

Prognose künftiger Problemunkräuter im Maisanbau durch Artverbreitungsmodellierung

Predicting weed problems in maize cropping by species distribution modelling

Jana Bürger ^{1*}, Barbara Edler ², Bärbel Gerowitz ¹ und Horst-Henning Steinmann ²

¹ Universität Rostock, Phytomedizin, Satower Straße 48, 18059 Rostock, Deutschland

² Universität Göttingen, Zentrum für Biodiversität und Nachhaltige Landnutzung, Grisebachstraße 6, 37077 Göttingen, Deutschland

*Korrespondierender Autor, jana.buerger@uni-rostock.de



DOI 10.5073/jka.2014.443.048

Zusammenfassung

Die starke Zunahme des Maisanbaus in den letzten Jahren und Veränderungen in der Anbautechnik haben die Selektion typischer Maisunkräuter gefördert, die auch in besonderem Maße von den Folgen des Klimawandels profitieren könnten. Für die Pflanzenproduktion ist es von hohem Interesse, zukünftige Probleme mit Unkräutern abzuschätzen. Im Projekt KLIFFF wurden darum neben experimentellen Arbeiten auch Artverbreitungsmodellierungen für das Gebiet von Niedersachsen durchgeführt. Für die vorliegende Studie wurden für neun Unkrautarten, die in verschiedenen Ländern Europas große Bedeutung im Maisanbau haben und weitverbreitet auftreten, die ökologische Nische und die Schadensnische ermittelt. Die ökologische Nische beschreibt die Umweltbedingungen, die günstig für das dauerhafte Vorkommen einer Art sind, die „Schadensnische“ jene Umweltbedingungen, unter denen eine Art darüber hinaus Schaden in landwirtschaftlichen Kulturen hervorruft. Dazu wurden Vorkommensdaten aus verschiedenen Vegetationsdatenbanken mit hochaufgelösten Klima-, Boden- und Landnutzungsdaten kombiniert. Durch die Projektion der Modelle auf simulierte Klimawerte für die Zeit 2070 - 2100 wurden Effekte des Klimawandels abgeschätzt.

Die Ergebnisse zeigen, dass in Niedersachsen bereits heute fast flächendeckend günstige Bedingungen für typische Maisunkräuter herrschen, aber nur einzelne Arten weitverbreitet hohe Bedeutung im Maisanbau besitzen (*Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium album*, *Polygonum convolvulus*). Die Ergebnisse decken sich sehr gut mit Daten eines früheren Maisunkraut-Monitorings. Die Reaktion auf die veränderten Klimabedingungen zum Ende dieses Jahrhunderts ist artspezifisch sehr unterschiedlich. Einige Arten reagieren im potentiellen Vorkommen neutral (*E. crus-galli*), andere mit großflächigen Zugewinnen (*Polygonum persicaria*) oder Verlusten (*Viola arvensis*) geeigneter Habitate. Alle Arten, die heute bereits hohes Schadpotential aufweisen, behalten dieses; weitere Arten gewinnen regional Schadenspotential (*Calystegia sepium*, *Setaria viridis*).

Stichwörter: Klimawandel, MaxEnt, Niedersachsen, potentielle Verbreitung, ökologische Nische, Schadensnische, *Echinochloa crus-galli*, *Chenopodium album*

Abstract

Increasing maize cultivation and changed cropping practices promote the selection of typical maize weeds that may also profit strongly from climate change. Predicting potential weed problems is of high interest for plant production. Within the project KLIFFF, experiments were combined with species distribution modelling for this task in the region of Lower Saxony, Germany. For our study, we modelled ecological and damage niches of nine weed species that are significant and wide spread in maize cropping in a number of European countries. Species distribution models describe the ecological niche of a species, these are the environmental conditions under which a species can maintain a vital population. It is also possible to estimate a damage niche, i.e. the conditions under which a species causes damage in agricultural crops. For this, we combined occurrence data of European national data bases with high resolution climate, soil and land use data. Models were also projected to simulated climate conditions for the time horizon 2070 - 2100 in order to estimate climate change effects.

Modelling results indicate favourable conditions for typical maize weed occurrence virtually all over the study region, but only a few species are important in maize cropping. This is in good accordance with the findings of an earlier maize weed monitoring. Reaction to changing climate conditions is species-specific, for some species neutral (*E. crus-galli*), other species may gain (*Polygonum persicaria*) or lose (*Viola arvensis*) large areas of suitable habitats. All species with damage potential under present conditions will remain important in maize cropping, some more species will gain regional importance (*Calystegia sepium*, *Setaria viridis*).

Keywords: *Chenopodium album*, climate change, damage niche, *Echinochloa crus-galli*, ecological niche, Lower Saxony, MaxEnt, potential distribution

Einleitung

Durch die Intensivierung der Landwirtschaft mit hohem Einsatz von Dünger und Herbiziden, vereinfachten Fruchtfolgen und reduzierter Bodenbearbeitung sind in den letzten Jahrzehnten sehr starke Veränderungen in der Ackerunkrautflora zu beobachten (BAESSLER und KLOTZ, 2006; FRIED *et al.*, 2012). In jüngerer Zeit hat durch die Förderung von Biogasanlagen zur Energiegewinnung in Deutschland der Maisanbau auch in Regionen stark zugenommen, wo diese Kultur bisher wenig Bedeutung hatte. Da Mais generell eine relativ neue Frucht im Ackerbau in Deutschland ist, ist auch die assoziierte Unkrautflora weniger etabliert als in klassischen Früchten wie den meisten Getreidearten. Durch den Anbau von Mais in engen Fruchtfolgen werden typische Unkrautarten gefördert, die oft Frühjahrskeimer, wärmeliebend, großwüchsig und konkurrenzstark, auch gegenüber dem Mais, sind (MEHRTENS, 2003; FRIED *et al.*, 2008; GUNTON *et al.*, 2011).

Große Veränderungen stehen der Landwirtschaft auch durch den Klimawandel bevor. Für Niedersachsen werden beispielsweise ein Temperaturanstieg von durchschnittlich 2.5 °C sowie eine Abnahme der Sommerniederschläge um 10 Prozent prognostiziert (MOSELEY *et al.*, 2012). Für die Unkrautflora kann das artspezifisch sehr unterschiedliche Folgen haben. Neben einer Veränderung der Artenzusammensetzung durch veränderte Konkurrenzbeziehungen können sich die Vorkommensareale von Arten verschieben, und im extremsten Fall werden Arten aussterben (PATTERSON, 1995). Es wird erwartet, dass die typischen Maisunkräuter auch von den Folgen des Klimawandels besonders profitieren können, (z. B. wärmeliebende Arten aufgrund der Temperaturerhöhungen).

Die Artverbreitungs- oder Nischenmodellierung kann dazu dienen, den Effekt von Klimaveränderungen auf die Verbreitung von Arten zu prognostizieren. Sie verbindet Daten über das aktuelle Vorkommen einer Art in einem Trainingsgebiet mit Daten zu den dort herrschenden Umwelteigenschaften und erfasst die ökologische Nische dieser Art, d.h. die Umweltbedingungen, die günstig für das dauerhafte Vorkommen der Art an einem Standort sind. Überträgt man das Modell wieder in einen geografischen Raum, lässt sich die Eignung dieses Raumes als Habitat für die Art bestimmen. Anhand des Modells und prognostizierter Klimawerte kann abgeschätzt werden, wo eine Art in Zukunft günstige Bedingungen vorfinden wird. Bisherige Untersuchungen dieser Art umfassten z. B. die Effekte des Klimawandels auf die Flora von Deutschland (POMPE *et al.*, 2011) oder auf Ackerunkräuter auf europäischer Ebene (HYVÖNEN *et al.*, 2012).

Für die Pflanzenproduktion ist es von hohem Interesse, zukünftige Probleme mit Unkräutern abzuschätzen, um sich in der Entwicklung von Anpassungsstrategien für den Klimawandel auf solche Arten zu konzentrieren, die besonders stark auftreten, schwer bekämpfbar oder typisch für bestimmte Anbausysteme sind. Hierzu kann die Ermittlung der „Schadensnische“ dienen, die die Umweltbedingungen beschreibt, unter denen eine Art Schaden in landwirtschaftlichen Kulturen hervorruft. Sie wurde zuerst von McDONALD *et al.* (2009) für wichtige Maisunkräuter in den USA ermittelt.

Im Teilprojekt Pflanzenproduktion des Forschungsverbunds KLIFF(www.kliff-niedersachsen.de) wurden neben experimentellen Arbeiten auch Artverbreitungsmodellierungen für das Gebiet von Niedersachsen durchgeführt, um Effekte des Klimawandels auf Ackerunkräuter zu untersuchen. Der Fokus lag dabei auf der regionalen Skala, um notwendige Anpassungsmaßnahmen für die Landwirtschaft zu erarbeiten (BREITSAMETER *et al.*, 2014). Im vorliegenden Beitrag wird die Modellierung von ökologischen Nischen und Schadensnischen von neun typischen Unkrautarten im Maisanbau vorgestellt, die zur Abschätzung der zukünftigen Verbreitung dieser Arten in Niedersachsen diene.

Material und Methoden

Es wurden für neun Unkrautarten (Tab. 1), die nach Einschätzung von Experten (MEISSLE *et al.*, 2010) in verschiedenen Ländern Europas hohe Bedeutung im Maisanbau haben und regelmäßig und weitverbreitet auftreten, je zwei Artverbreitungsmodelle erstellt, ein Modell der ökologischen Nische sowie ein Modell der Schadensnische Daten über das Vorkommen dieser Arten in Europa wurden aus verschiedenen nationalen Vegetationsdatenbanken sowie von der Datenbank des Global Biodiversity Information Facility (gbif) als geografische Koordinaten abgefragt. Zwei Trainingsdatensätze wurden zusammengestellt: (1) zur Modellierung der ökologischen Nische alle europäischen Vorkommensdaten umfassend in den geographischen Grenzen zwischen 11° westlicher bis 41° östlicher Länge sowie zwischen 34° und 70° nördlicher Breite und (2) zur Modellierung der Schadensnische eingeschränkt auf Vorkommensdaten aus den europäischen Regionen, in denen die Art als signifikant für das Unkrautmanagement eingeschätzt wurde.

Tab. 1 Liste der untersuchten Arten.

Tab. 1 List of studied species.

Art (EPPO-Code)	Anzahl der Fundorte, deren Koordinaten für die Modellierung der Ökologischen Nische verwendet wurden	Länder , in denen die Art als „signifikant und weit verbreitet“ eingeschätzt wird. Quelle: (MEISSLE <i>et al.</i> , 2010)*	Anzahl der Fundorte, deren Koordinaten für die Modellierung der Schadensnische verwendet wurden
<i>Calystegia sepium</i> (CAGSE)	37640	F, NL	14064
<i>Chenopodium album</i> (CHEAL)	32078	I, ES, F, NL, DK, D, POL	10328
<i>Echinochloa crus-galli</i> (ECHCG)	12865	HU, I, ES, F, NL, D, POL	2459
<i>Polygonum aviculare</i> (POLAV)	50517	F, DK, D	908
<i>Fallopia convolvulus</i> (POLCO)	22631	F, DK, D	684
<i>Polygonum persicaria</i> (POLPE)	9945	F, DK, D	644
<i>Setaria viridis</i> (SETVI)	6243	HU, ES	108
<i>Solanum nigrum</i> (SOLNI)	16725	F, D	204
<i>Viola arvensis</i> (VIOAR)	22040	DK	86

*) Länder mit Angabe der Regionen : D – Deutschland (Südwesten), DK – Dänemark, ES – Spanien (Ebro-Tal), F – Frankreich (Südwesten, Westen, Normandie), HU – Ungarn (Békés, Tolna), I – Italien (Po-Ebene), NL – Niederlande, POL – Polen (Südwesten).

Zur Beschreibung der Umweltbedingungen im Trainingsgebiet dienten klimatische Variablen, die auf globaler bis regionaler Ebene als die wichtigsten Treiber für die Verbreitung von Arten angesehen werden, sowie Variablen zu Bodeneigenschaften und Landnutzung, die auf kleineren Skalen (regional oder lokal) wirken (PEARSON und DAWSON, 2003; BREITSAMETER *et al.*, 2014 im gleichen Band). Historische Daten zu verschiedenen Aspekten des Klimas (Mittelwerte, Minima, Maxima und Verteilungsmuster über die Jahreszeiten) für Europa im Zeitraum 1950 - 2000 wurden von der worldclim-Datenbank (HUMANS *et al.* 2005) geladen. Simulierte Klimawerte für Niedersachsen in der Zeit zwischen 1970 - 2000 sowie 2070 - 2100 stammen vom regionalen Klimamodell REMO, Lauf UBA, Klimaszenario „weiteres schnelles Wachstum“ A1B (MOSELEY *et al.*, 2012). Aus den biaskorrigierten monatlichen Werten von REMO wurden ebenfalls die 19 klimatischen Variablen aggregiert.

Daten zu Bodentextur, pflanzenverfügbarem Wasser und Gehalt an organischem Kohlenstoff stammen von der Europäischen Bodendatenbank (<http://eu soils.jrc.ec.europa.eu>), Daten zur Landnutzung vom ISCGM (<http://www.iscgm.org>). Sie wurden für die Zukunftsprojektion als

unverändert angenommen. Die verwendete Auflösung der Umweltvariablen betrug 10'. Zur Vermeidung überparametrisierter Modelle wurden in jedem artspezifischen Modell diejenigen Variablen entfernt, die mit einer anderen Variable korreliert waren (Pearsons $r > 0.8$), die über eine höhere Erklärungskraft im Modell verfügte.

Artverbreitungsmodelle wurden mit MaxEnt 3.3.3k erstellt, einer weit verbreiteten Methode für Verbreitungsmodellierung mit (presence-only-)Vorkommensdaten (PHILLIPS *et al.*, 2006). Wir verwendeten die Standardeinstellungen des Programms, abgesehen von den folgenden: maximale Anzahl der Iterationen erhöht auf 2000, als Feature-Klasse wurden bei einigen Arten nur lineare, quadratische und Produkt-features genutzt, wenn die Autofeatures-Option zu Überanpassungen führte. Die maximale Anzahl an Hintergrund-Punkten wurde festgelegt entsprechend der Anzahl der Vorkommensdaten einer Art.

Die Modellierung umfasste 10 Replikationen mit Cross-Validierung. Dafür wurden die Vorkommensdaten jeder Art in 10 Teildatensätze aufgeteilt, ein Modell mit 9 Teildatensätzen trainiert und mit dem zehnten, zurückgehaltenen Datensatz validiert. Zuletzt wurden die Ergebnisse der 10 Replikationen gemittelt. Die Modellgüte wurde mit dem AUC quantifiziert (area under the receiver operator characteristic curve). AUC-Werte über 0.7 gelten als akzeptabel, über 0.9 als exzellent. Der AUC sinkt bei sehr hoher Anzahl der Trainingsdaten und ist nicht zwischen Modellen verschiedener Arten vergleichbar (PETERSON *et al.*, 2011).

Die Ergebnisse der Modellierungen sind Karten der Habitategnung bzw. des Schadpotentials, projiziert für Niedersachsen in den geographischen Grenzen 6 bis 12° östlicher Länge und 51 bis 54° nördlicher Breite, jeweils einmal für heutige und einmal für zukünftige Klimabedingungen. Diese Karten wurde mit Hilfe eines Schwellenwerts in eine binäre Größe übersetzt werden, die geeignete und nicht geeignete Gebiete bzw. Gebiete mit und ohne Schadpotential anweist. Die Größe dieser Areale errechnet sich als Proportion der als geeignet ausgewiesenen Rasterzellen an allen Zellen von Niedersachsen. Das Veränderungssignal für ergibt sich als Differenz zwischen zukünftiger und heutiger Größe geeigneter Areale, basierend auf REMO-Werten für beide Zeitperioden.

Die Datenaufbereitung sowie die Auswertung der Ergebnisse erfolgten mit QGIS 1.0.8 (QGIS Development Team, 2012) und R 2.15.2 (R Core Team, 2012) sowie den Paketen raster 2.0-41 (Hijmans und van Etten, 2012) und rgdal 0.8-4 (Keitt *et al.*, 2013).

Ergebnisse

Für alle Arten wurden Modelle mit akzeptabler bis sehr guter Anpassung erstellt, Tabelle 2 fasst alle wichtigen Ergebnisse zusammen. Für die neun untersuchten Arten herrschen in Niedersachsen weit verbreitet gute Vorkommensbedingungen: die Modelle der ökologischen Nischen weisen hohe Flächenanteile Niedersachsens als geeignete Habitate aus. Zwischen den Regionen Niedersachsens bestehen zum Teil allerdings deutliche Unterschiede, wie Abbildung 1 dies beispielhaft für *E. crus-galli* und *S. viridis* zeigt (s. auch BREITSAMETER *et al.*, 2014). Im Gegensatz dazu weisen die Modelle der Schadensnische Niedersachsens nur für einige wenige Arten, nämlich CHEAL und ECHCG, als Gebiet mit bedeutendem Schadpotential aus. POLCO ist regional im Süden Niedersachsens als bedeutend modelliert worden.

Tab. 2 Flächenanteil geeigneter Habitate für Maisunkräuter in Niedersachsen und Veränderungssignal unter Bedingungen des Klimawandels.

Tab. 2 *Proportional area of suitable habitats for maize weeds in Lower Saxony and change signal under climate change conditions.*

Art	Modell der ökologischen Nische			Modell der Schadensnische		
	AUC	Geeignete Habitate *) 1970-2000	Veränderungssignal bis 2070-2100	AUC	Gebiete mit Schadpotential*) 1970-2000	Veränderungs- signal bis 2070-2100
CAGSE	0.71	0.95	-0.03	0.63	0.02	+0.14
CHEAL	0.69	0.96	+0.13 A)	0.69	0.99	-0.02
ECHCG	0.78	0.85	+0.03	0.79	0.99 B)	-0.03
POLAV	0.68	0.77	-0.23	0.98	0.00	+0.10
POLCO	0.73	0.97	-0.95	0.99	0.10	+0.00
POLPE	0.83	0.51	+0.35	0.99	0.00	+0.02
SETVI	0.76	0.78	+0.04	1.00	0.01	+0.25
SOLNI	0.74	0.90	-0.06	0.98	0.02	-0.02
VIOAR	0.75	0.95	-0.94	1.00	0.00	+0.00

* Anteil am Gebiet Niedersachsens, A) Für CHEAL ist die Summe aus heute geeignetem Gebietsanteil von Niedersachsen und Änderungssignal > 1.0. Dies ist ein Artefakt der Berechnung. Die Berechnung der Habitateignung in der Gegenwart basiert auf den tatsächlich gemessenen Klimawerten. Für die Berechnung des Veränderungssignals wurden für Gegenwart und Zukunft simulierte Klimawerte aus REMO genutzt, um systematische Modellfehler auszugleichen. Das REMO-Modell gibt nicht genau die gemessenen Klimawerte wieder, bildet aber das Veränderungssignal im Klima gut ab. B) Es kann passieren, dass das Modell der Schadensnische größere geeignete Gebiete ausweist als das Modell der ökologischen Nische, da beide Modelle unabhängig voneinander sind und verschiedene Variablen enthalten.

Die Projektion auf die zukünftig erwarteten Klimabedingungen bringt für die neun Arten sehr unterschiedliche Veränderungssignale. Während das Vorkommensareal einiger Arten weitgehend unverändert bleibt, werden für POLAV, POLCO und VIOAR hohe bis sehr hohe Verluste an geeigneten Flächen vorhergesagt. Dafür nimmt das geeignete Areal für POLPE zu. Ähnlich verhält es sich mit dem Veränderungssignal für die Flächen mit potentieller Schadwirkung. Die drei Arten CHEAL, ECHCG und POLCO bleiben unverändert wichtig und für drei weitere Arten nehmen die Gebiete mit Schadpotential zu: CAGSE, POLAV und SETVI.

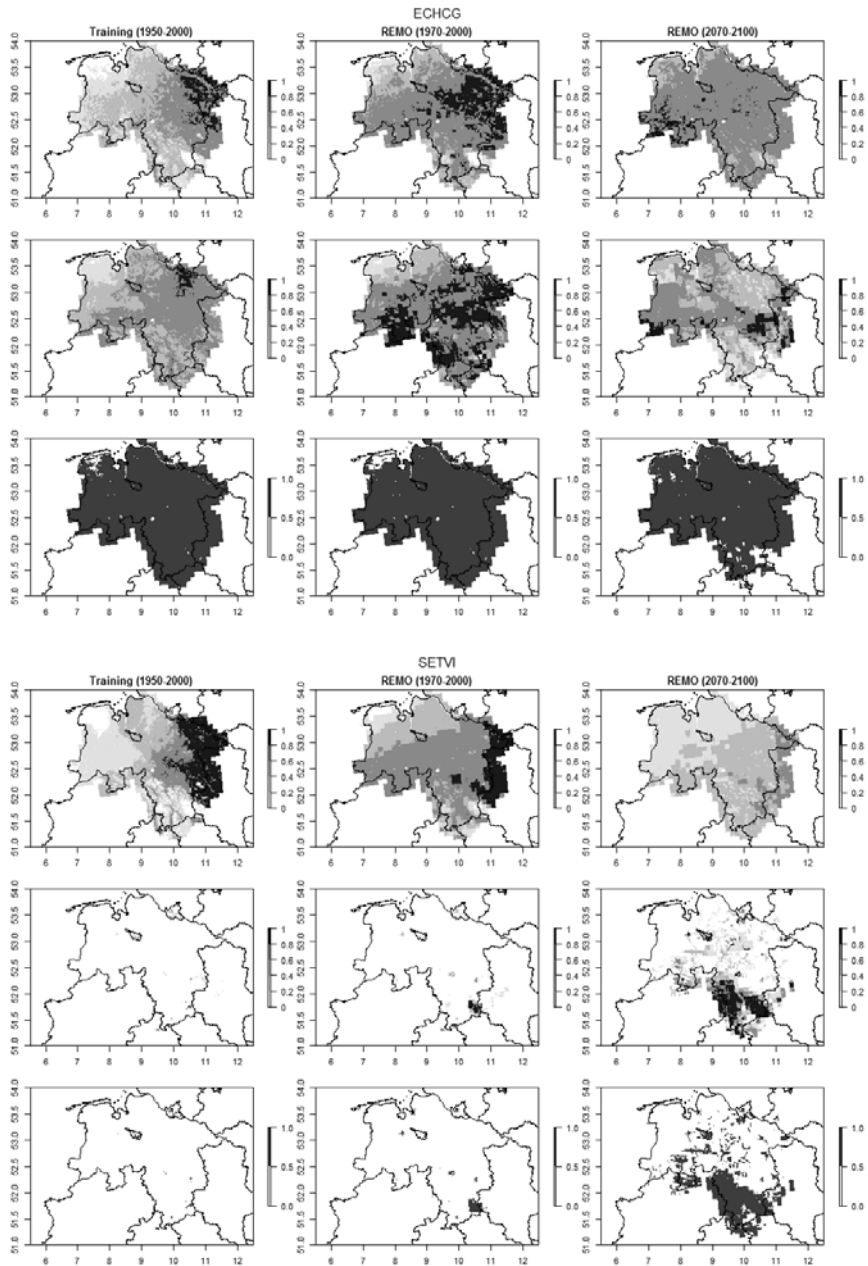


Abb. 1 Ökologische Nische und Schadensnische von *Echinochloa crus-galli* (ECHCG) und *Setaria viridis* (SETVI). Oberste Zeile: Habitataignung entsprechend der ökologischen Nische, mittlere Zeile: Eignung entsprechend der Schadensnische. Dunklere Farben zeigen eine höhere Eignung. Untere Zeile: Gebiete mit Schadpotential (grau markiert).

Fig. 1 Ecological and damage niches of *Echinochloa crus-galli* (ECHCG) and *Setaria viridis* (SETVI). Upper line: habitat suitability according to ecological niche, middle line: Suitability of conditions according to damage niche. Darker colours show a higher suitability. Lower line: Areas with damage potential (coloured grey).

Diskussion

Wir haben für neun Unkrautarten, die in verschiedenen europäischen Maisanbau-Regionen weit verbreitet auftreten und eine hohe Bedeutung haben, die ökologische Nische und die Schadensnische modelliert, um daraus Aussagen über ihr Vorkommen und über ihr Schadpotential unter heutigen und zukünftigen Klimabedingungen in Niedersachsen abzuleiten. Die Ergebnisse zur Habitataignung decken sich gut mit Karten der Niedersächsischen Vegetationskartierung (GARVE, 2007). Darüber hinaus stimmen die Ergebnisse der Schadensnischen-Modellierung mit den Aussagen von MEHRTENS *et al.* (2005) überein, die ein deutschlandweites Monitoring von Unkräutern im Maisanbau auswerteten. Die Autoren nennen CHEAL, ECHCG, POLCO, SOLNI und VIOAR als wichtigste Arten, die mit hoher Stetigkeit und hohen Dichten auftreten. Die beiden letztgenannten Arten wurden aber als weniger bedeutend in Mais eingeschätzt.

Durch die gute Übereinstimmung der Modellierungsergebnisse mit unabhängigen Kartierungsergebnissen zeigt sich der Erfolg des Ansatzes, eine Nischenmodellierung mit Expertenwissen über die Bedeutung verschiedener Unkrautarten zu kombinieren. Die Abschätzungen der Schadensnische sind relevant für die Landwirtschaft, da sie Aussagen über die Bedeutung einzelner Unkrautarten erlauben, die über das potentielle Vorkommen hinausgehen.

Die Projektion der ermittelten Modelle auf zukünftige klimatische Gegebenheiten weist artspezifisch sehr unterschiedliche Veränderungssignale aus. Dabei fällt auf, dass sich für die in der Gegenwart wichtigsten Maisunkräuter in Niedersachsen das Gebiet mit Schadpotential nicht oder nur unwesentlich verkleinern wird, weitere Arten aber an Bedeutung gewinnen werden. Dagegen verkleinert sich das potentielle Vorkommensgebiet für einige der untersuchten Arten erheblich.

Diese artspezifisch sehr unterschiedliche Reaktion auf veränderte Klimabedingungen wurde in ähnlichen Studien für andere geografische Räume beschrieben. McDONALD *et al.* (2009) erwarten für den Maisanbau in den USA zukünftig Verschiebungen der Schadensnischen von Süden nach Norden, beispielweise eine Ausweitung der Schadensnische von *Sorghum halepense* und eine Verkleinerung für *Abutilon theophrasti*. In einer Studie auf europäischer Ebene untersuchten HYVÖNEN *et al.* (2012) 25 Ackerunkrautarten, vornehmlich aus Mittel- und Südeuropa, und modellierten Verbreitungsgewinne für 14 Arten und Verluste für 11 Arten. Die Autoren untersuchten eine andere Artauswahl als die hier vorgestellte, doch wurden Gewinne vor allem von den bisher eher südlicher verbreiteten, also wärme-angepassten Arten erzielt.

In der vorliegenden Studie wurde erstmals die Verbreitung von Ackerunkräutern auf der kleinskaligen regionalen Ebene modelliert. Verbreitungsmodellierungen müssen jenseits des Klimas die auf dieser Ebene wirksamen Faktoren mit einbeziehen: Boden, Management und biotische Interaktionen (STRATONOVITCH *et al.*, 2012; BREITSAMETER *et al.*, 2014 in diesem Band). Daher wurden einerseits hochaufgelöste Boden- und Landnutzungsvariablen in der Modellierung eingesetzt. Andererseits erfolgte die Auswahl der Trainingsdaten für die Schadensnische mit einem Filter, der Informationen zu Management (Mais, intensive europäische Landwirtschaft) und damit auch weiteren ökologischen Komponenten (Zusammensetzung der Flora, Konkurrenz) implizit aggregierte. Hierdurch wurde die hohe Qualität der Modelle und die Deckung zu den Monitoring-Ergebnissen von MEHRTENS *et al.* (2005) erreicht.

Da der Fokus der Studie auf der Projektion von Nischen-Modellen in die Zukunft bestand, und weniger in der Erklärung der heutigen Verbreitung der untersuchten Arten, ist es nicht möglich, aus den Modellen Schlüsse über biologische oder ökologische Wirkmechanismen zu ziehen. Die Untersuchung solcher Zusammenhänge wäre eine andere Fragestellung und bedürfte einer anderen Auswahlmethode für die eingehenden Umweltvariablen. Dass verschiedene Variablen zu Boden und Landnutzung als unverändert in der Zukunft angenommen werden, liegt an der fehlenden Verfügbarkeit entsprechender Szenario-Daten. Allerdings ist es trotzdem sinnvoll, die Variablen einzubeziehen. Sie bestimmen einerseits wesentlich die Modellgüte mit. Andererseits werden die relativen Verhältnisse, z. B. bezüglich des pflanzenverfügbaren Wassers zwischen

verschiedenen Bodentypen, vermutlich auch in Zukunft bestehen bleiben, so dass eine solche klassifizierte Variable als qualitative Größe sinnvoll für die Projektion ist.

Projektionen in die Zukunft sind grundsätzlich mit Unsicherheiten verbunden, deshalb können auch Verbreitungsmodelle nur ein Werkzeug zur Abschätzung von Klimawandeleffekten in der Landwirtschaft sein, sie geben Hinweise auf potentielle Probleme in der Unkrautbekämpfung.

Danksagung

Die vorliegende Studie wurde unterstützt durch das niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur innerhalb des KLIFF Forschungsverbunds (Klimafolgenforschung und Anpassung in Niedersachsen). Wir danken den zahlreichen Betreuern nationaler Vegetationsdatenbanken, die Vorkommensdaten zur Verfügung gestellt haben.

Literatur

- BAESSLER, C. und S. KLOTZ, 2006: Effects of changes in agricultural land use on landscape structure and arable weed vegetation over the last 50 years. *Agricult., Ecosys. and Env.* **115**, 43-50.
- BREITSAMETER, L., J. BÜRGER, B. EDLER, K. PETERS, B. GEROWITT und H.-H. STEINMANN, 2014: Klimafolgenforschung zu Ackerunkräutern - Daten, Methoden und Anwendungen auf verschiedenen Skalen. *Julius-Kühn-Archiv*, **443**.
- FRIED, G., E. KAZAKOU und S. GABA, 2012: Trajectories of weed communities explained by traits associated with species' response to management practices. *Agric. Ecosyst. Env.* **158**, 147 - 155.
- GARVE, E., 2007: Verbreitungsatlas der Farn- und Blütenpflanzen in Niedersachsen und Bremen. *Naturschutz und Landschaftspflege in Niedersachsen*. Niedersächsisches Landesamt für Ökologie, Hannover.
- GUNTON, R., S. PETIT und S. GABA, 2011: Functional traits relating arable weed communities to crop characteristics. *J. Veget. Sci.* **22**, 541-550.
- HUMANS, R. und J. v. ETEN, 2012: Raster: Geographic data analysis and modeling. <http://CRAN.R-project.org/package=raster>.
- HUMANS, R., S. CAMERON, J. PARRA, P. JONES und A. JARVIS, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Internat. J. Climatol.* **25** (15), 1965 - 1978.
- HYVÖNEN, T., M. LUOTO und P. UOTILA, 2012: Assessment of weed establishment risk in a changing European climate. *Agricult. Food Sci.* **21**(4), 348 - 360.
- KEITT, T., R. BIVAND, E. PEBESMA und B. ROWLINGSON, 2013: rgdal: Bindings for the Geospatial Data Abstraction Library. <http://CRAN.R-project.org/package=rgdal>.
- MCDONALD, A., S. RIHA, A. DITOMMASO und A. DE GAETANO, 2009: Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agricult. Ecosyst. Env.* **130**(3), 131 - 141.
- MEHRTENS, J., M. SCHULTE und K. HURLE, 2005: Unkrautflora in Mais: Ergebnisse eines Monitorings in Deutschland. *Gesunde Pflanzen* **57** (8), 206 - 218.
- MEISSE, M., P. MOURON, T. MUSA, F. BIGLER, X. PONS, V. VASILEIADIS, S. OTTO, D. ANTICHI, J. KISS, Z. PLINKS, Z. DORNER, R. VAN DER WEIDE, J. GROTEN, E. CZEMBOR, J. ADAMCZYK, J. THIBORD, B. MELANDER, G. NIELSEN, R. POULSEN, O. ZIMMERMANN, A. VERSCHWELE und E. OLDENBURG, 2010: Pests, pesticide use and alternative options in European maize production: Current status and future prospects. *J. Appl. Entomol.* **134**(5), 357 - 375.
- MOSELEY, C., O. PANFEROV, C. DÖRING, J. DIETRICH, U. HABERLANDT, V. EBERMANN, D. RECHID, F. BEESE und D. JACOB, 2012: Klimaentwicklung und Klimaszenarien. In: REGIERUNGSKOMMISSION KLIMASCHUTZ (Hrsg.): Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels, 18-41.
- PATTERSON, D., 1995: Weeds in a changing climate. *Weed Sci.* **43**(4), 685 - 701.
- PEARSON, R. und T. DAWSON, 2003: Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Glob. Ecol. Biogeogr.* **12** (5), 361-371.
- PETERSON, A., J. SOBERÓN, R. PEARSON, R. ANDERSON, E. MARTÍNEZ-MEYER, M. NAKAMURA und M. ARAÚJO, 2011: Ecological niches and geographic distributions. Princeton University Press, Princeton, NJ, 314 S.
- PHILLIPS, S. J., R. ANDERSON und R. SCHAPIRE, 2006: Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Modell.* **190**(3-4), 231 - 259.
- POMPE, S., S. BERGER, J. BERGMANN, F. BADECK, J. LÜBBERT, S. KLOTZ, A. REHSE, G. SÖHLKE, S. SATTLER, G. WALTHER und I. KÜHN: Modellierung der Auswirkungen des Klimawandels auf die Flora und Vegetation in Deutschland. *BfN-Skripten* **304**, 193 S.
- QGIS DEVELOPMENT TEAM, 2012: QGIS Geographic Information System. Open Source Geospatial Foundation Project. <http://qgis.osgeo.org>.
- R CORE TEAM, 2012: R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- REDWITZ, C. VON, F. DE MOL und B. GEROWITT, 2011: Multivariate analysis of a maize field survey in Germany. *Proceedings 4th Workshop of the EWRS Working Group Weeds and Biodiversity*, 21.
- STRATONOVITCH, P., J. STORKEY und M. SEMENOV, 2012: A process-based approach to modelling impacts of climate change on the damage niche of an agricultural weed. *Glob. Change Biol.* **18** (6), 2071 - 2080.