

Marco Herrmann<sup>1</sup>, Christoph Federle<sup>2</sup>, Manfred Röhrig<sup>2</sup>, Benno Kleinhenz<sup>1</sup>

## Teilflächenspezifisches Prognosemodell zur räumlichen Verteilung von Fusarium-Halmbasisverbräunung

Site-specific prognosis model for the spatial distribution of Fusarium crown rot

131

### Zusammenfassung

Die teilflächenspezifische Applikation von Pflanzenschutzmitteln ermöglicht die variable Anpassung der Fungizidmenge an das räumliche Auftreten von Pflanzenkrankheiten im Schlag. Hierfür müssen jedoch geeignete Methoden zur Krankheitserkennung oder -prognose vorhanden sein. Deshalb wurde im Rahmen des Forschungsprojektes „AssSys“ (ANONYM, 2021) ein teilflächenspezifisches Prognosemodell entwickelt, welches die relative räumliche Verteilung von Fusarium-Halmbasisverbräunung in Winterweizen prognostiziert. Hierbei werden anhand von topographischen Daten (Höhendaten, SAGA Wetness Index) drei Zonen unterschiedlicher Befallsgefährdung ausgewiesen. Zur Entwicklung und Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells wurde in den Jahren 2011–2012 sowie 2018–2020 das räumliche Auftreten von Fusarium-Halmbasisverbräunung auf mehreren Untersuchungsflächen je Jahr bonitiert. Die Modellgüte wurde anhand der Koinzidenz zwischen bonitiertem und prognostiziertem Befallsniveau über die Untersuchungsflächen bestimmt. Diese variiert abhängig von der Datenquelle und der ausgewiesenen Zone zwischen 57 % und 80 %. Das teilflächenspezifische Prognosemodell ermöglicht somit die Identifizierung besonders sowie wenig vulnerabler Bereiche in Schlägen und wird prototypisch als Webservice via [www.isip.de](http://www.isip.de) realisiert.

**Stichwörter:** Assistenzsystem, teilflächenspezifisches Prognosemodell, räumliche Befallsverteilung, Fusarium-Halmbasisverbräunung, Gefährdungszone

### Abstract

Site-specific application of pesticides allows to adapt the application rate to the spatial distribution of plant disease(s) in fields. For this purpose, suitable procedures for disease detection or prognosis are necessary. Therefore, a site-specific prognosis model was developed in the research project “AssSys” (ANONYM, 2021) to predict the relative spatial distribution of Fusarium crown rot in winter wheat. Based on topographic data (elevation data, SAGA Wetness Index) three zones of disease risk are differentiated. From 2011–2012 and 2018–2020 the spatial distribution of Fusarium crown rot was sampled in several study fields per year for model development and evaluation. Model quality was assessed as the coincidence between sampled and predicted disease level. It ranged from 57 % to 80 % given the data source and disease risk zone. In general, the site-specific prognosis model provides an opportunity to identify zones of high and low vulnerability in agronomic fields.

**Key words:** Assistance system, site-specific prognosis model, spatial disease distribution, Fusarium crown rot, disease risk zone

### Einleitung

Precision Farming bietet die Möglichkeit, den fortlaufend steigenden ökonomischen und ökologischen Anforderungen an die landwirtschaftliche Produktion durch eine gezieltere Steuerung des Ressourceneinsatzes Rechnung

### Affiliationen

<sup>1</sup> Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), Bad Kreuznach

<sup>2</sup> Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion e. V. (ISIP), Bad Kreuznach

### Kontaktanschrift

Marco Herrmann, Zentralstelle der Länder für EDV-gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), Rüdeshheimer Str. 60 – 68, 55545 Bad Kreuznach, E-Mail: [herrmann@zepp.info](mailto:herrmann@zepp.info)

### Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen

15. Februar 2021/16. April 2021

zu tragen. Im Bereich des Pflanzenschutzes lässt sich dies durch die variable räumliche Anpassung der Anwendungsmenge der verwendeten Betriebsmittel realisieren. Diese Anpassung fußt bei der Behandlung von Schaderregern auf zwei wesentlichen Gesichtspunkten: Dem Zustand der Feldfrucht sowie der räumlichen Verteilung des berücksichtigten Schaderregers oder der Krankheit (JAMBHULKAR & MESHARAM, 2013; MAHLEIN et al., 2012). Durch eine variable Anpassung der Fungizidmenge an die Bestandsdichte lassen sich somit in Gersten- und Weizenbeständen etwa 20 % der Aufwandmenge einsparen (DAMMER & EHLERT, 2006; DAMMER et al., 2009).

Die Charakterisierung der räumlichen Verteilung des Schaderregers oder der Krankheit ist aufwendig, manuelle Felderhebungen stellen aufgrund des großen Arbeitsaufwands keine praktikable Lösung dar (DAMMER & EHLERT, 2006). Demgegenüber bieten sensorgestützte Verfahren die Möglichkeit, die Verteilung der jeweiligen Krankheit anhand der Verbreitung zugehöriger Schadsymptome im Schlag abzuleiten (MAHLEIN et al., 2012). Hierbei ist jedoch zu beachten, dass eine verlässliche Detektion der Pflanzenkrankheitssymptome zu einem Zeitpunkt möglich sein muss, der eine effiziente Pflanzenschutzmaßnahme erlaubt (LE COINTE et al., 2016; REYNOLDS et al., 2012). Ist dies nicht der Fall, bieten teilflächenspezifische Prognoseansätze eine weitere Möglichkeit, um das räumliche Auftreten der berücksichtigten Krankheit abzuschätzen. Als Grundlage können Informationen zum Krankheitsauftreten aus vergangenen Jahren oder zu Faktoren, die abhängig von der Krankheit Einfluss auf deren Entwicklung und Verbreitung nehmen können (bspw. Bodenbeschaffenheit, Topographie, Bestandsdichte), dienen (BJERRE et al., 2006). Somit wird die Befallsgefährdung, sprich die Wahrscheinlichkeit für einen Befall der jeweiligen Pflanzenkrankheit in spezifischen Bereichen eines Schlags, modelliert (ORTIZ et al., 2011). Um Aussagen zum tatsächlichen Krankheitsauftreten treffen zu können, sind ergänzende Feldbeobachtungen in den spezifischen Teilbereichen erforderlich (BJERRE et al., 2006). Teilflächenspezifische Pflanzenschutzmittelbehandlungen basierend auf Gefährdungszonen können ökonomische Vorteile bieten, wie ORTIZ et al. (2012) anhand von teilflächenspezifischen Nematizidbehandlungen nachweisen konnten.

Ein Ziel des Forschungsprojekts „AssSys“ bestand in der Entwicklung eines Prognosemodells als Grundlage zur Planung und Durchführung teilflächenspezifischer Pflanzenschutzmittelapplikationen. Exemplarisch wurde dieses Modell zur Prognose des räumlichen Auftretens von Fusarium-Halmbasisverbräunung in Winterweizenschlägen entwickelt. Fusarium-Halmbasisverbräunung stellt eine Nekrose von Halmbasis, Halm und Wurzelgewebe dar, welche durch ein Spektrum unterschiedlicher Erreger der Gattung *Fusarium* sowie *Microdochium nivale* ausgelöst werden kann (BECCARI et al., 2018; CLEMENT & PARRY, 1998; COLBACH et al., 1996; TILLMANN, 2013). Die Ausprägung von Schadsymptomen und die Ertragsminderung durch Fusarium-Halmbasisverbräunung wird

verstärkt, wenn die Wirtspflanze unter Wasserstress leidet (CARIDDI & CATALANO, 1990; COOK & CHRISTEN, 1976; PAPENDICK & COOK, 1974; SMILEY et al., 2005a). Entsprechend kann das Krankheitsauftreten innerhalb von topographisch heterogenen Schlägen stark variieren, wenn aufgrund der Geländedeposition (Hanglage, Lage in Mulde etc.) starke Bodenfeuchteunterschiede auftreten (COOK, 1980).

Basierend auf diesen Erkenntnissen wurde ein Modell entwickelt, das Bereichen geringerer (abgeleiteter) Bodenfeuchte eine höhere Gefährdung für das Auftreten von Fusarium-Halmbasisverbräunung zuweist als Bereichen höherer Bodenfeuchte. Die Bodenfeuchteverteilung wurde im Zuge des Projektes zur Realisierung des Prognoseansatzes nicht durch direkte Messungen in den Untersuchungsflächen bestimmt, sondern abgeleitet.

## Material und Methoden

### **Bonituren zum räumlichen Krankheitsauftreten**

Zur Entwicklung und Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells wurde die räumliche Verteilung von Fusarium-Halmbasisverbräunung auf insgesamt 29 Untersuchungsflächen in Deutschland bonitiert. Hierzu wurden jeweils etwa 150 Boniturrasterpunkte in Form eines regelmäßigen Boniturrasters über die Untersuchungsfläche verteilt (Abb. 1). Die genaue Anzahl der Boniturrasterpunkte, Orientierung des Boniturrasters sowie Boniturrasterweite wurden jeweils anhand der Geometrie der Untersuchungsfläche und Lage der Fahrgassen angepasst, sodass diese Kenngrößen zwischen den einzelnen Untersuchungsflächen variieren.

Die Bonituren wurden in den Jahren 2018–2020 im Forschungsprojekt „AssSys“ ausgeführt, zudem wurden Boniturdaten der Jahre 2011 und 2012 aus dem Forschungsprojekt „Intelligente Wissenstechnologien für das öffentlich-private Wissensmanagement im Agrarbereich“ in die Auswertungen integriert (SCHEIBER et al., 2013). Insgesamt lagen Datensätze für 35 Boniturraster vor, da auf einigen der Untersuchungsflächen mehrere Boniturraster angelegt wurden (Tab. 1).

Bei den Flächen handelte es sich um konventionell bewirtschaftete Schläge, auf denen Winterweizen angebaut wurde. Auf die Sortenwahl wurde kein Einfluss genommen, generell bestehen keine bekannten wirksamen Resistenzen gegenüber Fusarium-Halmbasisverbräunung (LIU & OGBONNAYA, 2015; SMILEY & YAN, 2009; TILLMANN, 2013). Die Bewirtschaftung inklusive der ausgeführten Pflanzenschutzmaßnahmen erfolgte gemäß den jeweiligen örtlichen Vorgaben der zugehörigen Betriebe. Die Auswahl der Flächen erfolgte zum einen aufgrund eines erhöhten Befallsrisikos (enge Fruchtfolgen mit hohem Getreideanteil), zum anderen aufgrund einer möglichst heterogenen Topographie.

Ab Zeitpunkt der Milchreife des Weizens (BBCH 75; MEIER, 2001) wurden je angelegtem Boniturraster 10 Pflanzen, ab 2019 20 Pflanzen entnommen, anschlie-



**Abb. 1.** Boniturdesign. Beispielhafte Darstellung eines Boniturrasters (ESRI, 2021).

ßend die Haupthalme selektiert und bonitiert. Der Befall mit *Fusarium*-Halmbasisverbräunung wurde visuell bestimmt, in Befallsklassen untergliedert und anhand dieser Befallsklassen eine Befallsstärke berechnet. Das Vorgehen basierte auf Vorgaben zur Befallsstärkeermittlung von Halmbruch (ANONYM, 1986).

### Analyse der räumlichen Befallsverteilung

Die bonitierte räumliche Befallsverteilung jedes Boniturrasters wurde analysiert, da das Auftreten von messbaren räumlichen Befallsunterschieden Grundvoraussetzung für eine teilflächenspezifische Krankheitsprognose ist (BJERRE et al., 2006). Hierzu wurde der Moran's I, eine Statistik zur Messung der räumlichen Autokorrelation, berechnet (MORAN, 1950). Der Moran's I schwankt zwischen  $-1$  (negative räumliche Autokorrelation) und  $1$  (positive räumliche Autokorrelation), Werte nahe  $0$  indizieren eine zufällige räumliche Befallsverteilung (FORTIN et al., 2002). Die Befallsdaten wurden box-cox-transformiert, um den Einfluss von Ausreißern auf die Berechnung der Statistik zu minimieren, zudem wurde die räumliche Gewichtungsmatrix inkrementell zur Maximierung des Moran's I-Wertes bestimmt (FU et al., 2014). Die Transformation der Daten wurde mit XLSTAT (Version 2018.1.1) vorgenommen, die Berechnung des Moran's I erfolgte mit der GIS-Software ArcGIS Pro (Version 2.7.0).

Für die Entwicklung des teilflächenspezifischen Prognosemodells wurde vereinfacht angenommen, dass eine anhand des Moran's I bestimmte signifikante positive Autokorrelation der Befallsdaten gleichzeitig das Auftreten ausreichender Befallsunterschiede für eine teilflächenspezifische Krankheitsprognose indiziert. War dies nicht der Fall, wurde das entsprechende Boniturras-

ter nicht für die Erstellung und Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells verwendet.

### Konzeption des teilflächenspezifischen Prognosemodells

Ein Flussdiagramm zum Ablauf des teilflächenspezifischen Prognosemodells ist in Abb. 2 gegeben. Zur teilflächenspezifischen Prognose der relativen räumlichen Verteilung von *Fusarium*-Halmbasisverbräunung wurden topographische Daten verwendet. Diese entstammen einem digitalen Höhenmodell mit einer Auflösung von  $10 \times 10$  m, das vom Bundesamt für Kartographie und Geodäsie deutschlandweit zur Verfügung gestellt wird (ANONYM, 2015). Die gewählte räumliche Auflösung basiert auf allgemeinen Empfehlungen im Bereich des Precision Farming (CÓRDOBA et al., 2016; TAYLOR et al., 2007). Aus dem digitalen Höhenmodell wurde die Geländehöhe für die Untersuchungsfläche abgeleitet, zudem wurde der SAGA Wetness Index (SWI) mit der Software SAGA GIS, Version 6.4.0, für die Untersuchungsflächen berechnet (BÖHNER & SELIGE, 2006; CONRAD et al., 2015). Der SWI dient zur Charakterisierung der Bodenfeuchteverhältnisse eines Gebietes basierend auf dessen Topographie und der modellierten Abflussrichtung des Wassers. Die Wahl dieser Daten ergibt sich aus schlagübergreifenden Auswertungen zum Zusammenhang zwischen diesen und weiteren untersuchten topographischen Attributen (bspw. Hangneigung, Exposition) und dem bonitierten Krankheitsauftreten (Ergebnisse nicht dargestellt). Die gewählten Daten werden aktuell als Alternativen für die teilflächenspezifische Prognose verwendet, obwohl eine gemeinsame Implementierung anhand der gewählten Konzeption des Prognosemodells möglich wäre. Die

**Tab. 1. Übersicht der Untersuchungsflächen und des Boniturdesigns inklusive durchschnittlicher Befallsstärke (*Fusarium-Halmbasisverbräunung*) und p-Wert der Moran's I-Analyse.**

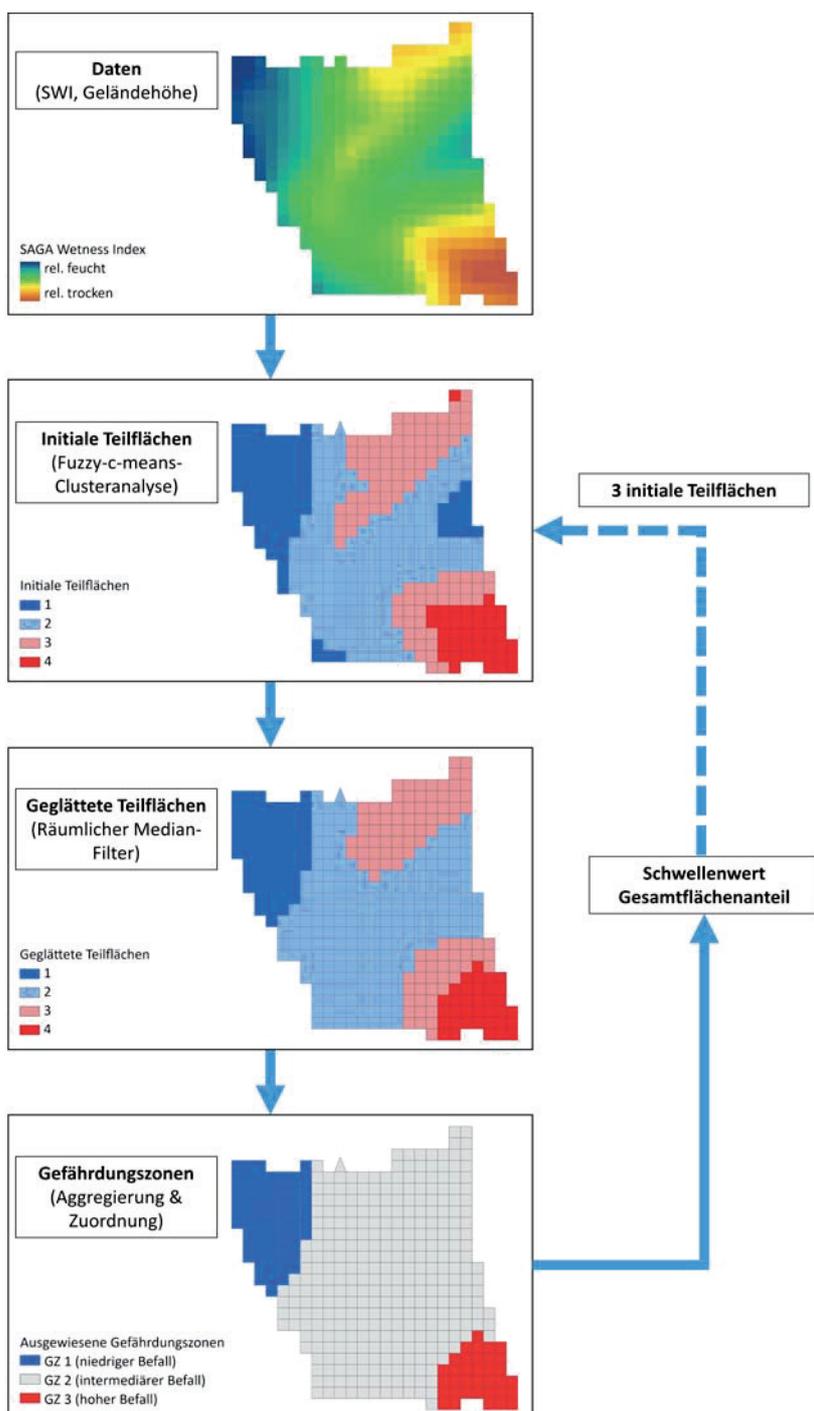
Untersuchungsfläche	Jahr	Anzahl Boniturlpunkte	Bonitierte Halme je Punkt	Durchschnittliche Befallsstärke ( <i>Fusarium-Halmbasisverbräunung</i> )	p-Wert (Moran's I)
Baufeld	2011	192	10	17,4	< 0,001***
Engelwald	2011	164	10	26,8	< 0,001***
Keddert	2011	192	10	30,9	0,727
Rekultivierung	2011	236	10	11,7	< 0,001***
Schiereichen	2011	212	10	21,8	< 0,001***
Schönebusch	2011	223	10	28	< 0,001***
Vorlinge 2	2011	224	10	9	< 0,001***
Woltersdorf	2011	236	10	14,4	< 0,001***
Breitenwiese	2012	157	10	14,3	< 0,001***
Bullengraben	2012	184	10	18,6	< 0,001***
Engelwald	2012	136	10	23,4	< 0,001***
Holstein 1	2012	200	10	35,8	0,014*
Hopsassa	2012	190	10	28,9	< 0,01**
Hurenpfad	2012	78	10	37,2	< 0,01**
Keddert	2012	143	10	17,3	< 0,001***
Ohlenkog	2012	119	10	20,8	< 0,001***
Rekultivierung	2012	225	10	19,1	< 0,001***
Südfeld	2012	174	10	21	< 0,001***
Vorlinge 1	2012	209	10	15,9	0,12
Aue – Teil 1	2018	175	10	28,1	0,141
Aue – Teil 2	2018	155	10	33,5	0,019*
Niederweide	2018	189	10	19,4	< 0,001***
Steinbruchsbreite	2018	164	10	19,3	< 0,001***
Welschbillig	2018	172	10	2,2	0,643
Ammensleben	2019	71	20	17	0,042*
Bebertal	2019	156	20	13,7	< 0,001***
Falkenhagen	2019	153	20	17,9	< 0,001***
Warberg	2019	142	20	20,9	< 0,001***
Welschbillig	2019	140	20	11,9	0,638
Wennerode	2019	139	20	21,2	< 0,01**
Groß Ammensleben	2020	145	20	18,3	< 0,001***
Großer Plan	2020	140	20	15,3	< 0,001***
Klinkow – Teil 1	2020	165	20	24,3	< 0,001***
Klinkow – Teil 2	2020	158	20	31	< 0,001***
Welbsleben	2020	159	20	9,5	< 0,001***

\* p &lt; 0,05, \*\* p &lt; 0,01, \*\*\* p &lt; 0,001

Ergebnisse der Modellevaluierung zeigten jedoch eine geringere Prognosegüte als bei jeweiliger separater Nutzung der beiden gewählten topographischen Attribute (Ergebnisse nicht dargestellt).

Um anhand der gewählten Daten homogene Teilflächen ähnlicher Bodenfeuchteverhältnisse ableiten zu können, verwendet das teilflächenspezifische Prognosemodell einen Fuzzy-c-means-Algorithmus (BEZDEK,

1981). Obwohl im Bereich des Precision Farming kein all-gemeingültiges Verfahren zur Ausweisung von Teilflächen besteht, stellen Clusterungsverfahren, insbesondere der Fuzzy-c-means-Algorithmus, den meistverwendeten Ansatz dar (TAGARAKIS et al., 2011; GUASTAFERRO et al., 2010). Mithilfe des verwendeten Algorithmus wird die berücksichtigte Fläche in vier initiale Teilflächen untergliedert. Tests mit einer größeren Anzahl an Teilflächen zeig-



**Abb. 2.** Flussdiagramm. Schematische Darstellung des teilflächenspezifischen Prognosemodells.

ten Divergenzen in der Untergliederung über verschiedene Wiederholungen. Dies liegt in der der Tatsache begründet, dass der Algorithmus iterativ nach einem Ergebnis zur Unterteilung der Gesamtfläche sucht, weshalb das Ergebnis des Algorithmus nicht zwangsläufig der optimalen Lösung entsprechen muss (PEETERS et al., 2015).

Bei der Ausweisung von Teilflächen können allerdings unabhängig vom verwendeten Algorithmus isolierte Patches auftreten, die die Kontiguität der ausgewiesenen Teilflächen verringern. Eine Glättung der initialen Teilflächen durch räumliche Filter kann deren Kontigui-

tät wesentlich erhöhen (BETZEK et al., 2018). Im teilflächenspezifischen Prognosemodell ist eine Median-Filterfunktion mit einer 3x3-Pixel-Maske implementiert (CÓRDOBA et al., 2016).

Um die relative Gefährdung dieser geglätteten Teilflächen für das Auftreten von *Fusarium*-Halmbasisverbräunung ausweisen zu können, wird die durchschnittliche Attributausprägung (Geländehöhe oder SWI) je Teilfläche berechnet. Aufgrund der Ätiologie der Krankheit wird die Teilfläche mit geringster durchschnittlicher Geländehöhe (höchstem SWI) und damit vermuteter

höchster Bodenfeuchte als Teilfläche niedrigster Befallsgefährdung ausgewiesen, die Teilfläche größter durchschnittlicher Geländehöhe (niedrigstem SWI) als Teilfläche höchster Befallsgefährdung. Die beiden verbleibenden Teilflächen werden zu einer Teilfläche intermediärer Befallsgefährdung zusammengefasst.

Für jede der ausgewiesenen Teilflächen wird der prozentuale Gesamtflächenanteil berechnet, um unplausible Ergebnisse (fehlende Teilflächen, Teilflächen mit einzelnen oder wenigen Pixeln) zu detektieren. Aktuell ist im teilflächenspezifischen Prognosemodell ein heuristischer Schwellenwert von 7,5 % Gesamtflächenanteil implementiert. Unterschreitet eine der Teilflächen den Schwellenwert, erfolgt eine Neuausweisung von drei initialen Teilflächen anhand des Fuzzy-c-means-Algorithmus. Die restlichen Prozessierungsschritte erfolgen analog.

Die Güte des konzipierten teilflächenspezifischen Prognosemodells wurde anhand der ausgeführten Boniturreaster evaluiert. Für jedes der berücksichtigten Boniturreaster wurden mithilfe des teilflächenspezifischen Prognosemodells und den gewählten Daten wie beschrieben drei Gefährdungszonen für das Auftreten von Fusarium-Halmbasisverbräunung ausgewiesen. In jeder der Gefährdungszonen wurde der Mittelwert der Befallsstärke anhand der Boniturergebnisse berechnet und eine Rangfolge erstellt (niedrigstes, intermediäres, höchstes Befallsniveau). Die Prognosegüte des teilflächenspezifischen Modells wurde definiert als die Anzahl der Übereinstimmungen zwischen prognostizierter Befallsgefähr-

dung und bonitiertem Befallsniveau, angegeben für jede der drei Gefährdungszonen.

## Ergebnisse

Die Ergebnisse zur Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells in Abhängigkeit von den gewählten Daten sind in Tab. 2 und Tab. 3 gegeben. Insgesamt wurden 30 Boniturreaster in die Evaluierung einbezogen, die eine signifikante positive räumliche Autokorrelation der Befallsdaten aufwiesen.

Wird die Befallsgefährdung für Fusarium-Halmbasisverbräunung anhand der Geländehöhe teilflächenspezifisch prognostiziert, so liegt die Genauigkeit dieser Prognosen, erfasst als Koinzidenz zwischen prognostizierter Befallsgefährdung und bonitiertem Befallsniveau, zwischen 60 und 80 % in Abhängigkeit von der betrachteten Gefährdungszone. Die höchste Genauigkeit ergibt sich für die intermediäre Zone, mit 67 respektive 60 % liegt sie für die beiden verbleibenden Zonen wesentlich geringer. Zudem ist zu beachten, dass die Zonen prognostiziert hoher respektive niedriger Befallsgefährdung einen beträchtlichen Anteil gegenteiliger Boniturergebnisse aufweisen (23 % der untersuchten Boniturreaster mit niedrigem Befallsniveau, 30 % der untersuchten Boniturreaster mit hohem Befallsniveau). Für insgesamt 17 Boniturreaster entsprach das bonitierte Befallsniveau aller drei Gefährdungszonen der prognostizierten Befallsgefährdung (57 %).

**Tab. 2. Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells (Geländehöhe).** Dargestellt ist die Koinzidenz zwischen prognostizierter Befallsgefährdung und bonitiertem Befallsniveau für  $n = 30$  Boniturreaster anhand des teilflächenspezifischen Prognosemodells mit der Geländehöhe als Datenquelle.

Befallsniveau/Befallsgefährdung		bonitiert		
		niedrig	intermediär	hoch
prognostiziert	niedrig	67 %	3 %	30 %
	intermediär	10 %	80 %	10 %
	hoch	23 %	17 %	60 %

**Tab. 3. Evaluierung des teilflächenspezifischen Prognosemodells (SWI).** Dargestellt ist die Koinzidenz zwischen prognostizierter Befallsgefährdung und bonitiertem Befallsniveau für  $n = 30$  Boniturreaster anhand des teilflächenspezifischen Prognosemodells mit dem SAGA Wetness Index (SWI) als Datenquelle.

Befallsniveau/Befallsgefährdung		bonitiert		
		niedrig	intermediär	hoch
prognostiziert	niedrig	57 %	27 %	26 %
	intermediär	27 %	60 %	13 %
	hoch	17 %	13 %	70 %

Bei Verwendung des SWI als Datenquelle für das teilflächenspezifische Prognosemodell liegt die Genauigkeit der Prognoseergebnisse insgesamt geringer als bei Verwendung der Geländehöhe (zwischen 57 und 70 %). Auch entsprach hier nur für 15 Boniturraster das bonitierte Befallsniveau aller drei Gefährdungszonen der prognostizierten Befallsgefährdung (50 % der Fälle). Demgegenüber ist die Prognosegenauigkeit für die Zone hoher Befallsgefährdung mit 70 % höher als bei entsprechender Nutzung der Geländehöhe als Datenquelle (60 %).

## Diskussion

Das hier vorgestellte teilflächenspezifische Prognosemodell inklusive der zugehörigen Evaluierung zeigt, dass Teilflächen unterschiedlicher Befallsgefährdung für das Auftreten von *Fusarium-Halmbasisverbräunung* anhand topographischer Daten abgeleitet werden können. Die Identifikation räumlich aggregierter Befallsmuster für 30 der 35 angelegten Boniturraster anhand des Moran's I deutet darauf hin, dass das Krankheitsauftreten von *Fusarium-Halmbasisverbräunung* auf topographisch heterogenen Schlägen generell als nicht-zufällig angesehen werden kann, was eine wesentliche Grundvoraussetzung für ein teilflächenspezifisches Krankheitsmanagement ist (BJERRE et al., 2006). Dies wird verstärkt durch die Tatsache, dass zwei der Boniturraster mit zufälliger Befallsverteilung eine wenig heterogene Topographie (weniger als drei Meter maximale Höhendifferenz) bzw. eine äußerst geringe durchschnittliche Befallsstärke (2,2) aufwiesen. Die Ergebnisse unterstützen allgemeine Beobachtungen von COOK (1980) zum räumlichen Auftreten von *Fusarium-Halmbasisverbräunung*.

Zur Erstellung des Prognosemodells wurden topographische Daten verwendet, um Boniturdaten aus einem vorangegangenen Forschungsprojekt in den Entwicklungsprozess zu integrieren (SCHEIBER et al., 2013). Aufgrund der zeitlichen Beständigkeit topographischer Attribute war es somit möglich, diese retrospektiv abzuleiten und die korrespondierenden Boniturdaten für die Modellerstellung und -evaluierung nutzbar zu machen. Gleichzeitig lag hierin die Auswahl der Krankheit, *Fusarium-Halmbasisverbräunung*, für die Erstellung des teilflächenspezifischen Prognosemodells begründet.

Zwar besitzt diese Pflanzenkrankheit in (semi-)ariden Gebieten hohe Bedeutung und verursacht bedeutende Ernteverluste (CHEKALI et al., 2013; HOLLOWAY et al., 2013; SMILEY et al., 2005b), in Mitteleuropa wird die Ertragsrelevanz dieser Krankheit jedoch als eher gering eingeschätzt (COLBACH et al., 1996). Demgegenüber ist der Einfluss von Wasserstress auf das Krankheitsauftreten ausführlich dokumentiert, woraus sich ein indirekter Einfluss der Topographie über die Bodenfeuchte auf das Krankheitsauftreten ableitet (COOK, 1980; PAPENDICK & COOK, 1974; SMILEY et al., 2005a; SMILEY, 2009). Somit bestand eine fundierte Grundlage, aufgrund derer das teilflächenspezifische Prognosemodell entwickelt werden konnte.

Die Ergebnisse der Modellevaluierung mit Genauigkeiten zwischen 57 und 80 % bestätigen einen allgemeinen Zusammenhang zwischen Topographie und Krankheitsausprägung. Generell weist die Geländehöhe als Datenquelle eine höhere Genauigkeit im Vergleich mit dem SWI auf. Eine abschließende Beurteilung ist anhand von 30 evaluierten Boniturrastern und der Abhängigkeit der Genauigkeit von der betrachteten Gefährdungszone nicht möglich. Aus den Ergebnissen wird auch ersichtlich, dass eine teilflächenspezifische Krankheitsprognose alleinig basierend auf topographischen Daten mit großen Unsicherheiten verbunden ist. Dies zeigt sich insbesondere bei Betrachtung der Fälle, in denen das bonitierte Befallsniveau aller drei Gefährdungszonen der prognostizierten Befallsgefährdung entsprach (57 % der Fälle für die Geländehöhe als Datenquelle, 50 % der Fälle für den SWI als Datenquelle). Offensichtlich bieten topographische Daten den Vorteil, zeitlich nur wenig variabel zu sein, allerdings liefern diese verständlicherweise keine Informationen zu aktuellen Umweltbedingungen im relevanten Prognosezeitraum. Generell vermuten BJERRE et al. (2006), dass die Verwendung von aktuellen Informationen zur Bestandsdichte gegenüber topographischen Daten bei einer teilflächenspezifischen Krankheitsprognose zu bevorzugen sind. Somit könnte die Prognosegüte des bestehenden Modells verbessert werden, indem aktuellere Datenquellen wie beispielsweise Bestandsdichteinformationen integriert werden.

Eine weitere Entwicklungsmöglichkeit besteht in der Anpassung des teilflächenspezifischen Prognosemodells an weitere Krankheiten. Da das Prognosemodell die Befallsgefährdung für *Fusarium-Halmbasisverbräunung* konzeptuell aus der räumlichen Verteilung von Umweltfaktoren, die förderlich bzw. hinderlich für das Krankheitsauftreten sind, ableitet (ORTIZ et al., 2011), ist bei entsprechender Kenntnis über die Ätiologie weiterer Krankheiten eine Adaption des bestehenden Prognosemodells möglich. Allerdings ist dies nur dann sinnvoll, wenn diese Krankheit(en), wie auch *Fusarium-Halmbasisverbräunung*, im Allgemeinen messbare räumliche Befallsunterschiede aufweist bzw. aufweisen.

## Ausblick

Das bestehende und hier vorgestellte teilflächenspezifische Prognosemodell wird in das Informationssystem Integrierte Pflanzenproduktion (ISIP) implementiert und als externer Datenservice für das im Forschungsprojekt „AssSys“ entwickelte Assistenzsystem prototypisch zur Verfügung gestellt. Eine allgemeine Bereitstellung des Prognosemodells über ISIP ist nicht beabsichtigt, da konkrete Handlungsanweisungen für den Pflanzenschutz anhand der ausgewiesenen Gefährdungszonen nicht gegeben werden können. Entsprechende Feldversuche zur Ableitung geeigneter Handlungsanweisungen konnten im Zuge des Forschungsprojekts nicht realisiert werden, zudem ist im konkreten Anwendungsfall die verhältnismäßig geringe

Ertragsrelevanz von Fusarium-Halmbasisverbräunung zu berücksichtigen.

## Interessenskonflikte

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

## Literatur

- ANONYM, 1986: 4-5.1.6 Richtlinie für die Prüfung von Fungiziden gegen *Pseudocercospora herpotrichoides* (Fron) Deighton (Halmbuchkrankheit) an Getreide. Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft., 4-5.1.6. Berlin.
- ANONYM, 2015: Digitales Geländemodell Gitterweite 10 m (DGM10). Bundesamt für Kartographie und Geodäsie.
- ANONYM, 2021: Verbundprojekt: Assistenzsystem zur teilflächen-spezifischen Applikation von Pflanzenschutzmitteln (AssSys) – Teilprojekt 4. Zugriff: 1. Februar 2021, URL: [https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail\\_id=396351&site\\_key=141&stichw=assistenz&tKat=6008&lhm=10&lbj=2017&lem=10&lej=2020&zeilenzahl\\_zaehtler=9#newContent](https://service.ble.de/ptdb/index2.php?detail_id=396351&site_key=141&stichw=assistenz&tKat=6008&lhm=10&lbj=2017&lem=10&lej=2020&zeilenzahl_zaehtler=9#newContent).
- BECCARI, G., A. PRODI, A. PISI, P. NIPOTI, A. ONOFRI, P. NICHOLSON, K. PFOHL, P. KARLOVSKY, D.M. GARDINER, L. COVARELLI, 2018: Development of three fusarium crown rot causal agents and systemic translocation of deoxynivalenol following stem base infection of soft wheat. *Plant Pathology* **67** (5), 1055–1065, DOI: 10.1111/ppa.12821.
- BETZEK, N.M., E.G. DE SOUZA, C.L. BAZZI, K. SCHENATTO, A. GAVIOLI, 2018: Rectification methods for optimization of management zones. *Computers and Electronics in Agriculture* **146**, 1–11, DOI: 10.1016/j.compag.2018.01.014.
- BEZDEK, J.C., 1981: *Pattern Recognition with Fuzzy Objective Function Algorithms*. Boston, MA, Springer, DOI: 10.1007/978-1-4757-0450-1.
- BJERRE, K.D., L.N. JØRGENSEN, J.E. OLESEN, 2006: Site-Specific Management of Crop Diseases. In: *Handbook of precision agriculture: Principles and applications*. SRINIVASAN, A. (Hrsg.), New York, Food Products Press, S. 237-282.
- BÖHNER, J., T. SELIGE, 2006: Spatial prediction of soil attributes using terrain analysis and climate regionalisation. BÖHNER, J., K.R. McCLOY, J. STOBL (Eds.): *SAGA-Analyses and Modelling Applications*. –Göttinger Geographische Abhandlungen **115**, 13-28.
- CARIDDI, C., M. CATALANO, 1990: Water stress and Fusarium culmorum infections on Durum Wheat. *Phytopathologia Mediterranea* **29** (1), 51-55.
- CHEKALI, S., S. GARGOURI, S. BERRAIES, M.S. GHARBI, J.N. NICOL, B. NAS-RAOUI, 2013: Impact of Fusarium foot and root rot on yield of cereals in Tunisia. *Tunisian Journal of Plant Protection*. *Tunisian Journal of Plant Protection* **8**, 75-86.
- CLEMENT, J.A., D.W. PARRY, 1998: Stem-base disease and fungal colonisation of winter wheat grown in compost inoculated with *Fusarium culmorum*, *F. graminearum* and *Microdochium nivale*. *European Journal of Plant Pathology* **104** (4), 323-330.
- COLBACH, N., N. MAURIN, P. HUET, 1996: Influence of cropping system on foot rot of winter wheat in France. *Crop Protection* **15** (3), 295–305, DOI: 10.1016/0261-2194(95)00150-6.
- CONRAD, O., B. BECHTEL, M. BOCK, H. DIETRICH, E. FISCHER, L. GERLITZ, J. WEHBERG, V. WICHMANN, J. BÖHNER, 2015: System for Automated Geoscientific Analyses (SAGA) v. 2.1.4. *Geoscientific Model Development* **8** (7), 1991–2007, DOI: 10.5194/gmd-8-1991-2015.
- COOK, R.J., 1980: Fusarium root rot of wheat and its control in the Pacific Northwest. *Plant Disease* **64** (12), 1061-1066.
- COOK, R.J., A.A. CHRISTEN, 1976: Growth of cereal root-rot fungi as affected by temperature-water potential interactions. *Phytopathology* **66** (February), 193-197.
- CÓRDOBA, M.A., C.I. BRUNO, J.L. COSA, N.R. PERALTA, M.G. BALZARINI, 2016: Protocol for multivariate homogeneous zone delineation in precision agriculture. *Biosystems Engineering* **143**, 95–107, DOI: 10.1016/j.biosystemseng.2015.12.008.
- DAMMER, K.H., D. EHLERT, 2006: Variable-rate fungicide spraying in cereals using a plant cover sensor. *Precision Agriculture* **7** (2), 137-148.
- DAMMER, K.H., H. THÖLE, T. VOLK, B. HAU, 2009: Variable-rate fungicide spraying in real time by combining a plant cover sensor and a decision support system. *Precision Agriculture* **10** (5), 431-442.
- ESRI, 2021: "Imagery" [basemap]. Maßstab 1:2078. "World Imagery". 18.04.2019. <http://www.arcgis.com/home/item.html?id=30e5-fe3149c34df1ba922e6f5bbf808f>. (21. Januar 2021).
- FORTIN, M.-J., M.R.T. DALE, J.V. HOEF, A.H. EL-SHAARAWI, W.W. PIEGORSCH, 2002: Spatial analysis in ecology. *Encyclopedia of environmetrics* **4**, 2051-2058.
- FU, W.J., P.K. JIANG, G.M. ZHOU, K.L. ZHAO, 2014: Using Moran's I and GIS to study the spatial pattern of forest litter carbon density in a subtropical region of southeastern China. *Biogeosciences* **11** (8), 2401–2409, DOI: 10.5194/bg-11-2401-2014.
- GUASTAFERRO, F., A. CASTRIGNANO, D. DE BENEDETTO, D. SOLLITTO, A. TROCCHI, B. CAFARELLI, 2010: A comparison of different algorithms for the delineation of management zones. *Precision Agriculture* **11** (6), 600–620, DOI: 10.1007/s11119-010-9183-4.
- HOLLAWAY, G.J., M.L. EVANS, H. WALLWORK, C.B. DYSON, A.C. MCKAY, 2013: Yield Loss in Cereals, Caused by *Fusarium culmorum* and *F. pseudograminearum*, Is Related to Fungal DNA in Soil Prior to Planting, Rainfall, and Cereal Type. *Plant Disease* **97** (7), 977–982, DOI: 10.1094/PDIS-09-12-0867-RE.
- JAMBHULKAR, P.P., N.M. MESHRA, 2013: Site Specific Crop Protection. In: *Current Concepts In Crop Protection*. BANIK, S. (Hrsg.), Lanham, Studium Press, S. 240-280.
- LE COINTE, R., T.E. SIMON, P. DELARUE, M. HERVÉ, M. LECLERC, S. POGGI, 2016: Reducing the Use of Pesticides with Site-Specific Application: The Chemical Control of *Rhizoctonia solani* as a Case of Study for the Management of Soil-Borne Diseases. *PLoS ONE* **11** (9), e0163221, DOI: 10.1371/journal.pone.0163221.
- LIU, C., F.C. OGBONNAYA, 2015: Resistance to Fusarium crown rot in wheat and barley: a review. *Plant Breeding* **134** (4), 365–372, DOI: 10.1111/pbr.12274.
- MAHLEIN, A.-K., E.-C. OERKE, U. STEINER, H.-W. DEHNE, 2012: Recent advances in sensing plant diseases for precision crop protection. *European Journal of Plant Pathology* **133** (1), 197–209, DOI: 10.1007/s10658-011-9878-z.
- MEIER, U., 2001: Entwicklungsstadien mono- und dikotyle Pflanzen, Biologische Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft, Berlin und Braunschweig.
- MORAN, P.A.P., 1950: Notes on Continuous Stochastic Phenomena. *Biometrika* **37** (1/2), 17, DOI: 10.2307/2332142.
- ORTIZ, B.V., C. PERRY, D. SULLIVAN, P. LU, R. KEMERAIT, R.F. DAVIS, A. SMITH, G. VELLIDIS, R. NICHOLS, 2012: Variable rate application of nematocides on cotton fields: a promising site-specific management strategy. *Journal of nematology* **44** (1), 31-39.
- ORTIZ, B.V., D.G. SULLIVAN, C. PERRY, G. VELLIDIS, 2011: Delineation of Management Zones for Southern Root-Knot Nematode using Fuzzy Clustering of Terrain and Edaphic Field Characteristics. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **42** (16), 1972–1994, DOI: 10.1080/00103624.2011.591471.
- PAPENDICK, R.I., R.J. COOK, 1974: Plant Water Stress and Development of Fusarium Foot Rot in Wheat Subjected to Different Cultural Practices. *Phytopathology* **64** (3), 358–363, DOI: 10.1094/Phyto-64-358.
- PEETERS, A., M. ZUDE, J. KÄTHNER, M. ÜNLÜ, R. KANBER, A. HETZRONI, R. GEBBERS, A. BEN-GAL, 2015: Getis-Ord's hot- and cold-spot statistics as a basis for multivariate spatial clustering of orchard tree data. *Computers and Electronics in Agriculture* **111**, 140–150, DOI: 10.1016/j.compag.2014.12.011.
- REYNOLDS, G.J., C.E. WINDELS, I.V. MACRAE, S. LAGUETTE, 2012: Remote Sensing for Assessing *Rhizoctonia* Crown and Root Rot Severity in Sugar Beet. *Plant Disease* **96** (4), 497–505, DOI: 10.1094/PDIS-11-10-0831.
- SCHIEBER, M., G. JOHANN TO BÜREN, C. KUHN, T. ZEUNER, B. KLEINHENZ, 2013: Intelligente Wissenstechnologien für das öffentlich-private Wissensmanagement im Agrarbereich: Abschlussbericht Projekt 01|A08005D. Bad Kreuznach, Zentralstelle der Länder für EDV-Gestützte Entscheidungshilfen und Programme im Pflanzenschutz (ZEPP), 70 S., DOI: 10.2314/GBV:77895224X.
- SMILEY, R.W., 2009: Water and Temperature Parameters Associated with Winter Wheat Diseases Caused by Soilborne Pathogens. *Plant Disease* **93** (1), 73–80, DOI: 10.1094/PDIS-93-1-0073.
- SMILEY, R.W., J.A. GOURLIE, S.A. EASLEY, L.-M. PATTERSON, 2005a: Pathogenicity of Fungi Associated with the Wheat Crown Rot Complex in Oregon and Washington. *Plant Disease* **89** (9), 949–957, DOI: 10.1094/PD-89-0949.
- SMILEY, R.W., J.A. GOURLIE, S.A. EASLEY, L.-M. PATTERSON, R.G. WHITTAKER, 2005b: Crop Damage Estimates for Crown Rot of Wheat and Barley in the Pacific Northwest. *Plant Disease* **89** (6), 595–604, DOI: 10.1094/PD-89-0595.
- SMILEY, R.W., H. YAN, 2009: Variability of Fusarium Crown Rot Tolerances Among Cultivars of Spring and Winter Wheat. *Plant Disease* **93** (9), 954–961, DOI: 10.1094/PDIS-93-9-0954.
- TAGARAKIS, A., V. LIAKOS, S. FOUNTAS, S. KOUNDOURAS, K. AGGELOPOULOU, T. GEMTOS, 2011: Management zones delineation using fuzzy clus-

tering techniques in vines. 8th European Conference on Precision Agriculture (ECPA), Prag, 191-200.

TAYLOR, J.A., A.B. MCBRATNEY, B.M. WHELAN, 2007: Establishing Management Classes for Broadacre Agricultural Production. *Agronomy Journal* **99** (5), 1366, DOI: 10.2134/agronj2007.0070.

TILLMANN, M., 2013: Fusarium-Artenspektren an Halmbasis und Körnern von Weizen in unterschiedlichen Weizenfruchtfolgen. Dissertation, Georg-August Universität Göttingen, 221 S.

© Der Autor/Die Autorin 2021.

 Dies ist ein Open-Access-Artikel, der unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt wird (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

© The Author(s) 2021.

 This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution 4.0 International License (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.en>).