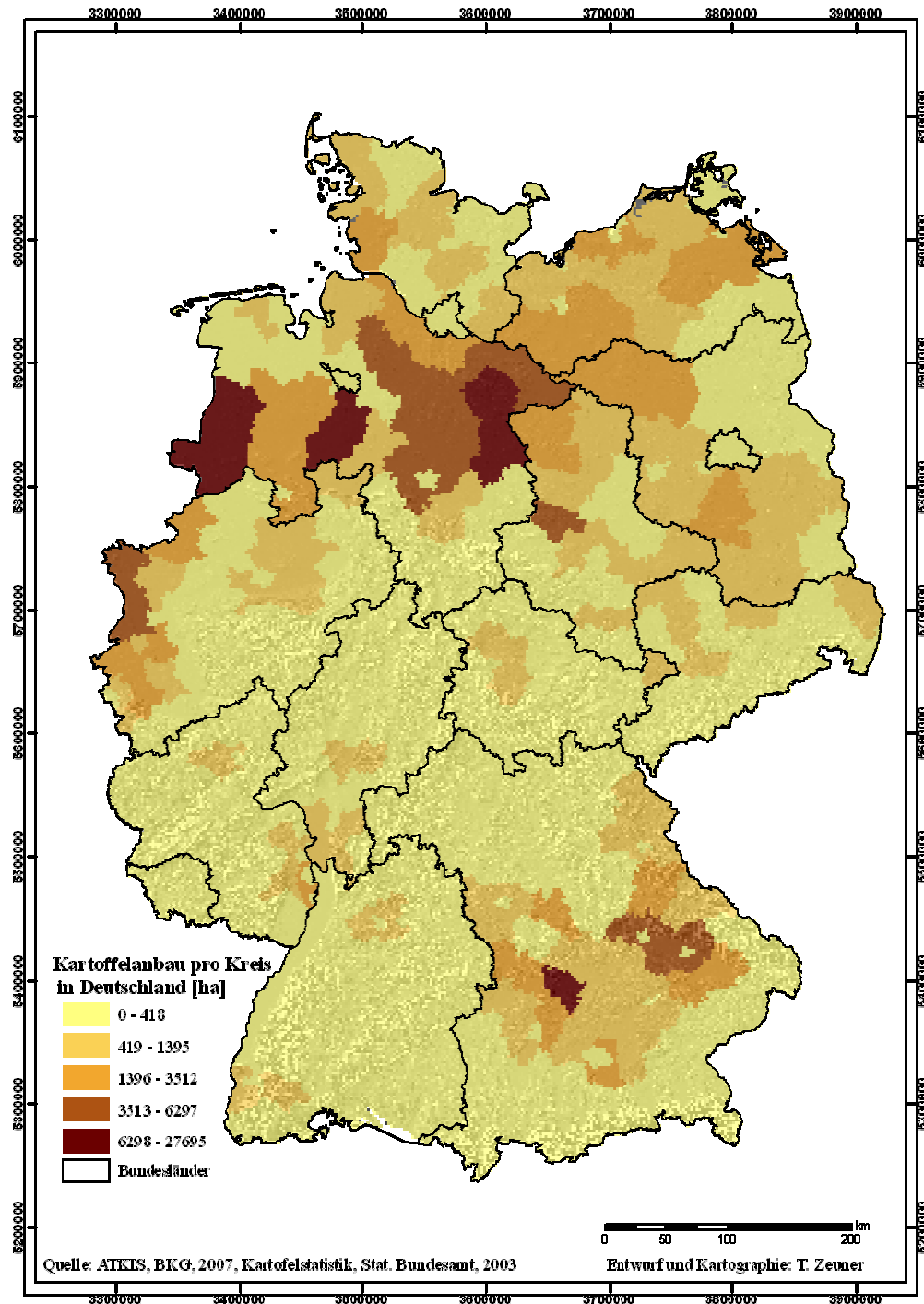


Abbildung 10: Verteilung der Kartoffelflächen in Deutschland pro Kreis [ha].

Die Kartoffel besitzt eine hohe klimatische Anpassungsfähigkeit. Ein optimales Wachstum wird bei einer Temperatur von 17 bis 20 °C erreicht. Erst bei Temperaturen von -1 °C stirbt das Kraut ab, und zu hohe Temperaturen von über 29 °C führen zu eingeschränkter Knollenanlage (PUTZ 1989). Wetterextreme wirken sich sofort auf den Stärkegehalt und die Verarbeitungsqualität der Kartoffel aus. Bis zur Entwicklung des Krautapparats reagiert die Kartoffel sehr empfindlich auf Wassermangel. Ergiebige Niederschläge fallen allerdings in Deutschland nur in den westlichen Luvlagen der Deutschen Mittelgebirge sowie im

Alpenvorland. Des Weiteren ist aufgrund steigender Kontinentalität eine Abnahme der Niederschlagsintensität in Deutschland von West nach Ost zu erkennen (WEISCHET et al. 2000). Somit herrscht in der Vegetationsperiode ein Niederschlagsdefizit. Hierdurch bedingt ist eine Beregnung zum optimalen Kartoffelanbau nötig.

Kartoffeln wachsen auf fast allen Böden. Für den Anbau werden krümelige, lockere, durchlässige, und leicht erwärmbare Böden bevorzugt, die eine hohe Feldkapazität aufweisen. Schwere, tonige oder sehr steinreiche Böden bereiten der Kartoffel Schwierigkeiten, da sich hier die Knollen nicht optimal ausbilden können. Auch trockene, sandige Standorte sind aufgrund von Wassermangel nur bedingt geeignet. Insgesamt sind humose, lockere Böden vom lehmigen Sand bis zum sandigen Lehm für den Kartoffelanbau am besten geeignet (PUTZ 1989). Besonders begünstigt sind somit leichtere, sandige oder auch lößhaltige Böden. Diese Bodentypen erwärmen sich im Frühjahr schneller, wodurch eine frühe Pflanzung und ein frühes Auflaufen der Kartoffeln möglich sind.

2.3 Untersuchungsgebiete

Als Untersuchungsgebiete wurden Deutschland und speziell die Bundesländer Brandenburg und Rheinland-Pfalz ausgewählt. Die naturräumlichen Gegebenheiten beider Bundesländer machten sie zu geeigneten Testgebieten.

Brandenburg ist eben, wird von eiszeitlichen Hügeln durchzogen, und es lassen sich eine Reihe ausgedehnter Waldgebiete, viele Seen, Flüsse und zahlreiche Kanäle finden (BRAMER et al. 1991, MARCINEK und ZAUMSEIL 1993). Klimatisch kann Brandenburg in den subkontinentalen bis kontinentalen Bereich eingeordnet werden. Die Vegetationsperiode des Kartoffelanbaus sind die Monate April bis September. Die mittlere Temperatur in Brandenburg in dieser Zeit beträgt ca. 9 bis 11 °C. Der kälteste Monat in der Vegetationsperiode ist der April, der im Mittel eine Temperatur von 8 °C hat. Wärmster Monat ist normalerweise der Juli mit 18 °C. Mit einer durchschnittlichen Niederschlagssumme von unter 300 mm in der Vegetationsperiode gehört das Land zu den trockensten Regionen Deutschlands und Europas (HEYER 1962) (Abbildung 11).

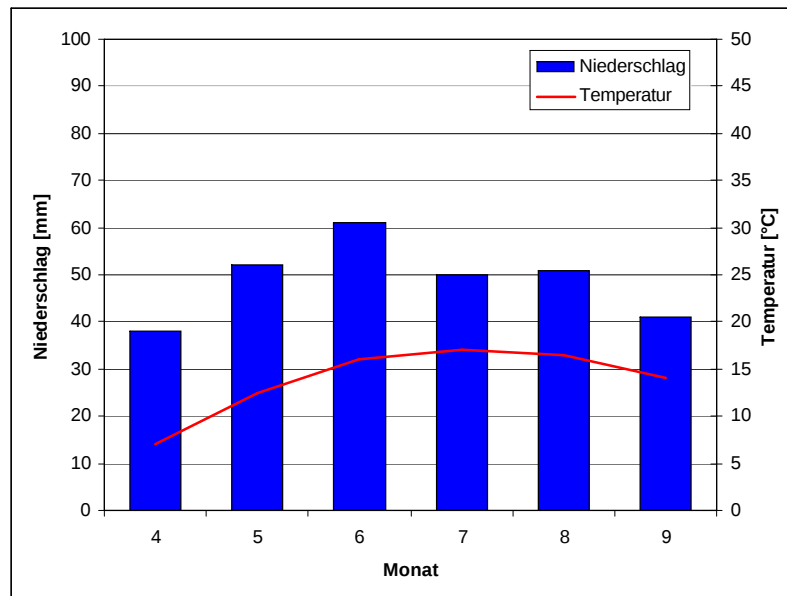


Abbildung 11: Klimadiagramm des 30 jährigen Mittels (1961-1990) von Neuruppin (Brandenburg) (MÜLLER-WESTERMEIER 1996).

77 % der landwirtschaftlich genutzten Fläche (= 1.028.951 ha) in Brandenburg wird als Ackerland bestellt (STBA 2006). Davon hat der Kartoffelanbau einen Anteil von 11.640 ha. (MULV 2006).

Das Land Rheinland-Pfalz liegt im Südwesten der Bundesrepublik Deutschland. Naturräumlich zählt Rheinland-Pfalz sowohl zum Deutschen Mittelgebirge als auch zum Oberrheingraben (FISCHER 1989). So gehört der Norden von Rheinland-Pfalz zum Rheinischen Schiefergebirge. Hierzu zählen die Eifel, der Hunsrück, der Westerwald und der nordwestliche Teil des Taunus. Im südlichen Teil von Rheinland-Pfalz schließt sich das Rheinhessische Tafel- und Hügelland, das Saar-Nahebergland, das Nordpfälzer Bergland und der nördliche Teil der Oberrheinischen Tiefebene an (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962, FISCHER 1986, LIEDTKE und MARCINEK 2002).

Klimatisch liegt Rheinland-Pfalz im westeuropäisch-atlantischen Klimabereich (ENDLICHER 1991, WEISCHET und ENDLICHER 2000). Die Witterung ist durch milde Winter und gemäßigte Sommer geprägt. Der Niederschlag in der Vegetationsperiode liegt im Landesschnitt bei 400 mm (FISCHER 1989). Der wärmste Monat ist der Juli, in dem im Mittel etwa 17 °C nicht unterschritten werden (Abbildung 12). Sowohl bei den Niederschlagsmengen als auch bei den mittleren Temperaturen treten landesweit deutliche Unterschiede auf, die durch die Orographie in Rheinland-Pfalz zu erklären sind. Deswegen wurden die klimatischen Bedingungen der Kartoffelanbaugebiete am Oberrhein (Station Eich), im Maifeld (Station Münstermaifeld) und im Neuwieder Becken (Station Mühlheim-Kärlich) detailliert betrachtet.

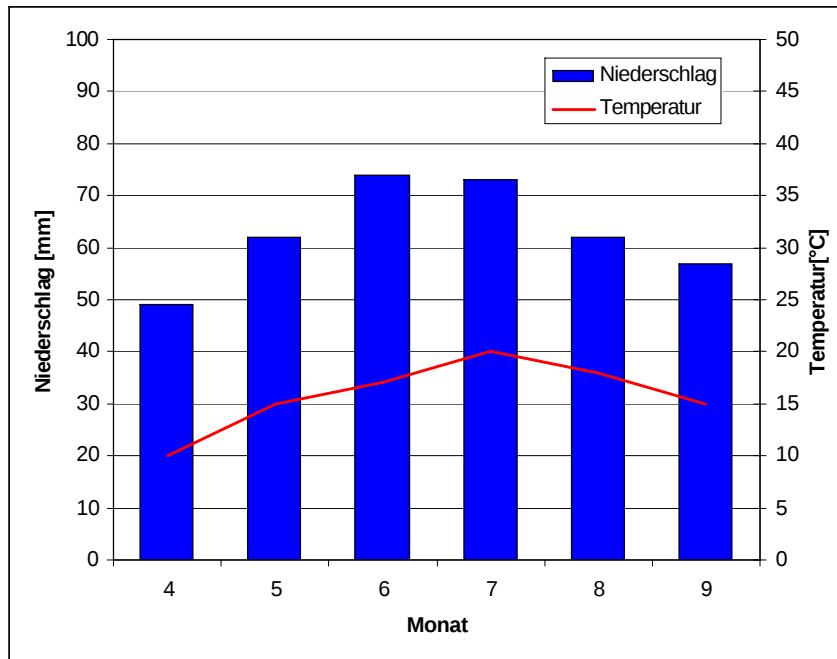


Abbildung 12: Klimadiagramm des 30 jährigen Mittels (1961-1990) von Koblenz (Rheinland-Pfalz) (MÜLLER-WESTERMEIER 1996).

Die durchschnittliche mittlere Temperatur während der Vegetationsperiode der Kartoffel ist im Gebiet Oberrheingraben mit einer Höhe über NN bis zu 100 m im Vergleich der drei Stationen mit 12 bis 21 °C am Höchsten. Am Übergang vom Mittelrheintal ins Neuwieder Becker und zwischen Hunsrück, Eifel und Westerwald im Anbaugebiet Neuwieder Becken mit Höhen zwischen 100 und 200 m über NN liegen die Mitteltemperaturen mit etwa 11 bis 18 °C um 2 °C niedriger als in der Oberrheinischen Tiefebene (BÖHM 1964, LIEDTKE und MARCINEK 2002). Das Saar-Nahe-Bergland und die unteren Hangregionen des Schiefergebirges bis etwa 400 m, zu denen auch die Kartoffelanbaugebiete im Maifeld gehören, besitzen etwas niedrigere Temperaturen. Die mittlere Temperaturamplitude der Vegetationsperiode schwankt zwischen 8 und 16 °C (FISCHER 1989). Die Gebiete über 400 m über NN weisen die extremsten Werte auf. Da diese für den Kartoffelbau in Rheinland-Pfalz keine Rolle spielen werden sie auch nicht näher betrachtet. Abbildung 13 zeigt, wie sich die Temperatur aufgrund der Höhenlage an den drei Stationen Eich, Mülheim-Kärlich und Münstermaifeld ausprägt.

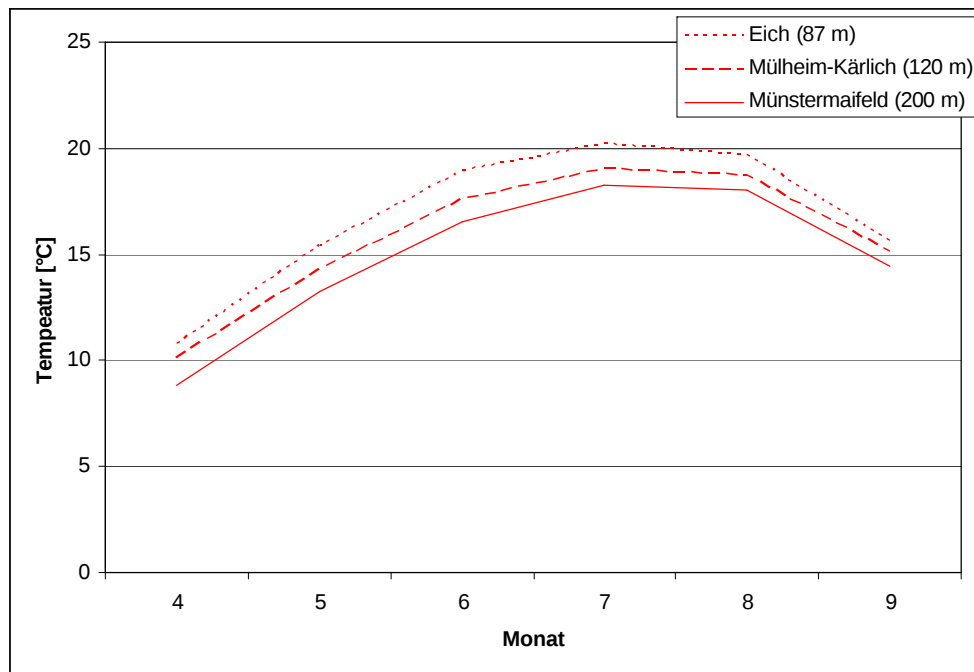


Abbildung 13: Mittlerer Temperaturverlauf der Monate April bis September der Stationen Eich, Mülheim-Kärlich und Münstermaifeld (Rheinland-Pfalz).

Mit der Niederschlagsverteilung verhält es sich ähnlich wie mit dem Temperaturverlauf. Sie variiert deutlich mit der Höhenlage. In den Tallandschaften von Rhein, Nahe, Glan, Mosel und Ahr werden Niederschläge von bis zu 400 mm gemessen. Im Mainzer Becken und in der Oberrheinischen Tiefebene werden dagegen Niederschläge von lediglich 250 mm gemessen. Aus diesem Grund ist hier eine Bewässerung der Kartoffelflächen unumgänglich. Gebirge modifizieren die Niederschlagsmengen, und so steigen die Niederschläge in Rheinland-Pfalz mit den Geländehöhen an. Aber auch die Positionierung der Gebirge spielt dabei eine wichtige Rolle. So werden die höchsten Niederschlagsmengen in den Luv-Bereichen der Gebirge gemessen (WEISCHET 1991). Die Hartlingszüge im Hunsrück bis 400 m liegen mit etwa 550 mm Niederschlag deutlich über dem Oberrheingraben. Die Kartoffelbauern haben hier ausreichende Niederschläge zur Verfügung, so dass nicht beregnet werden muss.

Die landwirtschaftliche Nutzfläche umfasst etwa 36,2 % der Landesfläche. Schwerpunkte befinden sich entlang des Oberrheins und der Mosel, im Bitburger Gutland und auf dem Maifeld. Die Bewirtschaftungsfläche (= 708.400 ha) gliederte sich 2006 folgendermaßen: 55,6 % Ackerbau, 34,7 % Dauergrünland, 9,7 % Weinbau und 0,9 % Obstbau. Dabei wurden im Jahr 2006 8.420 ha Ackerland mit Kartoffeln bestellt (MWVLW 2006).

2.4 Schaderregerprognosen

Der Einsatz von Prognosemodellen für landwirtschaftliche Schaderreger ist eine Möglichkeit, PSM effektiver einzusetzen. In der ehemaligen DDR hatten solche Modelle einen sehr hohen Stellenwert, und so wurden dort die Entwicklung und der Einsatz von Simulationsmodellen für Pflanzenkrankheiten vorangetrieben (GUTSCHE und KLUGE 1983). Auf Basis dieser Erfahrungen wurden bei der ZEPP mehr als 20 wetterbasierte Prognosemodelle entwickelt und in die Praxis eingeführt (JÖRG et al. 1999). Besonders im Kartoffel-, Obst- und Gemüseanbau haben Prognosemodelle eine zentrale Bedeutung (KLEINHENZ und JÖRG 1998). Dabei werden bei der Anwendung von Prognosemodellen zwei Ziele verfolgt. Zum einen soll der Zeitbedarf für Felderhebungen minimiert werden, indem der Erhebungszeitraum exakt prognostiziert wird, zum anderen soll der Bekämpfungstermin für den Einsatz von Fungiziden oder Insektiziden möglichst optimal bestimmt werden.

Ein Großteil der Prognosen beruht auf den empirisch ermittelten Zusammenhängen zwischen dem Witterungsverlauf und dem sich daraus entwickelnden Befallsverlauf. Dabei wird auf der Basis von zurückliegenden Wetterdaten gerechnet und nicht mit einer Wettervorhersage (KRANZ 1996).

Zur Entwicklung vieler Prognosemodelle werden speziell angelegten Beobachtungsflächen oder Versuche intensiv bonitiert, oder es werden historische Daten ausgewertet. Dabei wird versucht, die Kardinalwerte des Erstauftretens und der Entwicklung des Erregers und des Wirtes, durch Umweltfaktoren und gegebenenfalls auch Anbaumaßnahmen in den Prognosen zu berücksichtigen (KRANZ 1996).

Die Übernahme von Prognosemodellen in die Praxis ist oft ein langwieriger Prozess, da durch verbleibende Unsicherheit eine mehrjährige Validierung vieler Regeln der Prognosemodelle notwendig ist. Zudem müssen die Prognosen den praktischen Erfordernissen der landwirtschaftlichen Beratung angepasst werden. Um zu prüfen, ob Prognosen unter verschiedenen Anbaubedingungen hinreichend verlässlich und genau sind, werden sie anhand von Wetterdaten eines umfangreichen Messnetzes überprüft (KRANZ 1996, ROSSI et al. 1997). Haben sich die Prognosemodelle als zuverlässig und ausreichend sicher erwiesen, werden sie in die Praxis eingeführt. Nutzer der Prognosemodelle sind überwiegend Berater der Officialberatung, die Prognoseergebnisse auswerten und anschließend über Internet, Fax, Telefon oder SMS verbreiten (KRANZ 1996, KLEINHENZ 2001).

Die bei der ZEPP entwickelten Entscheidungshilfen lassen sich in drei Typen untergliedern. Modelle des Typ 1 werden mit einer „1“ hinter dem Modellnamen gekennzeichnet und berechnen das Erstauftreten von Schaderregern. Modelle mit der Endung „2“ sind

wissenschaftliche Modelle, die den Verlauf der Epidemie beschreiben. Diese werden jedoch nicht im Warndienst eingesetzt. Modelle des Typs „3“ berechnen den Infektionsdruck und werden zur Bestimmung von Zeiträumen mit hohem Gefährdungspotenzial genutzt, wodurch dann Behandlungsempfehlungen gegeben werden können. Diese Modelle sind vor allem bei polyzyklischen Krankheiten, also Krankheiten mit mehr als einem Entwicklungszyklus pro Jahr erforderlich (KLEINHENZ und JÖRG 1998).

In dieser Arbeit wurden vier der Modelle der ZEPP (SIMLEP3, SIMPHYT1 und 3 und SIMBLIGHT1) verwendet.

2.5 Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft

Ein Geographisches Informationssystem (engl.: Geographic Information System GIS) ist ein „rechnergestütztes Informationssystem, das aus Hardware, Software, Daten und Anwendungen besteht. Mit ihm können raumbezogene Daten digital erfasst und redigiert, gespeichert und reorganisiert, modelliert und analysiert sowie alphanumerisch und graphisch präsentiert werden“ (BILL 1999a). Dabei haben sich mit der Zeit in verschiedenen Fachrichtungen, in denen GIS zum Einsatz kommt, Spezialisierungen entwickelt, wie zum Beispiel das Rauminformationssystem (RIS), das Landschaftsinformationssystem (LIS), das Netzinformationssystem (NIS) oder das Umweltinformationssystem (UIS) (GOODCHILD 1997, MYSIAK 2000).

Die ersten GI-Systeme wurden in den 60er Jahren entwickelt. Diese hatten das Ziel, die Kartographie durch computergestützte Technologie zu erleichtern. Das erste anwendbare GIS war das „Canada Geographic Information System“. In den 70er und 80er Jahren wurden Funktionen zur räumlichen Analyse hinzugefügt.

Diese neue Technologie fand auch Einzug in landwirtschaftliche Entscheidungsprozesse, sowie in Monitorings- und Planungsverfahren im ländlichen Raum. Auch die Anwendungsmöglichkeiten von Satellitendaten oder auch das Potenzial der GPS-Technologie zur räumlichen Positionsbestimmung wurden für Forschungs- und Entwicklungsvorhaben genutzt (STREIT 2004). Eine Übertragung der Anwendungen in öffentliche Institute war aufgrund fehlender geeigneter landwirtschaftlicher Geodaten noch nicht möglich. Zudem waren die Investitionskosten für Hard- und Software sehr hoch und es fehlten landwirtschaftsspezifische Fachapplikationen (BILL 2004, MARBLE 2000).

Durch die Entwicklung von schnellen leistungsfähigen Computersystemen und modernen Erfassungssystemen (z.B. Laserscanning) konnten geeignete Geodaten erstellt werden, wodurch die Nutzung von GIS in der Landwirtschaft ermöglicht wurde (STREIT 2004).

Seitdem beteiligen sich die öffentliche Verwaltung, die Industrie und auch landwirtschaftliche Betriebe personell und finanziell, um den Ausbau von GIS in der Landwirtschaft voranzutreiben. Im Folgenden werden Nutzungsmöglichkeiten von GIS in der Landwirtschaft aufgezeigt.

Am häufigsten wird GIS zur Entscheidungsunterstützung verwendet. STREIT (2004) schätzt, dass 80 % aller Entscheidungen in der Wirtschaft und Verwaltung raumbezogen sind und dass dies in der Landwirtschaft in einem noch größeren Umfang zutrifft. Er spricht von der Unterstützung betrieblicher, regionaler und landesweiter Monitorings-, Planungs-, Entscheidungs- und Produktionsprozesse. Anwendungsbeispiele solcher Entscheidungshilfen sind Erosionsmanagement, Vor-Ort-Analysen mittels PDA und GPS, Monitorings mit mobilem GIS oder die Verwaltung landwirtschaftlicher Betriebe mit GIS (ZEUNER et al. 2006). Die Biologische Bundesanstalt (BBA) mit dem Institut für Folgenabschätzung im Pflanzenschutz ist federführend für die Nutzung von GIS in der Entscheidungsunterstützung in der Landwirtschaft (GOLLA et al. 2002, GOLLA et al. 2003).

In der Landwirtschaft werden immer häufiger GIS-basierte Verwaltungs- und Kontrollsysteme eingesetzt. Durch die EWG-Verordnung 3508/92 der Europäischen Union aus dem Jahr 2002 haben sich alle Mitgliedsstaaten verpflichtet ein GIS-basiertes Verwaltungs- und Kontrollsystem (InVeKoS) für die Verwaltung von landwirtschaftlichen Subventionen einzuführen. In Deutschland wurden die Bundesländer mit der Umsetzung von InVeKoS beauftragt (STREIT 2004).

Eine weitere Nutzungsmöglichkeit ist das „Precision Farming“. Durch die Nutzung von Geotechnologie in Form von GPS zur Positionsbestimmung, moderner Sensortechnik und von Geodaten ist es möglich, die standortspezifischen Eigenschaften eines Schlages bzw. Pflanzenbestandes zu dokumentieren. Mit diesen Daten ist eine teilflächen- und standortspezifische Bewirtschaftung des Schlages durch den Einsatz von präzisionsgesteuerten Traktoren und Anbaugeräten möglich (STREIT 2004). Die praxistaugliche Einführung von Precision Farming wird jedoch durch hohe Investitionskosten gebremst. Im Südwesten Deutschlands stellt sich durch die Kleinparzellierung der Schläge die Frage nach der Wirtschaftlichkeit eines solchen Systems. Durch bessere und kostengünstigere Technik und ein breiteres Verständnis für GIS werden auch die Anwendungsgebiete für Precision Farming in der Landwirtschaft zunehmen (BILL und FRITSCH 1991).

Die Anwendung von GIS in der Landwirtschaft hat aber auch Defizite aufgezeigt, die es zu beseitigen gilt, damit möglichst optimale Ergebnisse erzielt werden können. So stellen die Geodaten immer noch ein Problem hinsichtlich ihrer Qualität dar. Dieses liegt häufig in der

geforderten Genauigkeit, die noch nicht erfüllt werden kann. Des Weiteren fehlen bei der Verwendung von Daten von Drittherstellern häufig Informationen über die Erhebung (Referenzsystem, Datum, Erhebungsmethode, etc.). Ohne diese Metadaten sind solche Daten nutzlos, da sie nicht in den geographischen Kontext gestellt werden können. Daher ist die akribische Erfassung von Metadaten zu fordern.

Defizite bestehen auch in der Nutzung und Anwendung von komplizierten und komplexen GIS. Durch Schulungen und Ausbildung zu GIS-Experten kann dieses Defizit ausgeglichen werden, wodurch die Anwendung von GIS in der Landwirtschaft ermöglicht wird.

Die neuesten Konzepte von GIS beschäftigen sich mit Geodateninfrastrukturen und interoperabler Datenhaltung. Hierbei werden die Datenbestände von den Erstellern interaktiv per Webservice im Internet zur Verfügung gestellt. Dies ermöglicht größtmögliche Aktualität und Plausibilität der Daten. Über Metadatensuchmaschinen erfolgen die Verbreitung und der Zugang zu diesen Datenquellen (BILO 2004, LENK 2004). GIS hat sich somit als erfolgsversprechendes Hilfsmittel in der Landwirtschaft etabliert.

2.6 *Naturräumliche Gliederung*

Das Thema der „naturräumlichen Gliederung“ war bei dieser Arbeit von besonderer Bedeutung, da für die Interpolation der Wetterdaten zunächst eine Gliederung Deutschlands in Naturlandschaften durchgeführt werden musste.

„Die außerordentliche Vielgestaltigkeit, die ein Land aufweist, macht es nicht möglich dieses im Detail zu untersuchen, zu erforschen und darzustellen“ (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962). Es muss daher eine Möglichkeit gefunden werden, Untersuchungen zu verallgemeinern und sie räumlich auswertbar zu machen. Denn nur in einem kleinen Bereich ist es möglich der Vielfalt der Prozesse und Erscheinungen gerecht zu werden, sie zu verstehen und modellieren zu können. Wenn ein größerer Raum oder ein Land in seinen Eigenschaften überblickt werden soll, ist es immer notwendig zu verallgemeinern oder Teilbereiche auszuwählen. In der Geographie wird diese Forschungsrichtung als „Landschaftsökologie“ oder „Geoökologie“ bezeichnet (LESER 1997, LIEDTKE und MARCINEK 2002). Die Geoökologie versucht dabei, möglichst qualitative und quantitative Aussagen eines Geokomplexes zu erfassen. Die Basis der Forschung sind die einzelnen Ökosysteme. Beschrieben wird ein Ökosystem durch verschiedene Teilkomponenten (Geofaktoren: Gestein, Gewässer, Boden, Klima, Vegetation und Tierwelt) (SCHILKE 1992). Bilden diese ein raumspezifisches Wirkungsgefüge von annähernd gleichförmigen Raumeinheiten, so wird

diese Raumeinheit als „Landschaft“ oder „Naturraum“ bezeichnet (HAASE 1964, ELLENBERG 1973).

Die räumliche Differenzierung der Geofaktoren zu erfassen und sie in einheitliche Landschaften einzuteilen, ist die Aufgabe der naturräumlichen Gliederung. Um eine naturräumliche Gliederung erstellen zu können, wurden in den Nachbarwissenschaften der Geographie mehrere analytische Arbeitsmethoden entwickelt. Für eine Gliederung von vegetativ homogenen Landschaften wurde zum Beispiel die Phänologie zur Abgrenzung der Landschaften verwendet (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962, KLINK 1972, BURAK 2005).

In Europa sind solche Gliederungen seit Ende des 15. Jahrhunderts bekannt. Der Schweizer Naturforscher Conrad von Gesner (1516 bis 1565) ordnete bei einer Beschreibung dem Berg Pilatus vier klimatische Höhenstufen zu: die Schneeregion, die alpine Region, die subalpine Region und die Talstufe. Die Abgrenzung dieser Stufen geschah aufgrund phänologischer Gesichtspunkte. Carl von Linné (1707 bis 1778) war einer der Ersten, der die Höhenlage, das Klima und den Boden betrachtete, um Landschaften miteinander vergleichen zu können. Die erste bekannte kartographische Darstellung einer Gebietsgliederung stammt von J.L.G. Soullavie. Es handelt sich um eine Karte von 1783 mit fünf nach der Vegetation benannten Klimagürteln des Ardèche-Gebietes im Vivarais. Geologen und Geographen, wie Albrecht Penck (1886), Gustav Braun (1916) oder Norbert Krebs (1944) versuchten eine Einteilung Deutschlands zu erreichen (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962, LIEDTKE und MARCINEK 2002). Während einige Autoren eher das Relief oder den geologischen Bau zum Hauptkriterium ihrer Einteilungen machten, versuchten andere die Gesamtheit der naturräumlichen Gegebenheiten zu betrachten. Dabei wurden die Gebiete im Hinblick auf Lage, Nachbarschaften, Relief, Gewässer, inneren Bau, Klima, Boden und Pflanzenwelt analysiert. Jeder Versuch die natürlichen Grenzen für diese Landschaften scharf zu ziehen, ähnlich der administrativen Grenzen, gestaltete sich äußerst schwierig. Jede Grenzziehung ist daher eine Kompromisslösung. Die Erkenntnisse dieser Arbeiten und Forschungen mündeten in ein „Handbuch der naturräumlichen Gliederung Deutschlands“, das von MEYNEN und SCHMITHÜSEN (1962) erstellt wurde. Dieses Buch diente fortan als Basis zur Weiterentwicklung, Verfeinerung und Verifizierung der räumlichen Einteilung Deutschlands. Durch die Vielschichtigkeit der Geographie kam es dazu, dass je nach Fragestellung den Geofaktoren unterschiedliche Gewichtung zuteil wurde und die naturräumliche Gliederung modifiziert wurde. So entwickelte sich die Geoökologie zu einem eigenen Teilbereich bzw. Forschungsbestand der Geographie (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962, KLINK 1972, BURAK 2005).

2.7 Regionalisierungen

Unter Regionalisierung wird in der Geostatistik die Berechnung von Punktdaten auf die Fläche verstanden (CRESSIE 1990). Die ältesten Methoden für die Regionalisierung von Wetterdaten wurden Mitte des 19. Jahrhunderts angewendet. Die verteilten Messstationen wurden bezüglich ihrer Geländeeigenschaften (Höhe, Hangneigung, Exposition) als gleich angesehen. Aus dem einfachen arithmetischen Mittel zwischen zwei Stationen wurde dann der Schätzwert für einen virtuellen Messpunkt zwischen den Stationen berechnet. Bei umfangreichen, gleich verteilten Stationsnetzen, deren Naturraum nur geringe Reliefunterschiede aufweist, wird diese Methode mit guten Ergebnissen bis heute verwendet (SCHÄDLER 1985, HELLER 1996, FRANK 2000, JARVIS et al. 2002). Bei der Zeichnung von Isolinen durch die zuständigen Bearbeiter wurden oft manuelle Korrekturen aufgrund örtlichen Kenntnisstands durchgeführt. Diese Vorgehensweise war aber auf Dauer nicht praktikabel, da sie viel zu aufwändig und nicht nachvollziehbar oder objektivierbar war.

Anfang des 20. Jahrhunderts wurde erstmals der Begriff der Interpolation geprägt. Meinardus überzog ein Gebiet um 1900 mit einem äquidistanten Raster und berechnete einen Niederschlagswert auf Basis der benachbarten Wetterstationen und des Isohytenverlaufs für jede einzelne Rasterzelle (SEDLACEK 1978, HELLER, 1996).

Heute noch bekannt sind die Thiessen-Polygone. Thiessen zeichnete im Jahr 1911 Polygone aus einem Satz von Punkten. Ein Polygon wird dabei durch die Mittelsenkrechten aller Nachbarpunkte vom untersuchten Punkt erzeugt. Die Schnittpunkte dieser Mittelsenkrechten ergeben das Thiessen-Polygon. Die Gesamtheit der Thiessen-Polygone bilden das Thiessen-Diagramm (HELLER 1996). 1917 versuchte Horton dieses Verfahren zu objektivieren, indem er die Mittelsenkrechten zwischen den einzelnen Stationen konstruierte und einen Polygonzug mit repräsentativen Flächen erhielt. Diskin kombinierte 1970 die Verfahren von Thiessen und Meinardus und berechnete die flächenbezogene Gewichtung mit Hilfe eines äquidistanten Gitternetzes (SCHÄDLER 1985). Dieses Verfahren eignet sich auch gut bei unregelmäßigen Messnetzen, jedoch handelt es sich weiterhin um ein zweidimensionales Modell, was die Anwendung in stark gegliederten Gebieten schwierig macht.

Durch die Verbesserung der Rechenoperationen wurden in den 80er Jahren weitere Interpolationsverfahren entwickelt.

Die Quadrantenmethode ist die Weiterentwicklung der Rasterverfahren durch das US Office of Hydrology im Jahr 1972 (OLEA 1999). Sie wird auch inverse distance weighted (IDW) genannt. IDW erfordert die Definition von Teilflächen, meistens Quadranten, um den Interpolationspunkt. Innerhalb jeder Teilfläche muss der nächste gemessene Punkt gesucht

werden. Die Schätzung ist als eine gewichtete Summe der nächstgelegenen Messungen jeder Teilfläche definiert, wobei die Gewichte proportional zur Entfernung der Nachbarpunkte berechnet werden.

Zwei weitere Verfahren sind die Trendoberflächenanalyse und das Splineverfahren. Die Trendoberflächenanalyse wurde 1970 von Mandeville und Rodda ebenfalls auf Basis des Rasterverfahrens entwickelt (OSTHEIDER 1981). Die Spline Funktion ist eine mathematische Interpolation und stammt von Shaw und Lynn 1972 (HELLER 1996). Hierbei wird eine zweidimensionale Annäherung an den realen Wert durch eine bikubische Berechnung erreicht (LASLETT 1994).

Alle bisher vorgestellten Verfahren basieren auf zweidimensionalen Berechnungen, das heißt, dass keine Orographie in den Berechnungsprozess einfließt. Naturräume mit starkem Relief lassen sich daher nur bedingt durch diese Verfahren interpolieren. Auch wird bei diesen Verfahren ein sehr engmaschiges und zumeist regelmäßiges Raster vorausgesetzt.

Ausgehend von den geologischen Arbeiten von Krige entwickelte Matheron 1967 das Kriging-Verfahren (K). Dieses Verfahren versucht, die bisherigen Ansätze einer distanzgewichteten Interpolation durch eine Variogrammanalyse zu verbessern. Dabei erfolgt die Interpolation in vier Schritten. Im ersten Schritt wird ein Variograph erzeugt, das die räumliche Variabilität untersucht, um daraus als Zweites ein Modell abzuleiten, das die räumlichen Eigenschaften der Variablen beschreibt (KRIGE 1978). Das Modell wird dann zur Berechnung der Interpolation dem eigentlichen K genutzt. In einem letzten und vierten Schritt erfolgt eine qualitative Überprüfung der errechneten Koeffizienten. Für dieses Verfahren werden sehr große und möglichst regelmäßige Messnetze benötigt (STREIT 1981, OLIVER und WEBSTER 1990, HUDSON und WACKERNAGEL 1994, LASLETT 1994). K hat sich in vielen Bereichen bis heute weiterentwickelt und durchgesetzt.

Um den Einfluss der dritten Dimension, sowie weitere Einflüsse fassen zu können, wurde nach Alternativen zu den bisher vorgestellten Verfahren gesucht. Die multiple lineare Regression (MR) wurde dabei als Grundlage für Interpolationsberechnungen verwendet (HORMANN 1979, DALY et al. 1994, GOSSMANN et al. 1993, PHILLIPS und DALY 1993, KLEIN 1994, HELLER 1996). Die multiple Regressionsanalyse ist ein Instrument zur Untersuchung des funktionalen Zusammenhangs zwischen einem quantitativem Merkmal x mit den Ausprägungen y und den Merkmalen $x_1 \dots x_i$. Die MR hat die Aufgabe, den Zusammenhang zwischen mehr als zwei Variablen zu beschreiben und damit zu prognostischen Aussagen für eine als abhängig angesehene Variable y zu gelangen, der

unterstellt wird, dass sie nicht nur von x_1 , sondern auch von x_2 (und eventuell weiteren Variablen) abhängt (AIKEN et al. 1991, ROSNER 1992, COHEN et al. 2002).

Um den Einfluss der Topographie bei einer multiplen linearen Regression erfassen zu können, ist es notwendig eine Parametrisierung des Umgebungsreliefs zu erreichen. HORMANN 1981, HELLER (1996) und ZEUNER (2003) beschäftigten sich mit Ableitungen aus dem Digitalen Geländemodell. Durch die Nutzung von leistungsfähigen Rechnern und GIS ist es möglich, die benötigten Parameter zu extrahieren und sie bereitzustellen. Aber auch andere Geofaktoren, wie Landnutzung und Boden können Bestandteil einer MR sein (GIESECKE 1983, GIESECKE und MEYER 1983).

Mit Hilfe der MR und der Parametrisierung entwickelte sich in den letzten 15 Jahren eine Vielzahl von Modellen, wie z.B. das Freiburger Regionalisierungsmodell FREIM oder das Modell „Precipitation Elevation Regressions on Independent Slopes Model“ (PRISM) aus den USA in Oregon. Bei diesen Modellen stand die Parametrisierung der Geofaktoren aus dem DGM an erster Stelle. Neue Erklärungsvariablen wurden gesucht und berechnet. Hierzu waren sehr leistungsfähige Rechner notwendig (GOSSMANN et al. 1993, DALY et al. 1994, KLEIN 1994).

Die Entwicklung von Regionalisierungsansätzen hat gerade in den letzten 15 Jahren einen immensen Fortschritt erfahren. Dies hängt nicht zuletzt mit der Entwicklung von modernen GI-Systemen und leistungsfähigen Rechnern zusammen. Dabei sind die Potenziale noch nicht ausgeschöpft. Es ist nun möglich, mathematisch aufwändige Verfahren zu entwickeln, die eine Modellierung von Geophänomenen ermöglichen, die nicht nur in der Klimatologie verwendet werden können (HELLER 1996, ZEUNER 2003).

2.8 Interpolationsparameter

Zur Bereitstellung der Inputparameter der Prognosemodelle wurde untersucht, welche Wetterparameter von den Prognosemodellen benötigt werden (Tabelle 4) und wie diese bereitzustellen sind. Alle vier verwendeten Modelle benötigten den Parameter Temperatur. Bis auf das Modell SIMLEP3 wurde auch die relative Luftfeuchtigkeit für alle Berechnungen verwendet. Einzig das Modell SIMPHYT1 braucht zusätzlich den Niederschlag zur Erstellung einer Prognose des Erstauftretens von *P. infestans*.

Für die Berechnung der Schaderregerprognose mit flächendeckenden Inputdaten wurde entschieden, die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit anhand des vorhandenen Messnetzes zu extrahieren. Der Niederschlag hingegen wurde von der nächstgelegenen Messstation übernommen und für die Prognose verwendet. Die Arbeiten von SEDLACEK 1978, ROSNER 1992 und SCHRÖDER 2004 haben gezeigt, dass eine Interpolation des Niederschlags nur bedingt möglich ist. Lokale Niederschlagsereignisse, die nicht von einer Messstation erfasst wurden, würden bei einer Interpolation unberücksichtigt bleiben. Gerade in den Sommermonaten, in denen häufige Lokalereignisse oder Gewitterniederschläge festzustellen sind, würde es zu einer großen Diskrepanz zwischen der Interpolation und der Realität führen (SCHÄDLER 1985). Deshalb wurde eine Interpolation des Niederschlags bewusst ausgeschlossen. Um den Niederschlag trotzdem flächendeckend zur Verfügung zu stellen, wären Verfahren, wie die Radarniederschlagsmessung als Alternative für eine Interpolation zu prüfen. Dies soll aber nicht im Rahmen dieser Arbeit geschehen.

Tabelle 4: Benötigte Wetterparameter der Prognosemodelle für Schaderreger in Kartoffeln.

Modell	Temperatur	relative Luftfeuchte	Niederschlag
SIMLEP3	x		
SIMPHYT3	x	x	
SIMBLIGHT1	x	x	
SIMPHYT1	x	x	x

3 Material und Methoden

3.1 Hardware

Alle computergestützten Arbeiten wurden mit einem Pentium AMD Athlon™ 64 X2 Dual Core Processor 4400+ 1.80 GHz mit 3 GB RAM Arbeitsspeicher und Microsoft Windows XP Professional durchgeführt.

3.2 Geobasisdaten

Als Geobasisdaten dienen sowohl Vektor- als auch Rasterdaten. Diese wurden nach ihrem Eingang geprüft und anschließend in eine einheitliche Projektion dem Deutschen Gitter der Gauss Krüger Zone 3 überführt und zur Weiterverarbeitung in der Datenbank für interpolierte Wetterdaten (DIW) (siehe Kapitel 3.3 Geodateninfrastruktur) gespeichert. Diese Arbeiten wurden mit der Software ArcGIS 9.1 der Firma ESRI durchgeführt (ESRI 1995, LIEBIG und MUMMENTHEY 2002). Im Folgenden werden die Daten vorgestellt.

Vektordaten bestehen aus Grafiken und Sachdaten, das sind Informationen, die sich hinter jeder Grafik verbirgt (z.B. Name, ID, Höhe, etc.). Die Grafiken sind durch das Basiselement „Punkt“ definiert, aus dem alle anderen Objekte erzeugt werden können. Ein Punkt besteht aus einer xy-Koordinate des kartesischen Koordinatensystems und gegebenenfalls noch einer z-Komponente als Höheninformation. Daneben gibt es noch Linien- und Polygonelemente, die aus dem Basiselement aufgebaut werden. Linien entstehen aus Punkten, die durch eine Gerade miteinander verbunden sind. Polygone sind geschlossene Linienzüge, die eine konstruierte Fläche repräsentieren (Abbildung 14). Mit Hilfe dieser Elemente lassen sich beliebige Grafiken und Objekte darstellen. Sachdaten der Grafiken werden in parallel geführter Tabelle erfasst. Zu jedem Objekt gibt es in der Tabelle eine Sachdatenzeile. Die Beschreibung der Zusammenhänge aller Objekte oder Grafiken einer Vektordatendatei wird als Topologie bezeichnet (ESRI 2003a).

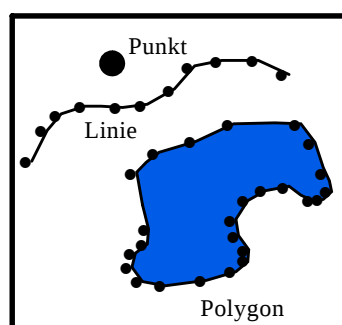


Abbildung 14: Geometrische Objekte der Vektordaten (LIEBIG UND MUMMENTHEY 2002).

Vektordaten haben den Vorteil eines geringen Speicherbedarfes und durch ihre Datenstruktur ist ein einfacher Zugriff auf einzelne Objekte möglich. Diese Datenstruktur bedingt auch, dass kontinuierlich verteilte Daten, wie zum Beispiel Höhendaten nur sehr schwierig ausgewertet werden können. Hierzu werden spezielle Auswertungsprogramme oder andere Datenformate benötigt. Das heißt, dass die Art der Daten und die gewünschte Analysemethode das Format bestimmen, in welchem die Daten gehalten werden (BILL und FRITSCH 1996, BARTELME 1995, LIEBIG und MUMMENTHEY 2002).

Rasterdaten können mit Fotos oder gescannten Grafiken verglichen werden. Diese bestehen aus einer gleichmäßigen Anordnung von rechteckigen Zellen, die Pixel genannt werden und sich nach Zeilen und Spalten in einer Matrix organisieren. Durch unterschiedliche Farb- und Grauwerte der einzelnen Pixel können die Informationen der Rasterdaten dargestellt und kann ein Gebiet repräsentiert werden. Dabei ist es möglich Geometrien, wie bei den Vektordaten darzustellen. Ein Punkt wäre ein Pixel, eine Linie oder ein Polygon entspräche einer Gruppe von Pixeln. Die Zellgröße der einzelnen Pixel bestimmt die Genauigkeit des darzustellenden Objektes. Je kleiner die Zellgröße, desto genauer kann die Geometrie abgebildet werden, desto größer ist allerdings auch der Speicherbedarf, da die Anzahl der benötigten Pixel zunimmt.

Rasterdaten können durch Laserscannungen, durch Fotos oder Satellitenaufnahmen erzeugt werden. Um diese Daten geographisch nutzen zu können, werden die Rasterdaten georeferenziert, indem jedem Pixel eine geographische Koordinate zugewiesen wird. Topologien werden bei Rasterdaten nicht gesondert gespeichert, weil diese eindeutig durch die Nachbarschaft zu acht Nebenzellen festgelegt sind. Werden den einzelnen Rasterzellen Werte zugewiesen, und ist es möglich mit diesen Werten mathematische Operationen durchzuführen, werden die Rasterdaten als Grids bezeichnet. Abbildung 15 zeigt ein reales Modell der Rasterdaten am Beispiel des Digitalen Geländemodells (DGM), wie es in einem Rechner bzw. in einem GIS abgebildet wird.

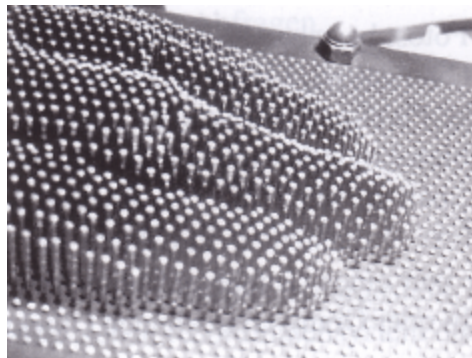


Abbildung 15: Reales Modell eines DGM. Jeder Stift repräsentiert eine Zelle des Rasters (LIEBIG UND MUMMENTHEY 2002).

3.2.1 ATKIS Basis-DLM

Die Landesvermessungsämter erstellen für die einzelnen Bundesländer das bundeseinheitliche Amtliche Topographisch-Kartographische Informationssystem ATKIS. Das ATKIS-Digitale Landschaftsmodell (DLM) 25 ist eine digitale Karte, enthält mehr Informationen als die Topographische Karte 1:25.000 und ist unterteilt in die Objektbereiche: Siedlung, Verkehr, Vegetation, Gewässer, Relief und Gebiete. Für die Länder Brandenburg und Rheinland-Pfalz lagen die ATKIS-Daten flächendeckend vor.

ATKIS-Daten waren in verschiedener Hinsicht als Basisdaten notwendig. Zum einen dienten sie zur Erstellung von Übersichtsbildern und kleinmaßstäbigen Darstellungen. Zum anderen wurden die ATKIS-Daten benötigt, um einen Raumbezug darzustellen, Gebietsmasken zu extrahieren und Landnutzungsklassen zu verifizieren (BILL 1999b, ATKIS 2003). Abbildung 16 zeigt ein Beispiel des ATKIS- Datensatzes der Gemeinde Eich in Rheinland-Pfalz. Zu sehen sind die Landnutzungen (Weinbau, Ackerland, Grünland), Siedlungen, sowie die Verkehrsflächen und die Höhenstruktur.

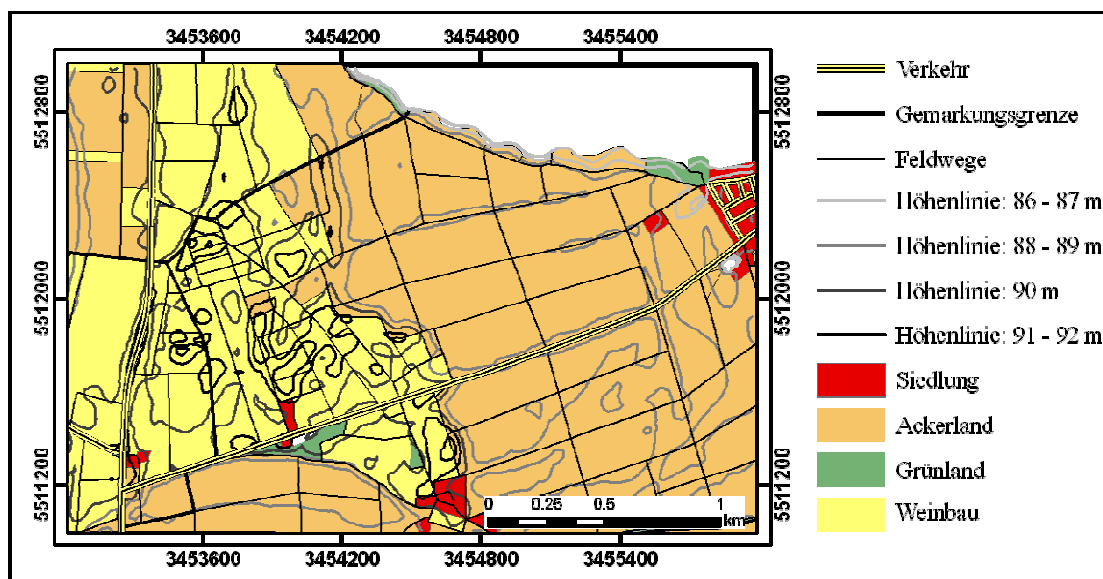


Abbildung 16: ATKIS- Datensatz der Gemeinde Eich in Rheinland-Pfalz (BKG 2006).

3.2.2 CORINE Land Cover

Das europaweite Programm CORINE Land Cover (CLC) hatte die Bereitstellung von einheitlichen und damit vergleichbaren Daten der Bodenbedeckung für Europa mit dem Anwendungsschwerpunkt Umwelt zum Ziel (STEENMANS und GHEORGHE 2004). Dabei wurden Landsat-Satellitenbilder nach unterschiedlichen Reflektionseigenschaften zur Bestimmung der Landnutzung untersucht. Die Kartierung erfolgte auf dem Maßstabsniveau

1:100.000 mit insgesamt 44 Bodenbedeckungskategorien (MOHAUPT-JAHR und KEIL 2004). Die Daten dienen zur Abgrenzung ackerbaulich genutzter Fläche von Grünland und bebauter Fläche (Abbildung 17).

Mit Hilfe dieser Daten konnte generell der Rechenaufwand reduziert werden, da nur für Flächen gerechnet wurde, die als Ackerland klassifiziert waren.

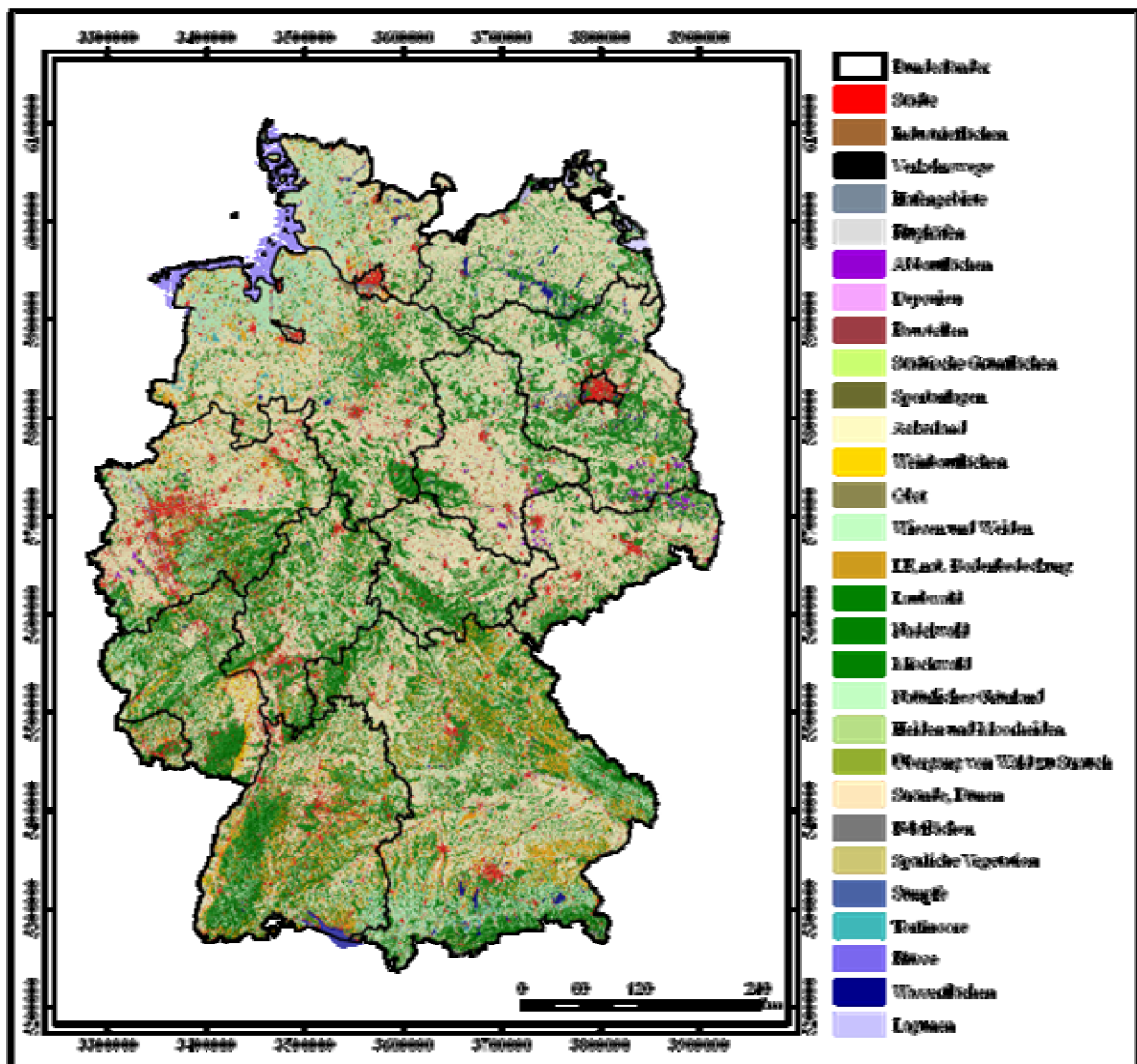


Abbildung 17: Landnutzung Deutschlands in CORINE Land Cover (BMU 2006).

3.2.3 Wetterdaten

Die Wetterdaten werden anhand von vollautomatischen Wetterstationen erhoben, die zum Teil von den Pflanzenschutzdiensten der Bundesländer und zum Teil vom DWD betrieben werden. Die beschreibenden Daten zur Wetterstation beinhalten die geographische Lage und die Geländefaktoren. Die Daten wurden von der ZEPP bereitgestellt und stammen von Stationen des Deutschen Wetterdienstes und des Pflanzenschutzdienstes Rheinland-Pfalz. Die Stationen sind mindestens mit Sensoren zur Messung von Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit, Niederschlag und Globalstrahlung ausgerüstet.

Die Daten der vollautomatischen Stationen des Landes Rheinland-Pfalz werden per Funk abgerufen und mit dem Datenbanksystem AGMEDAWIN (Agrarmeteorologische Datenbank für Windows) verwaltet und gespeichert (KEIL und KLEINHENZ 2006). Die Daten werden auf Plausibilität überprüft und in der Datenbank gespeichert.

Brandenburg besitzt ein relativ regelmäßiges Stationsnetz (Abbildung 18), bei dem die einzelnen Messstationen etwa 30 bis 70 km voneinander entfernt liegen. Die höchstgelegene Station ist die Station Wiesenburg auf 187 m und die tiefstgelegene die Station Manschnow auf 12 m, was eine Höhenamplitude von 175 m bedingt (Anhang 1).

Rheinland-Pfalz hat ein deutlich dichteres Stationsnetz als Brandenburg (Abbildung 18). Die Stationen sind jedoch nicht gleichmäßig verteilt, sondern konzentrieren sich auf die ackerbaulichen, gartenbaulichen und weinbaulichen Schwerpunktgebiete (siehe Kapitel 2.3 Untersuchungsgebiete). Mit 548 m ist die Station Bruchweiler am höchsten und mit 82 m die Station Heidenfahrt am niedrigsten gelegen (Anhang 2 bis 5).

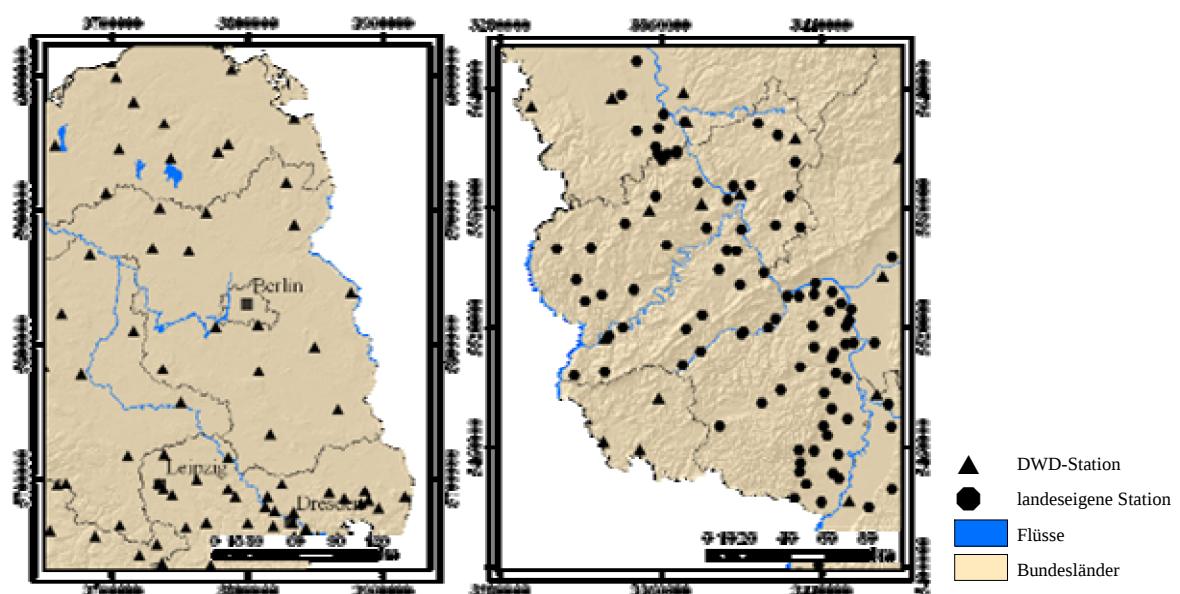


Abbildung 18: Agrarmeteorologische Messnetze in Brandenburg und Rheinland-Pfalz.

3.2.4 DGM-D

In topographischen Karten werden die Höhen als Geländelinien dargestellt. Ein digitales Geländemodell (DGM) dagegen gibt die Erdoberfläche nach Lage und Höhe durch eine Vielzahl von Punkten in digitaler Form wieder. Das DGM beschreibt die Landschaft als dreidimensionale Gitterlandschaft. Ein DGM repräsentiert somit die Erdoberfläche durch digital abgespeicherte x-, y-, z- Werte, wobei der x- und y- Wert die horizontale Lage bestimmen und der z- Wert die vertikale Höhe des Punktes angibt (BILL 1999a). Bei einem DGM wird nur die topographische Oberfläche der Erde dargestellt. Werden aber Bebauungs-, Vegetations- oder Grundwasseroberflächen aus Laserscanndaten extrahiert, so wird von einem Digitalen Höhenmodell (DHM) gesprochen (BILL 1999b, BECKER 2005). Da sich diese Arbeit auf landwirtschaftliche Nutzfläche bezieht, die keine Bebauungsflächen beinhalten, wird im folgendem immer vom DGM gesprochen.

Die Rastergröße bestimmt die Genauigkeit des Modells. Fortgeschrittene Computertechnologie macht sowohl durch hohe Speicherkapazitäten als auch hohe Rechnerleistungen die Nutzung genauer DGMs mit Rasterweiten kleiner als 10 m möglich (BECKER 2005). Für die durchgeführten Untersuchungen wurde das deutschlandweite DGM-D mit einer Gitterweite von 50 m und einer Höhengenaugkeit von 4 bis 5 m verwendet (BKG 2007).

Mit Hilfe von mathematischen, statistischen Methoden ist es möglich Folgeprodukte aus dem DGM zu berechnen. Diese Folgeprodukte sind zum Beispiel Hangneigung, Hangrichtung, Hanglage oder Hangkanten. Jedes Folgeprodukt oder jede Ableitung aus dem DGM bildet wiederum ein eigenes Geländemodell und wurde im Gridformat abgespeichert. Das DGM und verschiedene Ableitungen aus dem DGM dienten als Basis zur Charakterisierung der meteorologischen Parameter (BILL 1999b, BARTELEME 1995, BECKER 2005).

3.2.5 Digitale Orthophotos

Digitale Orthophotos (DOP) sind hochauflösende, verzerrungsfreie Abbildungen der Erdoberfläche. Sie werden durch ein besonderes Verfahren mit einer geometrischen Genauigkeit von etwa $\pm 0,4$ m aus Luftbildern hergestellt, die in der Regel im Maßstab 1:12.000 als Senkrechtaufnahmen vorliegen. Zur Herstellung digitaler Orthophotos müssen die analogen Luftbildoriginale zunächst in eine digitale Form überführt, georeferenziert und an ein vorhandenes Geländemodell angepasst werden. Dies geschieht, indem die gescannten Luftbilder mit 10 bis 20 Passpunkten aus der Deutschen Grundkarte 1:5.000 abgeglichen werden. Anschließend muss das Orthophoto das Geländemodell mit einer Genauigkeit von ± 1 m überdecken. Dann sind die Orthophotos maßstäbig, lagerichtig und lassen sich

spannungsfrei aneinander fügen (BILL und GRENZDÖRFER 1993). Digitale Orthophotos liegen für das gesamte Bundesgebiet vor und werden in einem periodischem Rhythmus von drei bis fünf Jahren aktualisiert.

Für diese Arbeit standen die DOPs der Bundesländer Brandenburg und Rheinland-Pfalz aus dem Jahr 2002 zur Verfügung. Sie dienten der Landnutzungskorrektur und zur Orientierung bei den Feldarbeiten. Abbildung 19 zeigt den Ausschnitt eines Orthophotos aus der Gemeinde Eich. Zu erkennen sind die einzelnen Ackerflächen, Siedlungen, Häuser und der Rhein.

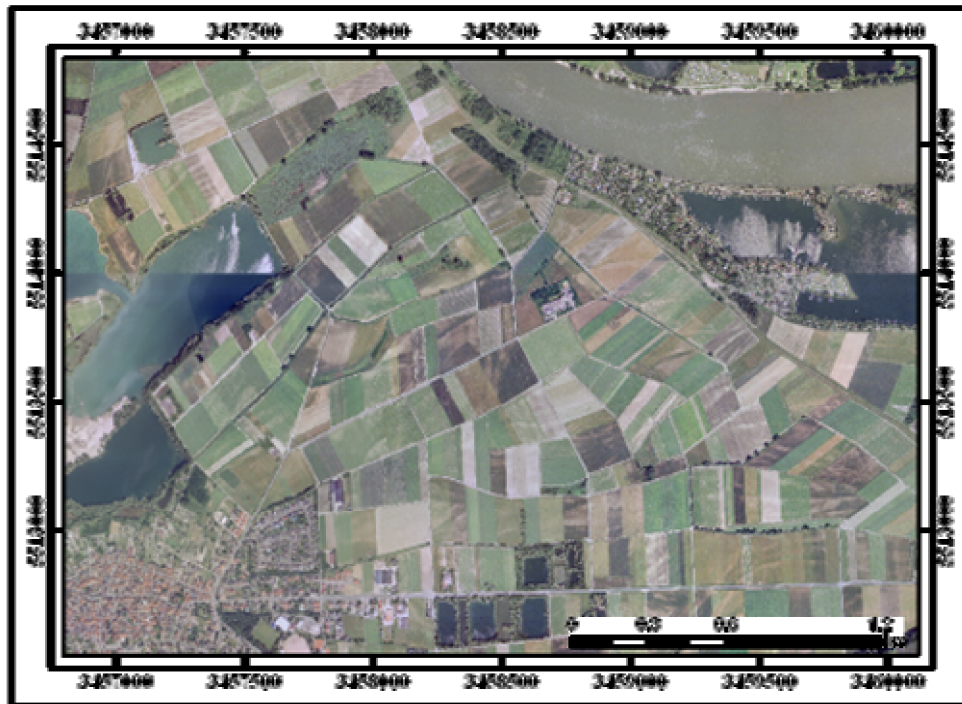


Abbildung 19: Ausschnitt eines Digitalen Orthophotos aus der Gemeinde Eich (MWVLW 2002).

3.2.6 Digitale Topographische Karte 25

Auf einer Digitalen Topographischen Karte 25 (DTK 25) sind die sichtbaren Erscheinungen der Erdoberfläche dargestellt. Diese Objekte sind dabei topographisch vermessen, lagerichtig bzw. lagetreu kartiert worden. Als Objekte werden die Inhalte der topographischen Karte verstanden. Es lassen sich Straßen bis hin zu kleinen Fußwegen finden. Des Weiteren sind Geländehöhen, Flüsse, Siedlungen, Waldflächen, landwirtschaftliche Nutzung und administrative Grenzen in ihnen eingetragen. Auch das Namensgut, also die Namen der Objekte, werden in den DTKs abgebildet (BILL 1999b). DTKs gibt es in unterschiedlichen Auflösungen mit unterschiedlichen Detailinhalten. Die DTK 1:25.000 wurde als Basiskarte zu Präsentationszwecken und zur Orientierung bei den Feldarbeiten verwendet (Abbildung 20).

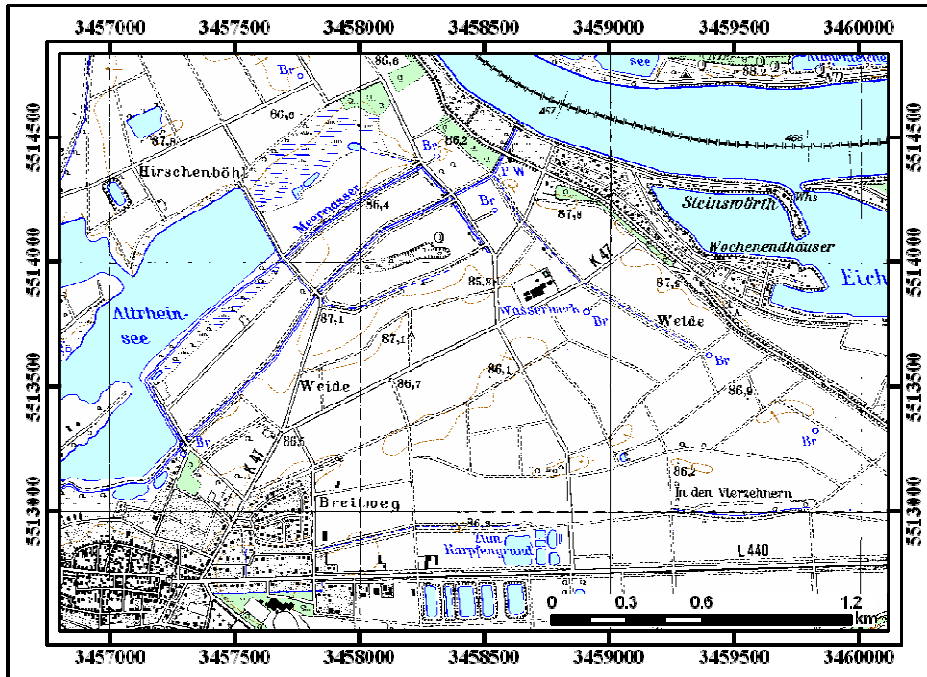


Abbildung 20: Ausschnitt aus der DTK25 der Gemeinde Eich (BKG 2006).

3.3 Geodateninfrastruktur

3.3.1 Datenbank für interpolierte Wetterdaten

Die Datenbank für interpolierte Wetterdaten (DIW) bildet das Kernstück der erstellten Infrastruktur. Sie bestimmt den Speicherort der Daten und regelt die reibungslose Kommunikation der Softwarekomponenten.

Um die Interpolationsergebnisse der Temperatur und relativen Luftfeuchtigkeit flächendeckend speichern zu können, wurde ein Raster mit einer Rasterweite von 1x1 km angelegt. Somit ergeben sich für die Fläche von Deutschland mit 357.092 km² etwa 360.000 Rasterzellen, die jeden einzelnen Quadratkilometer in Deutschland durch eine Information bezüglich Temperatur, relativer Luftfeuchtigkeit und dem späteren Prognoseergebnis repräsentierten. Dieses Raster wird im Folgenden als „Deutschlandgrid“ bezeichnet.

Für die Speicherung dieses Rasters und für die Realisierung der DIW wurden mehrere Alternativen durchgespielt. Für die GIS-Operationen wurden sowohl freie als auch kommerzielle GIS betrachtet. Zur Datenhaltung wurden verschiedene Datenbanksysteme (Postgre, Oracle oder DB2), wie auch die filebasierte Datenhaltung untersucht. Um eine einfache Nutzung der Prognosemodelle zu erreichen, wurde über die Integration der Modelle in GIS nachgedacht. Aber auch eine Nutzung bestehender Infrastrukturen (PASO und ISIP) zur Berechnung von Prognosemodellen wurde geprüft.

PASO (Prognose agrarischer Schadorganismen) ist eine Software, die den Pflanzenschutzdiensten der Länder jedes Jahr neu zur Berechnung der Prognosen zur Verfügung gestellt wird. Zur Realisierung von PASO wurden drei Einheiten, die programmspezifische Benutzeroberfläche, der Programmkern (Modellalgorithmus) und die benötigten Inputdaten separat erstellt. Die Kommunikation zwischen den Einheiten wurde über Schnittstellendateien realisiert. Dies hatte den Vorteil, dass alle Modelle einheitlich auf die Oberfläche und die Inputdaten zugreifen und neue Modelle einfach und schnell in die Software PASO integriert werden konnten.

Der ISIP e.V. – Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion, stellt im Internet eine Vielzahl von Entscheidungshilfen und Modellen zur Verfügung. Die technische Umsetzung von ISIP erfolgt über eine zentrale Komponente eines Content Management System (CMS) der CoreMedia AG (RÖHRIG und SANDER 2004). Es dient als Informationsdrehscheibe für alle internen und externen ISIP-Komponenten. Der Systemkern (Rechenkern), die Masterkomponente, besteht aus einem J2EE Applikationsserver (JBOSS), der mit der relationalen Datenbank (DB2) interagiert (RÖHRIG und SANDER 2006). Dies dient der einfachen Einbindung, Pflege und Weiterentwicklung von Modellen in das Framework. Die Bereitstellung der Modelle erfolgt auf einem Internetserver, auf welchem die Modelle interaktiv gerechnet, und die Ergebnisse zur Verfügung gestellt werden. Eine vollautomatische, tägliche Ergänzung der notwendigen Wetterdaten ermöglicht den laufenden Betrieb der Modelle ohne manuelle Eingriffe (RÖHRIG und SANDER 2006).

Letztlich wurde die ISIP-Infrastruktur gewählt, welche für eine Entwicklung von Schaderregerprognosen mit interpolierten Wetterdaten im Vergleich zu PASO flexibler erschien, da gerade in der Entwicklungs- und Validierungsphase der Interpolationsverfahren es mit ISIP möglich ist, einfach und schnell Einblick in den Berechnungsalgorithmus zu bekommen. Zudem wurde darauf geachtet, dass die DIW bei einer späteren Praxiseinführung zumindest teilweise verwendet werden kann. Im Folgenden wird die DIW vorgestellt und ihre Funktionsweise erläutert (Abbildung 21).

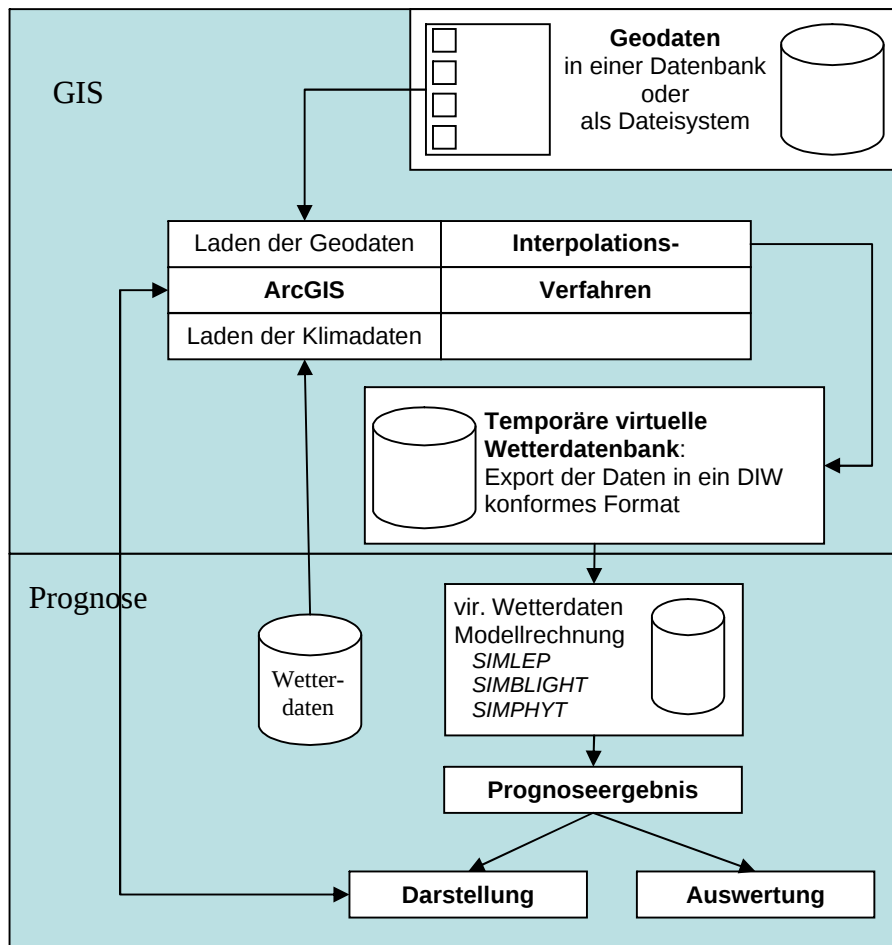


Abbildung 21: Datenbank für interpolierte Wetterdaten (DIW).

Die Geodateninfrastruktur besteht aus zwei Komponenten. Die erste Komponente ist die GIS-Komponente. Hier wurden alle Operationen durchgeführt, bei denen Daten mit Raumbezug verwendet wurden. Als GIS wurde das Desktop-GIS ArcGIS 9.1 der Firma ESRI verwendet. An dieses GIS wurden zwei Geodatenbanken zur Datenhaltung gekoppelt. Die Geodatenbanken basieren auf Microsoft Access® 2000 und wurden als Personal Geodatabase (PGD) in ArcGIS eingebunden. Die erste PGD beinhaltet die Geodaten für die Interpolationsberechnungen. Die zweite PGD speicherte die Ergebnisse der Interpolationsberechnungen.

Mit Hilfe der Entwicklungsumgebung ArcObjects wurde für das Desktop GIS ArcGIS 9.1 eine Erweiterung programmiert. In dieser Erweiterung wurden in Modulen die Algorithmen der Interpolationsverfahren IDW, Spline, Kriging und Multiple Regression (MR) implementiert (Siehe Kapitel 3.7 Interpolationsmethoden). Die Verfahren wurden so angepasst, dass auf die vorhandene Wetterdatenbank zugegriffen werden konnte. Die Wetterdaten mussten jedoch zuvor georeferenziert werden. Dies wurde von den Toolboxfunktionen mit Hilfe der Geodaten aus der PGD durchgeführt und mit ArcObjects

automatisiert. Der gesamte Interpolationsprozess der Erweiterung bestand aus folgenden Teilprozessen:

- Import und Georeferenzierung der Wetterdaten
- Interpolation der Wetterdaten (Temperatur und relative Luftfeuchte)
- Speicherung der Interpolationsergebnisse in der temporären PGD

Zur komfortablen Bedienung dieser Erweiterung wurde ein Eingabefenster erstellt (Abbildung 22).



Abbildung 22: Eingabefenster der ArcGIS-Erweiterung zur Interpolation von Wetterdaten.

Das Eingabefenster ermöglicht es, den Interpolationszeitraum festzulegen. Hierzu wird der Jahrestag als Zahl und das betreffende Jahr benötigt. Es kann gewählt werden, ob nur für eine bestimmte Interpolationszone oder für alle Interpolationszonen gerechnet werden soll. Zudem kann der zu interpolierende meteorologische Parameter eingestellt werden. Durch Betätigung eines Buttons am unteren Ende des Fensters wird die jeweilige Interpolationsroutine gestartet, und die Ergebnisse werden in der PGD abgelegt. Zur Entwicklung und Validierung war es notwendig, flexible Interpolationszeiträume sowie zusätzlich verschiedene Interpolationszonen wählen zu können.

Die zweite Komponente der DIW (Prognose) dient der Bereitstellung von Wetterdaten in einer Wetterdatenbank (DB2) und der Prognosemodellrechnung (Abbildung 21). Zur Umsetzung dieser Komponente wurde ein Teil des ISIP-Framework verwendet. Dies hat den Vorteil, dass alle bereits in ISIP zur Verfügung stehenden Funktionen, wie zum Beispiel das Wetterdatenmanagement, sowie die zur Berechnung der Prognosemodelle benötigten Routinen genutzt werden können. Zur Bereitstellung von Wetterdaten wurde die zentrale Wetterdatenbank von ISIP verwendet.

Zur Berechnung der Prognoseergebnisse wurde die DIW mit den Modulen der Modelle SIMLEP, SIMBLIGHT und SIMPHYT, sowie einer Wetterdatenbank (DB2) bestückt, auf der eine neue Wetterstationsliste mit virtuellen Wetterstationen angelegt wurde. Die virtuellen Wetterstationen entsprachen jeder einzelnen Zelle des Deutschlandgrids, durch welches das Ergebnis der Interpolationsberechnungen repräsentiert wurde. Als Koordinate für jede Wetterstation wurde der Mittelpunkt der Gridzelle bestimmt. Um die Daten in die Wetterdatenbank zu importieren, wurde ein Importformat benötigt, welches in der temporären PGD festgelegt war (Beispieldatei in Anhang 6).

Routinen des JBOSS ermöglichten es, für einzelne wie auch für mehrere virtuelle Stationen die Prognoseberechnung automatisiert durchzuführen. Die Ergebnisse der Prognoseberechnungen wurden in Exceltabellen gespeichert.

3.3.2 *ArcGIS und ArcObjects*

Für alle verwendeten GIS-Operationen wurde die Software ArcGIS 9.1 mit den Erweiterungen Spatial Analyst, Geostatistical Analyst, 3D- Analyst und dem Hawth's Tool der Firma ESRI verwendet (ESRI 1995). ArcGIS 9.1 wird dabei als Desktop GIS bezeichnet, das heißt, es wird als Softwarepaket lokal auf einem Rechner installiert, von wo aus es genutzt werden kann. Es vereinigt die Eigenschaften der Kartographie, der Datenintegration, des Datenmanagements, und bietet die Möglichkeit Daten zu analysieren und zu berechnen (ESRI 2004). Über Toolboxfunktionen von ArcGIS 9.1 werden viele Geoprocessingoperationen (z.B. Verschneidungsfunktionen) zur Verfügung gestellt (ESRI 2003c). Die Erweiterung Spatial Analyst dient der Bearbeitung aller verwendeten Rasterdaten (ESRI 2003f). Der Geostatistical Analyst verfügt über Methoden der deskriptiven und mathematischen Statistik (ESRI 2003e). Er vereinigt somit die Bausteine der Datenpräsentation, -beschreibung, -analyse und -modellierung. Der 3D-Analyst ist für die Bearbeitung der dritten Dimension zuständig (ESRI 2003g). Die Funktionen dieses Tools wurden hauptsächlich zur Visualisierung eingesetzt. Das Hawth's Tool für ArcGIS 9.1 ergänzt die Toolboxfunktionen durch Methoden im kartographisch, topographischem Bereich (THURSTON 2004, ESRI 2006).

ArcGIS 9.1 ermöglicht es dem Nutzer, eigene Methoden zu entwickeln und zu integrieren bzw. bestehende Methoden zu automatisieren. Hierzu wurde eine eigenständige Entwicklungsoberfläche namens ESRI ArcObjects in die GIS-Software integriert. Diese basiert auf der Programmiersprache Visual Basic for Applications (VBA). VBA ist eine von Microsoft entwickelte Skriptsprache, die zur Steuerung von Programmabläufen aus einem Visual Basic (VB) Dialekt abgeleitet wurde. VBA ist der Nachfolger verschiedener Makrosprachen, die in Microsoftprodukten verwendet wird. Sie ist objektorientiert und verfügt über ein umfangreiches Objektmodell, welches eine strukturierte und modulatorientierte Programmierung ermöglicht (HÖCK und MANEGOLD 2003, SPIECKERMANN 2005).

ArcObjects basiert auf dem Component Object Model (COM) von Microsoft. COM ist eine proprietäre Technologie, die zum Export von DLLs (Dynamic Link Libraries) unter Windows Klassen entwickelt wurde (HÖCK und MANEGOLD 2003, RAZAVI 2004). COM wiederum basiert auf dem Client/Server-Prinzip. COM definiert ein Protokoll, welches eine Applikation mit einer anderen verbindet. Durch Verwendung dieser Protokolle, können sich Softwareapplikationen in einem verteilten System untereinander austauschen. Das heißt, dass der *COM-Server* zu exportierende Klassen anbietet, die so genannten *COM-Objekte*. Diese werden über ein *COM-Interface* definiert, in dem der Programmcode hinterlegt ist. Der Client ist das Programm, welches die vom Server angebotenen Funktionen benutzt. Der Client kennt die Funktionen, die vom COM-Server angebotene COM-Objekte bieten, da diese in den entsprechenden COM-Interfaces deklariert sind. Ein Objekt kann dabei sowohl Server für einen Clienten sein als auch gleichzeitig Client eines anderen Servers von Objekten. COM erleichtert somit die Kommunikation zwischen dem Clienten und den Objekten (HÖCK und MANEGOLD 2003, ZEILER 2002, SPIECKERMANN 2005). Die VBA Entwicklungsumgebung, eingebettet in die COM-Architektur bietet die Möglichkeit flexibel, schnell und effizient Prozessabläufe nachzubilden und zu automatisieren (Abbildung 23).



Abbildung 23: Client/Server Architektur in ArcObjects (ZEILER 2002).

3.4 Boden-Klima-Regionen

Im Rahmen des EU-Forschungsprojektes (AIR3 CT94–1296) zur gebietsbezogenen Indikation zur Bewertung der landwirtschaftlichen Produktion 1998-2000 wurden die Boden-Klima-Regionen (BKR) von SCHULZKE und KAULE (2000) im Maßstab 1:1.000.000 definiert. Bei der Definition dieser Regionen konnten die Autoren auf Erfahrungen mit agrarökologischen Gliederungen in Ostdeutschland zurückgreifen. Diese wurden vornehmlich nach komplex-analytischem Ansatz bearbeitet (SCHULZKE 1988). Zur Erzeugung der BKR wurde eine logische Verknüpfung der Geofaktoren Klima, Witterung, Boden, natürlicher Wald und Vegetationseinheiten durchgeführt (Abbildung 24) (SCHULZKE 2000).

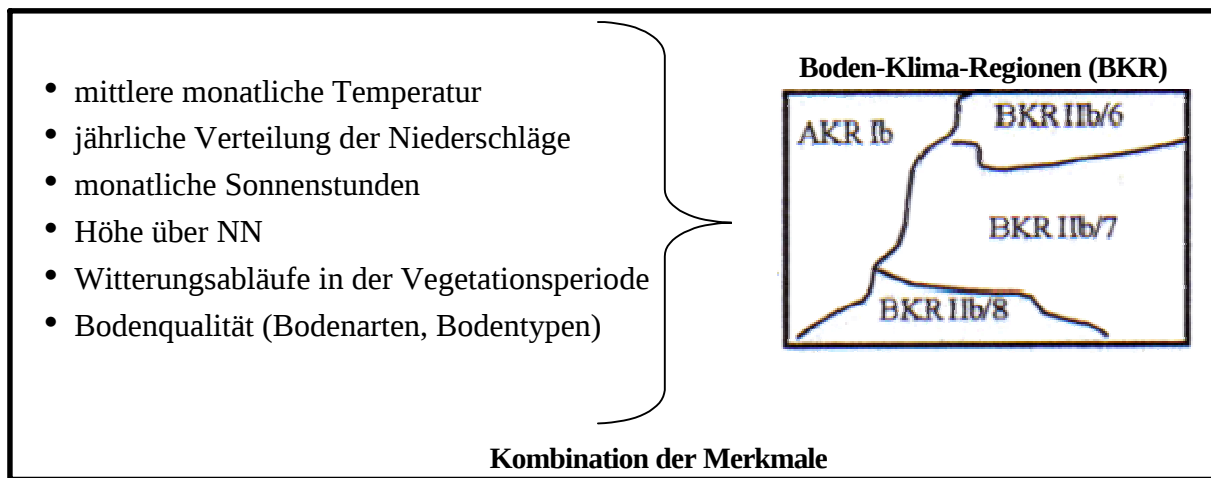


Abbildung 24: Merkmale der Boden-Klima-Regionen (SCHULZKE und KAULE 2000).

Bei der Erstellung der BKR sind die Geofaktoren als zwei Konstanten eingeflossen. Zum einen wurde aus langjährigen monatlichen Mitteltemperaturen, dem langjährigen Mittel des jährlichen Niederschlages (Mittelwert, Maxima und Minima), der mittleren Anzahl der Sonnenstunden im Jahr und der Höhe über NN eine Klimakonstante zusammengesetzt. Zudem wurden auch Witterungsabläufe in der Vegetationsperiode betrachtet. Zum anderen wurde eine Bodenkonstante durch die Bodenart und den Bodentyp bestimmt. Aus der Kombination beider Konstanten ergab sich ein Mosaik aus Polygonen. Dieses wurde generalisiert und zu größeren Einheiten zusammengefasst, die die heutigen Boden-Klima-Regionen darstellen.

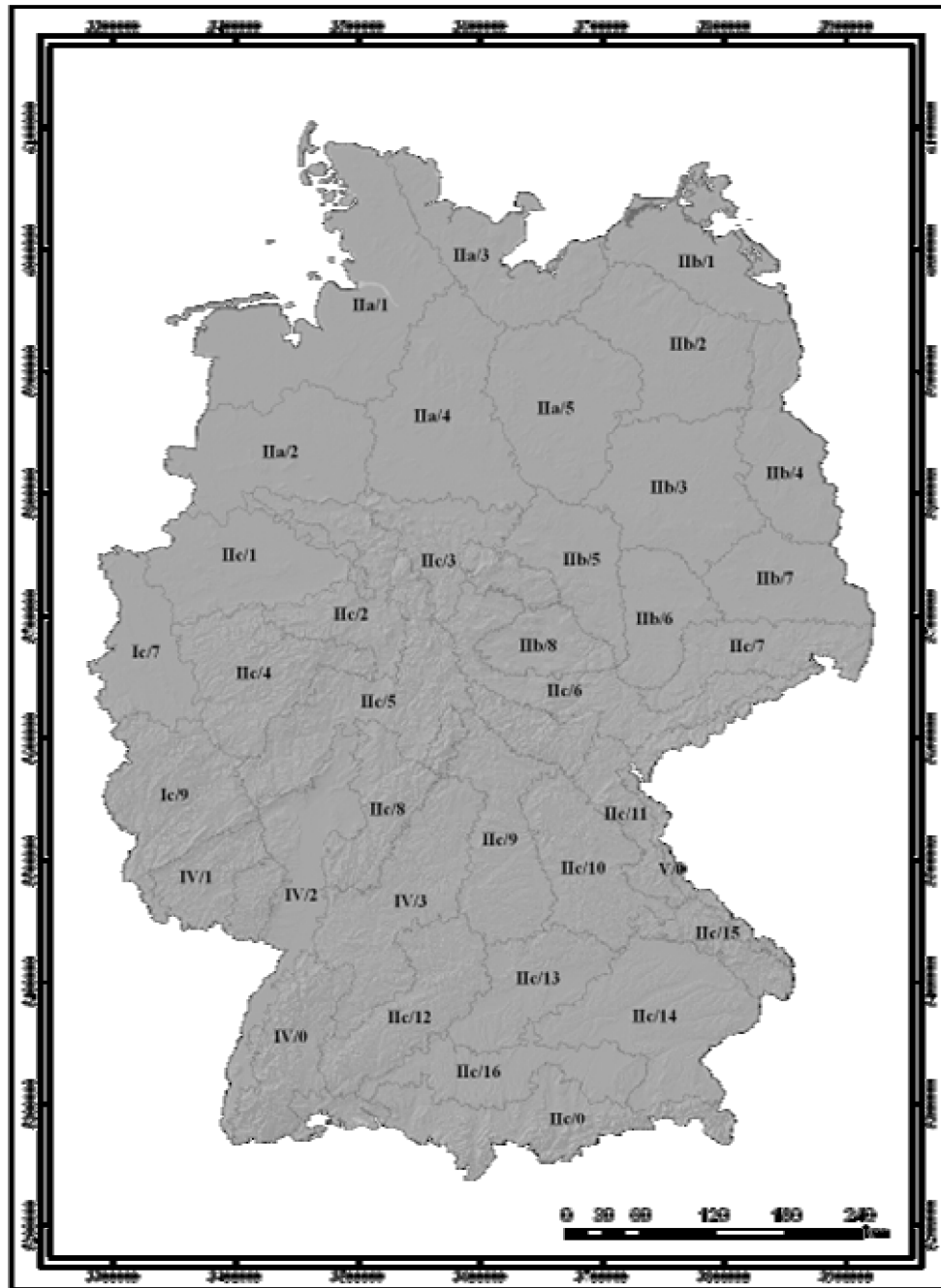


Abbildung 25: Karte der Boden-Klima-Regionen (SCHULZKE und KAULE 2000).

3.5 Reliefenergie

Die Reliefenergie gibt den Höhenunterschied eines bestimmten Gebietes pro Flächeneinheit an. Er wird in Meter pro Quadratkilometer angegeben. Dementsprechend besitzt eine gebirgige Landschaft eine hohe Reliefenergie, während eine Ebene nur eine geringe Reliefenergie aufweist. Sie wurde nach der Methode von BEHRENS und SCHOLTEN (2002) berechnet. Dabei wird die Differenz zwischen der maximalen und der minimalen Höhe einer quadratischen Fläche im Gelände berechnet. Der Inhalt dieser Fläche bestimmt den

Informationsgehalt der Reliefenergie. Bei kleinem Flächeninhalt ($< 5 \text{ km}^2$) werden kleine Erhebungen im Flachland stärker betont. Größere Erhebungen, wie die Mittelgebirge werden dagegen in sich weniger stark differenziert (BURAK 2005). Um auch die kleinen Erhebungen, die sich geländeklimatologisch auswirken, mit einfließen zu lassen, wurde aus dem DGM-D eine Basisfläche von $2,1 \text{ km} = 4,41 \text{ km}^2$ zur Berechnung der Reliefenergie gewählt (BURAK 2005). Die Karte der Reliefenergie wurde in Reliefenergieklassen (Anhang 7) nach BURAK (2005) eingeteilt (Abbildung 26).

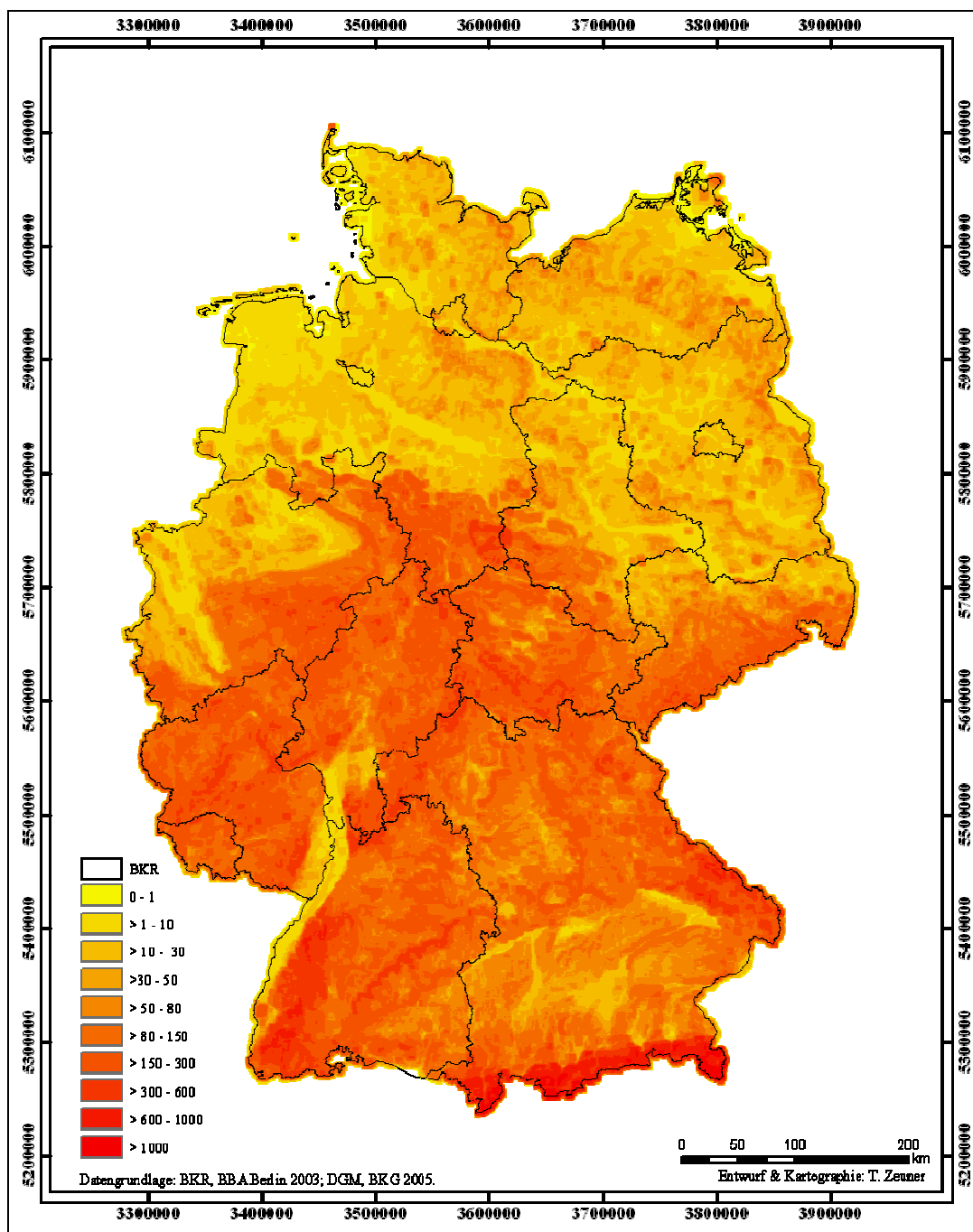


Abbildung 26: Reliefenergieklassen [$\text{m}/4,41 \text{ km}^2$] nach BURAK 2005.

3.6 Interpolationsparameter

3.6.1 Temperatur

Als Lufttemperatur wird der Wärmezustand der Luft bezeichnet. Dieser hängt von der Bewegung der Luftmoleküle ab. Die kinetische Energie eines Luftpakets ist umso höher, je wärmer die Luft und umso größer ihre Geschwindigkeit ist (LILJEQUIST und CEHAK 1984). Nach Messvorschrift der World Meteorological Organisation (WMO) wird die Lufttemperatur 2 m über Gras gemessen, um den Einfluss der bodennahen Luftschichten zu minimieren.

Die Höhe der Lufttemperatur im Raum hängt von der eingestrahlten Sonnenenergie ab. Diese wird durch einen Faktorenkomplex modifiziert. Der Sonnenstand besitzt dabei eine jahreszeitliche und tageszeitliche Komponente. Je höher die Sonne am Mittag steht, desto größer ist die eingestrahlte Energie, und die Erdoberfläche erwärmt sich entsprechend. Ob eine Oberfläche sich erwärmt oder abkühlt, wird aus dem Verhältnis zwischen Ein- und Ausstrahlung bestimmt. Nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz strahlt jeder Körper Energie proportional zur vierten Potenz seiner Oberfläche aus (LILJEQUIST und CEHAK 1984). Somit wird die Intensität der Erwärmung durch den Sonnenstand und die Sonneneinstrahlung bestimmt. Aufgrund dieser Gesetzmäßigkeit ergibt sich auch ein Tagesgang der Lufttemperatur. Die andauernde Ausstrahlung wird bei Sonnenaufgang durch Einsetzen der Sonneneinstrahlung kompensiert, bis es zur Erwärmung der Oberfläche kommt. Die maximale Erwärmung wird etwas zeitversetzt zum Höchststand der Sonne erreicht. Anschließend nimmt die Einstrahlung und somit die Temperatur wieder ab. Mit dem Sonnenuntergang setzt dann Ausstrahlung ein. Die niedrigsten Temperaturen werden zum Sonnenaufgang ermittelt. So kann ein typischer Tagesgang der Temperatur beschrieben werden (LILJEQUIST und CEHAK 1984, HEYER 1993).

Dieser Tagesgang wird durch Bewölkung sowie lokale Verhältnisse beeinflusst. Die Bewölkung wirkt als „Sperrschicht“, an der sowohl die Ein- als auch die Ausstrahlung reflektiert werden. Somit ergibt sich für den Tagesgang der Temperatur eine Herabsetzung der Tagesamplitude. Auch die Jahreszeit wirkt sich auf die Tagesamplitude aus, da die Einstrahlungszeiten im Sommer deutlich länger als im Winter sind. Dabei wird vom Tagesgang der Temperaturamplitude gesprochen (REINER 1949, WEISCHET 1991).

Weitere Einflüsse auf die Temperatur besitzen der Seewind, der Bergwind, die Kaltluft mit auftretenden Inversionswetterlagen, die Höhenlage, die Hanglage und die Hangrichtung.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass die aufgeführten Einflüsse auf die Temperatur eine hohe zeitliche Variabilität widerspiegeln und somit sehr schwierig zu modellieren sind bzw. kaum vollständig in einem Modell berücksichtigt werden können.

3.6.2 Relative Luftfeuchtigkeit

Der Wasserdampfgehalt der Luft wird mit Hilfe der Luftfeuchtigkeit angegeben. Die Luft besteht aus einem Gemisch verschiedener Gase und Wasserdampf. Beide zusammen verursachen mit ihrem Gewicht den Luftdruck. Die relative Luftfeuchtigkeit ist das prozentuale Verhältnis zwischen dem momentanen Wasserdampfdruck und dem Sättigungsdampfdruck. Der Sättigungsdampfdruck gibt dabei an, wie viel Wasserdampf die Luft bei einer bestimmten Temperatur aufnehmen kann. Die relative Luftfeuchtigkeit wird mit folgender Formel berechnet:

$$\xi = \frac{e}{E} * 100\% \approx \frac{\mu}{\mu_s} * 100\% \approx \frac{p_u}{p_{u,\max}} * 100\% \approx \frac{s}{S} * 100\%$$

Die einzelnen Formelzeichen stehen für folgende Größen:

- e – Dampfdruck
- E – Sättigungsdampfdruck
- ρ_u – absolute Luftfeuchtigkeit
- $\rho_{u,\max}$ – maximale absolute Luftfeuchtigkeit
- s – spezifische Luftfeuchtigkeit
- S – Sättigungsfeuchte
- μ – Mischungsverhältnis
- μ_s – Mischungsverhältnis bei Sättigung

Mit steigender Temperatur nimmt die zur Sättigung benötigte Wasserdampfmenge zu. Das hat zur Folge, dass die relative Luftfeuchtigkeit eines gegebenen Luftvolumens bei Erwärmung abnimmt. Die relative Luftfeuchtigkeit ist daher temperaturabhängig. Mit Hilfe der Magnus-Formel ($E(t) = 6,1078 * e^{17,08085 * t / 234,175 + t}$) lässt sich die Kurve für den Sättigungsdampfdruck berechnen (REINER 1949, VDI 1985b, WEISCHET 1991).

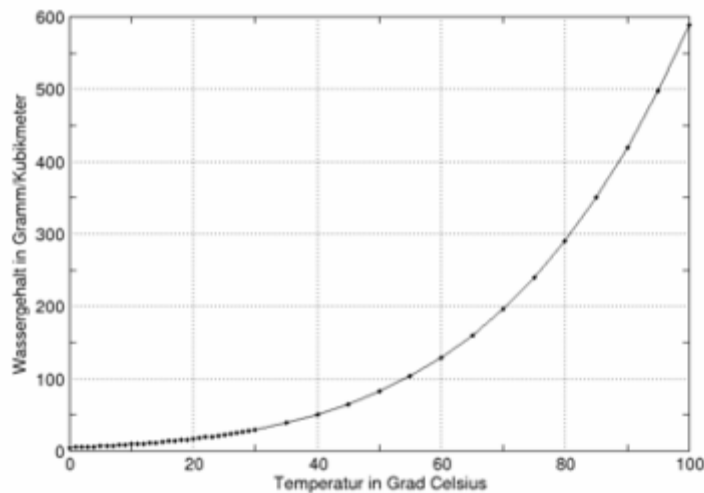


Abbildung 27: Sättigungskurve von Wasserdampf in der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (WEISCHET 1991).

So zeigt sich beispielsweise, dass in einer als trocken erscheinenden Wüste mit einer Lufttemperatur von 34,4 °C und einer relativen Luftfeuchte von 20 % insgesamt 7,6 Gramm Wasserdampf in einem Kubikmeter Luft enthalten sind, was bei einer Lufttemperatur von 6,8 °C (Taupunkt) einer relativen Luftfeuchte von 100 % entspricht und somit zur Kondensation, sowie Dunst- und Nebelbildung führen würde. Daher sind Phänomene wie Dunst oder Nebel ein Signal für eine hohe relative Luftfeuchtigkeit und gleichzeitig für tiefe Temperaturen. Die Wahrnehmung der Luft als trocken oder feucht liegt also eher an der Temperatur als an der tatsächlich in ihr enthaltenen Wassermenge (HÄCKEL 2005).

Der Tagesgang der Luftfeuchtigkeit ist im Normalfall abhängig von der Temperatur. Das Maximum wird am Vormittag und das Minimum am Nachmittag erreicht. Luftmassenwechsel oder der Untergrund können diese Verhältnisse allerdings ändern. In den bodennahen Luftschichten hängt der Feuchtegehalt von den Verhältnissen des Untergrunds und von der thermisch regulierten Sättigungsgrenze ab. Letztere wird durch den Taupunkt bestimmt. Dies ist die Temperatur, an der der Wasserdampfdruck gleich dem Sättigungsdampfdruck ist und somit Kondensation einsetzt. Tagsüber ist die relative Feuchte in Bodennähe aufgrund der relativ starken Erwärmung der Oberfläche gering. Durch Abkühlung und abfließende Kaltluft steigt die relative Luftfeuchtigkeit schnell an, und es kann zu Nebelbildung kommen. Es besteht also ein starker Gradient zwischen der nächtlichen relativen Luftfeuchtigkeit und der am Tage.

Die Vegetation und die Beschaffenheit der Erdoberfläche modifizieren das beschriebene Verhalten der relativen Luftfeuchtigkeit durch Verdunstung in Form von Transpiration und Evapotranspiration. Hohe Lufttemperaturen begünstigen die Verdunstung, wodurch die relative Luftfeuchtigkeit konstant gehalten werden kann. Die Verdunstung wird auch durch

die Turbulenz und durch das vertikale Dampfdruckgefälle bestimmt, da die Verdunstung Wärmeenergie für den Verdunstungsprozess benötigt. Vegetationsbedeckter Boden liefert höhere Feuchtegrade, zum einen wegen der Evapotranspiration und zum anderen, weil er sich weniger stark erhitzen kann. In Pflanzenbeständen ist die Luftfeuchte meist höher als über unbewachsenem Boden. Auch Waldbestände haben eine höhere relative Luftfeuchtigkeit.

Neben der Vegetation und der Temperatur wird auch die relative Luftfeuchtigkeit durch das Relief stark beeinflusst. An Mulden, Tälern oder Blockaden bilden sich Kaltluftseen der nachts abfließenden kalten Luftmassen. Diese besitzen eine hohe Luftfeuchtigkeit, wodurch es zur Tau- und Nebelbildung kommen kann (LILJEQUIST und CEHAK 1984).

Aber auch die Großwetterlage kann zu einer abrupten Änderung der Luftfeuchtigkeit führen. Allgemein gilt, je höher die Lufttemperatur bei gleicher spezifischer Feuchte, desto geringer ist die relative Luftfeuchtigkeit. Werden aufgrund eines Wetterlagenwechsels aber feucht-warme Luftmassen vom Meer herantransportiert, so steigt die relative Luftfeuchtigkeit (LILJEQUIST und CEHAK 1984).

3.7 Interpolationsmethoden

3.7.1 Quadrantenmethode IDW

Die Quadrantenmethode, auch IDW oder inverse distance weighted genannt, ist die einfachste und am häufigsten angewandte Methode zur Berechnung von Klimaparametern. Sie ist eine Erweiterung der Nächste-Nachbar-Methode (nearest neighbour).

IDW erfordert die Definition von Teilflächen, meistens Quadranten, um den Interpolationspunkt. Innerhalb jeder Teilfläche muss der nächstliegende gemessene Punkt gesucht werden. Die Schätzung ist als eine gewichtete Summe der nächstgelegenen Messungen jeder Teilfläche definiert, wobei die Gewichte proportional zur Entfernung sind (Abbildung 28). Die Ergebnisse einer IDW- Interpolation können nie größer oder kleiner als die Ausgangswerte sein, da nur zwischen den vorhandenen Werten interpoliert wird (HELLER 1996).

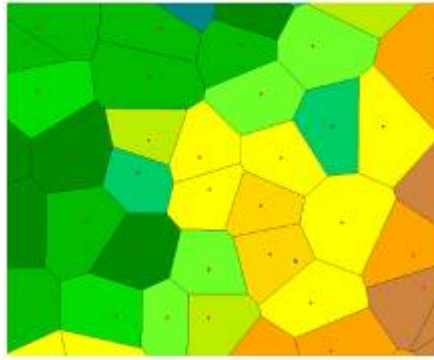


Abbildung 28: Polygonverteilung eines IDW-Verfahrens (ESRI 2003e).

3.7.2 Spline

Bei der Spline-Interpolation handelt es sich um mathematische Approximationsverfahren. Grundsätzlich wird zwischen kubischen und bikubischen Splines unterschieden, wobei die bikubischen Splines, zweidimensionale Interpolationen, bei flächenhafter Verteilung, eher zu verwertbaren Ergebnissen führen.

Splines teilen das Gebiet in Teil-Rechtecke ein, für die jeweils ein bikubisches Polynom dritten Grades dargestellt wird, das an den Nahtstellen der Rechtecke 2-mal stetig differenzierbar sein muss. Diese rechteckigen Teilpolynome müssen auf mathematischem Wege in ein Polynom überführt werden, so dass die Verteilung stetig ist, siehe Abbildung 29. Das heißt die Polynome werden so miteinander verbunden, dass die Polynome glatt erscheinen und keine Sprünge in der Wertemenge zu erkennen sind (ROSNER 1992).

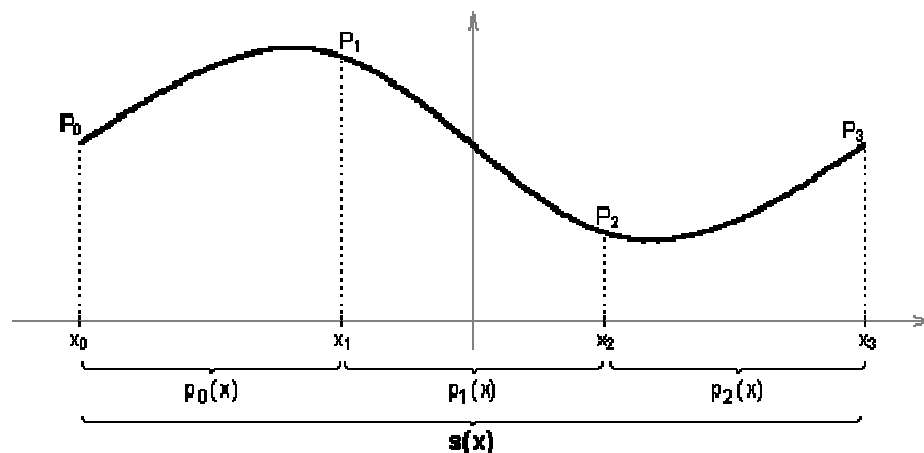


Abbildung 29: Spline-Interpolation mit vier Stützpunkten (ESRI 2003e).

3.7.3 Kriging

Das Interpolationsverfahren Kriging (K) ist ein geostatistisches Verfahren, das auf Grundlage der im theoretischen Variogramm beschriebenen räumlichen Zusammenhänge die räumliche Verteilung der betrachteten Daten schätzt (KRIGE 1951).

Dieses Verfahren wurde in den späten vierziger Jahren des 20. Jahrhunderts von D.G. Krige entwickelt und in den fünfziger Jahren von G. Matheron weiterentwickelt. Beide Geologen versuchten aufgrund von Bohrungen mit Hilfe dieses Verfahrens Rückschlüsse über das Volumen von Goldadern unter Tage zu schließen, um optimal schürfen zu können (STREIT 1981). Parallel hierzu verwendete L.S. Gandin dieses Verfahren in der Sowjetunion für den Bereich der Meteorologie, wo die Stärken dieses Verfahrens zur Geltung kamen (OLIVER und WEBSTER 1990).

Kriging ist somit ein Verfahren, das erwartungstreu und mit Effizienz Werte an den unbeprobten Orten schätzt. Ähnlich wie bei nichtlinearen Interpolationsverfahren berechnet Kriging ein gewichtetes Mittel der bekannten Werte, nur mit dem Unterschied, dass im geostatistischen Modell kein systematischer Fehler produziert wird, sondern im Mittel der wahre Wert geschätzt wird. Der räumliche und zeitliche Prozess wird dabei durch das Variogramm beschrieben.

Die Schätzung des Krigkoeffizienten erfolgt über einen intrinsisch stationären stochastischen Prozess. Die Formel hierzu lautet (OLEA 1999, STEIN 1999):

$$z^*(u_0) = \sum v_i z(u_i)$$

$z^*(u_0)$ = Krigewert an einem unbeprobten Wert im Untersuchungsgebiet

v_i = Krigengewichtung

u_i = Ort der Beprobung

$z(u_i)$ = Beobachtungswert am beprobten Ort

Die Krigengewichtung v_i unterscheidet Kriging von ursprünglichen nicht geostatistischen Interpolationsverfahren. Würde man die Gewichtung bei der Berechnung der Interpolationswerte vernachlässigen, so wäre das Ergebnis sehr ähnlich dem Inverse-Distance-Verfahren. Kriging berechnet die Krigengewichte so, dass die Gewichte an das reale Problem angepasst werden. Dabei wird für jeden Punkt u_0 ein Krigengewicht geschätzt, indem der Schätzfehler im Mittel gleich null und die Varianz des Schätzfehlers minimal ist. Zur Validierung der Schätzung werden die Residuen aus der Differenz zwischen den empirisch ermittelten und den berechneten Werten ermittelt (CRESSIE 1990, OLEA 1999, STEIN 1999):

$$F(u_0) = Z(u_0) - z^*(u_0) = Z(u_0) - \sum v_i Z(u_i)$$

Aufgrund dieser Eigenschaften kann das Kriging-Verfahren der BLUE Methode (best linear unbiased estimator) zugeordnet werden.

Die Bestimmung der Gewichte für die Schätzung der Werte erfolgt über eine Extremwertaufgabe, die das Minimum der Varianz aus der Krigeschätzung berechnet. Diese hat als Nebenbedingung, dass das Mittel aller Schätzwerte aus der Krigeschätzung null ergibt. Für die Extremwertaufgabe und die Nebenbedingung können folgende Definitionen angenommen werden.

Extremwertaufgabe (OLEA 1999, STEIN 1999):

$$Var[F(u_0)] = \min\{ F(u_0), v_1, \dots, v_n \text{ reelle Zahlen} \}$$

Nebenbedingung:

$$0 = E[F(u_0)] = E[Z(u_0) - \sum v_i Z(u_i)] = E[Z(u_0)] - \left(\sum v_i E[Z(u_i)] \right) = E[Z(u_0)] (1 - \sum v_i)$$

$$\rightarrow 1 = \sum v_i$$

Die Berechnung der Extremwertaufgabe samt der Nebenbedingung kann mit Hilfe der Lagrange-Multiplikation gelöst werden. Dies führt zu einem linearen Gleichungssystem, dessen eindeutige Lösung die Gewichte der Krigeschätzung bildet. Die Formel des Gleichungssystems ist folgende:

$$\sum v_j \gamma(u_i - u_j) + v = \gamma(u_i - u_0)$$

$$1 = \sum v_i$$

Um zu verstehen, was bei der Lösung des Gleichungssystems passiert, ist es notwendig, die Gleichung in der Matrix-Schreibweise aufzustellen:

$$\underbrace{\begin{bmatrix} \gamma_{11} & \dots & \gamma_{1n} & 1 \\ \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \gamma_{n1} & \dots & \gamma_{nn} & 1 \\ 1 & \dots & 1 & 0 \end{bmatrix}}_{=c} * \underbrace{\begin{bmatrix} v_1 \\ \vdots \\ v_n \\ v \end{bmatrix}}_{=v} = \underbrace{\begin{bmatrix} \gamma_{10} \\ \vdots \\ \gamma_{n1} \\ 1 \end{bmatrix}}_{=D}$$

Die Berechnung des Schätzwertes erfolgt auf den Eigenschaften dieser Matrix. Matrix D steht für die Variogrammwerte, welche zwischen dem Schätzort und den in die Schätzung eingeflossenen benachbarten Werten die Nachbarschaftsbeziehungen beschreiben. Diese Matrix bildet analog ein distanzgewichtetes Interpolationsverfahren nach. Der Unterschied liegt nur darin, dass der geometrische Abstand der Punkte durch einen statistischen ersetzt wurde. Matrix c beschreibt den statistischen Zusammenhang der Nachbarwerte. Liegen zwei Nachbarwerte nah beieinander, so ist ihr Variogrammwert klein. Liegen sie weit voneinander

entfernt, ist er groß. Durch Multiplikation der Inversen der Matrix C mit der Matrix D werden Gemeinsamkeiten in den Nachbarpunkten erfasst. Liegen Nachbarpunkte nah beieinander (liefern sie also für das Schätzen des nicht beobachteten Wertes teilweise redundante Informationen), so werden ihre Gewichte gesenkt und auf andere Nachbarwerte verteilt (STEIN 1999). Auch hier ist zu beachten, dass "nah" sich auf den durch das Variogramm bestimmten statistischen Abstand bezieht. Kriging berücksichtigt also die Konstellation der Nachbarpunkte hinsichtlich ihres Abstandes zum zu schätzenden Punkt und hinsichtlich ihrer Gemeinsamkeit. Aus der Matrix lässt sich demnach folgende Formel für die Bestimmung des Gewichtes v ermitteln (OLEA 1999):

$$v = C^{-1} * D$$

In dem Paket ArcGIS 9.1 ist das Verfahren K als Funktion im Geostatistical Analyst bereits umgesetzt worden. Dies ermöglicht den Einsatz des Verfahrens ohne weiteren Programmieraufwand. Die benötigten Daten müssen nur noch im Vektorformat (Shapefiles) vorliegen, und die Krigingfunktion in ArcGIS kann gestartet werden. Zur Automatisierung dieses Verfahrens wurde die Entwicklungsumgebung ArcObjects verwendet.

Zusammenfassend ist zu sagen, dass das Krigingverfahren eine viel versprechende Methode ist, um eine Interpolation der meteorologischen Parameter zu leisten. Der Nachteil dieser Methode ist das höchst komplizierte und aufwändige Rechenverfahren. Große Auswirkungen auf das Interpolationsergebnis haben die geographische Lage sowie die Anzahl der Wetterstationen. Kriging benötigt ein umfangreiches und gleichmäßiges Netz von Wetterstationen, um eine allgemeingültige Tendenz aus den Daten berechnen zu können (STREIT 1981, CRESSIE 1990, OLIVER und Webster 1990, OLEA 1999, STEIN 1999).

3.7.4 Multiple Regression

In der Klimatologie wurde in den letzten Jahren die Untersuchung von drei-dimensionalen Betrachtungen vorangetrieben. Dabei entstanden viele Verfahren zur Regionalisierung von klimatologischen Größen. Zumeist basieren diese Verfahren auf linearen Interpolationslösungen zur Berechnung von Schätzwerten zwischen zwei benachbarten Messstationen. HORMANN (1979) zeigte jedoch, dass gerade bei gegliederten Naturräumen lineare Interpolationslösungen nicht ausreichend waren. Stark gegliederte Naturräume besitzen eine deutliche Abhängigkeit der Klimawerte von der Topographie. Deshalb konzentrierte sich die Forschung der Regionalisierungen mehr auf diese Richtung. Ziel war

es, alle wesentlichen Lageeinflüsse zu erfassen, die für eine räumliche Differenzierung der Klimawerte notwendig waren. Um die vielen Einflussfaktoren in einer Interpolationsberechnung berücksichtigen zu können, wurde auf eine mathematisch-statistische Methode, die multiple Regression (MR), zurückgegriffen. Die MR erlaubt Berechnungen in Form einer Regressionsgleichung, die für jede einzelne Rasterzelle des Deutschlandgrids einen Wert für den gewünschten meteorologischen Parameter berechnet (SCHRÖDER 2004). In den Untersuchungen von HORMANN (1979) und MÜLLER-WESTERMAIER (1995) hat sich gezeigt, dass sich Regressionen zum Einsatz bei Regionalisierungen von Klimaparametern bewährt haben. Dabei wurde festgestellt, dass allein durch Hinzunahme des Parameters Höhe über NN interpolierte Werte der Temperatur mit hohen Genauigkeiten berechnet werden konnten. Durch eine umfangreiche Parametrisierung wird es möglich, die meteorologische Größe in einer Regressionsformel zu beschreiben (ZEUNER 2003):

$$y = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + ... + b_n * x_n$$

y = meteorologische Parameter (z.B. Temperatur)
x = unabhängige Parameter (Relieffaktoren)
b = Regressionskoeffizient

Neben der linearen multiplen Regression sind auch log-lineare oder exponentielle Modelle denkbar. Aus Gründen der Übersichtlichkeit wird aber meist auf andere als die lineare MR verzichtet (DALY et al. 1994). In Abbildung 30 wurde das Ablaufschema der Interpolation mit MR dargestellt.

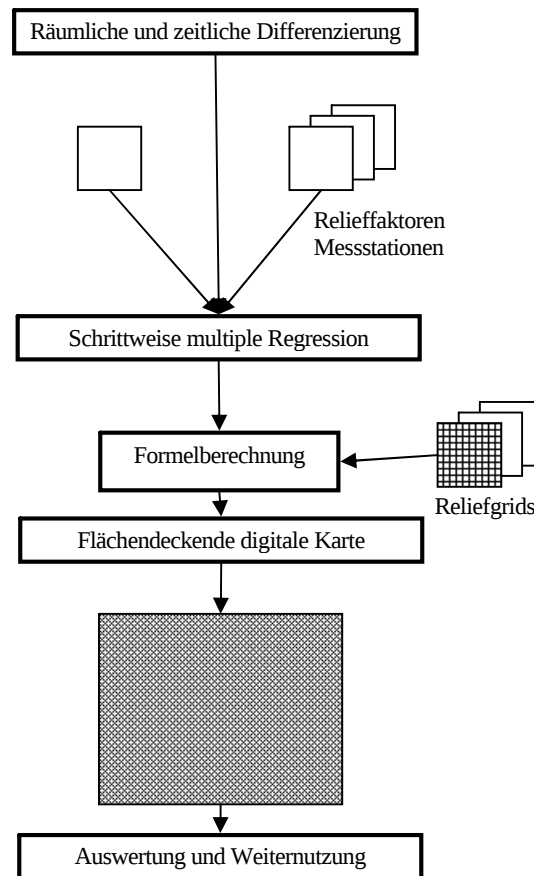


Abbildung 30: Ablaufschema der Interpolation mit der multiplen Regression (geändert nach SCHRÖDER 2004).

Zunächst erfolgt die räumliche und zeitliche Differenzierung auf Grundlage der aufbereiteten Geobasisdaten (Temperatur, relative Luftfeuchte, Höhe, Lage) (SCHRÖDER 2004). Über eine schrittweise multiple Regression wird ein Verschnitt dieser Basisdaten erreicht (HELLER 1996, ZEUNER 2003, MENSE-STEFAN 2005). Aus den Basisdaten werden für jede einzelne Zelle des Deutschlandgrids die Werte der Geofaktoren abgefragt und in die Formel der MR eingesetzt. Das Ergebnis wird als Temperaturwert für diese Zelle abgespeichert. Dieses Ergebnis kann nun interpretiert und für weitere Berechnungen verwendet werden.

3.7.4.1 Rechnung der multiplen Regression

Der MR liegt die Formel des allgemeinen Regressionsmodells: $y = f(x_1, \dots, x_k) + e$ zu Grunde (RAUSCH und VERDOOREN 2004).

Diese unterscheidet sich im Vergleich zu einer MR dadurch, dass jede Einflussgröße für sich berechnet wird. Bei einer MR wird dem Einfluss einer Einflussgröße der einer anderen hinzugefügt. Gilt für das allgemeine Regressionsmodell, dass jedes einzelne $x_1, \dots, x_k$ durch

den Term $\beta_0 + \beta_1 * x_1 + \dots + \beta_k * x_k$ mit $k \geq 2$ dargestellt werden kann, so erhält man die Modellgleichung der MR (β = Regressionskoeffizient):

$$y = \beta_0 + \beta_{1j} * x_1 + \beta_{2j} * x_{21} + \dots + \beta_k * x_{kj} + e_j, (j = 1, \dots, n)$$

y = meteorologische Parameter (z.B. Temperatur)
x = unabhängige Parameter (Relieffaktoren)
 β = Regressionskoeffizient

Werden nun die einzelnen Merkmalsausprägungen, die bei den Beobachtungen (zum Beispiel 12 Wetterstationen in einer Interpolationszone mit zwei Ausprägungen) gemacht wurden, in diese Formel überführt ergibt sich folgende Darstellung:

$$y_1 = \beta_0 + \beta_1 * x_{11} + \beta_2 * x_{21} + e_1$$

$$y_2 = \beta_0 + \beta_1 * x_{12} + \beta_2 * x_{22} + e_2$$

.....

$$y_{12} = \beta_0 + \beta_1 * x_{112} + \beta_2 * x_{212} + e_{12}$$

Da, wie beim K solche Schreibweisen nicht üblich oder unpraktikabel sind werden diese Einzelgleichungen in Matrizen überführt (RAUSCH und VERDOOREN 2004):

$$y = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_n \end{pmatrix}, \beta = \begin{pmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_k \end{pmatrix}, X = \begin{pmatrix} 1 & x_{11} & x_{21} & \dots & x_{k1} \\ 1 & x_{12} & x_{22} & \dots & x_{k2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 1 & x_{1n} & x_{2n} & \dots & x_{kn} \end{pmatrix} \text{ und } e = \begin{pmatrix} e_1 \\ e_2 \\ \vdots \\ e_n \end{pmatrix}.$$

Die Matrix X wurde durch eine Spalte erweitert, in welche die Zahl 1 mehrfach eingefügt wurde. Diese dienen als Scheinvariable, um das Absolutglied bzw. die allgemeine Regressionskonstante (β_0) in dieser Matrix zu repräsentieren. Werden jetzt nur noch die Variablen betrachtet, lässt sich die Gleichung für die allgemeine MR aufstellen (RAUSCH und VERDOOREN 2004)

$$y = X\beta + e$$

X = Koeffizientenmatrix

β = Parametervektor

e = Vektor der Fehlerglieder

Für die MR wird die lineare Unabhängigkeit der Variablen vorausgesetzt, damit die Regressionsparameter geschätzt werden können. Hierzu muss die Anzahl der Ausprägungen kleiner als die Anzahl Wetterstationen ($k < n$) sein (RAUSCH und VERDOOREN 2004). Ist diese Bedingung erfüllt, muss ebenfalls darauf geachtet werden, dass durch eine mathematische Operation mit einer Konstanten sich die Einflussgrößen nicht gegenseitig erzeugen können. Aufgrund der Kriterien, die zur Bildung von Interpolationszonen geführt haben und durch die

Nutzung von unabhängigen Geofaktoren als Einflussgrößen ist diese Voraussetzung immer erfüllt und eine Parameterschätzung kann erfolgen.

Zur Schätzung der Regressionskoeffizienten wird die Methode der kleinsten Quadrate angewendet. Die Regressionsvariablen werden durch die Regressionskoeffizienten $b_0, b_1, \dots, b_k$ repräsentiert. Dabei wird versucht, den Wert b so zu bestimmen, dass bei einem Schätzwert $\hat{\beta}$ für β die Summe der Abweichungsquadrate (SQ) minimiert werden:

$$SQ = \sum_{j=1}^n (y_j - \beta_0 - \beta_1 * x_{1j} - \dots - \beta_k * x_{kj})^2$$

Wenn davon ausgegangen werden kann, dass die quadratische Abweichung geteilt durch den Parametervektor gleich null ist, also minimal, dann ergibt sich die Normalgleichung zur Berechnung des Schätzwertes $\hat{\beta}$: $X'X\hat{\beta} = X'y$

Den linken Teil des Terms erhält man, indem die Matrix X transponiert und anschließend mit sich selbst multipliziert wird. Um den rechten Teil des Terms zu berechnen, werden die Matrizen y und die transponierte Matrix X miteinander multipliziert.

Da zur Berechnung von $\hat{\beta}$ bzw. b die Normalgleichung aufgelöst werden muss, ist zunächst die inverse Matrix aus der Matrix $X'X$ zu erzeugen (RAUSCH und VERDOOREN 2004). Dabei ist darauf zu achten, dass die Matrix $X'X$ invertierbar ist. Dies kann erreicht werden, indem bei der Versuchsanordnung mindestens $k+1$ verschiedene Messstellen gewählt werden. Anschließend wird das Teilergebnis des rechten Terms mit dem Ergebnis der inversen Matrix multipliziert, um den Koeffizienten b für jede Ausprägung zu erhalten:

$$b = \hat{\beta} = (X'X)^{-1} X'y.$$

Nun können für jede einzelne Zeile der Matrix Regressionskoeffizienten bestimmt werden.

Mit Hilfe dieser Koeffizienten können die Werte der Zielgröße für jede Wertemenge aus $(x_1, x_2, \dots, x_n)$ aus der Formel:

$$\hat{y} = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2 + \dots + b_n * x_n$$

berechnet werden.

3.7.4.2 Prädiktoren

Ziel war es, Prädiktoren zu finden, die unabhängig voneinander waren, und mit denen das zu beschreibende Phänomen erklärt werden konnte. Bei der Parametrisierung wurde auf die Erfahrungen von HELLER (1996), HORMANN (1979) und ZEUNER (2003) zurückgegriffen. Dabei wurde darauf verwiesen, dass gerade bei der Interpolation von meteorologischen Größen, die Reliefparameter und die Lage den stärksten Einfluss besitzen. HORMANN (1979) schreibt zudem, dass die Variabilität des Stationsnetzes mitverantwortlich ist, ob ein Parameter Einfluss auf eine meteorologische Größe besitzt. Zur Erklärung von Temperatur und relativer Luftfeuchte im Gelände wurden einige Parameter auf ihren Einfluss getestet.

Zur Erfassung von Kontinentalität und Maritimität eignen sich die Lageparameter (Geographische Länge und Breite) einer Station. Diese Daten wurden mit Hilfe von GPS gemessen. Die gemessenen Positionen wurden anhand der DTK25 noch einmal überprüft und gegebenenfalls korrigiert, bevor die Koordinaten zur Nutzung bei der MR in Dezimalgrade umgerechnet wurden.

Die Temperaturabnahme mit der Höhe bzw. Temperaturschwankungen durch die Sonneneinstrahlung oder auch Inversionen sind bei der Modellierung der Temperatur zu berücksichtigen. Diese Einflüsse konnten mit Hilfe des DGM-D extrahiert werden. Hierzu dienten die Parameter Höhenlage, Hangneigung und Exposition.

Zur Erfassung, ob eine Station sich im kaltluftgefährdeten Gebiet befindet, wurde die Hanglage nach HORMANN (1981) berechnet. Die Hanglage gibt an, wo sich die Station relativ zum Hang befindet, ob am Hangfuß, im Hang selbst oder auf der Bergkuppe (ZEUNER 2003).

Als weitere Einflussparameter wurden Horizonthöhen in unterschiedlichen Richtungen und Entfernungen zu einer Wetterstation berechnet. Damit sollten Luv- und Leeeffekte durch vor- oder nachgelagerte Erhebungen bestimmt und auf Einfluss getestet werden. Hierzu wurden Kreise in unterschiedlichen Entfernungen (in 0,5, 1, 5 und 15 km Entfernung) um die Wetterstationen gezogen. Diese Kreise wurden durch vier Horizontwinkel (N[316°-45°], O[46°-135°], S[136°-225°] und W[226°-315°]) zerschnitten. Somit ergaben sich insgesamt zwölf Horizontwinkel, in denen der Höhenwert aus dem DGM-D bestimmt werden musste. Hierbei war darauf zu achten, dass einem weiter entfernten Horizontwinkel nicht der größere Höhenwert eines näher liegenden Horizontwinkels zugewiesen wurde.

3.8 Auswertungen der Interpolationsergebnisse

Zur Überprüfung der Ergebnisse der Interpolationsverfahren wurden in jeder verwendeten Interpolationszone nacheinander unterschiedliche Stationen von der Interpolationsberechnung ausgeschlossen, um dann die gemessenen Werte dieser Stationen mit den interpolierten Werten zu vergleichen.

Der Vergleich der berechneten und gemessenen Stationswerte erfolgte dabei durch deskriptive Statistik, lineare Regression, Box-Whisker-Plots (Boxplot) und Teststatistik (Student-T-Test).

3.9 Prognosemodelle

3.9.1 SIMLEP1, SIMLEP2 und SIMLEP3

Das Modell SIMLEP1 simuliert den Abundanzverlauf des Kartoffelkäfers (*Leptinotarsa decemlineata*) vom Erscheinen der Käfer aus dem Winterlager bis zum Auftreten von Jungkäfern. Dabei werden die wesentlichen populationsdynamischen Prozesse, wie Immigration, Reproduktion, Ontogenese und Mortalität (spezifisch für die einzelnen Entwicklungsstadien des Käfers) temperaturabhängig nachgebildet. Eine Ausnahme bildet die Berechnung der Mortalität (M) von Jung- und Altlarven. Da in der Literatur dazu nur sehr grobe, quantitative Angaben zu finden waren, wurden fixe Grundmortalitäten definiert. Während des Junglarvenstadiums sterben 40 % der Individuen; während des Altlarvenstadiums 25 % der Altlarven. Außerdem werden bei der Berechnung der Eiablage neben der Temperatur auch das Alter der Weibchen (AW) und beim Schlüpfen der Eier das Alter der Eier (AE) als Einflussfaktoren berücksichtigt (KURTH et al. 1984).

SIMLEP1 bildet die Basis für ein Prognoseverfahren, das Aussagen zur phänologischen Entwicklung und zur relativen Abundanz der einzelnen Entwicklungsstadien des Käfers liefert. Diese Prognosen beziehen sich jeweils auf größere Gebiete (Regionen), die im Wesentlichen durch die Repräsentativität der verwendeten Temperaturwerte begrenzt werden (KURTH et al. 1984).

Aufbauend auf SIMLEP1 wurde SIMLEP2 entwickelt. Dieses Modell ist für schlagspezifische Berechnungen zur Steuerung der Insektizidapplikationen konzipiert. Zur Spezifizierung des Ausgangsbefalls auf dem Schlag benötigt SIMLEP2 zusätzliche Inputwerte (Boniturtermin „Erstaufreten Eigelege“, Anzahl der bei dieser Bonitur gefundenen Eigelege auf 40 Pflanzen und Termin der letzten Bonitur ohne Eigelegefund)

(JÖRG und ROßBERG 1998). Im März 1998 wurde eine vereinfachte Version des Modells SIMLEP2 den staatlichen Pflanzenschutzdiensten unter dem Namen SIMLEP3 zur Verfügung gestellt (ROßBERG et al. 1999). Mit SIMLEP3 werden folgende Terminaussagen bzw. Terminprognosen gegeben (Abbildung 31):

- Termin des Erstauftretens von Junglarven
- Termin des Erstauftretens von Altlarven
- Zeitspanne für die maximale Eiabundanz
- Zeitspanne für das maximale Auftreten von Junglarven

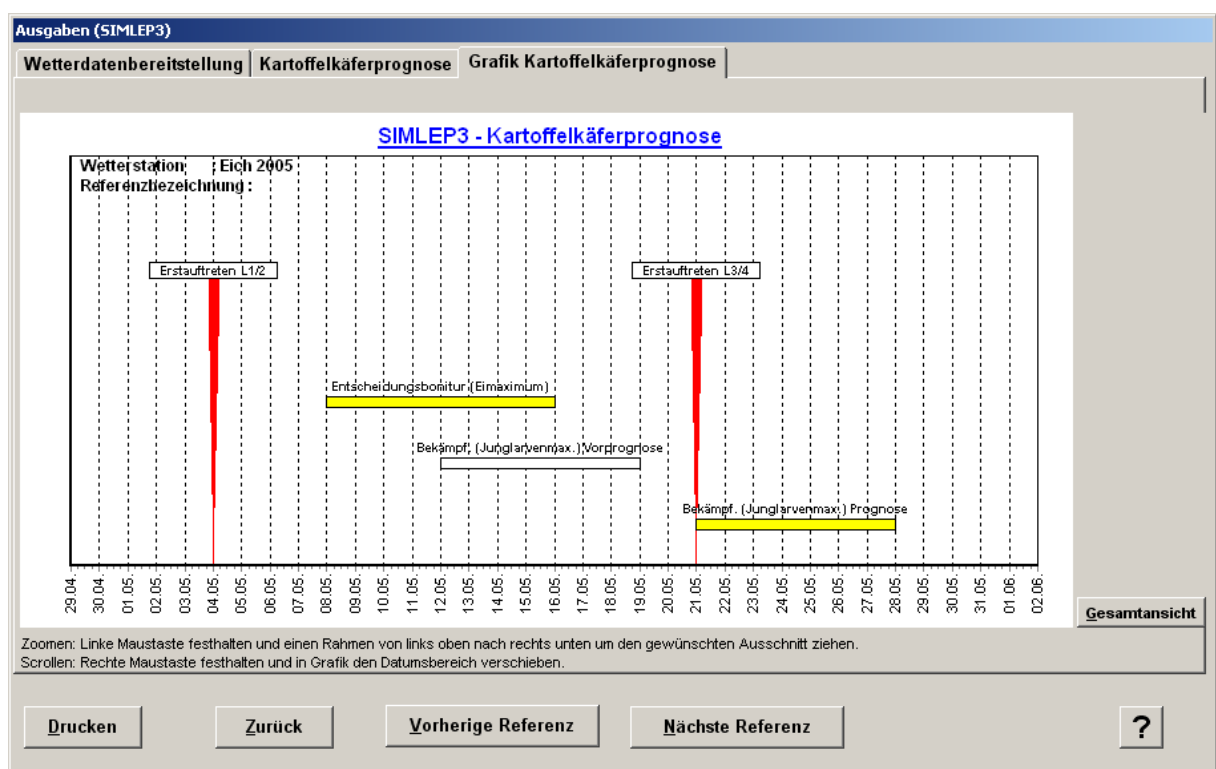


Abbildung 31: Ergebnis von SIMLEP3 an der Station Eich 2005.

Das Modell SIMLEP3 wird in der landwirtschaftlichen Praxis angewendet und leistet somit einen wesentlichen Beitrag zur erfolgreichen Bekämpfung des Kartoffelkäfers und zur Reduzierung des Insektizidresistenzrisikos, indem es durch die Prognose des optimalen Bonitur- und Bekämpfungszeitraums hilft, die Insektizidwirkung zu maximieren und den Insektizideinsatz auf das notwendige Maß zu beschränken (ROßBERG et al. 1999).

3.9.2 SIMPHYT3

Das Modell SIMPHYT3 berechnet ausschließlich den Einfluss der Witterung auf die Krautfäuleepidemie und liefert Aussagen zum aktuellen Infektionsdruck auf lokaler und regionaler Ebene. Aus den Modellergebnissen können Empfehlungen zum Spritzabstand und zur Fungizidwahl abgeleitet werden (GUTSCHE et al. 1999, KLEINHENZ und JÖRG 2000).

Die Grundidee des Modells besteht darin, dass ein Algorithmus im eintägigen Zeittakt über der Zeitachse angewendet wird. Dabei wird ein kompletter Befallszyklus von der Infektion, der latenten Phase über die infektiöse Phase bis zum befallsbedingten Absterben simuliert. Da ein kompletter Befallszyklus in der Regel 14 Tage dauert, werden die Wetterdaten bei SIMPHYT3 vom aktuellen Datum aus immer zwei Wochen rückwirkend betrachtet. Dabei werden stündliche Wetterdaten der Temperatur und der relativen Luftfeuchte benötigt (Tabelle 5). Der Infektionsdruck entspricht dem Befall auf 1000 ungeschützten Blattfiedern, der sich aus einer einzelnen infizierten Blattfieder, ohne Fungizidwirkung, je nach Witterungsverlauf innerhalb der 14 Tage entwickelt (GUTSCHE et al. 1999).

Neben dem Infektionsdruck werden die Okkupationsraten (PEW-Werte) aus der relativen Luftfeuchte und der Temperatur vom Modell berechnet. Sie geben an, ob und in welchem Maße am aktuellen Tag eine Befallszunahme von *P. infestans* möglich war.

Der mathematische Ansatz beruht auf einer logistischen Wachstumskurve, dem Äquivalenz-Theorem von van der Plank (GUTSCHE et al. 1999). Das Modell berechnet die Prozesse Latenzzeit, Dauer der infektiösen Periode und Neuinfektionsraten.

Tabelle 5: Wetterparameter von SIMPHYT3.

Wetterparameter in SIMPHYT3	Temperatur	relative Luftfeuchte	Niederschlag
Latenzzeit	x		
Infektiöse Periode	x		
Neuinfektionsrate	x	x	
Okkupationsraten	x	x	

Die Entwicklungsgeschwindigkeit der Epidemie wird anhand der Neuinfektionsrate beschrieben. Zur Berechnung der Neuinfektionsrate wird für jede Stunde überprüft, ob infektionsgünstige Bedingungen geherrscht haben (GUTSCHE et al. 1999). Dabei wird unterstellt, dass eine relative Luftfeuchte von mindesten 75 %, gemessen in 2 m Höhe, einer relativen Luftfeuchte von mindestens 90 % im Kartoffelbestand entspricht. Zur Bestimmung der Neuinfektionsrate wird folgende Bedingung im Algorithmus je Stunde untersucht:

- In den vergangenen 16 Stunden, muss eine Periode von mindestens 10 Stunden geherrscht haben, in denen mindestens 75 % relative Luftfeuchte und eine Temperatur zwischen 8 und 25 °C gemessen wurden.

Ist diese Bedingung erfüllt, wird eine temperaturabhängige Neuinfektionsrate je Stunde berechnet, die zu einer täglichen Rate aufsummiert wird (GUTSCHE et al. 1999).

Der Modelloutput von SIMPHYT3 ist der Infektionsdruck und der PEW-Wert (Abbildung 32). Mit Hilfe des Infektionsdrucks können Empfehlungen zu den Spritzabständen bei der *P. infestans*-Bekämpfung gegeben werden. Dabei wird der Infektionsdruck in fünf Klassen von „sehr niedrig“ bis „sehr hoch“ eingeteilt. Bei einem „sehr niedrigen“ Infektionsdruck wird ein Spritzabstand von 15 Tagen empfohlen. Dieser wird bei zunehmendem Infektionsdruck um jeweils 2 Tage pro Infektionsdruckklasse bis zu einem Spritzabstand von 7 Tagen bei „sehr hohem“ Infektionsdruck verkürzt. Anhand der gelben und roten Balken des PEW-Werts kann überprüft werden, ob an dem betreffenden Tag eine Befallszunahme von *P. infestans* möglich war. Die Balken werden gelb gefärbt wenn der errechnete PEW-Wert unter 0,4 bleibt, dass heißt es ist eine schwache Zunahme von *P. infestans* möglich. Steigt er auf über 0,4 so werden die Balken rot gezeichnet und eine starke Befallszunahme von *P. infestans* kann erfolgen.

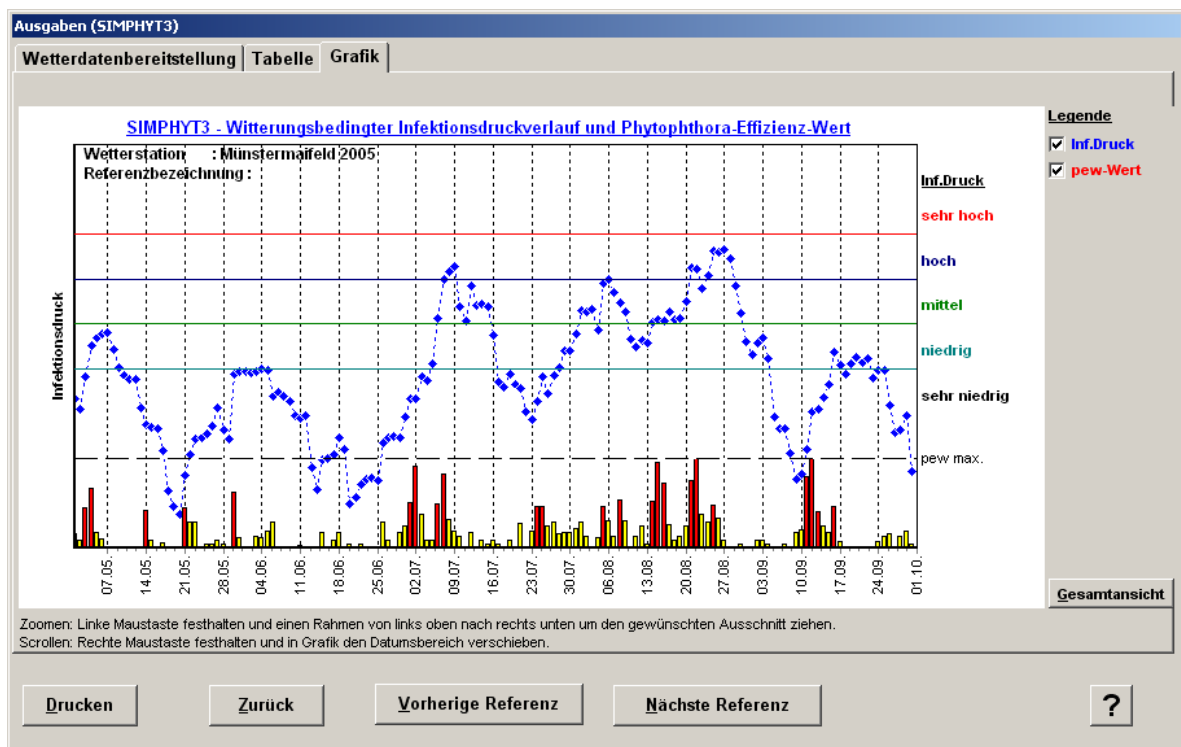


Abbildung 32: Ergebnis von SIMPHYT3 in Münstermaifeld 2005.

3.9.3 SIMBLIGHT1

Das Modell SIMBLIGHT1 berechnet den Epidemiestart der Krautfäule der Kartoffel. Ziel ist es, den optimalen Tag für den Behandlungsbeginn prognostisch zu ermitteln. Da das Modell SIMPHYT1 nicht erweiterbar war, wurde das Modell SIMBLIGHT als neuer Ansatz zur Berechnung des Erstauftretens der Krautfäule entwickelt. Dabei war es möglich weitere Parameter in das Modell zu integrieren (KLEINHENZ et al. 2006).

Grundlage der Berechnungen von SIMBLIGHT1 sind Teile des Algorithmus von SIMPHYT3. Der Unterschied zwischen den beiden Modellen liegt in der Einbeziehung eines Sortenfaktors, der Bodenfeuchte und der Anbaudichte. Das Modell berechnet zwei Raten: eine Infektionsrate und eine Entwicklungsrate, die den Fortgang der Krankheit beschreibt. Die Zunahme des Befalls der Krankheit wird im Modell durch die Variablen latent befallene Blattfläche und infektiös befallene Blattfläche simuliert.

Die Kartoffelsorten wurden in zwei Gruppen, in normal und hoch anfällige Sorten eingeteilt. Die Bodenfeuchte wird ebenfalls in zwei Gruppen in niedrige und hohe Bodenfeuchte klassifiziert. Dabei wird der Zeitraum von 7 Tagen nach der Pflanzung bis zum Auflauf der Kartoffelpflanzen betrachtet. Wenn in diesem Zeitraum an mindestens vier Tagen hohe Bodenfeuchte festgestellt wurde, wird der Schlag in die Gruppe hohe Bodenfeuchte einsortiert. Da zurzeit keine Bodenfeuchtemessungen möglich sind, wird die Befahrbarkeit des Schlages als Indikator für hohe Bodenfeuchte verwendet (KLEINHENZ et al. 2006).

Da das Infektionsrisiko steigt, wenn die Anbaudichte über 10 % liegt, wurde die Anbaudichte im Modell integriert. Die Einschätzung der Anbaudichte erfolgt in zwei Abstufungen (= 10 % oder < 10 %) (KLEINHENZ et al. 2006). Die Angaben beziehen sich auf den Anteil Ackerfläche in der Umgebung (ca. 1 km) des Schlages, auf dem Kartoffeln angebaut werden. In dieser Arbeit wurde die Anbaudichte anhand der Anbaustatistik des Statistischen Bundesamtes von 2003 berechnet. Hierbei wurde ermittelt, welche Gemeinden einen Anteil von mehr als 10 % Kartoffelfläche an der gesamten Ackerfläche hatten.

Tabelle 6: Auflaufklassen für Kartoffelschläge in SIMBLIGHT1 (Kleinhenz et al. 2006).

Klasse	1	2	3	4	5	6	7
Auflauf	vor 6.04.	16.-20.04.	21.-25.04.	26-30.04.	01.-05.05.	06.-10.05.	11.-15.05.
Klasse	8	9	10	11	12	13	
Auflauf	16.05.-20.05	21. -25.05.	26. -30.05.	31. -04.06.	05. -09.06	nach 09.06.	

Da der Auflauf von Kartoffeln in Deutschland von Anfang April bis Mitte Mai erfolgt werden beim Modelloutput stets Termine für 13 Auflaufpentaden (Tabelle 6) unterschieden. Abbildung 33 zeigt exemplarisch das Ergebnis von fünf Auflaufpentaden. Sobald die Verlaufskurven einen kritischen Wert überschreiten, wird eine Behandlung empfohlen. Der kritische Wert für den Behandlungsbeginn wurde anhand von empirischen Daten ermittelt.

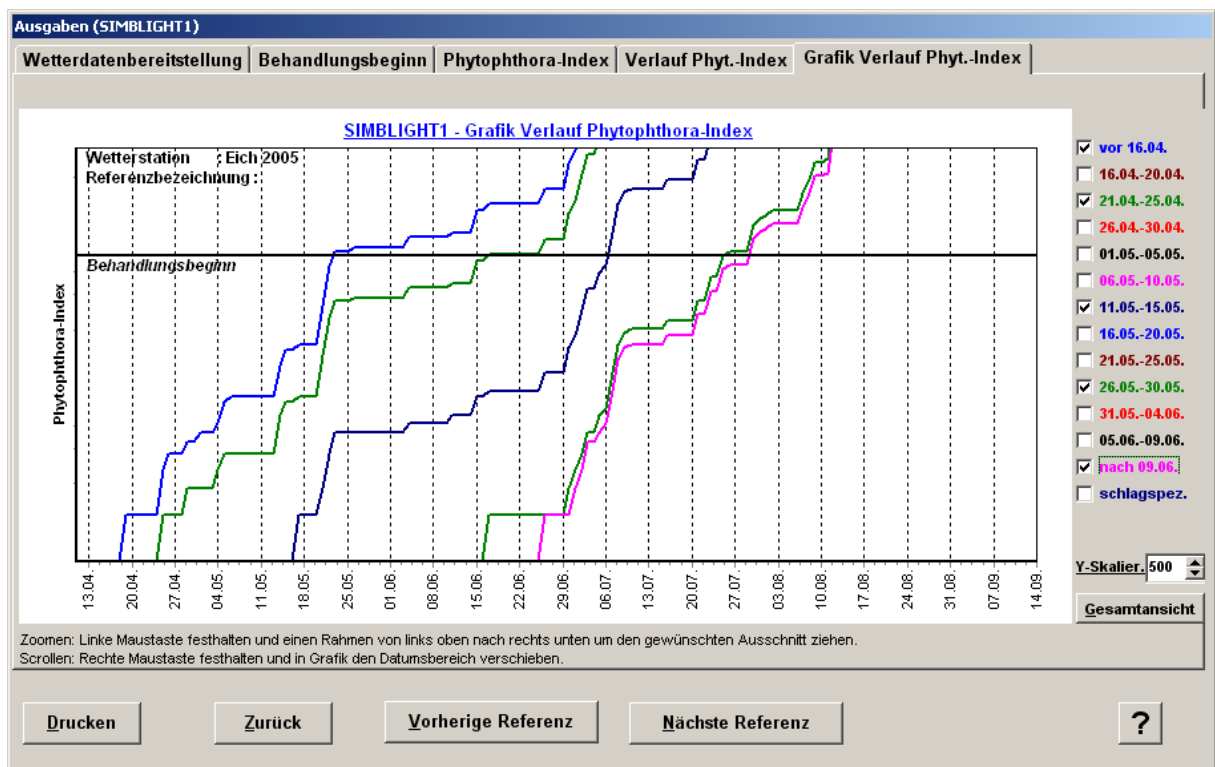


Abbildung 33: Ergebnis für SIMBLIGHT1 in Eich 2005.

3.9.4 SIMPHYT1

Das Modell SIMPHYT1 bildet die Phase vom Beginn der epidemiologischen Entwicklung von *P. infestans* bis zum sichtbaren Erstauftreten der Krankheit nach. Ziel des Verfahrens ist es, den optimalen Tag für den Spritzbeginn prognostisch zu ermitteln, um vorzeitige Behandlungsmaßnahmen zu vermeiden. Das Modell ist für Schläge ohne Anbauverfrühung, zum Beispiel durch Folienanbau, und für Flächen ohne Beregnung einzusetzen (KLUGE und GUTSCHE 1990, KLEINHENZ et al. 2006).

Erreicht die latent befallene Blattfläche den Wert 0,1 %, wird der Epidemiebeginn angenommen. Da der Vorlauf zu einem beobachteten Epidemieverlauf in der Regel 7 bis 12 Tage beträgt wurde der 8. Tag nach Erreichen des genannten latenten Befallswerts als Prognosetermin definiert (GUTSCHE und KLUGE 1984). Dieser Vorlauf basiert nicht auf einer Wetterprognose, sondern auf der Entwicklung des Erregers vor der Sichtbarkeitsschwelle.

Das Modell benutzt neben der Temperatur und der relativen Luftfeuchte (Tabelle 7) einen Startwert für das praktisch nicht feststellbare Erregerpotenzial um die epidemiologische Entwicklung des Pilzes zu berechnen. Der Startwert ist von einem Regionalfaktor, dem Pflanzgutbefall und der Niederschlagsmenge in der Anfangsphase der Pflanzenentwicklung abhängig.

Der Regionalfaktor wird aus der Höhenlage der Station und aus den langjährigen Klimadaten des Monats Juni bestimmt.

Der Pflanzgutbefall ist entscheidend für die Anzahl der Primärherde (siehe Kapitel 2.1.2 Kraut- und Knollenfäule) und den Verlauf der Frühphase der Epidemie. Da die Informationen über das Pflanzgut aber meist nicht ausreichend sind, wird seit 1999 immer der höchste Pflanzgutbefall vorausgesetzt (KLEINHENZ und JÖRG 1998).

Zudem wird die Sortenanfälligkeit im Modell durch „niedrige“ und „hohe“ Gefährdung berücksichtigt. Zu beachten ist, dass durch Staunässe, benachbarte Gewässer und starken Vorjahresbefall die Gefährdung von „niedrig“ (GG1) auf „hoch“ (GG2) gestuft werden kann.

Tabelle 7: Witterungseinfluss von SIMPHYT1.

Witterungseinfluss von SIMPHYT1	Temperatur	relative Luftfeuchte	Niederschlag
Regionalfaktor	x		x
Dauer der latenten Phase	x		
Dauer der infektiösen Phase	x		
Bestimmung der Okkupationsrate	x	x	

Ähnlich wie bei SIMBLIGHT1 erfolgt die Berechnung der Ergebnisse von SIMPHYT1 für acht Auflauftermindekaden. Dabei werden stets Ergebnisse für „niedrige“ und „hohe“ Gefährdung ausgegeben (Abbildung 34). Der Epidemiestart wird durch kleine Schilder markiert. Bei den jeweils zusammengehörigen GGs sind farbig gleich gezeichnet. Die erste Dekade hat ihren Auflauf vor dem 10. April und die letzte Dekade nach dem 10. Juni (Tabelle 8). Ein Kartoffelfeld gilt als aufgelaufen, wenn mindestens 80 % der Kartoffeln aufgelaufen sind.

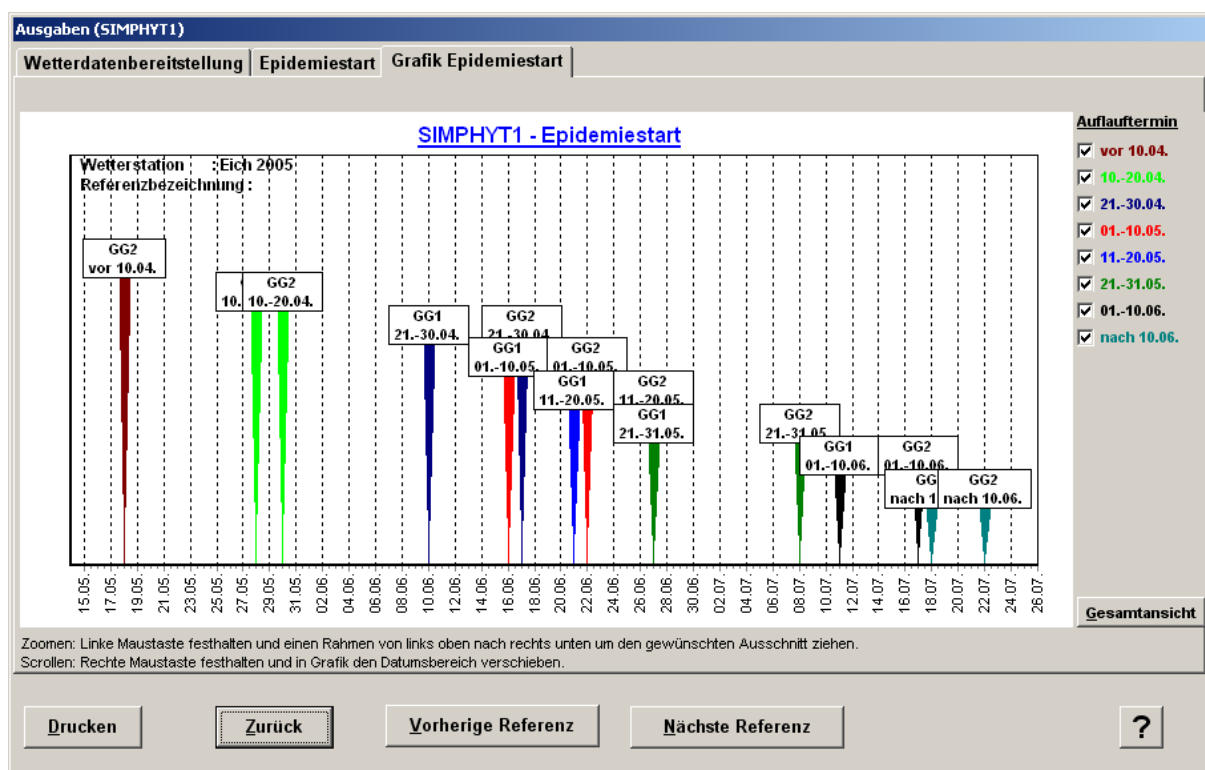


Abbildung 34: Ergebnis von SIMPHYT1 in Eich 2005.

Tabelle 8: Auflaufklassen für Kartoffelschläge in SIMPHYT1 (KLEINHENZ und JÖRG 1998).

Klasse	1	2	3	4	5	6	7	8
Auflauf	vor 10.04.	11.-20.04.	21.-30.05.	01.-10.05.	11.-20.05.	21.-31.05.	01.-10.06	nach 10.06.

3.10 Auswertung der Prognoseberechnungen

Zur Überprüfung der Prognoseergebnisse wurden Boniturdaten aus den Jahren 2000 bis 2007 verwendet. Bonituren sind Erhebungen, bei denen das Schaderregerauftreten an landwirtschaftlichen Nutzpflanzen als BH und/oder BS dokumentiert wird. Die Erhebungen erfolgen nach vereinheitlichtem Schema der ZEPP. Dabei gibt es drei Arten von Boniturdaten: Erhebungen in Exaktversuchen, Erhebungen auf Monitoringflächen (ausgewählte Schläge, auf denen regelmäßig wöchentliche Boniturgänge stattfinden) und Erhebungen auf Flächen, von denen ein Schaderregerauftreten zufällig gemeldet wird. Diese Daten dienen der Validierung, Verbesserung und Entwicklung bestehender Prognosemodelle.

Von 2001 bis 2003 wurden *Phytophthora*- Erhebungen in zwei Regionen in Rheinland-Pfalz durchgeführt. Dabei wurden in drei Jahren insgesamt 244 Schläge in Rheinland-Pfalz zweimal wöchentlich auf das EA von *P. infestans* untersucht. Die Schlaggeometrien wurden anhand der DTK25 festgehalten, so dass diese nachträglich einer virtuellen Station zugewiesen werden konnten. Da die Schläge in Rheinland-Pfalz relativ klein sind, und eine

hohe Anbaudichte vorherrscht, kam es vor, dass mehrere Schläge auf dem Gebiet derselben virtuellen Station (1 km²) lagen. Da aufgrund der kleinräumigen Lage der Schläge mehrere Schläge einer virtuellen Station zugewiesen wurden war es nicht möglich, unabhängige Untersuchungen mit diesen Schlägen durchzuführen. Um nur ein Erstauftretensdatum für eine virtuelle Station zu erhalten, wurde das Datum ermittelt, an dem 20 % dieser Schläge einer virtuellen Station ein EA aufwiesen.

Tabelle 9: Anzahl kontrollierter Schläge in Rheinland-Pfalz von 2001 bis 2003.

Jahr	Region in Eich	Region in Böhl
2001	26	48
2002	44	72
2003	23	31
Gesamt	93	151

Im Jahr 2006 wurden Bonituren in drei Regionen in Rheinland-Pfalz und in zwei Regionen in Brandenburg durchgeführt. Diese wurden anhand der Anbaudichte und der Lage der Wetterstationen mit Hilfe der Kartoffelanbaustatistik des Statistischen Bundesamtes ausgewählt (Abbildung 35). Dabei wurden Schläge in unterschiedlichen Entfernungen zwischen zwei Wetterstationen betrachtet. Insgesamt wurden in Rheinland-Pfalz 21 und in Brandenburg 13 Schläge auf Krautfäule untersucht. Zur Beobachtung der Populationsdynamik des Kartoffelkäfers wurden 7 Monitoringflächen in Rheinland-Pfalz und 5 in Brandenburg betrachtet (Tabelle 10). Zur Georeferenzierung der Schläge wurden PDAs und GPS eingesetzt. Die Bonituren begannen mit dem Auflaufen der Kartoffelpflanzen Mitte Mai. Sie wurden bis zur Abreife bzw. Ernte Mitte August mindestens einmal wöchentlich durchgeführt.

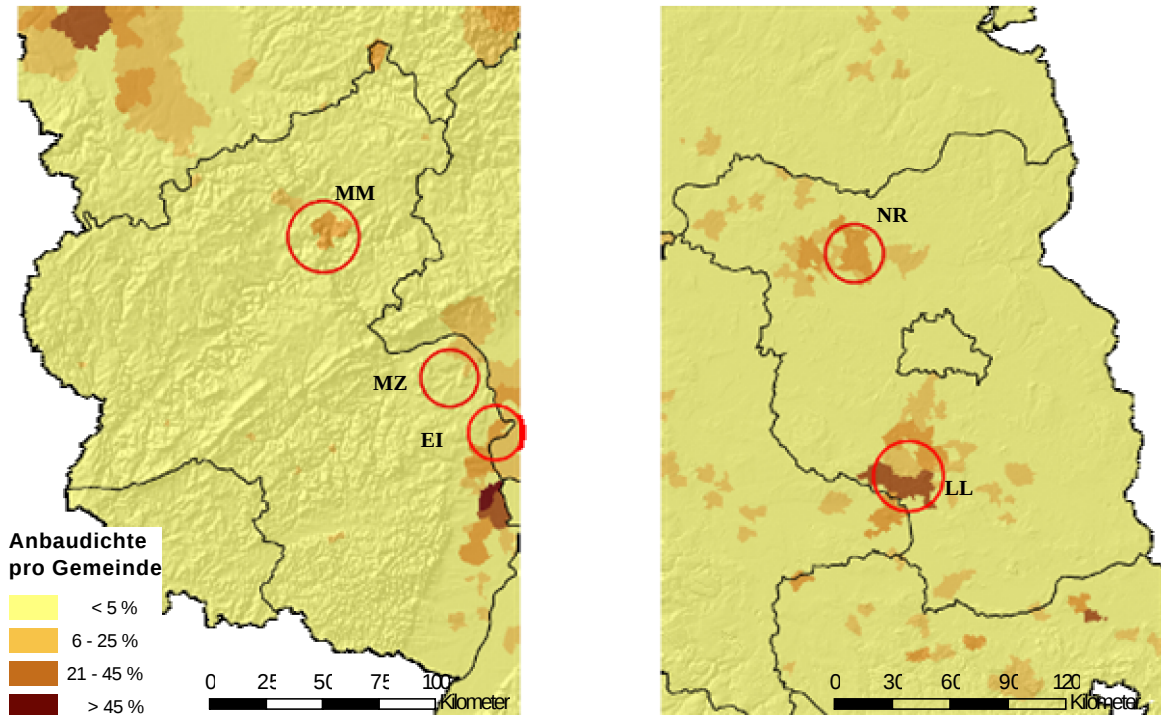


Abbildung 35: Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz (links) und in Brandenburg (rechts) 2006
(MM=Münstermaifeld, MZ =Mainz, EI=Eich, NR=Neuruppin, LL=Langenlipsdorf).

Tabelle 10: Anzahl kontrollierter Schläge im Jahr 2006 und 2007.

Bundesland	Anbauregion	Schaderreger	
		Krautfäule	Kartoffelkäfer
Rheinland-Pfalz	Mainz/Eich	11	4
	Mayen-Koblenz /Neuwied	10	3
Brandenburg	Neuruppin/Kyritz	6	3
	Langenlipsdorf	7	2
Gesamt		34	12

Die Monitoringdaten der Pflanzenschutzdienste der Bundesländer stammen aus den Jahren 2000 bis 2006. Dabei wurden 546 Schläge (Tabelle 11) bezüglich des EA von *P. infestans* und 21 Schläge (Tabelle 12) bezüglich des Entwicklungsverlaufs des Kartoffelkäfers untersucht.

Die Georeferenzierung der Daten erfolgte anhand von Gemeinde- und Schlagnamen. Dabei wurde mit Hilfe der Ackergeometrien aus ATKIS jedem Schlag eine virtuelle Wetterstation zugewiesen. Die Zuordnung erfolgte, indem in jeder Gemeinde die größte zusammenhängende Ackerfläche bestimmt wurde. Der Mittelpunkt dieser Fläche wurde als Lage des Schlages angenommen und der virtuellen Wetterstation zugewiesen. Teilweise war es auch möglich, über den Schlagnamen genauere Zuordnungen zu erreichen.

Tabelle 11: *P. infestans* Monitoringdaten der PSD der Bundesländer von 2000 bis 2006.

Erntejahr	Anzahl Schläge
2000	1
2001	76
2002	24
2003	/
2004	155
2005	110
2006	180
Gesamt	546

Tabelle 12: Kartoffelkäfer Monitoringdaten des PSD in Rheinland-Pfalz von 2000 bis 2004.

Erntejahr	Anzahl Schläge
2000	15
2001	3
2004	3
Gesamt	21

4 Ergebnisse

4.1 Regionalisierung der Interpolationszonen

Zur Interpolation der meteorologischen Parameter wurde eine naturräumliche Gliederung erstellt. Um eine Differenzierung zwischen dem klassischen Begriff der naturräumlichen Gliederung und der erstellten räumlichen Gliederung zu erreichen, soll im Folgenden nicht mehr von Landschaften im Sinne einer naturräumlichen Gliederung gesprochen werden, sondern von Interpolationszonen. Ziel war es Interpolationszonen zu finden, in denen die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit möglichst optimal durch die vorhandenen Geofaktoren beschrieben werden können. Dazu wurde in jeder Interpolationszone eine ausreichende Anzahl von Wetterstationen benötigt.

Um die minimale Anzahl an Wetterstationen in einer Interpolationszone zu bestimmen wurden Regressionsrechnungen mit Wetterdaten aus Brandenburg und Rheinland-Pfalz und unterschiedlicher Stationsanzahl durchgeführt. Dabei wurde überprüft, ob 90 % aller Bestimmtheitsmaße aller Regressionsberechnungen über 60 % lagen (Tabelle 13). Aus den Ergebnissen ergab sich, dass mindestens 8 Stationen erforderlich waren, um die Bedingungen zu erfüllen.

Tabelle 13: Anzahl an Wetterstationen für die multiple Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von über 60 %.

Anzahl der Berechnungen	Anzahl der Stationen	90% des Bestimmtheitsmaß	
		> 60 %	< 60 %
42240	2		x
42240	4		x
42240	6		x
42240	8	x	
42240	10	x	
42240	12	x	

Um den Rechenaufwand, für spätere Berechnungen schon im Voraus so gering wie möglich zu halten, wurde gemessen, wie lange die Interpolationsverfahren Kriging und Multiple Regression benötigen, um 24 Stunden bei 15 Wetterstationen zu interpolieren (Tabelle 14). Das Verfahren Kriging hat dabei eine mehr als doppelt so lange Zeit benötigt wie das Verfahren der multiplen Regression. Damit die Berechnungszeit für alle Interpolationszonen für einen Tag nicht über 30 Minuten steigt, wurde die Anzahl der Interpolationszonen auf 30 begrenzt.

Tabelle 14: Berechnungszeit für 24 Stunden mit 15 Wetterstationen und den Interpolationsmethoden Kriging und multiple Regression.

Anzahl Zonen	Berechnungszeit in Minuten	
	Kriging	Multiple Regression
1	0,56	0,25
5	4,36	2,00
10	9,18	4,60
20	18,36	8,18
30	28,00	12,30
50	46,36	20,49

4.1.1 Regionalisierung auf Basis der Boden-Klima-Regionen

Zur Definition der Interpolationszonen wurden die Boden-Klima Regionen (BKR) als Basis verwendet, da diese mittels der Kombination aus Höhen-, Klima- und Bodeneinfluss erstellt wurden. Damit aus den Boden-Klima-Regionen Interpolationenzonen werden konnten, musste eine Anpassung der Zonen an die Lage der Wetterstationen durchgeführt werden.

Zudem sollten Zonen identifiziert werden, die landwirtschaftlich irrelevant sind, um diese von der Berechnung auszuschließen. Mit Hilfe der CLC-Daten wurde die landwirtschaftliche Nutzfläche extrahiert. Anschließend wurden alle nicht landwirtschaftlichen Flächen ($> 1000 \text{ km}^2$) mit dem Eintrag „no data“ deklariert. Diese wurden dann bei weiteren Berechnungen ausgeschlossen.

Bevor die Modifikation der BKR zu Interpolationszonen durchgeführt werden konnte, wurde die Einteilung der BKR mit Hilfe der Reliefenergie kontrolliert. Das Ablaufschema der Umwandlung der BKR in Interpolationszonen ist in Abbildung 36 dargestellt.

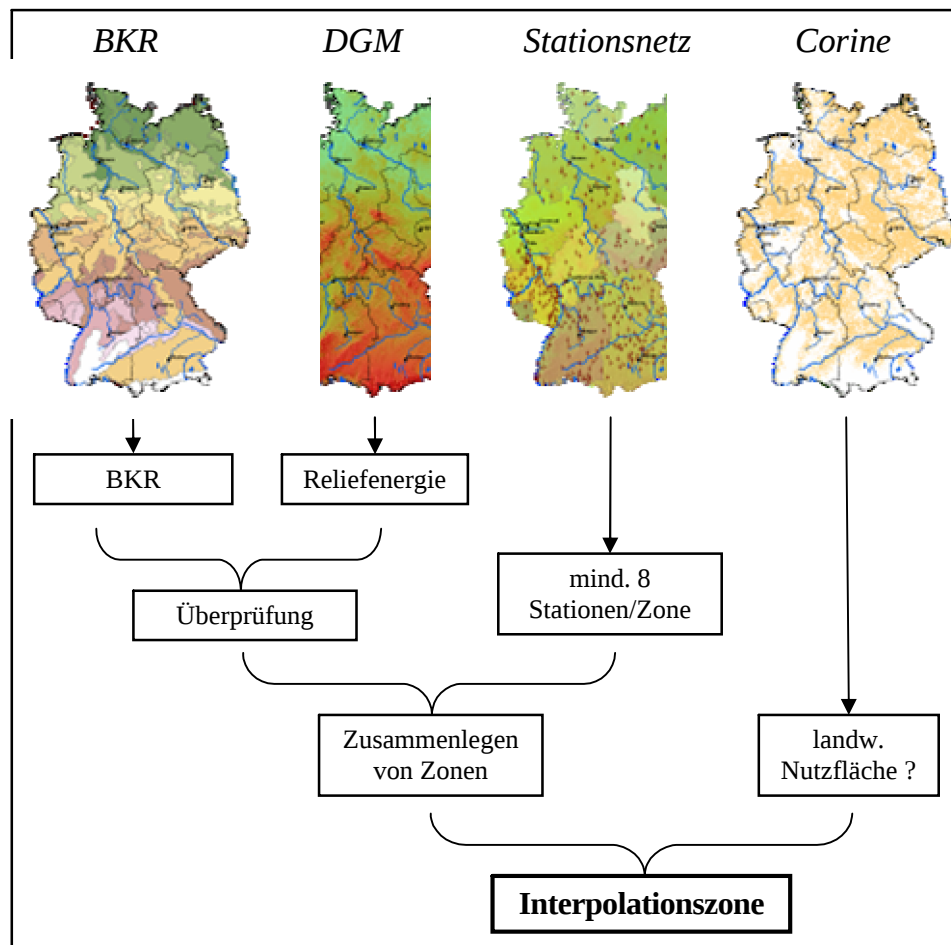


Abbildung 36: Ablaufschema zur Bildung von Interpolationszonen.

Zur Überprüfung der Abgrenzungen der BKR wurden diese mit der Reliefenergie verschnitten und überprüft in wie weit benachbarte Reliefenergieklassen durch die Grenzen der BKR zerschnitten werden (Abbildung 37). Dabei wurde aus jeder einzelnen BKR der Mittelwert, das Maximum und das Minimum der Reliefenergie berechnet (Tabelle 15).

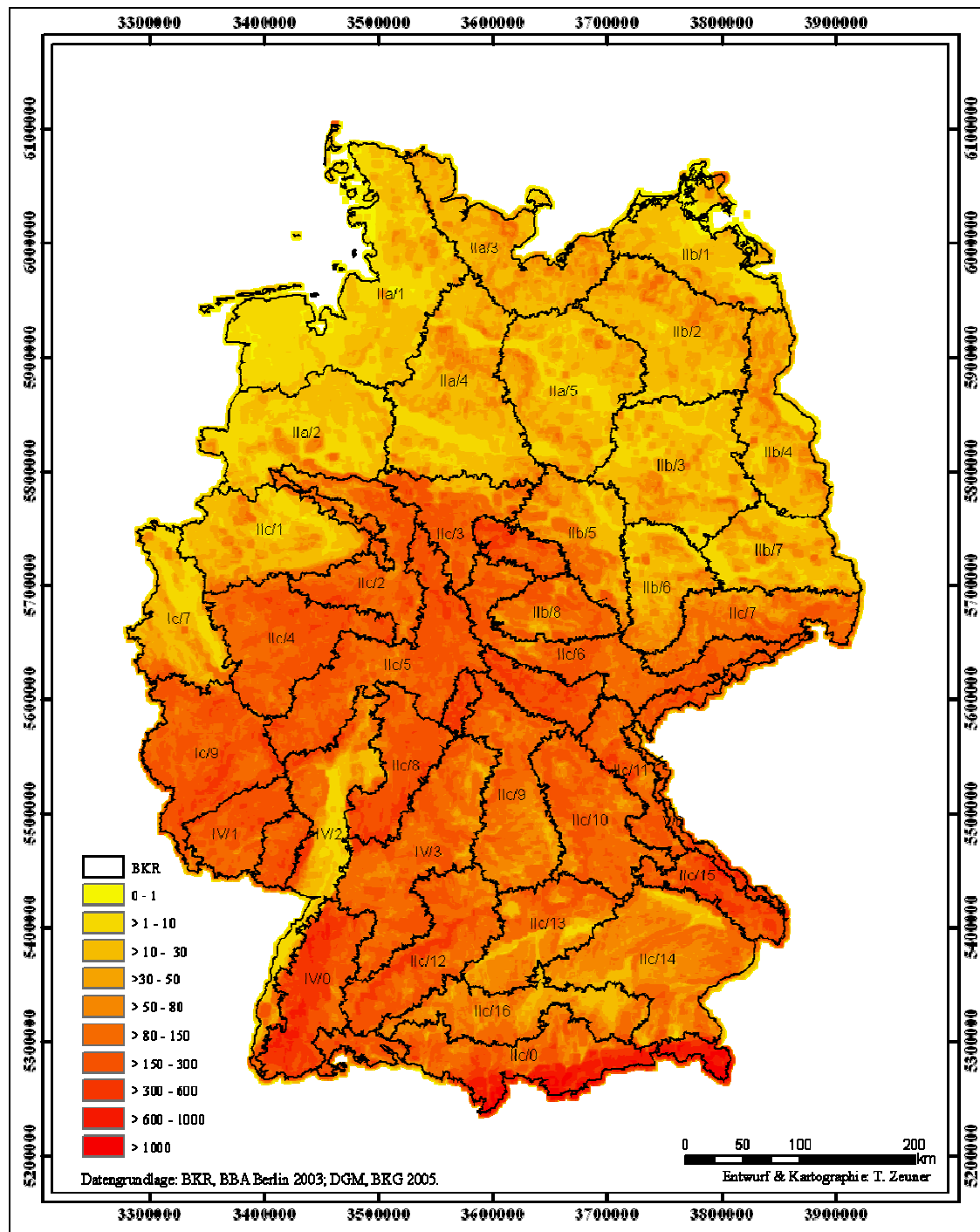


Abbildung 37: Reliefenergieklassen [$\text{m}/4,41\text{km}^2$] verschnitten mit den BKR.

Das Ergebnis zeigt, dass die BKR sich an die Struktur der Reliefenergieklassen anpassen. Dabei fielen die Boden-Klima-Regionen IIb/5 und IV/2 durch einen niedrigen Mittelwert bei hohem Maximum auf. Bei der Betrachtung von Abbildung 37 wird deutlich, dass in beiden Regionen Reliefenergien über sieben Klassen vorkamen. Um diese Regionen zu homogenisieren, wurde versucht durch Teilen und Zusammenlegen mit einer Nachbarzone homogene Regionen zu erzeugen.

Tabelle 15: Mittelwert, Maximum und Minimum der Reliefenergie in den einzelnen Boden-Klima-Regionen

Boden-Klima-Region	BKR Nr.	Reliefenergie [m/4,41 km ²]		
		Mittelwert	Maximum	Minimum
Nord- und Ostfriesisches Küstenland	IIa/1	13	223	0
Ostholsteiner-Mecklenburger Küstenland	IIa/3	35	115	1
Pommersches Küstenland	IIb/1	21	174	0
Mecklenburger Wald- und Seenlandschaft	IIb/2	31	106	0
Lüneburger Heidedlandschaft	IIa/4	28	289	1
Altmark-Wendland-Prignitz	IIa/5	25	103	0
Ostbrandenburger Platten	IIb/4	34	147	1
Niedersächsische Ebene	IIa/2	20	199	1
Westbrandenburger Ebenen	IIb/3	24	100	1
Anhaltinische Löß-Ebenen	IIb/5	56	456	2
Detmolder-Waldecker Hügelland	IIc/2	144	420	6
Hildesheimer Ackerland	IIc/3	131	474	6
Teutoburger Wald	IIc/0	115	248	7
Münsterland	IIc/1	34	261	0
Südbrandenburgische Niederungen	IIb/7	27	178	1
Harz	IIc/0	217	646	43
Leipziger Ackerland	IIb/6	38	159	1
Kölner Bucht	Ic/7	38	295	1
Hessisches Hügelland	IIc/5	178	535	23
Thüringer Hügelland	IIc/6	147	409	19
Thüringer Becken	IIb/8	115	296	8
Sauerland	IIc/4	170	386	9
Sächsisches Hügelland	IIc/7	101	362	8
Thüringer Wald	IIc/0	235	477	35
Erzgebirge	IIc/0	213	430	66
Rhön	IIc/0	296	534	87
Mittelfränkisches Hügelland	IIc/9	107	404	13
Eifel-Hunsrück	Ic/9	193	544	17
Unterfränkisches Hügelland	IIc/8	214	440	4
Oberes Rheintal	IV/2	86	809	1
Oberpfalz	IIc/11	158	433	21
Böhmerwald	V/0	273	687	24
Oberfränkisches Hügelland	IIc/10	133	433	16
Main-Neckar-Senke	IV/3	132	445	2
Pfälzer Bergland	IV/1	178	442	31
Pfälzer Wald	IV/0	198	451	31
Bayerischer Wald	IIc/15	268	748	31
Schwäbische Alb	IIc/12	265	491	7
Schwäbisches Hügelland	IIc/13	85	240	3
Niederbayerisches Hügelland	IIc/14	79	236	1
Schwarzwald	IV/0	322	936	3
Oberbayerisches Hügelland	IIc/16	72	379	12
Alpenvorland	IIc/0	417	1918	11

Bei der Region IIb/5 Anhaltinische Löß-Ebene war ein Teilen bzw. Zusammenlegen mit einer Nachbarzone nicht möglich. Dies lag daran, dass die Reliefenergien größer 200 m/4,41 km² zu den Ausläufern des Harzes gehören. Da dieser zu „no data“ erklärt wurde, und nicht

genügend Wetterstationen für eine eigene Zone vorhanden waren, wurde die Region IIb/5 in ihrer Geometrie belassen.

Die Boden-Klima-Region IV/2 Oberes Rheintal konnte zweimal geteilt werden. Der nordöstliche Teil wurde mit der Region IV/1 zusammengefasst und der nördliche Teil der Region IIC/5 angehängt (Abbildung 38). Die anschließende Neuberechnung des Mittelwertes, des Maximums und des Minimums dieser Region ergab 52, 308 und 1 m/4,41 km².

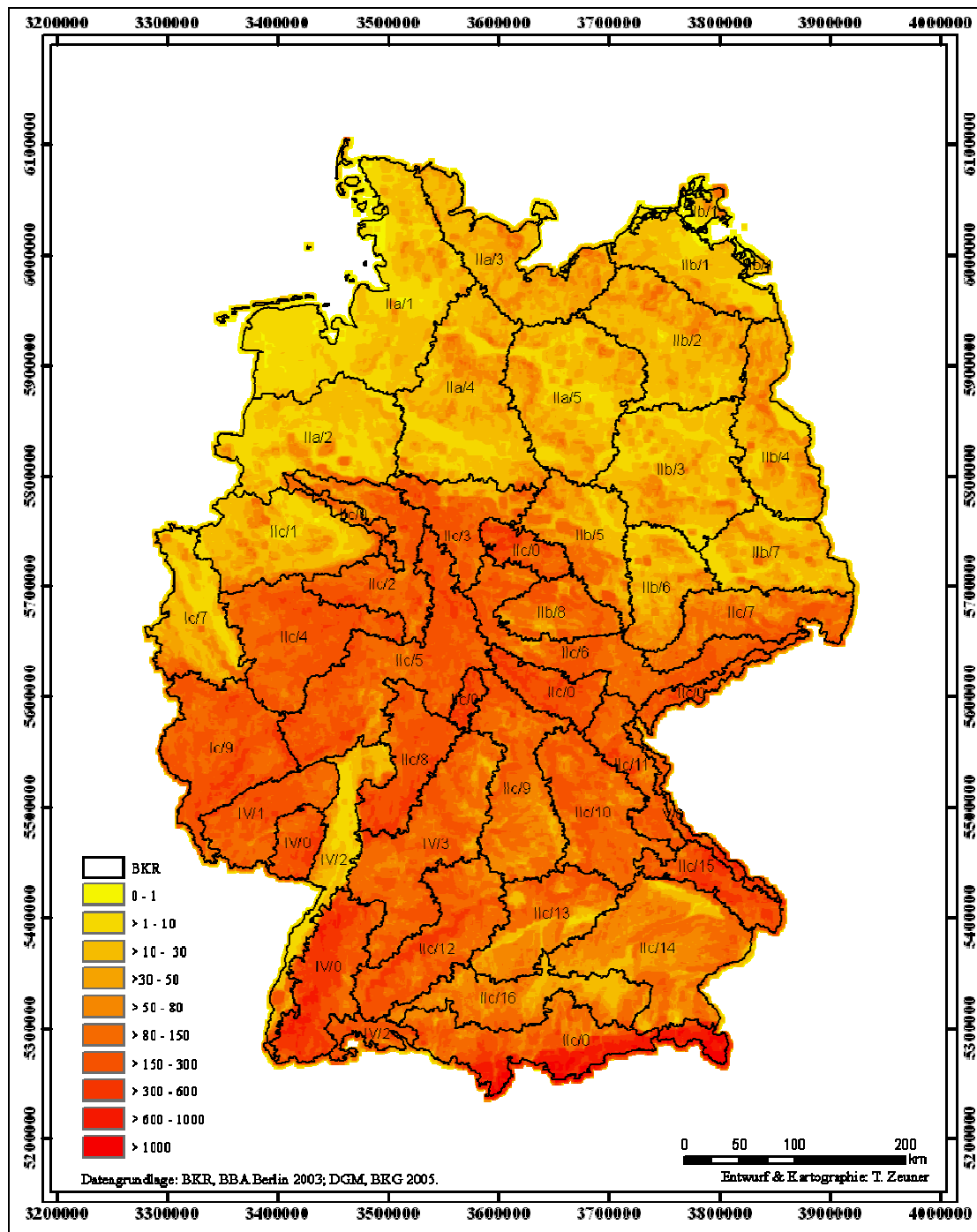


Abbildung 38: Korrigierte Boden-Klima-Regionen nach der Reliefenergie [m/4,41 km²].

In einem nächsten Schritt wurden die BKR an die Lage der Wetterstationen angepasst. Hierzu wurden die kleinsten Nachbarzonen solange zusammengelegt, bis sich mindestens die acht geforderten Wetterstationen in einer Interpolationszone befanden. Es zeigte sich jedoch, dass diese schematische Vorgehensweise nicht ausreichend war. Da teilweise mit diesen Zonen keine 60 % Erklärungswahrscheinlichkeit erreicht werden konnte. Dies lag daran, dass bei der Zusammenlegung wieder Zonen entstanden, die mehr als sieben Reliefenergieklassen beinhalteten und deshalb nicht plausibel zu interpolieren waren.

Deshalb wurde entschieden ein manuelles Verfahren anzuwenden, bei dem darauf geachtet wurde, dass nur die Interpolationszonen zusammengelegt wurden, die nicht mehr als zwei unterschiedliche Reliefenergieklassen und ausreichend Wetterstationen enthielten (Abbildung 39).

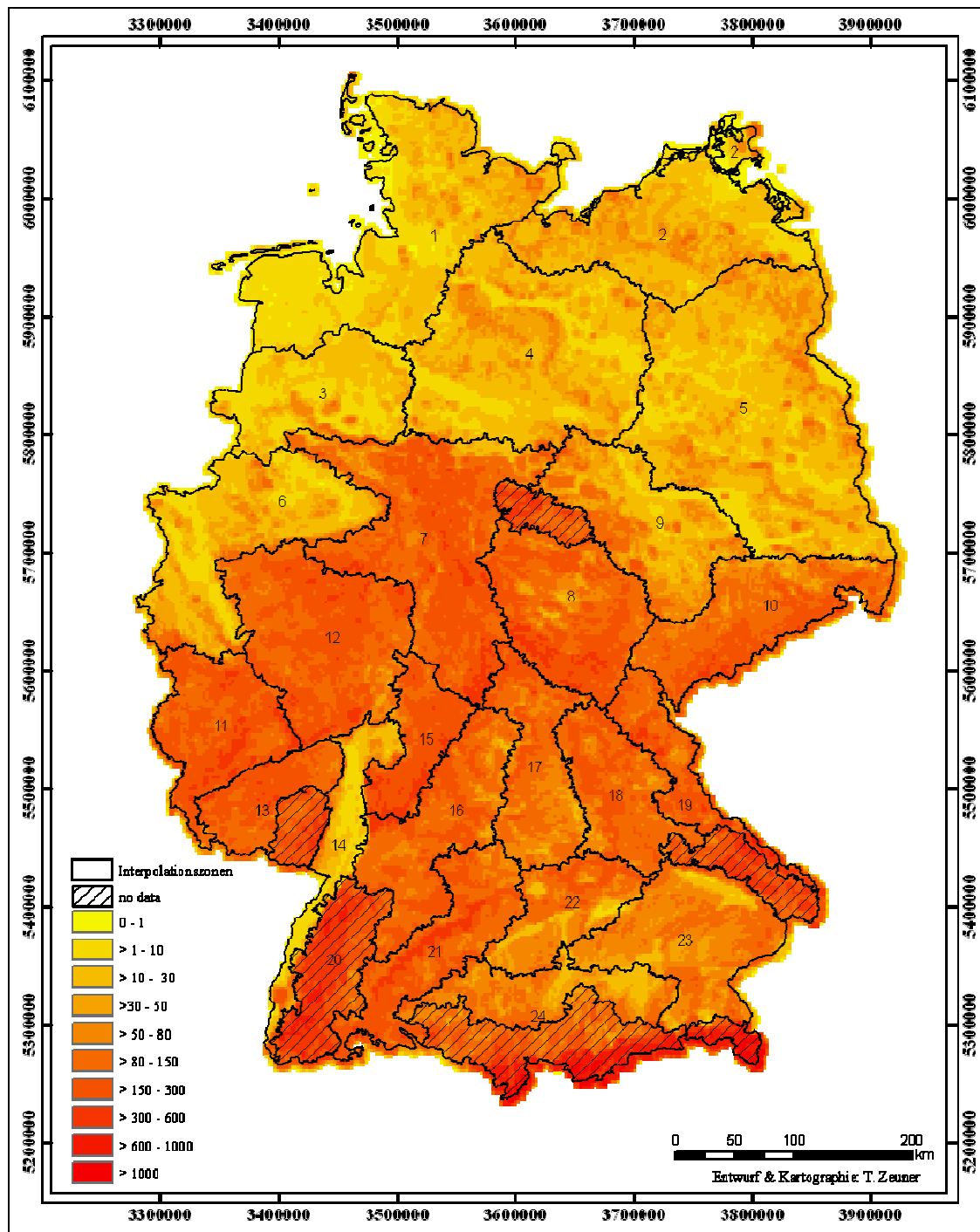


Abbildung 39: Karte der Interpolationszonen von Deutschland.

In Brandenburg wurden aufgrund der geringen Anzahl an Wetterstationen die BKR-Regionen IIb/3, IIb/4, IIb/7 (siehe Kapitel 3.4 Boden-Klima-Regionen) zusammengefasst. Die Regionen IIb/2, IIa/5 wurden an der Landesgrenze von Brandenburg geteilt und ebenfalls der Interpolationszone 5 zugeordnet. Daraus ergab sich für Brandenburg eine einzige Interpolationszone mit insgesamt 14 Messstationen. Eine Teilung in mehrere Zonen war aufgrund der geringen Anzahl der Stationen nicht möglich.

In Rheinland-Pfalz ergaben sich dagegen vier Interpolationszonen. Durch die hohe Reliefenergie der Mittelgebirge sind deutlich kleinere Interpolationszonen als in Brandenburg entstanden. In Rheinland-Pfalz stehen wesentlich mehr Wetterstationen zur Verfügung. Die Zonen passen sich der in Kapitel 2.3 (Untersuchungsgebiete) vorgestellten Landschaftsgliederung an. Zone 11 beschreibt den Hunsrück und die Eifel mit ca. 30 Wetterstationen. Diese wird im Osten durch den Rhein und im Süden durch die Nahe begrenzt. Östlich des Rheins schließt sich Zone 12 an, die sowohl das Neuwieder Becken als auch den Westerwald abdeckt. Im Süden wird Zone 14 durch den Grabenbruch des Rheins und Rheinhessen gebildet. Diese Zone zieht sich bis in das Maintal hinein. Die letzte Zone, Zone 13, liegt südwestlich in Rheinland-Pfalz und beschreibt ein Gebiet südlich der Nahe und westlich der oberrheinischen Tiefebene (Abbildung 39).

4.1.2 Regionalisierung in Interpolationskreise

Da das Stationsnetz der beschränkende Faktor für die Anwendung und die Güte der Interpolationsverfahren ist, wurde ein zweiter Ansatz zur Erstellung von Interpolationszonen erarbeitet. Dabei wurde nicht auf die Eigenschaften des Geländes geachtet, sondern die Anzahl und Verteilung der Wetterstationen war zonenbildend. Ziel war es, Zonen zu finden, in denen das Stationsnetz optimal und in denen die Stationen so häufig wie möglich für eine Interpolation verwendet werden konnten. Dabei musste die Forderung nach mindestens acht Stationen pro Zone innerhalb von Deutschland eingehalten werden. Als geeignete Geometrie für diese Einteilung erwies sich die Kreisform. Da bei Kreisen, im Gegensatz zu Quadraten oder Rechtecken, es durch kleine Überschneidungsbereiche zu einer optimalen Flächenausnutzung kommt und Wetterstationen in unterschiedlichen Kreisen teilweise mehrfach verwendet werden können. Deshalb wird im Folgenden zwischen Interpolationszonen und Interpolationskreisen unterschieden.

Bei der Erstellung der Kreise wurde darauf geachtet, dass die gesamte Fläche Deutschlands durch Kreise abgedeckt wurde und keine Lücken entstanden. Zudem wurden die Kreismittelpunkte vertikal versetzt, um die Anzahl der Kreise so gering wie möglich zu halten (Abbildung 40).

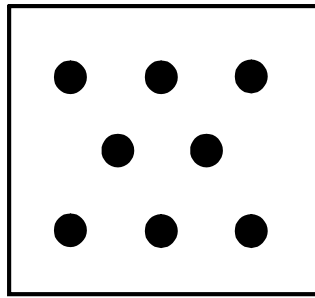


Abbildung 40: Bildung von vertikal versetzten Kreismittelpunkten.

Für diese Arbeiten diente das Hawth's Analysis Tools (Version 3.26) für ArcGIS 9.1. Zunächst wurde mit der „Generate Regular Point“ Funktion eine Vektordatei mit Punktgeometrie erzeugt. Anschließend wurde aus dem Punktvektor mit Hilfe der Bufferfunktion von ArcGIS 9.1 ein Polygonvektor in Kreisform berechnet. Um den Abstand der Kreismittelpunkte und den Radius der Kreise zu ermitteln, wurden verschiedene Kombinationen getestet (Tabelle 16).

Tabelle 16: Ermittlung des Kreismittelpunktes und des –radius.

Abstand der Kreismittelpunkte [km]	Kreisradius [km]	Fläche von D abgedeckt?	mind. 8 Stationen eingehalten?	Anzahl der Kreise
50	50	ja	nein	198
50	60	ja	nein	198
50	70	ja	ja	198
50	80	ja	ja	198
100	50	nein	nein	47
100	60	nein	nein	47
100	70	ja	ja	47
100	80	ja	ja	47
150	50	nein	nein	26
150	60	nein	nein	26
150	70	nein	ja	26
150	80	nein	ja	26

Dabei zeigte sich, dass ein Abstand der Kreismittelpunkte vom 100 km bei einem Radius von 70 km geeignet war. Der vertikale Versatz der Kreise betrug dabei 35 km. Mit dieser Kombination war es möglich, die gesamte Fläche von Deutschland mit Kreisen abzudecken. Aufgrund der geometrischen Anordnung wurden die geforderten Schnittbereiche bei allen Kreisen eingehalten. Insgesamt neun Kreise (1, 2, 3, 7, 8, 13, 14, 19 und 20) konnten die geforderte Zahl von acht Stationen nicht erreichen. Dabei lagen alle diese Kreise an der Außengrenze von Deutschland. 90 % dieser Kreise hatten dabei einen größeren Flächenanteil im Ausland als in Deutschland. Mit einer Anzahl von 47 Kreisen konnten die

Interpolationskreise die Forderung nach maximal 30 Zonen bzw. Kreisen zur Reduzierung des Rechenaufwandes nicht erfüllen.

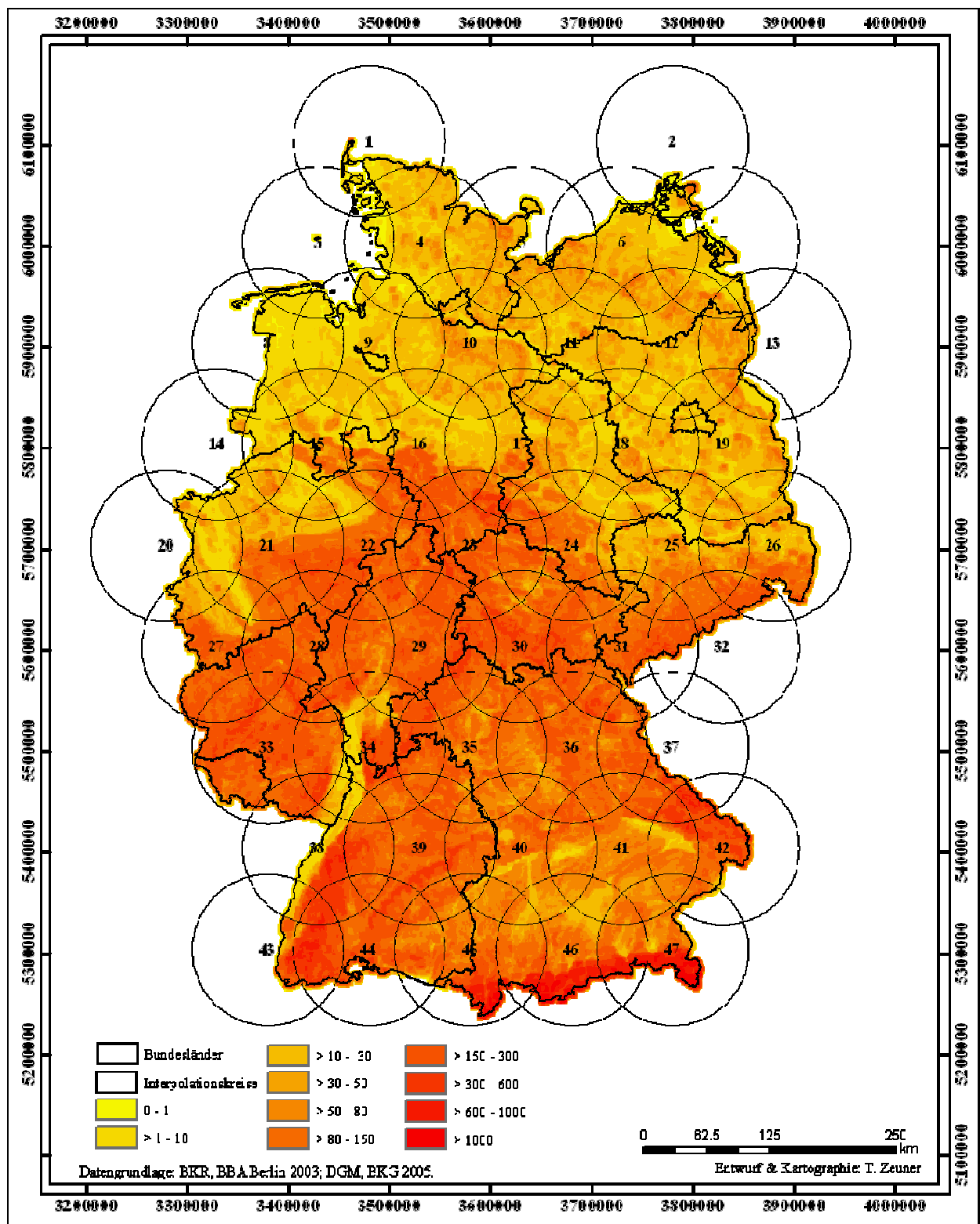


Abbildung 41: Karte der Interpolationskreise mit der Reliefenergie [$\text{m}/4,41 \text{ km}^2$] für Deutschland.

4.1.3 Zusammenführung von Interpolationszonen und Interpolationskreisen

In einem dritten Ansatz, wurde die Synthese aus Interpolationszonen bzw. –kreisen zur Erstellung von homogenen Interpolationszonen verwendet. Dabei sollten die Vorzüge beider Lösungen extrahiert werden, um diese zu vereinigen.

Die Interpolationszonen wurden nach naturräumlichen Kriterien erstellt. Dass heißt, die Zonen sind homogen, was eine Interpolation und die Interpretation der Ergebnisse erleichtert. Die Abgrenzung der einzelnen Zonen erfolgt durch Grenzlinien. Hierdurch ist eine mehrfache Verwendung der Wetterstationen nicht möglich.

Durch die Bildung von Interpolationskreisen sollte eine mehrfache Verwendung der Wetterstationen ermöglicht werden. In den Überlappungsbereichen der Kreise konnte erreicht werden, dass die Wetterstationen bis zu vier Mal in unterschiedlichen Kreisen verwendet werden können. Durch Mittelwertbildung in den Überlappungsbereichen der Kreise entsteht ein Spline-Effekt, wodurch es zu einem fließenden Übergang zwischen den Kreisen kommt.

Bei der Betrachtung der jeweiligen Vor- und Nachteile beider Gliederungsansätze wurden die jeweiligen Vorteile zusammengefügt um damit die Nachteile zu minimieren. Hierzu waren Überschneidungsbereiche für die Interpolationszonen zu berechnen. Alle Wetterstationen, die sich in einem solchen Überschneidungsbereich (Buffer) befinden, werden von beiden benachbarten Zonen für die Interpolationsberechnung verwendet. Der Schnittbereich wurde nach folgenden Kriterien festgelegt. Schneidet die Grenzlinie einer Interpolationszone einen Bereich mit einer Reliefenergie von weniger als $100 \text{ m}/4,41 \text{ km}^2$ dann wird ein Buffer von zehn Kilometern angelegt. Übersteigt die Reliefenergie einen Wert von $100 \text{ m}/4,41 \text{ km}^2$, ist also mit stärkerem Geländeeinfluss zu rechnen, so wurde ein Überschneidungsbereich von fünf Kilometern berechnet. Für Brandenburg wurden zehn Kilometer Buffer und für Rheinland-Pfalz fünf Kilometer Buffer berechnet. Abbildung 42 und Abbildung 43 zeigen eine Karte von Brandenburg bzw. Rheinland-Pfalz mit den Interpolationszonen. Durch die Bufferzonen ist erkennbar, welche Wetterstationen mehrfach benutzt werden können. Für die Interpolationsberechnungen wurde dieser Ansatz verwendet.

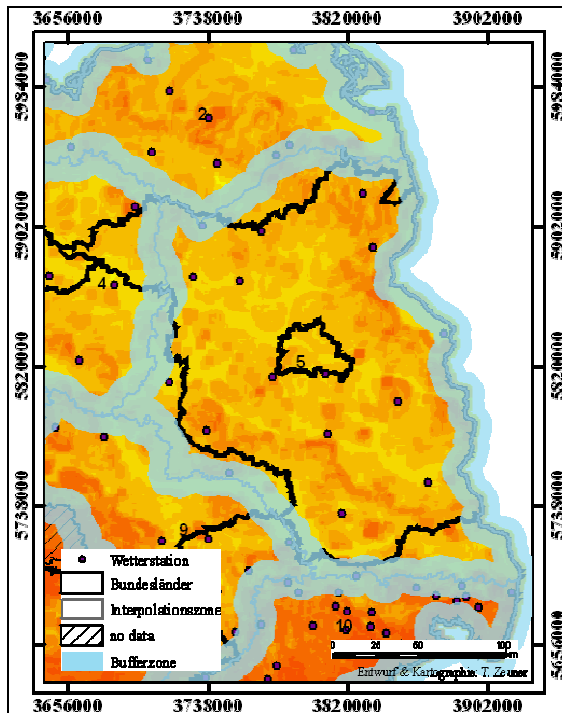


Abbildung 42: Interpolationszone mit Buffer für Brandenburg.

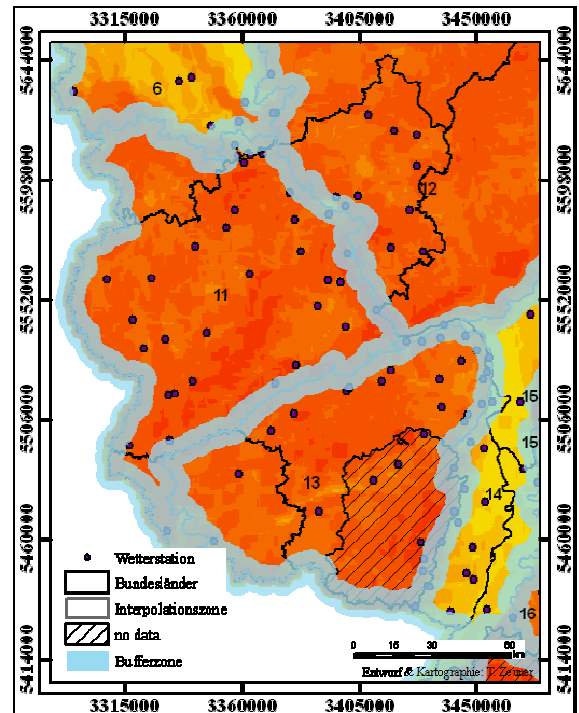


Abbildung 43: Interpolationszonen mit Buffer für Rheinland-Pfalz.

4.2 Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte

Für die Berechnung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte wurden sowohl deterministische als auch geostatistischen Interpolationsverfahren verwendet. (IDW, Spline, Kriging (K) und Multiple Regressionen (MR)). Zur Überprüfung der Verfahren wurden die Interpolationszonen 5 in Brandenburg, sowie 12 und 14 in Rheinland-Pfalz verwendet (Abbildung 40). Die Temperatur und die relative Luftfeuchte wurden für den Zeitraum vom 1. Januar bis zum 31. August der Jahre 2003 bis 2006 interpoliert. Dabei wurden die Monate April, Mai, Juni und Juli gesondert betrachtet, da diese Monate ausschlaggebend für das Schaderregerauftreten an der Kartoffelpflanze sind.

Zur Überprüfung der Verfahren wurden in jeder Zone nacheinander unterschiedliche Stationen von der Interpolationsberechnung ausgeschlossen, um dann die gemessenen Werte dieser Stationen mit den interpolierten Werten zu vergleichen. In Brandenburg waren dies die Stationen Cottbus, Grünow, Neuruppin, Kyritz und Baruth. In Rheinland-Pfalz wurden aus der Zone 11 die Stationen Dreis, Mendig, Riol und Wahlbach und aus der Zone 14 Eich, Mainz, Lustadt und Schifferstadt nacheinander ausgeschlossen. Bei der Wahl der Interpolationszonen in Rheinland-Pfalz wurde darauf geachtet, dass eine Zone mit geringer und eine Zone mit hoher mittlerer Reliefenergie (Tabelle 15) gewählt wurde. Zur Darstellung der Ergebnisse wurden exemplarisch zwei Stationen, Cottbus aus Brandenburg und Eich aus Rheinland-Pfalz, ausgewählt.

4.2.1 Verworfenen Interpolationsverfahren

Bei den Interpolationsberechnungen zeigte sich, welche Verfahren näher betrachtet und getestet werden sollten, da mit ihnen plausible Ergebnisse erreicht werden konnten, und welche Verfahren sich nicht eignen, um die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchte zu interpolieren. In Tabelle 17 wurden die Ergebnisse der Berechnungen zusammengestellt. Zu sehen ist der Mittelwert, das Maximum und das Minimum beider Parameter für die jeweiligen Interpolationsverfahren. Diese Werte wurden als Mittelwert aus den Ergebnissen aller weggelassenen Stationen gebildet. Zudem wurde bei jeder Auswertung die Standardabweichung berechnet.

Dabei war zu erkennen, dass sich die deterministischen Verfahren IDW und Spline deutlich von den geostatistischen Verfahren unterschieden. Sowohl bei der Temperatur als auch bei der relativen Luftfeuchte waren die Mittelwerte aller Verfahren fast gleich. Anhand der Standardabweichung des Mittelwertes war zu erkennen, dass der Streuungsbereich der Verfahren IDW und Spline größer war als bei K oder MR. IDW und Spline hatten

Standardabweichungen zwischen 0,6 und 0,9 °C bzw. 2,8 und 6,1 % relativer Luftfeuchte. Bei der Temperatur blieben bei K und MR die Werte der Standardabweichung um 0,3 °C darunter. Bei der relativen Luftfeuchte war die Standardabweichung von K und MR um etwa 1,5 % niedriger.

Beim Maximum und beim Minimum kamen die Unterschiede zwischen den Ergebnissen der Verfahren noch deutlicher zum Vorschein. Bei IDW und Spline wurde ein Maximum bei der Temperatur von 7,3 bis 10,6 °C und ein Minimum von -4,3 bis -9,5 °C ermittelt. Bei K und MR blieben die Werte wieder darunter. Das Maximum überschritt im Mittel den Wert von 5,6 °C nie und beim Minimum wurde im Mittel -4,5 °C als niedrigster Wert ermittelt. Auch bei der Standardabweichung erzielten IDW und Spline um etwa 0,8 °C höhere Werte.

Beim Maximum und Minimum der relativen Luftfeuchte konnten in Tabelle 17 analoge Ergebnisse zu der Temperatur beobachtet werden. Bei K und MR konnte, außer im Jahr 2004, keine Abweichung größer als $\pm 32,8$ % relative Luftfeuchte ermittelt werden. Bei den Verfahren IDW und Spline traten jedoch immer deutlich höhere Werte von bis zu 44,8 bzw. -45,5 % relativer Luftfeuchte auf. Bei der Standardabweichung konnte ein ähnliches Verhalten, wie bei der Temperatur beobachtet werden.

Aus den gezeigten Ergebnissen ergab sich, dass die Verfahren IDW und Spline in den Interpolationszonen 5, 11 und 12 im Vergleich zu den Verfahren K und MR weniger geeignet waren, um die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit zu interpolieren. Im Folgenden wurden nun die Verfahren K und MR detailliert untersucht, um das geeignetste Verfahren zur Interpolation zu finden.

Tabelle 17: Mittelwert, Maximum und Minimum der Verfahren IDW, Spline, Kriging und multiple Regression von 2003 bis 2006.

Jahre	Parameter	2003	2004	2005	2006	2003	2004	2005	2006
		T [°C]				RF [%]			
IDW	Mittelwert	0.1	0.3	0.2	0.4	0.5	-0.2	0.1	-0.7
	STW Mittelwert	0.6	0.6	0.7	0.7	4.3	4.0	2.8	3.3
	Maximum	8.5	10.6	7.9	8.1	31.8	33.8	26.2	26.4
	STW Maximum	1.5	4.3	1.3	1.7	8.3	12.4	7.0	9.3
	Minimum	-7.2	-4.3	-7.5	-7.5	-35.6	-36.7	-29.7	-27.7
	STW Minimum	1.5	2.0	1.7	2.1	9.0	14.5	8.0	14.9
Spline	Mittelwert	0.0	0.1	0.1	0.2	0.8	-1.3	1.0	2.6
	STW Mittelwert	0.6	0.8	0.5	0.9	5.4	5.8	4.9	6.1
	Maximum	7.4	8.8	7.3	8.5	35.8	44.8	32.3	43.7
	STW Maximum	3.2	3.2	2.3	3.8	11.5	15.9	25.0	12.1
	Minimum	-6.6	-9.5	-7.7	-8.9	-37.3	-45.5	-37.2	-39.2
	STW Minimum	5.9	5.6	4.4	4.6	13.4	15.8	13.1	12.2
Kriging	Mittelwert	0.0	0.0	0.1	0.2	0.7	0.2	0.4	-0.7
	STW Mittelwert	0.5	0.5	0.6	0.6	3.2	3.4	2.3	2.7
	Maximum	5.6	4.4	5.0	5.2	23.5	22.3	23.5	22.6
	STW Maximum	1.4	0.9	0.9	1.7	7.5	5.0	5.1	8.5
	Minimum	-4.4	-3.9	-4.5	-4.1	-25.7	-22.3	-26.2	-27.5
	STW Minimum	1.2	2.4	1.8	2.6	6.1	15.6	9.3	5.0
MR	Mittelwert	0.0	0.0	0.0	0.1	0.3	0.1	0.1	-0.6
	STW Mittelwert	0.2	0.3	0.3	0.3	2.0	2.2	1.6	1.6
	Maximum	4.4	4.1	4.9	4.7	19.6	32.6	21.6	21.2
	STW Maximum	0.7	0.9	0.9	0.8	4.4	16.8	5.2	6.2
	Minimum	-3.8	-4.5	-4.5	-4.1	-18.9	-21.9	-22.8	-22.8
	STW Minimum	0.9	0.7	1.5	0.7	11.5	7.0	5.5	5.4

4.2.2 Kriging

4.2.2.1 Temperaturinterpolation mit K in Brandenburg

Die Interpolation der Temperatur mit dem Krigingverfahren wurde mit der ArcGIS-Erweiterung der Geodateninfrastruktur durchgeführt. Zunächst wurden die gemessenen und berechneten Temperaturen durch lineare Regression auf Signifikanz überprüft. Das Bestimmtheitsmaß für die Station Cottbus hatte einen Wert von 99,25 % (Abbildung 44). Die Steigung der Regressionsgeraden betrug 0,98. K hat sich als geeignetes Verfahren herausgestellt.

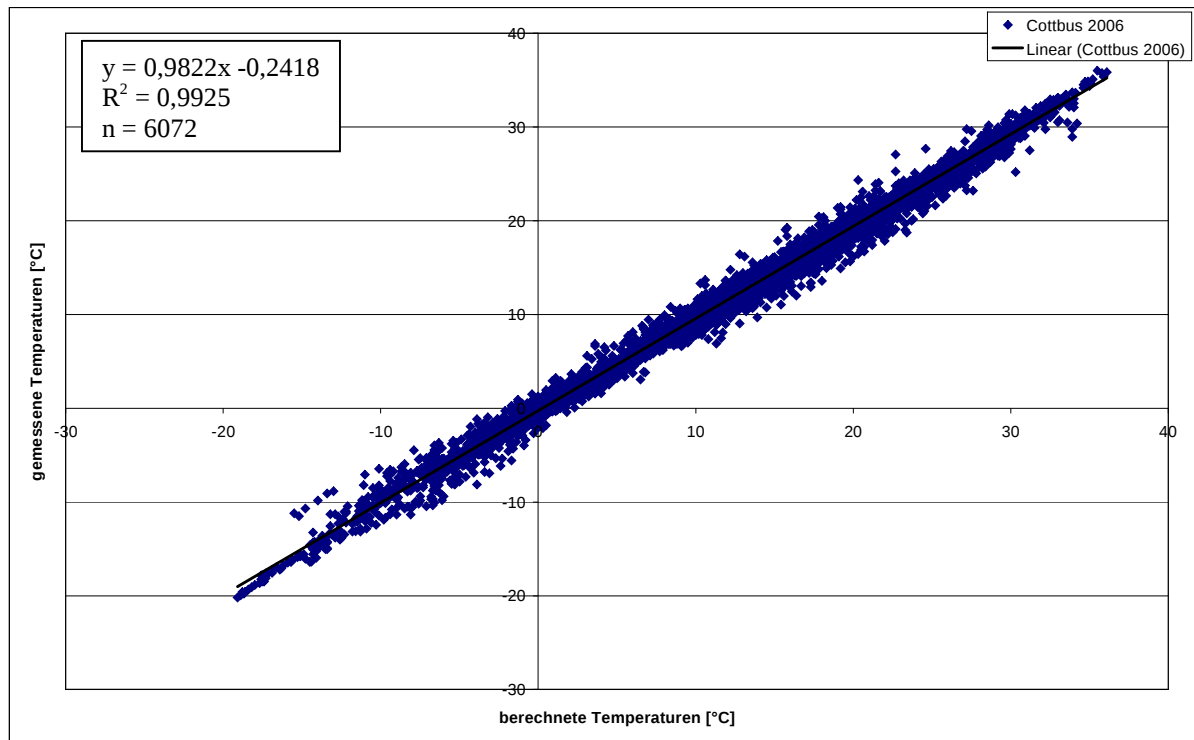


Abbildung 44: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Cottbus 2006 mit dem K-Verfahren.

Zur Analyse der Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten wurden Box-Whisker-Plots (Boxplot) verwendet. Aus dem Boxplot konnten die Streuung, das arithmetische Mittel und zwei Quartile abgelesen werden. Die Grenzen der Whisker wurde auf 99 % aller beobachteten Werte festgelegt. Abbildung 45 zeigt das Ergebnis des Boxplots der Station Cottbus in Brandenburg von 2003 bis 2005. Das Minimum des ersten Quartils aller Jahre lag bei $-0,86\text{ °C}$ und das Maximum des dritten Quartils bei $0,38\text{ °C}$. Somit ist eine leichte Unterschätzung bei 50 % aller Werte zu erkennen. Die Mittelwerte der einzelnen Jahre lagen mit $-0,2$ bis $-0,4\text{ °C}$ knapp unter 0 Grad. Bei einer Messungenauigkeit der Messfühler von bis zu $0,4\text{ °C}$ war diese Abweichung im Toleranzbereich. Die Amplitude des oberen und unteren Whiskers lagen in einem Bereich zwischen $-2,6\text{ °C}$ und $2,3\text{ °C}$. Es wurden auch einige Ausreißerwerte festgestellt. Diese erreichen im Maximum eine Abweichung von etwa $4,3\text{ °C}$ vom Mittelwert der Verteilung. Die Ergebnisse der einzelnen Jahre unterschieden sich nur geringfügig. Festgestellt werden konnte, dass die Amplitude der Abweichungen von 2003 bis 2006 leicht abnimmt.

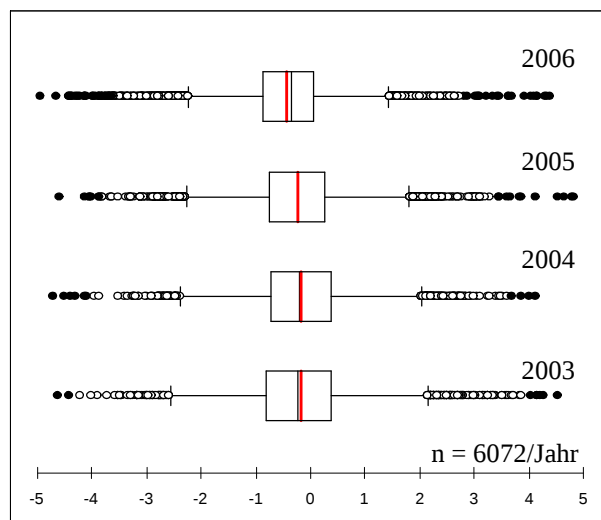


Abbildung 45: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Bei der Betrachtung der Monate April bis Juli setzte sich die festgestellte Tendenz fort. Die leichte Unterschätzung des Mittelwertes und Quartile liegen in den Monaten April und Mai im Mittel bei $-0,4$ bis $-0,6$ °C (Abbildung 46 und Abbildung 47). In den Monaten Juni und Juli liegt die mittlere Unterschätzung bei $-0,1$ bis $-0,4$ °C (Abbildung 48 und Abbildung 49). Die absoluten Abweichungen aller vier Monate lagen zwischen dem oberen und unterm Whisker bei -3 bis $2,4$ °C. Die Ausreißerwerte der einzelnen Monate lagen bei einem Maximum von $5,6$ °C. Auffallend war nur, dass die Ausreißer meistens erst bei Temperaturen über 30 °C festgestellt wurden.

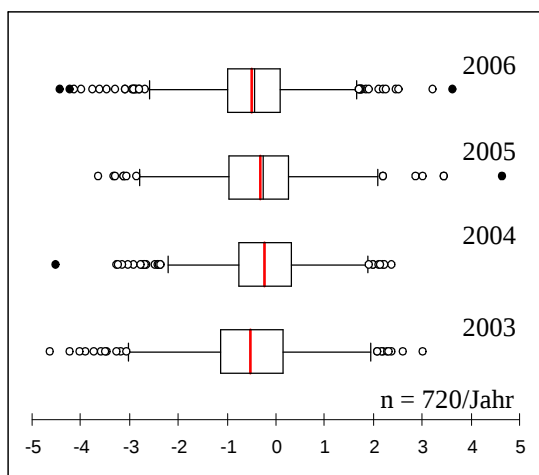


Abbildung 46: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

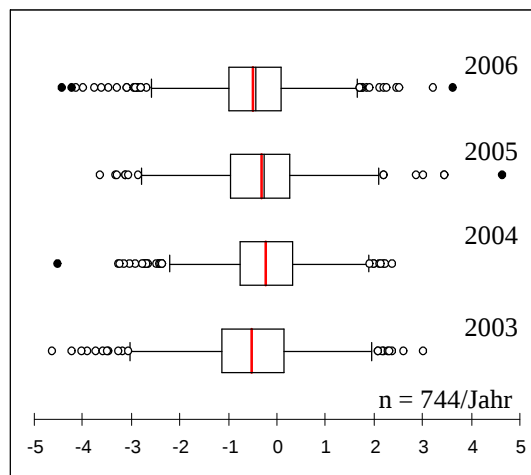


Abbildung 47: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

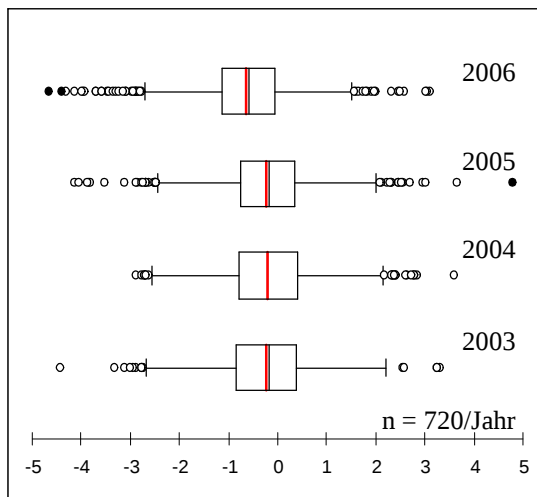


Abbildung 48: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

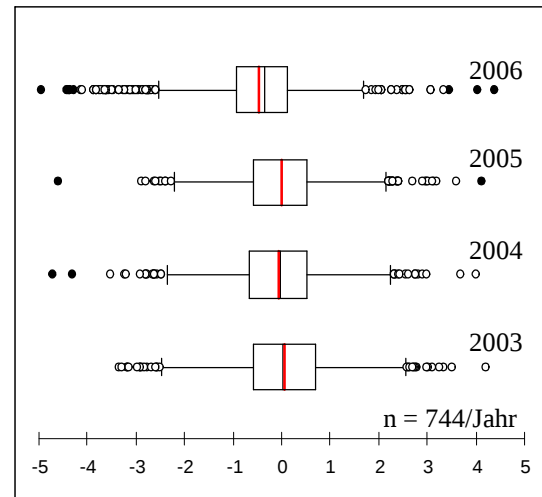


Abbildung 49: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Tabelle 18a und b zeigt eine Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse aller von der Interpolation ausgeschlossenen Stationen. Das Bestimmtheitsmaß lag dabei immer zwischen 96 und 98 %. Beim Mittelwert traten sowohl Über- als auch Unterschätzungen auf. Die maximale mittlere Abweichung lag bei der Station Baruth 2006 bei 0,6 °C. Die maximale und minimale Abweichung zum gemessenen Wert lag bei 8,1 und -7,4 °C, wobei es sich dabei aufgrund des niedrigen Mittelwertes um Ausreißerwerte handelt.

Tabelle 18a: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem K-Verfahren in Brandenburg.

Jahre	Station	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt	Mittelwert	Maximum	Minimum
2003	Baruth	96.91	1.053	-1.260	0.4	8.1	-4.4
	Cottbus	98.00	0.979	-0.957	-0.1	4.5	-4.7
	Grünow	98.43	0.979	0.077	0.2	4.6	-4.6
	Kyritz	98.10	1.000	0.100	-0.2	6.3	-4.0
	Neuruppin	98.05	0.963	0.843	-0.3	4.4	-4.6
2004	Baruth	95.59	1.073	-1.264	0.3	6.2	-3.2
	Cottbus	97.80	1.059	0.357	-0.1	4.2	-4.8
	Grünow	97.06	0.987	-0.345	0.5	4.5	-3.0
	Kyritz	96.40	1.010	-0.100	-0.1	4.8	-4.0
	Neuruppin	96.95	0.961	0.710	-0.2	4.1	3.6

Tabelle 18b: Fortsetzung von Tabelle 18a: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem K-Verfahren in Brandenburg.

Jahre	Station	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt	Mittelwert	Maximum	Minimum
2005	Baruth	97.58	1.025	-0.760	0.5	6.0	-2.9
	Cottbus	98.44	0.990	0.266	-0.2	4.4	-4.3
	Grünow	98.34	0.984	0.102	0.1	5.0	-5.9
	Kyritz	98.35	0.967	0.246	-0.2	5.9	-7.4
	Neuruppin	98.35	0.959	0.692	-0.1	3.9	-3.3
2006	Baruth	96.91	0.989	-0.390	0.6	6.2	-3.6
	Cottbus	99.25	0.982	-0.242	-0.2	4.3	-4.9
	Grünow	98.84	1.008	0.073	-0.2	3.3	-3.8
	Kyritz	98.78	0.993	0.057	0.1	4.4	-4.8
	Neuruppin	98.51	0.977	0.578	-0.2	3.4	-4.3

4.2.2.2 Temperaturinterpolation mit K in Rheinland-Pfalz

In Rheinland-Pfalz konnten an der Station Eich ebenfalls gute Ergebnisse mit dem K-Verfahren erzielt werden. Die Ergebnisse am Standort dieser Station wurden stellvertretend für die Berechnungen in Rheinland-Pfalz dargestellt (Abbildung 50). An der Station Eich 2006 wurde bei der linearen Regression ein Bestimmtheitsmaß von 97,96 % berechnet.

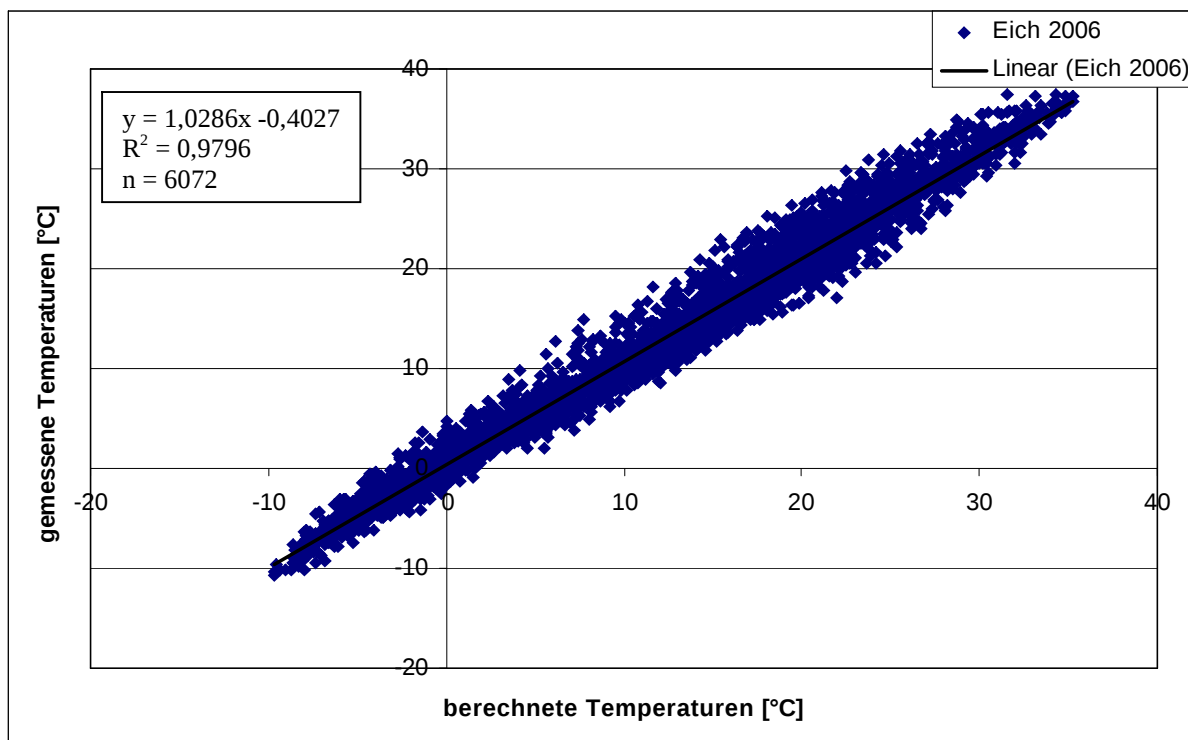


Abbildung 50: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Eich 2006 mit dem K-Verfahren.

Die Boxplots der Abweichungen der einzelnen Jahre der berechneten und gemessenen Temperaturen in Eich zeigen, dass der Mittelwert 2003 um 0,1 °C und 2004 um 0,4 °C zu niedrig berechnet wurde (Abbildung 52). Die beiden Quartile lagen in diesen Jahren zwischen

-0,5 und 0,5 °C, dass heißt 50 % aller Werte befanden sich in einem Abweichungsbereich von maximal 0,5 °C. Die Whisker lagen 2003 und 2004 deutlich unter -2 bzw. 2 °C und somit auch unter den Werten von Brandenburg. In den Jahren 2005 und 2006 waren die Abweichungen um etwa 0,3 °C größer, als die der Jahre 2003 und 2004. Die mittleren Abweichungen lagen bei 0,6 und 0,8 °C Unterschätzung. Die Quartile hatten eine Amplitude von 1,2 °C. Der untere und obere Whisker von 2005 und 2006 erreichten Werte von bis -3 und 2,2 °C.

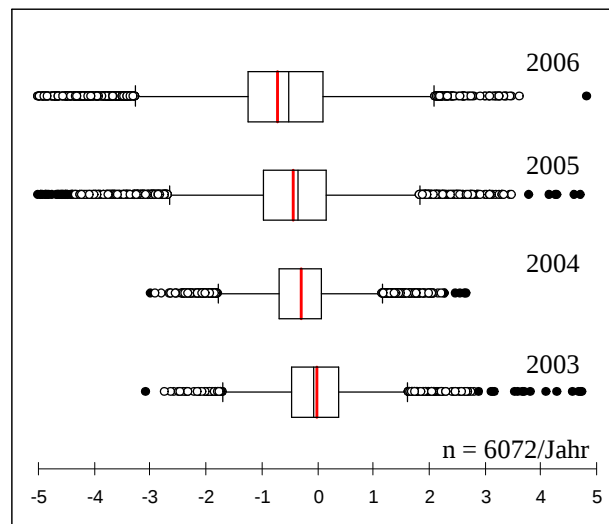


Abbildung 51: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Die Betrachtung der einzelnen Monate der Messstation Eich zeigten im Vergleich zur Jahresdarstellung ein analoges Bild. Die Abweichung der Jahre 2003 und 2004 lagen bei allen vier Boxplots bis zu 0,5 °C unter den Abweichungen der Jahre 2005 und 2006 (Abbildung 52 und Abbildung 53). Auffallend war jedoch, dass gerade in den Monaten Juni und Juli im Jahr 2006 deutlich höhere Abweichungen bei den Quartilen von -2 bis zu 0,6 °C und beim unteren und oberen Whisker sogar von -4,8 bis zu 3,5 °C erreicht wurden als 2003 und 2004 (Abbildung 54 und 54).

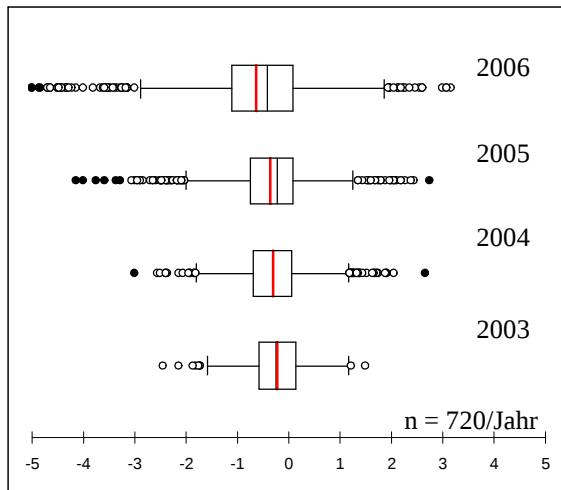


Abbildung 52: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

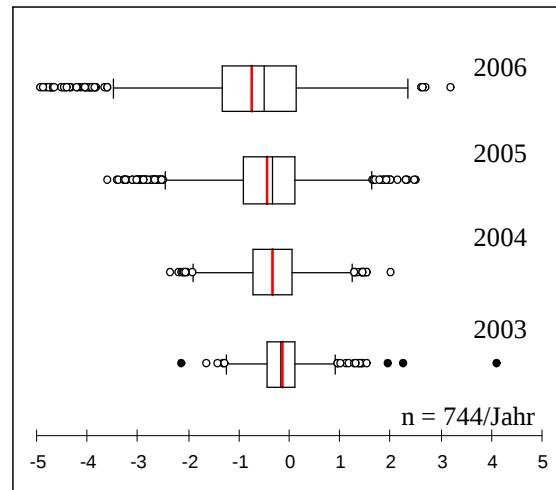


Abbildung 53: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

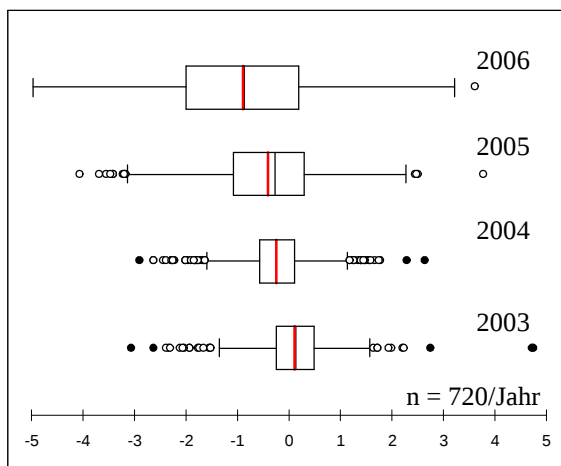


Abbildung 54: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

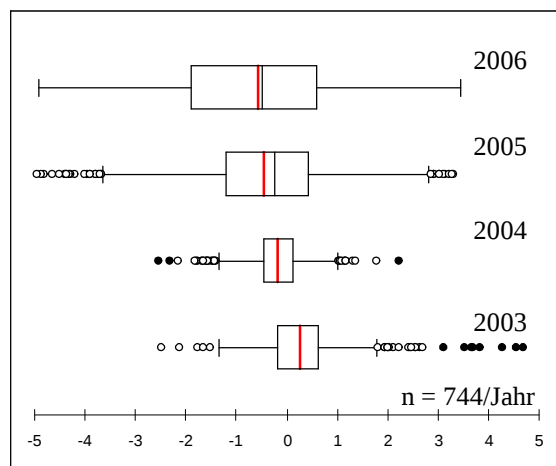


Abbildung 55: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Alle Ergebnisse der Temperaturberechnungen in den Interpolationszonen 12 und 14 wurden in Tabelle 19 zusammengefasst. Im Bestimmtheitsmaß unterschieden sich beide Zonen nur geringfügig. In Zone 11 wurde ein Bestimmtheitsmaß zwischen 94 und 98 % ermittelt. In der Zone 14 lag der untere Wert des Bestimmtheitsmaßes um 2 % mit 96 % höher als in Zone 11. Der obere Wert war gleich.

Bei der Betrachtung der mittleren Abweichung von den gemessenen Werten wurde festgestellt, dass die Mittelwerte der Zone 11 im Durchschnitt 0,3 °C höher lagen als in Zone 14. Die maximale mittlere Abweichung lag bei Zone 11 bei -0,7 und 1,5 °C und bei Zone 14 bei -0,8 und 0,5 °C. Die maximalen und minimalen Abweichungen beider Zonen

waren sehr ähnlich und lagen im Schnitt zwischen 5 und 6 °C. In beiden Zonen konnten somit vergleichbare Ergebnisse, wie in Brandenburg, erreicht werden.

Tabelle 19: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem K-Verfahren in Rheinland-Pfalz.

Jahre	Zone	Station	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt	Mittel	Max	Min
2003	11	Dreis	98.14	0.983	-0.311	0.6	5.3	-3.6
		Mendig	96.82	1.007	0.562	-0.7	5.4	-6.3
		Wahlbach	98.95	0.989	-0.625	0.8	5.3	-2.7
		Riol	94.28	1.029	0.594	-1.0	5.7	-6.7
	14	Eich	98.59	0.952	0.930	-0.1	8.2	-4.3
		Mainz	98.43	0.961	1.099	-0.4	3.3	-4.2
		Lustadt	98.59	0.991	0.212	-0.1	6.3	-2.9
		Schifferstadt	98.62	1.010	0.624	-0.8	3.8	-4.4
2004	11	Dreis	96.86	1.024	-0.649	0.4	4.1	-4.3
		Mendig	95.40	1.023	0.338	-0.6	4.8	-6.1
		Wahlbach	97.88	0.941	-0.443	1.2	4.1	-3.4
		Riol	94.89	1.079	0.259	-1.3	3.8	-7.1
	14	Eich	97.87	0.989	0.568	-0.4	4.2	-3.2
		Mainz	98.30	0.953	1.049	0.4	3.2	-3.8
		Lustadt	97.22	1.043	-0.478	-0.2	6.1	-3.5
		Schifferstadt	98.40	0.950	0.702	0.1	4.9	-2.6
2005	11	Dreis	97.36	1.005	-0.806	0.7	5.0	-5.0
		Mendig	96.09	1.031	0.145	-0.6	5.2	-9.0
		Wahlbach	98.18	0.965	-0.872	1.4	6.4	-3.7
		Riol	95.33	1.013	0.803	-1.0	4.5	-4.4
	14	Eich	96.38	1.015	0.378	-0.6	3.5	-5.3
		Mainz	98.26	0.965	1.196	-0.6	3.6	-4.1
		Lustadt	98.47	0.976	0.064	0.3	5.6	-2.6
		Schifferstadt	98.59	0.954	0.942	-0.2	5.6	-3.1
2006	11	Dreis	97.61	0.977	-0.638	1.0	7.7	-4.0
		Mendig	95.06	0.996	0.445	-0.4	7.0	-8.3
		Wahlbach	98.13	0.967	-1.011	1.5	8.6	-2.6
		Riol	97.01	0.994	0.130	0.0	4.5	-3.8
	14	Eich	97.96	1.029	0.403	-0.8	3.8	-4.9
		Mainz	98.49	0.966	0.851	-0.3	3.2	-3.8
		Lustadt	98.96	0.976	-0.132	0.5	5.2	-2.9
		Schifferstadt	98.84	0.995	0.315	-0.2	2.8	-3.5

4.2.2.3 Luftfeuchteinterpolation mit K in Brandenburg

Die Auswertungen der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte wurden analog der Auswertungen der Temperaturdaten durchgeführt. Das Bestimmtheitsmaß lag bei der Station Cottbus 2006 bei 98,3 % (Abbildung 56). Die Steigung der Regressionsgeraden mit 0,99 tendiert gegen 1. Es konnten sowohl positive als auch negative Ausreißerwerte bei der linearen Regression ermittelt werden.

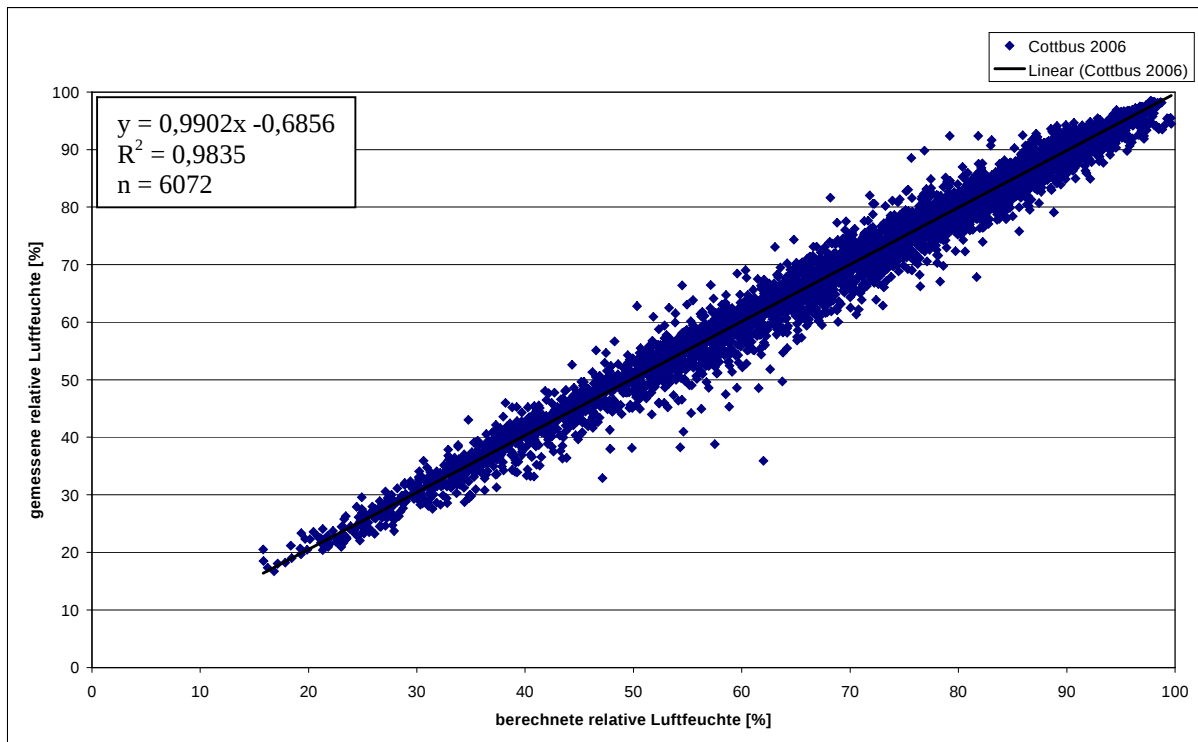


Abbildung 56: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Cottbus 2006 mit dem K-Verfahren.

Der unteren und oberen Whisker der Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchten lag zwischen -18 und 19 % (Abbildung 57). Der Bereich des ersten und dritten Quartils befindet sich zwischen -5 und 4 % relativer Luftfeuchte. Somit lagen 50 % aller Werte im Bereich des Messfehlers der Messsensorik, der für die relative Luftfeuchte bei 2 bis 5 % relativer Luftfeuchte liegt (VDI 1985b). Der Mittelwert der Abweichungen lag zwischen -1 und 2 % relativer Luftfeuchte. Die Amplitude zwischen dem unteren und oberen Whisker bzw. dem ersten und dritten Quartils nehmen mit den Jahren von 2003 bis 2006 ab. Bei den Abweichungen konnten Ausreißer in einem Bereich zwischen 18 und 25 % relativer Luftfeuchte ermittelt werden.

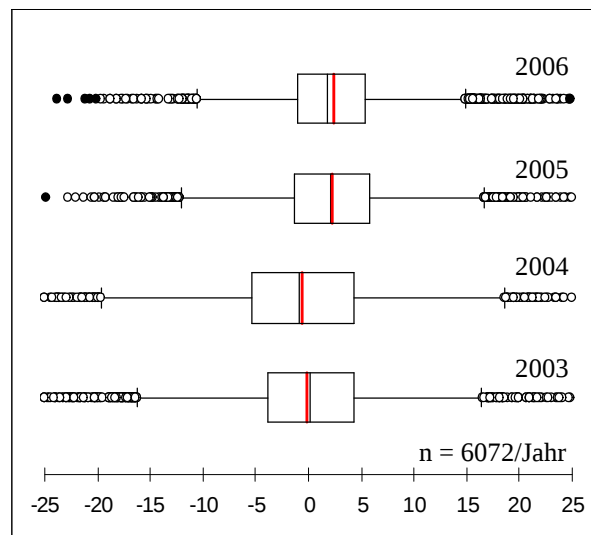


Abbildung 57: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Bei den Abweichungen zwischen den berechneten und gemessenen Werten der einzelnen Monate fällt auf, dass weniger Ausreißerwerte im Vergleich zu Abbildung 57 berechnet wurden. Die geringsten Abweichungen beim unteren und oberen Whisker wurden im April 2006 mit -12 und 16 % erzielt (Abbildung 58). Im April und Mai ist eine positive mittlere Abweichung von bis 3 % zu erkennen (Abbildung 58 und 59). Die mittleren Abweichungen im Juni und im Juli lagen zwischen -1 und 1 % relativer Luftfeuchte (Abbildung 60 und Abbildung 61).

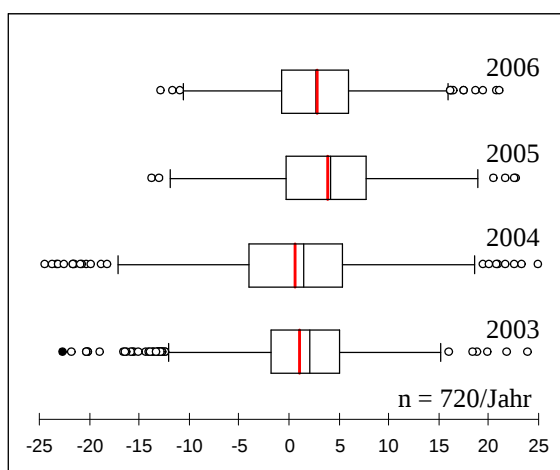


Abbildung 58: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

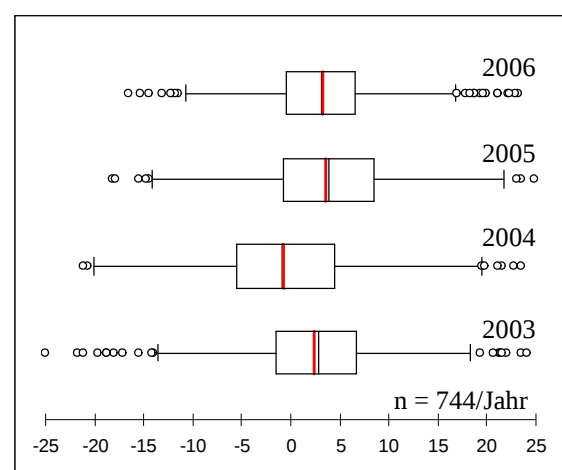


Abbildung 59: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

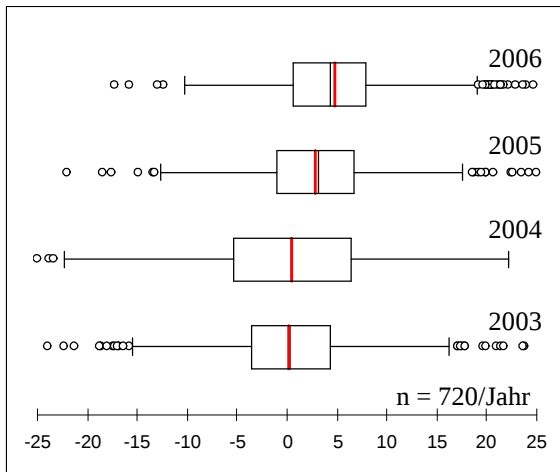


Abbildung 60: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

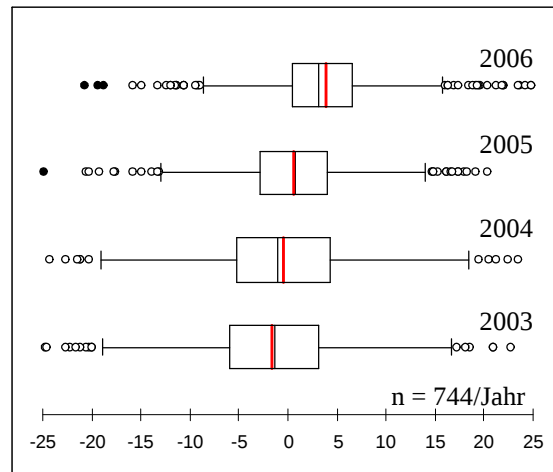


Abbildung 61: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass das Bestimmtheitsmaß bei der relativen Luftfeuchtigkeit um etwa 4 % geringer war als bei der Temperatur (Tabelle 20). Es lag zwischen 89 und 94 %. Die mittlere Abweichung der relativen Luftfeuchte aller betrachteten Stationen in Brandenburg variierte von -2 bis zu 4,7 %. Somit ist eine gleichmäßige Verteilung zwischen Über- und Unterschätzung festzustellen. Die größte Abweichung nach oben wurde an der Station Baruth 2003 mit 31,7 % ermittelt. Die größte Abweichung nach unten wurde mit -41,2 % an der Station Kyritz 2003 festgestellt. Diese kann aber als Ausreißer angesehen werden, da alle anderen Stationen minimale Werte von 24 bis 32 % relativer Luftfeuchte aufwiesen.

Tabelle 20: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem K-Verfahren in Brandenburg.

Jahre	Station	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt	Mittelwert	Maximum	Minimum
2003	Baruth	89.76	0.992	-1.635	2.2	31.7	-32.8
	Cottbus	91.60	0.992	-1.598	0.0	25.8	-26.0
	Grünow	91.32	0.951	2.035	1.3	30.4	-29.3
	Kyritz	89.60	1.140	-11.200	1.5	29.8	-41.2
	Neuruppin	90.07	0.997	1.477	-1.3	27.8	-27.3
2004	Baruth	89.68	0.961	-1.818	4.7	26.8	-27.2
	Cottbus	90.30	0.899	2.324	-1.0	25.1	-25.3
	Grünow	89.26	0.856	11.357	-0.7	23.2	-31.0
	Kyritz	87.30	1.050	-2.420	-1.7	27.2	-28.4
	Neuruppin	88.19	1.045	-2.493	-0.8	28.3	-32.1
2005	Baruth	93.14	0.963	-1.284	3.9	26.7	-23.2
	Cottbus	94.50	0.983	-1.889	2.0	24.0	-24.5
	Grünow	92.52	0.976	1.892	-0.2	21.8	-32.5
	Kyritz	92.20	96.990	0.290	-1.9	26.6	-29.1
	Neuruppin	92.99	0.908	8.301	-1.8	18.9	-22.4
2006	Baruth	90.24	0.994	-1.250	1.7	25.0	-32.0
	Cottbus	98.35	0.990	0.686	1.5	25.1	-24.9
	Grünow	93.52	1.003	0.053	-0.3	22.6	-22.9
	Kyritz	92.90	0.936	6.340	-2.0	18.8	-30.1
	Neuruppin	93.16	0.922	5.915	-0.6	20.5	-27.7

4.2.2.4 Luftfeuchteinterpolation mit K in Rheinland-Pfalz

Bei der relativen Luftfeuchte wurde an der Station Eich ein Bestimmtheitsmaß von 96,58 % ermittelt. Anhand der Punktwolke war zu erkennen, dass bei der Feuchteinterpolation einige Ausreißerwerte zu finden waren (Abbildung 62). Die Steigung der Regressionsgeraden betrug 1,095.

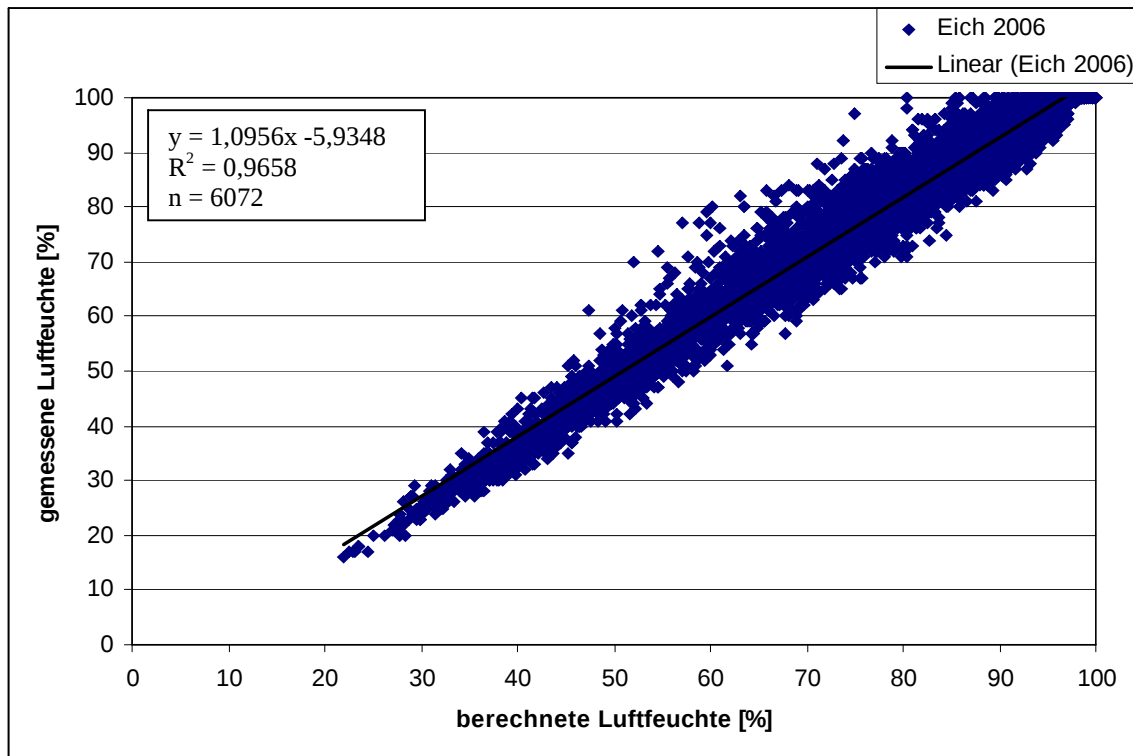


Abbildung 62: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Eich 2006 mit dem K-Verfahren.

Die Abweichungen, die dabei zwischen den berechneten und gemessenen Luftfeuchten erzielt wurden, lagen im Mittel in Eich um 1 bis 3 % unter den Werten die in Brandenburg berechnet wurden (Abbildung 63). Die Abweichungen der einzelnen Jahre lagen dabei im Mittel zwischen -1,3 und 1,6 %. In den Jahren 2003 und 2006 wurde die Luftfeuchte im Mittel leicht unter und in den Jahren 2004 und 2005 leicht überschätzt. Die Quartile hatten dabei eine Spannbreite von 3 bis 5 % relativer Luftfeuchte. Die Whisker überschritten Werte von über 9 % relativer Luftfeuchte nie. Allerdings wurden Ausreißerwerten, mit Abweichungen bis zu ± 20 % relativer Luftfeuchte ermittelt.

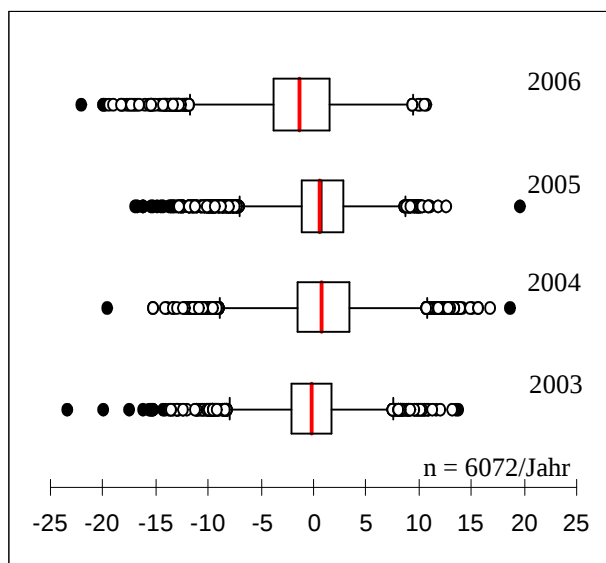


Abbildung 63: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Die Boxplots der einzelnen Monate wiesen ein analoges Ergebnis zum K-Verfahren, wie die zum Gesamtzeitraum auf. Auffallend war bei Betrachtung der Monate, dass die Einzelwerte der Quartile und der Whisker mit 2 bis 4 % etwas höher lagen als bei der Betrachtung des gesamten Jahres. Mit maximalen Abweichungen des unteren und oberen Whiskers von -15 bis 15 % relativer Luftfeuchte im Mai und im Juni wurden geringere Abweichungen als in Cottbus erzielt. Die Amplitude der Quartile lag dabei bei maximal 6 %. Die relative Luftfeuchte wurde in allen Monaten und in allen Jahren im Mittel um 1 bis 3 % leicht überschätzt (Abbildung 64 bis 66).

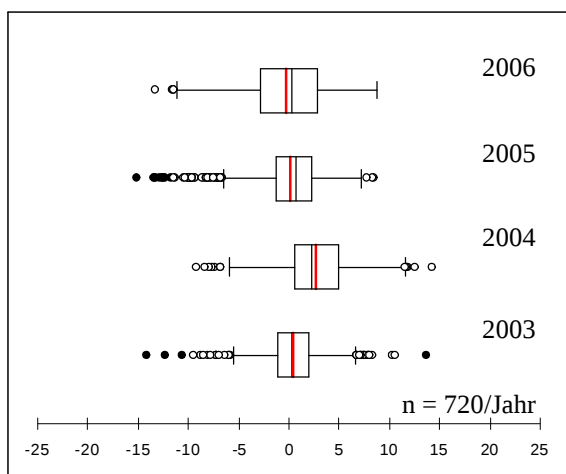


Abbildung 64: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

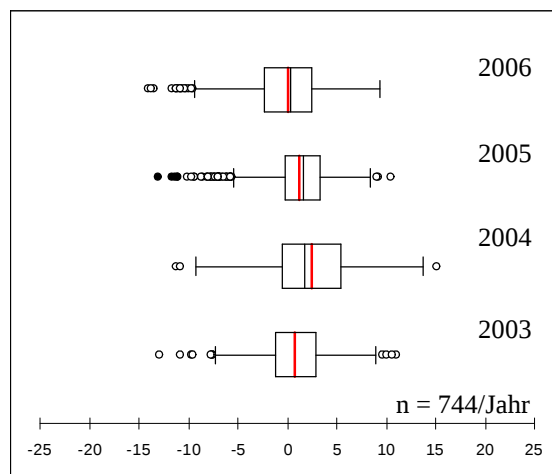


Abbildung 65: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

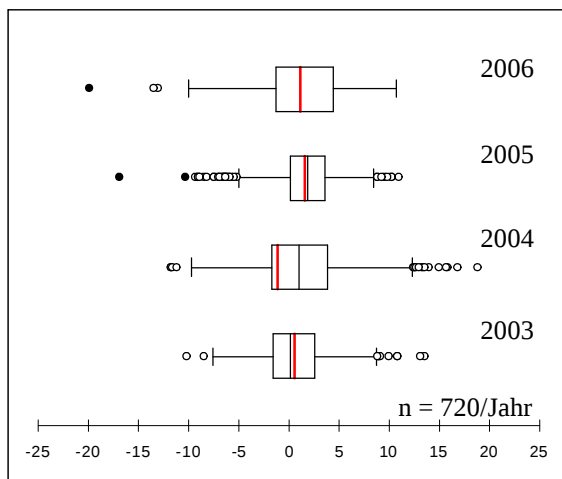


Abbildung 66: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

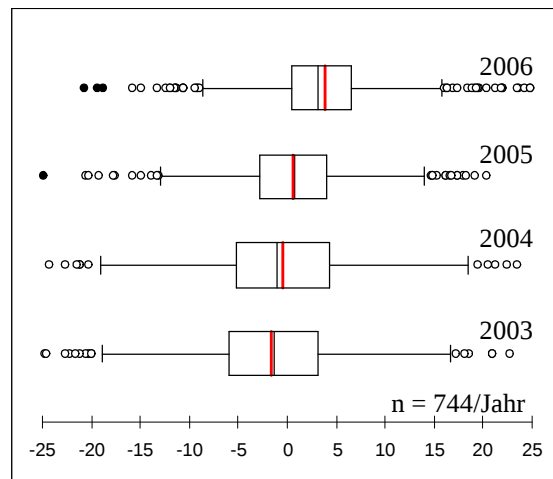


Abbildung 67: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.

Die Ergebnisse der Interpolationsberechnungen mit K der Interpolationszonen 12 und 14 wurden in Tabelle 21 dargestellt. In Zone11 schwankten die Bestimmtheitsmaße zwischen 85 und 95 % und in Zone 14 zwischen 91 und 96 %.

Bei der mittleren Abweichung konnten jedoch keine deutlichen Unterschiede zwischen den beiden Interpolationszonen ausgemacht werden. Die mittlere Abweichung lag zwischen – 5,3 und 7,1 % relativer Luftfeuchte. Die maximalen und minimalen Abweichungen lagen zwischen ± 25 bis 33 % relativer Luftfeuchte, wobei für die Station Mendig 2003 und 2006 zwei Ausreißerwerte mit über 40 % relativer Luftfeuchte Abweichung berechnet wurden.

Tabelle 21a: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem K-Verfahren in Rheinland-Pfalz.

Jahre	Zone	Station	Bestimmtheits- maß	Steigung	Y-Achsen- abschnitt	Mittel	Max	Min
2003	11	Dreis	95.03	1.024	3.546	-5.3	18.9	-27.4
		Mendig	89.10	0.918	-3.240	9.1	45.0	-20.1
		Wahlbach	96.45	0.989	1.233	0.8	22.5	-19.1
		Riol	85.21	0.947	2.340	1.4	20.7	-30.8
	14	Eich	95.43	0.915	4.349	-1.1	15.1	-23.3
		Mainz	94.91	0.981	-5.877	7.1	18.8	-25.6
		Lustadt	91.89	0.982	1.574	-0.4	25.1	-21.3
		Schifferstadt	94.13	0.931	5.632	-1.2	16.6	-21.2
2004	11	Dreis	92.70	1.016	-0.321	0.0	19.0	-22.4
		Mendig	86.80	0.964	-5.148	7.9	30.5	-17.1
		Wahlbach	95.41	1.047	0.219	-3.8	16.6	-22.2
		Riol	91.01	1.023	-4.753	3.0	26.1	-21.0
	14	Eich	92.80	0.920	3.758	1.8	18.8	-21.1
		Mainz	93.65	0.987	-4.437	5.4	22.8	-20.1
		Lustadt	93.59	0.984	0.046	1.0	25.6	-34.4
		Schifferstadt	95.27	91.830	5.010	0.5	16.8	-35.0

Tabelle 21b: Fortsetzung von Tabelle 21a: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem K-Verfahren in Rheinland-Pfalz.

Jahre	Zone	Station	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt	Mittel	Max	Min
2005	11	Dreis	94.00	0.985	3.457	-2.3	22.1	-21.9
		Mendig	86.52	0.955	0.208	3.1	35.0	-21.2
		Wahlbach	92.76	1.006	1.966	-2.4	29.9	-20.2
		Riol	86.37	1.000	-2.418	2.4	21.8	-25.3
	14	Eich	95.26	1.054	-5.415	1.6	19.0	-17.4
		Mainz	93.99	0.967	-3.259	5.6	21.8	-14.1
		Lustadt	94.04	1.070	-2.929	-1.8	16.8	-24.2
		Schifferstadt	91.46	0.957	2.252	-0.5	21.2	-32.1
2006	11	Dreis	93.19	0.992	4.107	-3.4	20.5	-33.0
		Mendig	83.95	0.924	1.000	4.4	48.4	-29.7
		Wahlbach	90.76	1.011	5.322	-6.1	21.5	-38.2
		Riol	90.88	1.006	1.854	-2.2	20.0	-26.6
	14	Eich	96.58	1.096	-5.935	-1.3	12.9	-20.5
		Mainz	94.98	0.904	2.356	4.2	19.4	-18.1
		Lustadt	92.92	1.119	-3.635	-4.3	11.1	-24.6
		Schifferstadt	95.17	1.013	0.396	0.0	14.8	-28.1

4.2.3 Multiple Regression

Um mit Hilfe einer MR die Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit berechnen zu können, mussten zunächst die Prädiktoren bestimmt werden, die den größten statistischen Einfluss auf die Zielvariable besaßen. Anhand dieser Ergebnisse wurde ein Prädiktorendatensatz festgelegt, mit dem die MR die Temperaturen und die relative Luftfeuchtigkeit für das Untersuchungsgebiet berechnet. Beim Versuchsaufbau und der Validierung der Interpolation wurde analog zum K-Verfahren vorgegangen. Das heißt, es wurden wieder Stationen von der Interpolationsberechnung ausgeschlossen und anschließend die Berechnungsergebnisse für diese Stationen mit den Messdaten verglichen.

4.2.3.1 Prädiktorenanalyse

Als mögliche Prädiktoren für die Berechnung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte wurden alle Prädiktoren, die ermittelt und berechnet wurden (siehe Kapitel 3.7.4.2 Prädiktoren) auf Signifikanz getestet. Hierzu wurden schrittweise MR mit Parameterausschluss mit SPSS 15.0 berechnet. Für die Aufnahme eines Parameters in das Modell der MR wurde ein Signifikanzniveau von 90 % festgelegt. Anschließend wurden für alle fünf Interpolationszonen in Brandenburg und Rheinland-Pfalz von Januar bis September von 2003 bis 2006 schrittweise MR gerechnet und dabei überprüft, wie oft welche Parameter mit in das Modell aufgenommen wurden.

Interpolationszone 5 ist durch sehr geringe mittlere Reliefenergie charakterisiert. Als Prädiktoren wurden fast ausschließlich der Rechts- und der Hochwert in das Modell der MR aufgenommen. Als weiterer Prädiktor mit 9 % diente die Höhenlage. Alle weiteren Prädiktoren waren in dieser Zone unbedeutend.

Die Interpolationszonen 11 und 13 haben eine höhere mittlere Reliefenergie als Zone 5, das heißt der Geländeeinfluss ist in diesen Zonen stärker ausgeprägt. Bei der Aufnahme der Prädiktoren wurde die Höhenlage zu 19 bzw. 18 % und die sonstigen Parameter zu 6 bzw. 5 % in dem Modell integriert. Die am häufigsten aufgenommenen Parameter waren wieder der Rechtswert und der Hochwert (Tabelle 22).

In der Interpolationszone 11 wurde die Höhe mit 26 % am häufigsten im Vergleich aller Zonen für die Regressionsrechnung verwendet. Dominierend waren aber der Rechtswert und der Hochwert. Alle anderen Prädiktoren wurden in 7 % der Fälle verwendet.

Die Interpolationszone 14 weist eine ähnliche mittlere Reliefenergie auf wie Zone 5. Die Aufnahme der Geländehöhe lag hier bei 9 % und der Rechts- und Hochwert waren mit über 90 % die am häufigsten aufgenommenen Parameter bei der MR.

Aufgrund der einheitlichen und eindeutigen Ergebnisse zur Aufnahme der Prädiktoren in die MR wurde entschieden die Parameter Rechtswert, Hochwert und Höhe als festen Parametersatz mit in das Modell der MR aufzunehmen. Der Einfluss aller weiteren Prädiktoren war im Mittel kleiner als 0,5 %. Es ist daher nicht davon auszugehen, dass diese Prädiktoren zu einer Verbesserung bei der Berechnung von Temperatur und relativer Luftfeuchte beitragen.

Bei einer Erweiterung des Verfahrens auf weitere Interpolationszonen oder Veränderungen am Stationsnetz ist eine erneute Überprüfung des Prädiktorendatensatzes notwendig.

Tabelle 22: Aufnahme der Prädiktoren bei der MR in Prozent.

Interpolationszone	Anzahl der Berechnungen	Rechtswert	Hochwert	Höhe	Sonstige
5	23328	49	45	5	1
11	23328	43	32	19	6
12	23328	37	30	26	7
13	23328	44	33	18	5
14	23328	42	48	9	1

4.2.3.2 Temperaturinterpolation mit MR in Brandenburg

Die Vorgehensweise bei den Temperaturberechnungen mit der MR erfolgte analog zu der K Berechnungen.

Das Bestimmtheitsmaß lag in Cottbus bei 99,3 %. Die Regressionsgeraden hatte eine Steigung von 1,008 (Abbildung 68).

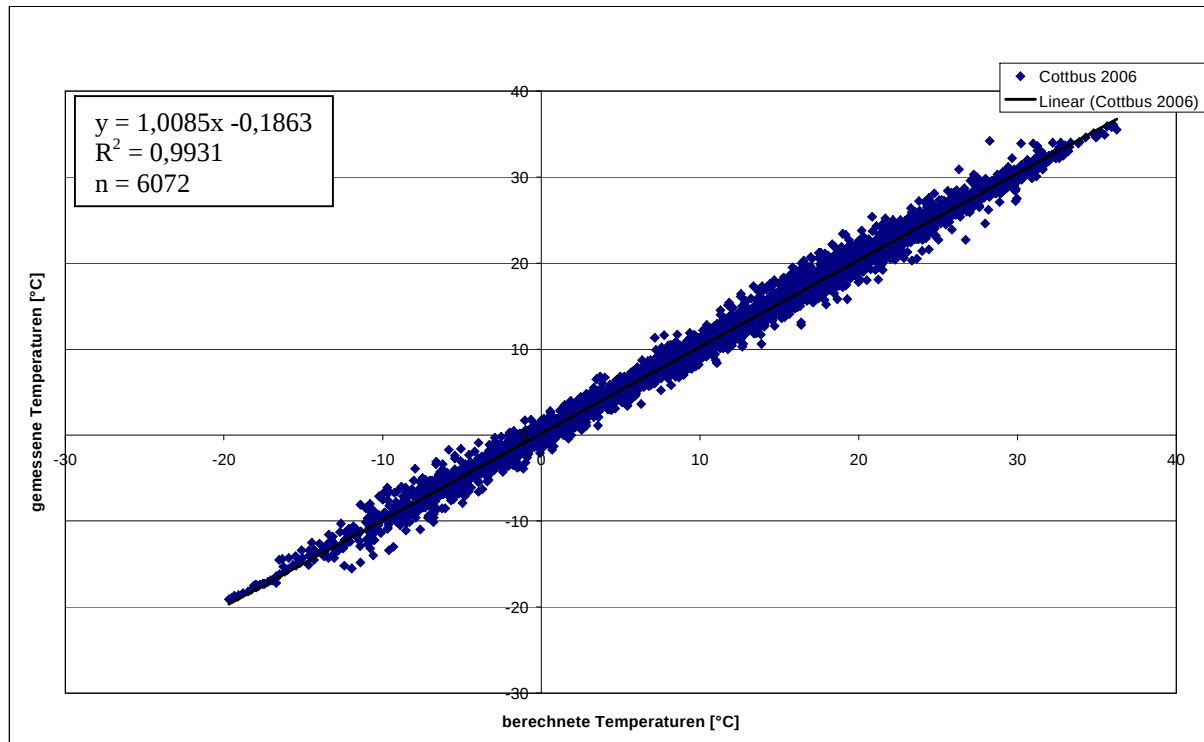


Abbildung 68: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Cottbus 2006 mit dem MR-Verfahren.

Auch die Residuen der berechneten Werte zeigten, dass die Temperaturen in Cottbus plausibel interpoliert werden konnten. Die mittleren Abweichungen lagen bei -0,2 bis 0,1 °C, das heißt, es wurde bei den Abweichungen im gleichen Verhältnis über- und unterschätzt. Die Werte für das erste und dritte Quartil lagen bei -0,5 und 0,4 °C. Diese Werte liegen im Bereich des Messfehlers der Messsensorik. Die Werte des unteren und oberen Whiskers lagen bei ± 2 °C. Die Ausreißerwerte liegen zwischen ± 2 und 5 °C Abweichung (Abbildung 69).

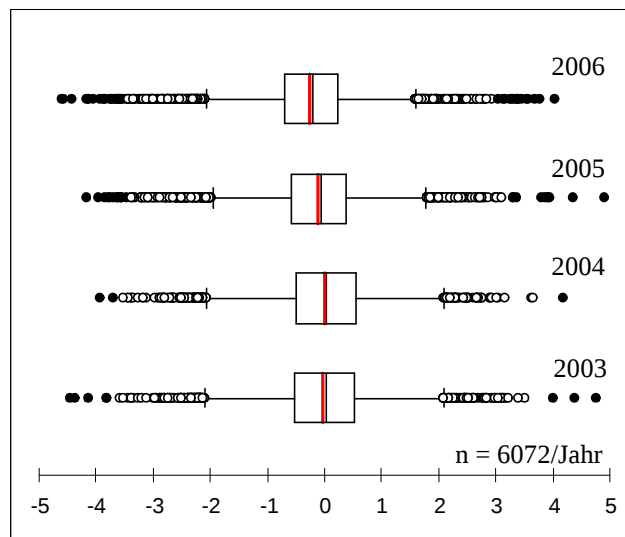


Abbildung 69: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Die Ergebnisse der monatlichen Betrachtung von April bis Juli spiegeln diese Ergebnisse wider. Die Werte des unteren und oberen Whiskers liegen zwischen $-2,5$ und 2 °C. Nur im April 2005 wird eine etwas höhere negative Abweichung von $2,7$ °C erreicht (Abbildung 70). Die Mittelwerte weichen mit $0,1$ °C sowohl in positive als auch in negative Richtung ab. Einzig in den Monaten Juni und Juli des Jahres 2006 wurde eine etwas höhere Abweichung von $-0,3$ °C beim Mittelwert festgestellt (Abbildung 72 und Abbildung 72). Auffallend ist, dass bei der Betrachtung der Einzelmonate weniger Ausreißerwerte zu finden waren, und dass diese fast alle unter ± 4 °C Abweichung lagen.

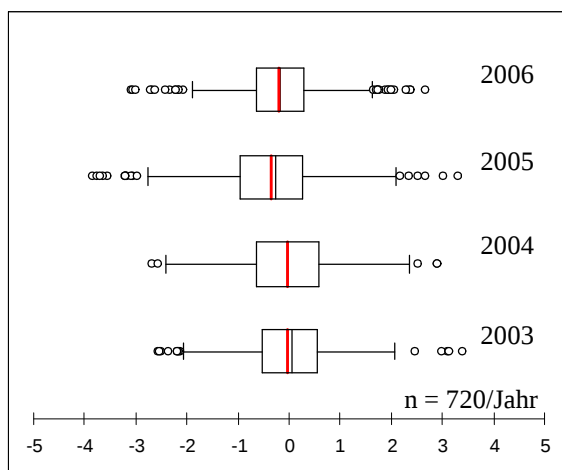


Abbildung 70: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

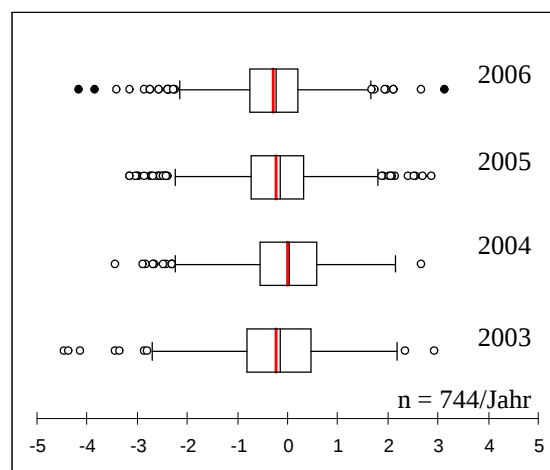


Abbildung 71: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

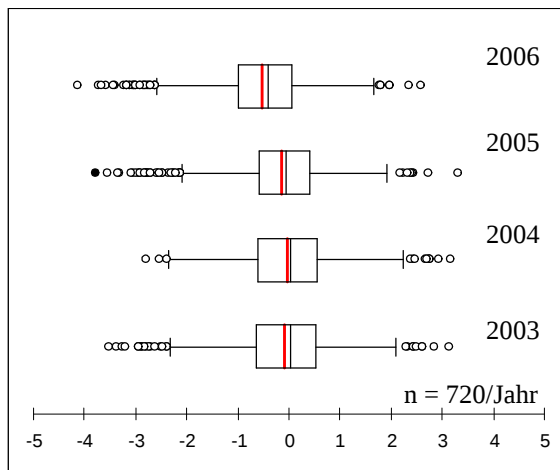


Abbildung 72: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

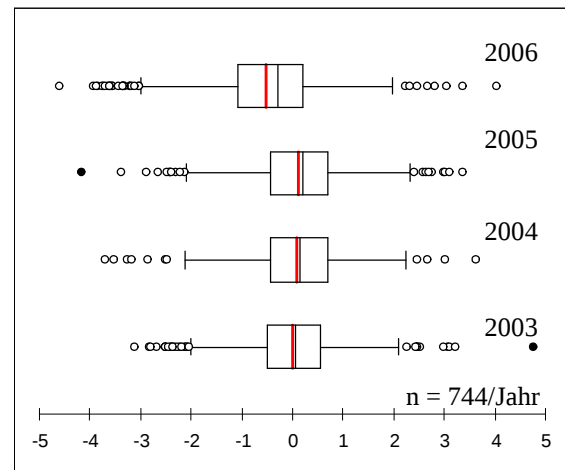


Abbildung 73: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Bei der Zusammenfassung aller weiteren von der MR ausgeschlossenen Wetterstationen konnten Bestimmtheitsmaße zwischen 95 und 99 % berechnet werden (Tabelle 23). Die mittlere Abweichung aller Stationen lag zwischen -0,2 und 0,4 °C, was im Toleranzbereich der Messgenauigkeit der Messsensorik liegt. Bei der maximalen Abweichung wurde nur an der Station Neuruppin 2004 und 2006 ein Maximalwert von mehr als 6 °C ermittelt. Die geringste Abweichung lag bis auf die Station Kyritz 2006 ebenfalls unter -6 °C. Zusammengefasst ist zu sagen, dass auch mit dem MR-Verfahren plausible Temperaturinterpolationen in Brandenburg berechnet werden konnten.

Tabelle 23: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem MR-Verfahren in Brandenburg.

Jahre	Station	Bestimmtheits- maß	Steigung	Y-Achsen- abschnitt	Mittelwert	Maximum	Minimum
2003	Baruth	98.81	1.033	-0.865	0.3	4.6	-2.3
	Cottbus	99.10	1.009	-0.769	-0.1	4.7	-4.5
	Grünow	98.77	0.988	0.146	0.1	4.2	-2.5
	Kyritz	98.80	1.010	0.010	-0.2	5.1	-3.6
	Neuruppin	98.74	0.972	0.635	-0.2	4.6	-4.3
2004	Baruth	97.91	1.047	-0.892	0.2	5.3	-4.0
	Cottbus	98.00	0.999	-0.253	0.1	4.1	-4.4
	Grünow	97.94	0.988	-0.232	0.4	4.1	-4.0
	Kyritz	97.77	1.024	-0.150	-0.2	3.5	-4.0
	Neuruppin	95.50	0.971	0.603	-0.2	7.3	-5.9
2005	Baruth	98.65	1.020	-0.686	0.4	4.7	-4.1
	Cottbus	98.99	1.012	-0.677	-0.2	5.0	-4.1
	Grünow	98.51	0.991	-0.051	0.2	4.7	-4.6
	Kyritz	97.70	0.963	0.376	-0.1	5.7	-9.8
	Neuruppin	96.59	0.955	0.737	-0.1	7.4	-5.1
2006	Baruth	98.69	1.013	-0.601	0.4	5.4	-3.6
	Cottbus	99.31	1.009	0.186	-0.2	4.1	-4.5
	Grünow	98.89	0.990	0.110	0.0	4.0	-4.1
	Kyritz	99.00	0.994	-0.018	0.0	4.0	-4.8
	Neuruppin	97.50	0.970	0.619	-0.2	6.1	-5.5

4.2.3.3 Temperaturinterpolation mit MR in Rheinland-Pfalz

Bei dem Verfahren der MR konnten bei der Station Eich in Rheinland-Pfalz ebenfalls signifikante Zusammenhänge bei der linearen Regression erreicht werden. Das Bestimmtheitsmaß lag bei 98,9 % und somit um 0,4 % niedriger als an der Station Cottbus in Brandenburg. Die Steigung der Regressionsgeraden betrug 0,9691 (Abbildung 74).

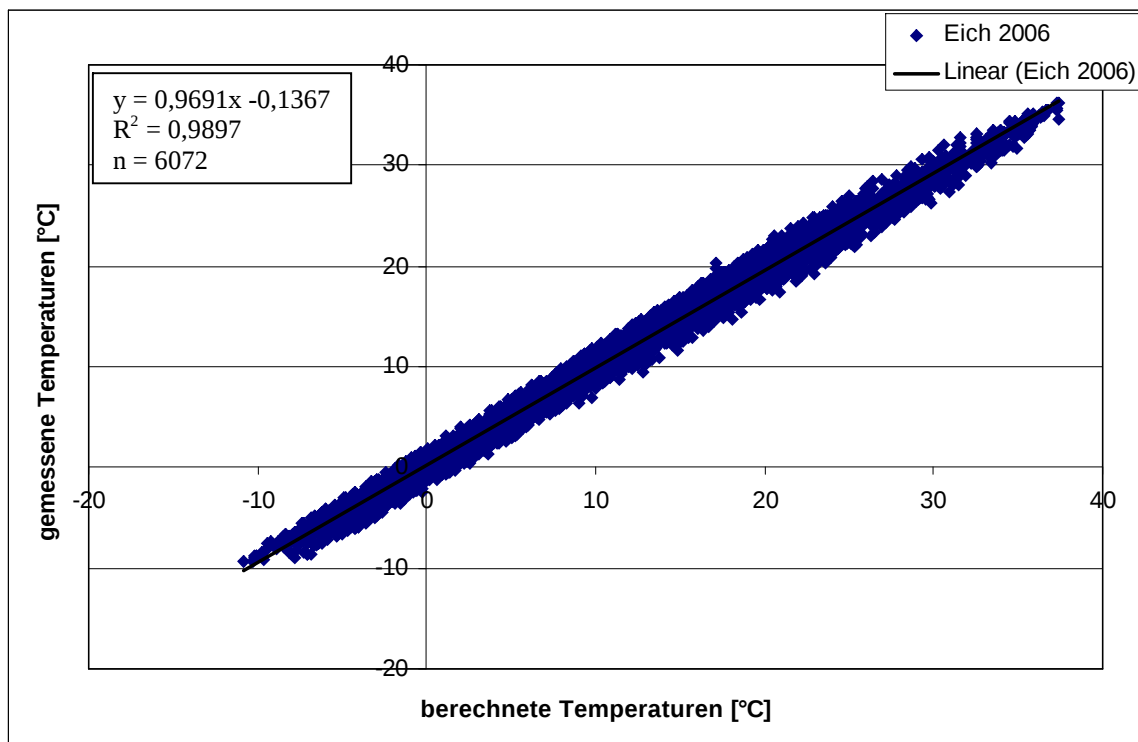


Abbildung 74: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Eich 2006 mit dem MR-Verfahren.

Bei der Betrachtung der Boxplots der Temperaturabweichung in Eich fällt auf, dass sich der gleiche Effekt ergeben hat, wie bei Kriging. In den Jahren 2003 und 2004 wurden um bis zu 1 °C geringere Abweichungen als in den Jahren 2005 und 2006 erzielt (Abbildung 75). Der Mittelwert weist in den Jahren 2003, 2004 und 2006 nur eine geringe Abweichung von $\pm 0,1$ °C auf. 2005 wurde eine mittlere Abweichung von -0,2 °C ermittelt. Die Quartile schwankten 2003 und 2004 um 0,4 °C und 2005 und 2006 um 1,2 °C. Die maximale Abweichung der Whisker lag bei -2,2 und 2 °C.

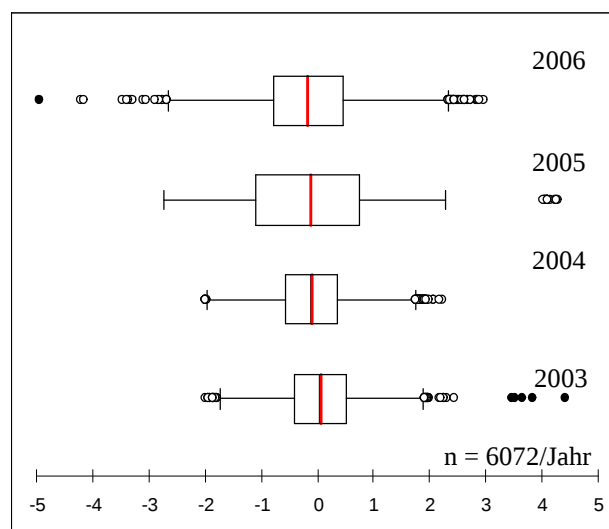


Abbildung 75: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Die Abweichungen der Jahre 2003 und 2004 bleiben in den Monaten Juni und Juli beim MR Verfahren auf bis zu 0,2 °C fast gleich (Abbildung 76 bis 78). In den Jahren 2005 und 2006 lagen die Abweichungen um 0,5 bis 1 °C höher. Auffallend war, dass bei dem MR-Verfahren nur wenige Ausreißerwerte sowohl bei der Darstellung der Monate als auch bei der Jahresdarstellung berechnet wurden. Die ermittelten Ausreißerwerte lagen in einem Bereich zwischen ± 2 bis 2,5 °C.

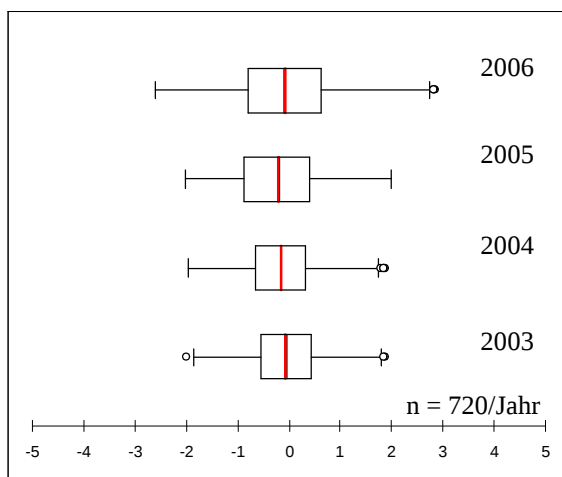


Abbildung 76: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

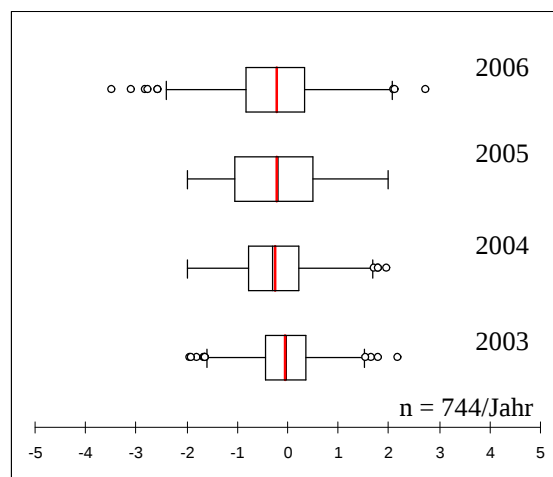


Abbildung 77: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

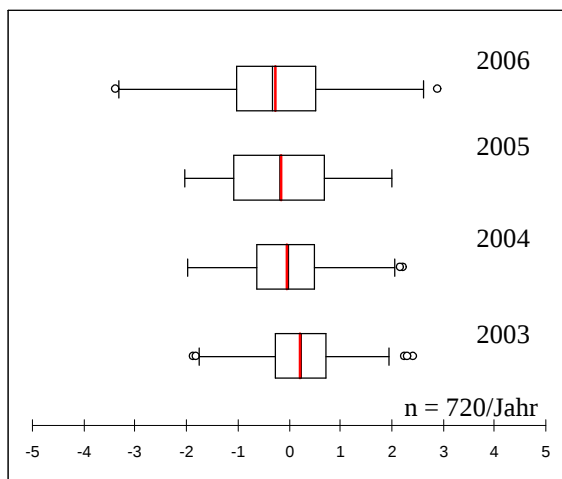


Abbildung 78: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

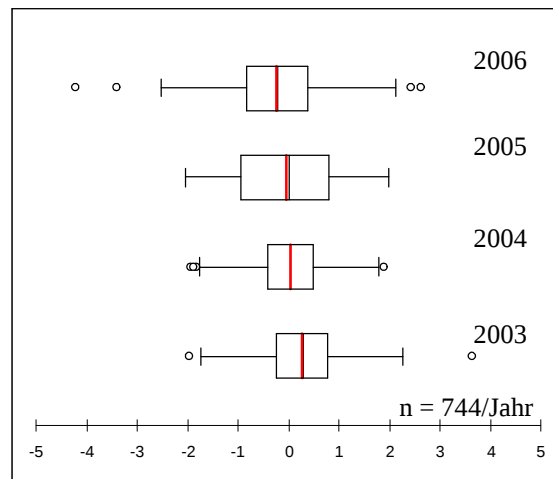


Abbildung 79: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

In Tabelle 24 wurden die Ergebnisse der Interpolationsberechnungen mit MR in Rheinland-Pfalz zusammengefasst. Anhand des Bestimmtheitsmaßes war kein Unterschied zwischen den beiden Interpolationszonen zu erkennen. Das Bestimmtheitsmaß lag bei beiden Zonen zwischen 97 und 99 %. Außer bei der Station Schifferstadt 2003 wurde eine mittlere Abweichung von $\pm 0,4$ °C bei allen Stationen nie überschritten. Die mittlere Abweichung

liegt somit im Toleranzbereich der Messsensorik. Die maximale Abweichung aller Stationen wurde in Eich 2003 mit 5,9 °C Abweichung ermittelt. Die minimale Abweichung wurde bei der Station Mendig 2005 mit -6,1 °C festgestellt. Das MR-Verfahren hat sich als brauchbar erwiesen, um die Temperatur zu regionalisieren.

Tabelle 24: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem MR-Verfahren in Rheinland-Pfalz.

Jahre	Zone	Station	Bestimmtheits- maß	Steigung	Y-Achsen- abschnitt	Mittel	Max	Min
2003	11	Dreis	99.04	1.006	-0.239	0.2	5.2	-4.6
		Mendig	98.35	1.001	-0.011	0.0	5.4	-3.7
		Wahlbach	98.84	1.003	-0.159	0.1	3.8	-2.9
		Riol	98.50	1.009	0.333	0.2	3.1	-3.1
	14	Eich	99.00	0.972	0.401	0.1	5.9	-3.3
		Mainz	99.07	0.979	0.514	-0.2	4.0	-4.2
		Lustadt	98.63	0.992	0.072	0.1	3.2	-2.7
		Schifferstadt	99.10	1.022	0.310	-0.7	3.6	-3.4
2004	11	Dreis	98.40	1.056	-0.660	0.0	3.5	-4.3
		Mendig	97.34	0.998	-0.093	0.1	4.6	-4.0
		Wahlbach	97.91	0.985	0.090	0.1	3.5	-4.0
		Riol	97.99	1.032	-0.495	0.0	3.5	-5.2
	14	Eich	98.25	0.995	0.199	-0.1	3.7	-4.0
		Mainz	98.46	0.973	0.633	-0.2	3.5	-4.0
		Lustadt	98.50	1.049	-0.431	-0.3	4.7	-4.3
		Schifferstadt	98.39	0.959	0.818	-0.2	3.7	-4.0
2005	11	Dreis	98.55	1.030	-0.519	0.1	4.3	-4.0
		Mendig	98.23	1.020	-0.149	-0.2	4.4	-6.1
		Wahlbach	98.57	1.009	-0.216	0.1	4.6	-4.0
		Riol	97.75	0.988	-0.158	0.3	5.6	-4.8
	14	Eich	97.97	1.019	0.162	-0.2	3.8	-2.9
		Mainz	98.61	0.981	0.703	-0.4	4.8	-4.0
		Lustadt	98.49	0.990	0.017	0.2	4.7	-4.0
		Schifferstadt	98.97	0.976	0.875	-0.5	5.0	-4.0
2006	11	Dreis	98.92	1.028	-0.538	0.2	4.2	-3.6
		Mendig	98.04	1.013	-0.216	0.0	5.1	-5.5
		Wahlbach	98.77	0.997	-0.051	0.3	5.2	-4.3
		Riol	98.99	0.984	-0.306	0.6	4.3	-3.6
	14	Eich	98.97	0.969	0.137	-0.1	2.4	-5.1
		Mainz	98.83	0.978	0.560	-0.2	4.0	-4.5
		Lustadt	98.83	0.969	0.233	0.3	5.9	-4.5
		Schifferstadt	99.18	0.986	0.669	0.0	4.7	-3.6

4.2.3.4 Luftfeuchteinterpolation mit MR in Brandenburg

Bei der linearen Regression der gemessenen und berechneten Werte der relativen Luftfeuchte mit dem Verfahren der MR an der Station Cottbus in Rheinland-Pfalz wurde ein Bestimmtheitsmaß von 94,01 % mit einer Steigung der Regressionsgeraden von 0,8831 ermittelt (Abbildung 80).

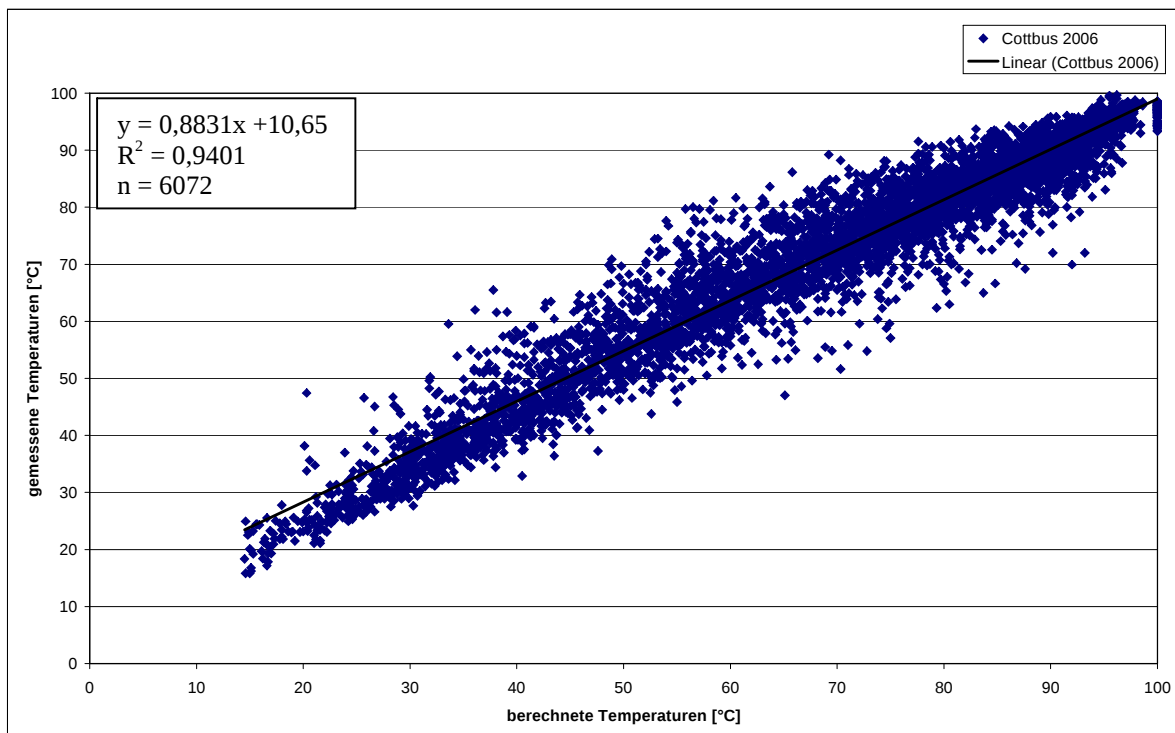


Abbildung 80: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Cottbus 2006 mit dem MR-Verfahren.

Zur Betrachtung der Abweichungen wurden die Boxplots der Jahre 2003 bis 2006 herangezogen. Der unteren und oberen Whisker lag bei -18 und 14 % relativer Luftfeuchte (Abbildung 81). Die Bereiche des ersten und dritten Quartils lagen in den Jahren 2003 und 2004 zwischen -5 und 3 % relativer Luftfeuchte. Dies wurde auch durch ein negatives Abweichungsmittel von -1 bzw. -2 % relativer Luftfeuchte bestätigt. In den Jahren 2005 und 2006 zeichnete sich eine leichte Überschätzung im Mittel von 2 % relativer Luftfeuchte ab. Die Quartile dieser Jahre lagen zwischen -2 und 4 % relativer Luftfeuchte. Somit lagen 50 % aller Werte im Bereich des Messfehlers der Messsensorik. Ähnlich, wie bei K wurden auch bei der Berechnung mit MR Ausreißerwerte ermittelt. Diese haben eine maximale Abweichung vom Mittelwert von ± 25 % relative Luftfeuchte.

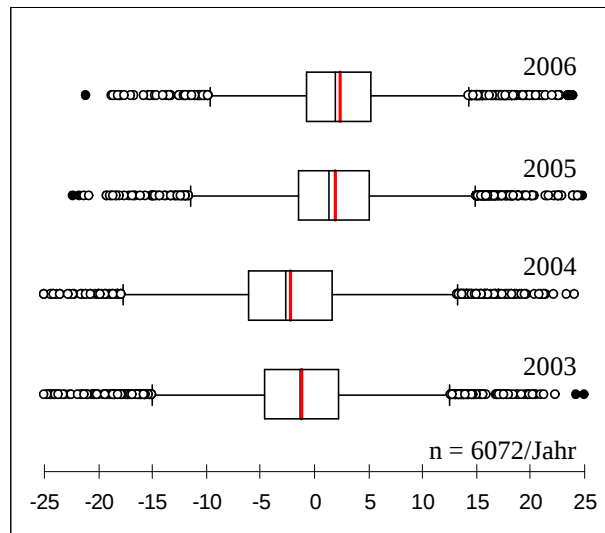


Abbildung 81: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Bei den monatlichen Darstellungen der Residuen zeigte sich ein ähnliches Bild wie bei den Gesamtresiduen. Die Jahre 2003 und 2004 hatten im April ein Abweichungsmittel von 0 % relativer Feuchte. Die Jahre 2005 und 2006 dieses Monats wurden mit 2 % relativer Feuchte leicht überschätzt (Abbildung 82). Die Quartilsgrenzen in diesen Monaten hatten eine Amplitude von bis zu 6 % relativer Luftfeuchte. Im Mai zeigt sich ein ähnliches Bild wie im April (Abbildung 83). Die Whisker lagen zwischen -15 und 15 % relativer Luftfeuchte und die Quartilsabstände bewegten sich im Bereich des Messfehlers der Sensorik. Die Monate Juni und Juli zeigten ein einheitliches Bild, was sich auch in den Gesamtresiduen widerspiegelte (Abbildung 84 und Abbildung 85). In den Jahren 2003 und 2004 wurden jeweils leicht unterschätzt und in 2005 und 2006 leicht überschätzt. Die Quartile schwankten um 2 bis 3 % relativer Luftfeuchte um den Mittelwert und die Whisker lagen bei -18 und 16 % relativer Luftfeuchte. Bei allen vier Monaten war auffallend, dass die Ausreißerwerte im Verhältnis zu den Gesamtresiduen deutlich geringer waren und dass das Ausreißermaximum bei ± 24 % relativer Luftfeuchte lag.

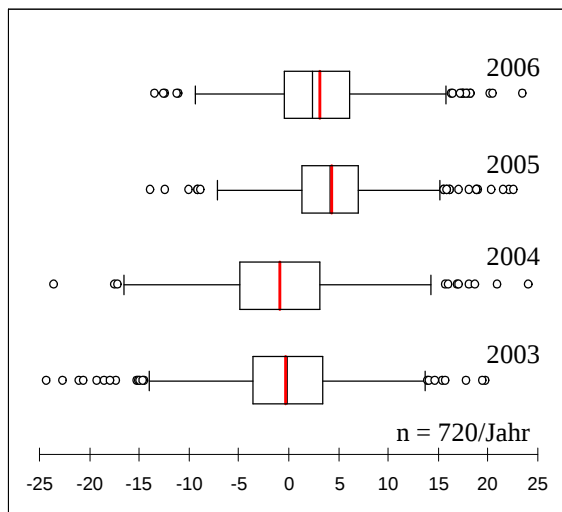


Abbildung 82: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat April von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

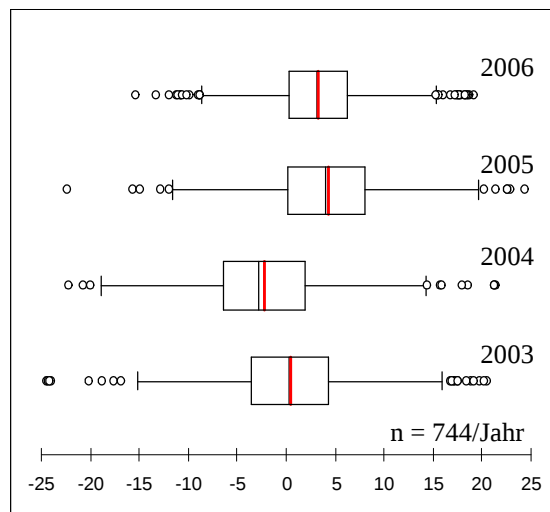


Abbildung 83: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Mai von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

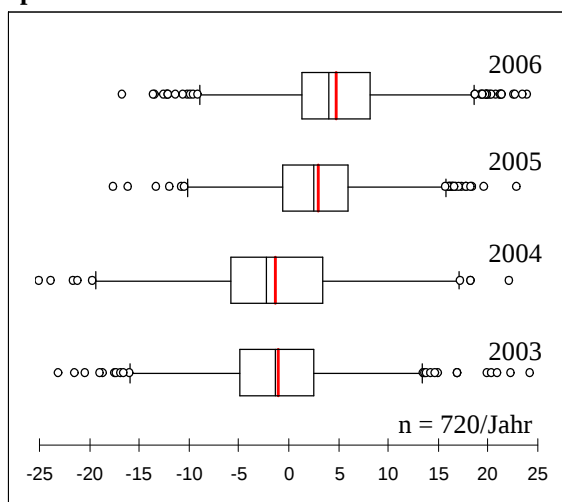


Abbildung 84: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Juni von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

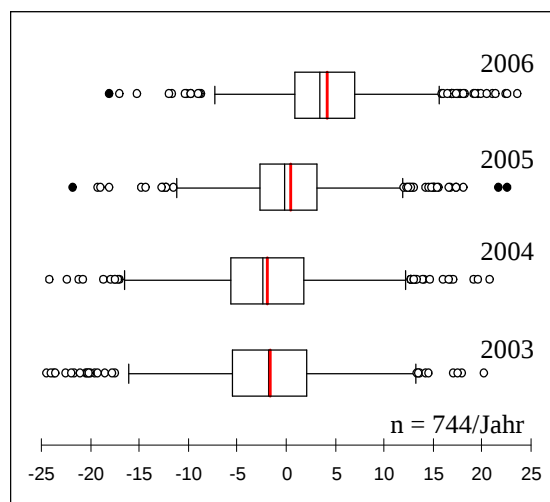


Abbildung 85: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Juli von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Die Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse aller Stationen in Brandenburg wurde in Tabelle 25 dargestellt. Der Zusammenhang zwischen den gemessenen und den berechneten Werten lag dabei bei 89 bis 97 %. Der Mittelwert der Abweichungen aller Stationen schwankte zwischen -3,8 und 3 % relativer Luftfeuchtigkeit. Außer an der Station Kyritz 2005 wurde keine maximale Abweichung von über 29 % relativer Luftfeuchte festgestellt. Mit -37 % relativer Luftfeuchte Abweichung hatte Neuruppin 2006 die minimale Abweichung.

Tabelle 25: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem MR-Verfahren in Brandenburg.

Jahre	Station	Bestimmtheits- maß	Steigung	Y-Achse- abschnitt	Mittelwert	Maximum	Minimum
2003	Baruth	96.10	1.003	-1.531	1.3	13.8	-24.9
	Cottbus	96.80	1.000	-1.699	-1.0	24.0	-25.0
	Grünow	95.65	0.972	0.751	1.1	12.5	-23.5
	Kyritz	96.80	1.100	-8.300	1.1	13.4	-22.4
	Neuruppin	95.70	1.021	-0.089	-1.3	20.1	-18.3
2004	Baruth	96.46	0.997	-2.987	3.2	28.0	-20.3
	Cottbus	95.99	0.987	-2.321	-3.8	25.0	-25.1
	Grünow	93.91	0.899	-3.250	-0.2	27.8	-21.3
	Kyritz	95.09	1.060	-4.530	-0.5	26.5	-22.7
	Neuruppin	89.22	1.052	-3.784	-0.6	27.2	-29.3
2005	Baruth	97.02	1.006	-3.426	3.0	26.2	-23.2
	Cottbus	96.60	0.993	-2.357	-3.5	24.0	-24.8
	Grünow	95.49	0.990	1.473	-0.7	18.7	-22.6
	Kyritz	91.20	0.946	2.700	-1.2	36.2	-31.6
	Neuruppin	89.63	0.935	6.239	-1.6	28.5	-37.4
2006	Baruth	95.83	1.023	-2.803	1.3	19.1	-25.9
	Cottbus	94.01	0.981	2.650	-2.0	25.0	-25.3
	Grünow	96.12	0.995	1.309	-1.0	19.0	-20.6
	Kyritz	96.40	0.960	3.872	-1.5	21.6	-20.0
	Neuruppin	91.65	0.939	5.082	-0.9	28.0	-37.5

4.2.3.5 Luftfeuchteinterpolation mit MR in Rheinland-Pfalz

Die lineare Regression der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchten in Eich 2006 hatte ein Bestimmtheitsmaß von 97 %. Die Punktwolke der Werte wies ein gleichförmiges Bild auf, was auf wenige Ausreißerwerte schließen lässt (Abbildung 86). Die Steigung der Regressionsgeraden lag bei 0,8828.

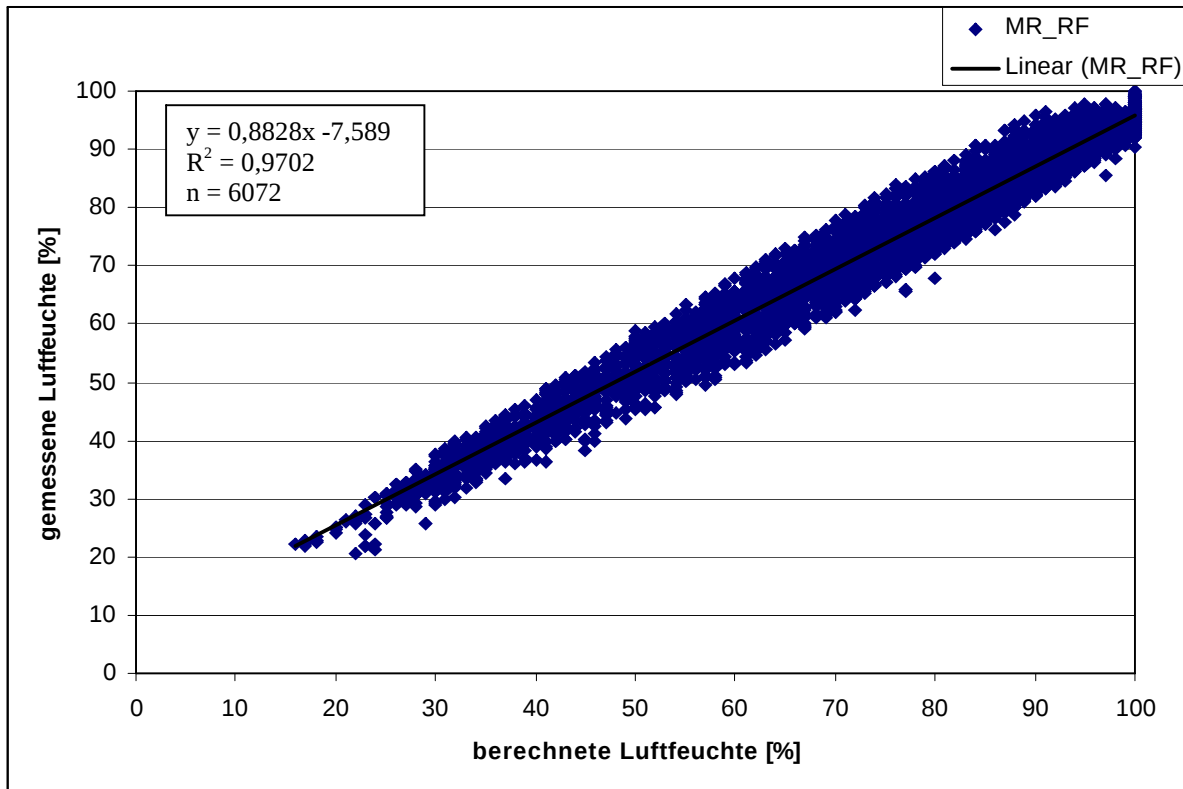


Abbildung 86: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Eich 2006 mit dem MR-Verfahren.

Die Boxplots der Abweichungen von Eich 2000 bis 2006 zeigten, dass die Whisker von ± 10 % relativer Luftfeuchte aufwiesen. In den Jahren 2003, 2004 und 2006 wurde im Mittel um 2,2, 1,4 bzw. 0,6 % relativer Luftfeuchte leicht überschätzt. Im Jahr 2005 erreichte der Mittelwert -0,3 % relativer Luftfeuchte (Abbildung 87). Auffallend war, dass bis auf die Jahre 2003 und 2005 keine Ausreißerwerte in den Boxplots zu erkennen sind.

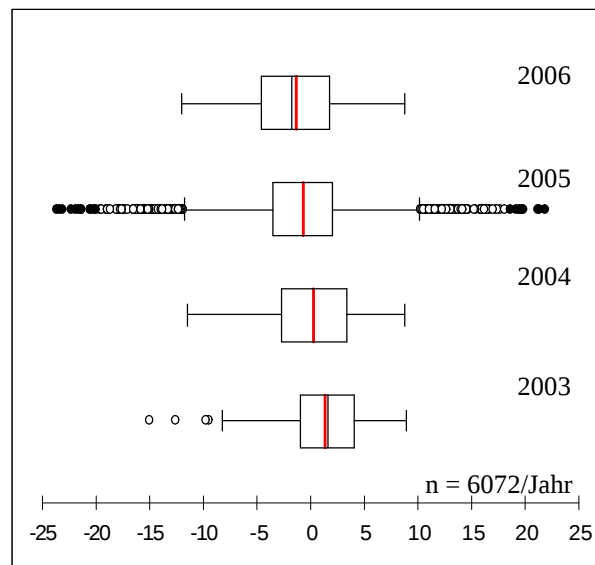


Abbildung 87: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Mit den Boxplots der einzelnen Monate in Eich mit MR wurden analoge Ergebnisse wie im Gesamtzeitraum erzielt. Im den Jahren 2003 und 2005 konnte bei den Monaten April bis Juli weniger Ausreißerwerte dokumentiert werden. Diese müssen daher aus anderen Monaten resultieren (Abbildung 88 bis 90).

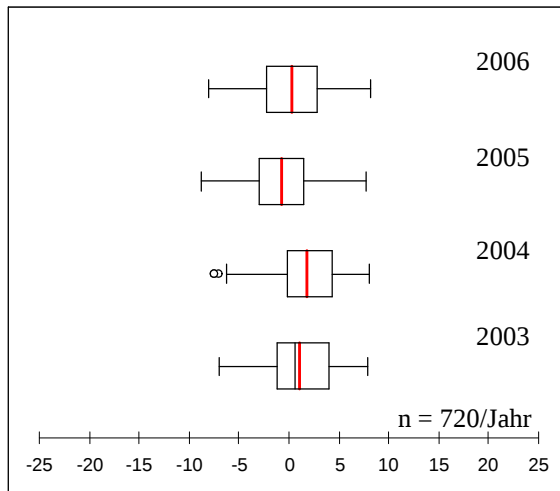


Abbildung 88 Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat April 2003 von bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

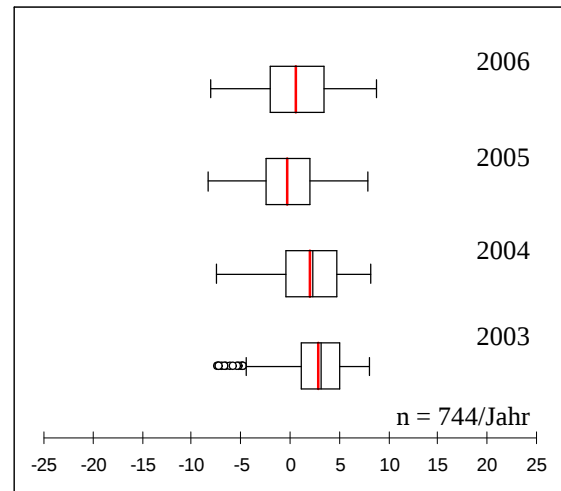


Abbildung 89: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Mai von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

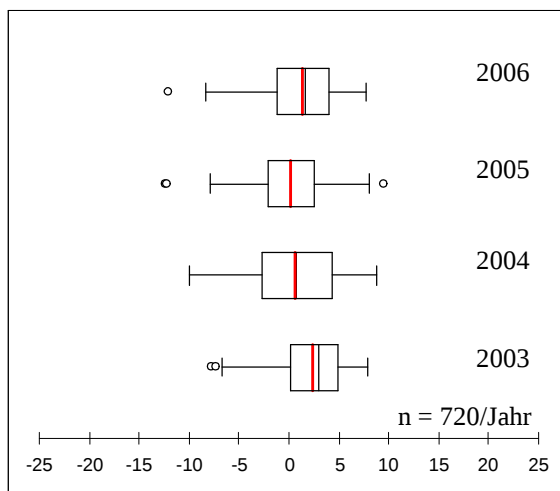


Abbildung 90: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Juni von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

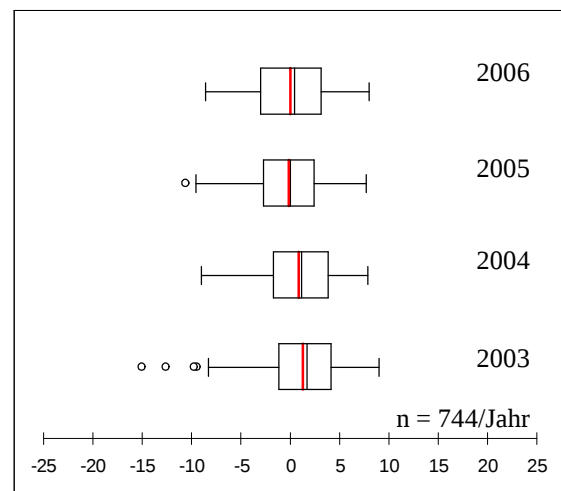


Abbildung 91 Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Juli von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.

Tabelle 26 zeigt die Zusammenfassung der Ergebnisse der Interpolationsberechnungen mit dem MR-Verfahren der relativen Luftfeuchtigkeit der Zonen 12 und 14 in Rheinland-Pfalz. Es konnten dabei keine Unterschiede zwischen den Ergebnisse der beiden Zonen ausgemacht werden. Das Bestimmtheitsmaß aller Stationen lag zwischen 89 und 98 %. Der Mittelwert befand sich zwischen -3,3 % an der Station Riöl 2006 und 4,2 % relativer Luftfeuchte an der Station Mendig 2003 und 2004. Das Maximum wurde in Wahlbach 2004 mit 36,4 % relativer

Luftfeuchte erreicht. Das Minimum lag bei -32 % relativer Luftfeuchte und konnte in Lustadt 2006 festgestellt werden.

Tabelle 26: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem MR-Verfahren in Rheinland-Pfalz.

Jahre	Zone	Station	Bestimmtheits- maß	Steigung	Y-Achsen- abschnitt	Mittel	Max	Min
2003	11	Dreis	97.96	1.017	1.396	-2.7	26.5	-23.7
		Mendig	91.55	0.981	-2.970	4.2	24.3	-19.6
		Wahlbach	96.89	1.009	-1.540	0.9	20.9	-18.6
		Riol	91.30	0.963	2.758	-2.0	15.7	-25.0
	14	Eich	97.18	0.932	2.501	2.2	9.9	-15.1
		Mainz	98.26	1.000	-4.369	4.3	21.3	-20.0
		Lustadt	95.23	1.023	-1.551	0.0	18.9	-18.4
		Schifferstadt	96.38	0.972	1.063	0.8	13.2	-28.9
2004	11	Dreis	95.83	1.027	-2.452	0.2	28.5	-17.1
		Mendig	89.99	1.013	-5.141	4.2	25.9	-16.4
		Wahlbach	96.91	1.089	5.591	-1.3	36.6	-19.0
		Riol	96.99	1.000	-0.261	0.3	30.7	-16.0
	14	Eich	95.78	0.954	1.821	1.4	11.0	-12.5
		Mainz	96.71	0.971	1.965	2.4	35.0	-17.7
		Lustadt	95.48	1.044	-3.948	0.9	27.1	-25.4
		Schifferstadt	96.48	0.988	-0.545	1.3	30.5	-23.8
2005	11	Dreis	95.25	0.978	1.621	0.9	16.0	-18.6
		Mendig	95.14	1.003	-1.875	1.7	26.9	-16.6
		Wahlbach	96.26	1.053	-3.955	-0.1	17.0	-20.3
		Riol	96.98	0.987	0.799	0.1	16.9	-18.4
	14	Eich	97.08	1.029	-1.704	-0.3	22.5	-24.0
		Mainz	96.44	0.973	-0.317	2.2	20.0	-16.9
		Lustadt	96.44	1.082	-4.732	-1.2	26.6	-20.5
		Schifferstadt	95.88	0.992	-1.083	1.7	18.1	-30.2
2006	11	Dreis	96.65	1.002	0.688	-1.0	18.3	-24.0
		Mendig	92.11	0.993	-1.643	2.1	25.3	-22.4
		Wahlbach	91.02	1.045	-1.347	-2.0	19.2	-25.2
		Riol	97.86	1.005	2.942	-3.3	18.3	-19.1
	14	Eich	97.20	0.883	7.589	0.6	8.8	-11.5
		Mainz	96.59	0.918	3.589	2.3	29.1	-27.0
		Lustadt	97.17	1.110	-5.008	-2.5	21.0	-32.3
		Schifferstadt	96.43	1.003	-0.676	1.4	23.9	-22.0

Über die Interpolationen mit dem MR-Verfahren kann gesagt werden, dass sowohl mit der Temperatur als auch mit der relativen Luftfeuchtigkeit plausible Interpolationen in beiden Bundesländern berechnet werden konnten. Die Abweichungen lagen bei der Temperatur im Mittel um 0,4 °C und bei der relativen Luftfeuchtigkeit zwischen 3 und 6 %. Ein Einsatz dieses Verfahren für die Bereitstellung von flächendeckendem Wetterinput zu Berechnung von Schaderregerprognosen ist daher denkbar. Welches der beiden Verfahren geeigneter ist, soll ein direkter Vergleich beider Verfahren zeigen.

4.2.4 Ausschluss der Verfahren

Bei den bisherigen Untersuchungen wurde getestet, inwieweit es möglich ist, die Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit mit den Verfahren K und MR zu interpolieren und damit auf die Fläche umzusetzen. Es wurde gezeigt, dass beide Verfahren für solche Berechnungen geeignet sind, und plausible Ergebnisse berechnet werden können.

Nun sollen die Berechnungsergebnisse zur Nutzung für die landwirtschaftlichen Schaderregerprognosen weiter verwendet werden. Hierzu spielt neben der realitätsnahen Berechnung der Parameter auch die Performanz eine entscheidende Rolle. Im Folgenden wurde ein statistischer Vergleich der Ergebnisse der Interpolation mit K und MR durchgeführt. Dabei sollte herausgefunden werden, ob signifikante Unterschiede zwischen den Interpolationsergebnissen und den gemessenen Werten bestehen. Zudem wurde die Performanz der Interpolationsmethoden untersucht, um das geeignete Verfahren zur Interpolation und zur Anbindung an die Prognosemodelle zu ermitteln.

Zur statistischen Überprüfung der Interpolationsergebnisse und der gemessenen Werte wurde der Student-Test (T-Test) mit gepaarten Stichproben im Softwarepaket SPSS 15.0 durchgeführt. Verglichen wurden die gemessenen Werte (GEM) mit den Interpolationsergebnissen des K-Verfahrens (K), die gemessenen Werte mit den Interpolationsergebnissen des MR-Verfahrens (MR) und die Interpolationsergebnisse des K-Verfahrens mit den Interpolationsergebnissen des MR-Verfahrens. Das Signifikanzniveau wurde auf 95 % gesetzt.

Das Ergebnis der Tests ergab, dass alle Tests in allen Interpolationszonen, aller Jahren und bei allen Testvarianten nicht signifikant waren. Somit sind die Unterschiede, die es zwischen den drei Datensätzen gemessene Werte, Interpolationsergebnisse mit K und Interpolationsergebnisse mit MR gibt zufällig. Das bestätigt auf der einen Seite, dass mit den Interpolationsverfahren realistische Ergebnisse erzielt werden konnten. Auf der anderen Seite ist es aber aufgrund dieser Analyse und der vergleichbaren Abweichungen bei K und MR nicht möglich, einem der beiden Verfahren den Vorzug für die spätere Prognoseberechnung zu geben.

Tabelle 27: T-Test zur Signifikanz des Zusammenhangs der Unterschiede zwischen den Messwerten und den Interpolationsergebnissen von K und MR.

Jahre	Zone	Station	GEM-K		GEM-MR		K-MR	
			T	RF	T	RF	T	RF
2003	5	Baruth	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Cottbus	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Kyritz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Neuruppin	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	11	Dreis	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mendig	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Wahlbach	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Riol	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	14	Eich	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mainz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Lustadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Schifferstadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2004	5	Baruth	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Cottbus	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Kyritz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Neuruppin	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	11	Dreis	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mendig	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Wahlbach	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Riol	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	14	Eich	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mainz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Lustadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Schifferstadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2005	5	Baruth	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Cottbus	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Kyritz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Neuruppin	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	11	Dreis	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mendig	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Wahlbach	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Riol	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	14	Eich	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mainz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Lustadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Schifferstadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
2006	5	Baruth	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Cottbus	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Kyritz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Neuruppin	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	11	Dreis	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mendig	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Wahlbach	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Riol	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
	14	Eich	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Mainz	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Lustadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.
		Schifferstadt	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.	n.s.

n.s. = nicht signifikant GEM = gemessene Werte T = Temperatur RF = relative Luftfeuchte

Da die Berechnungsdauer mit der Anzahl von Messstationen in einer Interpolationszone variiert, wurden für diese Untersuchung 15 Wetterstationen verwendet (Tabelle 14). Zur Bestimmung der Berechnungsdauer beider Verfahren wurden die Daten der Jahre 2003 bis 2006 verwendet. Interpoliert wurde von Januar bis Ende August. Dabei wurde nach der Interpolation von je 24 Stunden die Zeit gestoppt und abgespeichert. Aus den Werten der einzelnen Tage wurde der Mittelwert gebildet. Für das Verfahren K ergab sich eine mittlere Berechnungsdauer für einen Tag von 56 Sekunden pro Tag. Das MR Verfahren benötigte dagegen nur 25 Sekunden für die gleiche Berechnung. Die zeitlichen Unterschiede resultieren aus dem komplizierten mathematischen Algorithmus des K-Verfahrens. Aus Performanzgründen ist daher das MR-Verfahren dem K-Verfahren vorzuziehen.

Bei dem Vergleich der Verfahren K und MR konnte gezeigt, dass statistisch kein Unterschied zwischen den beiden Interpolationsergebnissen ermittelt werden konnte. Bei der Performanz hat sich allerdings gezeigt, dass das MR-Verfahren deutlich schneller rechnet als das K-Verfahren. Deswegen wurde entschieden, die MR als Interpolationsverfahren zu wählen. Die Ergebnisse der Interpolationsberechnungen mit MR wurden anschließend als Input für die Berechnung der Algorithmen der Prognosemodelle SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMPHYT1 und SIMBLIGHT verwendet.

4.3 Prognoseberechnung

Bei der Berechnung der Prognosemodelle wurde untersucht, ob mit interpolierten Wetterdaten vergleichbare oder sogar höhere Prognosegenauigkeiten erzielt werden konnten als mit den Daten einer nahe gelegenen Wetterstation. Hierzu wurde für einen Schlag jeweils eine Prognose mit der dem Schlag zugehörigen virtuellen Station und einer nächstgelegenen Wetterstation berechnet. Untersucht wurden die Abweichungen zueinander sowie die zu den Ergebnissen der Felderhebungen. Zur Validierung standen Boniturdaten von 2000 bis 2006 aus Deutschland zur Verfügung.

4.3.1 SIMLEP3

4.3.1.1 Validierung mit Boniturdaten aus Brandenburg und Rheinland-Pfalz

Für die Betrachtung der Ergebnisse von SIMLEP3 wurde jeweils die Abweichung in Tagen, die sich bei der Berechnung der Prognose zu der Bonitur ergaben herangezogen. Dies wurde exemplarisch an vier Schlägen aus Brandenburg und Rheinland-Pfalz von 2006 dokumentiert. Anschließend wurden die Ergebnisse der einzelnen Schläge zusammengefasst, um eine Bewertung der Berechnungen mit interpolierten (SIMLEP-v) und gemessenen (SIMLEP-m) Wetterdaten vornehmen zu können.

Die beiden Schläge in Brandenburg konnten den Wetterstationen Kyritz bzw. Langenlipsdorf als Referenzstationen zugewiesen werden. Die Schläge befanden sich 6.400 m bzw. 14.000 m von der Wetterstation entfernt. Der Höhenunterschied zwischen den Schlägen und der Referenzstation war gering und betrug maximal 10 m. Bei dem Schlag in Kyritz wurden am 24.Mai2006 die ersten Eigelege bonitiert. Bereits fünf Tage später wurde das Erstauftreten (EA) der L1/2-Larven entdeckt. Der Beginn des Massenauftritts (MA) der Eigelege bzw. der L1/2-Larven erfolgte am 10.06. bzw. am 24.06.. Beim MA betrugen die Unterschiede zwischen SIMLEP-v und SIMLEP-m einen Tag. Beim MA der Eigelege lagen die Prognosen von SIMLEP-v näher am Boniturwert und beim MA der L1/2-Larven die von SIMLEP-m.

Die ersten Eigelege des Schlages in der Nähe der Station Langenlipsdorf im Südwesten von Brandenburg wurden ca. drei Wochen später am 14.06.2006 gefunden. Erste Larven erschienen am 27.06.. Bei beiden EA-Terminen konnte mit SIMLEP-v eine Prognose mit einen Tag geringeren Abweichungen berechnet werden. Diese war aber 6 bzw. 7 Tage zu früh. Der Beginn des MA der Eigelege wurde sowohl bei SIMLEP-m als auch bei SIMLEP-v um 5 Tage zu spät berechnet. Beim Beginn des MA der L1/2-Larven wurde eine Prognose

ohne Abweichungen zu SIMLEP-m berechnet. Das Ergebnis von SIMLEP-v lag einen Tag später.

Die beiden Schläge in Rheinland-Pfalz wurden den Referenzstationen Mühlheim-Kärlich und Eich zugeordnet. Diese lagen 4.200 m bzw. 3.480 m von der Messstation entfernt. Das Gelände besitzt hier teilweise eine höhere Geländerauhigkeit, was durch den Höhenunterschied zwischen dem Schlag und der Wetterstation von 120 m bzw. 5 m verdeutlicht wird. Bei dem Schlag mit der Referenzstation Mühlheim-Kärlich lag das Ergebnis von SIMLEP-m mit 2 Tagen zu später Prognose beim EA L1/2 um einen Tag näher am EA als das Ergebnis von SIMLEP-v. Beim EA der L3/4-Larven wurde zu früh prognostiziert. Das Ergebnis von SIMLEP-v war 11 Tage und das von SIMLEP-m 13 Tage zu früh. Für den Beginn des MA der Eigelege wurde eine zu späte Prognose von 4 Tagen mit SIMLEP-m und 6 Tagen mit SIMLEP-v ermittelt. Die Ergebnisse für den Beginn des MA der L1/2-Larven lag bei beiden Berechnungen 4 Tage zu spät und war somit identisch.

Beim vierten Schlag in der Nähe der Wetterstation Eich, waren alle Prognosen mit SIMLEP3 zu früh. Dabei betrugen die Unterschiede zwischen 0 und 3 Tagen. Das EA der L1/2-Larven wurde bei beiden Berechnungen 12 Tage zu früh prognostiziert. Beim EA der L3/4-Larven lag das Ergebnis von SIMLEP-v mit 11 Tagen um drei Tage näher am Boniturdatum als mit SIMLEP-m, war aber zu früh. Für den Beginn des MA der Eigelege war die Prognose mit SIMLEP-m und mit SIMLEP-v 1 bzw. 2 Tage zu früh. Die Prognose des Beginns des MA der L1/2-Larven verhält sich ähnlich wie die Prognose des EA der L3/4. Hier lagen die Abweichungen mit SIMLEP-v um 3 Tage näher an den Boniturdaten. Die Abweichungen lagen 11 bzw. 8 Tage früher als die Bonitur (Tabelle 28).

Tabelle 28: Vergleich der Kartoffelkäferbonituren mit den Prognoseergebnisse von SIMLEP3 in den Anbaugebieten in Brandenburg und Rheinland-Pfalz 2006.

Land	Station	Erstfund Eigelege	Anzahl Eigelege	Datenherkunft	EA L1/2	EA L3/4	MA EI Beginn	MA EI Ende	MA L1/2 Beginn	MA L1/2 Ende
BB	Kyritz	24.05.	3	Bonitiert	29.05.	19.06.	10.06.	16.06.	24.06.	30.06.
				Wet.	10.06.	17.06.	06.06.	14.06.	18.06.	25.06.
				Bon.-Wet.	-12	2	4	2	6	5
				Vir.	10.06.	17.06.	07.06.	15.06.	17.06.	24.06.
				Bon.-Vir.	-12	2	3	1	7	6
	Langenlippsdorf	14.06.	1	Bonitiert	27.06.	05.07.	20.06.	24.06.	27.06.	27.06.
				Wet.	19.06.	26.06.	25.06.	03.07.	27.06.	04.07.
				Bon.-Wet.	8	9	-5	-9	0	-7
				Vir.	21.06.	28.06.	25.06.	03.07.	28.06.	05.07.
				Bon.-Vir.	6	7	-5	-9	-1	-8
RP	Mühlheim-Kärlich	25.08.	1	Bonitiert	06.06.	27.06.	30.05.	03.06.	12.06.	28.06.
				Wet.	08.06.	14.06.	03.06.	11.06.	16.06.	23.06.
				Bon.-Wet.	-2	13	-4	-8	-4	5
				Vir.	09.06.	16.06.	05.06.	13.06.	16.06.	23.06.
				Bon.-Vir.	-3	11	-6	-10	-4	5
	Eich	11.05.	2	Bonitiert	29.05.	14.06.	21.05.	14.06.	13.06.	18.06.
				Wet.	17.05.	31.05.	20.05.	28.05.	31.05.	07.06.
				Bon.-Wet.	12	14	1	17	13	11
				Vir.	17.05.	03.06.	19.05.	27.05.	03.06.	10.06.
				Bon.-Vir.	12	11	2	18	10	8

Bon. = Bonitiert Wet. = Wetterstation Vir. = virtuelle Station

Um einen Überblick aller Schläge zu erhalten, wurden die Abweichungen der Ergebnisse von SIMLEP-m und SIMLEP-v nach dem Bewertungsschema für SIMONTO (Tabelle 29) klassifiziert und in Tabelle 30 dargestellt (ROßBERG et al. 2005).

Tabelle 29: Bewertungsschema für SIMLEP3 (ROßBERG et al. 2005).

0 = Tage Abweichung = 4	(+)	sehr gut
4 < Tage Abweichung = 7	(o)	akzeptabel
7 < Tage Abweichung	(-)	unzureichend

Die unterschiedliche Anzahl von Schlägen pro Prognosedatum resultiert aus unvollständigen Boniturdaten. Bei der Betrachtung aller Schläge wurden nur geringe Unterschiede zwischen den Ergebnissen von SIMLEP3-m und SIMLEP3-v festgestellt. Diese lagen bei maximal zwei Schlägen Abweichung pro Klasse.

Zusammenfassend kann gesagt werden, dass bei den Ergebnissen mit SIMLEP-v insgesamt weniger „unzureichende“ Schläge erreicht werden konnten als bei SIMLEP-m. Die

Ergebnisse für den „akzeptablen“ Abweichungsbereich waren mit je 47 Schlägen gleich. In der Klasse der „sehr guten“ Abweichungen wurden bei SIMLEP-v drei Schläge mehr in diese Klasse eingeordnet.

Festzuhalten bleibt aber, dass mit SIMLEP-v plausible Schaderregerprognosen berechnet werden konnten, die mindestens die gleiche Treffsicherheit aufweisen, wie die bisherigen Prognoseberechnungen mit SIMLEP-m.

Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse von SIMLEP 3 aus den Jahren 2000, 2001, 2004, 2006 und 2007.

Methode	Anzahl Schläge	EA L1/2	EA L3/4	Ma. Eigelge Beginn	Ma. Eigelege Ende	Ma. L1/2 Beginn	Ma. L1/2 Ende	gesamt
		44	40	33	39	35	36	227
Messstationen	sehr gut	14	12	20	16	17	13	92
	akzeptabel	11	10	6	6	6	8	47
	unzureichend	19	18	7	17	12	15	88
virtuelle Stationen	sehr gut	15	14	18	18	17	13	95
	akzeptabel	12	8	8	2	8	9	47
	unzureichend	17	18	7	19	10	14	85

4.3.2 SIMPHYT3

4.3.2.1 Statistische Auswertung der Prognoseergebnisse von SIMPHYT3

Zur Beurteilung der Ergebnisse des Modells SIMPHYT3 standen keine Validierungsdaten zur Verfügung. Aus diesem Grund wurde analog zu der Vorgehensweise der Validierung der Temperatur- und Luftfeuchteberechnungen verfahren und eine rein statistische Auswertung vorgenommen. Dabei wurde immer eine Prognose mit SIMPHYT3 für den Standort einer Wetterstation berechnet, einmal mit gemessenen Wetterdaten (SIMPHYT3-m) und einmal mit interpolierten Wetterdaten (SIMPHYT3-v). Bei der Interpolation war darauf zu achten, dass die gemessenen Wetterdaten dieser Stationen nicht mit in den Interpolationsprozess integriert waren. Am Beispiel der Station Eich 2003 in Rheinland-Pfalz wurden die Ergebnisse dieser Analyse dargestellt.

Das Ergebnis der Prognoseberechnungen von SIMPHYT3 ist ein täglicher Wert für den Infektionsdruck und den PEW-Wert vom 1. April bis zum 31. August. Da für eine Beratung von *P. infestans* der Zeitraum vom 01. Juni bis zum 15. August entscheidend ist, wurde bei den nachfolgenden Darstellungen dieser Zeitraum dargestellt.

Mit Hilfe von Diagrammen lassen sich Infektionsdruck und PEW-Wert anschaulich darstellen. Zudem sollte der Einfluss der meteorologischen Parameter Temperatur und relative

Luftfeuchte herausgestellt werden, so dass auch mit gemischten Wetterdaten gerechnet wurde. SIMPHYT3-TT ist demnach der Infektionsdruck mit gemessenen Temperaturen und berechneter relativer Luftfeuchte und SIMPHYT3-RF mit gemessener relativer Luftfeuchte und berechneter Temperaturen.

Beim Infektionsdruck der Station Eich waren je zwei der vier Kurven fast identisch. Dies war zum einen der Infektionsdruck von SIMPHYT3-v und SIMPHYT3-TT und zum anderen der Infektionsdruck von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-RF. Festzuhalten bleibt, dass bei allen vier Berechnungen in Bezug auf die Steigung identische Kurven gezeichnet werden konnten. Die Abweichungen der Kurven lagen dabei im Maximum bei 0,5 und somit bei ein bis zwei Infektionsdruckklassen (Abbildung 91).

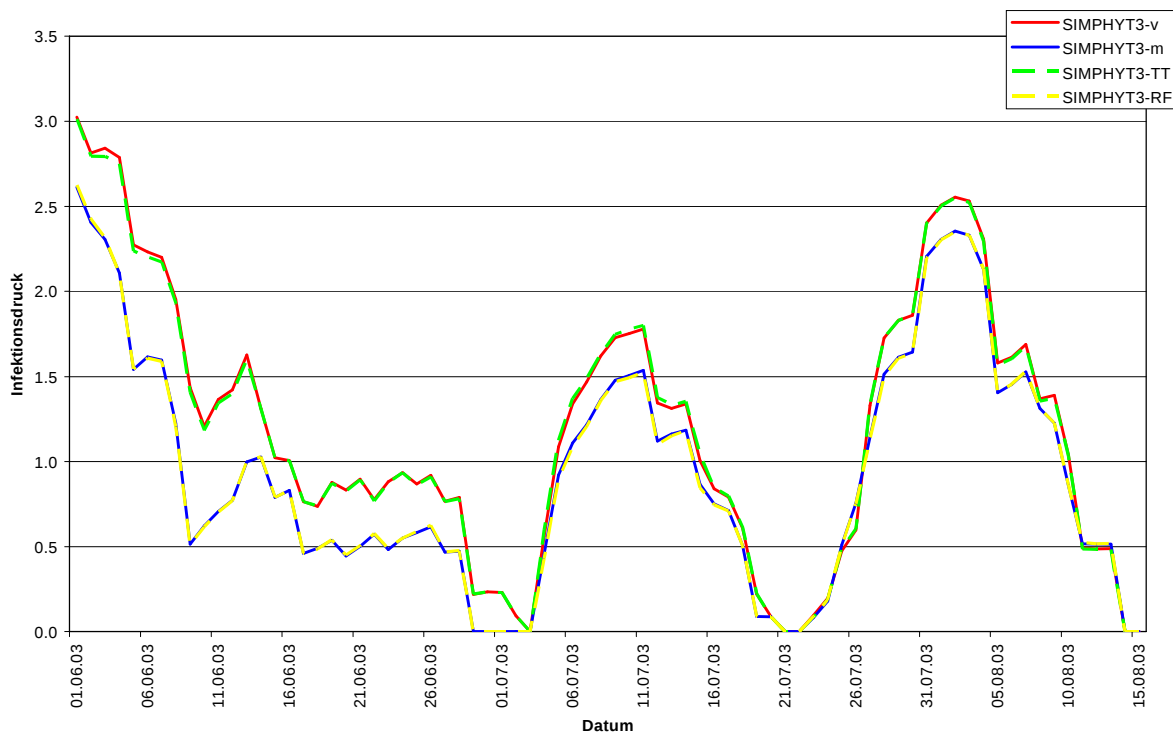


Abbildung 92: Infektionsdruck von SIMPHYT3 in Eich 2003 mit unterschiedlichem Wetterinput.

Beim PEW-Wert der Station Eich 2003 (Abbildung 92) konnte ein analoges Bild wie beim Infektionsdruck beobachtet werden. Auch hier wiesen jeweils zwei der vier Balken die gleichen Werte auf. Dies waren wieder SIMPHYT3-v und SIMPHYT3-TT bzw. SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-RF. Dabei lagen die Abweichungen zwischen diesen Balken bei 0 und 0,21.

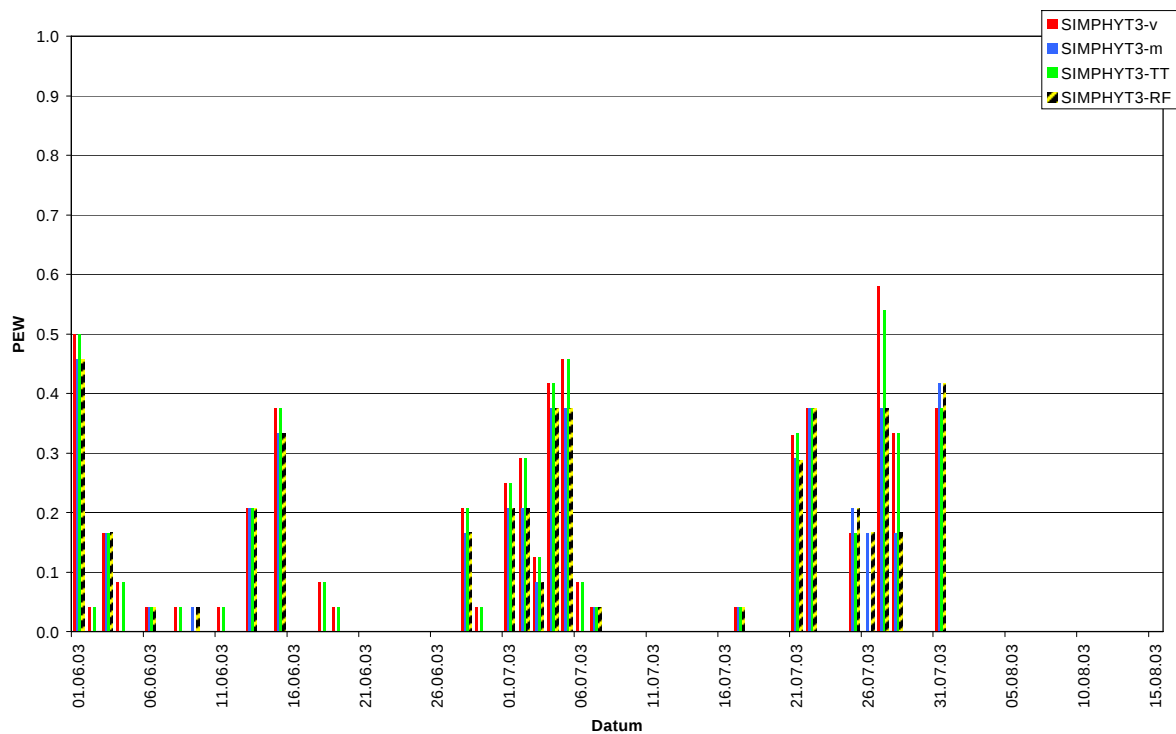


Abbildung 93: PEW-Wert von SIMPHYT3 in Eich 2003 mit unterschiedlichem Wetterinput.

Die Ergebnisse von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v wurden mit Hilfe der linearen Regression auf statistischen Zusammenhang analysiert. Dabei wurden der Infektionsdruck und der PEW-Wert gesondert betrachtet.

Mit dem Infektionsdruck konnte an der Station Eich 2003 ein Bestimmtheitsmaß von 94,3 % berechnet werden. Die Steigung der Regressionsgeraden betrug 0.87 (Abbildung 94).

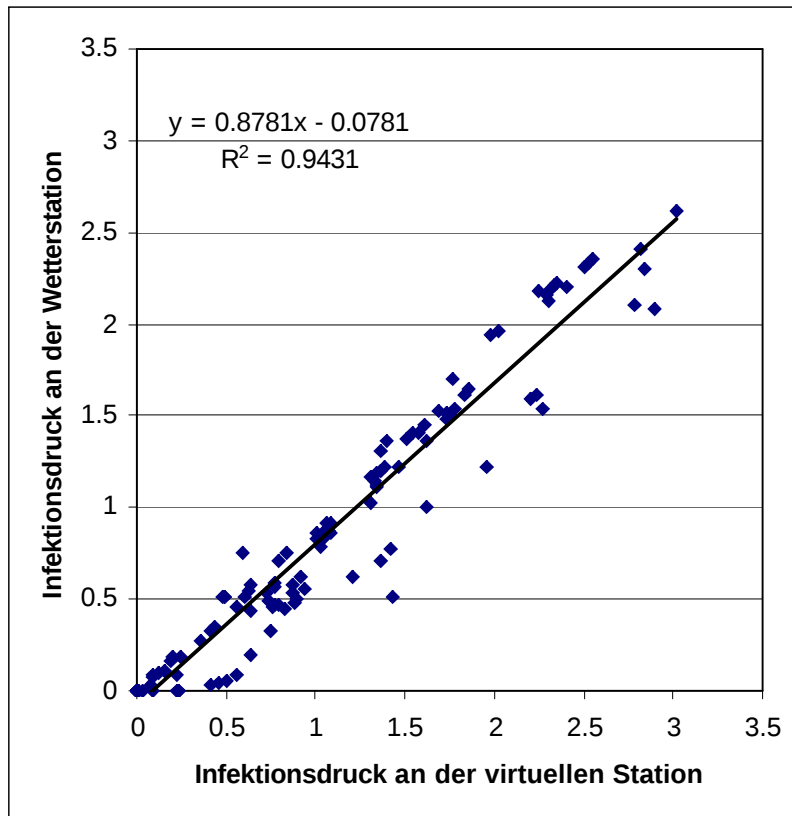


Abbildung 94: Zusammenhang zwischen dem Infektionsdruck von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich 2003 (n =124).

Beim PEW-Wert lag das Bestimmtheitsmaß mit 91,3 % niedriger als beim Infektionsdruck. Da 75 % aller PEW-Werte sowohl bei den Ergebnissen mit gemessenen Wetterdaten als auch mit interpolierten Wetterdaten 0 waren, liegen 80 Punkte an der Stelle [0,0] in Abbildung 95 übereinander, wodurch ein niedriger Y-Achsenabschnitt zustande kommen.

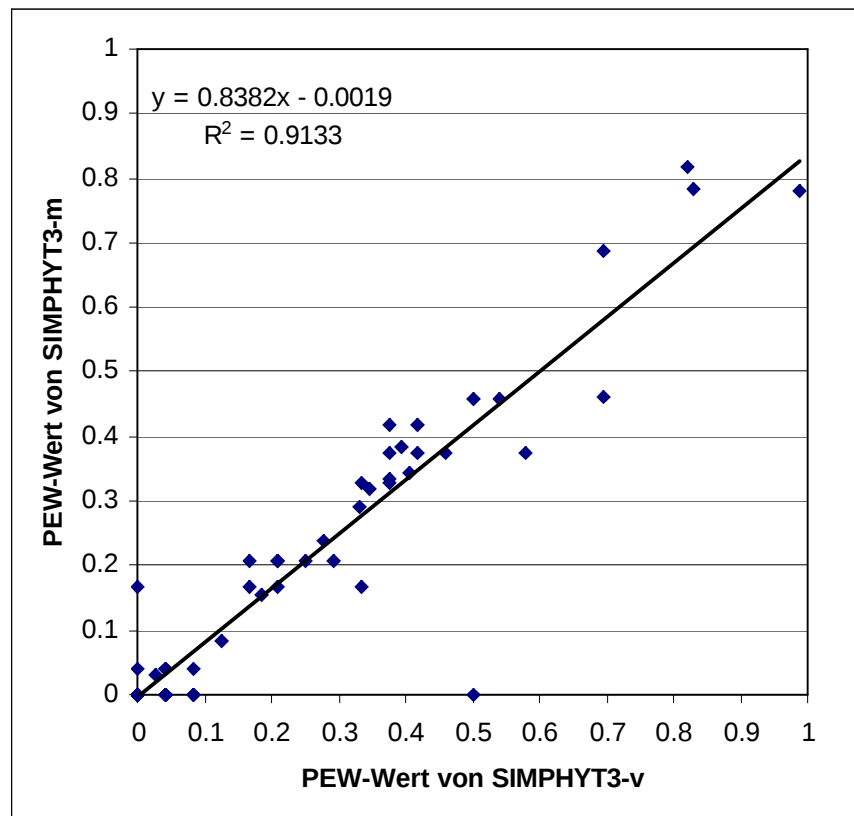


Abbildung 95: Zusammenhang zwischen dem PEW-Wert von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich 2003 (n=124).

Die Abweichungen des Infektionsdrucks und des PEW-Wertes von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v wurden an der Station Eich 2003 bis 2006 in Boxplots dargestellt (Abbildung 96 und Abbildung 97). Beim Infektionsdruck lagen die 99 % Whisker aller Jahre zwischen -0,5 und 0,6. Das erste und das dritte Quartil der Boxplots wurden mit Werten zwischen -0,2 und 0,3 berechnet. Die Mittelwerte aller Jahre liegen zwischen -0,1 und 0,2.

Für die geringen Abweichungen des PEW-Werts war es kaum möglich, lesbare Boxplots zu zeichnen. Der untere und obere Whisker lag in allen Jahren deutlich unter $\pm 0,1$. Die Quartile besitzen eine Amplitude von unter 0,05. Der Mittelwert der Abweichungen ist null. Die Ausreißerwerte die beim PEW-Wert ermittelt werden konnten liegen im Maximum bei -0,4 bzw. bei 0,3.

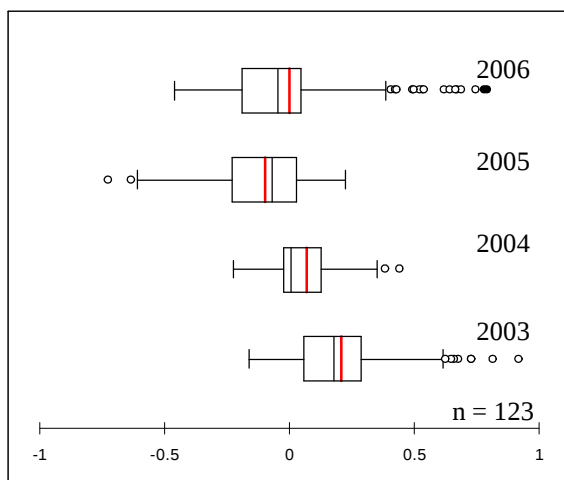


Abbildung 96: Box-Whisker-Plot der Abweichungen des Infektionsdrucks zwischen SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich.

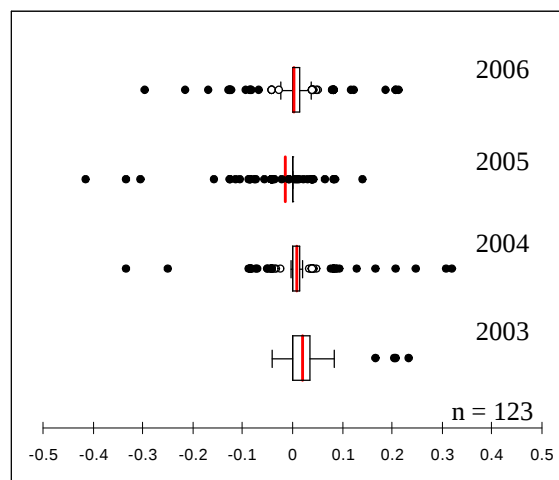


Abbildung 97: Box-Whisker-Plot der Abweichungen des PEW-Werts zwischen SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich.

Zur statistischen Analyse der Werte des Infektionsdrucks und des PEW-Werts wurde ein χ^2 -Test auf Normalverteilung durchgeführt. Anschließend wurden die Verteilungen mit Hilfe des T-Tests auf Signifikanz überprüft. Die Ergebnisse dieser Untersuchung sind für den Infektionsdruck in Tabelle 31 und für den PEW-Wert in Tabelle 32 zu finden. Die Berechnungen wurden in den Bundesländern Brandenburg und Rheinland-Pfalz für die Jahre 2000 bis 2006 an den analogen Standorten wie bei der Interpolationsvalidierung (siehe Kapitel 4.2 Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte) durchgeführt.

Die Berechnungen für den χ^2 -Test für alle Stationen und alle Jahre ergaben, dass alle Verteilungen normalverteilt waren (Tabelle 31). Das Ergebnis des T-Tests zeigte, dass die Unterschiede zwischen allen Verläufskurven nicht signifikant waren, dass heißt, die Unterschiede zwischen den Ergebnissen von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v bei allen Stationen zufällig waren. Mit der linearen Regression wurden Bestimmtheitsmaße zwischen 75 und 98 % ermittelt (Tabelle 31).

Die Ergebnisse des PEW-Wertes zeigen ein analoges Bild, wie die des Infektionsdrucks (Tabelle 32). Auch hier wurde die Normalverteilung für alle Jahre und alle Verläufe durch den χ^2 -Test bestätigt. Der T-Test hat ergeben, dass die Unterschiede zwischen den PEW-Werten zufällig waren und somit statistisch gleiche Verläufe berechnet wurden. Das Bestimmtheitsmaß aller Stationen und aller Jahre lag dabei zwischen 77 und 96 %.

Tabelle 31: Ergebnisse des χ^2 -Test, des T-Tests und der linearen Regression für den Infektionsdruck mit berechneten und gemessenen Wetterdaten.

Jahre	Zone	Station	χ^2	T-Test	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt
2003	5	Baruth	n	n.s.	87.73	1.062	0.047
		Cottbus	n	n.s.	76.18	0.955	0.310
		Kyritz	n	n.s.	97.64	1.075	-0.037
		Neuruppin	n	n.s.	85.66	1.138	-0.022
	12	Dreis	n	n.s.	87.66	1.143	-0.104
		Mendig	n	n.s.	75.43	0.643	-0.024
		Wahlbach	n	n.s.	86.01	0.821	0.138
		Riol	n	n.s.	94.66	0.945	0.084
	14	Eich	n	n.s.	94.31	0.878	-0.078
		Mainz	n	n.s.	95.70	0.879	-0.075
		Lustadt	n	n.s.	90.10	1.104	-0.176
		Schifferstadt	n	n.s.	97.31	0.960	0.012
2004	5	Baruth	n	n.s.	88.92	0.879	-0.035
		Cottbus	n	n.s.	95.85	1.081	-0.103
		Kyritz	n	n.s.	95.00	0.983	0.026
		Neuruppin	n	n.s.	97.71	1.107	-0.203
	12	Dreis	n	n.s.	98.93	1.051	-0.233
		Mendig	n	n.s.	97.07	1.128	-0.556
		Wahlbach	n	n.s.	92.31	0.902	0.281
		Riol	n	n.s.	97.33	0.874	0.233
	14	Eich	n	n.s.	90.10	0.935	0.046
		Mainz	n	n.s.	97.33	0.868	-0.046
		Lustadt	n	n.s.	95.50	0.990	-0.088
		Schifferstadt	n	n.s.	98.59	0.969	-0.047
2005	5	Baruth	n	n.s.	85.09	0.932	-0.202
		Cottbus	n	n.s.	93.16	1.016	-0.212
		Kyritz	n	n.s.	97.83	0.925	0.160
		Neuruppin	n	n.s.	97.59	1.126	-0.042
	12	Dreis	n	n.s.	93.92	0.913	0.178
		Mendig	n	n.s.	89.62	0.823	0.026
		Wahlbach	n	n.s.	93.76	0.968	-0.064
		Riol	n	n.s.	93.39	0.868	0.183
	14	Eich	n	n.s.	95.26	1.007	0.090
		Mainz	n	n.s.	92.61	0.912	-0.019
		Lustadt	n	n.s.	93.03	0.963	0.136
		Schifferstadt	n	n.s.	95.44	1.024	-0.115
2006	5	Baruth	n	n.s.	91.03	1.016	-0.040
		Cottbus	n	n.s.	98.38	0.987	-0.052
		Kyritz	n	n.s.	96.75	0.966	0.100
		Neuruppin	n	n.s.	96.76	0.995	-0.003
	12	Dreis	n	n.s.	98.20	0.982	-0.110
		Mendig	n	n.s.	94.62	0.850	0.012
		Wahlbach	n	n.s.	95.57	0.927	0.275
		Riol	n	n.s.	98.62	1.012	0.180
	14	Eich	n	n.s.	91.59	1.006	-0.004
		Mainz	n	n.s.	94.40	0.919	-0.066
		Lustadt	n	n.s.	94.42	1.074	0.145
		Schifferstadt	n	n.s.	97.12	0.934	0.126

n = normalverteilt ns = nicht signifikant

Tabelle 32: Ergebnisse des χ^2 -Test, des T-Tests und der linearen Regression für den PEW-Wert mit berechneten und gemessenen Wetterdaten.

Jahre	Zone	Station	χ^2	T-Test	Bestimmtheitsmaß	Steigung	Y-Achsenabschnitt
2003	5	Baruth	n	n.s.	82.44	0.935	0.008
		Cottbus	n	n.s.	80.00	1.040	0.018
		Kyritz	n	n.s.	94.25	1.020	0.003
		Neuruppin	n	n.s.	80.57	0.999	0.014
	12	Dreis	n	n.s.	84.96	1.001	0.038
		Mendig	n	n.s.	78.01	0.745	-0.015
		Wahlbach	n	n.s.	90.50	0.895	-0.002
		Riol	n	n.s.	87.42	0.866	0.011
	14	Eich	n	n.s.	91.33	0.838	-0.002
		Mainz	n	n.s.	88.68	0.828	-0.009
		Lustadt	n	n.s.	77.68	0.917	0.008
		Schifferstadt	n	n.s.	86.69	0.959	0.005
2004	5	Baruth	n	n.s.	83.87	0.764	0.004
		Cottbus	n	n.s.	84.14	0.881	0.021
		Kyritz	n	n.s.	91.60	0.997	0.006
		Neuruppin	n	n.s.	93.19	1.007	0.003
	12	Dreis	n	n.s.	94.31	0.943	-0.015
		Mendig	n	n.s.	83.68	0.849	-0.001
		Wahlbach	n	n.s.	96.44	0.973	0.008
		Riol	n	n.s.	92.70	0.902	0.003
	14	Eich	n	n.s.	87.72	0.915	0.006
		Mainz	n	n.s.	85.86	0.792	-0.001
		Lustadt	n	n.s.	86.45	0.989	-0.004
		Schifferstadt	n	n.s.	88.37	0.920	0.002
2005	5	Baruth	n	n.s.	88.82	0.792	0.001
		Cottbus	n	n.s.	94.00	0.896	-0.001
		Kyritz	n	n.s.	93.34	1.005	0.012
		Neuruppin	n	n.s.	90.48	0.979	0.004
	12	Dreis	n	n.s.	93.03	0.917	0.002
		Mendig	n	n.s.	90.75	0.849	-0.001
		Wahlbach	n	n.s.	86.58	0.891	0.003
		Riol	n	n.s.	87.11	0.875	0.001
	14	Eich	n	n.s.	88.29	1.041	0.011
		Mainz	n	n.s.	87.47	0.850	0.004
		Lustadt	n	n.s.	81.22	0.948	0.017
		Schifferstadt	n	n.s.	90.89	0.956	0.000
2006	5	Baruth	n	n.s.	84.97	0.921	0.011
		Cottbus	n	n.s.	89.75	0.899	0.001
		Kyritz	n	n.s.	95.58	0.998	0.007
		Neuruppin	n	n.s.	94.07	0.975	0.002
	12	Dreis	n	n.s.	90.88	0.902	0.001
		Mendig	n	n.s.	78.11	0.789	0.004
		Wahlbach	n	n.s.	90.03	0.987	0.027
		Riol	n	n.s.	90.13	1.076	0.025
	14	Eich	n	n.s.	85.51	0.936	0.008
		Mainz	n	n.s.	88.33	0.875	-0.003
		Lustadt	n	n.s.	87.43	0.994	0.043
		Schifferstadt	n	n.s.	93.67	0.995	0.003

n = normalverteilt n.s. = nicht signifikant

4.3.2.2 Darstellung der Verteilung des Infektionsdrucks in Eich 2003

Für die Darstellung des Infektionsdrucks von SIMPHYT3 wurde ein Gebiet (Eicher Knie) in Rheinland-Pfalz ausgewählt. Es befindet sich zwischen Alzey, Mainz und Worms und hat eine Ausdehnung von etwa 25 km. Der Höhenunterschied in diesem Gebiet lag bei 80 m. Das Gebiet wird naturräumlich durch die Oberrheinische Tiefebene und das Rheinhessische Tafel- und Hügelland getrennt. Für die nachfolgenden Darstellungen wurde ein Zeitraum mit hoher Dynamik des Infektionsdrucks vom 25. Mai bis zum 09. Juni 2003 ausgewählt.

Am ersten Tag (25.05.) wurde ein Infektionsdruck zwischen 0 und 2,5 berechnet (Abbildung 98). Zu erkennen war, dass der Infektionsdruck mit < 2 an den virtuellen Stationen im Süden des Gebietes an diesem Tag kleiner war als im übrigen Gebiet. Abbildung 99 zeigt die Situation am folgenden Tag. Bis auf 8 virtuelle Stationen hatten alle einen Infektionsdruck < 2 . Diese wechselten an den nachfolgenden Tagen auch in diese Infektionsdruckklasse (Abbildung 100 und 101), bis am 28. Mai (Abbildung 101) alle virtuellen Stationen der Klasse < 2 angehörten. Die Situation hielt drei Tage an. Am 01.06 (Abbildung 102) kam es zu einer Erhöhung des Infektionsdrucks von Osten und von Norden her. Für diese virtuellen Stationen wurden ein Infektionsdruck zwischen 2,6 und 3 berechnet. Die höher gelegenen virtuellen Stationen sowie die Stationen im Süden wiesen einen Infektionsdruck von 2,1 bis 2,5 auf. Am 02.06. nahm der Infektionsdruck im gesamten Gebiet zu. Die virtuellen Stationen, die bisher im Bereich zwischen 2,1 und 2,5 lagen, wurden eine Infektionsdruckklasse höher eingestuft. Am östlichen Rand des Gebietes war ein Streifen von ca. sechs Kilometern zu erkennen, in dem ein Infektionsdruck zwischen 3,1 und 3,5 erreicht wurde (Abbildung 103). In den folgenden Tagen nahm der Infektionsdruck wieder ab (Abbildung 104 und 105). Am 03. und 04. Juni hatten die höher gelegenen virtuellen Stationen im Westen bereits einen Infektionsdruck von unter 2,5 wogegen die restlichen Stationen einen Infektionsdruck von maximal 3 aufwiesen. Vom 05. Juni bis zum 07. Juni wurden alle virtuellen Stationen um eine bzw. zwei Infektionsdruckklassen heruntergestuft (Abbildung 106 und 107). Am 08. Juni war der Infektionsdruck so stark gefallen, dass bis auf wenige virtuelle Stationen im Grenzbereich zwischen den tiefer und den höher liegenden virtuellen Stationen für alle Stationen ein Infektionsdruck < 2 berechnet wurde (Abbildung 108). Am letzten Tag des Betrachtungszeitraums sank der Infektionsdruck weiter, so dass alle Stationen < 2 eingeordnet wurden (Abbildung 109). Mit diesem Infektionsdruckverlauf konnte gezeigt werden, dass schon bei geringen Entfernungs- und Geländeunterschieden, bedingt durch das Geländeklima, Änderungen im Infektionsdruck zu beobachten sind.

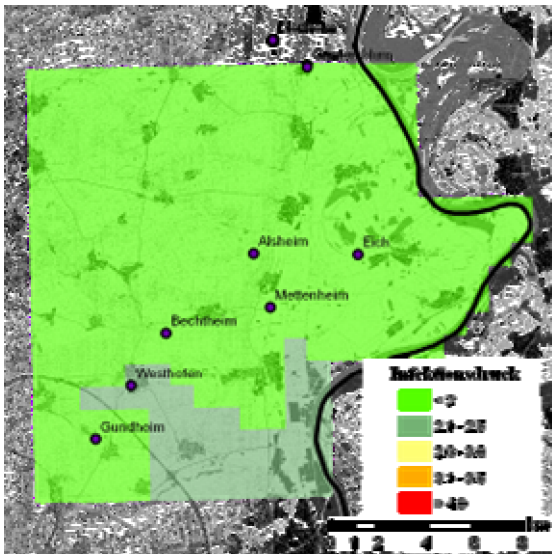


Abbildung 98: Infektionsdruck am Eicher Knie am 25.05.2003.

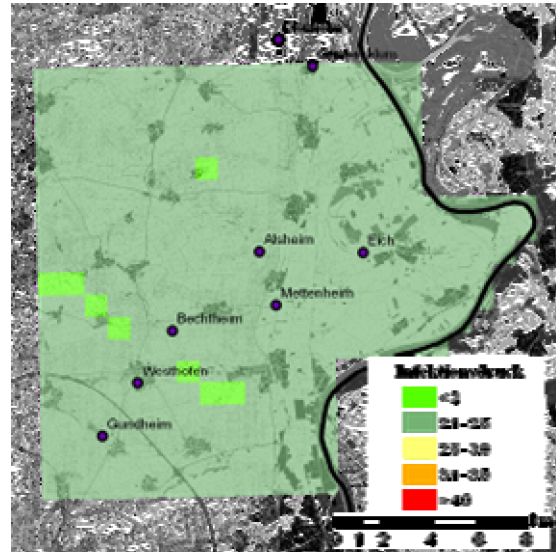


Abbildung 99: Infektionsdruck am Eicher Knie am 26.05.2003.

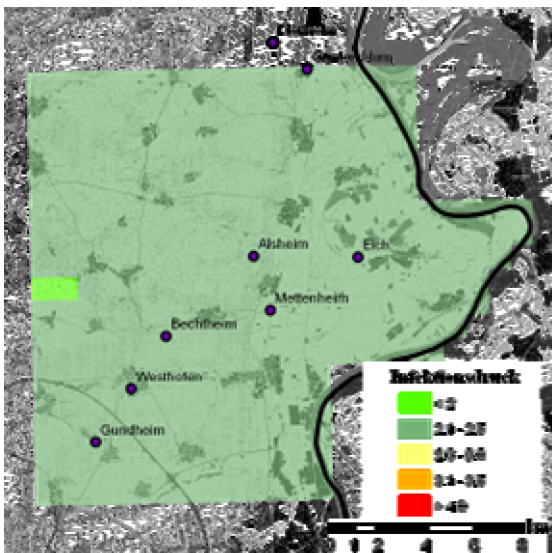


Abbildung 100: Infektionsdruck am Eicher Knie am 27.05.2003.

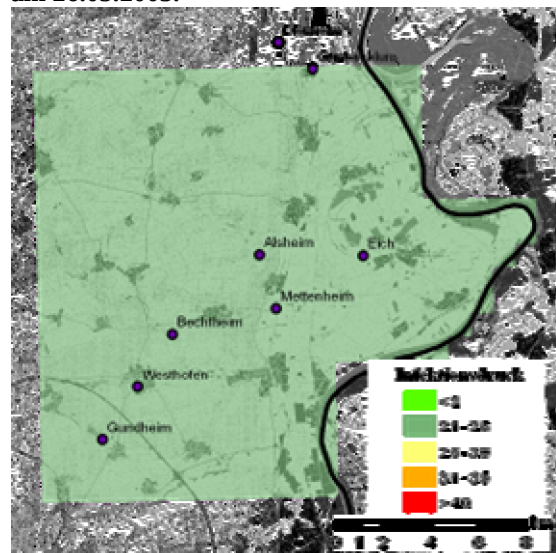


Abbildung 101: Infektionsdruck am Eicher Knie vom 28.05. bis zum 31.05.2003.

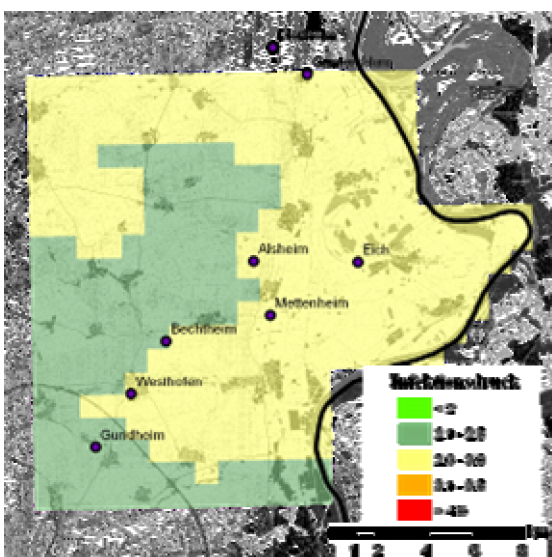


Abbildung 102: Infektionsdruck am Eicher Knie am 01.06.2003.

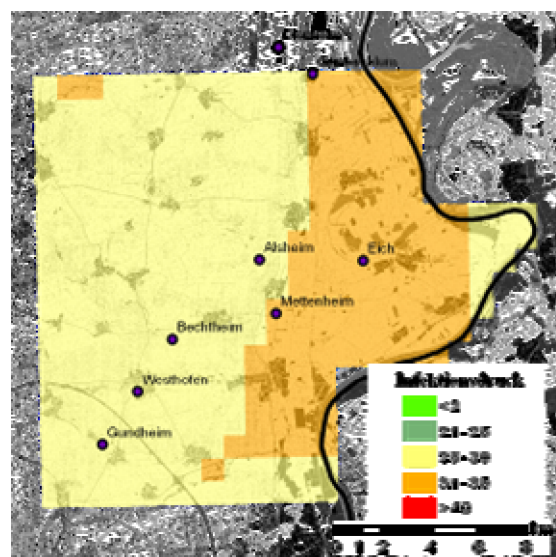
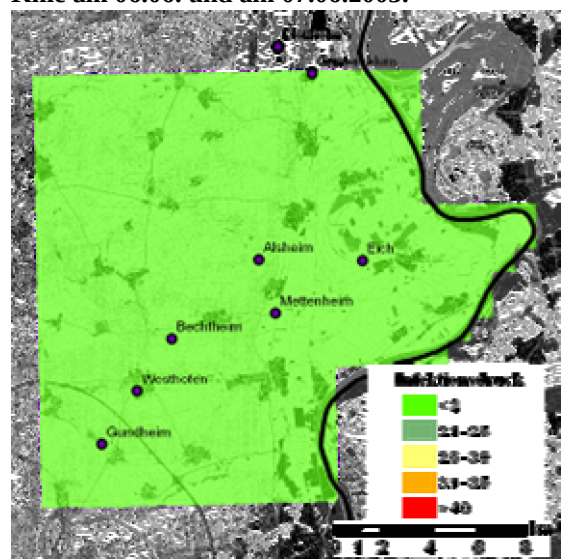
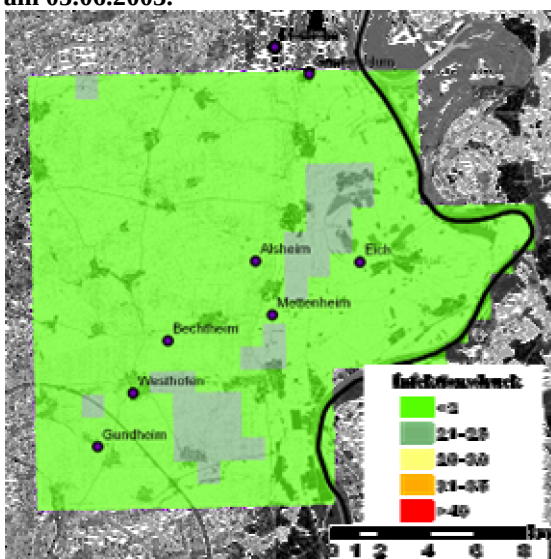
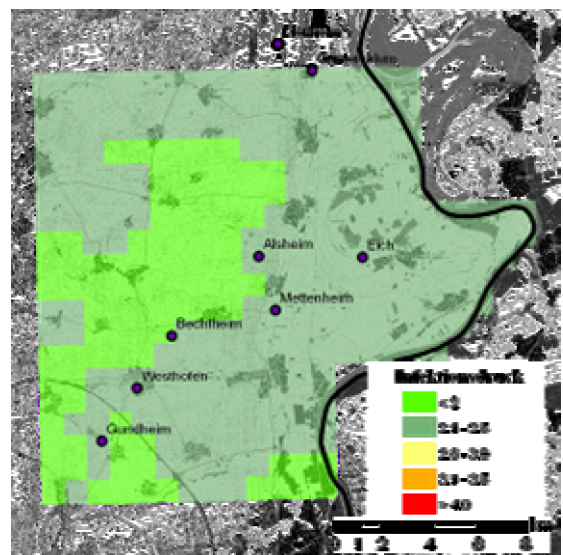
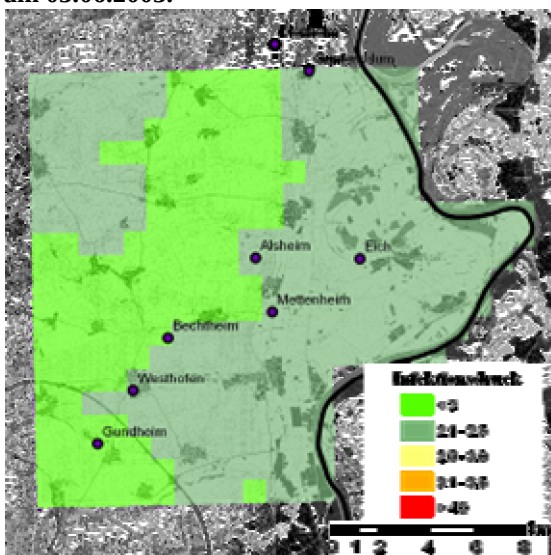
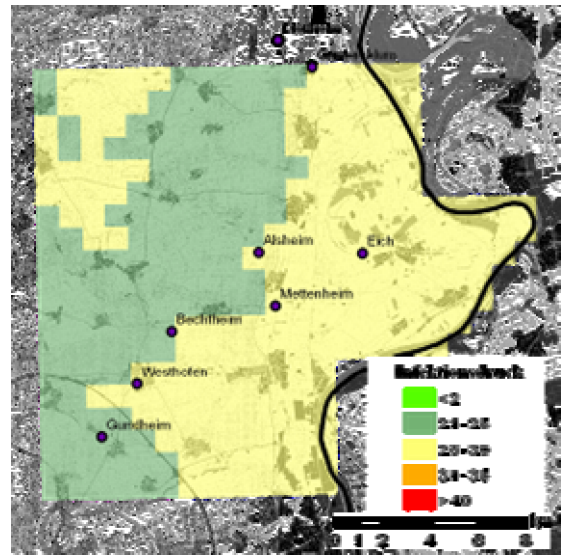
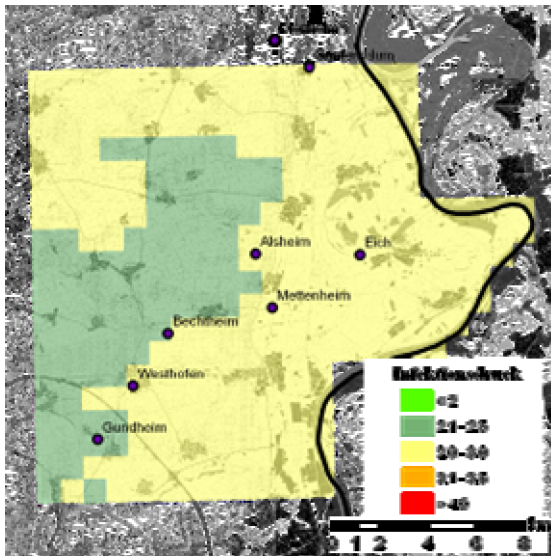


Abbildung 103: Infektionsdruck am Eicher Knie am 02.06.2003.



4.3.3 *SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1*

4.3.3.1 Schlagspezifische Betrachtung an der Wetterstation Eich 2001 und 2002

Die Validierung der Ergebnisse der Modelle *SIMBLIGHT1* und *SIMPHYT1* wurden zusammen durchgeführt. Zur Auswertung der Erstauftrittsberechnungen mit *SIMBLIGHT1* und *SIMPHYT1* mit gemessenen und interpolierten Wetterdaten (*SIMBLIGHT-m* und *SIMBLIGHT-v* bzw. *SIMPHYT1-m*, *SIMPHYT1-v*) wurde zunächst eine Einzelschlagbetrachtung durchgeführt. Hierzu wurden die Daten der Bonituren aus Rheinland-Pfalz von 2000 bis 2003 verwendet. Dieser Datensatz wurde nach Schlägen durchsucht, bei denen das bonitierte EA vor dem ersten Termin für Fungizidapplikationen lag. Dies war nötig, um eine ungestörte Epidemie des Schaderregers auf dem Feld beobachten zu können. Dabei konnten insgesamt neun Schläge extrahiert werden. Davon lagen fünf Schläge im Bereich der Wetterstation Eich und vier Schläge im Bereich der Wetterstation Schifferstadt.

In Abbildung 110 wurden die Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Eich in Rheinland-Pfalz 2001 dargestellt. Auf zwei dieser Schläge (Markierung) wurde nicht vor dem EA behandelt. Bei Schlag a lagen die Unterschiede zwischen den Berechnungen mit *SIMPHYT1-m* und *SIMPHYT1-v* bzw. *SIMBLIGHT1-m* und *SIMBLIGHT1-v* bei je einen Tag. *SIMPHYT1-m* war einen Tag zu spät, aber einen Tag früher am EA als *SIMPHYT1-v*. Bei *SIMBLIGHT1* war es gerade umgekehrt. *SIMBLIGHT1-v* lag 2 Tage und *SIMBLIGHT1-m* 3 Tage zu früh. Bei Schlag b lag das EA am 31. Mai 2001. *SIMPHYT1-m* prognostizierte vier Tage zu früh, während *SIMPHYT1-v* das EA einen Tage früher berechnete. Beide Berechnungen mit *SIMBLIGHT1* waren zu spät, wobei *SIMBLIGHT1-m* 2 Tage und *SIMBLIGHT1-v* einen Tag zu spät waren.

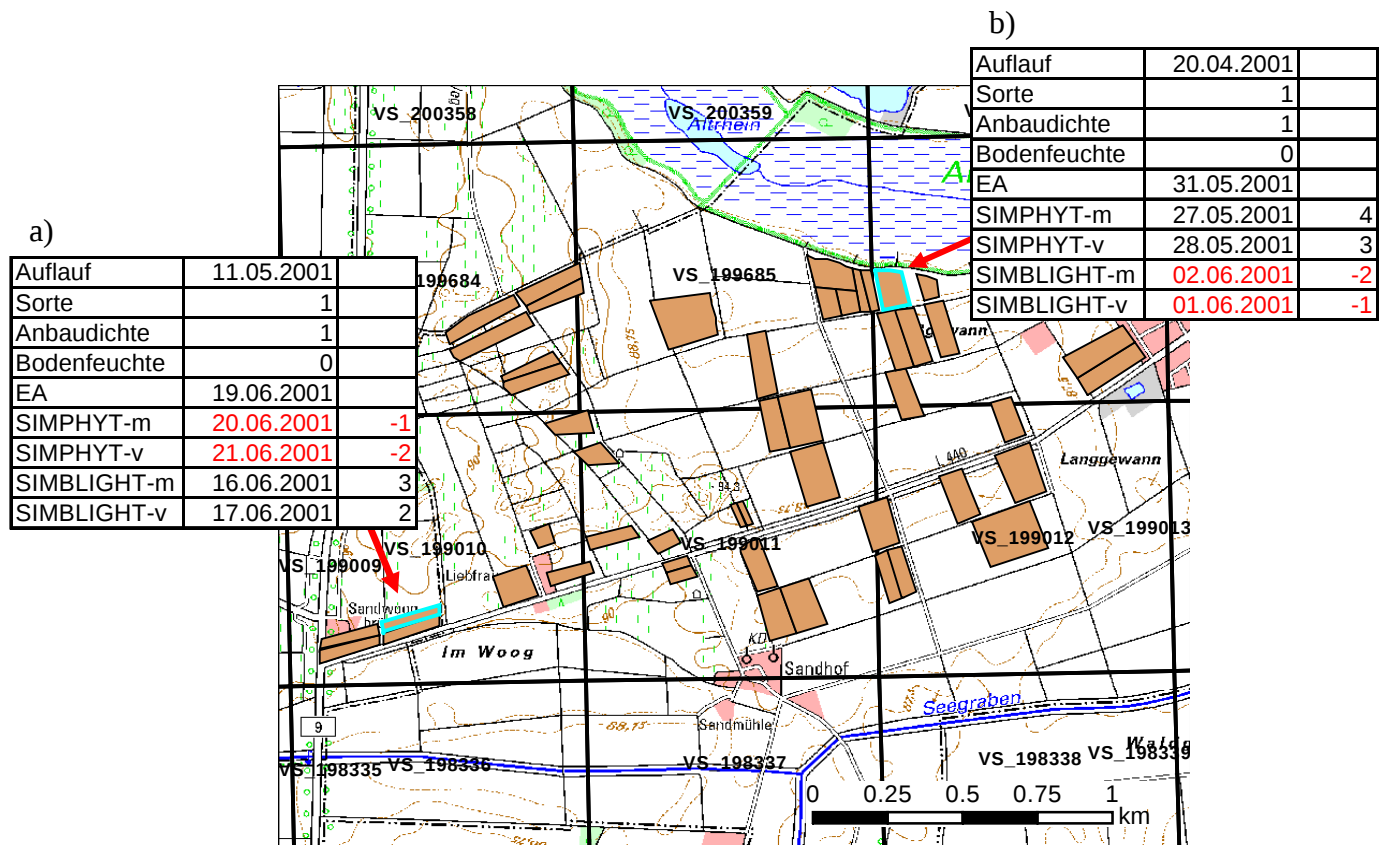


Abbildung 110: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Eich 2001.

In der Nähe des Ortes Eich konnten 2002 drei Schläge ermittelt werden, die den Anforderungen entsprachen. Bei Schlag c waren alle Prognosen zu spät. SIMPHYT1-m war 13 Tage und SIMPHYT1-v 17 Tage zu spät. Bei SIMBLIGHT1 zeigte sich das gleiche Bild, wobei die Prognosen 3 und 7 Tagen zu spät waren. Bei den Ergebnissen der Prognosen mit dem Schlag d lagen 2002 alle Prognosen zu früh, wobei mit SIMPHYT1-v und SIMBLIGHT1-v jeweils geringere Abweichungen erzielt werden konnten. Bei SIMPHYT1 lag dieser Unterschied bei 7 und bei SIMBLIGHT1 bei 11 Tagen (Abbildung 111). Bei Schlag e war SIMPHYT1-m 1 Tag zu früh und SIMPHYT1-v 3 Tage zu spät. SIMBLIGHT1 war dagegen deutlich zu früh, wobei SIMBLIGHT1-v 11 Tage und SIMBLIGHT1-m 19 Tage zu früh waren.

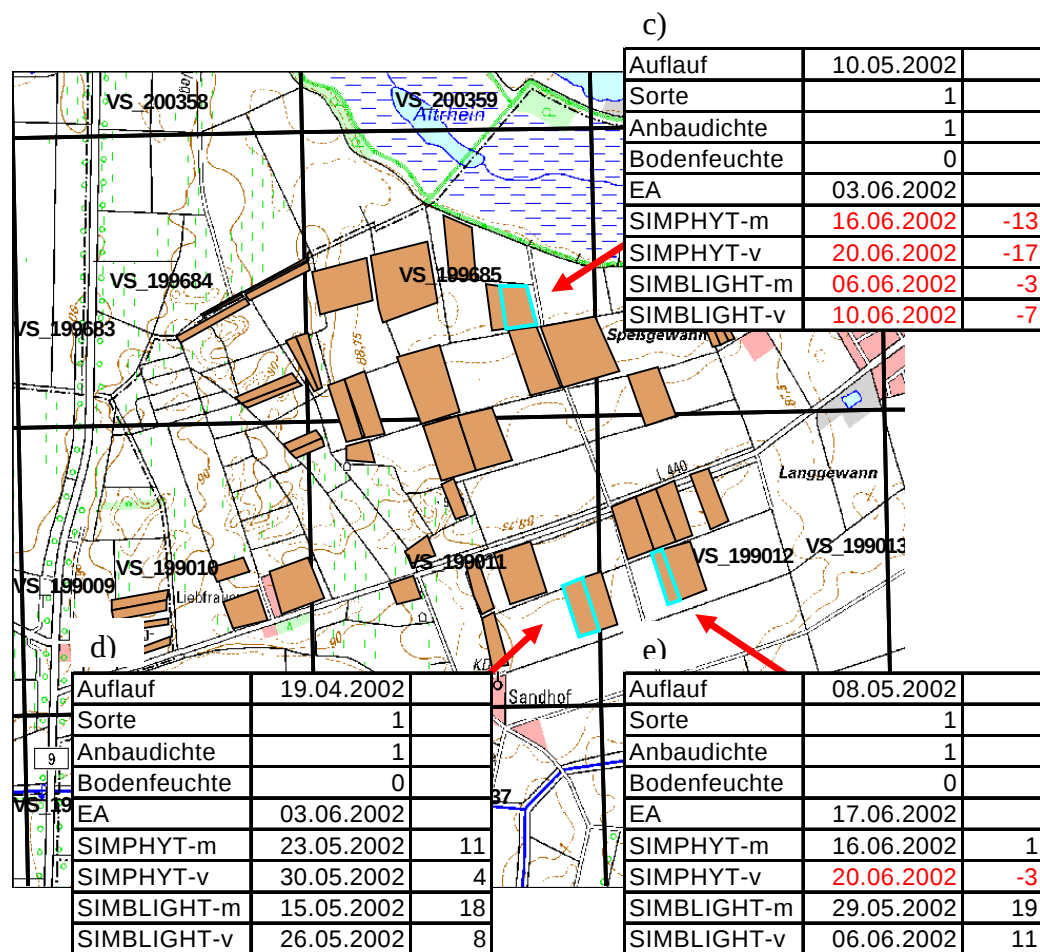


Abbildung 111: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Eich 2002.

4.3.3.2 Schlagspezifische Betrachtung an der Wetterstation Schifferstadt 2002 und 2003

In der Nähe der Wetterstation Schifferstadt konnten aus den Versuchsjahren 2002 und 2003 jeweils 2 Schläge gefunden werden, bei denen der Termin der ersten Fungizidapplikation nicht vor dem EA lag. Die beiden Schläge aus dem Jahr 2002 lagen nur etwa 600 m auseinander. Schlag f wurde mit beiden Modellen zu spät prognostiziert. SIMPHYT1-v lag 15 Tage und SIMPHYT1-m 16 Tage zu spät im Vergleich zum EA. Die Ergebnisse des Modells SIMBLIGHT1 waren mit SIMBLIGHT1-v 3 und SIMBLIGHT1-m 6 Tage zu spät. Der Unterschied zwischen den Ergebnissen von SIMBLIGHT1-v und SIMBLIGHT1-m lag bei 3 Tagen (Abbildung 112).

Schlag g hatte sein EA am 21. Mai 2002. Das Modell SIMPHYT1-v war 10 Tag zu spät aber einen Tag früher als SIMPHYT1-m. Die Ergebnisse des Modells SIMBLIGHT1 hatten geringere Abweichungen als bei SIMPHYT1. Diese lagen bei SIMBLIGHT1-v bei 2 und bei SIMBLIGHT1-m bei 4 Tagen zu später Prognose.

g)

Auflauf	15.04.2002	
Sorte	1	
Anbaudichte	1	
Bodenfeuchte	0	
EA	21.05.2002	
SIMPHYT-m	01.06.2002	-11
SIMPHYT-v	31.05.2002	-10
SIMBLIGHT-m	25.05.2002	-4
SIMBLIGHT-v	23.05.2002	-2

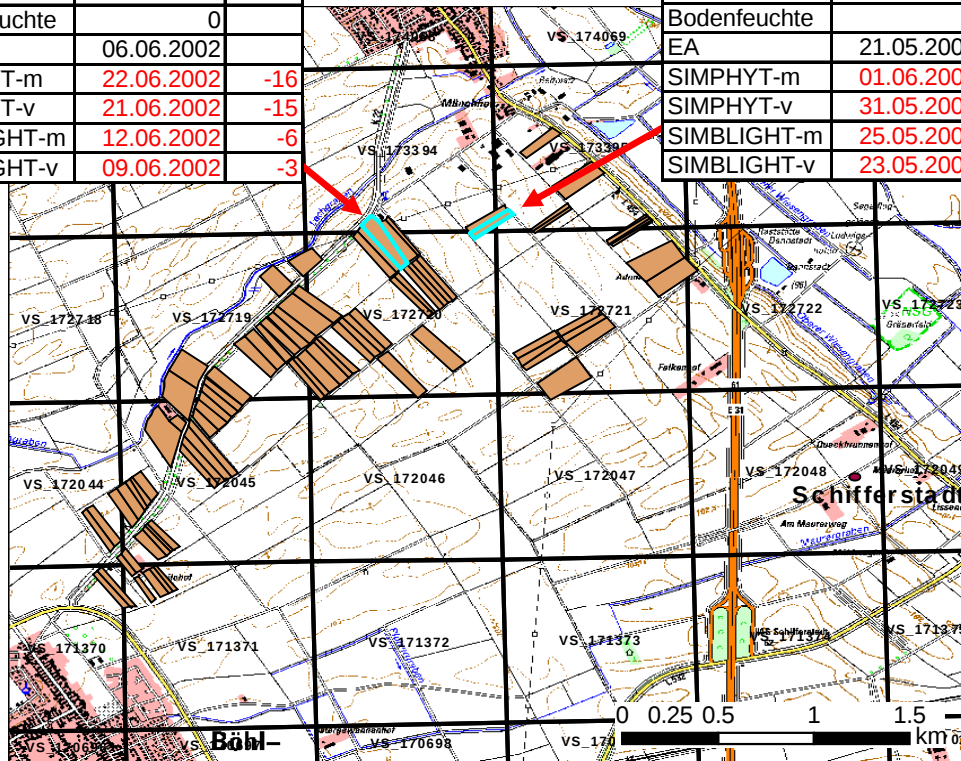


Abbildung 112: Kartoffelschläge in der Nähe des Ortes Böhl 2002.

Im Jahr 2003 wurden bei Bonituren zwei Schläge in der Nähe der Wetterstation Schifferstadt ermittelt, die das oben genannte Kriterium erfüllten. Für beide Schläge wurden zu späte Prognosen berechnet. Schlag h im Westen (Abbildung 113) war mit SIMPHYT1-m 21 Tage zu spät. Das Ergebnis mit SIMPHYT1-v war 13 Tage zu spät. Mit SIMBLIGHT1 wurde einmal sechs und einmal acht Tage zu spät prognostiziert, wobei das Ergebnis mit SIMBLIGHT1-m um 3 Tage geringere Abweichungen zum EA hatte.

Bei Schlag i hatten die Ergebnisse bei SIMPHYT1-m um 1 Tag höhere Abweichungen als bei SIMPHYT1-v. Diese waren 21 Tage zu spät. Die Abweichungen zum EA lagen mit SIMBLIGHT1-m bei 6 und mit SIMBLIGHT1-v bei 8 Tagen zu später Prognose.

Festzuhalten bleibt, dass bei der Betrachtung aller Einzelschläge die Unterschiede zwischen den Ergebnissen mit berechneten und gemessenen Wetterdaten bei 1 bis 6 Tagen lagen. Dabei wurde beobachtet, dass die Ergebnisse mit berechnetem Wetter häufig geringere Abweichungen zum EA aufwiesen.

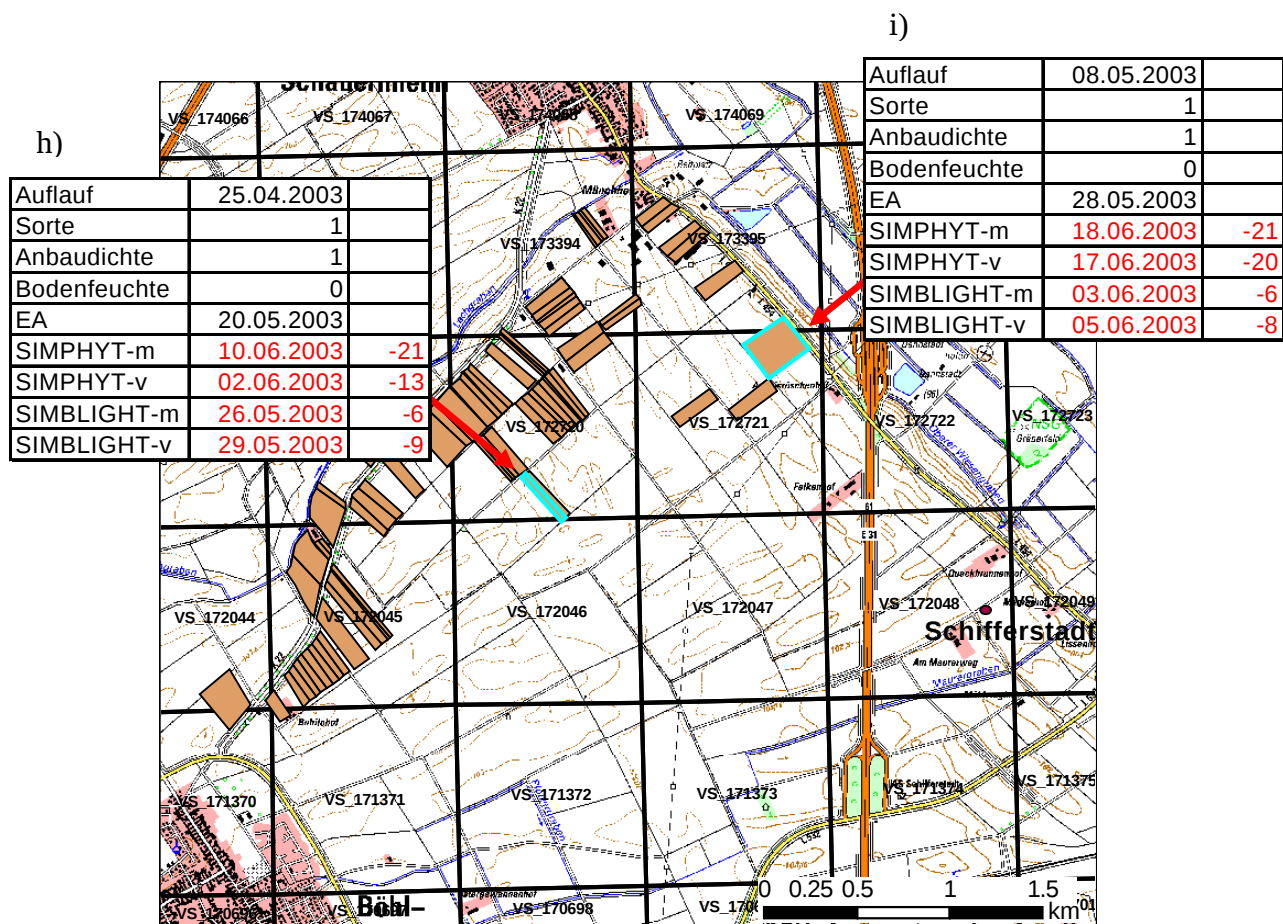


Abbildung 113: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Schifferstadt 2003.

4.3.3.3 Validierung mit deutschlandweiten Boniturdaten von 2001 bis 2006

Für die Auswertung der Ergebnisse von SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1 wurden die Daten der Bonituren von 2001 bis 2003 in Rheinland-Pfalz, sowie die Daten des deutschlandweiten Monitorings von 2001 bis 2006 verwendet. Berechnet wurde das EA für alle Schläge mit der nächstgelegenen Wetterstation (Modell-m) und mit der dem Schlag zugeordneten virtuellen Station (Modell-v). Bei den Schlägen des Deutschlandmonitorings waren teilweise nur die Gemeinidenamen zur Georeferenzierung angegeben. Mit Hilfe von ATKIS wurde die größte zusammenhängende Ackerfläche dieser Gemeinden bestimmt und so die virtuelle Station ermittelt (siehe Kapitel 3.10 Auswertung der Prognoseberechnungen).

Anschließend wurden das Ergebnis der Berechnungen mit den Boniturdaten verglichen und die Abweichungen zwischen der Prognose und der Bonitur bestimmt. Die Ergebnisse wurden in Box-Whisker-Plots dargestellt. Da bei den Bonituren von 2001 bis 2003 mehrere Schlägen im Bereich einer virtuellen Station lagen, war eine eindeutige Zuordnung von prognostiziertem und bonitiertem EA nicht möglich. Deshalb wurde aus allen Schlägen einer

virtuellen Station das Datum ermittelt, an dem 20 % der Schläge ein EA aufwiesen (siehe Kapitel 3.10 Auswertung der Prognoseberechnungen).

Bei den Bonituren im Jahr 2001 hatten alle Prognosen im Mittel ein zu frühes EA berechnet (Abbildung 114). Dabei hatte der Mittelwert der Abweichungen bei SIMPHYT1-v und SIMBLIGHT-v geringer Abweichungen zu den Boniturdaten. Beim Modell SIMBLIGHT1-v waren das 5 und beim Modell SIMPHYT1-v 3 Tage. Die Werte des unteren und oberen Whiskers hatten bei dem Modell SIMBLIGHT1-v eine geringere Amplitude als die bei SIMBLIGHT1-m. Diese lagen mit Abweichungen von -10 Tagen zu spät bis 11 Tagen zu früh. Dagegen reichten die Abweichungen bei den Ergebnissen von SIMBLIGHT1-m bis 18 Tage zu frühe Prognose. Das gleiche Bild zeigte sich auch bei den Quartilen. Diese lagen bei SIMBLIGHT1-m bei -5 und 6 und bei SIMBLIGHT1-v bei -3 und 11 Tagen. Somit hatten die Ergebnisse von SIMBLIGHT1-v in diesem Jahr deutlich geringere Abweichungen zum EA als die von SIMBLIGHT-m (Abbildung 114).

Die Prognoseergebnisse im Jahr 2002 zeigten, dass alle Prognosen im Mittel zu spät berechnet wurden. Bei den Ergebnissen für das Modell SIMBLIGHT1-v waren das 2 und bei SIMBLIGHT1-m 5 Tage. Die Werte für die Whisker und die Quartile bei SIMBLIGHT1-v lagen bei -21 und 9 sowie -9 und 1 Tag (Abbildung 114). Dagegen war die Amplitude bei SIMBLIGHT1-m mit -25 und 20 Tagen bei den Werten der Whisker und -15 und 9 Tagen bei den Werten der Quartile höher (Abbildung 115).

Im dritten Jahr dieser Boniturdaten lagen die Abweichungen von SIMBLIGHT1-v im Mittel 2 Tage zu spät. Die Werte der Whisker bzw. der Quartile lagen bei -14 und 12 bzw. -8 und 5 Tagen. Die Ergebnisse mit SIMBLIGHT1-m hatten weniger Abweichungen im negativen Bereich. Der Mittelwert lag bei 1 Tag zu früher Prognose, die Whisker und die Quartile lagen bei -8 und 16 bzw. -5 und 5 Tagen. Die Ergebnisse mit SIMPHYT1-m und SIMPHYT1-v waren sehr ähnlich. Bei der Amplitude der Whisker und der Quartile konnten Ergebnisse von 31 und 15 Tagen erzielt werden. Der Mittelwert der Abweichungen bei SIMPHYT1-v hatte mit 3 Tagen zu später Prognose um 3 Tage geringere Abweichungen als bei SIMPHYT1-m.

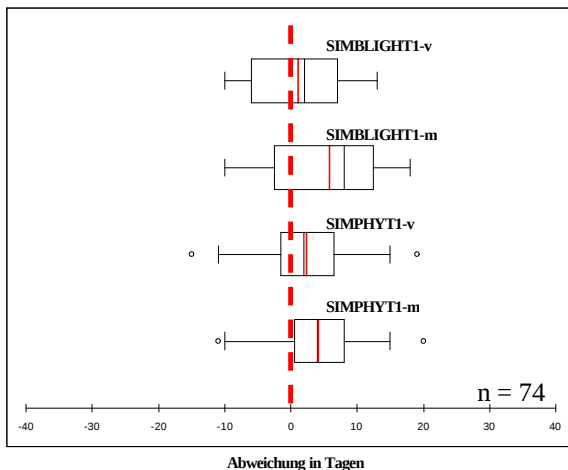


Abbildung 114: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2001.

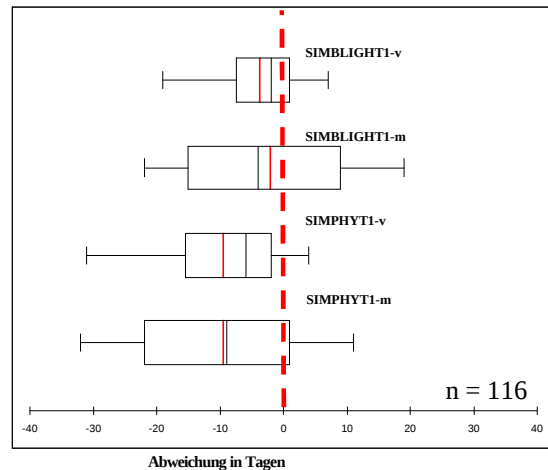


Abbildung 115: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2002.

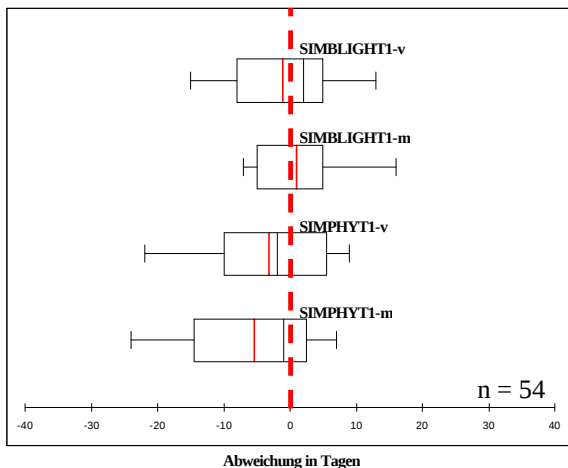


Abbildung 116: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2003.

Bei den Monitoringdaten der Bundesländer von 2001 bis 2006 wurden vergleichbare Ergebnisse, wie bei den Boniturdaten von 2001 bis 2003 erzielt. Im Jahr 2001 wurden insgesamt 76 Schläge auf Krautfäule untersucht. Die Boxplots der Abweichungen zwischen den Prognoseberechnungen und den Boniturdaten haben in diesem Jahr im Mittel zu frühe Prognosen zwischen 1 und 18 Tagen ergeben. Dabei war festzustellen, dass im Mittel die Prognosen mit den virtuellen Stationen um bis zu 7 Tage geringere Abweichungen als mit Wetterstationen aufwiesen. Die Boxplots von SIMBLIGHT1-v und SIMBLIGHT1-m besaßen etwa die gleichen Amplituden bei den Whiskern und bei den Quartilen. Bei SIMPHYT1 waren die Unterschiede größer. Hier waren die Amplituden der Werte des Whiskers und der Quartile bei SIMPHYT1-v um 5 bis 10 Tage geringer als bei SIMPHYT1-m. Zudem hatte der Mittelwert um etwa 5 Tage geringere Abweichungen zum EA.

Im Jahr 2002 lagen alle Prognosen im Mittel bis zu 5 Tagen hinter dem EA. Sowohl bei SIMBLIGHT1 als auch bei SIMPHYT1 hatten dabei die Berechnungen mit virtuellen Stationen um 2 bis 3 Tage geringere Amplituden bei den Whiskern und bei den Quartilen als Berechnungen mit den gemessenen Daten (Abbildung 118).

Aus dem Jahr 2003 standen keine Validierungsdaten zur Verfügung. Die Ergebnisse der Jahre 2004 und 2005 waren ähnlich (Abbildung 119 und Abbildung 120). Im Mittel wurden bei allen Berechnungen zu frühe Prognosen von 7 bis 21 Tagen simuliert. Die Amplitude der Abweichungen der Whiskers und der Quartile waren beim Modell SIMBLIGHT1-v und SIMBLIGHT1-m gleich, wobei in beiden Jahren der Mittelwert bei SIMBLIGHT1-v um bis zu 10 Tage geringere Abweichungen zum EA hatte. Bei den Ergebnissen des Modells SIMPHYT1 waren im Jahr 2004 beide Whisker gleich. Beim ersten und beim zweiten Quartil hatten die Abweichungen bei SIMBLIGHT-v jeweils um 2 Tage geringere Abweichungen zum EA als bei SIMBLIGHT-m (Abbildung 119). 2005 konnten ähnliche Ergebnisse erzielt werden wie 2004 (Abbildung 120).

Bei den Daten des Jahres 2006 wurden im Mittel Abweichungen bei SIMBLIGHT1-m von 12 und bei SIMBLIGHT1-v von 6 Tagen zu früher Prognose erzielt (Abbildung 121). Bei dem Modell SIMPHYT1 waren die Boxplots fast gleich. Die Abweichungen waren im Mittel 13 Tage zu früh. Der untere Whisker bei SIMPHYT1-v hatte eine um einen Tag geringere Abweichungen zum EA.

Insgesamt bleibt festzuhalten, dass die Unterschiede zwischen den Berechnungen mit berechnetem und gemessenem Wetter im Mittel zwischen 5 und 8 Tagen lagen. Dabei waren die Abweichungen bei den Ergebnissen mit berechnetem Wetter zum EA häufig geringer. Dadurch wurden aber auch mehr zu späte Prognosen berechnet.

Unabhängig von der Betrachtung der reinen Abweichungen zwischen Prognoseergebnis und dem EA wird zur Validierung der Prognoseergebnisse von SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 oft auch eine Klassifizierung der Abweichungen durchgeführt. Dabei werden die Prognoseergebnisse in „sehr gute“, „akzeptable“ und „unzureichende“ Schläge eingeteilt. Bei der Betrachtung der Klassengrenzen dieser Einteilung fällt auf, dass zu späte Prognosen deutlich kritischer bewertet werden als zu frühe Prognosen. Das heißt, dass eine zu späte Fungizidapplikation größere wirtschaftliche Folgen haben kann als eine zu frühe Behandlung. Bei der hier durchgeführte Untersuchung ist daher zu beachten, dass das Ziel der Prognoseberechnungen mit berechnetem Wetter zwar geringere Abweichungen zum EA waren, dies aber gleichzeitig nicht unbedingt eine Erhöhung der Treffergenauigkeit bedeuten muss, da die berechneten Prognosen zu spät waren.

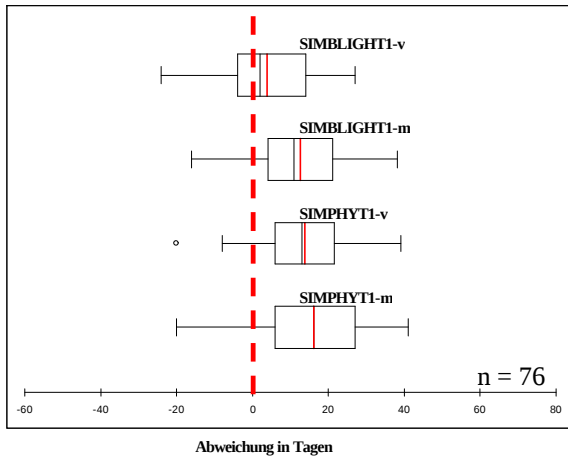


Abbildung 117: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2001.

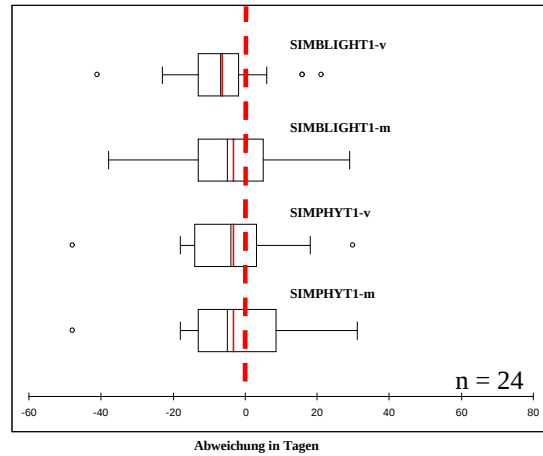


Abbildung 118: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2002.

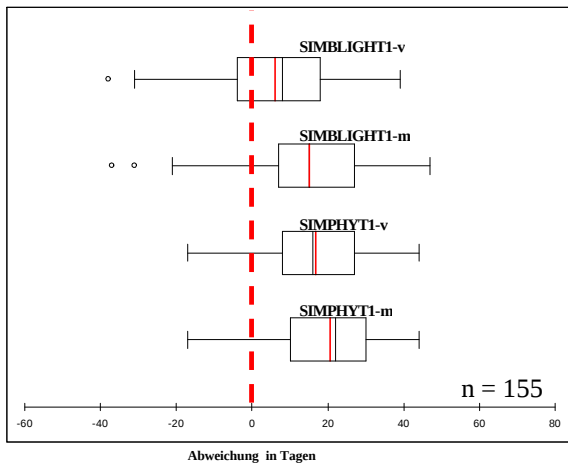


Abbildung 119: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2004.

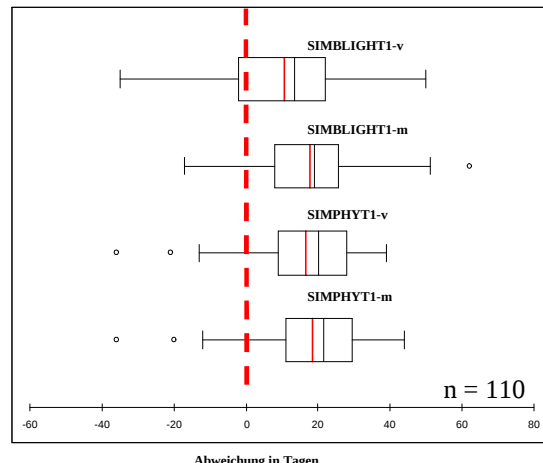


Abbildung 120: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2005.

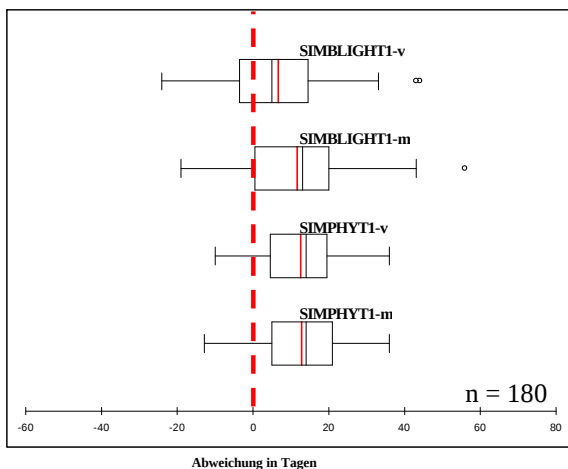


Abbildung 121: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2006.

4.4 Sensitivitätsanalyse der Prognosemodelle

Um den Einfluss der Temperatur und der relativen Luftfeuchte auf das Ergebnis der Prognosemodelle zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Prognosemodelle durch Modifikation der Wetterdaten einiger Wetterstationen aus verschiedenen Jahren durchgeführt. Anschließend wurde eine Prognose mit den Prognosemodellen SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 mit den modifizierten Wetterdaten berechnet. Dabei konnten die Abweichungen der Modellergebnisse zu denen mit unveränderten Wetterdaten ermittelt werden. Die Modifikation der Wetterdaten orientierte sich an den Abweichungen der Interpolationsvalidierung (siehe Kapitel 4.2 Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte). Die Temperatur wurde in Schritten von 0,5 °C viermal ins negative und ins positive modifiziert. Die relative Luftfeuchte wurde dagegen nur zweimal um 3 % relativer Luftfeuchte verändert. Somit ergaben sich insgesamt 45 Wetterdatenkombinationen. Die Berechnungen wurden für alle Stationen der Jahre 2003 bis 2006 durchgeführt, die auch bei der Interpolationsvalidierung verwendet wurden. Da alle betrachteten Stationen aus verschiedenen Jahren einheitliche Abweichungen aufwiesen, wurden die Ergebnisse der Station Eich 2006 ausgewählt, um die Sensitivität der Modelle zu dokumentieren.

4.4.1 Sensitivität von SIMLEP3

Als Wetterinput für das Modell SIMLEP3 wird die Temperatur benötigt. Deshalb wurde bei SIMLEP3 nur die Temperaturmodifikationen betrachtet.

Beim EA der L1/2-Larven lagen die Abweichungen bei maximaler positiver Temperaturmodifikation bei einem Tag früherer und bei maximaler negativen Temperaturmodifikation bei zwei Tagen späterer Prognose. Die Abweichungen ergaben sich ab einer Temperaturmodifikation von 0,5 °C pro Stunde, sowie ab -1 °C pro Stunde in Eich 2006 (Tabelle 33).

Beim Erstauftreten der L3/4-Larven konnten höhere Abweichungen von bis zu drei Tagen pro Modifikationsstufe erreicht werden (Tabelle 33). Die maximalen Abweichungen werden bei 2 °C Modifikation pro Stunde mit 5 Tagen früherer Prognose und bei -2 °C Modifikation pro Stunde mit 8 Tagen späterer Prognose erreicht. 0,5 °C negativer Temperaturmodifikation pro Stunde bedeuten daher 2 bis 3 Tage spätere Prognose. Bei positiver Temperaturmodifikation verfrüht sich die Prognose bei Temperaturerhöhung von 0,5 °C pro Stunde um 3 Tage und steigt bei einer Erhöhung der Temperatur von 2 °C pro Stunde auf 5 Tage frühere Prognose an.

Bei den Terminen für den Beginn und das Ende des MA der Eigelege wurden nur geringe Abweichungen von einem Tag späterer Prognose festgestellt. Diese traten ab einer Temperaturänderung von -1 °C pro Stunde auf. Dass der Beginn und das Ende des MA der Eigelege die gleichen Abweichungen aufweisen erklärt sich, da nur der Beginn durch den Modellalgorithmus berechnet wurde und das Ende durch Addition eines festen Zeitraums bestimmt wird.

Des Weiteren wurden beim Beginn und Ende des MA der L1/2-Larven die gleichen Abweichungen wie beim Erstauftreten der L3/4-Larven erzielt (Tabelle 33).

Die Messgenauigkeit der Messsensorik der Wetterstationen wird nach VDI-Richtlinien je nach Alter und Fabrikat mit 0,1 bis 0,5 °C angegeben. Bei Betrachtung der vorgestellten Ergebnisse kann demnach beim Modell SIMLEP3 beim EA der L1/2-Larven und beim MA der L1/2-Larven aufgrund der Messgenauigkeit eine Abweichung von bis zu 3 Tagen entstehen.

Tabelle 33: Abweichungen der Modellergebnisse von SIMLEP3 durch verschiedene Temperaturmodifikationen in Eich 2006.

SIMLEP3	T = -2	T = -1,5	T = -1	T = -0,5	T = -0	T = 0,5	T = 1	T = 1,5	T = 2
EA L1/2	-2	-1	-1	0	0	1	1	1	1
EAL3/4	-8	-7	-5	-3	0	3	4	4	5
MA Ei Beginn	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0
MA Ei Ende	-1	-1	-1	0	0	0	0	0	0
MA L1/2 Beginn	-8	-7	-5	-3	0	3	4	4	5
Ma L1/2 Ende	-8	-7	-5	-3	0	3	4	4	5

T = Temperatur

4.4.2 Sensitivität von SIMPHYT3

4.4.2.1 PEW-Wert

Zur Untersuchung der Sensitivität des Modells SIMPHYT3 wurde sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte betrachtet. Untersucht wurde die Anzahl von Tagen, die einen PEW-Wert vom mehr als 0,4 aufwiesen. Diese wurden aufsummiert und die Differenz zu dem Ergebnis mit unveränderten Wetterdaten gebildet.

Tabelle 34 zeigt die Abweichung der Summe aller Tage eines Jahres mit dem PEW-Wert größer als 0,4 zwischen den Wettermodifikationen und dem unveränderten Wetter.

Zu erkennen ist, dass mit negativer bzw. mit positiver relativer Luftfeuchtemodifikation die Differenz der Anzahl der Tage mit $PEW > 0,4$ ab- bzw. zunimmt. Bei -3 % relativer Luftfeuchtemodifikation pro Stunde macht dies 0 und bei -6 % relativer Luftfeuchtemodifikation pro Stunde 6 Tage weniger mit $PEW > 0,4$ aus. Bei den positiven Luftfeuchtemodifikationen wurden bei 3 % Modifikation pro Stunde 5 und bei 6 % Modifikation pro Stunde 11 zusätzliche Tage mit einem $PEW > 0,4$ festgestellt.

Der Einfluss der Temperatur war dagegen schwächer ausgeprägt. Er beträgt von der Variante mit -2 °C bis 2 °C Temperaturabweichung pro Stunde eine Abweichung von bis zu 2 Tagen. Sowohl im negativen als auch im positiven Temperaturbereich waren 1 bis 1,5 °C Temperaturmodifikation notwendig, damit sich Änderungen von 1 bis 2 Tagen einstellten.

Zu erkennen ist, dass die Sensitivität durch die relative Luftfeuchtigkeit deutlich größere Auswirkungen auf die Ergebnisse von SIMPHYT3 in Eich 2006 hatte als die Temperatur. Zwischen den Luftfeuchtekompositionen von -6 und 6 % relativer Luftfeuchteabweichungen liegen bei allen Temperaturkonstellationen 15 bis 17 Tage Abweichungen mit $PEW > 0,4$, wogegen bei der Temperaturmodifikation eine Abweichungsamplitude von 2 bis 4 Tagen erreicht wurde (Tabelle 34).

Tabelle 34: Differenz der Anzahl an Tagen mit $PEW > 0,4$ beim Modell SIMPHYT3 durch unterschiedliche Wettermodifikationen in Eich 2006 (n=124 Tage).

Wettermodifikation pro Stunde	RF = -6	RF = -3	RF = 0	RF = 3	RF = 6
T = -2	-7	-2	-1	4	8
T = -1,5	-7	-2	-1	4	8
T = -1	-6	-1	-1	5	9
T = -0,5	-6	0	0	5	9
T = 0	-6	0	0	5	11
T = 0,5	-6	0	0	6	11
T = 1	-6	0	2	7	12
T = 1,5	-5	1	2	7	12
T = 2	-5	1	2	7	12

T = Temperatur RF = relative Luftfeuchte

4.4.2.2 Infektionsdruck

Beim Infektionsdruck wurden die Abweichungen der Berechnungen des Infektionsdrucks mit modifizierten Wetterdaten und mit unveränderten Wetterdaten untersucht. Hierzu wurde aus den Ergebnissen der Abweichungen eines Untersuchungsjahres (1. April bis 31. August) die area under disease progress curve (AUDPC) berechnet. Die AUDPC fasst den Verlauf des Infektionsdrucks über das Untersuchungsjahr zusammen, indem mittels Trapez-Integration das Integral des Infektionsdrucks von zwei Tagen berechnet wird und die Ergebnisse anschließend aufsummiert werden (BATTILANI et al. 1996).

Die Ergebnisse zeigen, dass durch die Modifikation der relativen Luftfeuchtigkeit sich größere AUDPC-Werte ergeben haben als durch die Temperaturmodifikation. Die Amplitude der AUDPC-Werte der Luftfeuchtemodifikation von -6 bis 6 % pro Stunde lag bei 56,7. Von der maximalen negativen bis zur maximalen positiven Modifikation pro Stunde von 2 °C lag die Amplitude bei der Temperatur bei 27,1 (Tabelle 35).

Tabelle 35: AUDPC der Abweichungen des Infektionsdrucks der Wettermodifikationen vom unveränderten Wetter in Eich 2006.

Wettermodifikation pro Stunde	RF = -6	RF = -3	RF = 0	RF = 3	RF = 6
T = -2	-49.4	-36.0	-19.4	-5.9	6.6
T = -1,5	-42.7	-27.8	-11.6	1.5	13.9
T = -1	-39.3	-24.9	-7.8	4.6	16.8
T = -0,5	-35.4	-20.8	-3.3	9.5	22.0
T = 0	-31.8	-17.4	0.0	13.1	24.9
T = 0,5	-29.5	-14.6	2.9	16.4	26.1
T = 1	-26.8	-11.5	5.2	18.8	28.8
T = 1,5	-25.3	-9.7	7.2	20.9	31.8
T = 2	-23.6	-8.0	7.7	22.7	32.6

T = Temperatur RF = relative Luftfeuchte

4.4.3 Sensitivität von SIMBLIGHT1 und SIMPHYHT1

Die Sensitivität der Modelle SIMBLIGHT1 und SIMPHYHT1 wurden, wie auch die Prognoseergebnisse, zusammen betrachtet.

Die Abweichungen in Tagen bei Modifikation der relativen Luftfeuchte und unveränderter Temperatur lagen beim Modell SIMBLIGHT1 bei -6 % relativer Luftfeuchtemodifikation pro Stunde bei -27 Tagen und bei 6 % relativer Luftfeuchtemodifikation pro Stunde bei 3 Tagen. Eine Luftfeuchtemodifikation von 3 % pro Stunde kann sich daher schon um 3 bis 10 Tage auf das Modellergebnis auswirken (Tabelle 36).

Es hat sich gezeigt, dass analog wie bei SIMPHYHT3 auch bei SIMBLIGHT1 der Temperatureinfluss erkennbar hinter dem Einfluss der relativen Luftfeuchte zurückbleibt. Der Temperatureinfluss beim Modell SIMBLIGHT1 lag bei maximaler negativer wie auch positiver Modifikation bei -10 bzw. 8 Tagen. Eine regelmäßige Modifikation der Lufttemperatur von 0,5 °C pro Stunde in Eich 2006 wirkte sich um etwa 2 bis 4 Tage auf das Modellergebnis aus (Tabelle 36).

Tabelle 36: Abweichung in Tagen vom Modellergebnis von SIMBLIGHT1 durch verschiedene Wettermodifikationen in Eich 2006.

Wettermodifikation pro Stunde	RF = -6	RF = -3	RF = 0	RF = 3	RF = 6
T = -2	-32	-25	-10	0	2
T = -1,5	-32	-25	-10	2	2
T = -1	-28	-12	-6	2	3
T = -0,5	-27	-12	-4	2	3
T = 0	-27	-10	0	3	3
T = 0,5	-27	-10	2	3	7
T = 1	-12	2	2	3	8
T = 1,5	-12	2	8	7	9
T = 2	-12	2	8	9	9

T = Temperatur RF = relative Luftfeuchte

Während bei SIMBLIGHT1 deutlich größere Abweichungen, bedingt durch die Modifikation der stündlichen Werte betrachtet werden konnten, sind bei SIMPHYT1 eher geringe Abweichungen aufgetreten (Tabelle 37).

Durch Veränderung der relativen Luftfeuchte pro Stunde konnte bei SIMPHYT1 sowohl bei negativer, wie auch bei positiver Modifikation eine um einen Tag verspätete Prognose beobachtet werden. Bei der Temperatur lagen die Abweichungen bei 1 bis -2 Tagen bei Temperaturmodifikationen von -2 bis 2 °C pro Stunde. Während bei SIMBLIGHT1 mit negativer Temperaturmodifikation der Prognosetermin im Jahresgang später wurde, hat sich der Prognosetermin bei SIMPHYT1 durch negative Temperaturenmodifikation verfrüht. Eine regelmäßige Abweichung durch die Wettermodifikation, wie sie bei SIMBLIGHT1 oder SIMPHYT3 festgestellt wurde, konnte bei SIMPHYT1 nicht erkannt werden.

Tabelle 37: Abweichung in Tagen vom Modellergebnis von SIMPHYT1 durch verschiedene Wettermodifikationen in Eich 2006.

Wettermodifikation pro Stunde	RF = -6	RF = -3	RF = 0	RF = 3	RF = 6
T = -2	1	1	1	1	1
T = -1,5	1	1	1	1	1
T = -1	0	0	0	0	0
T = -0,5	0	0	1	0	0
T = 0	-1	-1	0	-1	-1
T = 0,5	-1	-1	-1	-1	-1
T = 1	-2	-2	-2	-2	-2
T = 1,5	-2	-2	-2	-2	-2
T = 2	-2	-2	-2	-2	-2

T = Temperatur RF = relative Luftfeuchte

4.4.4 Zusammenfassung der Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse

Zusammenfassend bleibt festzuhalten, dass durch die Berechnung der Sensitivität der Modelle SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 verdeutlicht werden konnte, welchen Einfluss die Wetterparameter auf das Ergebnis der Prognoseberechnung haben. Beim Modell SIMLEP3 hatte nur die Temperatur Auswirkungen auf das Modellergebnisse, wobei sich nur bei den Terminen für das EA und das MA der L1/2-Larven größere Abweichungen von bis zu 8 Tagen ergaben. Bei den Modellen, die sowohl Temperatur als auch relative Luftfeuchte berücksichtigen, zeigte sich, dass die relative Feuchte einen größeren Einfluss auf das Ergebnis nimmt und die Temperatur im Vergleich nur eine geringe Rolle spielt. Bemerkt werden muss, dass das Modell SIMPHYT1 kein Abweichungsschema aufzuweisen hatte. Alle Abweichungen lagen bei 1 Tag späterer Prognose. Sowohl die Temperatur als auch die relative Luftfeuchte besaßen kaum Einfluss auf das Modellergebnis.

Die niedrigsten Wettermodifikationen lagen im Bereich der Messgenauigkeit der Messsensorik. Somit waren Aussagen möglich, ob und wie sich die Messgenauigkeit, bedingt durch Alter und Fabrikat des Sensors, auf das Prognoseergebnis auswirken kann. Bei allen Modellen konnten Abweichungen in diesem Bereich von 1 bis 4 Tagen beobachtet werden.

5 Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit, die Berechnung von schlagspezifischen Schaderregerprognosen mit den Modellen SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1 mit Hilfe von GIS, konnte erreicht werden. Dabei lag der Schwerpunkt auf der Bereitstellung von flächendeckenden Wetterdaten, die als Inputparameter für die Berechnung der Modelle benötigt wurden. Insgesamt waren fünf Schritte notwendig, um das beschriebene Ziel zu erreichen:

- Erstellung einer Geodateninfrastruktur,
- Regionalisierung der Interpolationszonen,
- Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte,
- Prognosenberechnung,
- Sensitivitätsanalyse der Prognosemodelle.

Erstellung einer Geodateninfrastruktur

Bei den GIS-basierten Untersuchungen dieser Arbeit kamen der Datenaufbereitung und der Erzeugung einer geeigneten Geodateninfrastruktur für die Massenberechnung von Wetterdaten und Schaderregerprognosen besondere Bedeutung zu. Die Daten und die Geodateninfrastruktur (GDI) stellen dabei das Grundgerüst jeder Untersuchung dar. Ihre Qualität bzw. Funktionsweise sind entscheidend für das zu erreichende Ergebnis (BARTELME 2000).

BILL (2004) beurteilt die Leistungsfähigkeit einer modernen GDI heute nicht mehr nach der Komplexität der Datenstruktur oder Menge der bereitgestellten Informationen, sondern nach einem möglichst einfachen, schnellen und wartungsfreien Zugang auf relevante Informationen. Er spricht über oftmals freie Datenbanken im WWW, bei denen interoperable Strukturen eine große Rolle spielen. Die Nutzung dieser Datenbanken erfolgt mit Webdiensten, die sich bei Geodaten nach internationalem Standards der OGC (Open GIS Consortium) richten (BILL 2004, LENK 2004, NÖLLE 2004). Die Vorteile solcher GDIs sieht NÖLLE (2004) darin, dass die Daten beim Anbieter bleiben, Aktualisierungen zeitnah eingespielt und die Pflege und Korrektheit der Daten gewährleistet sind. Die Grenzen der Datenübertragung liegen nach NÖLLE (2004) und BILL (2004) heute ausschließlich in der Bandbreite der Internetverbindung.

STREIT (2004) weist aber auf Defizite der Geoinformationen in der Landwirtschaft hin und beschreibt, wie diese sich auf GDIs auswirken (siehe Kapitel 2.5 Geographische

Informationssysteme in der Landwirtschaft). So fehlen häufig benötigte Geofachdaten zur Erstellung von Internetdiensten bzw. das benötigte Fachpersonal um diese Daten im WWW zur Verfügung zu stellen.

Neben den modernen interoperablen GDIs gibt es noch die klassischen GDI. Dabei spielt ein Konzept aus Hardware, Software, Datenhaltung und Anwendungen die entscheidende Rolle (BILL 1999a). Die Daten liegen dabei beim Anwender, der selbst für Aktualität und Pflege der Daten verantwortlich ist. Diese Form der Datenbereitstellung ist zeitlastig und bedingt einen hohen Speicherbedarf. Aber gerade für statische Datentypen (z.B. DGM), die sich selten oder gar nicht ändern, hat sich ein solches Datenhaltungskonzept bewährt (BARTELME 2000). Der Zugriff auf die Daten ist dauerhaft gewährt, da keine Abhängigkeiten von einem Datenanbieter oder einem Internetprovider bestehen.

Für die Umsetzung der GDI dieser Arbeit wurde eine Kombination aus beiden Ansätzen verwendet. Vor allem die deutschlandweiten Geobasisdaten stehen heute nur teilweise oder zeitweise in Pilotprojekten in Internetdiensten zur Verfügung, so dass ein dauerhafter Zugriff während der Bearbeitung dieser Arbeit nicht gewährleistet war. So wurde entschieden, die statischen Geodaten, die sich während der Dauer des Projektes nicht ändern (DGM, ATKIS, Corine, DOPs und DTK25), nach klassischem Konzept in die GDI einzubinden, damit ein dauerhafter Zugriff auf diese Daten gewährleistet war. Alle dynamischen Daten wurden nach modernem Konzept integriert. So wurde auf die Wetterdaten durch den Internetdienst von ISIP e.V. zugegriffen.

Auch in Europa wurde die Wichtigkeit von verteilten Geoinformationen erkannt. So wurden mehrere Programme und Konferenzen gestartet, welche die Aktivitäten im GI-Bereich fördern und koordinieren sollen. Die neuesten Projekte in dieser Richtung sind INSPIRE und IMAGI. Bei INSPIRE handelt es sich um eine Initiative der europäischen Kommission aus dem Jahr 2001 mit dem Ziel, eine europäische Geodatenbasis mit integrierten raumbezogenen Informationsdiensten zu schaffen (BILO 2004). Beabsichtigt ist die Verabschiedung einer EU-Richtlinie, die die Mitgliedsstaaten verpflichtet, stufenweise interoperable Geobasisdaten sowie Geofachdaten bereit zu stellen. IMAGI ist der deutsche Partner von INSPIRE (MYSIAK 2000, LENK 2004, STREIT 2004). Mit diesen Projekten können weitere Datenquellen über das Internet erschlossen und genutzt werden (STREIT 2004). Dies wird sich auch auf eine Praxiseinführung bzw. eine Weiterentwicklung der Anwendungen dieser Arbeit positiv auswirken. Es ist davon auszugehen, dass die klassischen Datenbanken mit der Zeit durch internetbasierte Datenquellen ersetzt werden. Umgekehrt sollen auch in Zukunft die Ergebnisse dieser Arbeit als Webdienste bzw. Datenquellen im Internet angeboten werden.

Jedes Ergebnis mit GIS ist eine Darstellung als generalisierte Karte der Wirklichkeit. Schon bei der Erstellung der verwendeten Geodaten wurde eine Klassifizierung bzw. Generalisierung bei der Entscheidung, welche Objekte aufgenommen werden, durchgeführt (BILL 1999a). Das bedeutet, die Ausgangsdaten bestimmen, welche minimale Auflösung eine Analyse mit GIS haben kann. Aber auch das Prognosegebiet und die Performanz, also die Berechnungsgeschwindigkeit, spielen bei der Wahl der Auflösung eine wichtige Rolle (BARTELME 2000).

Gefordert war, für jeden beliebigen Kartoffelschlag im Untersuchungsgebiet eine Prognose für die Bekämpfung der Kartoffelschaderreger zu erstellen. Dabei sollten allerdings keine teilschlagspezifischen Prognosen für jeden Schlag erarbeitet werden, wie bei SPIECKERMANN (2005) exemplarisch vorgestellt wurde. Dies wäre auch nicht möglich gewesen da das DGM mit einer Rasterweite von 100x100 m die von SPIECKERMANN geforderten 9x9 m Auflösung nicht erfüllen kann. Betrachtet man nun die Schlaggrößen in Deutschland, so kann festgestellt werden, dass diese von Norden nach Süden stark variieren (siehe Kapitel 2.2 Anbauggebiete und Anbaubedingungen). Für die Wahl einer geeigneten Rastergröße stellte die heterogene Struktur über Gesamtdeutschland ein Problem dar. Um alle Schläge abdecken zu können, wäre eine Rasterweite von 100 m über Deutschland nötig. Dabei wären aber gerade für die großen Schläge im Norden und im Osten von Deutschland mehrere Prognosen berechnet worden. Um eine Prognose pro Schlag zu erhalten, könnte der Mittelwert aus diesen Ergebnissen gebildet werden. Auch das Precising Farming beschäftigt sich mit dem Umgang von teilschlagspezifischen Berechnungen (WAGNER 2004). Da in dieser Arbeit aber kein Precision Farming also teilschlagspezifische Berechnung erfolgen soll und aufgrund der kleinen Rasterweite keine Performanz mehr gewährleistet wäre, wurde ein Kompromiss zwischen Schlaggröße und Performanz gewählt und eine Rastergröße von 1x1 km festgelegt. Da alle Ausgangsdaten der Geobasisdaten kleinskaliert als das 1x1 km Raster waren, mussten diese erst umgerechnet werden. Hierdurch kam es zu einer weiteren Generalisierung des DGMs, was sich allerdings positiv auf den Speicherbedarf und die Rechenperformanz auswirkte. So war es möglich, für alle Basisdaten einen flächendeckenden Datensatz für das Bundesgebiet zusammenzustellen, der als Datenbasis für eine GIS-basierte Erstellung landwirtschaftlicher Schaderregerprognosen diente.

Damit die Berechnungen fehlerfrei und effizient durchgeführt werden konnten, war die Datenbank für interpolierte Wetterdaten (DIW) eine wichtige Komponente. Sie war dabei für die reibungslose Kommunikation der einzelnen Bausteine der Module verantwortlich.

Entstanden ist ein Zweikomponentensystem, das zum einen flächendeckenden Wetterdaten und zum anderen Schaderregerprognosen berechnet.

Zur Berechnung aller GIS-basierten Operationen wurde die Software ArcGIS 9.1 der Firma ESRI gewählt (ESRI 2003a). Die Fülle an räumlichen und geostatistischen Operationen, die bereits in diesem Softwarepaket integriert sind, ermöglichten es, flexibel testen und entwickeln zu können (LIEBIG und MUMMENTHEY 2002). In ESRI (2003c) sind die Funktionen beschrieben, mit denen die Geodaten an die Anforderungen angepasst werden konnten. Der Vorteil der Software ArcGIS 9.1 liegt darin, dass über die Erweiterung Geostatistical Analyst die Interpolationsroutinen Quadrantenmethode (IDW), Spline und Kriging (K) ohne weiteren Programmieraufwand genutzt werden konnten (ESRI 2003e). Für eine Massenberechnung der Interpolationen musste jedoch noch eine Automatisierung programmiert werden. Bei HÖCK und MANGEGOLD (2000) bzw. bei SPIECKERMANN (2005) ist beschrieben, wie eine Erweiterung für ArcGIS 9.1 mit ArcObjects erfolgen kann. SPIECKERMANN (2005) zeigte exemplarisch, dass es möglich ist, ein Prognosemodell ins GIS zu integrieren. Mit Hilfe dieser Entwicklungsumgebung war es dann möglich, zusätzlich zu den genannten Interpolationsverfahren das Verfahren multiple Regressionen (MR) zu implementieren und alle Arbeitsschritte zu automatisieren.

Ähnlich wie bei den Interpolationsverfahren stellte sich die Frage, wo und wie die Prognosen berechnet werden sollten. Bei RÖHRIG und SANDER (2004) wurde gezeigt, dass ISIP ein komplettes System ist, welches es durch einfache Anpassungen ermöglicht, die bestehenden Prognosemodelle zu nutzen. Zudem basiert ISIP auf Internettechnologie und dient als modernes Kommunikationsmedium (RÖHRIG und SANDER 2006). Neben ISIP wurde auch eine Verwendung der Software PASO bzw. die Integration der Modelle in ArcGIS mit ArcObjects vorgesehen. SPIECKERMANN (2005) zeigte, dass SIMPHYT1 mit Hilfe von ArcGIS zu rechnen war, wies aber gleichzeitig auf den Zeit- und Programmieraufwand dieser komplexen Modelle hin. Da eine spätere Praxiseinführung der hier entwickelten Verfahren über ISIP vorgesehen war, wurden die Prognosen mit ISIP berechnet.

Somit konnte mit der DIW eine GDI entwickelt werden, die alle benötigten Aufgaben erfüllen konnte und dazu noch zukunftsorientiert ausgerichtet war. Dabei wurden jedoch unterschiedliche Software und Programmiersprachen verwendet, die zum reibungslosen Ablauf miteinander kommunizieren mussten. Dies wurde mit Hilfe von Schnittstellenspezifikationen gelöst. Bei einer späteren performanten Nutzung ist allerdings darauf zu achten, dass eine einheitliche Software und lediglich eine Programmiersprache verwendet wird. Dies sorgt für ein stabiles System und größtmögliche Performanz. Da ISIP als Plattform

für eine Praxiseinführung vorgesehen war, wäre ein Austausch von ArcGIS-Desktop als GIS-Komponente möglich, da nur wenige Methoden aus dem umfangreichen Methodenpool von ArcGIS verwendet werden und eine serverseitige javabasierte GIS-Komponente von ISIP gewünscht wird. Die javabasierte GIS-Bibliothek MapObjects von ESRI (ESRI 2001) oder die freie Entwicklungsumgebung Kepler wären zwei Alternativen zu ArcGIS, in denen die benötigten Prozeduren umgesetzt werden könnten, um somit eine direkte Integration von GIS in ISIP zu erreichen. Zudem ist wahrscheinlich, dass die Standards nach OGC immer größere Bedeutung gewinnen werden und es wird eine Umwandlung von klassischer in moderne Datenhaltung erfolgen.

Regionalisierung der Interpolationszonen

Zur Durchführung der Interpolation wurden Interpolationszonen ausgewiesen. GEIGER (1961) wies in seinem Buch über „Das Klima der bodennahen Luftschichten“ darauf hin, dass die Aufstellungsvorschriften für eine Wetterstation dazu festgelegt worden sind, zufällige Einflüsse des Beobachtungsstandorts auszuschließen, um so repräsentative Messungen zu erzielen. Die Messwerte von Stationen, die 20, 50 oder mehr Kilometer entfernt liegen, kennzeichnen das Klima eines Landes (GEIGER 1961). Trotz einheitlicher Aufstellungsvorschriften werden immer wieder geländeklimatologische Unterschiede festgestellt, wodurch die Vergleichbarkeit der Stationen im Sinne einer Interpolation bzw. die Übertragbarkeit der Daten nicht mehr gewährleistet ist. Mit Hilfe der naturräumlichen Gliederung wird in der Geographie eine solche Vergleichbarkeit ermöglicht (LIEDTKE und MARCINEK 2002).

Zu einer Regionalisierung schreibt BURAK (2005), dass eine Landschaft als dynamisches und hierarchisches System aufgefasst werden kann. Dabei weisen Landschaften jeder Maßstabsebene räumliche Merkmalsunterschiede auf, die dadurch unterschiedliche räumliche Reichweiten haben. Als Ausprägungsmerkmale zur Beschreibung der Prozesskombinationen werden bei BURAK (2002) das Klima, das Relief, der Boden und die Nutzung genannt. ENDLICHER (1991), der für den Nationalatlas von Deutschland einige Gliederungen erstellte, verwendete Merkmale wie die Temperatur und den Niederschlag für die Einteilung des Klimaspektrums in Deutschland. Für die Einteilung von Agrarklimaregionen nutzte ENDLICHER (1991) den mittleren klimatischen Wasserhaushalt, die monatlichen Wärmesummen über 5 °C und die Frostdaten. MEYNEN und SCHMITHÜSEN (1962) verwendeten den Gesteinsaufbau, das Relief, die Vegetation und das Klima als Kriterien der Landschaftsbildung für ihre Arbeit der naturräumlichen Gliederung von Deutschland. In der agrarökologischen Gebietsgliederung von SCHULZKE und KAULE (2000) wurden die Gliederungsmerkmale Boden, Klima und Höhe verwendet, die auch als Gliederungsmerkmale

für diese Arbeit verwendet wurden. Eine Überprüfung der agrarökologischen Gliederung nach SCHULZKE und KAULE (2000) mit Hilfe der Reliefenergie zeigte, dass diese gut an das DGM angepasst war und somit den Ansprüchen als Ausgangsbasis an eine naturräumliche Gliederung für diese Arbeit gerecht werden konnte. Eine unveränderte Übernahme dieser Gliederung als Interpolationszonen war jedoch nicht möglich, da das Hauptaugenmerk in jeder Zone auf der Anzahl und Verteilung der Wetterstationen lag. SCHRÖDER (2004) zeigte, dass für Regionalisierungen der Temperatur bei dem Verfahren Kriging umfangreiche Messnetze notwendig waren, um plausible Ergebnisse zu erzielen. Bei HELLER (1996) wurde auf die unterschiedlichen Ansprüche des Stationsnetzes bei verschiedenen Interpolationsverfahren hingewiesen. Dabei lag der Schwerpunkt auf möglichst gleichverteilten Stationsnetzen mit möglichst vielen Wetterstationen. Um die minimale Anzahl von Wetterstationen pro Interpolationszone zu ermitteln, wurden Interpolationsberechnungen mit MR mit unterschiedlicher Anzahl von Stationen durchgeführt. Mindestens acht Stationen waren notwendig, um geeignete Korrelationen zu erreichen. Dabei ist aber zu bemerken, dass der Wert von acht Stationen eher als Anhaltspunkt, als als Richtwert zu verstehen ist. Denn ausgehend von der Verteilung der Stationen ist es möglich, dass mehr oder weniger Stationen ausreichen, um plausibel zu interpolieren. ZEUNER (2003) konnte zeigen, dass schon die Zunahme bzw. das Weglassen einer Station große Auswirkungen auf die Korrelation bei der Interpolation von Klimadaten haben kann. Es wurde versucht, jeder Zone mindestens acht Stationen zuzuordnen. Neben der naturräumlichen Gliederung wurde auch die Performanz in die Bildung der Interpolationszonen eingebunden. Berechnungen ergaben, dass eine Interpolation für einen Tag mit 15 Stationen pro Interpolationszone für 30 Zonen etwa 30 Minuten benötigt. Dies wurde auch als maximal zumutbare Berechnungszeit festgelegt.

Die agrarökologische Gliederung von SCHULZKE und KAULE (2000) wurde so modifiziert, dass das Messnetz optimal verwendet und jede Zone mit einer ausreichenden Anzahl an Stationen ausgestattet werden konnte. Vorher wurde jedoch die Einteilung von SCHULZKE und KAULE (2000) mit Hilfe der Reliefenergie kontrolliert. Dabei wurde ermittelt, dass zwei Regionen durch größere Höhenunterschiede charakterisiert waren, und deshalb nicht dem Anspruch für eine Interpolationszone gerecht werden konnten. An Brandenburg angrenzend war dies die BKR IIb/5 und in Rheinland-Pfalz die BKR IV/2. Durch Teilung und Zusammenlegung mit Nachbarflächen konnte die BKR in Rheinland-Pfalz korrigiert werden. Aufgrund fehlender Wetterstationen und der räumlichen Nähe zum Harz war eine Korrektur von BKR IIb/5 nicht möglich (siehe Kapitel 4.1.1 Regionalisierung auf Basis der Boden-Klima-Regionen). Bei der Modifikation der BKR zu Interpolationszonen war ein

Kompromiss zwischen Zonengröße und Stationsanzahl notwendig. Gerade im Norden und im Osten Deutschlands sind einige sehr große Zonen entstanden, die sich teilweise auch über mehrere Naturräume ausbreiten. Aufgrund der morphologischen Gegebenheiten von Nord- und Ostdeutschland aber war auch mit größeren Zonen in diesem Bereich zu rechnen (LIEDTKE und MARCINIEK 2002). Die Ergebnisse der Interpolationsberechnungen (siehe Kapitel 4.2 Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte) haben gezeigt, dass auch in großen Interpolationszonen plausible Ergebnisse erzielt werden konnten. Sollten, wie im Jahr 2006 in Brandenburg, dauerhaft weitere Messstationen in diesen Zonen zur Verfügung stehen, kann eine Modifikation bzw. Verkleinerung dieser Zonen vorgenommen werden. Kritisch bemerkt werden muss noch, dass die harten Grenzen der Interpolationszonen zu einer eingeschränkten Nutzung der Wetterstationen führen. Die Wetterstationen werden dadurch immer genau einer Zone zugeordnet und eine Mehrfachverwendung ist nicht möglich. Da in benachbarten Interpolationszonen jeweils unabhängige Ergebnisse berechnet werden, ist zu erwarten, dass es zu Abweichungen an den Grenzen zwischen den Zonen kommt. Dies war aber nicht Gegenstand dieser Untersuchungen. MÜLLER-WESTERMEIER (1995) wies bei der Erstellung von numerischen Karten für den DWD auf dieses Problem hin. Um dem Stationsnetz stärkere Gewichtung bei der Bildung von Interpolationszonen zukommen zu lassen, wurden weitere Ansätze geprüft. In den Arbeiten von MÜLLER-WESTERMEIER (1995) und SCHNEIDER (2003) dienen geometrische Formen als Gliederungsobjekte für Deutschland zur Bildung von klimatologischen Karten bzw. von Ozonvorhersagekarten. Dabei wurden sowohl rechteckige wie auch runde Geometrien eingesetzt. In einem zweiten Ansatz wurden deshalb keine Interpolationszonen, sondern Interpolationskreise konstruiert. Auf Basis eines regelmäßig versetzten Rasters wurden überlappende Kreise erzeugt. SUN (2002) konnte zeigen, dass gerade bei gleichmäßigen Clustern- bzw. Kreisen die Radiusgröße erheblichen Einfluss auf die Durchführbarkeit von räumlichen Analysen hat, so dass die Kriterien für die Interpolationszonen auch Gültigkeit für die Interpolationskreise haben sollten. Zusätzlich musste darauf geachtet werden, dass die Kreise die Fläche von Deutschland komplett abdecken. Zur Bestimmung des Radius und der Kreismittelpunkte wurden verschiedene Kombinationen getestet. Ein Abstand zwischen den Kreismittelpunkten von 100 km und ein Radius von 70 km wurden als geeignet ermittelt. Diese Vorgehensweise hatte den Vorteil, dass die Messstationen in mehreren Kreisen gleichzeitig verwendet wurden. Somit konnte eine optimale Ausnutzung des Stationsnetzes erreicht werden. Allerdings hatten neun Kreise weniger als acht Stationen und mit 47 Kreisen konnte die geforderte Anzahl von maximal 30 Kreisen nicht eingehalten werden, weswegen

die Interpolationskreise den Ansprüchen einer Regionalisierung für eine Interpolation nicht gerecht werden konnten. Zudem fehlte bei der Einteilung in Kreise jegliche Geländeinformation.

Um sowohl dem Geländeeinfluss als auch dem Wetterstationsnetz ausreichende Bedeutung zukommen zu lassen, wurde ein dritter Ansatz aus einer Kombination der bisherigen erzeugt. BURAK (2002) wies darauf hin, dass es sinnvoll sein kann, Ansätze zu kombinieren, um die Vorteile zu bündeln und die Nachteile zu minimieren. Es stellte sich heraus, dass der dritte Ansatz aus beiden Lösungen am besten geeignet war. Dabei wurden, je nach Reliefenergie, überlappende Grenzen von 5 bis 10 km zwischen den Interpolationszonen definiert. Die Wetterstationen, die sich in einem Überlappungsbereich befanden, wurden in zwei oder mehreren Zonen für die Interpolationsberechnung verwendet. Durch die Einhaltung der naturräumlichen Gegebenheiten ist ein Vergleich der Stationen innerhalb einer Zone möglich (MEYNEN und SCHMITHÜSEN 1962). Die Nutzungsmöglichkeit des Messnetzes konnte verbessert werden, indem einige Wetterstationen mehreren Interpolationszonen zugeordnet wurden, was die Anzahl der Wetterstationen pro Interpolationszone erhöht. Größere Stichprobenzahlen durch Veränderung der Rastergröße führen nach Sun (2002) zu einer Verbesserung der Zusammenhänge der untersuchten Objekte. Die Interpolationszonen mit überlappenden Grenzen waren daher eine gute Basis für die folgende Interpolationsberechnung.

Durch Änderungen des Stationsnetzes, wie sie in Brandenburg 2006 erfolgte, sollte eine Modifikation der Einteilung überdacht werden, um die großen Interpolationszonen im Norden und Osten Deutschlands zu verkleinern. Um aber die Vergleichbarkeit der einzelnen Jahre 2003 und 2004, sowie 2005 und 2006 zu gewährleisten, wurde in dieser Arbeit auf eine Anpassung der Interpolationszonen verzichtet.

Dass weitere Modifikationen der Interpolationszonen in den nächsten Jahren vorgenommen werden, ist unwahrscheinlich. Es existieren zwar eine Vielzahl weiterer Wetterstationen, die aber zurzeit für den Interpolationsprozess nicht zur Verfügung stehen. Diese Stationen gehören zu Messnetzen der Wasserwirtschaftämter der Bundesländer von Deutschland, der Meteomedia AG (METEOMEDIA 2007) oder anderen Institutionen und dienen zur Bearbeitung der jeweiligen fachspezifischen Fragestellungen. Durch eine Bereitstellung über Internetdatenbanken, ähnlich wie bei Geodaten könnte eine breitere Nutzung dieser Wetterdaten erfolgen und eine Einbindung in die Verfahren dieser Arbeit wäre möglich. Dies würde zu einem deutschlandweiten engmaschigen Messnetz führen, mit dem noch höhere

Genauigkeiten bei einer Interpolation zu erwarten wären, als bisher (MÜLLER-WESTERMEIER 1995, SUN 2002, SCHRÖDER 2004).

Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte

In einem weiteren Schritt erfolgte die Wahl eines geeigneten Interpolationsverfahrens für die Interpolation der Temperatur und der relativen Luftfeuchte. Nach einer eingehenden Literaturrecherche kristallisierte sich heraus, dass die geostatistischen Verfahren deutliche Vorteile gegenüber den deterministischen Verfahren aufweisen. SEDLACEK (1978) und HELLER (1996) untersuchten die Anwendbarkeit von Regionalisierungsverfahren. Dabei kamen beide zu dem Schluss, dass die deterministischen Verfahren, wie IDW und Spline, aufgrund der fehlenden Geländeinformation (2-D Modelle) nicht an die Ergebnisse der geostatistischen Modelle heranreichen konnten. HELLER (1996) verwies allerdings darauf, dass in einfachem Gelände, bei dem nur geringe Höhenunterschiede auftreten, heute immer noch mit deterministischen Verfahren gerechnet wird, da diese Verfahren einfach zu überschauen und schnell zu rechnen sind. Deshalb wurden erste Interpolationsberechnungen sowohl mit den deterministischen Verfahren IDW und Spline, als auch mit den geostatistischen Verfahren K und MR durchgeführt. Besonders betont wurden zwei geostatistischen Verfahren. Dies waren bei STREIT (1981) und bei OLIVER und WEBSTER (1990) das Verfahren K und bei HORMANN (1979), DALY et al. (1993) sowie KLEIN (1994) das MR-Verfahren. Beide Verfahren hatten sich bei der Interpolation von klimatologischen Größen bewährt (ROSNER 1992). Allerdings wies bereits SCHRÖDER (2004) darauf hin, dass durch den komplizierten mathematischen Algorithmus bei K von langen Berechnungszeiten ausgegangen werden muss. Zudem benötigt das Verfahren ein engmaschiges, dichtes Messnetz, um plausible Ergebnisse zu erzielen. Nach HORMANN (1979) liegen die Stärken des MR-Verfahren im Einbeziehen der dritten Dimension (Höhe) sowie weiterer Prädiktoren mit Einfluss auf den zu interpolierenden Parameter.

Ergebnisse mit den vier genannten Interpolationsverfahren bestätigten die in der Literatur gefundenen Aussagen. Die Verfahren IDW und SPLINE waren nicht in der Lage vergleichbare Ergebnisse wie mit K und MR zu erzielen. Die maximalen und minimalen Abweichungen zwischen gemessenen und berechneten Werten hatten bei der Temperatur um 3 bis 6 °C und bei der relativen Luftfeuchte um 10 bis 22 % höhere Abweichungen als die geostatistischen Verfahren. Die Gründe hierfür liegen in der Vernachlässigung des Geländes und somit der dritten Dimension. Dies wurde auch von ROSNER (1992) und HELLER (1996) bestätigt. Aufgrund fehlender Höheninformation und weiten Entfernungen zwischen den Wetterstationen war es nicht möglich, mit IDW und SPLINE die gleichen Ergebnisse zu

erreichen wie mit K und MR. Bei dieser Untersuchung wurde jedoch deutlich, dass sowohl mit MR als auch mit K plausible Ergebnisse erzielt werden konnten. Um diese genauer zu bewerten, wurden weitere Berechnungen durchgeführt.

Dabei wurden in den Interpolationszonen in Brandenburg und in Rheinland-Pfalz jeweils vier Stationen einzeln nacheinander von der Interpolation ausgeschlossen und anschließend die berechneten mit den gemessenen Werten dieser Stationen verglichen. Sowohl bei dem Verfahren K als auch bei MR wurden Abweichungen an den Messstationen ermittelt. Diese lagen für die Temperatur bei 50 % aller Werte im Mittel um $\pm 0,5$ °C. Bei 99 % aller Werte konnten im Mittel Abweichungen von ± 2 °C registriert werden. Bei der relativen Luftfeuchte wurden Abweichungen mit den Quartilen von ± 5 % und mit den Whiskers von ± 18 % erreicht. Mehr als 50 % aller Abweichungen liegen sogar im Bereich des Messfehlers der Messsensorik (VDI 1985a, VDI 1985b). Das heißt, dass bei beiden Verfahren nicht festgestellt werden kann, ob die Abweichungen aufgrund von Interpolations- oder Messfehlern aufgetreten sind. Um zu überprüfen, ob statistische Unterschiede zwischen den gemessenen und berechneten Daten mit K und MR bestehen, wurde ein T-Test durchgeführt, der ergab, dass die Daten nicht signifikant verschieden waren. Das bedeutet, dass die Unterschiede, die im Datensatz ermittelt wurden, zufällig sind (SCHÖNWIESE 2000). Als Kriterium, welches der beiden Verfahren geeigneter war und zur Interpolation als Input von Schaderregerverfahren verwendet wird, wurde zusätzlich die Performanz der Verfahren herangezogen. Wie erwartet und auch in der Literatur bei SCHRÖDER (2004) erwähnt, waren die Berechnungszeiten von K, aufgrund des komplizierten mathematischen Verfahrens fast doppelt so hoch wie die von MR. Für alle weiteren Berechnungen wurde deswegen entschieden, das MR-Verfahren als Standardverfahren zu verwenden.

Das Bestimmtheitsmaß für die Temperaturinterpolationen lag bei dem MR-Verfahren zwischen 94 und 99 %. Werden diese Ergebnisse mit denen von MUES (2000) verglichen, der in seiner Dissertation eine Regionalisierung der langjährigen Mittelwerte für Niedersachsen im Forstbereich durchgeführt hat, so ist festzustellen, dass MUES (2000) mit MR vergleichbare Bestimmtheitsmaße im Vergleich der gemessenen zu den berechneten Temperaturen erzielen konnte. In Brandenburg und in Rheinland-Pfalz wurden in dieser Arbeit die Prädiktoren geographische Länge, geographische Breite und Höhe als ausschlaggebend zur Berechnung der Temperatur und der relativen Luftfeuchte herausgearbeitet. Dies verwundert nicht, da das Messnetz aus landwirtschaftlicher Sicht zur Überwachung von landwirtschaftlichen Schaderregern bzw. in landwirtschaftlichen Schwerpunktgebieten errichtet wurde und die Variabilität bzw. die Geländerepräsentanz für

die Standortwahl keine Rolle spielte (KEIL 2006). Dennoch wurden enge Zusammenhänge zwischen gemessenen und berechneten Daten ermittelt. Bei den Regressionen von MUES (2000) in Niedersachsen wurden vier Prädiktoren ermittelt. Neben der geographischen Länge, Breite und Höhe über NN. hatte auch die Küstennähe großen Einfluss auf das Berechnungsergebnis. Aufgrund der großen Entfernung zur Küste im Fall von Brandenburg bzw. Rheinland-Pfalz hat dies in beiden Bundesländern keine Rolle gespielt. Es zeigt aber, dass bei einer Übertragung der Verfahren auf andere Bundesländer eine erneute Überprüfung der Prädiktoren durchgeführt werden sollte. Mit der relativen Luftfeuchte wurden bei der Auswahl der Prädiktoren ähnliche Ergebnisse erzielt und ebenfalls Länge, Breite und Höhe für die MR ausgewählt. MUES (2000) zeigte, dass teilweise der Lee-Effekt zusätzlich zu den genannten Prädiktoren bei der MR verwendet wurde. Dies lag an der unterschiedlichen Skalierung der Arbeiten. MUES (2000) verwendete eine Auflösung von 50 m, wodurch das Gelände viel detailreicher dargestellt wurde und kleinräumige Ereignisse großen Einfluss auf das Ergebnis ausübten. In der vorliegenden Arbeit wurde aus Performanzgründen eine Auflösung von 1x1 km gewählt, wodurch eine Generalisierung, die viele geländeklimatologische Effekte nicht berücksichtigte, erfolgte.

ZEUNER (2003) erzielte im Rheingau mit MR vergleichbare Ergebnisse. Seine Interpolation mit MR erreichten durchschnittliche Abweichungen von $\pm 1,5\text{ }^{\circ}\text{C}$ von monatlichen Mittelwerten. Das Stationsnetz war darauf ausgelegt, unterschiedliche Höhenlagen, Hangneigungen und Expositionen abzudecken und war damit deutlich variabler als das hier verwendete. Dies spiegelte sich auch in der Aufnahme der Prädiktoren der MR wieder. Neben der Höhenlage hatten unterschiedliche Kombinationen aus Länge, Breite, Hangneigung, Exposition und Lee-Effekten Einfluss auf das Ergebnis der Berechnungen. Die niedrige Auflösung von 20x20 m war dafür verantwortlich, dass die geländeklimatologischen Gegebenheiten in einem kleinen Einzugsgebiet zum Tragen kamen und nachgebildet werden konnten. In seinen Darstellungen konnte ZEUNER (2003) mikro- bzw. mesoklimatische Effekte wie die Kaltluftgefährdung oder Staueffekte an Mulden oder Täler nachbilden (GEIGER 1964, LILJEQUIST 1994). Ein durchschnittlicher Hang in Deutschland hat in etwa eine Länge von 300 m bei einer Auflösung von 1x1 km war es demnach nicht möglich Effekte, wie den Kaltluftabfluss nachzubilden. Zudem konnten durch die beschriebene geringe Variabilität des Messnetzes keine Luv- und Lee-Effekte, sowie Hangneigungs- und Expositionseffekte nachgewiesen werden. Hierzu wäre ein deutlich engmaschigeres DGM nötig, um diese kleinskalierten Ergebnisse kartographisch darzustellen. Da bei einer deutschlandweiten Betrachtung keine Performanz mehr gewährleistet wäre, und der bei dieser

Arbeit zur Verfügung stehende Computer mit dieser Datenmenge überlastet wäre, war eine solche Vorgehensweise nicht praktikabel. Um den Einfluss von Hangneigung und Exposition zu berücksichtigen, wären weitere Feldversuche, wie sie GEIGER (1964) oder ZEUNER (2003) durchgeführt haben, notwendig. Dabei müssten deutschlandweit Versuchsstationen in kleinen Einzugsgebieten aufgestellt werden, die den Einfluss der Geofaktoren auf die Wetterparameter ermitteln. Der Aufwand einer solchen Untersuchung wäre allerdings nicht überschaubar, so dass zunächst weitere Untersuchungen außerhalb dieser Arbeit nötig sind.

Ein weiterer Faktor, der zu einer Verbesserung der Interpolation beitragen könnte, wäre die Einbeziehung von Wetterlagen. Diese zeichnen einen typischen Witterungsverlauf nach mit dem es möglich ist, eine Tendenz für das Verhalten der Temperatur und der relativen Luftfeuchte abzuschätzen (LILJEQUIST 1994). Ob und wie Wetterlagen bei der Interpolation Verwendung finden können, bedarf weiterer Untersuchungen.

Bei der Interpolation der Wetterparameter Temperatur und relativer Luftfeuchte konnten Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Werten im Mittel von weniger als 0,3 °C bzw. 5 % relativer Luftfeuchte festgestellt werden. Die Ungenauigkeiten der interpolierten Wetterdaten sind somit nicht höher als die Messungenauigkeit der Wetterstationen und somit tolerabel. Ganz im Gegenteil, durch geländeklimatische Einflüsse (GEIGER 1961) ist damit zu rechnen, dass die Ungenauigkeiten von interpolierten Wetterdaten eines Kartoffelschlages geringer sind als die einer in der Nähe liegenden Wetterstation. Die interpolierten Wetterdaten dienen im Folgenden als Inputparameter für die Berechnung von landwirtschaftlichen Schaderregerprognosen.

Prognosenberechnung

Ziel der Validierung der Prognoseergebnisse mit gemessenen und interpolierten Wetterdaten war es herauszufinden, ob die in dieser Arbeit entwickelte neue Methode, der Berechnung von Schaderregerprognosen mit interpolierten Wetterdaten, die gleichen oder bessere Trefferquoten erreicht werden können als die Berechnung der Prognose mit einer nahegelegenen Wetterstation. Hierzu wurden die Prognosemodelle SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMBLIGHT1 und SIMPHYT1 betrachtet.

Bei JÖRG et al. (1997) und ROßBERG et al. (1999) wurden Validierungen der Modellergebnisse von SIMLEP3 durchgeführt. Dabei wurden Felderhebungen aus den Jahren 1994 bis 1996 verwendet. ROßBERG et al. (1999) berechneten ihre Prognosen mit den Daten naheliegender Wetterstationen zu ihren Versuchsschläge. Anschließend wurde das Prognoseergebnis mit den Daten der Felderhebung verglichen und bewertet. Mit Trefferquoten von 80 bis 90 % resümierte ROßBERG et al. (1999), dass die Prognosen zufriedenstellend waren. Die

Validierung der Modellergebnisse von SIMLEP3 dieser Arbeit wurde nach analoger Vorgehensweise durchgeführt. Dabei wurde immer eine Prognose mit den Daten der naheliegenden Wetterstation (SIMLEP3-m) und den Daten der virtuellen Wetterstation (SIMLEP3-v) berechnet. Für die Auswertung der Prognoseergebnisse dienten Felderhebungen der Jahre 2000, 2001, 2004, 2006 und 2007. Sowohl mit SIMLEP3-m als auch mit SIMLEP3-v konnten nicht die gleichen Trefferwahrscheinlichkeiten erzielt werden wie bei JÖRG et al. (1997) und ROßBERG et al. (1999). Diese lagen mit SIMLEP3-m und SIMLEP3-v zwischen 65 und 80 %. Da an einigen Standorten 2006 bereits erste Eigelege bei der ersten Bonitur festgestellt wurden, ist davon auszugehen, dass zu spät mit dem Start der Bonituren begonnen wurde. Der Fund erster Eigelege dient als Startwert für den Modellalgorithmus von SIMLEP3. Ein zu später Modellstart führt zu einer zu späten Prognose, wodurch die Unterschiede der Trefferquoten zwischen ROßBERG et al. (1999) und dieser Arbeit zu erklären sind. Zudem wurde bei ROßBERG et al. (1999) alle 3 bis 4 Tage bonitiert, wogegen die Schläge in dieser Arbeit alle 6 bis 7 Tage nach Kartoffelkäfern untersucht wurden. Der kürzere Boniturabstand kann auch ein Grund für die höhere Trefferquote bei ROßBERG et al. (1999) sein.

Bei den Trefferquoten konnten fast keine Unterschiede zwischen SIMLEP3-m und SIMLEP3-v erkannt werden. Das heißt, dass basierend auf der Temperatur zufriedenstellende Interpolationen berechnet wurden, mit denen plausible Prognosen erstellt werden konnten. Wird die Differenz zwischen dem prognostiziertem Datum und dem Datum der Felderhebungen von SIMLEP3-m und SIMLEP3-v berechnet, so konnten Abweichungen von maximal drei Tagen zwischen den beiden Berechnungsmethoden festgestellt werden. Dabei waren die Abweichungen von SIMLEP3-v häufig näher am Boniturdatum als die von SIMLEP3-m. Die geringen Unterschiede zwischen den Berechnungen mit gemessenen und berechneten Wetterdaten sind durch die bei der Sensitivitätsanalyse festgestellten Eigenschaften des Modellalgorithmus von SIMLEP3 zu erklären. Dabei werden durch Summenbildung die feinskalierten Wetterdaten, die bei der Interpolation erzeugt wurden, generalisiert. Das bedeutet, dass aufgrund des Modellalgorithmus keine Steigerung der Trefferquote durch eine weitere Verfeinerung der Interpolationsergebnisse zu erwarten ist. Da diese Methode aber hauptsächlich an Schlägen getestet wurden, die in ihrer Umgebung ein schwaches Relief aufweisen, das heißt, bei denen keine großen Temperaturunterschiede auftreten, können größer Abweichung bei stärkerem Relief nicht ausgeschlossen werden.

Der große Vorteil der Berechnung von SIMLEP3 mit Hilfe von GIS ist die räumliche Berechnung und Darstellung der Prognoseergebnisse. Die Wahl einer geeigneten

Wetterstation entfällt. Hierdurch kommt es durch die Prognoseberechnung mit interpoliertem Wetter zu einer großen Übereinstimmung zwischen dem prognostizierten Auftreten und dem auf dem Schlag festgestelltem Auftreten von empfindlichen Larvenstadien.

Um jedoch die Ergebnisse von SIMLEP3 räumlich berechnen zu können, muss aus dem schlagspezifischen Modell ein räumliches oder regionales Modell werden, da der Starttermin für die Prognoseberechnung aktuell an dem Fund der ersten Eigelege festgemacht wird (ROßBERG et al. 1999). Ähnlich wie bei SIMBLIGHT1 könnten Fundpentaden zur Einteilung des Fundtermins der ersten Eigelege gebildet werden. Somit wäre es möglich, für jede Fundpentade eine Prognosekarte für SIMLEP3 zu zeichnen.

Um die zeitaufwändigen Erhebungen der Bestimmung des Termins der ersten Eigelege zu minimieren, entwickelte die ZEPP ein neues Modell (SIMLEP-Start), welches das Erscheinen von Altkäfern aus dem Winterlager simuliert (JÖRG et al. 2007). Dieses Modell könnte auch als Basis zur Berechnung von SIMLEP3-Ergebniskarten verwendet werden. Zusätzlich wäre es möglich, mit Hilfe von GIS und aktuellen Anbaustatistiken mit Informationen über Fruchtfolgen (Statistisches Bundesamt bzw. InVeKoS) das Besiedelungsrisiko für Nachbarschläge durch Kartoffelkäfer zu berechnen. Hierdurch ist eine genauere Bestimmung des Startzeitpunktes des Modells zu erwarten.

Das Modell SIMPHYT3 prognostiziert den Infektionsdruck und den PEW-Wert der Krautfäuleepidemie. Bei GUTSCHE (1999) wurde bereits die Funktionsweise und die Anwendbarkeit des Modells SIMPHYT3 eingehend beschrieben und dabei das Modellergebnis in fünf Infektionsdruckklassen (siehe Kapitel 3.9.3 SIMPHYT3) eingeteilt. Betont wurde der große Nutzen des Modells, weswegen es auch intensiv in der Praxis eingesetzt wird.

Da der Infektionsdruck nicht mit einem durch Bonituren erhobenen Wert verglichen werden kann und keine Validierungsmethode in der Literatur beschrieben ist, wurde für die Validierung der Ergebnisse von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v eine rein statistische Auswertung vorgenommen. Dabei wurde analog zur Vorgehensweise der Wetterdatenvalidierung vorgegangen.

Zunächst wurden Diagramme des täglichen Wertes des Infektionsdrucks von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v gebildet. Dabei konnten nur Unterschiede in der Amplitude zwischen dem Infektionsdruck berechnet mit gemessenen und interpolierten Wetterdaten aber nicht in der Tendenz festgestellt werden. Um Herauszufinden welcher Wetterparameter verantwortlich für diese Amplitude war, wurde auch mit gemischten Wetterdaten (interpolierten und gemessenen Daten) gerechnet. Dabei zeigte sich, dass die relative Luftfeuchte den größeren Einfluss auf

das Prognoseergebnis hatte und somit verantwortlich für die Amplitude war. Die Temperatur spielte dabei nur eine geringe Rolle. Wie beschrieben werden die infektionsgünstigen Perioden durch die relative Luftfeuchtigkeit charakterisiert. Als Definition gilt, dass in den vergangenen 16 Stunden mindestens zehn Stunden eine relativen Luftfeuchte von über 75 % ermittelt wurde. Das bedeutet, dass bereits geringe Interpolationsungenauigkeiten dazu führen, dass infektionsgünstige Perioden falsch klassifiziert wurden. Anhand der Wetterdaten konnte nachgewiesen werden, dass in 90 % der Fälle in denen mit SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v ein Unterschied in der infektionsgünstigen Periode ermittelt wurde, der Luftfeuchteunterschied zwischen gemessenen und berechneten Luftfeuchten bei maximal 4 % lag. Hier gilt es nun zu prüfen, ob eine weitere Verfeinerung der Luftfeuchteberechnung zu einer besseren Beschreibung des Infektionsdrucks führt. Möglichkeiten hierzu wurden bereits bei der Wetterdatenvalidierung angesprochen. So könnte zum Beispiel durch die Integration von Wetterlagen bei der Interpolationsberechnung der relativen Luftfeuchte eine Verbesserung der Interpolationsergebnisse erfolgen. Dies wurde bereits bei der Diskussion der Interpolation der Temperatur und relativen Luftfeuchte angesprochen.

Mit Hilfe von linearen Regressionen und Box-Whisker-Plots wurde der Zusammenhang zwischen den Abweichungen des Infektionsdrucks von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v betrachtet. Das Bestimmtheitsmaß lag dabei zwischen 76 und 98 %. Der Mittelwert der Abweichungen lag bei 0,2. Anschließend wurden die Unterschiede des Infektionsdrucks von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v auf Signifikanz untersucht. Das Ergebnis des T-Tests bestätigte die vorherige Beobachtung, dass die Unterschiede zwischen SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v nicht signifikant waren. Es war also möglich, plausible Berechnungen für den Infektionsdruck mit dem Modell SIMPHYT3 und interpolierten Wetterdaten durchzuführen. Die Untersuchungen mit dem PEW-Wert führten zu analogen Ergebnissen wie beim Infektionsdruck.

Neben der statistischen Auswertung der Modellergebnisse von SIMPHYT3 wurde auch untersucht, wie sich der Infektionsdruck innerhalb eines Einzugsgebiets ändert. Hierzu dienten flächendeckende Berechnungen für ein Gebiet zwischen Alzey, Mainz und Worms mit einer Ausdehnung von 25 km. Geländebedingten Änderungen der Werte des Infektionsdrucks kamen dabei deutlich zum Vorschein. In den tiefer liegenden Gebieten in der Nähe des Rheins konnte zum gleichen Zeitpunkt ein höherer Infektionsdruck ermittelt werden als auf den höher liegenden Gebieten in Rheinhessen. Diese Berechnungen zeigen, dass durch die flächenhafte Berechnung von Schaderregerprognosen mit SIMPHYT3 schon in einem relativ kleinen Gebiet differenzierte Beratungsaussagen möglich sind.

Ein wichtiger Baustein in der Pflanzenschutzberatung sind die Modelle zum EA von *P. infestans*. Deshalb wurden die beiden Modelle SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 zur Vorhersage des EAs der Krautfäule betrachtet. Bei KLEINHENZ et al. (2006) wurde eine intensive Validierung der Modellergebnisse von SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 vorgenommen, bei der über 600 Felderhebungen von 1994 bis 2005 zur Validierung verwendet wurden. Dabei wurden die Ergebnisse der Modelle SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 mit den Ergebnissen der Felderhebungen verglichen. Eine Prognose konnte als korrekt bewertet werden, wenn das Prognosedatum vor dem Datum des bonitierten EAs auf dem Schlag lag (KLEINHENZ et al. 1999). Die erzielten Trefferquoten lagen bei KLEINHENZ et al. (2006) bis auf die Jahre 2002 und 2003 bei über 90 %. In den Jahren 2002 und 2003 wurde mit dem Modell SIMPHYT1 nur eine Trefferquote von rund 60 % erreicht, dies lag an den sehr feuchten Monaten April bis Juni dieser beiden Jahre. Um auch in feuchten Jahren hohe Trefferquoten zu berechnen, wurde das Modell SIMBLIGHT1 entwickelt, was den Einfluss der Bodenfeuchte und der Anbaudichte berücksichtigt, um angepasste Ergebnisse zu erzielen (KLEINHENZ et al. 2006). Mit dem Modell SIMBLIGHT1 konnten in den Jahren 2002 und 2003 bis zu 27 %-Punkte höhere Trefferquoten erzielt werden als mit SIMPHYT1.

Für die Validierung der Prognoseergebnisse von SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 mit gemessenen (-m) und interpolierten (-v) Wetterdaten dieser Arbeit wurden 790 Felderhebungen von 2000 bis 2006 ausgewertet. Dabei wurden die gleichen Trefferquoten mit SIMPHYT1-m und SIMBLIGHT1-m erreicht wie bei KLEINHENZ et al. (2006). Mit den Ergebnissen der Modelle SIMPHYT1-v und SIMBLIGHT1-v konnten um ein bis vier Prozentpunkte höhere Trefferquoten berechnet werden als mit den Ergebnissen mit gemessenen Wetterdaten. Auffallend war allerdings, dass auch bei interpolierten Wetterdaten in den Jahren 2002 und 2003 um 15 bis 20 % geringere Trefferquoten erzielt wurden. Das zeigt, dass durch die Berechnung der Prognosen mit GIS-basierten Inputparametern die Grenzbereiche bzw. die Limits der Modelle nicht aufgehoben werden und bei SIMPHYT1 2002 und 2003 die gleichen Beobachtungen gemacht werden konnten wie bei KLEINHENZ et al. (2006). GIS kann durch räumliche Darstellung der Ergebnisse bzw. durch Verschneidung mit Einflussfaktoren dazu beitragen, Lücken oder ungenaue Bereiche von Modellen aufzudecken, die dann weiter untersucht und modifiziert werden können.

Festzuhalten bleibt, dass mit interpolierten Wetterdaten um ein bis vier Prozent höhere Trefferquoten erzielt werden konnten als mit gemessenen Wetterdaten. Die Steigerung der Trefferquote von SIMBLIGHT1-v war größer als die von SIMPHYT1-v. Dies war auch so zu erwarten, da bei der Sensitivitätsanalyse gezeigt werden konnte, dass die Wetterdaten zur

Bestimmung der infektionsgünstigen Perioden bei SIMPHYT1 nur eine geringe Rolle spielen. Da das Modell SIMBLIGHT1 auf dem Modellalgorithmus von SIMPHYT3 basiert, ist zu vermuten, dass der Unterschied zwischen den Prognoseberechnungen mit gemessenen und interpolierten Wetterdaten bei SIMBLIGHT1 mit einer unterschiedlichen Anzahl an infektionsgünstigen Perioden (also durch die relative Luftfeuchte) zu erklären ist. Für das Modell SIMBLIGHT1 gelten daher die gleichen Empfehlungen zur Weiterentwicklung der Wetterinterpolation bzw. zur Betrachtungstiefe wie beim Modell SIMPHYT3.

Werden die Abweichungen der Prognoseergebnisse von den Felderhebungen in Tagen betrachtet, so fällt auf, dass die Ergebnisse basierend auf interpolierten Wetterdaten im Mittel 5 bis 8 Tage geringere Abweichungen zu den Felderhebungen aufwiesen als die Ergebnisse mit gemessenen Wetterdaten. Es bleibt aber die Gefahr, dass die Empfehlung zum ersten Fungizideinsatz zu spät berechnet wird. LINDNER et al. (1995) beurteilten die Wirkungskomponenten neuer *Phytophthora*-Fungizide auf der Basis von Laboruntersuchungen. Dabei wurde auf die protektive und kurative Wirkung von Fungiziden eingegangen. Die volle protektive Leistung wird nur erreicht, wenn das Fungizid vor dem ersten Kontakt zwischen der Pflanze und dem Pilz appliziert wurde. Dabei wird verhindert, dass die Sporen einen Keimschlauch bilden und die Pflanze befallen können. Nach erfolgter Infektion verlieren die protektiven Fungizide ihre Wirkung und es muss kurativ behandelt werden. Ideal wäre es, wenn die erste protektive Behandlung eine Woche vor dem EA auf dem Kartoffelfeld erfolgen würde. War das Modell allerdings zu spät und der Bekämpfungszeitpunkt für protektive Fungizide wurde verpasst, können nur noch kurative Behandlungen folgen.

Die Betrachtung einzelner Kartoffelschläge, bei denen keine Behandlung vor dem EA erfolgte, lieferten mit den Modellen SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 analoge Resultate, wie die eben beschriebenen Ergebnisse mit den Felderhebungen von 2000 bis 2006. Dabei lagen die Berechnungen mit interpolierten Wetterdaten häufig näher am Boniturdatum als die Berechnungen mit gemessenen Wetterdaten. Die Differenz zwischen der Prognose mit gemessenen und interpolierten Wetterdaten lag bei einem bis acht Tagen. Auffallend war nur, dass es durch fehlende Informationen über das Inokulum in diesen Gebieten mit hoher Anbaudichte zu ungenauen Prognosen kam. Das Inokulum beschreibt die Masse der infektiösen Einheiten eines Schaderregers (HALLMANN et al. 2007). Wie bei KLEINHENZ (2005) beschrieben, befindet sich das Inokulum auf Kartoffelpflanzen aus infizierten Nachbarmfeldern, Durchwuchskartoffeln, Abfallhaufen und infiziertem Pflanzgut. Je mehr Inokulum vorhanden ist umso schneller ist die Infektion eines ganzen Schläges möglich.

Wenn Informationen über das Inokulum vorliegen, kann damit der Startwert der Modelle genauer beschrieben werden. ADLER (2001) konnte in Versuchen mit inokulierten Kartoffelknollen zeigen, dass die Häufigkeit des Auftretens von latent erkrankten Trieben abhängig von der Bodenart und dem Wassergehalt ist. Gleiches gilt für den Ausbruch der Epidemie. Risikofaktoren für die Ausbreitung des Pilzes sind nach ADLER (2001) hohe Niederschläge, schwere, wasserhaltige Böden und hohe Bodenfeuchte. KLEINHENZ et al. (2006) wiesen darauf hin, dass auch die Anbaudichte einen Einfluss auf eine mögliche Infektion hat. Deshalb wurden beide Parameter, wie beschrieben, bei der Entwicklung von SIMBLIGHT1 in das Modell integriert. In der aktuellen Version muss der Nutzer vor dem Modellstart angeben, ob der Schlag eine hohe Bodenfeuchte und eine hohe Anbaudichte in der Umgebung aufweist. Dadurch obliegen diese Werte oft Vermutungen oder Schätzungen (KLEINHENZ et al. 2006). Die Objektivierung dieser Regionalfaktoren mit GIS wäre eine Möglichkeit, den Startwert der Schaderregerprognose zu verbessern. Die Anbaudichte ließe sich mit Hilfe von Anbaustatistiken und Daten von InVeKoS berechnen. Die Bodenfeuchte könnte mit Hilfe von Wasserhaushaltsmodellen flächendeckend berechnet werden (MENSE-STEFAN 2005). Neben der genauen Erfassung des Inokulum spielt aber auch die regionale Ausbreitung der Krankheit in einem Gebiet mit hoher Anbaudichte eine wichtige Rolle. Durch Geofaktoren und GIS könnte es möglich sein, Ausbreitungsmodelle an die EA-Modelle anzuschließen, um die regionale Ausbreitung der Krankheit zu prognostizieren. Hierzu ist aber weiterer Forschungsbedarf notwendig.

Die Ergebnisse zeigen, dass sowohl die Interpolationsberechnungen als auch die Prognoseberechnungen für die EA-Modelle von *P. infestans* zufriedenstellend waren. Für die praktische Beratung, wie die Bekämpfung von *P. infestans* durchzuführen ist bedeutet dies nun, dass mit Hilfe von interpolierten Wetterdaten und der Charakterisierung von geländeklimatologischen Gegebenheiten Standorte mit hohem Risiko oder frühem EA regional identifiziert und bei der Beratung berücksichtigt werden können.

In der ehemaligen DDR wurden auch schon Regionalisierungen zur Beschreibung des Schaderregerauftretens bei KLUGE und GUTSCHE (1985) durchgeführt. Dabei erfolgte eine Zonierung des DDR-Territoriums nach Befallsstärkeklassen. Zur Einteilung ihrer Zonen verwendeten GUTSCHE und KLUGE (1985) die Klimagliederung nach Böer, den Planungsatlas der DDR sowie die mittleren Befallsstärken der einzelnen Kreise aus den Jahren 1959 bis 1981. Nur durch langjährige Datenreihen war es ihnen möglich regionalen Unterschiede der jährlichen Witterung rechnerisch so weit auszugleichen, dass in ihrer Zonierung klimatisch bedingte Differenzierungen sichtbar wurden. Der Unterschied zu der hier vorliegenden Arbeit

besteht in der Betrachtung der jährlichen Witterung und im Einsatz von GIS und damit die Möglichkeit feinaufgelöste Daten für die Untersuchungen verwenden zu können.

Sensitivitätsanalyse der Prognosemodelle

Bei der Verwendung der Modellen SIMLEP3, SIMPHYT3, SIMPHYT1 und SIMBLIGHT1 dienen Wetterdaten als Inputparameter zur Berechnung der Prognose. Wetterdaten sind sehr dynamisch, sie zeichnen sich durch rasche Änderungen ihrer Parameter aus und sind daher schwierig zu messen (LILJEQUIST 1994). Um den Einfluss der Wetterdaten auf die Ergebnisse der Prognosemodelle zu untersuchen, wurde eine Sensitivitätsanalyse der Parameter Temperatur und relative Luftfeuchtigkeit durchgeführt. Dabei wurden vor allem drei Aspekte herausgearbeitet. Zum einen sollte herausgefunden werden, welche Veränderungen sich an den Prognoseergebnissen bei einer regelmäßigen Änderung der Inputparameter ergeben. Dies dient der Verifizierung und zur Untersuchung der Grenzen und Möglichkeiten des Modells (BATTILANI et al. 1993). Zum anderen entstehen Ungenauigkeiten bei der Bereitstellung von Wetterdaten, die sich auf das Ergebnis der Prognose auswirken. Bei der Validierung der Interpolationsberechnung wurde bereits auf diese Ungenauigkeit der Messsensorik hingewiesen. Da über 50 % der Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Wetterdaten in diesem Bereich lagen, kann aus dieser Untersuchung zurück geschlossen werden, wie sich die berechneten Wetterdaten auf das Prognoseergebnis auswirken werden. Zum Dritten sollte bei der Sensitivitätsanalyse herausgefunden werden, wie sich langfristige Wetteränderungen und häufig auftretende Wetterextreme, wie sie zurzeit beim Weltklimarat IPCC diskutiert werden, auf das Auftreten von Schaderregern sowie deren Prognostizierbarkeit bemerkbar macht. Die Klimasensitivität liegt dabei nach Berichten des Weltklimarats IPCC bei einer Erwärmung zwischen 1,1 und 4,1 °C bis zum Jahr 2099 (IPCC 2007).

Zur Durchführung der Sensitivitätsanalyse wurden stündliche Modifikationen der Wetterparameter vorgenommen und anschließend die Prognose mit den manipulierten Wetterdaten berechnet. Die Modifikationen orientierten sich anhand der Abweichungen der Interpolationsberechnungen, der Messungenauigkeit der Messsensorik und der Klimasensitivität des IPCC, so dass eine Modifikation von $\pm 0,5$ bis 2 °C und ± 3 bis 6 % relative Luftfeuchte durchgeführt wurde.

Das Modell SIMLEP3 benötigt als wetterbasierten Inputparameter lediglich die Temperatur. Die Auswirkungen der stündlichen Temperaturmodifikationen waren bis auf das Erstauftreten (EA) der Altlarven und das Massenauftreten (MA) der Junglarven gering und lagen bei maximal zwei Tagen. Durch die Addition von 2 °C pro Stunde auf die Temperatur wurden das EA der Altlarven und das MA der Junglarven um bis zu fünf Tage früher prognostiziert.

Dies ist durch den Modellalgorithmus von SIMLEP3 zu erklären. Die Berechnung der Entwicklungsraten der einzelnen Kompartments (Eiablage, Junglarven und Altlarven) basieren auf speziellen täglichen Temperatursummen (KURT et al. 1984). Durch die Bildung dieser Summen gleichen sich Über- bzw. Unterschätzungen der interpolierten Temperaturen aus. Das bedeutet, dass Ungenauigkeiten der Messsensorik bzw. der Temperaturinterpolation beim Modellergebnis generalisiert werden und kaum zum Tragen kommen. Die Ergebnisse der Berechnungen von SIMLEP3, bei denen über 0,5 °C pro Stunde auf die Temperatur addiert wurden zeigten, dass frühere Prognosen beim EA der Altlarven und MA der Junglarven ermittelt wurden. SIMLEP3 ist dadurch in der Lage auch bei Temperaturen, wie sie bei einem Klimawandel zu erwarten wären, angepasste Prognosen zu berechnen.

Bei den Modellen zur Prognose der Krautfäule wurden neben der Temperatursensitivität auch die Auswirkungen der relativen Luftfeuchte betrachtet. Die Auswirkungen des Klimawandels auf das Modell SIMPHYT3 wurden bereits bei KLEINHENZ und ZEUNER (2007) untersucht. Als Resultat wurde festgehalten, dass die relative Luftfeuchte einen größeren Einfluss auf das Modellergebnis hat als die Temperatur. Dies konnte durch die Ergebnisse dieser Arbeit bestätigt werden. So lag die Abweichung des AUDPC-Wertes des Infektionsdrucks bei der oberen und unteren Temperaturmodifikation (± 2 °C) zu dem AUDPC-Wert mit unveränderten Wetterdaten bei -20 bzw. 8 %-Punkten und bei der relativen Luftfeuchtemodifikation (± 6 %) bei -34 bzw. 26 %-Punkte. Die relative Luftfeuchte wird im Modellalgorithmus von SIMPHYT3 maßgeblich zur Charakterisierung der infektiöngünstigen Periode benötigt. Das heißt, sie beschreibt wann eine erfolgreiche Infektion der Pflanze möglich ist. Dabei spielt die Temperatur aber eher eine untergeordnete Rolle. Ist eine erfolgreiche Infektion erfolgt, so wird die Entwicklungsgeschwindigkeit der Krankheit rein temperaturabhängig modelliert (GUTSCHE et al. 1999). Das Kriterium, ob eine Infektion stattfindet oder nicht, basiert daher auf der relativen Luftfeuchte, wodurch die Auswirkungen auf die Modellergebnisse zu erklären sind. Bei regelmäßigen und dauerhaften Änderungen der Wetterparameter wie bei einem Klimawandel bedeutet dies, dass das Modell auch weiterhin für die Planung von Fungizideinsätzen genutzt werden kann (KLEINHENZ und ZEUNER 2007). Da das Modell SIMBIGHT1 auf Basis des Modells SIMPHYT3 entwickelt wurde, zeigte sich bei der Systematik der Abweichungen ein analoges Bild, wie es bei den Ergebnissen von SIMPHYT3 und bei KLEINHENZ und ZEUNER (2007) beschrieben wurde.

Im Vergleich zum Modell SIMBLIGHT1 ist der Wettereinfluss, der bei der Sensitivitätsanalyse beim Modell SIMPHYT1 ermittelt wurde, als sehr gering zu werten. Durch die Modifikation der relativen Luftfeuchte wurden Abweichungen von maximal einem Tag zur

Prognose mit unverändertem Wetter berechnet. Bei den Temperaturmodifikationen lag diese Abweichung bei maximal zwei Tagen. SIMPHYT1 berechnet die infektionsgünstigen Perioden mit Hilfe von Regionalfaktoren (GUTSCHE und KLUGE 1996), deshalb hatten die Temperatur und die relative Luftfeuchte kaum einen Einfluss auf den Infektionszeitpunkt.

Die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse haben gezeigt, dass der Einfluss von Temperatur und relativer Luftfeuchte davon abhängen, welches Modell betrachtet wird und wie diese Parameter im Modellalgorithmus verwendet werden. Bei allen Modellen konnte gezeigt werden, welche Abweichungen durch Messungenauigkeiten und durch die Interpolation zu erwarten sind. Dabei hatte die relative Luftfeuchtigkeit einen deutlich größeren Einfluss auf das Ergebnis der Prognose als die Temperatur.

In den letzten Jahren wurden zudem immer wieder extreme Wetterbedingungen, wie lange Trockenperioden, Starkniederschläge oder lange feuchte Perioden beobachtet, die einen bevorstehenden Klimawandel ankündigen (ICPP 2007, MÜLLER-WESTERMAIER 2007). Dabei stellt sich die Frage, ob sich das Klima so stark wandelt, dass die Temperatur bzw. die relativen Luftfeuchte die Bereiche verlassen, die von den Prognosemodellen beschrieben werden. SALINARI et al. (2007) untersuchte dazu die Auswirkungen des Klimawandels auf den Falschen Mehltau (*Plasmopara viticola*) im Weinbau. Dabei stellte er fest, dass für klimatologische Szenarien die Pflanzenphysiologie vor allem in den Kardinalbereichen noch nicht ausreichend untersucht worden sind, so dass verlässliche Aussagen über klimatologische Veränderungen nur schwer zu tätigen sind. Festzuhalten bleibt aber, dass bei den in der hier vorliegenden Arbeit untersuchten Kartoffelmodellen mit angepassten Ergebnissen selbst bei extremen Wettersituationen gerechnet werden konnte. Für die Phytophthoraprognose bedeutet dies, dass bei Trockenheit, trotz hoher Temperatur keine infektionsgünstigen Bedingungen herrschen, was vom Modell SIMBLIGHT1 auch so berücksichtigt wird. Bei anhaltenden Niederschlägen mit hohen Luftfeuchten besteht ein erhöhtes Infektionsrisiko, was bei SIMBLIGHT1 durch die infektionsgünstigen Stunden mit Hilfe der Luftfeuchte abgebildet werden kann. Es hat sich daher gezeigt, dass die Modelle an klimatische Änderungen angepasst sind.

6 Fazit und Ausblick

Im Rahmen der Dissertation wurde gezeigt, dass es möglich ist, mit Hilfe von GIS landwirtschaftliche Schaderregerprognosen für jeden beliebigen Schlag in Deutschland zu berechnen. Die Ergebnisse, die erzielt wurden, wiesen mindestens dieselbe, wenn nicht sogar höhere Trefferquoten auf als die bisherige Methode ohne GIS

Der unmittelbare Nutzen von GIS in der Schaderregerprognose liegt in der räumlichen Darstellung der Berechnungsergebnisse in Form von Risikokarten. Der Umgang und die Verständlichkeit von Entscheidungshilfen können dadurch verbessert werden. Eine Bereitstellung der Ergebnisse in Risikokarten könnte im Internet-Angebot des ISIP e.V. erfolgen. Moderne WebGIS-Operationen, wie zoomen oder panen würden den Nutzern das Navigieren und das Finden ihrer Schläge erleichtern. Mit Hilfe von leichtverständlichen Legenden und Farbdarstellungen werden die Ergebnisse der Prognosen präsentiert, wodurch ein schneller Einblick auf die aktuelle Situation ermöglicht wird. Entscheidungsprobleme in Bezug auf die für den Schlag auszuwählende Wetterstation wird es in Zukunft nicht mehr geben. Dies führt zu einer höheren Akzeptanz bei Landwirten und Beratern und somit auch zu einer breiteren Nutzung des Systems.

Die Stärke der neuen Methode zur Berechnung von Prognosemodellen mit interpoliertem Wetter zeigte sich bei den Modellen SIMPHYT3 und SIMBLIGHT1. Gerade bei der flächenhaften Berechnung von SIMPHYT3 haben sich geländebedingte Unterschiede der relativen Luftfeuchte im Infektionsdruck bemerkbar gemacht. Es ist also zu erwarten, dass durch die Berechnungen von SIMPHYT3 mit GIS regional differenzierte Beratungsaussagen möglich sind. Regionen mit niedrigerem Infektionsdruck könnten verlängerte Spritzintervalle zugeordnet bekommen, wodurch die Anzahl der Applikationen und damit die Menge an PSM reduziert werden könnte. Gefährdete Regionen mit höherem Infektionsdruck, würden dementsprechend kürzere Spritzintervalle zugewiesen. Wie sich dies insgesamt deutschlandweit auswirken wird, kann an dieser Stelle nicht abgeschätzt werden. Die Maxime einer optimalen landwirtschaftlichen Beratung muss lauten: So wenig wie möglich aber so häufig wie nötig (HALLMANN et al. 2007).

Neben der Anzahl der Behandlungen spielt aber auch der richtige Bekämpfungszeitpunkt eine wichtige Rolle. So konnte zum Beispiel mit dem Modell SIMBLIGHT1 eine Annäherung an das Erstauftreten (EA) von *P. infestans* erreicht werden. Damit wird eine Präzisierung der ersten Fungizidbehandlung ermöglicht, wodurch gute Trefferquoten, hohe Wirkungsgrade und ein geringeres Resistenzrisiko gewährleistet werden.

Mit den Ergebnissen dieser Arbeit konnte aber auch auf einige Schwächen durch die Verwendung von interpolierten Wetterdaten als Inputparametern von Prognosemodelle aufmerksam gemacht werden. Diese lagen im Bereich der berechneten relativen Luftfeuchten, die großen Einfluss auf die Bestimmung der infektionsgünstigen Periode hatten. Schon geringe Abweichungen der relativen Luftfeuchte führten dazu, dass infektionsgünstige Perioden falsch klassifiziert wurden. Möglichkeiten, die Interpolationsberechnungen zu verbessern, wurden durch Vereinigung von Wettermessnetzen zur Erhöhung der Stationsdichte oder die Verwendung von Wetterlagen aufgezeigt.

Ein aktuelles Problem stellt auch die Beschreibung des Ausgangsinokulums dar, wodurch ungenaue Prognosen sowohl mit GIS-basierten als auch gemessenen Wetterdaten entstanden. Auch hier wurden Lösungsansätze vorgeschlagen. So könnte durch eine Objektivierung der Regionalfaktoren Bodenfeuchte und Anbaudichte bei SIMBLIGHT1 durch GIS eine Präzisierung der Beschreibung des Inokulums erfolgen. Bei SIMLEP3 könnte der Ausgangsbefall (Fund von Eigelegen) mit SIMLEP-Start und GIS besser bestimmt werden. Hierzu besteht aber weiterer Forschungsbedarf.

Neben dem unmittelbaren Nutzen hat die Verwendung von GIS in der Schaderregerprognose aber auch einen mittelbaren Nutzen. So wäre ein weiterer interessanter Aspekt inwieweit es möglich ist, die in dieser Arbeit entwickelten Methoden auf weitere Modelle der ZEPP mit verringertem Aufwand zu übertragen und welche Trefferquoten dabei erreicht werden können. Dabei sind z.B. die CERCBET-Modelle, die zur Prognose der Blattfleckenkrankheit *Cercospora beticola* in Zuckerrüben dienen, zu nennen (RACCA und JÖRG 2007). Erfolgversprechende Ergebnisse werden aber auch bei den Modellen für Raps- und Weizenkrankheiten (SKLERPRO, PUCREC, SIMSEPT und SIMCERC) erwartet (WEINERT et al. 2004, KLUGE et al. 2006, RÄDER 2006, KOCH et al. 2007, RACCA und JÖRG 2007).

Bei der Verwendung von weiteren Prognosemodellen spielen jedoch weitere wetterbasierte Inputparameter eine wichtige Rolle. So ist zu prüfen, ob die Interpolation mit multiplen Regressionen auch auf Parameter wie Bodentemperatur, Blattnässe oder Niederschlag übertragen werden kann. Bei der Bodentemperatur ist eine erfolgreiche Verwendung dieses Interpolationsansatzes durchaus denkbar. Bei Blattnässe und Niederschlag erscheint dies eher unwahrscheinlich, da diese Parameter gerade in den Sommermonaten zu großen regionalen Schwankungen neigen. Um diese Einflussfaktoren dennoch flächendeckend verwenden zu können, sind andere Datenquellen zu erschließen. So könnte der Niederschlag zum Beispiel

aus Radarmessungen des DWD extrahiert und bereitgestellt werden. Hierzu sind diese Messungen aber erst auf Genauigkeit zu überprüfen.

Neben der Berechnung von GIS-basierten landwirtschaftlichen Schaderregerprognosen hat aber auch die georeferenzierte Speicherung von Felderhebungen und landwirtschaftlichen Daten einen großen Nutzen für den Pflanzenschutz. Durch die Erstellung von langjährigen Datenreihen kann das räumliche und zeitliche Verhalten von Schaderregern in Deutschland genauer dokumentiert und ausgewertet werden. Mit Hilfe von GIS könnte es möglich sein, Ausbreitungsmodelle für bestimmte Schaderreger zu erstellen und diese an EA-Modelle zu koppeln. Die langjährigen Daten können aber auch verwendet werden, um weitere Informationen zum Beispiel über Resistenzen von Pflanzenschutzmitteln zu dokumentieren, zu untersuchen und darzustellen.

Die Verwendung von GIS und speziell von interpoliertem Wetter in der landwirtschaftlichen Schaderregerprognose stellt somit einen ersten, aber wichtigen Baustein zur Integration von GIS im Pflanzenschutz dar. Die Erschließung neuer Berechnungsmethoden und neuer Datenquellen sorgt dafür, dass sich die Anwendung von GIS im Pflanzenschutz zügig steigert. Durch die Praxiseinführung der in dieser Arbeit erreichten Ergebnisse könnte ein großer Beitrag zu einer verbesserten Wirtschaftlichkeit und einem umweltfreundlicheren Pflanzenschutz geleistet werden.

7 Literatur

- ADLER, N.** (2001): Untersuchungen zum Befall von Kartoffeln mit *Phytophthora infestans* (Mont) de Bary mittels visueller Bonituren und PCR Methoden. Dissertation. Technische Universität München.
- AIKEN, L. S., WEST, S. G. und RENO, R. R.** (1991): Multiple Regression: Testing and Interpreting Interactions. Sage Publications, Inc. Thousand Oaks, California.
- APPEL, R., HABERMEYER, J. und HAUSLADEN, H.** (2001): Einfluss der Bodenfeuchte auf Primärbefall von *Phytophthora infestans*. Kartoffelbau **5**, S. 190 -193.
- ATKIS** (2003): Amtliches Topographisch-Kartographisches Informationssystem ATKIS. Adv-Arbeitsgruppe ATKIS. (http://www.atkis.de/dstinfo/dstinfo2.start_d0?dst_oar=1000&inf_sprache=deu&c1=1&d1=2&dst_typ=25&dst_ver=dst&dst_land=ADV, Okt. 2007).
- BARTELEME, N.** (1995): Geoinformatik. Modelle. Strukturen. Funktionen. 3. Auflage, Springer-Verlag Berlin.
- BATTILANI, P., RACCA, P. und ROSSI, V.** (1993): Sensitivity of a simulation model for *Cercospora* leaf spot on sugarbeet to meteorological data. Proceeding of Workshop on computer-based DSS on Crop protection, Danish Institute of Plant and Soil Science SP Report **7**, S. 225-233.
- BATTILANI, P., GIOSUE, S., NASSISI, A., RACCA, P. und ROSSI, V.** (1996): Use of geostatistics in geophytopathology: *Cercospora* leaf spot on sugarbeet in northern Italy as a case-study. Phytopath. Medit. **35**, S. 157-168.
- BECKER, M.** (2005): Entwicklung von computergestützten Hangstabilitätsmodellen zur Erstellung einer Gefahrenhinweiskarte für die Region Rheinhessen. Dissertation, Johannes Gutenberg – Universität Mainz.
- BEHRENS, T. und SCHOLTEN, T.** (2002). DGMK20 + Erstellung der Digitalen Geomorphologischen Karte für das Bundesland Rheinland-Pfalz im Maßstabsbereich 1:25 000 bis 1:50 000, Gießen.
- BILL, R.** (1999a): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- Band 1: Hardware, Software, Daten Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BILL, R.** (1999b): Grundlagen der Geo-Informationssysteme.- Band 2: Analysen, Anwendungen Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BILL, R.** (2004): Interoperable GIS-Infrastruktur im landwirtschaftlichen Betrieb. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum. KTBL-Schrift **428**, S. 69-74 Braunschweig.
- BILL, R. und FRITSCH, D.** (1991): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 1 Hardware Software und Daten. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BILL, R. und GRENZDÖRFER, G.** (1993): The importance of Orthophotos for Sectoral Geo-Information Systems. Photogrammetric Week **5** S. 285-299, WichmannVerlag, Karlsruhe.
- BILL, R. und FRITSCH, D.** (1996): Grundlagen der Geo-Informationssysteme, Band 2 Analysen Anwendungen und neue Entwicklungen. Herbert Wichmann Verlag, Heidelberg.
- BILO, M.** (2004): INSPIRE – Die europäische Geodateninfrastruktur nicht nur für Natur- und Umweltschutz. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, KTBL-Schrift **428**, S. 122-129, Braunschweig.
- BLÜTHGEN, J. und WEISCHET, W.** (1982): Allgemeine Klimageographie. De Gruyter Berlin.
- BÖHM, H.** (1964): Eine Klimakarte der Rheinlande. Erdkunde **18**, S. 202-206.

- BRAMER, H., HENDL, M., MARCINEK, B., NITZ, K., RUCHHOLZ, K. und SLOBODDA, S. (1991):** Physische Geographie Mecklenburg-Vorpommern, Brandenburg, Sachsen-Anhalt, Sachsen, Thüringen. 1. Auflage, Haack, Gotha.
- BRICE, R. (1985):** Kartoffeln wachsen nicht im Keller. S. 1- 36, Otto Maier Verlag Ravensburg.
- BUNDESAMT FÜR KARTOGRAPHIE UND GEODÄSIE (BKG) (Hg) (2007):** Digitales Geländemodell für Deutschland DGM-D. Frankfurt.
- BURAK, A. (Hg) (2005).** Eine prozessorientierte landschaftsökologische Gliederung Deutschlands. Deutsche Akademie für Landeskunde, Flensburg.
- CAO, K., FRIED, P., RUCKSTUHL, M. und FORRER, H.R. (1996):** Ereignisorientierte Krautfäule-Prognose mit Phyto Pre 2000. Agrarforschung 3, S. 325-328.
- COHEN, J., COHEN, P., WEST, S.G. und AIKEN, L.S. (2002):** Applied Multiple Regression/Correlation Analysis for the Behavioral Science. Lawrence Erlbaum Association. Inc. Mahwah, New Jersey.
- CRESSIE, N. (1990):** The origins of Kriging. Mathematical Geology 22 (3), S. 239-252.
- DALY, C., NEILSON, R.P., PHILLIPS, D.L. (1994):** A statistical-topographic model for mapping climatological precipitation over mountainous terrain. Journal of Applied Meteorology 33, S. 140-158.
- ELLENBERG, H. (Hg) (1973):** Ökosystemforschung. Berlin.
- ENDLICHER, W. (1991):** Klima, Wasserhaushalt, Vegetation. Grundlagen der Physischen Geographie II. Darmstadt.
- ERWIN, D. C., BARTNICKI-GARCIA S. und TSAO, P.H. (1983):** *Phytophthora* Ist Biology, Taxonomy, Ecology, and Pathology. The American Phytopathological Society, Minnesota.
- ESRI (1995):** Arc/Info-User's Guide. Grid. Environmental Systems Research Insitute. Inc. Redlands. California.
- ESRI (2001):** Mapobjects Embeddable Mapping and GIS Components for Application Developers. Environmental Systems Research Institute. Inc. Redlands. California.
- ESRI (2003a):** Understanding GIS. Environmental Systems Research Institute. Inc. Redlands. California.
- ESRI (2003b):** ArcGIS 9 Building a Geodatabase. Redlands, California.
- ESRI (2003c):** ArcGIS 9 Overview of ArcGIS Topology. Redlands, California.
- ESRI (2003d):** ArcGIS 9 Using ArcGIS ArcPad. Redlands, California.
- ESRI (2003e):** ArcGIS 9 Using ArcGIS Geostatistical Analyst. Redlands, California.
- ESRI (2003f):** ArcGIS 9 Using ArcGIS Spatial Analyst. Redlands, California.
- ESRI (2003g):** ArcGIS 9 Using ArcGIS 3-D-Analyst. Redlands, California.
- ESRI (2004):** ESRI Cartography: Capabilities and Trends. ESRI White Paper, Redlands, California.
- ESRI (2006) :** ArcGIS Desktop. Redlands, California.
- FALKE, K., RACCA, P., WÖJTOWICZ, A. und JÖRG, E. (2006):** Untersuchungen zur Überwinterung des Kartoffelkäfers als Grundlage für ein Erstauftretensmodell. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem 400, S. 284-285.
- FAO (2005):** Buried treasure: the potato. Agriculture 21, Agriculture and Consumer Protection Department Food and Agriculture Organization of the United Nations, Spotlight/2006, (<http://www.fao.org/ag/magazine/0611sp1.htm>, Okt. 2007).

- FISCHER, H.** (1986): Erläuterungen zur Geomorphologischen Karte 1: 100 000 der Bundesrepublik Deutschland GMK 100 Blatt 6, C5910 Koblenz. Berlin.
- FISCHER, H.** (1989): Rheinland-Pfalz und Saarland - eine geographische Landeskunde. Wissenschaftliche Buchgesellschaft, Darmstadt.
- FLIER, W. G.** (2001): Variation in *Phytophthora infestans*. Dissertation, University of Wageningen.
- FRANK, A.U.** (2000): Geographic Information Science: New methods and technology. Journal of Geographic System 2, S. 99-105.
- FRANKE, W.** (1976): Nutzpflanzenkunde. G. Thieme-Verlag, Stuttgart, S.72-75.
- GEIGER, R.** (1961): Das Klima der bodennahen Luftschicht. vierte, neubearbeitete und erweiterte Auflage mit 281 Abbildungen. Friedr. Vieweg und Sohn-Verlag, Braunschweig.
- GETIS, A.** (2000): Spatial analysis and GIS: An introduction. Journal of Geographic System 2, S. 1-3.
- GIESECKE, J.** (1983): Gebietsniederschlag. Wasserwirtschaft **73** (1) S. 1-7.
- GIESECKE, J. und MEYER, H.** (1983a): Vergleich von Rechenmethoden für Gebietsniederschläge. Wasserwirtschaft **74** (1). S.8-11.
- GOLLA, B., ENZIAN, S., JÜTTERSONKE, B. und GUTSCHE, V.** (2002): Entwicklung und Testung eines GIS-gestützten Verfahrens zur Erstellung thematischer Risikokarten als Grundlage für eine Differenzierung von Anwendungsbestimmungen zum Schutz des Naturhaushaltes beim Einsatz von PSM. UFOPLAN Forschungsbericht 201 63 410, UBA-Texte **24** (02).
- GOLLA, B., ENZIAN, S. und GUTSCHE, V.** (2003): GIS-based risk mapping of potential pesticide drift from agricultural fields to neighbouring water bodies. Landscape Management for Functional Biodiversity IOBC wprs Bulletin **26** (4), S. 59-64, York.
- GOODCHILD, M.F.** (1997): What is Geographic Information Science? NCGIA Core Curriculum in GIScience, Unit 002 (<http://www.ncgia.ucsb.edu/giscc/units/u002>, Okt. 2007).
- GOSSMANN, H., BANZHAF, E. und KLEIN, G.** (1993): Regionalisierung ökologischer Ansätze – alte Aufgabe, neue Lösungen. Das Freiburger Regionalisierungsmodell. FREIM. Würzburger Geographische Arbeiten. **87**, S. 339-417.
- GÜTING, R.H.** (1999): Spatial database notes, Tutorial notes. Fachbereich Informatik Praktische Informatik IV Fernuniversität Hagen (<http://www.informatik.fernuni-hagen.de/import/pi4/Tutorial-neu.pdf>, Okt. 2007).
- GUTSCHE, V.** (1999). "Das Modell SIMPHYT 3 zur Berechnung des witterungsbedingten Epidemiedruckes der Krautfäule der Kartoffel (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary)." Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz. **51** (7): S. 169-175.
- GUTSCHE, V. und KLUGE, E.** (1983): Phyteb-Prognose, ein neues Verfahren zur Prognose des Krautfäuleerstauftrittens (*Phytophthora infestans* (Mont.) De Bary). Nachrichtenblatt Pflanzenschutz DDR **370**, S. 45-48.
- GUTSCHE, V., JÖRG, E. und KLEINHENZ, B.** (1999): *Phytophthora*-Prognose mit SIMPHYT III. Kartoffelbau **50**, S. 128-130.
- HÄCKEL, H.** (2005): Meteorologie, 5. Auflage. Ulmer-Verlag, Stuttgart (Hohenheim).
- HALLMANN, J., QUADT-HALLMANN, A. und VON TIEDEMANN, A.** (2007): Phytomedizin. Eugen Ulmer Verlag, Stuttgart.
- HANSEN, J.G., KLEINHENZ, B. und JÖRG, E.** (2002): Results of validation trials of *Phytophthora* DSSs in Europe, 2001. Sixth Workshop of an European network for development of an integrated control strategy of potato late blight. Applied Plant Research BV, PPO-Spezial Report Nr. **8**, S. 231-242.

- HEITEFUß, R.** (2000): Pflanzenschutz Grundlagen der praktischen Phytomedizin. 3. Auflage, G. Thieme Verlag Stuttgart.
- HELLER, S.** (1996): Der Einsatz des Geographischen Informationssystems bei der Regionalisierung des Niederschlags im Nationalpark Berchtesgaden. Diplomarbeit, Johannes Gutenberg-Universität Mainz.
- HEYER, E.** (1962): Das Klima des Landes Brandenburg, Abhandlungen des Meteorologischen und Hydrologischen Dienstes der DDR **64**, Berlin.
- HEYER, E.** (1993): Witterung und Klima. Eine allgemeine Klimatologie. 9. Auflage, Teubner, Leipzig.
- HÖCK, M. und MANEGOLD, J.** (2003): ArcMap Programmierung mit VBA. Legoprint S.p.A., Lavis (TN).
- HOPPMANN, D. und SCHALLER, K.** (1981): Der Einfluss verschiedener Standortfaktoren auf Qualität und Quantität der Reben. Mitteilung: Entwicklung der Qualität in geringen und mittleren Jährgängen. Die Weinwissenschaft **36** (5), S.299-319, Wiesbaden.
- HOPPMANN, D., SIEVERS, U., HESSEL, J.** (1999): Klimatische Beurteilung zu den geländeklimatischen und agrarmeteorologischen Auswirkungen der Planung zur „Auenrenaturierung Dürkheimer Bruch“ Teil 2 Abbildungen und Tabellen. Unveröffentlichtes Gutachten des Agrarmeteorologie Außendienststelle Geisenheim des DWD, Geisenheim.
- HOPPMANN, D., SIEVERS, U., HESSEL, J.** (1997): Klimatische Risiken erkennen. Das deutsche Weinmagazin **20**, S.24-28.
- HORMANN, K.** (1979): Klimatologische Modellrechnungen und ihre Anwendungen. Kieler Geographische Schriften **50**, S. 247 – 263.
- HORMANN, K.** (1981): Räumliche Interpolation von Niederschlagswerken. Beiträge zur Hydrologie **8** (2), S. 5-40, Freiburg.
- HUDSON, G. und WACKERNAGEL, H.** (1994): Mapping temperature using kriging with external drift: theory and an example from Scotland. International Journal of Climatology **14** (1), S. 77-91.
- IPCC** (2007): Klimaänderung 2007. Vierter Sachstandsbericht des IPCC (AR4), Zusammenfassung für politische Entscheidungsträger. Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderung (Intergovernmental Panel on Climate Change IPCC), (<http://www.de-ipcc.de/download/IPCC2007-FullDocument.pdf>, Okt. 2007).
- JARVIS, C., BAKER, R. und MORGAN, D.** (2002): The impact of interpolated daily temperature data on landscape-wide predictions of invertebrate pest phenology. Agriculture, Ecosystems and Environment **94**, S. 169-181, New York.
- JÖRG, E., KLEINHENZ, B. und ROßBERG, D.** (1997): Kartoffelkäfer-Prognose mit SIMLEP. Kartoffelbau **5**, S. 174-177.
- JÖRG, E. und ROßBERG, D.** (1998): Entwicklung von SIMLEP2 zur schlagspezifischen Kartoffelkäferprognose. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt Berlin-Dahlem **357**, S. 100.
- JÖRG, E., KLEINHENZ, B., RACCA, P. und ROSSI, V.** (1999): Prognose der *Cercospora*-Blattfleckenkrankheit mit dem Modell CERCOESY. Zuckerrübe **48**, S. 174-176.
- JÖRG, E. und WEGOREK, P.** (2003): Kartoffelkäfer Insektizidresistenzen in Deutschland und Polen. Kartoffelbau **6**, S. 235-237.
- JÖRG, E. und RACCA, P.** (2000): CERCBET 1, 2 und 3 - Prognosemodelle zur Simulation von *Cercospora beticola*. Zuckerrübe **49**, S. 200-203.
- JÖRG, E., RACCA, P., FALKE, K. und WÓJTOWICZ, A.** (2007): Überwinterung und Schlupf des Kartoffelkäfers im Frühjahr. Kartoffelbau **4**, S. 122-125.

- KEIL, B. und KLEINHENZ, B. (2007):** AGMEDAWIN-a tool for easy and flexible management of meteorological data. Proceedings of EPPO Conference on Computer Aids for Plant Protection, Bulletin OEPP EPPO Bulletin **37** (2), S. 335-338, Wageningen.
- KLEIN, G. (1994):** Regionalisierung von Niederschlag mit Hilfe von digitaler Geländeinformation. Entwicklung eines geoökologischen Modells zur routinemäßigen Ableitung hochauflösender Niederschlagskarten. Freiburger Geographische Hefte **44**, Selbstverlag des Instituts für Physische Geographie, Freiburg.
- KLEINHENZ, B. (1994):** Entwicklung von Simulationsmodellen zur Beschreibung der Populationsdynamik von virusübertragenden Getreideblattläusen in der Herbst- und Winterperiode auf der Basis von im Freiland und Labor ermittelten Daten. Dissertation. Rheinische Friedrich-Wilhelm-Universität zu Bonn.
- KLEINHENZ, B. (2001):** Internet-Prognosesysteme im Pflanzenschutz. Landwirtschaft im Internet-Zeitalter: Erfahrungen und Erwartungen. DLG-Verlag **95**, S. 113-133, Frankfurt am Main.
- KLEINHENZ, B. und JÖRG, E. (1998):** Integrierter Pflanzenschutz – Rechnergestützte Entscheidungshilfen. Schriftenreihe des Bundesministeriums für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten. Reihe A: Angewandte Wissenschaft **473**, S. 168.
- KLEINHENZ, B. und JÖRG, E. (2000):** Results of Validation Trials of *Phytophthora* DSS in Europe in 1999. Workshop on the European network for development of an integrated control strategy of potato late blight., Applied Research for Arable Farming and Field Production of Vegetables, PAV-Special Report **6**, S. 180-190, Oostende, Belgium.
- KLEINHENZ, B. und PREIß, U. (2004):** The development of first appearance of *Phytophthora infestans* in production areas. Eighth Workshop of an European Network for development of an Integrated Control Strategy of potato late blight. PAV-Special Report **10**, S. 65-72, Jersey.
- KLEINHENZ, B., PREIß, U., JÖRG, J. und KAKAU, J. (2004):** Dreijährige Untersuchungen zur regionalen Ausbreitung von *Phytophthora infestans* an Kartoffeln. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem **396**, S.188.
- KLEINHENZ, B., FALKE, K., KAKAU, A. und ROßBERG, D. (2005):** SIMBLIGHT1: a new approach to predict first outbreak of Late Blight. Applied Plant Research, Lelystad, NetherlandsPRO-Spezial Report **11**, S. 237-244, Tallin.
- KLINK, H. J. (1972):** Geoökologische und naturräumliche Gliederung – Grundlagen der Umweltforschung. Geographische Rundschau **24**, S. 7-19.
- KLUGE, E. und GUTSCHE, V. (1984):** Untersuchungen zum Einfluss des Braunfäulebefalls der Pflanzkartoffelknollen auf des Erstauftretens der Krautfäule (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) mittels SIMPHYT1. Berlin, Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz **20** (5), S. 361-369.
- KLUGE, E. und GUTSCHE, V. (1985):** Zur Befallsstärke der Krautfäule der Kartoffel (*Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary) auf dem Territorium der DDR und deren Prognose. Berlin, Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz **21** (2), S. 159-167.
- KLUGE, E. und GUTSCHE, V. (1990):** Krautfäuleprognose mittels Simulationsmodell – Ergebnisse der Anwendung 1982 bis 1988. Berlin, Archiv für Phytopathologie und Pflanzenschutz **20** (5), S. 265-281.
- KLUGE, E., JÖRG, E. und ROßBERG, D. (2006):** SIMSEPT: Eine Entscheidungshilfe zur Bekämpfung von *Septoria tritici* und *Septoria nodorum*. Archives of phytopathology and plant protection **39** (2), S.79-92.
- KOCH, S., DUNKER, S., KLEINHENZ, B., RÖHRIG, M. und VON TIEDEMANN, A. (2007):** A crop less-related forecasting model for *sclerotinia* stem rot in winter oilseed rape. Phytopathology **97**, S. 1186-1194.
- KRANZ, J. (1996):** Epidemiologie der Pflanzenkrankheiten: Eine Einführung in Grundlage, Methode und praktische Anwendung. Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- KRIGE, D.G. (1951):** A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. Journal Chem. Metal. Min. Soc. **52** (6), S. 119-139, South Africa.

- KRIGE**, D.G. (1978): Lognormal – de Wijsian Geostatistics for elevation. Instituts of Mining and Metallurgy. Johannesburg. South Africa.
- KURTH**, H., **ROßBERG**, D. und **KÖPPEN**, H. (1984): Ein Simulationsmodell der Populationsdynamik des Kartoffelkäfers, *Leptinotarsa decemlineata* SAY (Coleoptera: Chrysomelidae), Konzeption und ökologische Grundlagen von SIMLEP) Beitrag Ent. **34**, S. 159 – 166, Berlin.
- LASLETT**, G. M. (1994): Kriging and Splines: An Empirical Comparison of their Predictive Performance in some applications. Journal of the American Statistical Association **89** (426), S. 391-400.
- LENK**, M. (2004): Geodateninfrastruktur Deutschland – Potentiale und Umsetzung. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, KTBL-Schrift **428**, S.129-132, Braunschweig.
- LESER**, H. (1997): Landschaftsökologie – Ansatz, Modelle, Methodik, Anwendung. 4. Auflage, Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- LFL** (Hg) (2006): Kartoffelberichte 2006. Bayrische Landesanstalt für Landwirtschaft.
- LIEBIG**, W. und **MUMMENTHEY**, R. D. (2002): ArcGIS – ArcView 8. 1. Auflage, Halmstad.
- LIEDTKE**, H. und **MARCINEK**, J. (2002): Physische Geographie Deutschlands, 3. überarbeitete und erweiterte Auflage, Klett-Perthkes, Gotha, Stuttgart.
- LILJEQUIST**, G. und **CEHAK**, K. (1984): Allgemeine Meteorologie. Springer-Verlag, Braunschweig.
- LINDNER**, K., **BURTH**, U., **STACHEWICZ**, H. und **GUTSCHE**, V. (1995): Beurteilung von Wirkungskomponenten neuer *Phytophthora*-Fungizide auf der Basis von Modelluntersuchungen. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutz. **47**, (11), S. 297-303.
- MARBLE**, F.M. (2000): Some thoughts on the integration of spatial analysis and Geographic Information Systems. Journal of Geographical Systems **2**, S.31-35.
- MARCINEK**, J. und **ZAUMSEIL**, L. (1993): Brandenburg und Berlin im physisch-geographischen Überblick. Geographische Rundschau **45**, S. 556-563.
- MENSE-STEFAN**, A. (2005): Standortdifferenzierte Abschätzung von Sickerwasserraten in Hessen, Mainzer Geographische Studien **53**, Mainz.
- METEOMEDIA AG** (2007): Messnetz der Meteomedia ag. (http://wetterstationen.meteomedia.de/messnetz/eu_d.html, Nov. 2007).
- MEYNEN**, E. und **SCHMITHÜSEN**, J. (1962): Handbuch der Naturräumlichen Gliederung Deutschlands Bad Godesberg.
- MITTLER**, S., **PETERSEN**, J., **RACCA**, P. und **JÖRG**, E. (2005): Ertragssicherung bei Zuckerrüben durch Bekämpfungsstrategie und Sortenwahl bei Blattkrankheiten. Zuckerindustrie **130**, S. 101-108.
- MOHAUPT-JAHR**, B. und **KEIL**, M. (2004): The CLC2000 project in Germany and environmental applications of land use informations. Conference proceedings: Corine Land Cover 2000 in Germany and Europe and its use for environmental applications, S. 37-45, Berlin.
- MUES**, V. (2000): GIS-gestützte Regionalisierung von Klima- und Depositionsdaten in Niedersachsen. Dissertation, Georg-August-Universität Göttingen.
- MÜLLER-WESTERMEIER**, G. (1995): Numerische Verfahren zu Erstellung klimatologischer Karten. Berichte des DWD **193**. Offenbach.
- MÜLLER-WESTERMEIER**, G. (1996): Klimadaten von Deutschland Zeitraum 1961 - 1990. Berichte des DWD **193**. Offenbach.

- MÜLLER-WESTERMEIER, G.** (2007): Klimastatusbericht 2006. Deutscher Wetterdienst, S5-29, Offenbach. (<http://www.ksb.dwd.de>, Nov. 2007).
- MULV (Hg)** (2006): Agrarbericht 2006 zur Land- und Ernährungswirtschaft des Landes Brandenburg. Ministerium für Ländliche Entwicklung, Umwelt und Verbraucherschutz.
- MWVLW (Hg)** (2006): Agrarbericht 2006. Herausgegeben durch das Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau in Rheinland-Pfalz.
- MYSIAK, J.** (2000): Räumliche Entscheidungsfindung mit Hilfe raumbezogener Informationssystem. Dissertation, Georg August Universität Göttingen.
- NÖLLE, O.** (2004): Geodienste: Basis für eine effiziente und nachhaltige Nutzung von Geoinformationen in Landwirtschaft und ländlichem Raum. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, KTBL-Schrift **428**, S. 133-140, Braunschweig.
- ÖERKE, E. C. und STEINER, V.** (1996): Ertragsverluste und Pflanzenschutz; die Anbausituation für die wichtigsten Kulturpflanzen. DPG-Schriften **6**, S. 165-170.
- OLEA, R. A.** (1999): Geostatistics for Engineers and Earth Scientists. Springer Verlag.
- OLIVER, M. A. und WEBSTER, R.** (1990): Kriging: A method of interpolation for geographical information systems. Int. J. Geographic Informations Systems **4** (3), S. 313-332.
- OSTHEIDER, M.** (1981): Spline – Interpolation und ihre Anwendung in der Geographie. Züricher Geographische Schriften **1.**, S. 57-80.
- PHILLIPS, D. L. und DALY, C.** (1993): Precipitation analysis methods for mountainous terrain. In methods of precipitation on a global scale. Report of GEWEX WCRP- 81 WMO/TD **588**, S. 88-90.
- PLETSCH, A.** (1989): Bundesrepublik Deutschland und Berlin (West). Band 3 Hessen. Darmstadt.
- PREIB, U. und RACCA, P.** (2004). Insektizidresistenzentwicklung beim Kartoffelkäfer. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem **396**, S. 364.
- PUTZ, B.** (1989): Kartoffeln, Züchtung, Anbau, Verwertung. Behr's Verlag GmbH, Hamburg.
- RACCA, P.** (2006): mündliche Mitteilung, Mai 2006.
- RACCA, P., JÖRG, E. und KLEINHENZ, B.** (2001): Internet Advisory System in Rheinland-Pfalz (Germany): Monitorings and DSS. EFITA 2001, Third European Conference of the European Federation for Information Technology in Agriculture Food and Environment. Agro Montpellier Ecole Nationale Supérieure Agronomique **1**, S. 59-64.
- RACCA, P., JÖRG, E., MITTLER, S. und PETERSEN, J.** (2002): Blattkrankheiten bei Zuckerrüben – Prognoseansätze zur Optimierung des Fungizideinsatzes. Zuckerindustrie **127**, S. 949-958.
- RACCA, P. und Jörg, E.** (2007): CERCBET 3 – a forecaster for epidemic development of *Cercospora beticola*. Proceedings of EPPO Conference on Computer Aids for Plant Protection, Bulletin OEPP, EPPO Bulletin **37** (2), S. 344-349, Wageningen.
- RÄDER, T.** (2006): Entwicklung eines Prognose- und Entscheidungsmodells zur Braunrostbekämpfung in Winterroggen und Winterweizen. Dissertation, Gottfried Wilhelm Leibnitz Universität Hannover.
- RADTKE, W., RICKMANN, W. und BRENDLER, F.** (2000): Kartoffel - Krankheiten, Schädlinge, Unkräuter. Verlag Th. Mann, Gelsenkirchen-Buer.
- RAUSCH, D. und VERDOOREN, R.** (2004): Einführung in der Biometrie, Grundlagen der Korrelationsanalyse und der Regressionsanalyse. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Saphir-Verlag, Berlin und Braunschweig.

- RAZAVI, A.H.** (2004): ArcGIS Developer's Guide for VBA 2nd Edition. Thomson Learning, New York.
- REINER, J.** (1949): Die meteorologischen Instrumente, mit 135 Abbildungen. Pössneck.
- RÖHRIG, M. und SANDER, R.** (2004): ISIP – online plant protection information in Germany. Online Agrometeorological Applications with Decision Support on the Farm Level. Cost Action **718** S. 41-47, Meteorological Applications for Agriculture. Dina publication.
- RÖHRIG, M. und SANDER, R.** (2006): Wissenstransfer mit dem Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP). Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin- Dahlem **400**, S. 476.
- ROSNER, H. J.** (1992): Geländeklimatologische Untersuchungen im Raum Feldberg-Altglashütte (Hochschwarzwald) und die Regionalisierung der Ergebnisse mit Methoden der digitalen Bildbearbeitung. Dissertation. Freiburger Geographische Hefte **39**. Freiburg.
- ROßBERG, D., JÖRG, E. und KLEINHENZ, B.** (1999): SIMLEP2 – ein Modell zur schlagspezifischen Prognose des Kartoffelkäfers. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd., **51** (4), S. 81-87.
- ROßBERG, D., GUTSCHE, V. und KLEINHENZ, B.** (2001): Prognose von *Phytophthora infestans* mit den SIMPHYT Modellen. Gesunde Pflanzen **53**, S. 37-43.
- ROßBERG, D., GUTSCHE, V., ENZIAN, S. und WICK, M.** (2002): NEPTUN 2000 Erhebung von Daten zum tatsächlichen Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel im Ackerbau Deutschland. Berichte aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft **98**, S. 27, Berlin-Dahlem.
- ROßBERG, D., JÖRG, E. und FALKE, K.** (2005): SIMONTO – ein neues Ontogenesemodell für Wintergetreide und Winterraps. Nachrichtenbl. Deut. Pflanzenschutzd. **57** (4) S. 74-80.
- ROSSI, V., RACCA, P., GIOSUE, S. und BATTILANI, P.** (1997): Decision support systems in crop protection: from analysis of the pathosystem to the computerized model. Petria **7** (1), S. 7-26.
- SALINAR, F., GIOSUE, S., ROSSI, V., TUBIELLO, F.N., ROSENZWEIG, C. und GULLINO, L.** (2007): Downy mildew outbreaks on grapevine under climate change: elaboration and application of an empirical-statistical model. Proceedings of EPPO Conference on Computer Aids for Plant Protection, Bulletin OEPP, EPPO Bulletin **37** (2), S. 317-326, Wageningen.
- SCHÄDLER, B.** (1985): Gebietsniederschläge. Der Niederschlag in der Schweiz. Beiträge zur Geologie der Schweiz. Hydrologie **31**, S. 171 – 186.
- SCHILKE, K.** (1992): Agrarökologie, Metzler Schulbuchverlag, S. 225, Hannover.
- SCHNEIDER, M.** (1999): Uncertainty Management for Spatial Data in Databases: Fuzzy Spatial Data Types. Gütting R.H. (ed): Advances in Spatial Databases (SSD) 6th Int. Symp., LNCS 1651, Springer Verlag, S.330-351.
- SCHNEIDER, F.** (2003): Entwicklung und Anwendung statistischer Methoden zur Kurzfristvorhersage von Ozonkonzentrationen in der Bundesrepublik Deutschland. Dissertation Frei Universität Berlin.
- SCHÖBER-BUTIN, B.** (2001): Die Kraut- und Braunfäule der Kartoffel und ihr Erreger *Phytophthora infestans* (Mont.) de Bary. Mitteilungen der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem. Heft **384**.
- SCHRÖDER, D.** (2004): Regionalisierung der Temperatur im Nationalpark Berchtesgaden mit Geographischen Informationssystemen. Mainzer Geographische Studien **5**, S.115-128, Mainz.
- SCHRÖDTER, H.** (1987): Wetter und Pflanzenkrankheiten, Hochschultext Springer Verlag, Heidelberg.
- SCHULZKE, D.** (1988): Eine ökologisch begründete territoriale Gebietsgliederung der DDR für die Wintergetreideproduktion. Arch. Acker- Pflanzenbau Bodenkunde **32** (12), Berlin.

- SCHULZKE, D. (2000): Empfehlungen für die Landesentwicklungsplanung in Brandenburg anhand einer agrarökologischen Gebietsgliederung. Beitr. Forstwirtschaft und Landschaftsökologie **34** (1), S. 1-48, Berlin.
- SCHULZKE, D. und KAULE, G. (2000): Eine agrarökologische Gebietsgliederung für Deutschland als Entscheidungshilfe zur Ableitung von Schutz- und Nutzungszielen in der Landwirtschaft, Mitteilungen Biologischer Bundesanstalt Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem **371**, S. 93-105 Braunschweig.
- SEDLACEK, P. (Hg) (1978): Regionalisierungsverfahren, Darmstadt.
- SPIECKERMANN, G. (2005): GIS-basierte Erfassung und Prognose der räumlichen Verteilung von Pflanzenkrankheiten. Dissertation, Rheinischen Friedrich-Wilhelms-Universität zu Bonn.
- STBA (Hg) (2006): Statistisches Jahrbuch für die Bundesrepublik Deutschland, Wiesbaden.
- STEENMANS, C. und GHEORGHE, A. (2004): European Perspective on the Joint I & CLC2000 Project. Conference proceedings: Corine Land Cover 2000 in Germany and Europe and its use for environmental applications, S. 31-36, Berlin.
- STEIN, M.L. (1999): Interpolation of Spatial Data: Some Theory for Kriging, Springer-Verlag.
- STREIT, U. (1981): Kriging. Eine geostatistische Methode zur räumlichen Interpolation hydrologischer Informationen. Wasserwirtschaft **71** (7/8), S. 219-223.
- SUN, Y. (2002): Determining the size of spatial clusters in focused tests: Comparing two methods by means of simulation in a GIS. Journal Geograph. Syst. **4**, S 359-370.
- STREIT, U. (2004): GIS-Einsatz in der Landwirtschaft – Defizite und Entwicklungspotenziale. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, KTBL-Schrift **428**, S. 7-28, Braunschweig.
- THURSTON, J. (2004): Product Review: ESRI ArcView 9.0 with ArcGIS 3d Analyst. GEO-Informatics, Oktober/November 2004, S. 53-57.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1985a): VDI 3786, Blatt 3, Meteorologische Messungen und Fragen der Luftreinheit: Lufttemperatur. Düsseldorf.
- VEREIN DEUTSCHER INGENIEURE (1985b): VDI 3786, Blatt 3, Meteorologische Messungen und Fragen der Luftreinheit: Luftfeuchte. Düsseldorf.
- WAGNER, U. (2004): Praktischer GIS-Einsatz im landwirtschaftlichen Betrieb. Geographische Informationssysteme in der Landwirtschaft und im ländlichen Raum, KTBL-Schrift **428**, S. 75-81, Braunschweig.
- WEINERT, J., KLEINHENZ, B., JÖRG, E. und RACCA, P. (2004): SIMCERC 3 – ein optimiertes Modell zur Prognose von *Pseudocercospora herpotrichioides* an Winterweizen und Triticale. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin-Dahlem **396**, S. 164.
- WEISCHET, W. (1991): Einführung in die allgemeine Geographie. Physische und meteorologische Grundlagen. 6. Auflage, Teubner Studienbücher der Geographie, Stuttgart.
- WEISCHET, W. und ENDLICHER, W. (2000): Regionale Klimatologie. Teil 2: Die Alte Welt, Europa, Afrika, Asien. Borntraeger-Verlag, Stuttgart, Leipzig.
- ZEILER, M. (Hg) (2002): Exploring ArcObjects Vol. 1 – Applications and Cartography. ESRI, Redlands California.
- ZEUNER, T. (2003): Geländeklimatologische Untersuchung im Rheingau, Diplomarbeit, Johannes Gutenberg – Universität Mainz.
- ZEUNER, T., ANDERL, A., EISELT, S., HEIDWEILER, H., KEIL, B. und SCHACKMANN, N. (2006): Mobile Felddatenerhebung in Rheinland-Pfalz. Mitteilungen aus der Biologischen Bundesanstalt Land- und Forstwirtschaft Berlin-Dahlem **400**, S 286, Berlin.

8 Datenquellen

ATKIS (2006): © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

Boden-Klima-Regionen (BKR) (2000): Biologische Bundesanstalt für Forst und Landwirtschaft, Institut für Folgeabschätzung im Pflanzenschutz in Kleinmachnow.

DGM-D (2006): © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

CORINE-Land Cover (CLC2000) (2000): Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und Reaktorsicherheit.

Wetterdaten (2000-2007): ZEPP Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz.

Boniturdaten (2000-2007) ZEPP Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz.

DOPs Rheinland-Pfalz (2002): MWVLW- Ministerium für Wirtschaft, Verkehr, Landwirtschaft und Weinbau, Geobasisinformationen der Vermessungs- und Katasterverwaltung Rheinland-Pfalz - © 04/2002.

DOPs Brandenburg (2003): Fachhochschule Eberswalde, Brandenburg.

DTK25 (2006): © Bundesamt für Kartographie und Geodäsie (BKG).

9 Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Ablaufschema zur Erstellung von Schaderregerprognosen mit GIS.	4
Abbildung 2: Beziehungsdreieck zwischen Geographie, Meteorologie und Epidemiologie.....	5
Abbildung 3: Primärbefall durch <i>P. infestans</i>	8
Abbildung 4: Abgestorbener Bestand durch <i>P. infestans</i> (ZEPP 2004).	8
Abbildung 5: Infektionsherde für <i>P. infestans</i> (Kleinhenz et al. 2006).	8
Abbildung 6: Lebenszyklus von <i>P. infestans</i> (geändert nach Erwin et al. 1983).....	9
Abbildung 7: Kartoffelkäfer und die ersten Frassschäden (ZEPP 2006).....	11
Abbildung 8: Kahlfrass durch den Kartoffelkäfer und seine Larven (ZEPP 2006).	11
Abbildung 9: Lebenszyklus des Kartoffelkäfers (Radtke et al. 2000).....	12
Abbildung 10: Verteilung der Kartoffelflächen in Deutschland pro Kreis [ha].	15
Abbildung 11: Klimadiagramm des 30 jährigen Mittels (1961-1990) von Neuruppin (Brandenburg) (Müller- Westermeier 1996).....	17
Abbildung 12: Klimadiagramm des 30 jährigen Mittels (1961-1990) von Koblenz (Rheinland-Pfalz) (Müller- Westermeier 1996).....	18
Abbildung 13: Mittlerer Temperaturverlauf der Monate April bis September der Stationen Eich, Mühlheim- Kärlich und Münstermaifeld (Rheinland-Pfalz).....	19
Abbildung 14: Geometrische Objekte der Vektordaten (Liebig und Mummmenthey 2002).	29
Abbildung 15: Reales Modell eines DGM. Jeder Stift repräsentiert eine Zelle des Rasters (Liebig und Mummmenthey 2002).....	30
Abbildung 16: ATKIS- Datensatz der Gemeinde Eich in Rheinland-Pfalz (BKG 2006).....	31
Abbildung 17: Landnutzung Deutschlands in CORINE Land Cover (BMU 2006).	32
Abbildung 18: Agrarmeteorologische Messnetze in Brandenburg und Rheinland-Pfalz.	33
Abbildung 19: Ausschnitt eines Digitalen Orthophotos aus der Gemeinde Eich (MWVLW 2002).	35
Abbildung 20: Ausschnitt aus der DTK25 der Gemeinde Eich (BKG 2006).....	36
Abbildung 21: Datenbank für interpolierte Wetterdaten (DIW).....	38
Abbildung 22: Eingabefenster der ArcGIS-Erweiterung zur Interpolation von Wetterdaten.....	39
Abbildung 23: Client/Server Architektur in ArcObjects (Zeiler 2002).	41
Abbildung 24: Merkmale der Boden-Klima-Regionen (Schulzke und Kaule 2000).....	42
Abbildung 25: Karte der Boden-Klima-Regionen (Schulzke und Kaule 2000).	43
Abbildung 26: Reliefenergieklassen [m/4,41 km ²] nach Burak 2005.....	44
Abbildung 27: Sättigungskurve von Wasserdampf in der Luft in Abhängigkeit von der Temperatur (Weischer 1991).....	47
Abbildung 28: Polygonverteilung eines IDW-Verfahrens (ESRI 2003e).	49
Abbildung 29: Spline-Interpolation mit vier Stützpunkten (ESRI 2003e).	49
Abbildung 30: Ablaufschema der Interpolation mit der multiplen Regression (geändert nach Schröder 2004). ..	54
Abbildung 31: Ergebnis von SIMLEP3 an der Station Eich 2005.	59
Abbildung 32: Ergebnis von SIMPHYT3 in Münstermaifeld 2005.....	61
Abbildung 33: Ergebnis für SIMBLIGHT1 in Eich 2005.	63
Abbildung 34: Ergebnis von SIMPHYT1 in Eich 2005.	65

Abbildung 35: Untersuchungsgebiete in Rheinland-Pfalz (links) und in Brandenburg (rechts) 2006 (MM=Münstermaifeld, MZ =Mainz, EI=Eich, NR=Neuruppin, LL=Langenlipsdorf).	67
Abbildung 36: Ablaufschema zur Bildung von Interpolationszonen.	71
Abbildung 37: Reliefenergieklassen [m/4,41km ²] verschnitten mit den BKR.	72
Abbildung 38: Korrigierte Boden-Klima-Regionen nach der Reliefenergie [m/4,41 km ²].	74
Abbildung 39: Karte der Interpolationszonen von Deutschland.	76
Abbildung 40: Bildung von vertikal versetzten Kreismittelpunkten.	78
Abbildung 41: Karte der Interpolationskreise mit der Reliefenergie [m/4,41 km ²] für Deutschland.	79
Abbildung 42: Interpolationszone mit Buffer für Brandenburg.	81
Abbildung 43: Interpolationszonen mit Buffer für Rheinland-Pfalz.	81
Abbildung 44: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Cottbus 2006 mit dem K-Verfahren.	85
Abbildung 45: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	86
Abbildung 46: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	86
Abbildung 47: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	86
Abbildung 48: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	87
Abbildung 49: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	87
Abbildung 50: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Eich 2006 mit dem K-Verfahren.	88
Abbildung 51: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	89
Abbildung 52: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	90
Abbildung 53: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	90
Abbildung 54: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	90
Abbildung 55: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	90
Abbildung 56: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Cottbus 2006 mit dem K-Verfahren.	92
Abbildung 57: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	93
Abbildung 58: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	93

Abbildung 59: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	93
Abbildung 60: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	94
Abbildung 61: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	94
Abbildung 62: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Eich 2006 mit dem K-Verfahren.	96
Abbildung 63: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	97
Abbildung 64: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	97
Abbildung 65: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	97
Abbildung 66: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	98
Abbildung 67: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem K-Verfahren.	98
Abbildung 68: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Cottbus 2006 mit dem MR-Verfahren.	101
Abbildung 69: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	102
Abbildung 70: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im April 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	102
Abbildung 71: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Mai 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	102
Abbildung 72: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juni 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	103
Abbildung 73: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Cottbus im Juli 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	103
Abbildung 74: Zusammenhang zwischen den berechneten und gemessenen Temperaturen in Eich 2006 mit dem MR-Verfahren.	105
Abbildung 75: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	105
Abbildung 76: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im April 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	106
Abbildung 77: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Mai 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	106
Abbildung 78: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juni 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	106

Abbildung 79: Abweichungen zwischen den gemessenen und berechneten Temperaturen an der Station Eich im Juli 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.....	106
Abbildung 80: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Cottbus 2006 mit dem MR-Verfahren.	108
Abbildung 81: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	109
Abbildung 82: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat April von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	110
Abbildung 83: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Mai von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	110
Abbildung 84: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Juni von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	110
Abbildung 85: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Cottbus im Monat Juli von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	110
Abbildung 86: Zusammenhang zwischen der berechneten und gemessenen relativen Luftfeuchte in Eich 2006 mit dem MR-Verfahren.	112
Abbildung 87: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	112
Abbildung 88: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat April 2003 von bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	113
Abbildung 89: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Mai von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	113
Abbildung 90: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Juni von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	113
Abbildung 91: Abweichungen zwischen der gemessenen und berechneten relativen Luftfeuchte an der Station Eich im Monat Juli von 2003 bis 2006 mit dem MR-Verfahren.	113
Abbildung 92: Infektionsdruck von SIMPHYT3 in Eich 2003 mit unterschiedlichem Wetterinput.	122
Abbildung 93: PEW-Wert von SIMPHYT3 in Eich 2003 mit unterschiedlichem Wetterinput.	123
Abbildung 94: Zusammenhang zwischen dem Infektionsdruck von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich 2003 (n =124).	124
Abbildung 95: Zusammenhang zwischen dem PEW-Wert von SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich 2003 (n=124).....	125
Abbildung 96: Box-Whisker-Plot der Abweichungen des Infektionsdrucks zwischen SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich.....	126
Abbildung 97: Box-Whisker-Plot der Abweichungen des PEW-Werts zwischen SIMPHYT3-m und SIMPHYT3-v an der Station Eich.	126
Abbildung 98: Infektionsdruck am Eicher Knie am 25.05.2003.	130
Abbildung 99: Infektionsdruck am Eicher Knie am 26.05.2003.	130
Abbildung 100: Infektionsdruck am Eicher Knie am 27.05.2003.	130
Abbildung 101: Infektionsdruck am Eicher Knie vom 28.05. bis zum 31.05.2003.....	130
Abbildung 102: Infektionsdruck am Eicher Knie am 01.06.2003.	130

Abbildung 103: Infektionsdruck am Eicher Knie am 02.06.2003.	130
Abbildung 104: Infektionsdruck am Eicher Knie am 03.06.2003.	131
Abbildung 105: Infektionsdruck am Eicher Knie am 04.06.2003.	131
Abbildung 106: Infektionsdruck am Eicher Knie am 05.06.2003.	131
Abbildung 107: Infektionsdruck am Eicher Knie am 06.06. und am 07.06.2003.	131
Abbildung 108: Infektionsdruck am Eicher Knie am 08.06.2003.	131
Abbildung 109: Infektionsdruck am Eicher Knie am 09.06.2003.	131
Abbildung 110: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Eich 2001.	133
Abbildung 111: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Eich 2002.	134
Abbildung 112: Kartoffelschläge in der Nähe des Ortes Böhl 2002.	135
Abbildung 113: Kartoffelschläge in der Nähe der Wetterstation Schifferstadt 2003.	136
Abbildung 114: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2001.	138
Abbildung 115: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2002.	138
Abbildung 116: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in RP 2003.	138
Abbildung 117: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2001.	140
Abbildung 118: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2002.	140
Abbildung 119: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2004.	140
Abbildung 120: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2005.	140
Abbildung 121: Box-Whisker-Plots der Abweichungen zwischen den Ergebnissen der vier Prognosemodelle SIMBLIGHT1-v, -m und SIMPHYT1-v, -m zum EA in Deutschland 2006.	140

10 Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Biologische und ökologische Kardinalwerte für <i>P. infestans</i> (Gutsche et al. 1999).....	10
Tabelle 2: Biologische und ökologische Kardinalwerte des Kartoffelkäfers (Kurth et al. 1984).....	13
Tabelle 3: Die weltweite Erzeugung von Kartoffeln im Jahr 2005 (LfL 2006).....	14
Tabelle 4: Benötigte Wetterparameter der Prognosemodelle für Schaderreger in Kartoffeln.....	28
Tabelle 5: Wetterparameter von SIMPHYT3.....	60
Tabelle 6: Auflaufklassen für Kartoffelschläge in SIMBLIGHT1 (Kleinhenz et al. 2006).	62
Tabelle 7: Witterungseinfluss von SIMPHYT1.	64
Tabelle 8: Auflaufklassen für Kartoffelschläge in SIMPHYT1 (Kleinhenz und Jörg 1998).....	65
Tabelle 9: Anzahl kontrollierter Schläge in Rheinland-Pfalz von 2001 bis 2003.....	66
Tabelle 10: Anzahl kontrollierter Schläge im Jahr 2006 und 2007.	67
Tabelle 11: <i>P. infestans</i> Monitoringdaten der PSD der Bundesländer von 2000 bis 2006.....	68
Tabelle 12: Kartoffelkäfer Monitoringdaten des PSD in Rheinland-Pfalz von 2000 bis 2004.....	68
Tabelle 13: Anzahl an Wetterstationen für die multiple Regression mit einem Bestimmtheitsmaß von über 60 %.	69
Tabelle 14: Berechnungszeit für 24 Stunden mit 15 Wetterstationen und den Interpolationsmethoden Kriging und multiple Regression.	70
Tabelle 15: Mittelwert, Maximum und Minimum der Reliefenergie in den einzelnen Boden-Klima-Regionen ..	73
Tabelle 16: Ermittlung des Kreismittelpunktes und des -radius.	78
Tabelle 17: Mittelwert, Maximum und Minimum der Verfahren IDW, Spline, Kriging und multiple Regression von 2003 bis 2006.....	84
Tabelle 18a: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem K-Verfahren in Brandenburg.....	87
Tabelle 19: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem K-Verfahren in Rheinland- Pfalz.	91
Tabelle 20: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem K-Verfahren in Brandenburg.....	95
Tabelle 21: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem K-Verfahren in Rheinland-Pfalz.	98
Tabelle 22: Aufnahme der Prädiktoren bei der MR in Prozent.	100
Tabelle 23: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem MR-Verfahren in Brandenburg.....	104
Tabelle 24: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der Temperatur mit dem MR-Verfahren in Rheinland-Pfalz.	107
Tabelle 25: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem MR-Verfahren in Brandenburg.....	111
Tabelle 26: Zusammenfassung der Interpolationsergebnisse der relativen Luftfeuchte mit dem MR-Verfahren in Rheinland-Pfalz.	114
Tabelle 27: T-Test zur Signifikanz des Zusammenhangs der Unterschiede zwischen den Messwerten und den Interpolationsergebnissen von K und MR.....	116

Tabelle 28: Vergleich der Kartoffelkäferbonituren mit den Prognoseergebnisse von SIMLEP3 in den Anbaubereichen in Brandenburg und Rheinland-Pfalz 2006.	120
Tabelle 29: Bewertungsschema für SIMLEP3 (Roßberg et al. 2005).....	120
Tabelle 30: Zusammenfassung der Ergebnisse von SIMLEP 3 aus den Jahren 2000, 2001, 2004, 2006 und 2007.....	121
Tabelle 31: Ergebnisse des χ^2 -Test, des T-Tests und der linearen Regression für den Infektionsdruck mit berechneten und gemessenen Wetterdaten.	127
Tabelle 32: Ergebnisse des χ^2 -Test, des T-Tests und der linearen Regression für den PEW-Wert mit berechneten und gemessenen Wetterdaten.	128
Tabelle 33: Abweichungen der Modellergebnisse von SIMLEP3 durch verschiedene Temperatur-modifikationen in Eich 2006.	142
Tabelle 34: Differenz der Anzahl an Tagen mit PEW > 0,4 beim Modell SIMPHYT3 durch unterschiedliche Wettermodifikationen in Eich 2006 (n=124 Tage).	143
Tabelle 35: AUDPC der Abweichungen des Infektionsdrucks der Wettermodifikationen vom unveränderten Wetter in Eich 2006.	144
Tabelle 36: Abweichung in Tagen vom Modellergebnis von SIMBLIGHT1 durch verschiedene Wettermodifikationen in Eich 2006.	145
Tabelle 37: Abweichung in Tagen vom Modellergebnis von SIMPHYT1 durch verschiedene Wettermodifikationen in Eich 2006.	146

11 Anhang

Anhang 1: Wetterstationen der Interpolationszone 5.

Name	X	Y	Höhe	Richtung	Neigung
Angermünde	14,00	53,03	56	45	0
Baruth	13,50	52,05	56	45	0
Berge	12,78	52,62	40	310	0
Berlin-Schönefeld	13,52	52,38	47	315	0
Berlin-Tegel	13,32	52,57	37	243	0
Coschen	14,73	52,02	40	101	0
Cottbus	14,32	51,78	69	341	0
Doberlug-Kirchhain	13,58	51,65	97	180	0
Drewitz bei Burg	12,17	52,22	80	334	0
Feldberg	13,42	53,32	115	174	1
Genthin	12,17	52,38	35	-1	0
Grambow-Schwennenz	14,37	53,38	50	311	1
Grünow	13,93	53,32	55	310	1
Holzdorf	13,17	51,77	82	225	0
Klettwitz	13,88	51,55	128	232	4
Kyritz	12,42	52,93	40	-1	0
Lampertswalde	13,67	51,32	121	237	0
Langenlipsdorf	13,08	51,92	91	225	0
Lindenberg	14,12	52,22	98	280	0
Lübben-Blumenfelde	13,88	51,93	57	45	0
Manschnow	14,55	52,55	12	333	0
Menz	13,05	53,10	77	3	0
Müncheberg	14,12	52,52	63	275	0
Neuglobsow	13,03	53,15	62	296	0
Neuruppin	12,82	52,90	38	239	0
Potsdam	13,07	52,38	81	52	2
Wiesenburg	12,47	52,12	187	87	0
Wittenberg	12,65	51,88	105	174	0
Wittstock	12,52	53,20	72	251	0
Wusterwitz	12,38	52,37	36	66	0
Zehdenick	13,33	52,97	51	278	0

Anhang 2: Wetterstationen der Interpolationszone 11.

Name	X	Y	Höhe	Richtung	Neigung
Ahrweiler	7,08	50,53	110	352	3
Altendorf	7,00	50,58	251	13	1
Avelsbach	6,70	49,75	220	321	3
Bacharach	7,77	50,07	153	89	10
Bad Neuenahr-Ahrweiler	7,08	50,53	111	352	3
Badenborn	6,53	49,92	348	275	1
Bernkastel-Kues	7,08	49,92	186	255	10
Berus	6,68	49,28	363	95	0
Brauneberg	7,00	49,92	126	112	2
Briedel	7,15	50,03	104	281	6
Bruchweiler	7,23	49,80	548	105	2
Buechel	7,08	50,18	452	74	0
Burgbrohl	7,28	50,47	118	289	1
Calmont	7,13	50,10	116	157	0
Dreis	6,78	50,27	470	264	4
Emmelshausen	7,57	50,15	465	158	2
Esch	7,03	50,57	268	36	1
Fritzdorf	7,07	50,58	228	260	1
Gondershausen	7,50	50,17	388	50	3
Hatzenport	7,42	50,23	156	186	9
Hersdorf	6,55	50,15	516	188	0
Kaltenborn	6,98	50,40	546	300	5
Kaltenengers	7,50	50,38	128	299	5
Kanzem	6,58	49,83	173	54	2
Kastellaun	7,40	50,07	439	258	1
Leimersdorf	7,13	50,60	170	178	2
Lisdorf	6,77	49,32	184	228	0
Mayschoß	7,02	50,52	140	2	6
Mendig	7,32	50,37	182	119	0
Merzkirchen	6,47	49,57	420	262	2
Mülheim-Kärlich	7,50	50,38	128	299	5
Münstermaifeld	7,35	50,25	178	327	1
Neef	7,13	50,08	133	76	9
Nittel	6,45	49,67	188	297	6
Nürburg	6,87	50,35	485	247	1
Oberzerf	6,68	49,58	376	319	2
Pommern	7,25	50,17	140	0	6
Rhaunen	7,33	49,87	347	77	2
Riol	6,78	49,80	134	37	1
Speicher	6,63	49,93	291	299	4
Steinborn	6,63	50,07	529	134	2
Strickscheid	6,32	50,15	470	348	2
Traben-Trarbach	7,10	49,98	130	169	6
Trier	6,67	49,75	265	218	3
Valwig	7,20	50,15	93	93	1
Wahlbach	7,60	50,00	421	256	1
Werthhoven	7,13	50,60	236	178	2
Wiersdorf	6,45	50,00	296	145	1
Winningen	7,52	50,32	98	136	7
Wittlich	6,87	49,97	210	3	1

Anhang 3: Wetterstationen der Interpolationszone 12.

Name	X	Y	Höhe	Richtung	Neigung
Bad Marienberg	7,97	50,67	547	334	1
Bendorf	7,58	50,42	127	239	3
Berghausen	8,00	50,27	410	257	1
Bonn-Roleber	7,20	50,73	159	59	0
Boppard	7,60	50,25	138	186	6
Eppenrod	7,93	50,40	312	331	2
Gießen	8,70	50,58	186	225	0
Grenzau	7,65	50,45	300	257	2
Heimbach-Weis	7,53	50,45	85	207	1
Hof Lauterbach	8,93	51,22	350	72	2
Isert	7,70	50,73	300	69	1
Köln/Bonn	7,17	50,87	91	272	1
Leichlingen	7,02	51,10	89	269	1
Lüdenscheid	7,65	51,25	387	38	4
Neunkirchen-Seelsch.	7,37	50,85	195	143	1
Nister	7,85	50,68	358	182	3
Singhofen	7,83	50,28	296	235	0
Wahlen	9,13	50,82	349	284	0
Waldems-Reinborn	8,35	50,25	380	343	4
Westerburg	7,97	50,57	383	158	2

Anhang 4: Wetterstationen der Interpolationszone 13.

Name	X	Y	Höhe	Richtung	Neigung
Asselheim	8,15	49,58	228	98	7
Bad Dürkheim	8,20	49,47	107	7	0
Bad Kreuznach	7,85	49,85	158	155	2
Dienstweiler	7,22	49,63	160	104	4
Enkenbach	7,88	49,53	321	68	3
Freinsheim	8,02	49,27	321	261	7
Martinshöhe	7,47	49,37	405	313	2
Meddersheim	7,62	49,78	157	20	0
Morlautern	7,77	49,47	320	272	0
Norheim	7,80	49,82	130	195	2
Oberstein	7,33	49,70	376	339	3
Ruppertsecken	7,88	49,65	461	340	3
Saarbrücken	7,12	49,22	322	135	0
Sausenheim	8,15	49,55	186	115	5
Sobernheim	7,57	49,78	203	328	5
Tholey	7,05	49,48	396	94	2
Weierhof	8,02	49,63	200	341	0
Wiesweiler	7,58	49,63	180	3	3

Anhang 5: Wetterstationen der Interpolationszone 14.

Name	X	Y	Höhe	Richtung	Neigung
Allmendfeld	8,53	49,75	90	-1	0
Alsheim	8,32	49,75	132	18	1
Alzey	8,12	49,73	215	77	1
Bad Nauheim	8,75	50,37	142	249	0
Bechtheim	8,27	49,72	154	181	1
Birkweiler	8,03	49,20	320	73	3
Bodenheim	8,30	49,92	122	85	1
Boenstadt	8,83	50,30	128	152	1
Dackenheim	8,18	49,52	190	48	1
Dienheim	8,33	49,83	172	131	1
Echzell	8,90	50,42	130	116	0
Edesheim	8,13	49,27	158	92	1
Eich	8,38	49,75	87	26	0
Ellerstadt	8,27	49,47	98	66	0
Flomborn	8,13	49,68	251	77	0
Frankenthal	8,35	49,53	95	90	0
Frankfurt/Main	8,60	50,05	111	333	0
Gau-Algesheim	8,00	49,95	132	356	3
Geisenheim	7,95	49,98	118	185	1
Göcklingen	8,03	49,17	188	185	1
Gönnheim	8,23	49,45	120	143	0
Gundheim	8,23	49,68	147	110	1
Guntersblum	8,35	49,82	113	92	2
Heidenfahrt	8,12	50,02	82	174	0
Heppenheim	8,27	49,62	118	149	0
Herxheimweyher	8,25	49,15	148	160	0
Ingelheim	8,08	49,97	219	286	2
Kettenheim	8,12	49,73	215	77	1
Kleinniedesheim	8,35	49,58	95	90	0
Ladenburg	8,63	49,47	100	270	0
Landau	8,07	49,12	150	172	1
Lustadt	8,28	49,25	116	156	0
Mainz	8,23	49,98	132	45	0
Mannheim	8,55	49,52	96	315	0
Mettenheim	8,33	49,73	85	111	0
Neustadt	8,18	49,37	132	106	0
Nierstein	8,33	49,88	114	110	6
Oberhofen	8,02	49,10	197	12	1
Offstein	8,23	49,60	131	17	1
Oppenheim	8,35	49,85	88	124	3
Rheinzabern	8,32	49,93	113	53	0
Rommersheim	8,10	49,82	238	271	1
Roßdorf	8,85	49,87	180	286	1
Schifferstadt	8,35	49,40	102	74	0
Schweigen	7,97	49,05	198	151	1
Schweighofen	8,00	49,03	159	135	0
Steinweiler	8,13	49,12	132	63	0
Westhofen	8,25	49,70	115	24	1
Worms	8,37	49,60	88	90	0
Zornheim	8,22	49,88	232	168	2

Anhang 6: Ausgabeformat für Wetterdaten zum Import in die DIW-Datenbank.

```

AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 0 220 I 9680 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 1 230 I 9690 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 2 230 I 9730 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 3 260 I 9650 I 1 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 4 240 I 9790 I 4 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 5 240 I 9710 I 1 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 6 290 I 9310 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 7 240 I 9490 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 8 190 I 9460 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 9 200 I 9310 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 10 210 I 9040 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 11 260 I 8570 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 12 280 I 8420 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 13 290 I 8360 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 14 270 I 8040 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 15 260 I 8080 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 16 150 I 8850 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 17 50 I 9440 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 18 10 I 9730 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 19 -40 I 9920 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 20 -80 I 9990 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 21 -70 I 9990 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 22 -150 I 9990 I 0 I
AKT VS_070481 1101 4813 571 20060101 23 -160 I 9990 I 0 I

```

Anhang 7: Tabelle zur Klassifizierung der Reliefenergie.

Reliefenergieklasse	Reliefenergie (m pro 4,42 km ²)	Flächenanteil (%) an der Gesamtfläche Deutschlands
1	0 – 1	1,9
2	> 1 – 10	16,9
3	> 10 – 30	20,7
4	> 30 – 50	12,0
5	> 50 – 80	12,9
6	> 80 – 150	19,7
7	> 150 – 300	13,2
8	> 300 – 600	2,1
9	> 600 – 1000	0,5
10	> 1000	0,1

