Mainzer naturwiss. Archiv	52	S. 77–102	13 Abb., 5 Tab.	Mainz 2015

Analyse von klimageographischen Einflussfaktoren in Bezug auf die wichtigsten Schädlinge und Krankheiten im Zuckerrübenanbau in ausgewählten Gebieten von Rheinland-Pfalz und Südhessen

Pascal Kremer, Jan Schlüter, Jonas Fischer, Hans-Joachim Fuchs, Christian Lang, Tilmann Sauer & Philipp Reiter

Kurzfassung

Der regionale Klimawandel führt zu einer saisonalen Umverteilung der Niederschläge und einem Temperaturanstieg. Diese Faktoren haben bereits einen Einfluss auf die regionale Landwirtschaft im Allgemeinen und den Zuckerrübenanbau im Speziellen. Auch Krankheiten und Schädlinge der Zuckerrübe sind von sich ändernden Witterungsverläufen in ihrer Epidemiologie beeinflusst.

Im Rahmen der Studie wird der Entwicklungszyklus der beiden regional bedeutendsten Blattkrankheiten, Cercospora Blattfleckenkrankheit und Echtem Mehltau, ausgelöst von den Ascomyceten *Cercospora beticola* und *Erysiphe betae*, sowie jener der Rübenzystennematode (*Heterodera schachtii*), vor dem Hintergrund des projizierten Klimawandels untersucht. Hierzu werden die beiden Modelle CERCBET1 und ERYBET1 mit Daten des **RE**gionalen Klima**MO**dells (REMO) betrieben und mit einem Blattwachstumsmodell nach Richerzhagen et al. (2012) abgeglichen. Die potentielle Generationenzahl der Rübenzystennematoden während einer Vegetationsperiode wird durch ein Temperatursummenmodell berechnet.

Es wird eine Tendenz zu schnelleren Epidemieverläufen der untersuchten Blattkrankheiten in der nahen Zukunft (2021-2050) im Vergleich zur Referenzperiode (1971-2000) projiziert. Diese Tendenz ist möglicherweise in der fernen Zukunft (2071-2100) noch deutlich stärker ausgeprägt. Auch der Entwicklungszyklus von *Heterodera schachtii* beschleunigt sich möglicherweise, so dass in Zukunft potentiell mehr Generationszyklen während einer Vegetationsperiode durchlaufen werden können.

Beiden Tendenzen kann agronomisch entgegengewirkt werden. Auf Seiten der Blattkrankheiten muss weiter an der Optimierung sowie Minimierung der Fungizidapplikationen geforscht werden. Bezüglich des Nematodenmanagements müssen weitere nematodenreduzierende Maßnahmen im Hinblick auf die potentiell erhöhte Nematodenpopulation im Zuge des projizierten Klimawandels erforscht werden.

Abstract

Analysis of climatic-geographic factors influencing the main pests and diseases of sugar beets in selected areas of Rhineland-Palatinate and southern Hesse

Recent climate change leads to a seasonal redistribution of precipitation and a temperature increase. Likewise, pests and diseases of sugar beet are influenced by changing weather patterns.

This study investigates the development cycle of the most yield-relevant fungal leaf diseases, cercospora leaf spot disease and sugar beet powdery mildew, caused by either *Cercospora beticola* or *Erysiphe betae*, as well as the most important pest nematode, *Heterodera schachtii* (beet cyst nematode), against the background of the projected climate change. The forecasting models CERCBET1 and ERYBET1 were run with data of the **RE**gional climate **MO**del (REMO) and compared to a leaf growth model by Richerzhagen et al. (2012). The potential number of beet cyst nematode generations during the growing season is simulated by a temperature sum model.

The study projects a tendency to a faster epidemic onsets and development of the leaf diseases under investigation, comparing the near future (2021-2050) with the reference period (1971-2000). This trend might be even more pronounced in the distant future (2071-2100). In the same manner, the development cycle of *Heterodera schachtii* will probably accelerate. In the future potentially more generation cycles during the growing season will be possible.

Both tendencies can be counteracted agronomically. The optimal timing and minimization of fungicidal treatments should be examined. Also nematode reducing actions with regard to the projected climate change should be investigated.

Key words

Agriculture, *Cercospora beticola*, climate change, *Erysiphe betae*, *Heterodera schachtii*, sugar beet

1. Naturräumliche Ausstattung des Untersuchungsgebietes und deren Bedeutung für den regionalen Zuckerrübenanbau und seine Pathogene

Die landwirtschaftliche Produktion ist zum großen Teil vom Witterungsverlauf in den einzelnen Jahreszeiten abhängig. Dies betrifft sämtliche Aspekte im Produktionsablauf von der Aussaat über den Feldaufgang, die Ertragsbildung während der Hauptwachstumsphase, bis hin zur Ernte (Chmielewski 2007). Neben dem Pflanzenwachstum ist auch die Entwicklung und das Auftreten von Pathogenen wie z. B. *Cercospora beticola* Sacc., 1876, dem Auslöser der Cercospora-Blattfleckenkrankheit (**CLS** = ***C**ercospora **l**eaf **s**pot disease*), des Echten Mehltaus (*Erysiphe betae* (Vaňha) Weltzien, 1963) **(EM)** und der Rübenzystennematode (*Heterodera schachtii* A. Schmidt, 1871) maßgeblich von der Jahreswitterung beeinflusst. Aufgrund dessen werden zunächst die naturräumlichen Gegebenheiten des Untersuchungsgebietes detailliert vorgestellt.

Das Untersuchungsgebiet umfasst in etwa die Naturräume Pfälzerwald, Nördlicher Oberrheingraben, Nordpfälzer Bergland, Mainzer

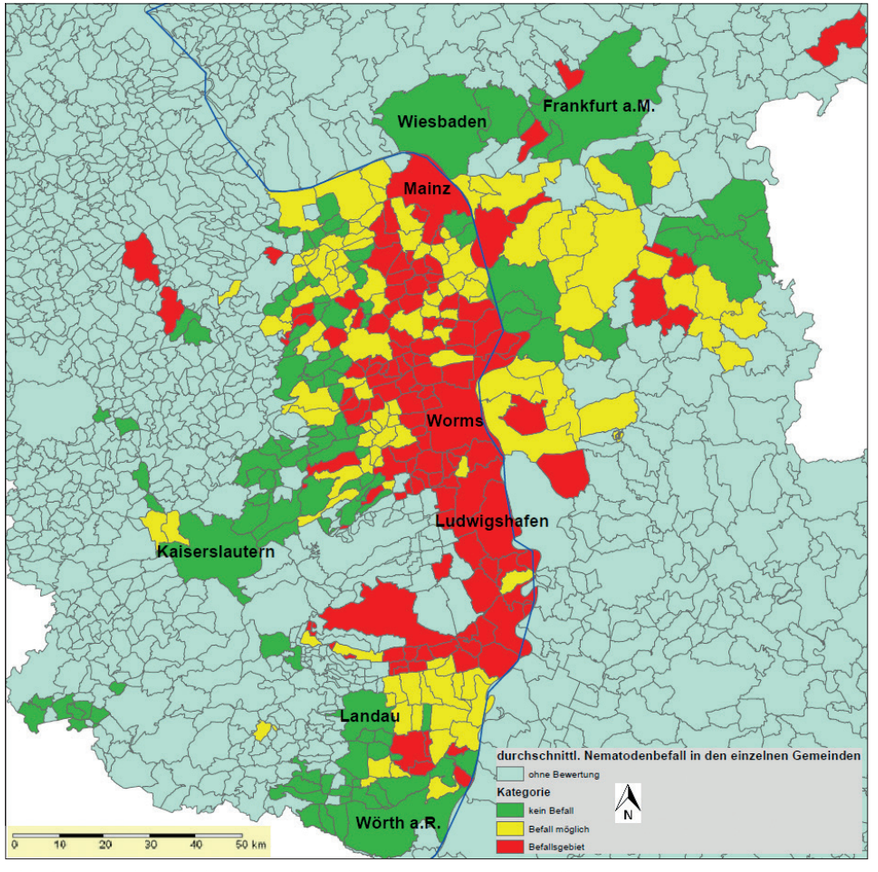


Abb. 1: Nematodenbefallsklassen im Gebiet des Verbandes der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer.

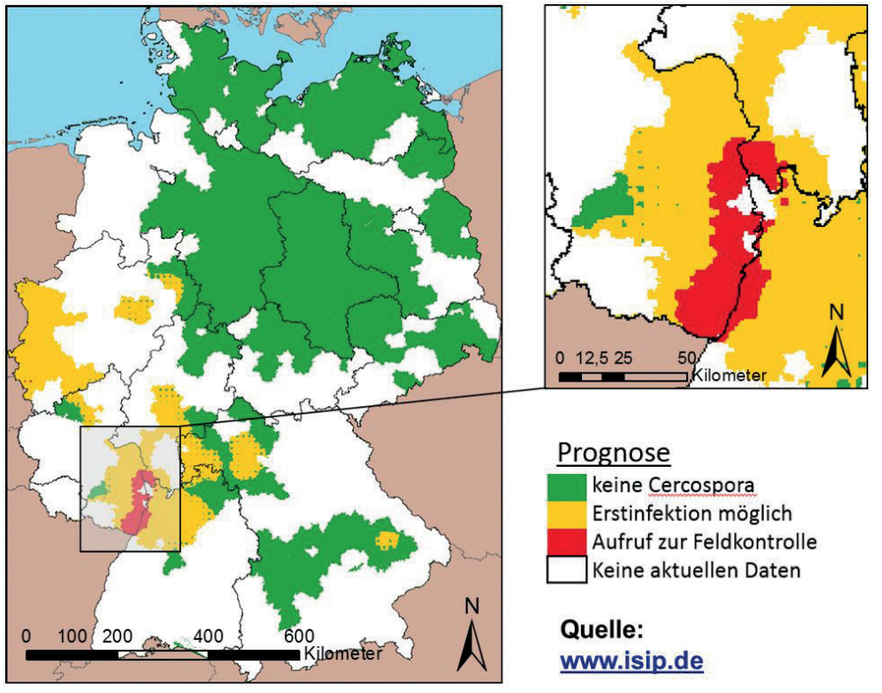


Abb. 2: Prognose-Informationen des Modells CERCBET1 für den 07.07.2008. Quelle: www.isip.de. im Gebiet des Verbandes der Hessisch-Pfälzischen Zuckerrübenanbauer.

Becken, Rhein-Main-Tiefland mit Ausläufern in den Odenwald und Spessart sowie die Wetterau. Es deckt sich mit dem Gebiet des „Verbandes der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V." (Abb. 1), welcher die Interessen von über 2.100 aktiven Zuckerrübenanbauern mit einer Anbaufläche von über 20.000 Hektar vertritt.

Orographisch wird das Gebiet im Norden durch Hunsrück und Taunus (Rheinisches Schiefergebirge), im Westen durch den Pfälzerwald, im Osten durch den Odenwald und Spessart eingegrenzt. Die speziellen hygrischen Verhältnisse mit vergleichsweise geringen Niederschlagssummen um 500 mm pro Jahr im Mainzer Becken werden maßgeblich durch die doppelte Lee-Lage zum Rheinischen Schiefergebirge und zum Pfälzerwald bedingt. Die thermische Sonderstellung des Untersuchungsgebietes mit Jahresdurchschnittstemperaturen von etwa 10 °C ist auf die beschriebene Beckenlage im Oberrheingraben, aber auch auf die Warmluftströme vom Mittelmeer her, welche durch das Rhône-Tal über die Burgundische Pforte das Untersuchungsgebiet thermisch beeinflussen, zurückzuführen (Fuchs 2010).

Insgesamt führt dies zu vergleichsweise frühen Ersteintrittsterminen der Blattkrankheiten, die durch *Cercospora beticola* und *Erysiphe betae* ausgelöst werden (Abb. 2). Auch die Anzahl potentieller Nematodengenerationen ist erhöht.

Laut dem 5. Sachbericht des *Intergovernmental Panel on Climate Change* (IPCC) erfolgte im Zeitraum 1880-2012 eine durchschnittliche globale Erwärmung um 0,85 °C (IPCC 2013). Regional zeigt sich ein Erwärmungstrend von 0,8 °C im Flächenmittel bezogen auf das Untersuchungsgebiet. Für die Zukunft wird

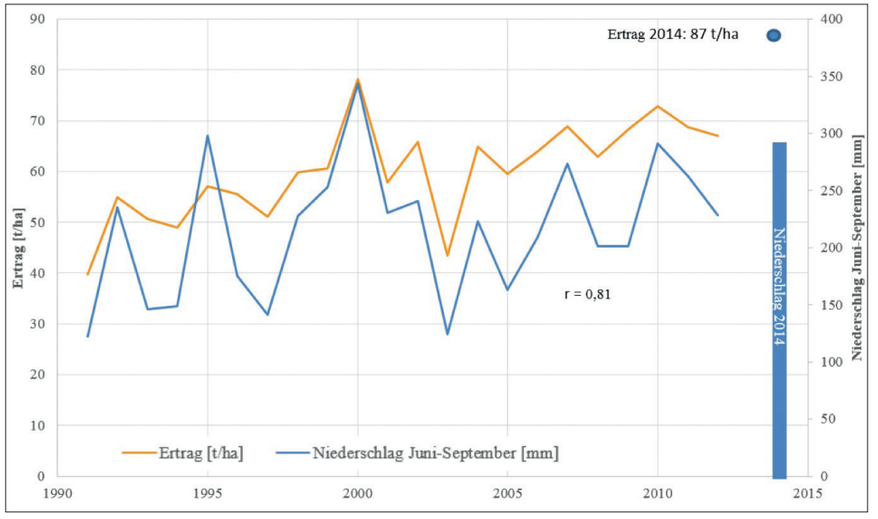


Abb. 3: Zusammenhang zwischen Ertrag und Niederschlag der Monate Juni-September in den Jahren 1991-2014. r = Pearson'scher Korrelationskoeffizient.

je nach zugrunde gelegtem Klimamodell und Region eine Erwärmung von 2,5-3,5 °C bis zum Ende des Jahrhunderts und damit eine Fortsetzung des Erwärmungstrends projiziert. Auch die Niederschlagsverteilung hat sich verändert. Frühling, Herbst und Winter sind im Untersuchungsgebiet tendenziell feuchter geworden, wohingegen in den Sommermonaten ein Niederschlagsrückgang zu verzeichnen ist (MULEWF 2007). Diesbezüglich wird ebenso eine Trendfortsetzung projiziert.

Durch die Verfügbarkeit immer höher aufgelöster regionaler Klimamodelle ist es heute möglich, regionale Studien, welche die Auswirkungen des Klimawandels auf das Pflanzenwachstum und Phytopathogene zum Gegenstand haben, durchzuführen. Dabei stehen nicht mehr nur Gewinn/Verlust-Potentialanalysen bezüglich des zu erwartenden Ertrages aufgrund veränderter Umweltbedingungen im Fokus aktueller Forschungen. Neue Modelle berücksichtigen auch sonstige pflanzenbaulich relevante (a)biotischen Faktoren wie z. B. Krankheiten (Juroszek & von Tiedemann 2012).

Inwiefern sich der rezente Klimawandel und die projizierte Klimaentwicklung auf die epidemiologischen Verläufe der ausgewählten Zuckerrübenpathogene auswirken könnten, steht im Fokus der Untersuchung.

Neben den klimageographischen Kennzeichen ist für die Landwirtschaft der Boden der entscheidende pflanzenbauliche Faktor. Das Ertragspotential der Böden im Untersuchungsgebiet ist überwiegend hoch bis sehr hoch. Es handelt sich teilweise um beste Lössböden mit Ackerzahlen von 95 und mehr. Die Bodenart „sandiger Lehm" dominiert im Zuckerrübenanbaugebiet mit einer hohen nutzbaren Feldkapazität. Dies begünstigt die Zuckerrübe in ihrem Ertragspotential. Sie wandelt das pflanzenverfügbare Wasser über die gesamte Vegetationsperiode effizient in Ertrag um, was sich an den signifikant hohen Zusammenhängen zwischen Ertrag und Niederschlagssumme während der Hauptvegetationsperiode verdeutlichen lässt (Abb. 3).

Von den beschriebenen klimageographischen Besonderheiten des Untersuchungsraumes wird nicht nur das Pflanzenwachstum begünstigt. Auch die stark witterungsabhängigen mykosen Blattkrankheiten profitieren von der relativ warmen Witterung. Besonders milde

Winter, in denen die CLS als dunkles Stroma (sklerotienartiges Myzel) in Blattresten am Boden überdauern kann, einhergehend mit einer feuchtwarmen Frühjahrswitterung, welche die Konidienbildung an den Blattresten fördert, begünstigen *Cercospora beticola* (Brendler et al. 2008). Ein für den Pilz günstiges Bestandsklima entsteht nach Reihenschluss der Zuckerrübe. Das Erreichen des Reihenschlusses ist ebenfalls stark von der Jahreswitterung abhängig: die Aussaat der Zuckerrübe wird maßgeblich von der Feldbefahrbarkeit terminiert. Die Spanne reicht von Ende Februar bis Mitte bzw. Ende April. Für die Keimung des Zuckerrübensaatguts ist eine Bodentemperatur von über 8 °C nötig. Das sich anschließende juvenile Wachstum bis hin zum Reihenschluss ist ein mit der Temperatur positiv korrelierter Prozess. Bei ausreichend hoher Blattnässe sowie Luftfeuchte profitieren allerdings auch die mykosen Blattkrankheiten von für das Pflanzenwachstum günstigen Witterungsbedingungen, weshalb im Rahmen der Untersuchungen ein Fokus darauf gelegt wurde, inwiefern sich gegebenenfalls die Pflanzenentwicklung und die Blattpilzentwicklung zeitlich gegeneinander verschieben.

2. Pathogene der Zuckerrübe: Witterungsansprüche und regionale Bedeutung

Jährliche Expertenbefragungen zeigen eine Zunahme des Auftretens von CLS zwischen 1994 und 2005 in Deutschland (Ladewig et al. 2007). Dadurch stieg der Bedarf an Fungizidbehandlungen. Dies wurde ebenfalls im Rahmen der NEPTUN Studie (Netzwerk zur Ermittlung der Pflanzenschutzmittelanwendung in unterschiedlichen landwirtschaftlich relevanten Naturräumen Deutschlands) festgestellt, welche außerdem zu dem Ergebnis kam, dass der Behandlungsindex von Fungiziden in der Zuckerrübenproduktion von 0,47 (2005) auf 0,88 (2007) und 0,83 (2009) anstieg. Der Behandlungsindex ist die Anzahl der ausgebrachten Pflanzenschutzmittel, bezogen auf die zugelassene Aufwandmenge und die Anbaufläche (Rossberg et al. 2010).

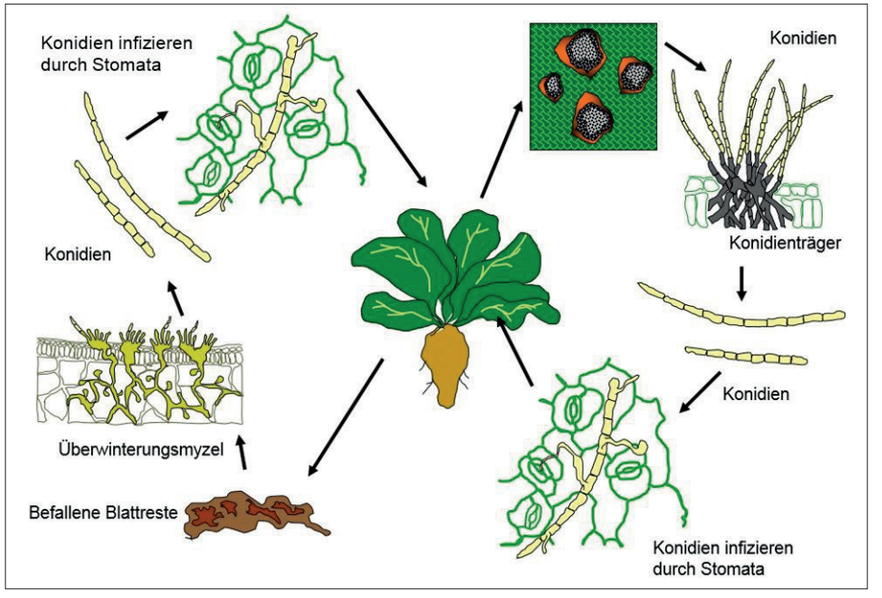


Abb. 4: Befallszyklus von Cercospora (*Cercospora beticola*, CLS). Quelle: Racca (2013).

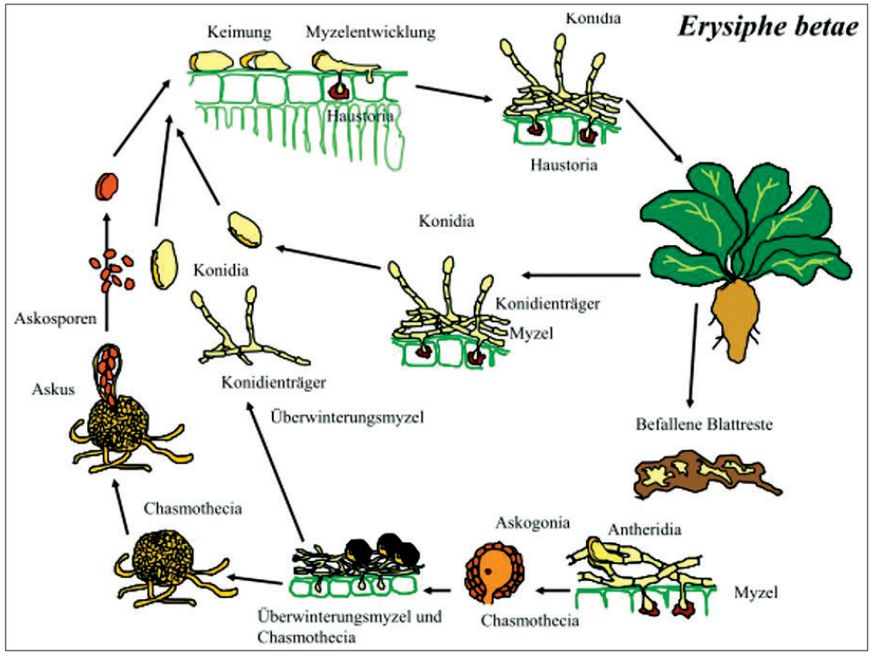


Abb. 5: Befallszyklus von Echtem Mehltau (*Erysiphe betae*, EM). Quelle: Racca et al. 2010.

CLS ist weltweit und auch in Deutschland die ertragsrelevanteste Blattkrankheit der Zuckerrübe und tritt zunehmend auf (Börner 2009, Holtschulte 2000). Bei unterlassener Bekämpfung kann der durch CLS verursachte Schaden zu Einbußen im bereinigten Zuckerertrag von bis zu 50 % führen. Im Zeitraum 1992-2013 wurden in Süddeutschland 236 Versuche zur fungiziden Blattbehandlung durchgeführt. Gegenüber der unbehandelten Kontrolle ergab sich im Durchschnitt ein um 9,1 % höherer bereinigter Zuckerertrag (BISZ 2015) (Tab. 1).

Ideale Bedingungen für die Inokulation der Zuckerrübe durch CLS und seiner Etablierung bestehen bei einer Temperatur von 25-30 °C und einer relativen Luftfeuchte von 95-100 % (Wolf et al. 200, Bleiholder & Weltzien 1972). Hierfür reicht Morgentau in den heißen Sommermonaten in der Regel aus (Mischke 1959). Der Keimschlauch braucht nur wenige Stunden um durch die Stomata in das Blatt einzudringen (Abb. 4). Die Inkubationszeit beträgt witterungsabhängig zwischen 8 und 14 Tagen. Kurz nach der Nekrotisierung beginnt die Sporulation, die ihr Maximum bei über 27 °C und 98-100 % relativer Luftfeuchtigkeit erreicht (Brendler et al. 2008).

Echter Mehltau (EM) bildet einen mehlig weißen Belag auf den Blättern (Brendler et al. 2008). EM ist nach CLS die regional bedeutendste Zuckerrübenblattkrankheit mit potentiellen Ertragsverlusten von bis zu 15 %. Dieser ist maßgeblich vom Befallsbeginn abhängig, welcher zwischen Juli und August variiert.

EM breitet sich bei hohen Temperaturen und geringer Feuchte aus. Die meisten sich vom Oberflächenmyzel abschnürenden Konidien (Abb. 5) werden bei Temperaturen um 15 °C sowie einer relativen Luftfeuchte von 30-40 % einzeln abgestoßen und sorgen auf diese Weise für eine weitere Ausbreitung. Für die

Tabelle 1: Steckbrief der Blattkrankheiten Cercospora und Echter Mehltau. Quelle: Brendler et al. (2008), BISZ (2015); Bilder: Verband der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V.

	Cercospora (*Cercospora beticola*)	**Echter Mehltau** (*Erysiphe betae*)
Taxonomie		
Stamm	Ascomycota	Ascomycota
Klasse	Dothideomycetes	Leotiomycetes
Ordnung	Capnodiales	Erysiphales
Familie	Mycosphaerellaceae	Erysiphaceae
Gattung	*Cercospora*	*Erysiphe*
Art	*C. betocola*	*E. betae*
Befallszyklus	Abb. 4	Abb. 5
Temperaturoptimum Sporenkeimung	25-30 °C	25-30 °C
Temperaturpessimum Sporenkeimung	6 °C; 35 °C	5 °C; 35 °C
Luftfeuchteoptimum Sporenkeimung	95-100 %	100 % (höchste Keimrate)
Luftfeuchtepessimum Sporenkeimung	90 %	30-40 % (Keimrate 70 %)
Schadausmaß	BZE[1]-Verlust von bis zu 50 %	BZE[1]-Verlust von bis zu 15 %
Prognosemodell	CERCBET1 & 3	ERYBET1
Agronomische Gegenmaßnahmen	Fungizidapplikation nach Schadschwellen	Fungizidapplikation nach Schadschwellen
Schadbild		

[1]BZE: Bereinigter Zuckerertrag

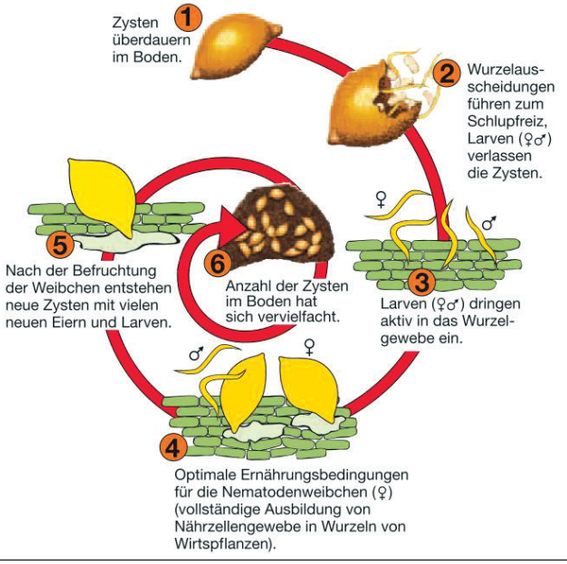
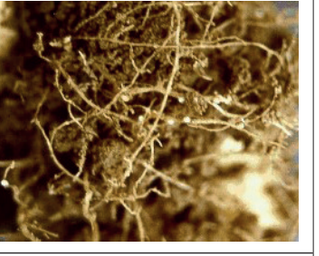
Sporenkeimung sind Temperaturen zwischen 25 °C und 30 °C optimal. Hohe Tag-Nacht-Temperaturschwankungen mit Taubildung fördern den EM an der Rübe (Brendler et al. 2008). Die höchste Keimrate wird bei 100 % Luftfeuchte erreicht.

Für eine schnelle Befallsausbreitung haben somit die beiden regional bedeutendsten Zuckerrübenblattkrankheiten sehr unterschiedliche Witterungsansprüche. Dies führt speziell in indifferenten Jahren zu heterogenen Befallsverläufen.
Auch die Schädlinge der Zuckerrübe sind in ihrer Entwicklung stark witterungsabhängig. Der regional ertragsrelevanteste Schädling, die Rübenzystennematode *Heterodera schachtii*, wird im Rahmen der Studie hinsichtlich der potentiellen Generationenzahl pro Vegetationsperiode untersucht. Die Überdauerungsform der Rübenzystennematoden ist die Zyste mit bis zu 600 Eiern und Larven. Der Entwicklungszyklus (Tab. 2) beginnt, wenn durch den Anbau von Wirtspflanzen wie der Zuckerrübe ein Schlupfreiz induziert wird (Müller 1981). Die Nematodenlarven verlassen die Zyste und dringen mithilfe ihres Mundstachels in die Zuckerrübenwurzel ein, wo sie die Bildung eines Nährzellengewebes (Syncytium) zur eigenen Versorgung induzieren. Nachdem weitere Larvenstadien durchlaufen wurden, entwickeln sich die adulten Männchen bzw. Weibchen. Die weißen Weibchen schwellen weiter an, wodurch sie an der Wurzel sichtbar werden. Die Männchen verlassen die Wurzel und befruchten die Weibchen, worauf diese 200-300, in Ausnahmefällen bis zu 600 Eier, ausbilden. Das Weibchen stirbt ab, verfärbt sich im Laufe mehrerer Wochen braun und die zitronenförmige Zyste löst sich schließlich von der Wurzel ab (Brendler et al. 2008, KWS 2015). Der beschriebene Entwicklungszyklus von Rübenzystennematoden ist hauptsächlich temperaturabhängig. Für den Abschluss einer Generation ist eine Bodentemperatursumme in 10-20 cm Tiefe von ca. 465 °C zu einer Basistemperatur von 8 °C nötig (Curi & Zmoray 1966). In Laborversuchen wurde beobachtet, dass ein Zyklus bereits schon nach 400 °C Temperatursumme abgeschlossen werden kann, so dass im Untersuchungsgebiet 2-4 Generationen pro Jahr möglich sind. Daher werden aktuell umfangreiche Freilandfeldversuche durchgeführt, um die Praxisempfehlungen gegebenenfalls anzupassen. Neben der Temperatur spielt die Bodenfeuchte eine entscheidende Rolle: 30-70 % nFK sind optimal für die Nematodenentwicklung (Brendler et al. 2008).
Insgesamt sind regional mittlere Witterungsverläufe ausgeprägt, die das Auftreten der Hauptpathogene begünstigen. Welche Auswirkungen der projizierte Klimawandel auf die bedeutendsten Pathogene hat, wird im Folgenden dargestellt.

3. Zuckerrübenblattkrankheiten: Modellgestützte Prognose/Projektion

In Deutschland hat die Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP) über 40 wetterbasierte Prognosemodelle für Schädlinge und Krankheiten entwickelt und mithilfe der Offizialberatung in die Praxis eingeführt. Zu diesen Modellen gehört auch CERCBET1 und ERYBET1, welche das Auftreten der Cercospora Blattfleckenkrankheit (CLS) bzw. des echten Mehltaus (EM) in Zuckerrüben prognostizieren bzw. projizieren. Diese wurden im Rahmen der vorliegenden Arbeit intensiv genutzt.
Das witterungsdatenbasierte Modell CERCBET1 wurde 2000 zunächst als Experten-/Fachberatertool eingeführt und ist seit 2005 in praktischer Anwendung (www.isip.de). Zusätzlich hat der deutsche Pflanzenschutzdienst während der letzten Jahre zur Modellvalidierung umfangreiche CLS Monitoring-Daten erhoben (Richerzhagen et al. 2011). Um die möglichen Auswirkungen des Klimawandels auf das CLS- und EM-Auftreten sowie die damit verbundenen Risiken für den Zuckerrübenanbau in Rheinland-Pfalz und Südhessen zu untersuchen, werden CERCBET1 sowie ERYBET1 als Projektionsmodelle eingesetzt. Als Dateninput werden REMO-Daten (**RE**gionales Klima**MO**dell) verwendet und der Output hinsichtlich möglicher Veränderungen untersucht.
CERCBET1 als auch ERYBET1 werden in der praktischen Anwendung eingesetzt, um dem Landwirt auf Basis von 3-Tages-Wettervorhersagen den potentiellen Erstbefall der Schläge (CLS1 bzw. EM1) sowie den Aufruf

Tabelle 2: Steckbrief Rübenzystennematode. Quellen: Brendler et al. (2008), BISZ (2015), KWS (2015).

Taxonomie	Stamm: Nematoda Klasse: Secernentea Ordnung: Tylenchida Familie: Heteroderidae Gattung: *Heterodera* Art: Rübenzystennematode (*Heterodera schachtii*)
Generativer Zyklus Durchschnittliche Bodentemperatursumme zum Vollenden eines Zyklus: **465 °C** (Basistemperatur 8 °C)	
Optimale Entwicklungsbedingungen	• Hohe Bodentemperatur • Mittlere Korngröße von 150-250 µm • 30-70 % nFK
Schadbild Links: Bei Starkem Befall erschlaffende Blätter Rechts: Wurzelbart ausgelöst durch Seitenwurzelbildung mit anhaftenden Zysten	
Schadausmaß	Ertragsverluste bis 50 %
Agronomische Gegen-maßnahmen	• Anbau nematodentoleranter Sorten • Weite/Weitere, nematodenreduzierende Fruchtfolge
Vermehrungsrate	P_f/P_i P_f: Befall nach Ernte P_i: Befall nach Aussaat

zur Feldkontrolle (CLS50 bzw. EM50) zu prognostizieren. Die Feldkontrollen sollen durch die Offizialberatung modellgestützt zum optimalen Zeitpunkt ermöglicht werden. Bei Überschreiten einer im Jahresverlauf variablen Schadschwelle bzw. Befallshäufigkeit wird den Landwirten in der Region eine Fungizidapplikation empfohlen.
Durch eine klimawandelinduzierte Erwärmung würde sich das Gebiet mit hohem CLS-Befallsdruck von Süden in Richtung Norden ausdehnen. Im Rahmen erster Untersuchungen mit dem regionalen Klimamodell STAR wurde für den Zeitraum 2004-2055 eine potentielle Vorverlagerung von CLS1 um durchschnittlich 12-15 Tagen für Niedersachsen errechnet (Zeuner et al. 2008). Im KLIFF-Projekt (Klimafolgenforschung in Niedersachsen) wurde auf Grundlage von REMO-Daten eine potentielle Vorverlagerung von CLS1 als auch von CLS50 von 22,9 Tagen bzw. von 25,2 Tagen beim Vergleich der Basisperiode (1971-2000) (B) mit der Langzeitperiode (2071-2100) (L) errechnet (Richerzhagen et al. 2011). Insgesamt zeigte die Studie, dass sich unter Annahme des zugrunde gelegten Klimaszenarios alle untersuchten CLS Termine zukünftig vorverlagern. Auch EM dürfte somit in seiner Epidemiologie von der regional projizierten Temperaturerwärmung profitieren, tritt allerdings regional verstärkt in relativ kühlen Jahren aufgrund seiner geringeren Temperaturansprüche während der Infektions- und Ausbreitungsphase auf.
Die Tendenz zu beschleunigten Befallsverläufen zeigten Racca et al. (2013) im Rahmen des KLIFF-Projektes für Niedersachsen auf. Für die Kurzzeitperiode (2021-2050) (K) wird eine Verfrühung des Krankheitserstauftretens von 3 Tagen, für die L Periode eine von 15 Tagen im Vergleich zur Referenzperiode (1971-2000) projiziert.
Von klimatischen Veränderungen ist auch die Ontogenese der Zuckerrübe beeinflusst, so dass sich möglicherweise die Interaktion zwischen Wirt und Pathogen verändert. Daher wurde im Rahmen der Studie mithilfe eines Blattwachstumsmodells der Einfluss der Temperatur auf das Eintreten des 20-Blattstadiums (B20) sowie des 40-Blattstadiums (B40) untersucht. Durch diese Vorgehensweise konnte analysiert werden, ob es zu einer synchronen klimawandelbedingten Verlagerung der Blattbildungsstadien und der Krankheitsentwicklung kommt oder ob Veränderungen projiziert werden.

4. Modellbeschreibung: CERCBET1 (*Cercospora beticola*), ERYBET1 (*Erysiphe betae*) und Blattwachstumsmodell

Im Rahmen dieses Beitrages wird der Fokus bezüglich der Blattkrankheitsmodellierung auf das Erstauftreten (CLS1 bzw. EM1) und den Aufruf zur Feldkontrolle (CLS50 bzw. EM50) der jeweiligen Blattkrankheit in einer Region gelegt. Mithilfe von CERCBET1 wurden auch jene Termine, an denen potentiell 100 % der Felder einer Region *Cercospora*-Befall aufweisen, untersucht (CLS100). Eine „Region“ umfasst im Einsatzgebiet *Prognose* jenes Gebiet, welches repräsentativ von einer Klimastation abgedeckt wird. Bei der Betrachtung von *Projektion*sdaten umfasst eine „Region“ jenes Gebiet, welches von den simulierten Klimadaten repräsentiert wird. Bei stationsbasierten Zukunftssimulationen wie z. B. den WETTREG-Modellen handelt es sich um die simulierten Stationsdaten, die analog der Messstationen den Raum repräsentativ abdecken. Bei Flächenprojektionen wie den in dieser Studie verwendeten REMO-Daten mit einer horizontalen Auflösung von 10 × 10 km entspricht die einzelne Rasterfläche einer „Region“.
Die regressionsanalytischen Modelle CERCBET1 und ERYBET1 benötigen als Dateninput Klimadaten sowie Regionalfaktoren. CERCBET1 summiert ab dem 1. Januar eines jeden Jahres die Durchschnittstemperatur zur Basistemperatur 5 °C auf, bis die jeweiligen Schwellenwerte für das Erstauftreten und Feldkontrolle erreicht sind. ERYBET1 verwendet als Prädiktoren die Winterfrosttage und die Summe der Tagesmitteltemperatur zur Basistemperatur von 5 °C ab dem 1. April.

Maßgeblich ist das Erstauftreten der Zuckerrübenblattkrankheiten vom Vorjahresinokulum, dem auf dem Acker befindlichen infektiösen Material, abhängig. Dieses wird durch die folgenden drei Faktoren abgeschätzt:

1. Anbauverhältnis der Zuckerrübe einer Region (prozentualer Anteil mit Zuckerrüben bepflanzter Felder)
2. Fruchtfolgegestaltung/-länge
3. Stärke des Vorjahresbefalls in der Region

Die genannten Faktoren beeinflussen den Startwert der Temperatursummenbildung der Modelle. Die Menge des infektiösen *Erysiphe betae*-Inokulums wird maßgeblich durch die Witterung im Winter determiniert, weshalb für dessen Abschätzung die folgenden drei Faktoren herangezogen werden (Racca & Jörg 2003):

1. Minimumtemperatursumme an Frosttagen (Kältesumme)
2. Anzahl Frosttage
3. Niederschlagsmenge

Die Auswertung der Witterung im Winterhalbjahr ermöglicht eine Abschätzung, wann und wo das Erstauftreten der jeweiligen Blattkrankheit zu erwarten ist. Dies unterstützt die Steuerung des Blattkrankheitsmonitorings und hilft dem Berater sowie den Landwirten ihre Bonituren und anschließenden Pflanzenschutzmaßnahmen gezielt durchzuführen sowie die Mitteleinsätze zu minimieren (Zeuner et al. 2010).
Im Rahmen der Studie wurde neben den Eintrittsterminen der Krankheiten auch der Frage nachgegangen, ob sich diese zu den Entwicklungsstadien der Zuckerrübe verschieben. Hierfür wurde die Ontogenese der Zuckerrübe mithilfe eines Blattwachstumsmodells nach Richerzhagen et al. (2012) simuliert. Dieses errechnet die Anzahl der gebildeten Blätter in Abhängigkeit von der Tagesmitteltemperatur. Im Rahmen der Studie wurde der Termin des Erreichens des 20-Blattstadiums (B20) und des 40-Blattstadiums (B40) untersucht. Es wurde der 15. März, ein aktuell praxisübliches Aussaatdatum, sowie der 1. März, ein in der nahen Zukunft möglicherweise häufiger praktizierter Saattermin, für den Simulationsstart des Blattwachstumsmodells verwendet. Dieses wurde auf Basis von publizierten Versuchsdaten erstellt (Büchse & Röver 1998, Chmielewski et al. 2004, Lemaire et al. 2008, Milford et al. 1985a, b, Richerzhagen et al. 2011).
Die beschriebenen Modelle wurden im Rahmen der vorliegenden Studie als Zukunftsprojektionsmodelle zur Klimafolgenabschätzung eingesetzt. Hierfür wurden die Modelle mit Daten des regionalen Klimamodells REMO angetrieben. REMO wurde das Emissionsszenario A1B, welches von einer vorwiegend ökonomisch gewinnorientierten Wirtschaftsentwicklung mit ausgeglichener Nutzung fossiler und nicht-fossiler Energieträger ausgeht (Nakicenovic & Swart 2000), zugrunde gelegt. Das Szenario A1B ist ein mittleres Szenario aus dem breiten Fächer möglicher Entwicklungspfade. In die Untersuchung flossen 150 Rasterflächen (10 × 10 km) ein. Diese

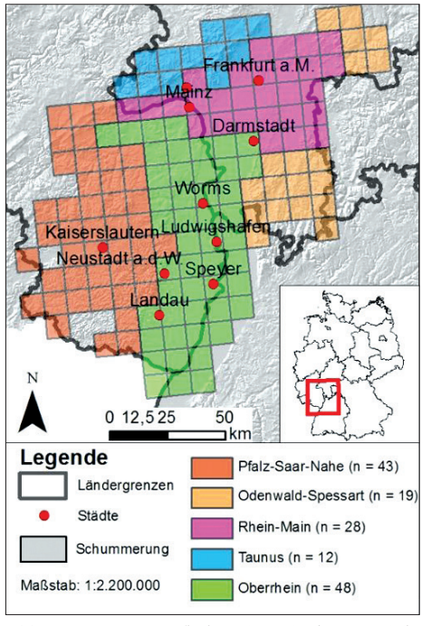


Abb. 6: REMO-Rasterflächen (10 × 10 km) mit Subregionen.

wurden aufgrund der heterogenen naturräumlichen Ausstattung des Untersuchungsgebietes in fünf Subregionen untergliedert, wofür hauptsächlich klimatische Faktoren sowie die Boden-Klima-Räume nach ROSSBERG et al. (2007) herangezogen wurden: Oberrhein (OR), 48 Rasterflächen; Rhein-Main (Rh-M), 28 Rasterflächen; Pfalz-Saar-Nahe (Pf-S-N), 43 Rasterflächen; Odenwald-Spessart (OwSp), 19 Rasterflächen; Taunus (Tau), 12 Rasterflächen (Abb. 6).

5. Ergebnisse der Klimafolgenabschätzung

Die Modellergebnisse werden als Zeitscheibenvergleiche dargestellt. Es werden die Zeitscheiben der Referenzperiode „B" (1971-2000), der nahen Zukunft „K" (2021-2050) und der fernen Zukunft „L" (2071-2100) gegenübergestellt.

5.1 Blattwachstum

Bei Aussaat am 15. März wird B20 (B40) in der B-Periode am Tag des Jahres (Day of Year = DOY) 158,9 (200,1), in der K-Periode am DOY 157,5 (197,7) projiziert (Tab. 3). Dies entspricht einer Verfrühung um 1,3 (2,4) Tage. Deutlichere Veränderungen werden für die L-Periode projiziert. Das Erreichen von B20 (B40) wird für DOY 149,4 (186,1) ausgegeben, was einer Verfrühung von 9,5 (14) Tagen entspricht. Aus der ANOVA geht hervor, dass sämtliche Zeitfenster signifikant unterschiedlich voneinander sind.
Die Blattwachstumsstadien werden bei Betrachtung der einzelnen Subregionen im Gebiet Oberrhein am frühesten und im Gebiet Taunus am spätesten für alle drei Zeitfenster erreicht. B20 (B40) wird beispielsweise im Gebiet Oberrhein in der B Periode am DOY 153,9 (192,7) und im Gebiet Taunus am DOY 162,9 (204) erreicht.
Geht man von einer Aussaat am 1. März aus, wird B20 (B40) bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet in der B-Periode am DOY 154,7 (196,4), in der K-Periode am DOY 153,2 (193,8) und in der L-Periode am DOY 144,8 (182,1) erreicht. Die gleichen Blattstadien werden somit bei einer um 2 Wochen früheren Aussaat 3-5 Tage schneller erreicht.

5.2 *Cercospora beticola*

Im Rahmen der Studie wurde das Erreichen der Termine CLS1 (Erstbefall), CLS50 (Aufruf zur Feldkontrolle) sowie CLS100 (Vollbefall) untersucht.
Für 30 Jahre und 150 REMO-Rasterpunkte im Untersuchungsgebiet sind theoretisch 4500 Jahres-Szenario-Beschreibungen möglich. In einigen Jahr-Rasterzellen-Kombinationen reichte die Temperatursumme jedoch nicht dafür aus, dass alle CLS-Termine erreicht wurden. Die betreffenden Rasterpunkte liegen hauptsächlich in den Mittelgebirgslagen des Taunus, des Odenwalds und des Spessarts.
Zusätzlich wurden alle Modelloutputdaten auf Ausreißer mit unrealistischen Werten, welche nach der Zuckerrübenvegetationsperiode liegen, untersucht. Hierfür wurde der 15. September (DOY 259) als limitierender Wert verwendet, da ab Anfang September aufgrund der ökonomischen Abwägung der Befalls-Verlust-Relation keine Fungizidapplikation mehr empfohlen wird (WOLF et al. 1998). Ein CLS Auftreten ab diesem Zeitpunkt ist für den Anbau irrelevant. Sämtliche Projektionen von CLS50 nach DOY 259 wurden dementsprechend verworfen. Es ist allerdings möglich, dass auf ein CLS50 Ereignis, welches vor DOY 259 projiziert wurde, ein CLS100 Ereignis nach dem Grenzwert projiziert werden kann. Diese Projektionen wurden in der Analyse berücksichtigt.
Folgende Stichprobenumfänge ergeben sich für die statistische Analyse der drei CLS-Ereignisse: In der B (K)-Periode wurde CLS1 4467 (4500), CLS50 4414 (4495) und CLS100 4381 (4492) Mal projiziert. In der L-Periode wurde für alle Jahr-Rasterzellen-Kombinationen CLS100 projiziert.
Im Mittel wird CLS1 in der K-Periode am DOY 176,9 erreicht, in der B-Periode am DOY 180,7, was einer Verfrühung von 3,8 Tagen entspricht. Die ANOVA zeigt, dass

Tabelle 3: Mittelwerte der mit CERCBET1 projizierten Ereignisse für das gesamte Untersuchungsgebiet von Rheinland-Pfalz und Südhessen: CLS1, CLS50 und CLS100 für die drei Perioden: B, K, L.
A1 = Saat am 1. März; A2 = Saat am 15. März; SD = Standardabweichung.

RLP & SüdHE	Projiziertes Auftreten (Mittelwert ± SD, in Kalendertagen) in den Zeitfenstern			Differenzen der Zeitfenster (in Kalendertagen)		
Ereignis	**B (1971-2000)**	**K (2021-2050)**	**L (2071-2100)**	**K - B**	**L - B**	**L - K**
CLS1	180,7 ± 12,1	176,9 ± 11,4	160,6 ± 10,4	-3,8	-20,1	-16,3
CLS50	212,0 ± 13,2	206,3 ± 12,3	188,2 ± 11,5	-5,7	-23,8	-18,1
CLS100	227,7 ± 15,0	220,8 ± 14,0	200,9 ± 12,2	-6,9	-26,8	-19,9
CLS50-CLS1	31,3	29,4	27,6	-1,9	-3,7	-1,8
A1_B20	154,7 ± 10,1	153,2 ± 7,9	144,8 ± 7,1	-1,5	-9,9	-8,4
A1_B40	196,4 ± 10,2	193,8 ± 8,9	182,1 ± 8,2	-2,6	-14,3	-11,7
A1_B40-B20	41,7	40,6	37,3	-1,1	-4,4	-3,3
CLS1-A1_B20	26,0	23,7	15,8	-2,3	-10,2	-7,9
CLS50-A1_B40	15,6	12,5	6,1	-3,1	-9,5	-6,4
A2_B20	158,6 ± 8,64	157,5 ± 7,2	149,7 ± 6,4	-1,1	-8,9	-7,8
A2_B40	199,7 ± 9,3	197,4 ± 8,5	186,2 ± 7,66	-2,3	-13,5	-11,2
A2_B40-B20	41,1	39,9	36,5	-1,2	-4,6	-3,4
CLS1-A2_B20	22,1	19,4	10,9	-2,7	-11,2	-8,5
CLS50-A2_B40	12,3	8,9	2,0	-3,4	-10,3	-6,9

diese zwei Zeitfenster sich nicht signifikant voneinander unterscheiden. Auch CLS50 und CLS100 werden laut Projektion früher eintreten (Abb. 7, 8). Für CLS50 wird eine Verfrühung von 5,7 Tagen, für CLS100 eine von 6,9 Tagen beim Vergleich von B und K projiziert. Die ANOVA zeigt einen signifikanten Unterschied der beiden CLS50 und CLS100 Zeitfenster.
Ein deutlich erhöhtes Risiko von früherem CLS Auftreten zeigt sich speziell für die L-Periode 2071-2100. Der Mittelwert für CLS1 ist DOY 160,6 (Tab. 3), was einer Verfrühung von 20,1 Tagen im Vergleich zur B-Periode und von 16,3 Tagen zur K-Periode entspricht. Ähnliche Veränderungen werden auch für CLS50 und CLS100 projiziert. CLS50 wird um 23,8 Tage früher projiziert im Vergleich zur B-Periode, CLS100 sogar um 26,8 Tage. Die ANOVA zeigt, dass sich das Zeitfenster L signifikant in allen analysierten CLS-Ereignissen von den anderen beiden betrachteten Zeitfenstern unterscheidet.

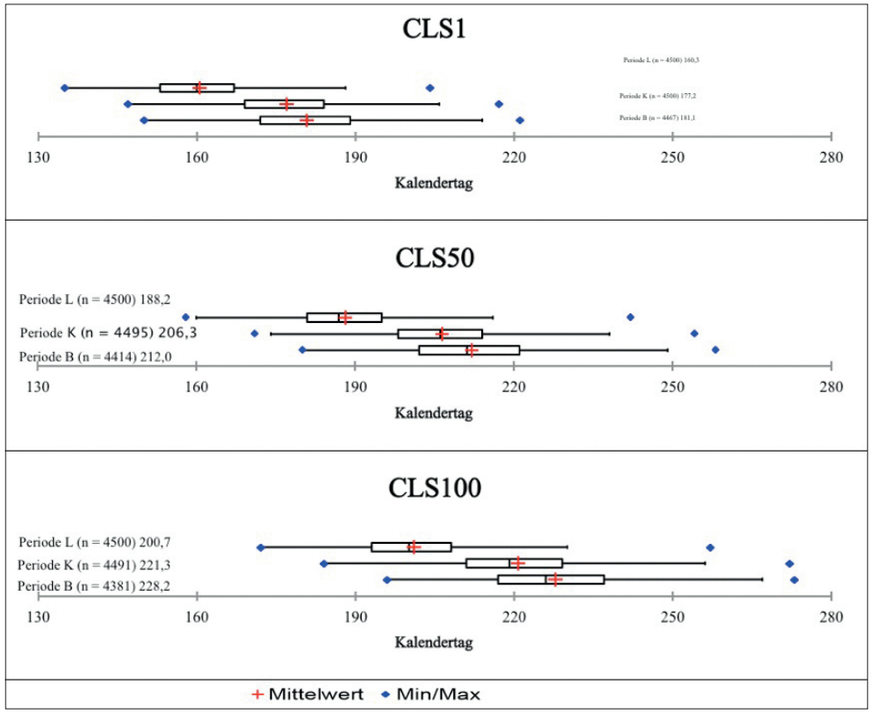


Abb. 7: Box-Whisker-Plots der Mittelwerte des mit CERCBET1 projizierten CLS1, CLS50 und CLS100 in den drei Perioden B, K, L.
n = Anzahl der gültigen Orts-Jahres-Kombinationen nach Plausibilitätstest.

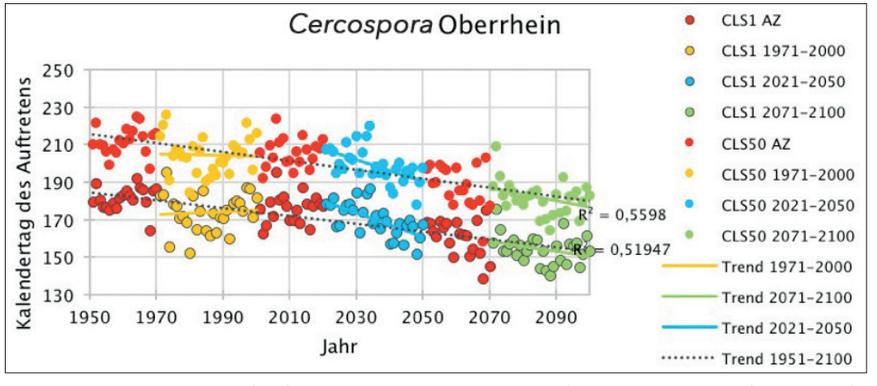


Abb. 8: Lineare Regressionsgeraden der mit CERCBET1 projizierten mittleren Termine CLS1 und CLS50 für die Subregion Oberrhein.
AZ = außerhalb der beobachteten Zeiträume: B, K, L. R^2 = Bestimmtheitsmaß.

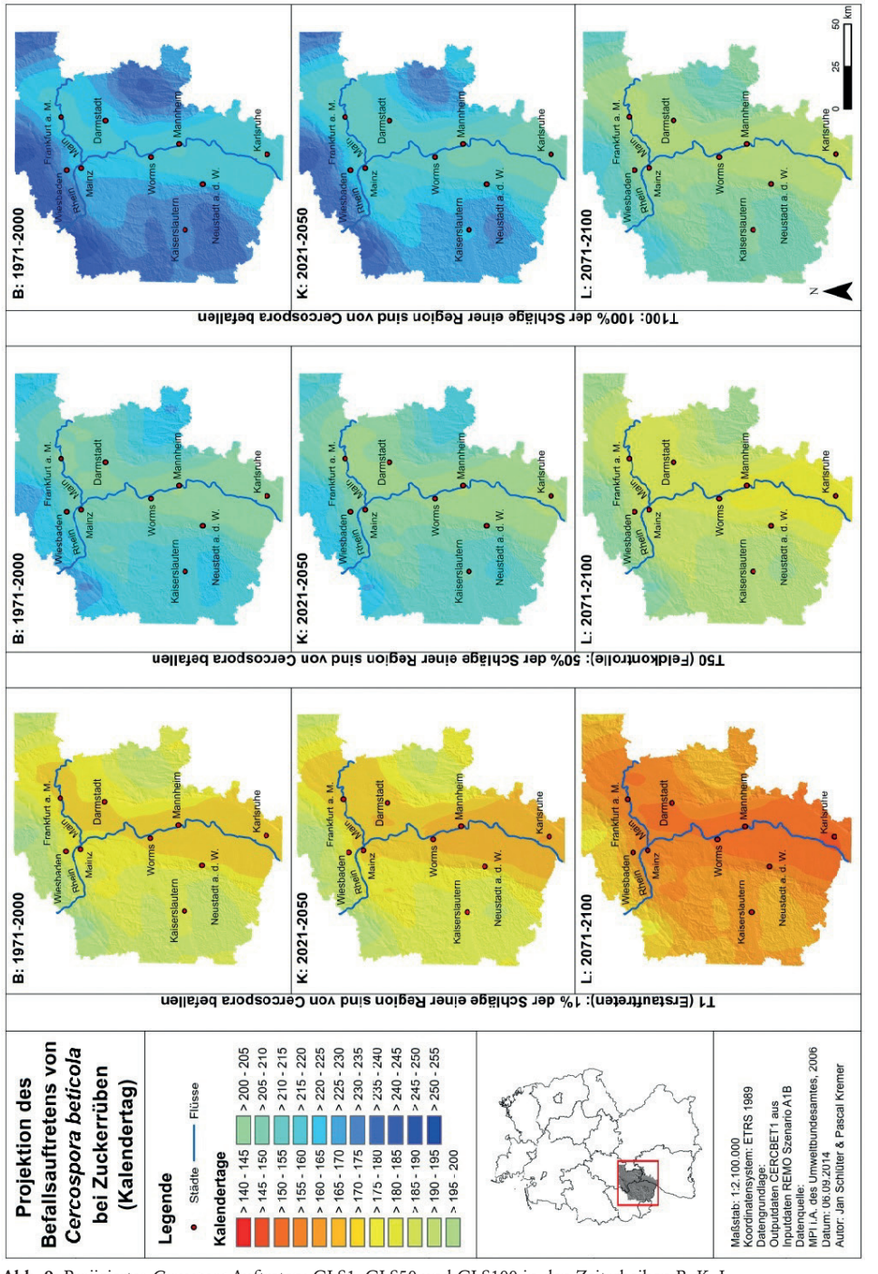


Abb. 9: Projiziertes *Cercospora*-Auftreten: CLS1, CLS50 und CLS100 in den Zeitscheiben B, K, L.

Tabelle 4: Mittelwerte der mit ERYBET1 projizierten Ereignisse für das gesamte Untersuchungsgebiet von Rheinland-Pfalz und Südhessen: EM1 und EM50 für die drei Perioden: B, K, L.
A1 = Saat am 1. März; A2 = Saat am 15. März; SD = Standardabweichung.

RLP & SüdHE	Projiziertes Auftreten (Mittelwert ± SD, in Kalendertagen) in den Zeitfenstern			Differenzen der Zeitfenster (in Kalendertagen)		
Ereignis	B (1971-2000)	K (2021-2050)	L (2071-2100)	K - B	L - B	L - K
EM1	185,2 ± 16,5	178,2 ± 16,5	163,8 ± 12,8	-7,0	-21,4	-14,4
EM50	227,2 ± 17,7	218,4 ± 18,8	198,8 ± 16,5	-8,8	-28,4	-19,6
EM50-EM1	42,0	40,2	35,0		-7,0	-5,2
A1_B20	154,7 ± 10,1	153,2 ± 7,9	144,8 ± 7,1	-1,5	-9,9	-8,4
A1_B40	196,4 ± 10,2	193,8 ± 8,9	182,1 ± 8,2	-2,6	-14,3	-11,7
A1_B40-B20	41,7	40,6	37,3	-1,1	-4,4	-3,3
EM1-A1_B20	30,5	25,0	19,0	-5,5	-11,5	-6,0
EM50-A1_B40	30,8	24,6	16,7	-6,2	-14,1	-7,9
A2_B20	158,6 ± 8,6	157,5 ± 7,2	149,7 ± 6,4	-1,1	-8,9	-7,8
A2_B40	199,7 ± 9,3	197,4 ± 8,5	186,2 ± 7,7	-2,3	-13,5	-11,2
A2_B40-B20	41,1	39,9	36,5	-1,2	-4,6	-3,4
EM1-A2_B20	26,6	20,7	14,1	-5,9	-12,5	-6,6
EM50-A2_B40	27,5	21,0	12,6	-6,5	-14,9	-8,4

Auch für die Dauer zwischen den untersuchten CLS-Ereignissen wird dementsprechend eine Verkürzung projiziert. Vom CLS-Erstauftreten bis zur Feldkontrolle wird für die B-Periode eine Dauer von 31,3 Tagen, für die K-Periode von 29,4 Tagen und für die L-Periode lediglich von 27,6 Tagen projiziert. Die drei Zeitfenster unterscheiden sich signifikant voneinander.
Bei der Betrachtung der fünf Subregionen des Untersuchungsgebietes ist ein deutlicher regionaler Unterschied bezüglich der CLS-Termine feststellbar. CLS1 tritt in der B Periode am frühsten im Gebiet OR (Abb. 8) am DOY 174,6 und am spätesten im Gebiet Tau am DOY 189,4 auf, was einer Differenz von 14,8 Tagen entspricht. Das CLS1-Eintreten wird für das Gebiet OwSp im Mittel am DOY 185,3, für Pf-S-N am DOY 185,5 sowie für Rh-M am DOY 176,8 projiziert. Die gleichen regionalen Unterschiede wurden auch für CLS50 und CLS100 in allen drei Zeitfenstern festgestellt (Abb. 9).

5.3 *Erysiphe betae*

Analog zu CERCBET1 wurde in den betrachteten 30-Jahres-Zeiträumen nicht in jeder Jahr-Rasterzellen-Kombination die Temperatursumme zum Erreichen des Erstbefalls (EM1) bzw. des Aufrufs zur Feldkontrolle aufgrund von Mehltaubefall (EM50) erreicht. Daraus ergeben sich ungleich große Stichproben für die statistische Analyse der zwei EM-Ereignisse: In der B (K)-Periode wurde EM1 4409 (4500) und EM50 4069 (4393) Mal projiziert. In der L-Periode wird das Erreichen von EM50 für alle Jahr-Rasterzellen-Kombinationen projiziert.
Das Erstauftreten wird in der B-Periode am DOY 185,2 projiziert, in der K-Periode am DOY 178,2, was einer Verfrühung von 7 Tagen entspricht. Die ANOVA zeigt, dass sich diese zwei Zeitfenster signifikant voneinander unterscheiden. Für EM50 wird ebenfalls eine signifikante Verfrühung von 8,8 Tagen beim Vergleich der B und K-Periode projiziert (Abb. 10).
Ein deutlich erhöhtes Risiko von früherem EM-Auftreten zeigt sich speziell für die L-Periode 2071-2100. Der Mittelwert für EM1 ist DOY 163,8 (Tab. 4), was einer Verfrühung von 21,4 Tagen im Vergleich zur B-Periode und von 14,4 Tagen zur K-Periode entspricht. Ähnliche Veränderungen werden auch für EM50 projiziert. EM50 wird um 28,4 Tage früher projiziert im Vergleich zur B-Periode. Auch für die Dauer zwischen den untersuchten EM-Ereignissen wird dementsprechend eine Verkürzung projiziert. Von EM1 bis EM50 wird für die B-Periode eine Dauer von 42 Tagen, für die K-Periode von 40,2 Tagen und für die L-Periode lediglich von 35 Tagen projiziert.
Hieraus lässt sich ableiten, dass der für die Zukunft projizierte Klimawandel möglicherweise große Auswirkungen auf das EM-Auftreten haben wird. Die Projektionsdaten zeigen allerdings auch, dass mit größeren Veränderungen erst in der fernen Zukunft zu rechnen ist.
Betrachtet man die fünf Subregionen des Untersuchungsgebietes, so ist ein deutlicher regionaler Unterschied bezüglich des EM-Auftretens feststellbar (Abb. 10). EM1 tritt in der B-Periode am frühsten im Gebiet OR am DOY 182,5 und am spätesten im Gebiet OwSp am DOY 192,9 auf, was einer Differenz von 10,4 Tagen entspricht. EM1 wird für das Gebiet Tau im Mittel am DOY 183,4, für Pf-S-N am DOY 185,2 sowie für Rh-M am DOY 185,2 projiziert. EM50 wird im Gebiet Tau im Durchschnitt am DOY 224 und damit am frühesten projiziert. Im Gebiet OR wird EM50 im Mittel am DOY 225,5 projiziert. Für das Gebiet OwSp simuliert das Modell am DOY 235 das Erreichen von EM50.

5.4 *Heterodera schachtii*

Zur Bestimmung der möglichen Generationenzahl der Rübenzystennematode wird beginnend mit dem 1. März eines jeden Jahres die Tagesmitteltemperatur zur Basistemperatur 8 °C bis zum 31. Oktober aufsummiert. Zur Bestimmung der potentiell möglichen

Tabelle 5: Mittelwerte der projizierten Nematodengenerationen im Untersuchungsgebiet sowie in den Subregionen in den Perioden B, K, L.
SD = Standardabweichung.

	Projizierte Anzahl potentielle Nematodengenerationen in den Zeitfenstern (Mittelwert ± SD, in Kalendertagen)					
Ereignis	B (1971-2000)	K (2021-2050)	L (2071-2100)	K - B	L - B	L - K
RLP & SüdHE	3,3 ± 0,5	3,7 ± 0,6	4,8 ± 0,6	0,4	1,4	1,1
OR	3,6 ± 0,4	4,0 ± 0,5	5,1 ± 0,5	0,4	1,5	1,1
Rh-M	3,5 ± 0,4	3,9 ± 0,5	4,9 ± 0,5	0,4	1,4	1,1
Pf-S-N	3,1 ± 0,4	3,4 ± 0,5	4,5 ± 0,5	0,4	1,4	1,1
OwSp	3,1 ± 0,5	3,4 ± 0,5	4,4 ± 0,5	0,3	1,4	1,0
Tau	2,9 ± 0,5	3,3 ± 0,5	4,3 ± 0,5	0,3	1,3	1,0

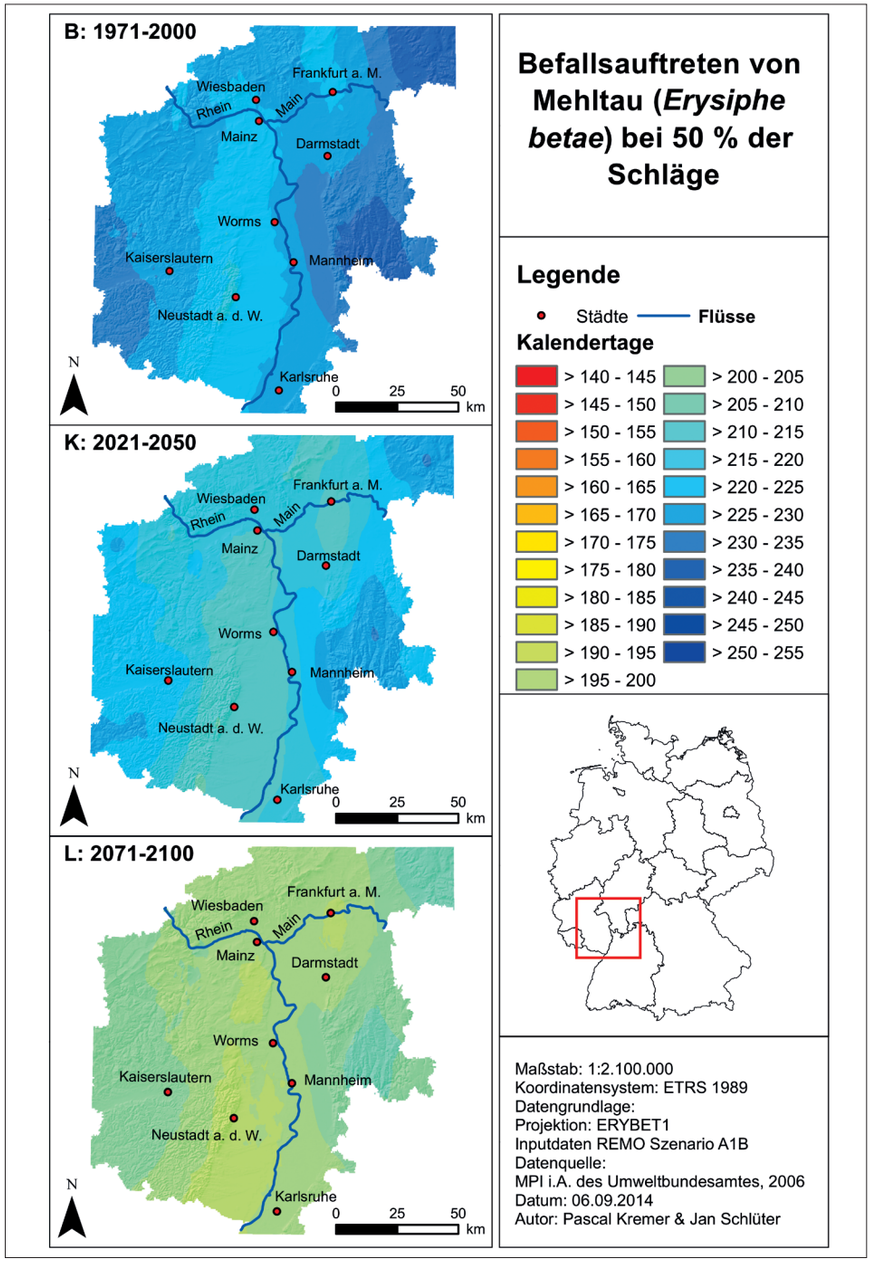


Abb. 10: Projiziertes Mehltau-Auftreten: EM50 in den Zeitscheiben B, K, L.

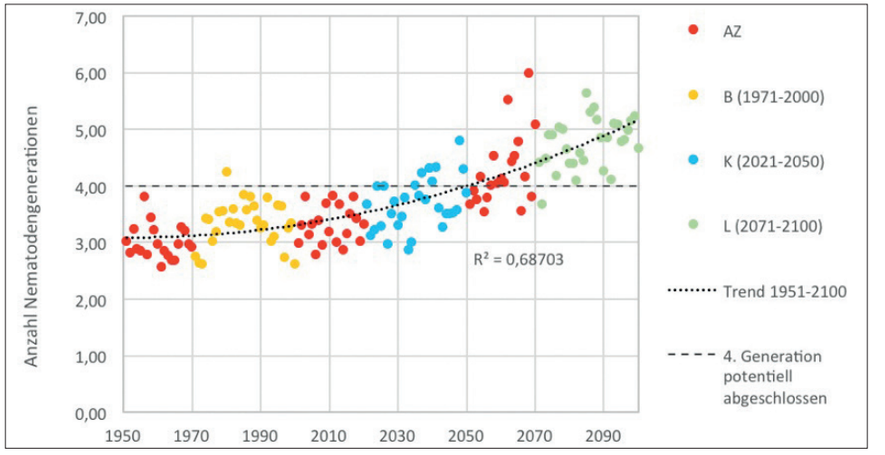


Abb. 11: Potentielle Anzahl von Nematodengenerationen pro Vegetationsperiode im Untersuchungsgebiet. AZ = außerhalb der beobachteten Zeiträume: B, K, L. R^2 = Bestimmtheitsmaß.

Nematodengenerationen wird der Wert von 465 °C Tagesmitteltemperatursumme zur Basistemperatur 8 °C zum Abschluss einer Generation angenommen (Curi & Zmoray 1966). Im Mittel sind, bezogen auf das gesamte Untersuchungsgebiet, in der B-Periode potentiell 3,3 Nematodengenerationen möglich. Für die K sowie L-Periode wird eine Zunahme auf 3,7 bzw. 4,8 projiziert. Ein deutlicher Unterschied zeigt sich bei der Betrachtung der Anzahl der Jahre, in welchen die 4. Nematodengeneration in den einzelnen Zeitfenstern potentiell abgeschlossen werden kann. Für die B-Periode wird dies potentiell einmal, für die K-Periode 7-mal und für die L-Periode 29-mal projiziert (Abb. 11).
Bezogen auf die einzelnen Subregionen zeigt sich, dass im Gebiet Rh-M und OR in der B-Periode mit 3,5 bzw. 3,6 potentiell die meisten Nematodengenerationen pro Vegetationsperiode möglich sind (Tab. 5). In den Mittelgebirgslagen des Taunus, des Odenwalds sowie des Spessarts sind 2,9 bis 3,1 Generationen potentiell möglich. Für die K-Periode ändert sich an der Rangfolge nichts. Für die Beckenlagen wird eine potentielle Generationenzunahme von 0,4, für die Mittelgebirgslagen von 0,3 projiziert (Tab. 5). Für die L-Periode wird allerdings eine deutliche Zunahme um weitere 1,1 bzw. 1 Generationen simuliert, so dass im Gebiet OR im 30-jährigen Mittel (2071-2100) sogar 5,1 Nematodengenerationen potentiell möglich werden könnten (Abb. 12).

6. Diskussion

Alle Ergebnisse der Simulationen deuten sowohl auf ein zukünftig tendenziell früheres Auftreten der Blattkrankheiten als auch ein früheres Erreichen der untersuchten Blattstadien in der K-Periode (2021-2050), aber speziell in der L-Periode (2071-2100) im Vergleich zur B-Periode (1971-2000) hin.
Es wird für die Zeitspanne zwischen CLS1 und CLS50 als auch CLS100 eine deutliche Verkürzung projiziert. In der K-Periode kommt es zu einer Verfrühung der CLS-Stadien um 3 bis 8 Tagen und in der L-Periode um 19 bis 29 Tagen im Vergleich zur B-Periode. Im Untersuchungsgebiet wird sich somit möglicherweise der *Cercospora*-Erstbefall vom 29. Juni auf den 8. Juni vorverschieben. Der Aufruf zur Feldkontrolle könnte im Mittel bereits am 6. Juli und nicht wie aktuell Ende Juli (30. Juli) erfolgen. Die Gebiete OR und Rh-M, in denen der Zuckerrübenanbau konzentriert ist, werden möglicherweise unter der Annahme gleichbleibender Anbauverhältnisse

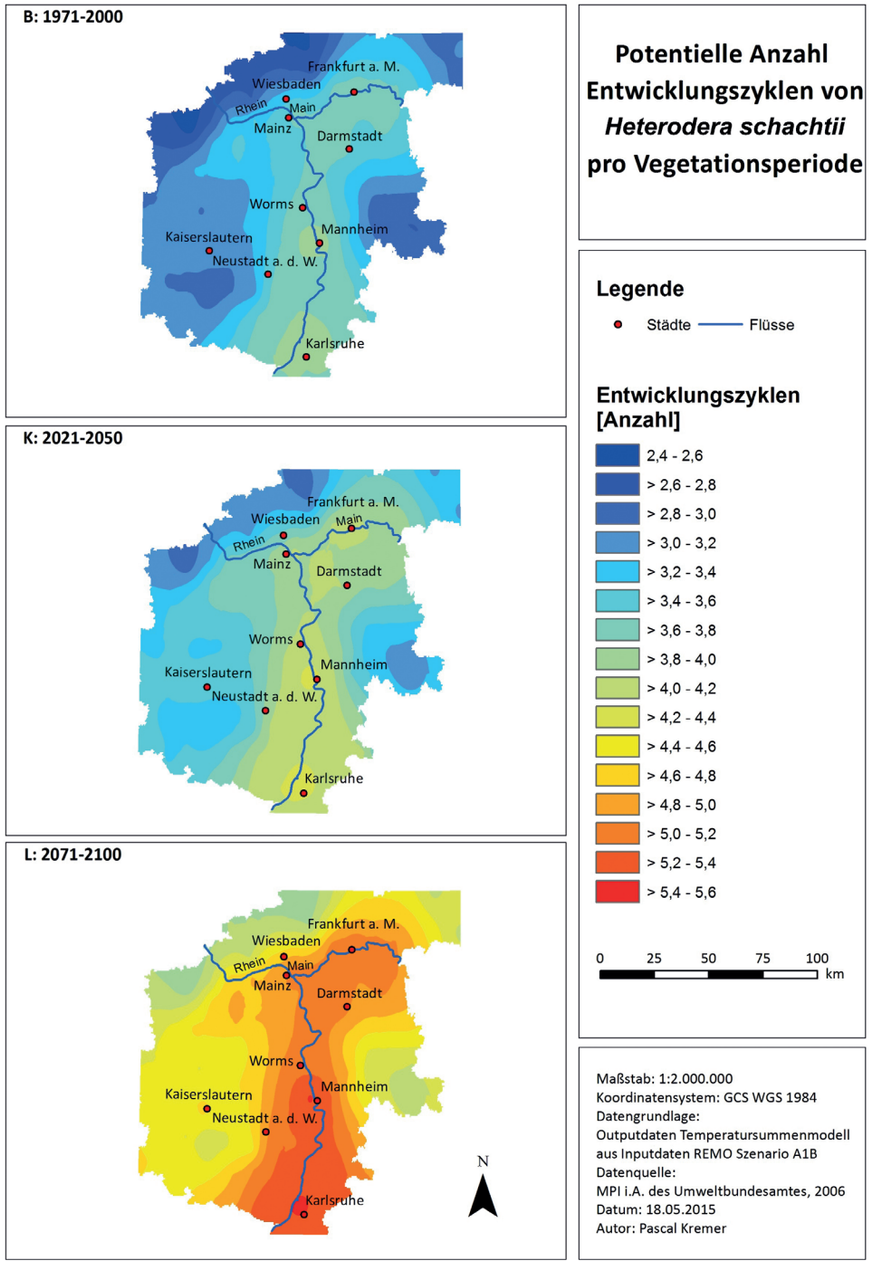


Abb. 12: Potentielle Anzahl Entwicklungszyklen der Rübenzystennematode in den Zeitscheiben B, K, L.

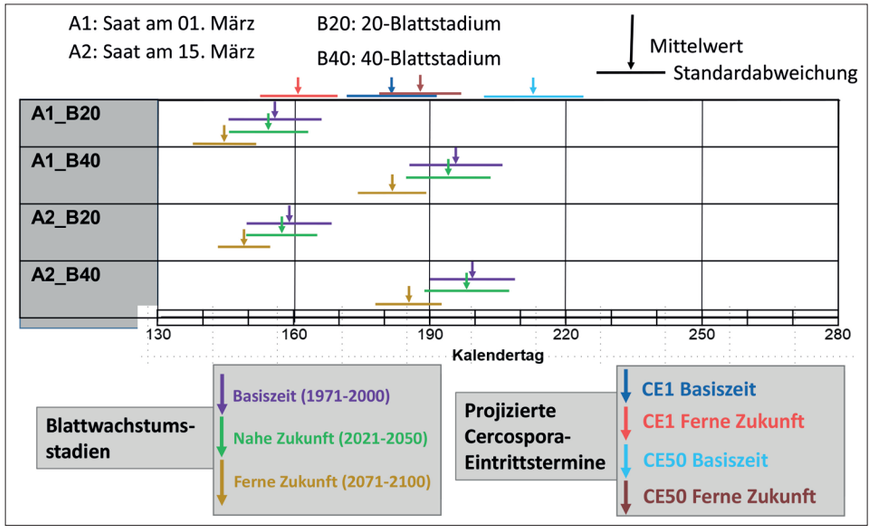


Abb. 13: Erreichen von B20 und B40 im Verhältnis zu CE1 und CE50 (Cercospora-Erstbefall und Aufruf zur Feldkontrolle) für die drei Zeitscheiben B, K, L.

vom frühesten CLS-Auftreten betroffen sein. In den untersuchten höher gelegenen Regionen Tau und OwSp ist in der L-Periode mit einem früheren CLS-Auftreten als im Gebiet OR in der B-Periode zu rechnen.

Auf der anderen Seite wird ein beschleunigtes Blattwachstum projiziert, wovon besonders die Mittelgebirgslagen profitieren könnten. Bei Aussaat am 15. März könnte sich B20 (B40) um etwa 1 (3) Tage beim Vergleich der B mit der K-Periode verfrühen. Wenn bereits am 1. März gesät wird, ist eine weitere Verfrühung um 4 Tage möglich. Speziell für die L-Periode wird jedoch eine enorme Verfrühung von etwa 9 (14) Tagen projiziert, so dass dann B20 (B40) bereits am 28. Mai (4. Juli) erreicht wäre. Die Phase zwischen B20 und B40 verkürzt sich potentiell um etwa 5 Tage auf etwa 37 Tage.

Die Vorverlagerung des CLS-Auftretens im Vergleich zu den Blattwachstumsstadien ist speziell in der L-Periode deutlich ausgeprägt. Diese asynchrone Verschiebung von CLS-Auftreten und Blattstadium bedeutet, dass in Zukunft im Untersuchungsgebiet möglicherweise die Zuckerrübenpflanzen in früheren Wachstumsstadien von CLS befallen werden (Abb. 13). Dieser Sachverhalt ist darauf zurückzuführen, dass die Pilzentwicklung bereits von günstigen Bedingungen deutlich vor der Aussaat profitiert. Die Pflanzenentwicklung beginnt mit der Aussaat, so dass der Zeitraum, in dem sich die projizierten klimatischen Veränderungen auswirken, für den Pilz deutlich länger ist. Diese Faktoren werden in den Modellen berücksichtigt, wodurch der beschriebene Sachverhalt der asynchronen Verschiebung zwischen CLS-Auftreten und Blattwachstum projiziert wird. Sich verändernde Anbaubedingungen haben auch Auswirkungen auf die Pflanze und ihre Antagonisten. Im Rahmen regionaler Untersuchungen konnte die Tendenz hin zu früheren Aussaatterminen und damit einer verlängerten Vegetationsperiode mit positiven Auswirkungen auf die Ertragsleistung festgestellt werden. Die frühere Aussaat ist wegen des tendenziell früheren Erreichens der Keimtemperatur von 8 °C in 2-5 cm Bodentiefe aufgrund klimatischer Veränderungen möglich, wodurch partiell der Verschiebung von Blattkrankheit und Blattwachstum entgegengewirkt werden kann. Welche Auswirkungen diese Verschiebung auf die Bestandsent-

wicklung der Zuckerrübe hat, muss weiter untersucht werden. Durch die Simulation des Blattwachstums bei Aussaat am 15. März und am 1. März konnte gezeigt werden, dass die Zuckerrübe durch die frühere Aussaat einen Entwicklungsvorsprung von ca. 4-5 Tagen hat. Der Blattapparat ist bei Ausnutzung des frühestmöglichen Saattermins schneller voll entwickelt, wovon die Pflanzen in der ertragsrelevanten Hauptwachstumsphase in der Zuckersynthese profitieren.

Auch für die regional zweitbedeutendste Zuckerrübenblattkrankheit, den Echten Mehltau, wird ein Trend hin zu früherem Auftreten und Ausbreiten im Bestand projiziert. Die EM-Stadien werden sich laut den Projektionen tendenziell stärker vorverlagern als die CLS-Stadien. Dies hängt mit den geringeren Temperaturansprüchen von EM zusammen. Dennoch wird CLS im Untersuchungsgebiet die dominierende Zuckerrübenblattkrankheit bleiben, da die projizierten, tendenziell höheren Temperaturen während der Infektions- und Ausbreitungsphase eher dem Optimumbereich von CLS im Vergleich zu EM entsprechen. Untersuchungen von Richerzhagen (2013) ergaben zudem, dass *Cercospora* bei Mischinfektionen die dominierende Blattkrankheit ist.

Das auf dem Acker verbleibende Inokulumpotential hängt maßgeblich von der Ausprägung des Winters ab. Dieses bestimmt den Erstbefallszeitpunkt sowie die Geschwindigkeit der Befallsausbreitung. In strengen Wintern erfrieren nahezu alle Mehltausporen und die Krankheit wandert durch Windverfrachtung (Anemochorie) aus südlichen Anbauregionen mit weniger strengen Wintern neu ein. In milden Wintern könnte das Inokulum regional überdauern, was einen früheren und stärker ausgeprägten Erstbefall zur Folge hätte. Dies muss weiter untersucht werden.

Eine Konsequenz des früheren Erreichens der Blattkrankheitsschwellenwerte (bestimmt durch die 100-Blattrupf-Methode) könnte eine Erhöhung der Anzahl der nötigen Fungizid-Anwendungen sein, da sich die Zeit, in der die Zuckerrübe befallen ist, tendenziell verlängern könnte. In den letzten 15 Jahren ist der Anteil der Felder mit einer Fungizidanwendung pro Jahr bezogen auf die Bundesrepublik von 20 % auf 75 % angestiegen (Rossberg et al. 2010). Je nach Bedarf variiert die Anzahl der Fungizidanwendungen zwischen null und drei, wobei die höchsten Werte in den Hauptanbaugebieten im Süden und Südwesten Deutschlands, sprich auch im Untersuchungsgebiet der Studie zu verzeichnen sind. Vor dem Hintergrund, dass sich das Blattkrankheits-Auftreten tendenziell verfrühen könnte und der Anforderung an die moderne Landwirtschaft den Pflanzenschutzmitteleinsatz zu minimieren, muss versucht werden, die Spritztermine optimal zu wählen, um eine maximale Fungizidwirkungsdauer zu erzielen. Um dies zu gewährleisten, ist weitere intensive Forschung an den Prognosemodellen und die Schaffung der nötigen Akzeptanz bei den Landwirten nötig.

Im Rahmen dieser Studie wurde der Faktor Züchtungsfortschritt, durch den möglicherweise eine erhöhte Krankheitsresistenz erzielt wird, nicht berücksichtigt. Diesbezügliche Abschätzungen sind allerdings aufgrund der lange andauernden Züchtungsprozesse und den komplexen Interaktionen zwischen Pflanzengenetik und Umwelt, wenn überhaupt, nur sehr schwer für die nahe und insbesondere ferne Zukunft möglich (Juroszek & von Tiedemann 2011).

Vertieft werden können die Ergebnisse der Studie von Seiten der Blattkrankheitsmodellierung durch die Veränderung der zugrunde gelegten Regionalfaktoren Anbaudichte, Anbauhäufigkeit und Vorjahresbefall. Im Rahmen dieser Studie wurde ein mittleres Szenario gewählt. Die möglichen Auswirkungen einer Intensivierung des Anbaus könnten über eine entsprechende Anpassung der Regionalfaktoren untersucht werden. Des Weiteren sollten mit den neuen regionalen Klimamodellen unter Annahme der RCP-Szenarien (Representative Concentration Pathways) die Ergebnisse überprüft werden, sobald diese zur Verfügung stehen, um den breiten Möglichkeitsfächer zukünftiger Entwicklungspfade abzudecken. Unterschiede sind bei einer solchen Vorgehensweise speziell für die projizierten Termine in der fernen Zukunft zu erwarten.

Ein zentrales Problem der Krankheitsmodellierung und -projektion ist die Güte sowie raumzeitliche Auflösung der regionalen Klimamodelle. Diese sind immer nur dann zukunftstauglich, wenn sie die zukünftig entscheidenden Prozesse abbilden können. Im Fall der vorliegenden Studie ist die Tagesmitteltemperatur das entscheidende Klimaelement, von welchem die Modellergebnisse maßgeblich abhängen. Die Flächenmuster der Temperatur werden für den Referenzzeitraum durch REMO gut abgebildet (Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg 2013). Es zeigte sich jedoch in vergleichbaren Untersuchungen, dass über die REMO-Daten ein etwas verspätetes CLS-Auftreten simuliert wird. Aufgrund der Komplexität der klimatischen Zusammenhänge und den Vereinfachungen im regionalen Klimamodell ist es nicht möglich, die realen Entwicklungen und die Projektion exakt in Einklang zu bringen. Um die Effekte dieser systematischen Abweichungen zu minimieren, wurden im Rahmen der Studie lediglich die Mittelwerte der drei jeweils 30-jährigen Zeitfenster und keine Jahreswerte analysiert.

Im Rahmen der Studie konnten mit Hilfe von CERCBET1 und ERYBET1 die möglichen zukünftigen regionalen Auswirkungen des Klimawandels auf das CLS- und EM-Auftreten unter Verknüpfung mit dem Blattwachstum untersucht werden. Eine zu dieser Untersuchung analoge Auswertung für die Zuckerrübenkrankheiten Rübenrost (*Uromyces betae*) und Ramularia (*Ramularia beticola*) wird aktuell durchgeführt.

Für die potentielle Anzahl Rübenzystennematoden wird aufgrund der projizierten Temperaturerhöhung eine Zunahme projiziert. Entscheidend ist diesbezüglich, wie viele Generationen pro Vegetationsperiode lebensfähig abgeschlossen werden können. In der B Periode werden im Mittel potentiell 3 Entwicklungszyklen abgeschlossen. Für die K Periode wird zwar eine Zunahme um 0,4 in den Beckenlagen und um 0,3 Entwicklungszyklen in den Mittelgebirgslagen projiziert. Dies hat jedoch lediglich in Jahren, in denen ausreichend gute Bedingungen vorherrschen, um die 4. Generation abzuschließen einen steigernden Einfluss auf die Population der Rübenzystennematoden. Für die B Periode wurde das potentielle Abschließen der 4. Generation einmal, für die K Periode 7-mal und für die L Periode 29-mal projiziert. Dies entspricht einer enormen Steigerung, zumal exponentielle Zuwachsraten der absoluten Individuenzahl der Populationen die Folge wären. Im Rahmen der Untersuchung wurde der 1. März bis 31. Oktober als Vegetationszeitraum angenommen. Im Zuge des projizierten Klimawandels könnte sich die Vegetationsperiode jedoch deutlich verlängern: agronomisch durch eine frühere Aussaat und spätere Ernte, entwicklungsbiologisch durch eine Verlängerung der Phase, in der die Tagesmitteltemperatur größer 8 °C und somit in einem für die Nematoden stoffwechselaktiven Bereich ist.

Inwiefern eine frühere Aussaat und spätere Ernte auf Basis der vorhandenen Klimaprojektionen möglich werden könnte, wird ebenfalls aktuell untersucht. Bereits ausgewertete rezente Daten seit den 1960er Jahren zeigen jedoch bereits eine tendenzielle Vorverlagerung der Saattermine.

Speziell in den Beckenlagen, in denen der Zuckerrübenanbau konzentriert ist, müssen agronomische Maßnahmen angewendet werden, um die Nematodenpopulationen unter einem ertragsrelevanten Niveau zu halten. Zwar kann den Nematoden mit einer angepassten, möglichst weiten Fruchtfolge der Zuckerrübe und den Anbau von nematodenresistenten Zwischenkulturen entgegengewirkt werden. Leider ist dies in der Praxis nur selten umzusetzen, da die Zwischenfrüchte aufgrund der häufig trockenen Witterung keine guten Wachstumsbedingungen vorfinden. Insbesondere sollten Sorten mit möglichst geringem Vermehrungspotential bei guter Ertragsleistung angebaut werden, welche Nematoden reduzieren können.

Unklar sind allerdings die Populationsentwicklung der Nematoden während der verschiedenen Zuckerrüben-Fruchtfolgen sowie der Einfluss des Klimawandels darauf. In weiterführenden Forschungsarbeiten sollten entsprechende Fragestellungen sowie deren praktische Umsetzbarkeit untersucht werden.

7. Danksagung

Die Autoren bedanken sich bei dem Ministerium für Umwelt, Landwirtschaft, Ernährung, Weinbau und Forsten Rheinland-Pfalz, dem Hessischen Ministerium für Umwelt, Klimaschutz, Landwirtschaft und Verbraucherschutz, dem Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum für Klimawandelfolgen, insbesondere dem Leiter Dr. Ulrich Matthes, der Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz, insbesondere bei Dr. Paolo Racca, den Mitarbeitern des Verbandes der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V., dem Kuratorium für Versuchswesen und Beratung im Zuckerrübenanbau, der ARGE Zuckerrübe Südwest, im Besonderen bei Herrn Harald Bauer und Herrn Axel Siekmann, den Universitäten Mainz und Bonn sowie der Firma Strube GmbH & Co. KG für die technische und finanzielle Unterstützung.

8. Literatur

Beratung und Information für den süddeutschen Zuckerrübenanbau (BISZ) (Hrsg.) (2015): Pflanzenschutz. Internet: http://bisz.suedzucker.de/Pflanzenschutz/ (24.04.2015).

Bleiholder, H. & Weltzien, H. C. (1972): Beiträge zur Epidemiologie von *Cercospora beticola* Sacc. & Zukkerrübe. II: Die Konidienbildung in Abhängigkeit von den Umweltbedingungen Temperatur, relative Luftfeuchtigkeit und Licht. – Phytopathologische Zeitschrift **73**: 46-68. Berlin.

Börner, H. (2009): Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz. 662 pp., Springer-Verlag. Berlin-Heidelberg.

Brendler, F., Holtschulte, B. & Rieckmann, W. (2008): Zuckerrübe: Krankheiten, Schädlinge, Unkräuter. 272 pp., Agro Concept. Bonn.

Büchse, A. & Röver, A. (1998): Blattbildungsrate und Assimilatverteilung als Kriterien zur Trennung von Entwicklungsabschnitten der Zuckerrübe. – Pflanzenbauwissenschaften **1**: 20-24. Stuttgart.

Chmielewski, F.-M., Müller, A. & Bruns, E. (2004): Climate changes and trends in phenology of fruit trees and field crops in Germany, 1961-2000. – Agricultural and Forest Meteorology **121**: 69-78.

Chmielewski, F.-M. (2007): Folgen des Klimawandels für Land- und Forstwirtschaft. – 75-85. In: Endlicher, W. & Gerstengarbe, F.-W. (Hrsg.): Der Klimawandel – Einblicke, Rückblicke und Ausblicke. 134 S., Potsdam-Institut für Klimaforschung. Potsdam.

Curi, J. & Zmoray, I. (1966): Beziehung klimatischer Faktoren zur Entwicklungsdauer von *Heterodera schachtii* in der Slowakei (CSSR). – Helminthologia **7**: 49-63. Berlin, Heidelberg, New York.

Fuchs, H.-J. (2010): Analyse und Prognose des Klimas in Rheinland-Pfalz. – 19-28. In: Hexemer, H.-P. (Hrsg.): Die Folgen des Klimawandels für Rheinland-Pfalz. – Schriftenreihe des Landtags Rheinland-Pfalz **44**: 96 S., Mainz.

Hallmann, J., Daub, M., Grundler, F. & Westphal, A. (2009): 150 Jahre *Heterodera schachtii*: Ein Überblick der frühen Arbeiten. – Journal für Kulturpflanzen **61**: 429-439. Stuttgart.

Holtschulte, B. (2000): *Cercospora beticola* – worldwide distribution and incidence. – 5-16. In: Asher, M. J. C., Holtschulte, B., Molard, M., Rosso, F., Steinrücken, G. & Beckers, R. (eds): *Cercospora beticola* Sacc. – biology, agronomic influence and control measures in sugar beet. – Advances in Sugar Beet Research **2**: 215 pp., IIRB. Brüssel.

IPCC (2013): Summary for Policymakers. In: Stocker, T. F., Qin, D., Plattner, G.-K., Tignor, M., Allen, S. K., Boschung, J., Nauels, A., Xia, Y., Bex, V. & Midgley, P. M. (eds): Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge (Cambridge University Press). Internet: http://www.climatechange2013.org/images/report/WG1AR5_SPM_FINAL.pdf (19.05.2015).

Juroszek, P. & von Tiedemann, A. (2011): Potential strategies and future requirements for plant disease management under a changing climate. – Plant Pathology **60**: 100-112. New York.

Kämpfe, L. (1952): Rüben- und Kartoffelälchen. 40 S., Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig. Leipzig.

KWS (Hrsg.) (2015): Nematoden: Erkennen – Handeln – Erträge sichern. Internet: https://www.kws.de/global/show_document.asp?id=aaaaaaaaaamlraf&download=1 (24.04.2015).

Ladewig, E., C. Bruns, H. Leipertz, G. Sander & H. Wetzler (2007): Expertenbefragung zum Pflanzenschutz 1994-2005. - In: Zuckerindustrie **132**: 260-265. Berlin.

Lemaire, S., Maupas, F., Cournède, P.-H. & de Reffye, P. (2008): A morphogenetic crop model for sugar-beet (*Beta vulgaris* L.). – International symposium on crop modeling and decision support; ISCMDS 2008 Nanjing. China.

Milford, G. F. J., Pocock, T. O. & Riley, J. (1985a): An analysis of leaf growth in sugar-beet. 1. Leaf appearance and expansion in relation to temperature under controlled conditions. – Annals of Applied Biology **106**: 163-172. New Jersey.

Milford, G. F. J., Pocock, T. O. & Riley, J. (1985b): An analysis of leaf growth in sugar-beet. 2. Leaf appearance in field crops. – Annals of Applied Biology **106**: 173-185. New Jersey.

Ministerium für Umwelt, Forsten und Verbraucherschutz Rheinland-Pfalz (MULEWF) (2007): Klimabericht Rheinland-Pfalz 2007. Internet: http://www.mwkel.rlp.de/File/KlimaberichtRLP2007-pdf/_1/ (13.10.2014).

Mischke, W. (1959): Untersuchungen über den Einfluß des Bestandsklimas auf die Entwicklung der Rüben-Blattfleckenkrankheit *Cercospora beticola* Sacc. im Hinblick auf die Einrichtung eines Warndienstes. – Bayerisches Landwirtschaftliches Jahrbuch **37**: 197-227. Wolnzach.

Müller, J. & Steudel, W. (1981): Der Einfluss der Kulturdauer verschiedener Zwischenfrüchte auf die Abundanzdynamik von *Heterodera schachtii* Schmidt. – Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes **35**: 103-108. Ulm.

Nakicenovic, N. & Swart R. (Hrsg.) (2000): Special Report on Emission Scenarios. 570 pp., Camebridge University Press. Camebridge.

Racca, P. & Jörg, E. (2003): Prognose von *Cercospora beticola* mit den CERCBET-Modellen. – Gesunde Pflanzen **55**: 62-69. Berlin, Heidelberg.

Racca, P., Braun, C. & Kleinhenz, B. (2010): Abschlussbericht – Integrierte Bekämpfung der Zuckerrübenkrankheiten Mehltau, Rost und Ramularia. 62 pp., Bad Kreuznach.

Racca, P. (2013): CERCBET – Prognosemodelle für Zuckerrüben: Validierungsergebnisse ZR Saison 2012 – Südzucker. Fungizidstrategie in Zuckerrüben. – Vortrag in Freising am 06.06.2013.

Racca, P., Kleinhenz, B., Hau, B. & Kuhn, C. (2013): Einfluss des Klimawandels auf das Erstauftreten der Blattkrankheiten Cercospora (*Cercospora beticola*), Mehltau (*Erysiphe betae*), Rost (*Uromyces betae*) und Ramularia (*Ramularia beticola*) in Zuckerrübenanbauregionen in Niedersachsen. Tagungsbeitrag, S. 162: Von globalen Klimawandel zu regionalen Anpassungsstrategie.

Richerzhagen, D., Racca, P., Zeuner, T., Kuhn, C., Falke, K. & Hau, B. (2011): Impact of climate change on the temporal and regional occurrence of Cercospora leaf spot in Lower Saxony. – Journal of Plant Diseases and Protection **118**: 167-177. Stuttgart.

Richerzhagen, D., Racca, P., Kuhn, C., Kleinhenz, B. & Hau, B. (2012): Einfluss des Klimawandels auf die Blattentwicklung und das Erstauftreten von Cercospora-Blattflecken (*Cercospora beticola*) an Zuckerrüben in Niedersachsen (Poster). – 58. Deutsche Pflanzenschutztagung: 436-437. Braunschweig.

Richerzhagen, D. (2013): Untersuchungen zum Auftreten und der Interaktion von Zuckerrüben-Blattkrankheiten am Beispiel von Cercospora-Blattflecken (*Cercospora beticola*), Rübenmehltau (*Erysiphe betae*) und Rübenrost (*Uromyces betae*) unter dem Einfluss des Klimawandels. – Dissertation an der Naturwissenschaftliche Fakultät der Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover: 207 S., Hannover.

Rossberg, D., Vasel, E.-H. & Ladewig, E. (2010): NEPTUN 2009 – Zuckerrübe. – Berichte aus dem Julius-Kühn-Institut **152**: 45. Quedlinburg.

Rossberg, D., Michel, V., Graf, R. & Neukampf, R. (2007): Definition von Boden-Klima-Räumen für die Bundesrepublik Deutschland. – Nachrichtenblatt Deutscher Pflanzenschutzdienst **59**: 155-161. Stuttgart.

Verband der hessisch-pfälzischen Zuckerrübenanbauer e.V. – Bildarchiv.

Wagner, A., Gerlinger, K., Chomoev, E., Höpker, K.-A., Schulz-Engler, D. & Mast, M. (2013): Zukünftige Klimaentwicklung in Baden-Württemberg – Perspektiven aus regionalen Klimamodellen. Langfassung. 164 S., LUBW Landesanstalt für Umwelt, Messungen und Naturschutz Baden-Württemberg. Karlsruhe.

Wolf, P., Weis, F.-J., Verreet, J., Bürcky, K., Maier, J. & Tischner, H. (1998): IPS (Integriertes Pflanzenschutzsystem)-Modell Zuckerrübe – Entwicklungsschritte und Einführung in die Praxis. – Gesunde Pflanzen **50**: 264-272. Berlin, Heidelberg.

Wolf, P. F. J., Heindl, M. & Verreet, J.-A. (2001): Zum Einfluss des Bestandesklimas auf die Prädisposition der Zuckerrübe gegenüber Infektionen von *Cercospora beticola* (Sacc.). – Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz **106**: 578-592. Stuttgart.

Zeuner, T., Kleinhenz, B., Racca, P., Kartschall, T. & Werner, P. (2008): Einfluss des Klimawandels auf das Schaderregererstauftreten am Beispiel von *Cercospora beticola* in Zuckerrüben in den nächsten 50 Jahren. – Tagungsband Julius-Kühn-Institut; 56. Deutsche Pflanzenschutztagung 22.-25. September 2008: 271. Kiel.

Zeuner, T., Kleinhenz, B., Racca, P. & Martin, L. (2010): Auswertungen zum räumlichen und zeitlichen Schaderregerauftreten in Ackerbaukulturen in Deutschland. – 57. Deutsche Pflanzenschutztagung 6.-9.September 2010 Berlin; Gesunde Pflanze, gesunder Mensch: 134-135. Berlin.

Anschriften der Verfasser:

Pascal Kremer, M.A.
Geographisches Institut
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
D-55099 Mainz
E-Mail: pkremer@students.uni-mainz.de

M. Ed. Jan Schlüter
Saarstraße 20
D-55122 Mainz
E-Mail: jschluet@students.uni-mainz.de

B. Sc. Jonas Fischer
Geographisches Institut
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
D-55099 Mainz
E-Mail: jfisc01@students.uni-mainz.de

Prof. Dr. Hans-Joachim Fuchs
Geographisches Institut
Johannes Gutenberg-Universität Mainz
D-55099 Mainz
E-Mail: hans.fuchs@uni-mainz.de
Homepage: www.geo.uni-mainz.de/fuchs

Dr. Christian Lang
Verband der Hessisch-Pfälzischen
Zuckerrübenanbauer e.V.
Rathenaustr. 10
D-67547 Worms
E-Mail: verband@ruebe.info

Dr. Tilmann Sauer
Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum
für Klimawandelfolgen
Hauptstraße 16
D-67705 Trippstadt
E-Mail: tilmann.sauer@klimawandel-rlp.de

Dipl.-Geogr. Philipp Reiter
Rheinland-Pfalz Kompetenzzentrum
für Klimawandelfolgen
Hauptstraße 16
D-67705 Trippstadt
E-Mail: philipp.reiter@wald-rlp.de

Manuskript eingegangen: 27.05.2015