

Klimafolgenforschung zu Ackerunkräutern – Daten, Methoden und Anwendungen auf verschiedenen Skalen

Climate change impact research on arable weeds – data, methods and applications at various scale levels

Laura Breitsameter^{1*}, Jana Bürger², Barbara Edler¹, Kristian Peters², Bärbel Gerowitt² und Horst-Henning Steinmann¹

¹ Georg-August-Universität Göttingen, Zentrum für Biodiversität und Nachhaltige Landnutzung, Sektion Landwirtschaft und Umwelt, Grisebachstr. 6, 37077 Göttingen, Deutschland

² Universität Rostock, Phytomedizin, Satower Str. 48, 18059 Rostock, Deutschland

*Korrespondierende Autorin, lbreits@agr.uni-goettingen.de



DOI 10.5073/jka.2014.443.014

Zusammenfassung

Eine große Anzahl an Einzeluntersuchungen hat sich in den vergangenen Jahren mit unterschiedlichen Aspekten der Folgen des Klimawandels für Biologie und Schadpotential von Ackerunkräutern befasst. Allerdings finden sich wenige Beispiele, die für einen definierten geographischen Raum und für einzelne Unkrautarten oder Anbausysteme ein umfassendes Bild liefern. Im Rahmen des Projektverbunds zur Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF) wurde ein Forschungsansatz erprobt, der mehrere Skalenebenen übergreift und unterschiedliche Methoden verbindet. Dieser Ansatz sollte eine Möglichkeit liefern, die Folgen veränderter Klimabedingungen für Verbreitung und Leistungsfähigkeit einzelner Unkrautarten umfassend und mit möglichst hoher Vorhersagegenauigkeit abzuschätzen. Die Arten *Abutilon theophrasti*, *Amaranthus retroflexus*, *Echinochloa crus-galli*, *Datura stramonium*, *Iva xanthiifolia* und *Setaria viridis* wurden anhand eines solchen Vorgehens untersucht. Hierzu wurde eine korrelative Artverbreitungsmodellierung (regionale Skalenebene) mit kontrollierten Gefäßversuchen zu vegetativer und generativer Leistungsfähigkeit der Arten unter den für das Ende des Jahrhunderts für Niedersachsen erwarteten Klimabedingungen (lokale Skalenebene) verbunden. Bei der Zusammenführung der Daten zeigte sich, dass die Ergebnisse von der Modellierung und den empirischen Experimenten im Wesentlichen gut übereinstimmen. Für *A. retroflexus*, *D. stramonium*, *E. crus-galli* und *S. viridis* wiesen die Ergebnisse beider Untersuchungsmethoden auf eine neutrale bis positive Wirkung zukünftiger Klimabedingungen hin, für *I. xanthiifolia* hingegen auf eine negative Wirkung. Lediglich für *A. theophrasti* ließen sich die Ergebnisse von der Artverbreitungsmodellierung und den Gefäßversuchen nicht vollständig zur Deckung bringen. Insgesamt lassen unsere Ergebnisse die Einschätzung zu, dass der Ansatz, die Folgen von Klimawandel auf Ackerunkräuter mit einer mehrere Methoden und Skalenebenen verbindenden Herangehensweise zu untersuchen, zahlreiche Stärken aufweist. Diese Vorgehensweise erlaubt es, für eine definierte Untersuchungsregion unterschiedliche Datensätze zu einem detaillierten Gesamtergebnis aneinanderzupassen, und kann aus diesem Grunde, ggf. um weitere Aspekte erweitert, für die Untersuchung regionaler Klimawandelfolgen für Ackerunkräuter empfohlen werden.

Stichwörter: Bioklimatische Nische, Habitateignung, korrelative Artverbreitungsmodellierung, regionales Klimamodell, tatsächliche Verbreitung

Abstract

In the past years, a large number of studies have examined various aspects of possible consequences of climate change for the biology and damage potential of arable weeds. However, there are merely a few examples that have comprehensively investigated individual weed species or arable crop systems within a clearly delimited geographical area. In the frame of the research co-operation KLIFF (Climate change impact and adaptation research for Lower Saxony), we tested an approach that combines a number of methods to span several scale levels and types of environmental factors, which was intended to provide as accurate as possible an estimate of the potential distribution and performance of individual arable weed species under the predicted future climate conditions. This approach was put to practice for the species *Abutilon theophrasti*, *Amaranthus retroflexus*, *Echinochloa crus-galli*, *Datura stramonium*, *Iva xanthiifolia* and *Setaria viridis*. We combined projections of the potential future distribution of the individual weed species based on a correlative distribution modelling approach (regional scale level) with pot experiments (local scale level) on the vegetative and generative performance of these species under climatic conditions predicted for the end of the current century for Lower Saxony. A synopsis revealed that the results obtained from the different approaches

corresponded to a large extent. For *A. retroflexus*, *D. stramonium*, *E. crus-galli*, and *S. viridis*, both approaches indicated a neutral or positive effect of the predicted future climate on their potential distribution and performance, whereas the opposite was found for *I. xanthiifolia*. Merely for *A. theophrasti*, results of the two methods did not fully concur. Altogether, our results highlight that investigating climate change impact on weeds by combining several methods to span several scale levels allows fitting various data sets to a comprehensive picture for a delimited region. It has a number of strengths which may be augmented by the inclusion of further aspects. Therefore, this approach can be recommended for research of the regional impacts of climate change on arable weeds.

Keywords: Bioclimatic niche, correlative distribution modelling, habitat suitability, regional climate model, realized distribution

Einleitung

Zahlreiche Untersuchungen haben sich in den vergangenen Jahren mit den Folgen des Klimawandels für die Biologie und dem Schadpotential von Ackerunkräutern befasst. Das aus Einzelstudien und Übersichtsbeiträgen verfügbare Wissen ist mittlerweile immens.

Dennoch ist die Literaturabdeckung des Themenbereichs sehr heterogen. Eine Ursache dafür ist die Vielzahl von Modellarten, Methoden und Regionen, welche die Grundlage der Studien bilden. Aus den vorhandenen Studien lässt sich schwer ein Gesamtbild entwickeln, denn es finden sich wenige Beispiele, die für einen definierten geographischen Raum für einzelne Unkrautarten oder bestimmte Anbausysteme eine umfassende, auf mehrere Methoden gründende Zusammenstellung geben. Dadurch sind nach wie vor relevante Wissenslücken vorhanden, die es erschweren, plausible Prognosen für bestimmte Regionen, deren Landnutzungsformen und dort vorkommende Unkrautarten zu erstellen.

Im Rahmen des Projektverbunds zur Klimafolgenforschung in Niedersachsen (KLIFF) wurde der Ansatz verfolgt, eine herbologische Forschungsfrage durch eine mehrere Skalenebenen übergreifende und unterschiedliche Methoden verbindende Herangehensweise zu bearbeiten. Die Datengrundlage wurde dabei durch eine Kombination von Literaturstudien, empirischen Experimenten und Modellierung geliefert.

Die geographische Verbreitung und das Vorkommen von Ackerunkräutern wird durch eine Reihe von Faktoren bestimmt, welche auf unterschiedlichen Skalenebenen wirken (Abb. 1). Die weiträumig wirkenden Einflussfaktoren sind dabei das Klima (überregionale Ebene) und die Topographie. Regional und kleinräumig bis zur Ebene des lokalen Standorts wirken schließlich der Umweltfaktor Boden und die Landnutzung auf Pflanzenarten ein. Das Ensemble dieser Faktoren definiert die bioklimatische Nische einer Art. Diese wird weiter durch limitierende biotische Faktoren wie Verbreitungswege, Störung und Konkurrenz eingeschränkt, welche schließlich die tatsächliche Verbreitung der Art bestimmen.

Um die Verbreitung und das Schadpotential von Unkräutern unter zukünftigen klimatischen Bedingungen umfassend und mit möglichst hoher Vorhersagegenauigkeit abschätzen zu können, ist es notwendig, diese auf unterschiedlichen Skalenebenen wirkenden Faktoren zu berücksichtigen. Zu diesem Zweck wurden in dem hier vorgestellten Ansatz eine Artverbreitungsmodellierung und die Gefäßversuche unter kontrollierten Bedingungen miteinander verbunden. Dieser umfangreiche Ansatz sollte genauere Informationen über die Breite der tatsächlichen Nische der untersuchten Unkräuter und über ihre vegetative und generative Leistungsfähigkeit unter den für das Ende des Jahrhunderts für Niedersachsen erwarteten Klimabedingungen liefern.

Hier zeigen wir die Ergebnisse eines derartigen methodischen Vorgehens. Der Fokus lag dabei auf sechs Unkrautarten, die in sommerannuellen Kulturen, insbesondere in Mais, vorkommen und in Europa bereits hohe Relevanz für die Unkrautbekämpfung haben (z. B. MEISSE *et al.*, 2010), beziehungsweise für die eine zunehmende Bedeutung erwartet wird (WEBER und GUT, 2005): *Abutilon theophrasti* Medik., *Amaranthus retroflexus* L., *Datura stramonium* L., *Echinochloa crus-galli* L., *Iva xanthiifolia* Nutt. und *Setaria viridis* L.

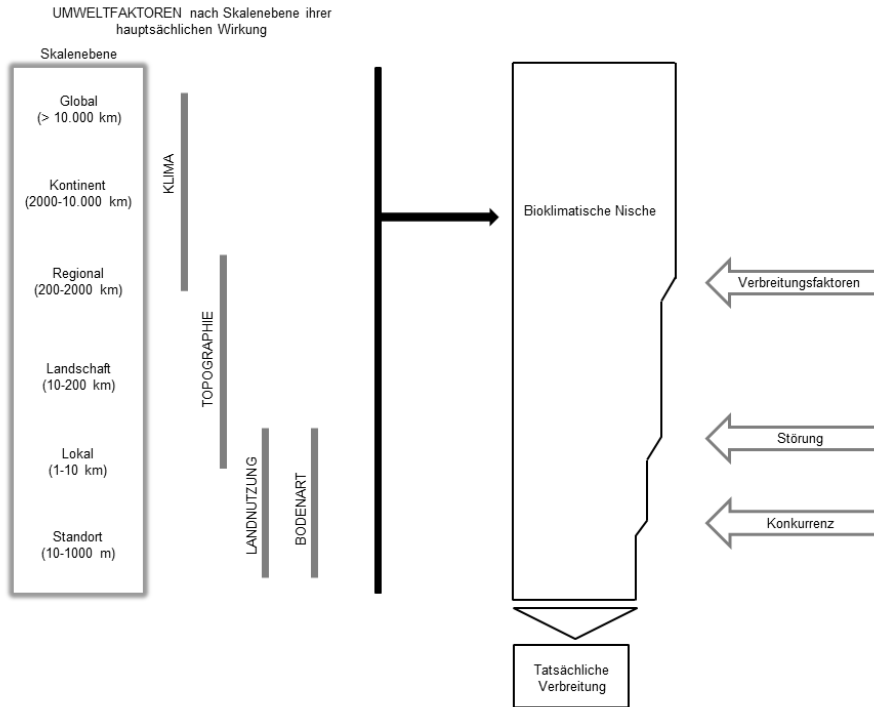


Abb. 1 Auf unterschiedlichen Skalenebenen wirkende Faktoren, welche das tatsächliche Verbreitungsgebiet von Pflanzenarten bestimmen. Eigene Darstellung, verändert nach PEARSON und DAWSON (2003) und McDONALD *et al.* (2009).

Fig. 1 Factors determining the realized distribution of plant species and primary scale levels of their action. Adapted from PEARSON and DAWSON (2003) and McDONALD *et al.* (2009).

Material und Methoden

Gesamtkonzept

Auf Basis einer umfangreichen Literaturstudie erfolgte zunächst die Auswahl von sechs Unkrautarten, die den Schwerpunkt dieser Studie bilden. Für diese Arten wurden die Folgen der für Niedersachsen prognostizierten Klimaveränderung auf mehreren Skalenebenen untersucht: Zur Abdeckung der regionalen Ebene wurde die derzeitige und die potentielle zukünftige Habitategnung für jede der Arten für Niedersachsen mittels korrelativer Verbreitungsmodellierung bestimmt und daraus ihre potentielle zukünftige Verbreitung in diesem Gebiet abgeleitet. Die lokale Wirkung prognostizierter zukünftiger Temperatur- und veränderter Bodenfeuchtebedingungen auf die vegetative und generative Leistungsfähigkeit der Unkräuter im Anbausystem wurde anhand von Gefäßversuchen unter Gewächshausbedingungen schließlich untersucht. Die für die einzelnen Skalenebenen erzielten Ergebnisse wurden in einer abschließenden Gesamtbetrachtung zusammengeführt.

Literaturstudie

Knapp 200 Literaturstellen zu den Auswirkungen des Klimawandels auf Unkräuter und Ungräser der sommerannuellen Anbausysteme Mais, Zuckerrübe und Kartoffel aus internationalen Fachjournalen, Tagungsbeiträgen, deutschsprachiger Fachliteratur und Monographien wurden gesichtet. Die Auswahl der für die Studie betrachteten Arten erfolgte aufgrund einer Reihe von Kriterien, u.a.:

- Thermophile Art, daher ein potentieller Profiteur einer Klimaerwärmung
- Potentiell invasiv oder mit einer Ausbreitungstendenz in Niedersachsen
- Hohe Relevanz durch hohes Schadpotenzial insbesondere in Sommerkulturen
- Gute Abdeckung in der vorhandenen Literatur

Anhand dieser Kriterien wurden *Abutilon theophrasti* Medik., *Amaranthus retroflexus* L., *Datura stramonium* L., *Echinochloa crus-galli* L., *Iva xanthifolia* Nutt. und *Setaria viridis* L. für die vorliegende Studie als Fokusarten ausgewählt.

Korrelative Artverbreitungsmodellierung

Die Grundannahme der korrelativen Verbreitungsmodellierung lautet, dass das Auftreten von Arten an einem Ort maßgeblich durch die vorherrschenden Umwelteigenschaften bestimmt wird. Die von einer Art eingenommene Nische wird durch ein mathematisch-statistisches Modell beschrieben, mit welchem die Verbreitung der Art unter den Umweltbedingungen eines anderen geographischen Raums oder in einer anderen Zeit abgeschätzt werden kann. Dabei basiert die Vorhersage auf einer Bewertung, wie gut die dort (oder dann) vorliegenden Umweltbedingungen für die untersuchte Art geeignet sind. Die Modellierung erfolgte mit MaxEnt (PHILLIPS *et al.*, 2006), einer etablierten Methode zur Verbreitungsmodellierung mit Vorkommensdaten (presence-only).

Die Grundlage der Modellierung bildeten die Koordinatenangaben zu Fundorten der Unkrautarten aus verschiedenen Vegetationserhebungen in Europa sowie hochaufgelöste Rasterdateien von verschiedenen Umweltparametern (Tab. 1). Die Klimadaten wurden durch Boden- und Landnutzungsdaten ergänzt, um diese wesentlichen lokalen Einflussfaktoren mit zu berücksichtigen (Abb. 1; HYVÖNEN *et al.*, 2012).

Tab. 1 Für Artverbreitungsmodellierung verwendete Daten und deren Quellen.

Tab. 1 Data and sources used of correlative distribution modeling.

Daten	Original-auflösung	Datenquelle
Vegetationsdaten	<10 km	GBIF und verschiedene nationale Datenbanken (www.gbif.org)
Historische Klimadaten in Europa, Set von 19 BIOCLIM-Variablen (inkl. Saisonalität)	10´	WORLDCLIM-Datenbank (HUMANS <i>et al.</i> , 2005)
Zukünftige Klimadaten in Niedersachsen 2070-2099 errechnet aus bias-korrigierten Monatswerten für Temperatur und Niederschlag	10 x 10 km	regionales Klimamodell REMO, Lauf UBA, IPCC-Szenario A1B (PANFEROV <i>et al.</i> , 2011)
Bodeneigenschaften	1 km	European Soil Data Base (http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/)
Landnutzung und Landbedeckung	je 1 km	Global Land Cover Facility (http://glcf.umd.edu/data/landcover/), ISCGM International Steering Committee for Global Mapping (http://www.iscgm.org/browse.html)

Die Modellgüte wird mit dem AUC (area under curve) angegeben, der zwischen 0,5 und 1,0 liegen kann (PETERSON *et al.*, 2011). Im Allgemeinen werden Werte ab 0,7 als akzeptabel und Werte über 0,9 als sehr gut eingestuft. Für alle sechs hier gezeigten Arten wurde eine hohe Modellgüte erreicht (AUC > 0,75). Anschließend wurde die zukünftige Habitateignung für das Gebiet Niedersachsens unter Verwendung der für das Ende des Jahrhunderts simulierten

Klimabedingungen projiziert. Weitere Details werden in BÜRGER *et al.* (2014), im gleichen Band beschrieben.

Gefäßversuche

Die Wirkung erhöhter Temperatur und reduzierter Wasserverfügbarkeit auf die sechs gewählten Arten wurde in zwei separaten Experimenten, die jeweils nur die drei C4- bzw. die drei C3-Pflanzenarten umfassten, untersucht.

Auflaufen und vegetatives Wachstum der Arten *A. theophrasti*, *D. stramonium* und *I. xanthiifolia* (C3-Pflanzen) wurden unter Bedingungen von reduzierter Wasserverfügbarkeit (pF 3 bis 4,2) und erhöhter Temperatur (durchschnittlich 25 °C) im Vergleich zu guter Wasserverfügbarkeit (pF 1,8) und Umgebungstemperatur (durchschnittlich 22 °C) in vier Böden (auf Lehm, Löss, Sand und Torf basiertes Gemisch) ermittelt. Das gesamte Experiment erfolgte als vierfach replizierter Gefäßversuch, der als Wiederholung in der Zeit in zwei aufeinander folgenden Jahren durchgeführt wurde. Die Auflaufrate (Anzahl der aufgelaufenen im Verhältnis zur Anzahl der gesäten Samen), sowie die Zeitdauer bis zur maximalen und zur halbmaximalen Auflaufrate wurden bestimmt. Aus diesen Größen wurden Rückschlüsse über die relative Eignung der einzelnen Kombinationen von Boden-, Feuchte- und Temperaturbedingungen für das Auflaufen der drei Unkrautarten gezogen.

Keimlinge aller drei Arten wurden anschließend in Mischkultur zusammen mit je zwei Maiskeimlingen in Pflanzgefäßen von 3 Liter Volumen unter den Bedingungen von reduzierter Wasserverfügbarkeit (pF 3 bis 4,2) und erhöhter Temperatur (durchschnittlich 25 °C) im Vergleich zu guter Wasserverfügbarkeit (pF 1,8) und Umgebungstemperatur (durchschnittlich 22 °C) in vier Böden (auf Lehm, Löss, Sand und Torf basiertes Gemisch) kultiviert. Alle Pflanzen wurden nach 45 Tagen destruktiv beerntet und die oberirdische Biomasse aller Pflanzen sowie die Wurzelbiomasse und -länge, das Spross-Wurzel-Verhältnis und die Blattfläche der Unkräuter bestimmt. Die Unkräuter befanden sich zum Zeitpunkt der Datenerhebung im BBCH-Stadium 50 bis 65 (letzteres in der erwärmten und trockenen Variante), Mais in BBCH 14 (bis 16 in der erwärmten Variante). Die Wirkung der einzelnen Kombinationen von Boden-, Feuchte- und Temperaturbedingungen auf die Morphologie der drei Arten wurde bestimmt und daraus Rückschlüsse auf die morphologische Plastizität und die Leistungsfähigkeit der Arten unter den jeweiligen Umweltbedingungen gezogen.

Im einem zweiten Experiment wurden vegetative und generative Parameter der Arten *A. retroflexus*, *E. crus-galli* und *S. viridis* (C4-Pflanzen) unter simulierten zukünftigen Klimabedingungen bestimmt (Temperaturerhöhung von 2 °C, reduzierte Luftfeuchtigkeit: 55 % „zukünftiges Klima“ vs. 68 % „heutiges Klima“). Die drei Unkrautarten wurden als Reinkultur und im Mischbestand mit Mais in Klimakammern gesät und kultiviert. Die Zeitdauer bis zur halbmaximalen und maximalen Auflaufrate, die Biomasse der Gesamtpflanzen und die Anzahl der Samen wurden bestimmt.

Ergebnisse

Korrelative Artverbreitungsmodellierung

In Tabelle 2 werden die relative Habitateignung unter derzeitigen Bedingungen, die prognostizierte relative Habitateignung und die potentielle zukünftige Verbreitung (Zeithorizont 2070 bis 2100) für das Gebiet Niedersachsen für die sechs betrachteten Unkräuter und Ungräser vergleichend dargestellt.

Tab. 2 Relative Habitategnung (derzeitiger Status und Projektion für den Zeithorizont 2070-2100) für sechs Arten von Ackerunkräutern und -ungräsern in Niedersachsen.

Tab. 2 *Relative habitat suitability (current status and projection for 2070-2100) for six species of arable weeds in Lower Saxony.*

Art	Relative Habitategnung in Niedersachsen		Veränderung heute vs. Zukunft
	heute	2070-2100	
<i>Abutilon theophrasti</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und südöstl. Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westen (vor allem Weser-Ems-Region und Küste vergleichsweise sehr geringe Habitategnung)	Für ein Vorkommen der Art geeignete Bedingungen in weiten Teilen Niedersachsens; vergleichsweise beste Habitategnung an der Küste und in den Börden; in großen Teilen der Region Weser-Ems, Zentralniedersachsens und der Lüneburger Heide dagegen zahlreiche Areale mit vergleichsweise geringerer Eignung	Deutliche Verringerung der Areale mit vergleichsweise sehr guter Habitategnung; gleichmäßigere Verteilung von Arealen mit moderater bis guter Habitategnung über ganz Niedersachsen
<i>Amaranthus retroflexus</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und südöstl. Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westen (vor allem Weser-Ems-Region vergleichsweise sehr geringe Habitategnung)	Für Vorkommen der Art gut geeignete Bedingungen in ganz Niedersachsen	Gleichmäßigere Verteilung von Arealen mit relativ guter Habitategnung über ganz Niedersachsen
<i>Datura stramonium</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und südöstl. Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westen (vor allem Weser-Ems-Region vergleichsweise sehr geringe)	Für Vorkommen der Art geeignete Bedingungen in ganz Niedersachsen; relativ geringere Habitategnung in der Stader und Oldenburger Geest; vergleichsweise beste Bedingungen in den Börden	Insgesamt gleichmäßigere Verteilung der für Artverbreitung geeigneten Gebiete über Niedersachsen.
<i>Echinochloa crus-galli</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und östl. der Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westen (vor allem Küstenregion vergleichsweise sehr geringe Habitategnung)	Für Vorkommen der Art geeignete Bedingungen in ganz Niedersachsen; relativ beste Bedingungen in der Region S-W-Weser-Ems	Vergrößerung des für die Artverbreitung gut geeigneten Gebiets auf ganz Niedersachsen und insgesamt eine Verbesserung der Habitategnung in ganz Niedersachsen
<i>Iva xanthiifolia</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und südöstl. Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westniedersachsen (vor allem Küstenregion vergleichsweise sehr geringe Habitategnung)	Für Vorkommen der Art geeignete Bedingungen lediglich in den Regionen Nordniedersachsen, der süd. Lüneburger Heide und Südhannover	Starke Verringerung des für die Artverbreitung geeigneten Gebiets

Art	Relative Habitategnung in Niedersachsen		Veränderung heute vs. Zukunft
	heute	2070-2100	
<i>Setaria viridis</i>	starker Gradient der Habitategnung von Osten (Nordniedersachsen und südöstl. Lüneburger Heide vergleichsweise sehr gut) nach Westen (vor allem Weser-Ems-Region und Küste vergleichsweise sehr geringe Habitategnung)	Für Vorkommen der Art gut geeignete Bedingungen in ganz Niedersachsen; vergleichsweise etwas geringere Habitategnung in der Küstenregion	Vergrößerung des für die Artverbreitung gut geeigneten Gebiets auf ganz Niedersachsen

Gefäßversuche

Die Gefäßversuche zeigten erstens, dass sowohl das Auflaufverhalten als auch das vegetative Wachstums der drei untersuchten Unkrautarten *A. theophrasti*, *D. stramonium* und *I. xanthiifolia* in unterschiedlichem Maße durch die angewandten Temperatur- und Feuchtestufen beeinflusst wurden. Zweitens verdeutlichten die Ergebnisse, dass die Bodenart unter den prognostizierten zukünftigen Bedingungen, und vor allem bei limitierter Wasserverfügbarkeit eine wichtige Einflussgröße für das Auflaufen und das Wachstums der untersuchten Arten ist.

Abutilon theophrasti wies bei höherer Temperatur eine erhöhte Auflaufrate und eine kürzere Zeitdauer bis zur maximalen und halbmaximalen Auflaufrate auf, was ein Hinweis darauf ist, dass das Temperaturoptimum dieser Art bei über 22 °C liegt (GUILLEMIN *et al.*, 2013). Im Gegensatz dazu war die Keimungsrate von *I. xanthiifolia* bei höherer Temperatur reduziert (vgl. EDLER und STEINMANN, 2012). Bei *D. stramonium* wurde kein Einfluss der Temperatur auf die Auflaufrate festgestellt. Die Reduktion der Bodenfeuchte bedingte prinzipiell bei den drei Unkräutern eine reduzierte Auflaufrate; bei *A. theophrasti* wurde bei erhöhter Temperatur allerdings unabhängig von der Bodenfeuchte eine relativ hohe Auflaufrate beobachtet, die durch Temperaturwerte nahe des Optimums erklärt werden könnte (KEBREAB und MURDOCH, 1999). Der Zeitverlauf des Auflaufens und die Auflaufrate wurden bei allen drei Unkrautarten durch die Bodenart beeinflusst. Unter Bedingungen der reduzierten Bodenfeuchte und der erhöhten Temperaturen waren die Auflaufraten im Torfboden vergleichsweise höher als in den anderen Bodenarten, insbesondere höher als im Sandboden.

Die Untersuchungen zeigten ferner, dass auch das vegetative Wachstum von *A. theophrasti*, *D. stramonium* und *I. xanthiifolia* artspezifisch in unterschiedlicher Weise durch veränderte Temperatur- und Feuchtebedingungen beeinflusst wurde. Im Mischbestand war die oberirdische Biomasse aller drei Unkräuter und vom Mais bei geringer Wasserverfügbarkeit, und insbesondere bei gleichzeitig erhöhter Temperatur, deutlich reduziert. Bei erhöhten Temperaturen war der Anteil vom Mais an der oberirdischen Biomasse des Gesamtbestands unabhängig von der Wasserverfügbarkeit erhöht. Die Unkrautarten zeigten je nach Bodenart unterschiedliche morphologische Veränderungen. *Abutilon theophrasti* war die einzige Unkrautart, deren Anteil an der oberirdischen Biomasse des Gesamtbestands unter Bedingungen reduzierter Wasserverfügbarkeit stieg und die keine Veränderung des Wurzel-Spross-Verhältnisses zeigte. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass Trockenheit eine vergleichsweise geringe Auswirkung auf die Etablierung und das Wachstum dieser Art haben könnte, wohingegen für *I. xanthiifolia* eine vergleichsweise hohe Abhängigkeit von guter Wasserverfügbarkeit zu bestehen scheint.

Das Experiment 2 zeigte, dass sowohl das Auflaufverhalten als auch die Biomasse- und generative Entwicklung der drei untersuchten Unkrautarten *A. retroflexus*, *E. crus-galli* und *S. viridis* in unterschiedlichem Maße durch die angewandten Temperatur- und Luftfeuchtestufen beeinflusst wurden. *Amaranthus retroflexus* und *S. viridis* liefen unter den prognostizierten zukünftigen Bedingungen früher auf als unter derzeitigen Bedingungen; bei *E. crus-galli* wurde in Bezug auf diesen Parameter kein Unterschied festgestellt. Die vegetative Biomasse von *E. crus-galli* und *S.*

viridis war unter „zukünftigen“ Klimabedingungen signifikant erhöht. *Echinochloa crus-galli* bildete unter „zukünftigen“ Bedingungen zudem mehr Samen als unter „derzeitigen“ Klimabedingungen. Die Ergebnisse dieses Versuchs weisen darauf hin, dass sich eine erhöhte Temperatur und eine reduzierte Luftfeuchte positiv auf die Leistungsfähigkeit von *E. crus-galli* und in gewissem Ausmaß auf die von *S. viridis* auswirken können.

Zusammenführung der Skalenebenen

Bei der Zusammenführung der Modellierung und der empirischen Experimente zeigt sich, dass die Ergebnisse im Wesentlichen gut übereinstimmen. Für *A. retroflexus*, *D. stramonium*, *E. crus-galli* und *S. viridis* wurde in den Gefäßversuchen eine hohe Auflaufrate, für *E. crus-galli* auch ein hohes vegetatives Wachstum unter den zukünftigen Bedingungen gemessen; dies deckt sich mit der durch Modellierung prognostizierten sehr guten (*E. crus-galli*) bis guten relativen Habitategnung für diese vier Arten in ganz Niedersachsen. Für *I. xanthiifolia* wurde eine negative Wirkung der prognostizierten Klimabedingungen für das Auflaufen und Wachstum im Gefäßversuch festgestellt, welche mit der in der Artverbreitungsmodellierung prognostizierten geringen relativen Habitategnung der Art in ganz Niedersachsen gut übereinstimmt. Lediglich bei *A. theophrasti* lassen sich die Ergebnisse der beiden Ansätze stellenweise nicht ganz zur Deckung bringen: für diese Art hatten die Gefäßversuche eine positive Wirkung der zukünftigen Bedingungen auf das Auflaufen und Wachstum, auch auf unterschiedlichen Böden, hingewiesen. Die Artverbreitungsmodellierung prognostizierte hingegen starke regionale Differenzen bezüglich der relativen Habitategnung und insgesamt eine Verringerung des für ein Vorkommen dieser Art geeigneten Gebiets in Niedersachsen.

Diskussion

Das Ziel der vorliegenden Arbeit war es auf Basis eines mehrere Skalenebenen übergreifenden Ansatzes die Auswirkungen der für das Ende des Jahrhunderts für Niedersachsen prognostizierten klimatischen Veränderungen auf die potentielle Verbreitung und die Leistungsfähigkeit einer Reihe von Ackerunkräutern zu untersuchen. Dieser Ansatz sollte der Tatsache gerecht werden, dass die tatsächliche Verbreitung von Pflanzenarten das Ergebnis des Einwirkens einer Reihe von Umweltfaktoren und biotischen Variablen ist, welche auf unterschiedlichen Skalenebenen wirken.

Die Ergebnisse der Artverbreitungsmodellierung stimmten für den Großteil der untersuchten Arten gut mit denen der Gefäßversuche überein. Dies unterstreicht die Komplementarität der unterschiedlichen hier verwendeten Methoden und die Leistungsfähigkeit der Artverbreitungsmodellierung.

In den Gefäßversuchen wurde auch die Wirkung der lokal am Standort vorherrschenden Bodenbedingungen auf die Pflanzen untersucht. Das Ergebnis, dass der Faktor Boden die Leistungsfähigkeit der untersuchten Arten unter veränderten Klimabedingungen in sehr unterschiedlicher Weise beeinflusst, kann die Interpretation der Ergebnisse der Artverbreitungsmodellierung (z.B. unterschiedliche Habitategnung von Standorten in unterschiedlichen bodenklimatischen Regionen) unterstützen.

Einige Aspekte der Wirkung von veränderten Klimabedingungen auf Ackerunkräuter konnten nicht von dem hier verwendeten Modellierungsansatz abgebildet werden. Insbesondere für folgende Daten haben sich die Gefäßversuche als notwendige Ergänzung zur Modellierung erwiesen:

- zur quantitativen Erfassung vegetativer (z. B. Biomasse, Wuchshöhe) und generativer (z. B. Anzahl gebildeter Samen) Parameter der Unkräuter
- zur Abbildung der Leistungsfähigkeit der betrachteten Art unter den Bedingungen der interspezifischen Konkurrenz durch andere Unkrautarten und/oder die Kulturpflanze (biologisch reduzierte Nische) und des Einflusses veränderter Klimabedingungen auf diese interspezifischen Wechselwirkungen

Für die untersuchten Arten konnte somit ein relativ umfassendes Bild der Wirkung veränderter Umweltbedingungen erstellt werden. Die gute Kongruenz der Ergebnisse deutet darauf hin, dass aus der Zusammenführung aller erzielten Ergebnisse eine haltbare Abschätzung der möglichen Folgen des Klimawandels für die betrachteten Arten von Ackerunkräutern für den Raum Niedersachsen erzielt wurde.

In einer Weiterentwicklung des hier vorgestellten Ansatzes sollten in ergänzenden Versuchen zusätzliche Aspekte Eingang finden, welche im Rahmen der vorliegenden Projektteile nicht bearbeitet werden konnten. Insbesondere ist hierbei die Berücksichtigung intraspezifischer genetischer Variation der betrachteten Arten von Bedeutung. Diese sollte sich einerseits auf die Unterschiede zwischen etablierten regionalen Populationen beziehen (WESTERMAN *et al.*, 2012). Andererseits sollten für Arten, die ihr Verbreitungsgebiet erweitern, mögliche evolutionäre Veränderungen des Genotyps und der tatsächlichen Nische abgebildet werden (BROENNIMANN *et al.*, 2007, CLEMENTS und DiTOMMASO, 2011).

Insgesamt lassen die hier gezeigten Ergebnisse die Einschätzung zu, dass der Ansatz, die Folgen des Klimawandels auf Ackerunkräuter mit einer mehrere Methoden und Skalenebenen verbindenden Herangehensweise zu untersuchen, zahlreiche Stärken aufweist. Die hier beschriebene Vorgehensweise erlaubt es für eine definierte Untersuchungsregion unterschiedliche Datensätze zu einem detaillierten Gesamtergebnis aneinanderzupassen. Aus diesem Grunde kann die hier vorgestellte Herangehensweise für die Untersuchung regionaler Klimawandelfolgen für Ackerunkräuter empfohlen werden.

Danksagung

Die vorliegende Studie wurde unterstützt durch das niedersächsische Ministerium für Wissenschaft und Kultur innerhalb des KLIFF Forschungsverbunds (Klimafolgenforschung und Anpassung in Niedersachsen). Des Weiteren danken wir der Abteilung Pedologie des Departments für Nutzpflanzenwissenschaften und der Abteilung Ökopedologie der gemäßigten Zonen des BÜSING-Institutes (beide Georg-August-Universität Göttingen) für die bodenphysikalischen und -bodenchemischen Analysen.

Literatur

- BROENNIMANN, O., U.A. TREIER, H. MÜLLER-SCHÄRER, W. THULLER, A. T. PETERSON und A. GUIBAN, 2007: Evidence of climatic niche shift during biological invasion. *Ecol. Letters* **10**, 701-709.
- BÜRGER, J., B. EDLER, B. GEROWITT und H.-H. STEINMANN, 2014: Prognose künftiger Problemunkräuter im Maisanbau durch Artverbreitungsmodellierung. In: Tagungsband **26**. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. Julius-Kühn-Archiv, **443**.
- CLEMENTS, D. R. und A. DiTOMMASO, 2011: Climate change and weed adaptation: can evolution of invasive plants lead to greater range expansion than forecasted? *Weed Research* **51**, 227-240.
- EDLER, B. und H.-H. STEINMANN, 2012: Untersuchungen zu Auflauf und Etablierung von *Iva xanthiifolia* Nutt. unter veränderten Umweltbedingungen in Norddeutschland. In: Tagungsband **25**. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. In: NORDMEYER, H. und L. ULBER, Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv **434**, 587-594.
- GUILLEMIN, J.-P., A. GARDARIN, S. GRANGER, C. REIBEL, N. MUNIER-JOLAIN und N. COLBACH, 2013: Assessing potential germination period of weeds with base temperatures and base water potentials. *Weed Research* **53**, 76-87.
- HIJMANS, R. J., S. E. CAMERON, J. L. PARRA, P. G. JONES und A. JARVIS, 2005: Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas. *Int. J. Climatol.* **25**, 1965-1978.
- HYVÖNEN, T., M. LUOTO und P. UOTILA, 2012: Assessment of weed establishment risk in a changing European climate. *Agricult. Food Sci.* **21**, 348-360.
- MCDONALD, A., S. RIHA, A. DiTOMMASO und A. DEGAETANO, 2009: Climate change and the geography of weed damage: Analysis of U.S. maize systems suggests the potential for significant range transformations. *Agric. Ecosys. Env.* **130**, 131-140.
- MEISLE, M., P. MOURON, T. MUSA, F. BIGLER, X. PONS, V. VASILEIADIS, S. OTTO, D. ANTICHI, J. KISS, Z. PÁLINKÁS, Z. DORNER, R. VAN DER WEIDE, J. GROTEN, E. CZEMBOR, J. ADAMCZYK, J. B. THIBORD, B. MELANDER, G. CORDSEN 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**, 357-375.
- MOSELEY, C., O. PANFEROV, C. DÖRING, J. DIERTRICH, U. HABERLANDT, V. EBERMANN, D. RECHID, F. BEESE und D. JACOB, 2012: Klimaentwicklung und Klimaszenarien. In: Empfehlungen für eine niedersächsische Strategie zur Anpassung an die Folgen des Klimawandels. Regierungskommission Klimaschutz (Hrsg.), 18-41.

26. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 11.-13. März 2014 in Braunschweig

- PANFEROV, O., M. MUDELSEE, C. DOERING, C. MOSELEY, D. JACOB und G. LOHMANN, 2011: Climate change projections for Lower Saxony, Germany, in the 21th century. European Geosciences Union, General Assembly 2011, Vienna, Austria, EGU2011-14020.
- PEARSON, R. G. und T. P. DAWSON, 2003: Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful? *Global Ecol. Biogeogr.* **12**, 361-371.
- PETERSON, A. T., J. SOBERÓN, R. G. PEARSON, R. P. ANDERSON, E. MARTÍNEZ-MEYER, M. NAKAMURA und M. B. ARAÚJO, 2011: *Ecological Niches and Geographic Distributions*. Princeton, New Jersey, Princeton University Press, 314 Seiten.
- PHILLIPS, S., R. ANDERSON und R. SCHAPIRE, 2006: Maximum entropy modeling of species geographic distributions. *Ecol. Mod.* **190**, 231-259.
- WEBER, E. und D. GUT, 2005: A survey of weeds that are increasingly spreading in Europe. *Agron. Sust. Devel.* **25**, 109-121.
- WESTERMAN, P. R., J. DIESTERHEFT und B. GEROWITT, 2012: Phenology of velvetleaf (*Abutilon theophrasti* Medic.) populations grown in northern Germany. In: Tagungsband 25. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung. In: NORDMEYER, H. und L. ULBER, Braunschweig, *Julius-Kühn-Archiv* **434**, 595-600.