

Carlotta Bauer¹, Alexander Fekete¹, Stefan Kühne², Peter Baufeld³

Abschätzung des klimawandelinduzierten Gefahrenpotentials von Feldheuschrecken (Acrididae) als Schädlinge für die zukünftige deutsche Landwirtschaft

Assessment of climate change-induced hazard potential of locusts (Acrididae) as pest for future German agriculture

Affiliation

¹Technische Hochschule Köln, Institut für Rettungsingenieurwesen und Gefahrenabwehr, Köln.

²Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Kleinmachnow.

³Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Kleinmachnow.

Kontaktanschrift

Prof. Dr. agr., Dr. habil. Stefan Kühne, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, E-Mail: stefan.kuehne@julius-kuehn.de

Zusammenfassung

Der Klimawandel begünstigt die Ansiedlung neuer Schadorganismen in Deutschland, die hier nun geeignete Lebensräume finden. Feldheuschrecken treten in südeuropäischen Ländern immer wieder als Landwirtschaftsschädlinge auf. Es wird daher untersucht, ob durch die klimawandelbedingte Nordverschiebung wärmerer Zonen klimatisch geeignete Lebensräume für Feldheuschrecken in Deutschland entstehen und landwirtschaftlich genutzte Flächen dadurch betroffen sein können. Mit der Software CLIMEX wird die mögliche Verbreitung der Italienischen Schönschrecke (*Calliptamus italicus* (L., 1758)), der Marokkanischen Wanderheuschrecke (*Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815)) und der Europäischen Wanderheuschrecke (*Locusta migratoria* (L., 1758)) für 20 Standorte in Deutschland in sechs Szenarien modelliert. Diese Szenarien werden durch die Kombination der beiden Betrachtungszeiträume 2021–2050 und 2071–2100 mit den drei Klimaprojektionen RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 definiert. Aufgrund der Untersuchung ist zu erwarten, dass *C. italicus* sich in Deutschland stark verbreiten wird, während *D. maroccanus* und *L. migratoria* nur kleine und lokale Populationen ausbilden könnten. Heuschreckenschwärme können an den betrachteten Standorten potentiell pflanzliche Erzeugnisse auf etwa 10 – 25 % der landwirtschaftlichen Fläche in Deutschland bedrohen, ihr Auftreten wird allerdings als unwahrscheinlich eingeschätzt, da die intensive Nutzung von Grünlandflächen bisher nur unzureichende Vermehrungsbedingungen bietet. Die Schaffung größerer Brachflächen im Rahmen von Umweltschutz- und Klimaanpassungsmaßnahmen könnte dies zukünftig ändern. Zusätzlich sollten Schwarmbildungen im Ausland und mögliche Migrationsrouten nach Deutschland untersucht werden. Weiterhin wird die Entwicklung von Konzepten zur Prävention und Intervention

für den Fall einer Heuschreckeninvasion empfohlen. Insgesamt ist jedoch aktuell von einem geringen Gefahrenpotential von Feldheuschrecken für die deutsche Landwirtschaft auszugehen.

Stichwörter

Schädlinge, Klimawandel, Heuschrecken, CLIMEX, Artverbreitungsmodellierung, *Calliptamus italicus*, *Locusta migratoria*, *Dociostaurus maroccanus*

Abstract

Climate change favors the establishment of new pests in Germany, which now find suitable habitats here due to the changed climate. Field locusts occur repeatedly as agricultural pests in southern European countries. Therefore, it is investigated whether the climate change-induced northward shift of warmer zones can create climatically suitable habitats for field locusts in Germany and whether agricultural areas can be affected by this. The CLIMEX software is used to model the possible distribution of the Italian locust (*Calliptamus italicus* (L., 1758)), the Moroccan locust (*Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815)) and the Migratory locust (*Locusta migratoria* (L., 1758)) for 20 locations in Germany in six scenarios. These result from the combination of the two observation periods 2021 – 2050 and 2071 – 2100 with the three climate projections RCP2.6, RCP4.5 and RCP8.5. Based on the study, *C. italicus* is expected to spread widely in Germany, whereas *D. maroccanus* and *L. migratoria* might form only small and local populations. Locust swarms can potentially threaten crop products on around 10 – 25% of the agricultural area in Germany at the sites considered, but are unlikely to occur, since



(c) Die Autoren/Die Autorin 2022

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>).

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen: 7. März 2022/30. Juni 2022

the intensive use of grassland areas provides insufficient conditions for reproduction. The creation of larger fallow areas as part of environmental protection and climate adaptation measures could change this in the future. In addition, swarm formation in neighbouring countries and possible migration routes to Germany should be investigated. Furthermore, the development of concepts for prevention and intervention in the event of a locust invasion is recommended. Overall, however, a low risk potential of field locusts for German agriculture is currently assumed.

Key words:

Crop Pest, Climate Change, Locusts, CLIMEX, Species Distribution Model, *Calliptamus italicus*, *Locusta migratoria*, *Dociostaurus maroccanus*

Einleitung

Die deutsche Landwirtschaft kann grundsätzlich als eine kritische Infrastruktur verstanden werden, da sie u. a. Nahrungsmittel und Nutzpflanzen herstellt, die für die Versorgung der Bevölkerung essentiell sind (Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Wissenschaftsforum, 2019). Der Schutz der landwirtschaftlichen Produktion gegenüber Gefahren wie Pflanzenschädlingen ist daher unerlässlich. Da der Klimawandel neben anderen Auswirkungen auch die Verschiebung der Verbreitungsgebiete von Arten zur Folge hat (Warren et al., 2011; Caminade et al., 2012; Renner et al., 2021), wird auch die deutsche Landwirtschaft bereits mit neuen Schädlingen wie der Kirschessigfliege (*Drosophila suzukii* (Matsumura, 1931)) (Asplen et al., 2015) oder dem Westlichen Maiswurzelbohrer (*Diabrotica virgifera* (LeBronte, 1858)) (Aragón & Lobo, 2012) konfrontiert. Ähnliche Trends werden bei Wanderheuschrecken wie der Wüstenheuschrecke (*Schistocerca gregaria* (Forsskål, 1775)) (Chen et al., 2020a) und der Italienischen Schönschrecke (*Calliptamus italicus* (L., 1758)) (Qin et al., 2013; Popova et al., 2016) festgestellt.

Neben der Ausbreitung in Deutschland können auch Schwarmbildungen im Ausland eine Gefahr für die deutsche Landwirtschaft darstellen, da die Schwärme zwischen 10 km (Marokkanische Wanderheuschrecke) und 200 km (Europäische Wanderheuschrecke) täglich zurücklegen können (Latchininsky, 2013). So können insgesamt Strecken bis zu 1000 km überwunden werden, was in etwa der Entfernung zwischen Sardinien und Frankfurt am Main oder Andorra und Köln entspricht. Zudem können Einschleppungen von nichtendemischen Heuschreckenarten durch den Menschen über große Distanzen nicht ausgeschlossen werden. So wurde im Jahr 2021 mit dem Personenflugverkehr eine bisher taxonomisch nicht bestimmte Heuschreckenart von Istanbul (Türkei) auf die Seychellen eingeschleppt (Pointe, 2021). In den USA stellen Heuschrecken bedeutende Schädlinge in der Landwirtschaft dar und verursachen immer wieder Kalamitäten. Das United States Department for Agriculture (USDA) wendete im Jahr 2020 5 Millionen US-Dollar zur Bekämpfung

von Heuschrecken und der Eingrenzung von Heuschreckenschwärmen auf (van der Voo, 2021). Es handelt sich dabei um Arten, die an die gemäßigten Klimate angepasst sind und mit einer zunehmenden Erwärmung zu Kalamitäten neigen.

Es ist daher notwendig, die potentielle Verbreitung neuer Heuschreckenarten als Schädlinge in Deutschland zu untersuchen, um potentielle Gefahren für die Landwirtschaft frühzeitig zu identifizieren. Nur so können rechtzeitig Handlungsbedarfe erkannt sowie Konzepte und Maßnahmen zum Schutz der Landwirtschaft entwickelt werden. Die vorliegende Arbeit untersucht die Fragestellung, ob in Deutschland zukünftig geeignete klimatische Bedingungen für die Verbreitung von Feldheuschrecken herrschen und ist somit nicht nur für die Landwirtschaft, sondern auch für den Bevölkerungsschutz von Interesse.

Heuschreckenschwärme als landwirtschaftliche Plage in früheren Jahrhunderten

Heuschreckenschwärme zählen zu den ältesten Landwirtschaftsschädlingen der Menschheitsgeschichte und finden als von Gott gesandte Plagen Erwähnung in der Bibel, dem Koran und der Torah (Simpson & Sword, 2008). In der Geschichte haben unterschiedliche Heuschreckenarten auf verschiedenen Kontinenten immer wieder für verheerende landwirtschaftliche Schäden gesorgt (Simpson & Sword, 2008; Medina et al., 2017; Rai & Sharma, 2020). Von Bedeutung sind dabei im Wesentlichen etwa 10 – 15 Arten aus der Familie der Feldheuschrecken (Orthoptera: Acrididae) (Solter et al., 2012).

Auch in Mitteleuropa traten in früheren Jahrhunderten (insb. im 5., 9., und 14. – 16. Jhd.) Heuschreckenschwärme auf (Rohr, 2010). Es handelte sich dabei um Populationen der Europäischen Wanderheuschrecke *Locusta migratoria* (L., 1758), möglicherweise kam vereinzelt auch die Marokkanische Wanderheuschrecke *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815) vor (Köhler & Aßhoff, 2002). Ihr Auftreten erfolgte in besonders warmen, trockenen Sommern bzw., wenn nach außergewöhnlich trockenen Perioden Regenfälle einsetzten (Köhler & Aßhoff, 2002). Die Schwärme entwickelten sich meist in der Ungarischen Tiefebene und migrierten bei trockenem Wetter und ausreichenden Ostwinden entweder nördlich der Alpen über Österreich und Tschechien bis nach Westdeutschland oder südlich der Alpen über die slawonische Tiefebene und Norditalien nach Süddeutschland (Rohr, 2010). Dort fraßen sie die Vegetation auf Wiesen und Feldern nieder (Oberhessische Presse, 2015). Besonders betroffen von der Zerstörung waren Getreidefelder und -vorräte bzw. Saatgut, was zu lokalen Hungersnöten führte (Köhler & Aßhoff, 2002).

Die Bekämpfung der Schädlinge wurde auf unterschiedlichste Art und Weise versucht: Von Gebeten und Glockenläuten über Kanonen- und Gewehrschüsse bis zum gezielten Legen von Feuern unter den befallenen Bäumen blieb nichts unversucht, jedoch waren die Bemühungen zumeist erfolglos (zur Strassen, 1926). Erst mit dem Einzug der Kleinen Eiszeit vom 16. bis frühen 19. Jahrhundert wurden Heuschreckenschwärme in Mitteleuropa seltener (Rohr, 2010).

Aktuelle Vorkommen von Feldheuschrecken in Europa

Heutzutage ist ca. ein Viertel der Feldheuschreckenarten in Europa vom Aussterben bedroht (Hochkirch et al., 2016). Mit der Italienischen Schönschrecke, der Europäischen Wanderheuschrecke und der Marokkanischen Wanderheuschrecke sind jedoch drei der wirtschaftlich relevantesten Arten in Europa vertreten und nicht bedroht (Hochkirch et al., 2016; DGfO, 2021; FAO, 2021c; Rutschmann, 2021a).

Dass sie auch heute noch eine Gefahr für die europäische Landwirtschaft darstellen können, zeigt die jüngste Vergangenheit: Im Jahr 2004 wurde Nordafrika von außerordentlich großen Schwärmen der Wüstenheuschrecke heimgesucht. Starke Winde ermöglichten es den Heuschrecken, das Mittelmeer zu überqueren und nach Spanien und Portugal einzufallen (FAO, 2004). Im Sommer 2005 führten hohe Temperaturen in Südfrankreich zur Schwarmbildung der dort heimischen Rotflügeligen Schnarrschrecke (*Psophus stridulus* (L., 1758)), die daraufhin Felder und Wiesen kahl fraß (Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2005). Gleich zwei Jahre in Folge, nämlich in den Jahren 2019 und 2020, war die italienische Insel Sardinien von Invasionen der Marokkanischen Heuschrecke betroffen, die auf mehreren tausend Hektar landwirtschaftlich genutzter Fläche schwere Schäden an der Vegetation hinterließ (Carlone & Sestito, 2020; Deutsche Welle, 2021).

In Deutschland sind derlei Ereignisse in jüngerer Zeit nicht zu verzeichnen, denn während *C. italicus* zur Kategorie 1 der Rote Liste Arten in Deutschland zählt (vom Aussterben bedroht) (Maas et al., 2002), gilt *L. migratoria* in Deutschland als ausgestorben, und *D. maroccanus* kommt bislang nicht nördlich des 49. Breitengrades vor (Rutschmann, 2021b; FAO, 2021c).

Da vor dem Hintergrund des globalen Klimawandels eine Nordwanderung wärmeliebender Spezies beobachtet werden kann, ist die Fragestellung zu untersuchen, ob durch die Klimaveränderungen in Deutschland zukünftig die hier genannten Heuschreckenarten als landwirtschaftliche Schädlinge auftreten und welche Bedingungen hierfür vorliegen müssen. *Calliptamus italicus* gehört zu den xerothermophilen Arten und bevorzugt Zwergstrauchheiden in Kombination mit Sandtrockenrasen, Steinschutthalden und Sanddünen (Borries et al., 1995, Abb. 1). Eine aktuelle Untersuchung zur Habitatänderung von Feldheuschrecken zeigt, dass *C. italicus* bereits jetzt neue, insbesondere auch höher gelegene Gebiete in Deutschland besiedelt (Poniatowski et al., 2020). Abbildung 2 zeigt die aktuellen Ausbreitungsgebiete.

Berichte über Massenvermehrungen dieser Art liegen in den 1990er Jahren aus praktisch allen Steppenregionen Südrusslands vor, in denen man Bekämpfungsmaßnahmen auf mehr als 200.000 ha durchgeführt hat (Stolyarov, 2000). Auch *Dociostaurus maroccanus* bewohnt offene, steppenartige Flächen, in denen eine Vegetation aus Xerophyten vorherrscht (Malakhov & Zlatanov, 2020). Kritisch für das Populationswachstum und somit auch für Massenvermehrungen dieser Art sind Regenfälle im Frühjahr, die die Vegetation schlagartig wachsen lassen und so für ein großes Nahrungsangebot der jungen Heuschrecken sorgen (Latchinsky, 1998). Die Euro-

päische Wanderheuschrecke hat mit ihren verschiedenen Unterarten das größte Verbreitungsgebiet der betrachteten Arten und kommt in Teilen Afrikas und Asiens sowie in Australien, Neuseeland und dem mediterranen Südeuropa, z. B. Frankreich, Italien, Portugal, Schweiz und Spanien vor (CABI, 2022). Sie besiedelt dort überwiegend Areale an Fluss-, See- oder Meeresufern mit niedriger Vegetation innerhalb steppenartiger Landschaften (FAO, 2021a). Wie auch bei den



Abb. 1. Rosarote Hinterflügel und hellrot gefärbte Schienen (Tibia) der Hinterbeine sind Bestimmungsmerkmale der Italienischen Schönschrecke (*Calliptamus italicus*) (Foto: Kühne, JKI).

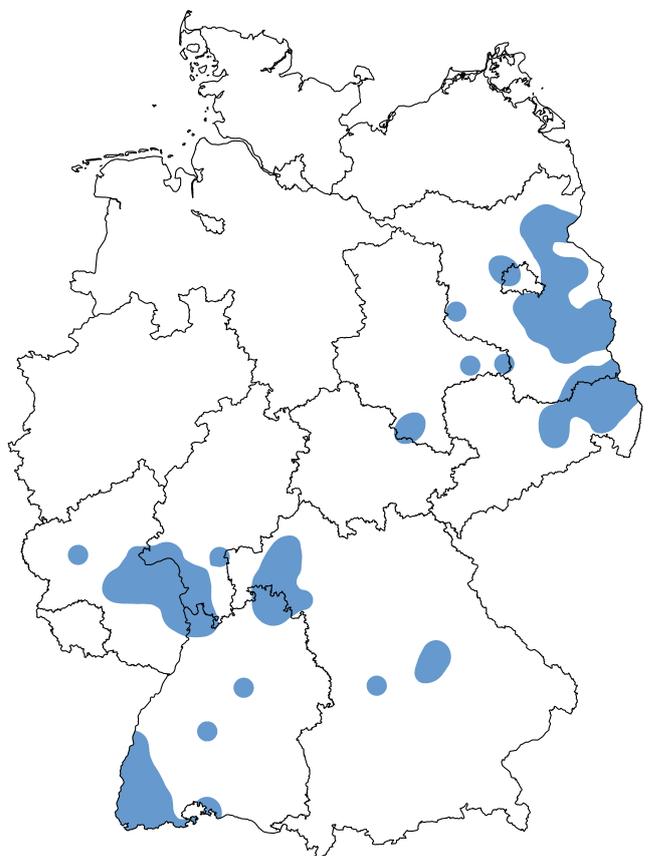


Abb. 2. Aktuelle Ausbreitungsgebiete von *C. italicus*. Quelle: Fischer et al., 2020

anderen Arten sind Massenvermehrungen neben den Habitateneigenschaften an günstige Wetterbedingungen gebunden (FAO, 2021a). Das Nahrungsspektrum der Heuschrecken umfasst eine Vielzahl von Pflanzen, darunter Gräser, Blattwerk und Zweige von Bäumen und Sträuchern, Obst und Gemüse sowie verschiedene Getreidearten (Steedman, 1990; Tarai & Doumandji, 2009). Somit gefährden Heuschreckenschwärme nicht nur die Nahrungsgrundlage von Menschen, sondern häufig auch Futterpflanzen für Nutz- und heimische Wildtiere.

Material und Methoden

Klimawandelszenarien

Für die Untersuchung des potentiellen zukünftigen Vorkommens von *C. italicus*, *D. maroccanus* und *L. migratoria* in Deutschland werden zunächst verschiedene Klimawandelszenarien definiert. Dazu werden die drei Repräsentativen Konzentrationspfade RCP2.6, RCP4.5 und RCP8.5 (geringe, mittlere und starke Klimaänderung) mit den beiden Zeiträumen 2021 – 2050 und 2071 – 2100 (nahe und ferne Zukunft) kombiniert (Umweltbundesamt, 2017). Für die sechs sich ergebenden Szenarien werden die Änderungen der Klimaparameter Temperatur und Niederschlag ermittelt (vgl. Tab. 1). Die entsprechenden Klimadaten werden aus dem Projekt Euro-CORDEX bezogen, welches feinmaschig aufgelöste Daten anhand der neu entwickelten Klimaprojektionen für Europa bereitstellt (Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, 2021).

Modellierung der Verbreitung

Die Software CLIMEX der staatlichen Behörde Australiens für wissenschaftliche und industrielle Forschung CSIRO (Canberra, Australien) bietet ein dynamisches Modell, das die Entwicklung einer Population in Abhängigkeit klimatischer Faktoren berechnet und hierbei auch die Extrapolation über bekannte Daten hinaus, beispielsweise für die Untersuchung verschiedener Klimawandelszenarien, ermöglicht (Beddow et al., 2010). Wie die meisten Modelle zur Artverbreitung stützt sich CLIMEX auf die Annahme, dass von der bekannten Verbreitung einer Spezies Rückschlüsse auf ihren klimatischen Toleranzbereich gezogen werden können (Kriticos et

al., 2015). Im Gegensatz zu vielen anderen Modellen dient CLIMEX jedoch nicht dazu, die von einer Population besiedelten Gebiete näher zu beschreiben, sondern die limitierenden Faktoren herauszuarbeiten, um somit auf Grundlage der klimatischen Eignung die äußersten Grenzen eines möglichen Verbreitungsgebietes zu ermitteln. Insbesondere im Kontext des Schädlingsmanagements können so Risikogebiete einer Invasion neuer Schädlinge identifiziert werden (Beddow et al., 2010). Dazu werden klimatische Wachstumsfaktoren und Stressoren einer Art zunächst auf Grundlage der bekannten Verbreitung und Literaturwerten ermittelt und anschließend im sog. „Ökoklimatischen Index“ („Ecoclimatic Index“ – EI) mit den jeweiligen Standortinformationen (Temperatur, Bodenfeuchte, ggf. Licht) verrechnet. Der Ökoklimatische Index gibt somit die klimatische Eignung eines Standortes für eine Spezies im Jahresverlauf auf einer Skala von 0 – 100 an, wobei ein EI von 30 bereits eine sehr gute Eignung bedeutet; ein EI von 100 ist dem Hersteller zufolge fast ausschließlich unter Laborbedingungen zu erreichen (Kriticos et al., 2015).

Als Grundlage für die ökoklimatischen Parameterprofile der hier betrachteten Arten (vgl. Tab. 2) dienen die in CLIMEX enthaltenen Templates (Kriticos et al., 2015), die bekannten Verbreitungsgebiete (z. B. FAO, 2021b) und Literaturdaten für diese oder verwandte Spezies (TANAKA, 1994; Magor & Roffey, 2003; Santiago-Alvarez et al., 2003; Olfert et al., 2011; Ren et al., 2016; Malakhov et al., 2018; Chen et al., 2020b; Nik et al., 2020). Ausgehend von den initialen Werten werden die Parameter manuell verändert und iterativ angepasst, bis die simulierte Verbreitung unter aktuellen Klimabedingungen mit der bekannten Verbreitung übereinstimmt (Kriticos et al., 2015).

Mit Hilfe der Parameter wird anschließend die Entwicklung von Populationen für die verschiedenen klimatischen Bedingungen der sechs definierten Klimawandelszenarien untersucht. Da die Untersuchung zunächst für eine erste Einschätzung des Gefahrenpotentials durch Heuschrecken dienen soll, werden lediglich die 20 Standorte betrachtet, für die in CLIMEX bereits Klimadaten aus Messstationen hinterlegt sind. Diese sind Berlin, Bremen, der Brocken, Dresden, Frankfurt, Freiburg, Hamburg, Hannover, Helgoland, Hof, Kassel, Kiel, Köln, Leipzig, Lüneburg, München, Münster, Nürnberg, Stuttgart und die Zugspitze (s. Abb. 3).

Tab. 1. Definierte Klimawandelszenarien aus der Kombination der gewählten Klimaprojektionen und Betrachtungszeiträume sowie Änderungen in Temperatur und Niederschlag nach Helmholtz-Zentrum Geesthacht (2021)

Szenario	Projektion	Zeitraum	Temperaturänderung [°C]		Niederschlagsänderung [%]	
			Winter	Sommer	Winter	Sommer
1	RCP2.6	2021-2050	+1	+1.4	+12	-11
2	RCP2.6	2071-2100	+1.2	+1.2	+13	-5
3	RCP4.5	2021-2050	+1.2	+1.4	+9	-4
4	RCP4.5	2071-2100	+2.5	+2.2	+18	-8
5	RCP8.5	2021-2050	+2.2	+1.4	+23	-3
6	RCP8.5	2071-2100	+4	+4	+19	-17

| Tab. 2. Ökologische Parameter für *Calliptamus italicus* (L., 1758), *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815) und *Locusta migratoria* (L., 1758)

Parameter	<i>Calliptamus italicus</i>	<i>Dociostaurus maroccanus</i>	<i>Locusta migratoria</i>
DV0 Unterer Grenzwert Temperatur [°C]	10	12	12
DV1 Unterer Optimalwert Temperatur [°C]	17	17	15
DV2 Oberer Optimalwert Temperatur [°C]	28	37	26
DV3 Oberer Grenzwert Temperatur [°C]	35	39	30
SM0 Unterer Grenzwert Bodenfeuchte	0,01	0,0001	0,01
SM1 Unterer Optimalwert Bodenfeuchte	0,03	0,001	0,1
SM2 Oberer Optimalwert Bodenfeuchte	0,3	0,7	0,3
SM3 Oberer Grenzwert Bodenfeuchte	0,5	0,9	0,6
DPD0 Diapause-einleitende Tageslänge [h]	10	10	11
DPT0 Diapause-einleitende Temperatur (durchschnittl. wöchentliches Maximum) [°C]	11	10	5
DPT1 Diapause-beendende Temperatur (durchschnittl. Wöchentliches Maximum) [°C]	6	10.5	0
DPD Entwicklungstage in der Diapause	90	30	-90
DPSW Sommer- oder Winterdiapause („0“ für Winter-, „1“ für Sommerdiapause)	0	0	0
TTCS Kältestress Grenzwert Temperatur [°C]	-18	3	-18
THCS Kältestress Akkumulationsrate	-0,0001	-0,0001	-0,0001
DTCS Kältestress Grenzwert Grad-Tage	15	15	15
DHCS Kältestress Akkumulationsrate 2	-0,0001	-0,00005	-0,0001
TTHS Hitzestress Grenzwert Temperatur [°C]	35	39	32
THHS Hitzestress Akkumulationsrate	0,0005	0,002	0,0005
DTHS Hitzestress Grenzwert Grad-Tage	0	0	0
DHHS Hitzestress Akkumulationsrate 2	0	0	0
SMDS Trockenstress Grenzwert Bodenfeuchte	0,01	0	0,01
HDS Trockenstress Akkumulationsrate	-0,003	0	-0,001
SMWS Nässestress Grenzwert Bodenfeuchte	0,6	1	0,9
HWS Nässestress Akkumulationsrate	0,0038	0,0015	0,005
DTCW Kalt-Nass Grenzwert Grad-Tage	-	15	22
MTCW Kalt-Nass Grenzwert Bodenfeuchte	-	0,6	0,6
PCW Kalt-Nass-Stress Akkumulationsrate	-	0,01	0,008

Landwirtschaftliches Risikopotential

Um die potentielle Gefährdung der Landwirtschaft zu bestimmen, werden die betrachteten Standorte in das frei verfügbare Geoinformationssystem QGIS übertragen und mit Landnutzungsdaten abgeglichen. Hierzu wird der Datensatz CORINE Land Cover 5 ha (CLC5 2018) (Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020) verwendet, der die Landoberfläche nach ihrer Nutzungsart in verschiedene Klassen differenziert. Für die vorliegende Untersuchung wird die Klasse 2 betrachtet, welche die landwirtschaftlich genutzten Flächen beinhaltet. Da die einzelnen Standorte keine flächige Untersuchung ermöglichen, wird für den Abgleich ein Puffer um die Standorte gelegt. Dies beruht auf der Annahme, dass ein untersuchter Standort das Mesoklima der umliegenden Fläche in einer gewissen Entfernung repräsentiert. Mesoklimatische Räume werden üblicherweise in einer Größenordnung zwischen 100 km² und 10.000 km² betrachtet. In der vorliegenden Untersuchung werden keine Geländedaten einbezogen, die das Mesoklima beeinflussen, weshalb große Flächen mit

Unsicherheiten belegt sind. Andererseits soll im Rahmen der Risikoeinschätzung eine großzügig ausgelegte Betrachtung stattfinden (Deutscher Bundestag, 2019). Es wird daher eine Fläche im mittleren Bereich der Spannweite gewählt und der Radius der Pufferzonen auf 30 km bemessen (hieraus ergibt sich eine jeweilige Fläche von ca. 2.800 km²). Anschließend werden die gebildeten Pufferflächen mit den Flächen der einzelnen Landnutzungsarten (nicht bewässertes Ackerland, Weinbauflächen, Obst- und Beerenobstbestände, Wiesen und Weiden) verschnitten und die Schnittfläche berechnet.

Ergebnisse

Der Einfluss der betrachteten Klimaveränderungen auf die Eignung der Standorte für die Italienische Schönschrecke wird in den Szenarienbildern in Abb. 4 dargestellt. Die Größe der blauen Marker gibt dabei den Ökologischen Index an, der mit zunehmendem Klimawandel und fortschreitender Zeit tendenziell steigt. Bei den mit einem × dargestellten Messpunkten handelt es sich teilweise um Standorte im Gebirge

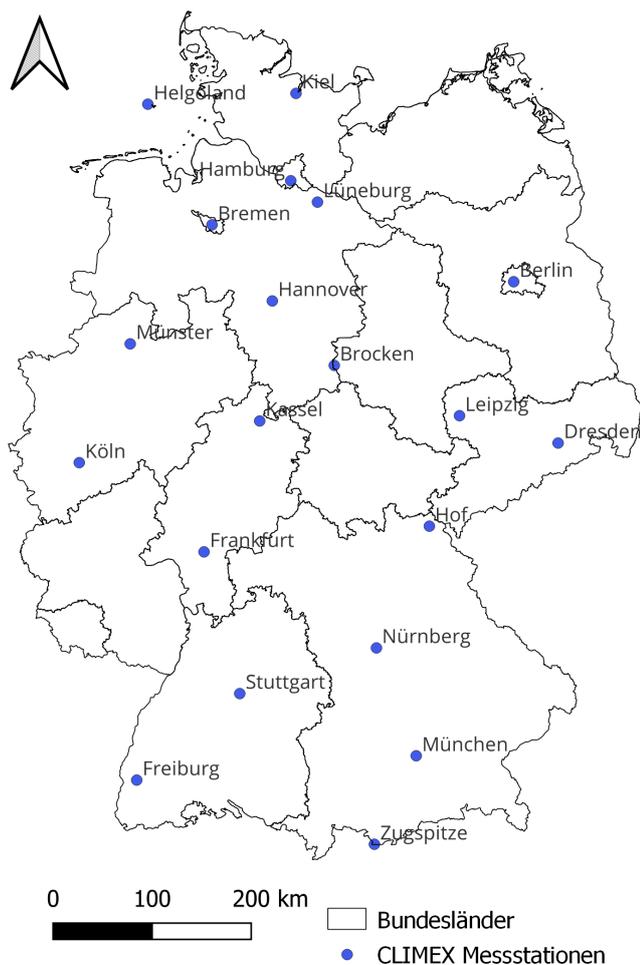


Abb. 3. Die in der Untersuchung betrachteten Standorte

(z. B. Brocken, Zugspitze), die aufgrund ihrer Höhenlage keine geeigneten Temperaturen erreichen.

Die Modellierung für die Marokkanische Wanderheuschrecke ergibt in den ersten fünf Szenarien für alle Standorte einen EI = 0. Im sechsten Szenario erreicht Köln als einziger Standort mit einem EI = 30 eine klimatische Eignung für diese Art (vgl. Abb. 5).

Für die Europäische Wanderheuschrecke liegen ab dem dritten Szenario vereinzelt EI-Werte > 0 vor, die höchsten Werte werden im sechsten Szenario erzielt (vgl. Abb. 6). Hier besitzt Köln mit einem EI = 14 die beste Eignung.

Zur Feststellung möglicher Auswirkungen auf die Landwirtschaft werden die potentiell betroffenen Regionen (Pufferzone mit 30 km Radius) in das Geoinformationssystem QGIS übertragen und mit den landwirtschaftlich genutzten Flächen verschnitten, d. h. es wird die Schnittfläche ermittelt. Die deutschlandweiten Flächen der betrachteten Landnutzungsarten sowie die untersuchten Standorte mit den gebildeten Pufferzonen sind in Abb. 7 dargestellt.

Neben der absoluten Fläche werden die Anteile der betroffenen Fläche an der Gesamtfläche der jeweiligen Nutzungsart ermittelt. Diese beträgt nach eigener Berechnung 12.870.000 ha für nicht bewässertes Ackerland, 127.062 ha für Weinbau, 195.727 ha für Obst- und Beerenobstanlagen und 6.430.700

ha für Wiesen und Weiden. Die ermittelten Flächen in absoluten und relativen Werten pro Standort und Landnutzungsart sind in Tab. 3 dargestellt. Fett hervorgehoben sind dabei diejenigen Standorte, die in mindestens einem Szenario durch Heuschreckenvorkommen betroffen sind.

Der Abgleich der klimatisch geeigneten Gebiete mit landwirtschaftlich genutzten Flächen ergibt, dass bundesweit ca. 23 % der Ackerfläche, 15 % der Rebfläche, 24 % der Obst- und Beerenobstbestände und 9 % der Wiesen und Weiden an Standorten liegen, die sich klimatisch potentiell für die Ausbreitung der untersuchten Feldheuschreckenarten eignen.

Diskussion

Aufgrund der durchgeführten Modellierung ist davon auszugehen, dass in Hinblick auf die klimatische Veränderung in nahezu allen Regionen Deutschlands geeignete Habitate für *C. italicus* entstehen werden. Bei den mit einem × dargestellten Messpunkten handelt es sich teilweise um Standorte im Gebirge (z. B. Brocken, Zugspitze), die aufgrund ihrer Höhenlage allerdings keine geeigneten Temperaturen erreichen.

Kritisch ist anzumerken, dass die Modellierung der Artverbreitung mit der verwendeten Methode auf klimatischen Bedingungen beschränkt ist; andere Habitatfaktoren sowie ökologische Gesichtspunkte werden in der Untersuchung nicht berücksichtigt. Da es sich um eine großskalige Untersuchung handelt, die erste Erkenntnisse über mögliche Ausbreitungsräume der betrachteten Arten in ganz Deutschland liefern soll, ist die Beschränkung der Untersuchung auf klimatische Parameter als Prädiktorvariablen jedoch nicht unüblich (Araújo et al., 2019). Empirische Studien zu den Ausbreitungsgebieten zweier weiterer Heuschreckenarten deuten zudem darauf hin, dass diese Arten in den letzten Jahren immer nördlichere Gebiete besiedeln und stützen somit die vorliegenden Modellierungsergebnisse (Treiber, 2011; Renker et al., 2020). Die Modellierung mit CLIMEX bietet somit eine gute Möglichkeit für eine erste Abschätzung des Gefahrenpotentials sowie insbesondere bei mangelnden explizit räumlichen Daten. Bei der Feststellung eines erhöhten Gefahrenpotentials für bestimmte Gebiete ist eine nähere Untersuchung unter Berücksichtigung weiterer (ökologischer) Prädiktorvariablen angeraten, um genauere Vorhersagen treffen zu können.

Weiterhin ist zu berücksichtigen, dass CLIMEX keine Gewichtung der verwendeten Parameter zulässt. Somit können die verwendeten Parameterwerte auf die jeweilige Spezies angepasst werden, nicht aber das Gewicht der Parameter in der Indexberechnung. Es kann somit nicht ausgeschlossen werden, dass Parameter in die Berechnung einfließen, die für eine bestimmte Spezies irrelevant oder weniger einflussreich sind. Aufgrund der Artinformationen, die sich aus der Literaturrecherche ergeben haben sowie der bereits erfolgreich durchgeführten Anwendung der Software für die Modellierung von Heuschreckenpopulationen (Olfert et al., 2011; Tu et al., 2013), wird dies allerdings als unproblematisch eingeschätzt.

Insbesondere aufgrund ihrer wichtigen Rolle im trophischen Gefüge sind zunächst positive Effekte einer anwachsenden *Calliptamus*-Population zu erwarten. Insbesondere (Agrar-)

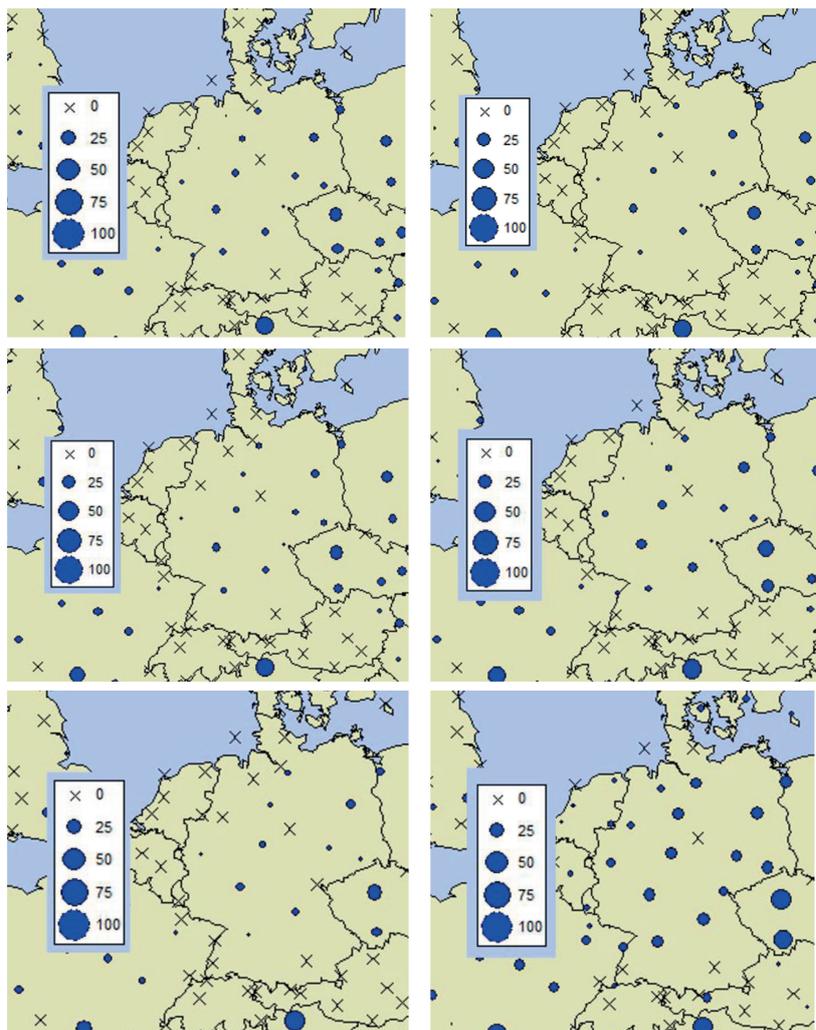


Abb. 4. Ökologischer Index (EI) der untersuchten Standorte für die Italienische Schönschrecke in den sechs Klimawandelszenarien. Obere Reihe: RCP2.6, mittlere Reihe: RCP4.5, untere Reihe: RCP8.5. Linke Spalte: Zeitraum 2021-2050, rechte Spalte: Zeitraum 2071-2100.

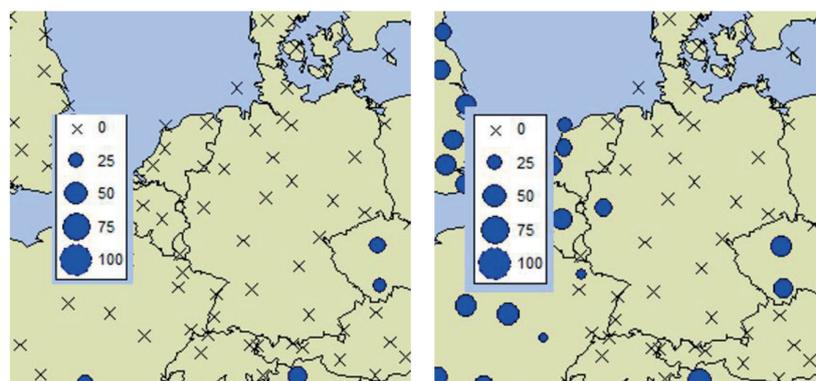


Abb. 5. Ökologischer Index der untersuchten Standorte für die Marokkanische Wanderheuschrecke. Links: Szenario 1 (RCP2.6, 2021-2050), rechts: Szenario 6 (RCP8.5, 2071-2100)

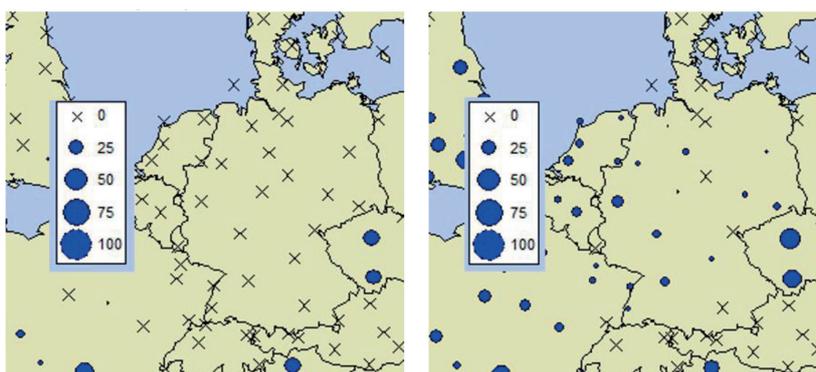


Abb. 6. Ökologischer Index der betrachteten Standorte für die Europäische Wanderheuschrecke. Links: Szenario 1 (RCP2.6, 2021-2050), rechts: Szenario 6 (RCP8.5, 2071-2100)

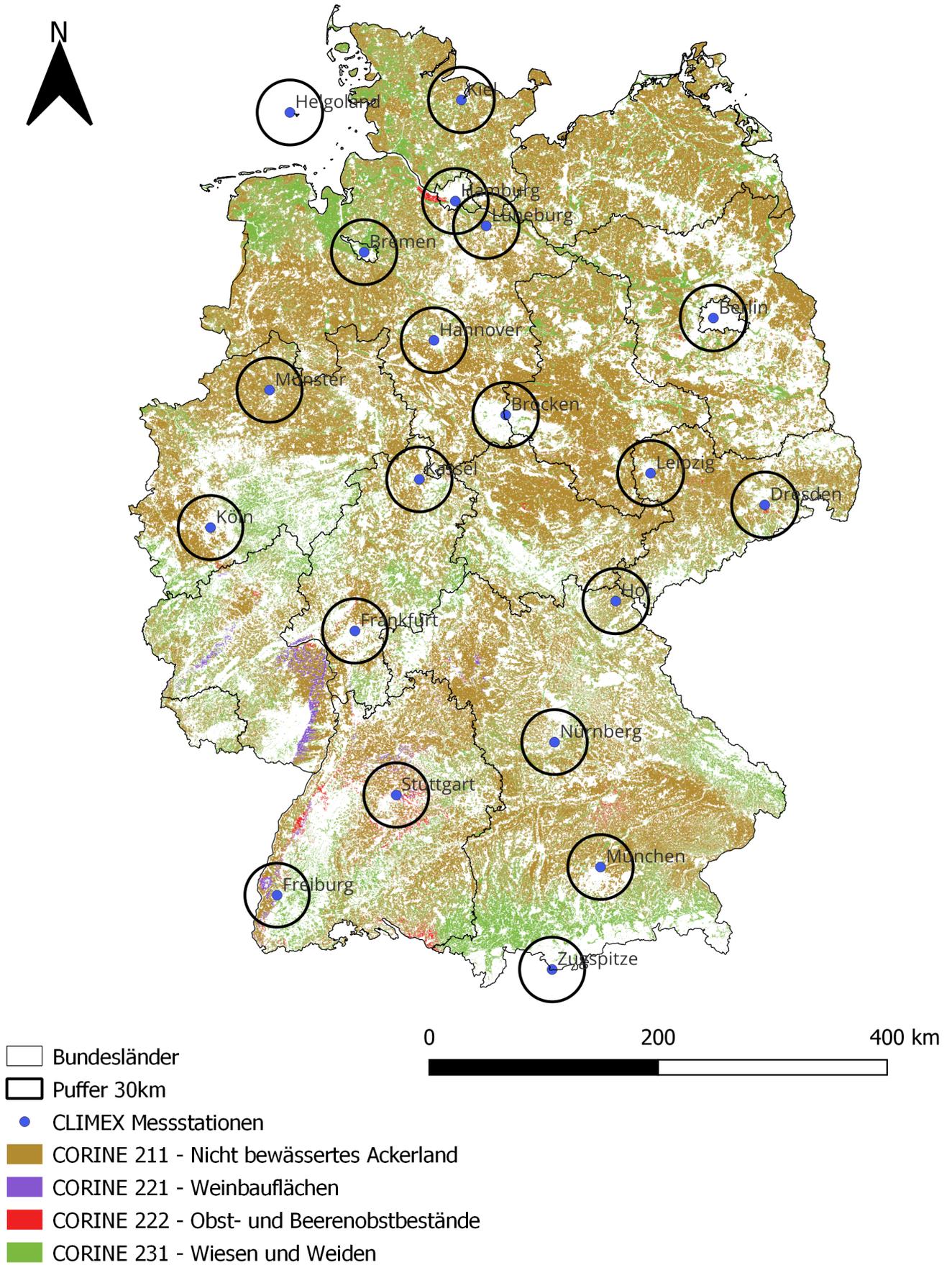


Abb. 7. Abgleich der Pufferzonen um die betrachteten Standorte mit landwirtschaftlich genutzten Flächen. Geodaten von GADM (2015) und GeoBasis-DE (2018).

Tab. 3. Potentiell betroffene Landwirtschaftsflächen in [ha] und [%] der jeweiligen Gesamtfläche pro Landnutzungsart im Bundesgebiet

Betroffene Flächen	Nicht bewässertes Ackerland		Weinbau		Obst- und Beerenobst		Wiesen und Weiden	
	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]	[ha]	[%]
Helgoland	0	0,0	0	0,0	0	0,0	0	0,0
Kiel	127.620	1,0	0	0,0	72	0,0	50.226	0,8
Hamburg	89.115	0,7	0	0,0	7.901	4,0	49.300	0,8
Lüneburg	152.680	1,2	0	0,0	180	0,1	43.325	0,7
Bremen	362.564	2,8	0	0,0	71	0,0	39.800	0,6
Berlin	89.349	0,7	6	0,0	288	0,1	35.533	0,6
Hannover	270.405	2,1	0	0,0	137	0,1	26.718	0,4
Münster	295.878	2,3	0	0,0	24	0,0	30.862	0,5
Brocken	415.968	3,2	0	0,0	414	0,2	25.768	0,4
Kassel	138.170	1,1	0	0,0	847	0,4	35.919	0,6
Leipzig	387.819	3,0	15	0,0	429	0,2	26.013	0,4
Köln	124.092	1,0	0	0,0	616	0,3	32.832	0,5
Dresden	255.154	2,0	113	0,1	2.151	1,1	47.432	0,7
Frankfurt	112.745	0,9	453	0,4	4.290	2,2	27.121	0,4
Hof	85.945	0,7	0	0,0	0	0,0	46.760	0,7
Nürnberg	97.300	0,8	0	0,0	205	0,1	41.670	0,6
Stuttgart	77.379	0,6	5575	4,4	25.820	13,2	24.446	0,4
München	216.104	1,7	0	0,0	62	0,0	27.377	0,4
Freiburg	38.785	0,3	1.2674	10,0	4.439	2,3	43.024	0,7
Zugspitze	0	0,0	0	0,0	0	0,0	22.289	0,3
∑ alle	3.337.072	25,9	18.836	14,8	47.946	24,5	676.415	10,5
∑ betroffene Gebiete	2.993.348	23,3	18.836	14,8	47.812	24,4	576.523	9,0

Vögel und andere Insektenfresser wie beispielsweise Eidechsen können von einem reichen Angebot an Feldheuschrecken wiederum profitieren.

Damit aber von einer Heuschreckenpopulation eine Gefährdung für landwirtschaftliche Kulturen ausgeht, sind Massenvermehrungen notwendig. Diese hängen allerdings von zeitlich begrenzten Witterungsbedingungen ab und können daher nicht durch die langfristigen Klimamodelle der verwendeten Software modelliert werden. Sie kommen insbesondere vor, wenn nach einer Dürreperiode durch extreme Wetterereignisse plötzlich sehr gute Bedingungen für die Insekten herrschen (Yu et al., 2009). Aus den Erfahrungen der letzten Jahre und zahlreichen wissenschaftlichen Studien ist zu erwarten, dass der Klimawandel in Deutschland genau diese extremen Wetterbedingungen verstärken wird (Umweltbundesamt, 2015; Yang & Sarfaty, 2016; Salih et al., 2020). Trotzdem ist nach aktuellem Stand nicht davon auszugehen, dass derartige Massenvorkommen von *C. italicus* in Deutschland auftreten werden. Grund hierfür wären bisher fehlende xerotherme Brachflächen, auf denen die Heuschrecken sich in ausreichender Menge vermehren könnten (Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz, 2013). Solange es an diesen mangelt, ist ein Entstehen von Heuschreckenschwärmen in Deutschland nicht zu erwarten (Bauer, 2021). Für eine zuverlässigere Einschätzung

des Auftretens von Heuschreckenschwärmen sollten weiterführende Untersuchungen durchgeführt werden. Hierzu wäre beispielsweise eine Kombination von Modellen wie CLIMEX und MaxEnt empfehlenswert, um sowohl Klimaprojektionen als auch Habitatparameter betrachten zu können (Byeon et al., 2018).

Aktuelle Studien zur Anpassung Deutschlands an den Klimawandel formulieren allerdings ausdrücklich die Notwendigkeit, extensive, großflächige Weidesysteme auszubauen und Grünbrachen zu schaffen (Renner et al., 2021). Laut Tscharncke sind mindestens 20 % der Agrarlandschaftsfläche für naturnahe Lebensräume bereit zu stellen, um die Biodiversität zu schützen (Tscharncke, 2021). Bislang beträgt der Anteil von Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert an der Agrarlandschaftsfläche etwas über 13 % (Bundesamt für Naturschutz, 2021). Bei einer Ausweitung entsprechend der genannten Forderungen können großflächige Vermehrungsgebiete entstehen, sodass Massenvermehrungen von Feldheuschrecken in Deutschland in Zukunft möglich wären. Bei der Planung größerer Brachflächen könnten Heuschreckenvermehrungen daher direkt mitgedacht und entsprechende ökologische Eindämmungsmaßnahmen mit eingeplant werden. Auch Agrarflächen, die für Photovoltaik-Freiflächenanlagen bereitgestellt werden, können möglicherweise Vermehrungsgebiete für Heuschrecken darstellen, wie eine Studie

des Bundesverbandes Neue Energiewirtschaft nahelegt (Peschel et al., 2019). Demnach trägt die extensive Pflege dieser Flächen zu einer lokalen Erholung der Biodiversität und der vermehrten Abundanz auch gefährdeter Arten wie beispielsweise der Italienischen Schönschrecke bei (Peschel et al., 2019). Bislang liegen jedoch nur wenige wissenschaftliche Untersuchungen hierzu vor. Zudem sind die entsprechenden Flächen wiederum auf ihre klimatische Eignung hin zu prüfen, da Photovoltaik-Anlagen durch die Absorption von Sonnenenergie eine Abkühlung der Umgebungstemperatur sowie lokale Veränderungen des Niederschlags verursachen (Hu et al., 2016).

Bereits heute liegen entsprechende Brachflächen in südeuropäischen Steppengebieten wie der Ungarischen Tiefebene vor. Hier können sich Wanderheuschrecken wie *Calliptamus italicus* bei geeigneten klimatischen Bedingungen massenhaft vermehren. Es ist daher grundsätzlich vorstellbar, dass in jenen Gebieten wieder Heuschreckenschwärme entstehen und bis nach Deutschland vordringen, wie in früheren Jahrhunderten bereits geschehen. Eine weiterführende Untersuchung zu möglichen Vorkommen und Massenvermehrungen von Feldheuschrecken in Europa sowie zu zukünftigen potentiellen Migrationsrouten von Heuschreckenschwärmen wäre daher sinnvoll.

Sollte es zu einem massenhaften Auftreten von landwirtschaftsschädlichen Heuschrecken kommen, besteht grundsätzlich die Möglichkeit, durch die Anwendung von Insektiziden regulierend einzugreifen. Ein großflächiger Einsatz stellt jedoch eine starke Belastung für die betroffenen Ökosysteme dar, weshalb präventive Maßnahmen wie Erhebungsprogramme von hoher Relevanz sind. Dies gilt insbesondere bei der Schaffung neuer Brachflächen sowie für die bereits bestehenden Vermehrungsareale im Ausland und die möglichen Migrationsrouten nach Deutschland.

Fazit

Durch den Klimawandel in Deutschland ist mit einem Populationsanstieg von *Calliptamus italicus* in verschiedenen Regionen Deutschlands zu rechnen. Die verstärkte Abundanz der Insekten ist aufgrund ihrer wichtigen Rolle in der Trophiekette grundsätzlich als positiv zu bewerten. Massenauftritte sind nach derzeitigem Stand als unwahrscheinlich anzusehen, können jedoch durch die Schaffung von Brachflächen im Zuge der Klimaanpassung und des Umweltschutzes gefördert werden. Da hierdurch negative Effekte für die Landwirtschaft zu erwarten sind, sollten entsprechende Konzepte entwickelt und Erhebungsprogramme betrieben werden, um Massenvermehrungen vorzubeugen und im Ereignisfall eine schnelle Regulation der Population erzielen zu können.

Danksagung

Die Autor:innen danken Prof. Dr. Thomas Fartmann von der Deutschen Gesellschaft für Orthopterologie, Dr. Martin Husemann von der Abteilung für Entomologie der Universität Hamburg und Petra Mahrenholz vom KomPASS des Umweltbundesamtes für die bereitwillige Auskunft und die wertvollen Hinweise zur Untersuchung. Weiterhin danken wir Prof.

Dr. Thomas Fartmann und Dr. Dominik Poniatowski von der Universität Osnabrück für die freundliche Bereitstellung des Bildmaterials zur Ausbreitung von *C. italicus*.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autorinnen und Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Aragón, P., J.M. Lobo, 2012: Predicted effect of climate change on the invasibility and distribution of the Western corn root-worm. *Agricultural and Forest Entomology* **14** (1), 13–18, DOI: 10.1111/j.1461-9563.2011.00532.x.

Araújo, M.B., R.P. Anderson, A. Márcia Barbosa, C.M. Beale, C.F. Dormann, R. Early, R.A. Garcia, A. Guisan, L. Maiorano, B. Naimi, R.B. O'Hara, N.E. Zimmermann, C. Rahbek, 2019: Standards for distribution models in biodiversity assessments. *Science Advances* **5** (1), eaat4858, DOI: 10.1126/sciadv.aat4858.

Asplen, M.K., G. Anfora, A. Biondi, D.-S. Choi, D. Chu, K.M. Daane, P. Gibert, A.P. Gutierrez, K.A. Hoelmer, W.D. Hutchison, R. Isaacs, Z.-L. Jiang, Z. Kárpáti, M.T. Kimura, M. Pascual, C.R. Philips, C. Plantamp, L. Ponti, G. Véték, H. Vogt, V.M. Walton, Y. Yu, L. Zappalà, N. Desneux, 2015: Invasion biology of spotted wing Drosophila (*Drosophila suzukii*): a global perspective and future priorities. *Journal of Pest Science* **88** (3), 469–494, DOI: 10.1007/s10340-015-0681-z.

Bauer, C., 2021: Klimawandelinduziertes Gefahrenpotential von Feldheuschrecken (Acrididae) als Schädlinge für die deutsche Landwirtschaft. Bachelorarbeit, Technische Hochschule Köln, 124 S.

Beddow, J.M., D. J. Kriticos, P. G. Pardey, R. Sutherst, 2010: Potential Global Crop Pest Distributions Using CLIMEX: HarvestChoice Applications.

Borries, J., N. Klappkarek, B. Ohm, 1995: Beitrag zum Vorkommen und zur Verbreitung von *Calliptamus italicus* (LINNÉ, 1758) in Brandenburg und Berlin. *Articulata* **10** (2).

Bundesamt für Bevölkerungsschutz und Katastrophenhilfe (BBK), Wissenschaftsforum, 2019: Wissenschaftsforum Band 9: Schutz Kritischer Infrastrukturen – Studie zur Versorgungssicherheit mit Lebensmitteln.

Bundesamt für Kartographie und Geodäsie, 2020: Neues im Bereich Open Data – CORINE Land Cover 5 ha (CLC5). Zugriff: 23. Juli 2021, URL: https://www.bkg.bund.de/SharedDocs/Produktinformationen/BKG/DE/P-2020/200408_CLC5.html.

Bundesamt für Naturschutz, 2021: Anteil der Landwirtschaftsflächen mit hohem Naturwert (High Nature Value Farmland) an der gesamten Agrarlandschaftsfläche. Zugriff: 9. Februar 2022, URL: <https://www.bfn.de/karten-und-daten/anteil-der-landwirtschaftsflaechen-mit-hohem-naturwert-high-nature-value-farmland>.

Byeon, D., S. Jung, W.-H. Lee, 2018: Review of CLIMEX and MaxEnt for studying species distribution in South Korea.

- Journal of Asia-Pacific Biodiversity **11** (3), 325–333, DOI: 10.1016/j.japb.2018.06.002.
- CABI, 2022:** *Locusta migratoria* (migratory locust). Zugriff: 27. Juni 2022, URL: <https://www.cabi.org/isc/datasheet/31151>.
- Caminade, C., J.M. Medlock, E. Ducheyne, K.M. McIntyre, S. Leach, M. Baylis, A.P. Morse, 2012:** Suitability of European climate for the Asian tiger mosquito *Aedes albopictus*: recent trends and future scenarios. *Journal of the Royal Society, Interface* **9** (75), 2708–2717, DOI: 10.1098/rsif.2012.0138.
- Carlone, M., D. Sestito, 2020:** 'There's nothing left' – Sardinian farmland stripped by locust swarms. Zugriff: 5. März 2021.507Z, URL: <https://newseu.cgtn.com/news/2020-06-25/-There-s-nothing-left-Sardinian-farmland-stripped-by-locust-swarms-RzaYxkBVuw/index.html>.
- Chen, C., J. Qian, X. Chen, Z. Hu, J. Sun, S. Wei, K. Xu, 2020a:** Geographic Distribution of Desert Locusts in Africa, Asia and Europe Using Multiple Sources of Remote-Sensing Data. *Remote Sensing* **12** (21), 3593, DOI: 10.3390/rs12213593.
- Chen, J., D. Cui, H. Ullah, K. Hao, X. Tu, Z. Zhang, 2020b:** Serpin7 controls egg diapause of migratory locust (*Locusta migratoria*) by regulating polyphenol oxidase. *FEBS open bio* **10** (5), 707–717, DOI: 10.1002/2211-5463.12825.
- Deutsche Welle, 2021:** Worst invasion of locusts in 60 years hits Sardinia | DW | 11.06.2019. Zugriff: 5. März 2021.495Z, URL: <https://www.dw.com/en/worst-invasion-of-locusts-in-60-years-hits-sardinia/a-49139894>.
- Deutscher Bundestag, 2019:** Bericht zur Risikoanalyse im Bevölkerungsschutz 2018, 144.
- DGfO, 2021:** Heuschrecken und Fangschrecken. Zugriff: 27. Juni 2021, URL: <http://dgfo-articulata.de/heuschrecken>.
- FAO, 2004:** Locusts in Canary Islands and Portugal: FAO. Zugriff: 10. März 2021.740Z, URL: <https://reliefweb.int/report/spain/locusts-canary-islands-and-portugal-fao>.
- FAO, 2021a:** Asian Migratory Locust (LMI) | Locust Watch in Caucasus and Central Asia | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Zugriff: 17. Juli 2021, URL: <http://www.fao.org/locusts-cca/bioecology/asian-migratory-locust-lmi/en/>.
- FAO, 2021b:** Distribution areas in CCA | Locust Watch in Caucasus and Central Asia | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Zugriff: 22. Juli 2021, URL: <http://www.fao.org/locusts-cca/bioecology/distribution-areas-in-cca/en/>.
- FAO, 2021c:** Moroccan Locust (DMA) | Locust Watch in Caucasus and Central Asia | Food and Agriculture Organization of the United Nations. Zugriff: 29. Juni 2021, URL: <http://www.fao.org/locusts-cca/bioecology/moroccan-locust-dma/en/>.
- Fischer, J., D. Steinlechner, A. Zehm, D. Poniatowski, T. Fartmann, A. Beckmann, C. Stettmer, 2020:** Die Heuschrecken Deutschlands und Nordtirols: Bestimmen, Beobachten, Schützen. 2. Auflage. Wiebelsheim: Quelle & Meyer.
- Frankfurter Allgemeine Zeitung, 2005:** „Beeindruckende Insektenwolken“. *Frankfurter Allgemeine Zeitung*.
- GADM, 2015:** Administrative Grenzen Deutschlands – Bundesländer. Zugriff: 28. Juli 2021, URL: <https://gadm.org/data.html>.
- GeoBasis-DE, 2018:** CORINE Land Cover 5 ha, Stand 2018. Zugriff: 22. Juli 2021, URL: <https://gdz.bkg.bund.de/index.php/default/digitale-geodaten/digitale-landschaftsmodelle/corine-land-cover-5-ha-stand-2018-clc5-2018.html>.
- Helmholtz-Zentrum Geesthacht, 2021:** Regionaler Klimaatlas Deutschland. Zugriff: 24. März 2021, URL: <https://www.regionaler-klimaatlas.de/>.
- Helmholtz-Zentrum hereon GmbH, 2021:** About EURO-CORDEX. Zugriff: 23. Juli 2021, URL: <https://www.euro-cordex.net/060374/index.php.en>.
- Hochkirch, A., A. Nieto, M. García Criado, M. Cáliz, Y. Braud, F. M. Buzzetti, D. Chobanov, B. Odé, J. J. Presa Asensio, L. Willemse, T. Zuna-Kratky, P. Barranco Vega, M. Bushell, M. E. Clemente, J. R. Correias, F. Dusoulier, S. Ferreira, P. Fontana, M. D. García, K.-G. Heller et al., 2016:** European Red List of Grasshoppers, Crickets and Bush-crickets. Luxembourg, 94.
- Hu, A., S. Levis, G.A. Meehl, W. Han, W.M. Washington, K.W. Oleson, B.J. van Ruijven, M. He, W.G. Strand, 2016:** Impact of solar panels on global climate. *Nature Climate Change* **6** (3), 290–294, DOI: 10.1038/nclimate2843.
- Köhler, G., H. Aßhoff, 2002:** Die Dissertation des Arnold Richertz von 1693 über Wanderheuschrecken – nicht nur ein Beitrag zur Jenaer Universitätsgeschichte. *Abhandlungen und Berichte des Museums der Natur Gotha* (22), 141–168.
- Kriticos, D.J., G. F. Maywald, T. Yonow, E. J. Zurcher, N. I. Herrmann, R. Sutherst, 2015:** CLIMEX Version 4: Exploring the effects of climate on plants, animals and diseases. Canberra, 177.
- Latchininsky, A.V., 1998:** Moroccan locust *Dociostaurus maroccanus* (Thunberg, 1815): A faunistic rarity or an important economic pest? *Journal of Insect Conservation* **2** (3/4), 167–178, DOI: 10.1023/A:1009639628627.
- Latchininsky, A.V., 2013:** Locusts and remote sensing: a review. *Journal of Applied Remote Sensing* **7** (1), 75099, DOI: 10.1117/1.JRS.7.075099.
- Maas, S., P. Detzel, A. Staudt, 2002:** Gefährdungsanalyse der Heuschrecken Deutschlands: Verbreitungsatlas, Gefährdungseinstufung und Schutzkonzepte; Ergebnisse aus dem F+E-Vorhaben 89886015 des Bundesamtes für Naturschutz. Münster, Landwirtschaftsverlag.
- Magor, J.I., J. Roffey, 2003:** Desert Locust Technical Series: Desert Locust Population Parameters. Rom, Plant Production and Protection Division, 35.
- Malakhov, D.V., N.Y. Tsyhuyeva, V.E. Kambulin, 2018:** Ecological modeling of *Locusta migratoria* L. breeding conditions in South-Eastern Kazakhstan. *Russian Journal of Ecosystem Ecology* **3** (1), DOI: 10.21685/2500-0578-2018-1-5.
- Malakhov, D.V., B.V. Zlatanov, 2020:** An Ecological Niche Model for *Dociostaurus maroccanus*, Thunberg, 1815 (Orthoptera, Acrididae): The Nesting Environment and Survival

- al of Egg-Pods. *Biosis: Biological Systems* **1** (1), 8–24, DOI: 10.37819/biosis.v1i1.48.
- Medina, H.E., A. Cease, E. V. Trumper, 2017:** The resurgence of the South American locust *Schistocerca gregaria*. *Metaleptea* **37** (3).
- Nik, N., E. Martono, N.S. Putra, Suputa, 2020:** Hatching of migratory locust (*Locusta migratoria*, L.) (Orthoptera: acrididae) eggs at several of texture and moisture levels in semi-field laboratory. *EurAsian Journal of BioSciences* (14), 4337–4345.
- Oberhessische Presse, 2015:** Heuschreckenplage nach Hitzewelle, URL: <https://www.op-marburg.de/Marburg/Heuschreckenplage-nach-Hitzewelle>.
- Olfert, O., R.M. Weiss, D. Kriticos, 2011:** Application of General Circulation Models to Assess the Potential Impact of Climate Change on Potential Distribution and Relative Abundance of *Melanoplus sanguinipes* (Fabricius) (Orthoptera: Acrididae) in North America. In: *Locusts and Grasshoppers: Behavior, Ecology, and Biogeography*. Latchininsky, A., G. Sword, M. Sergeev, M.M. Cigliano, M. Lecoq (Hrsg.), Hindawi Publishing Corporation, DOI: 10.1155/2011/578327.
- Peschel, R., T. Peschel, M. Marchand, J. Hauke, 2019:** Solar parks – Gewinne für die Biodiversität, 73.
- Pointe, E., 2021:** Two live locusts found on Turkish Airline flight ‘knocked down’. Seychelles Nation.
- Poniatowski, D., C. Beckmann, F. Löffler, T. Münsch, F. Helbing, M.J. Samways, T. Fartmann, 2020:** Relative impacts of land-use and climate change on grasshopper range shifts have changed over time. *Global Ecology and Biogeography* **29** (12), 2190–2202, DOI: 10.1111/geb.13188.
- Popova, E.N., S.M. Semenov, I.O. Popov, 2016:** Assessment of possible expansion of the climatic range of Italian locust (*Calliptamus italicus* L.) in Russia in the 21st century at simulated climate changes. *Russian Meteorology and Hydrology* **41** (3), 213–217, DOI: 10.3103/S1068373916030079.
- Qin, Y., Z. Li, L. Zhao, G. Fowler, Y. Fang, 2013:** The Current and Future Potential Geographical Distribution of the Italian Locust, *Calliptamus italicus* (Linnaeus) (Orthoptera: Acrididae) in China. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI Pt. II: 6th IFIP TC WG 5. 14 International Conference, CCTA 2012, Zhangjiajie, China, October 19-21, 2012*. Li, D., Y. Chen (Hrsg.), Berlin/Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 290–298, DOI: 10.1007/978-3-642-36137-1.
- Rai, A.N., A. Sharma, 2020:** Historical Overview of Locusts Attack in India: A Review Article. *International Journal of Agriculture System* **8** (2), 140–148.
- Ren, J.-L., X.-B. Tu, J. Ge, L. Zhao, Z.-H. Zhang, 2016:** Influence of temperature on the development, reproduction, and life table of *Calliptamus italicus* (L.) (Orthoptera: Acridoidea). *Journal of Asia-Pacific Entomology* **19** (1), 203–207, DOI: 10.1016/j.aspen.2015.12.016.
- Renker, C., K. Groh, M.A. Pfeifer, A. Wiese, 2020:** Neue Funde der Großen Schiefkopfschrecke – *Ruspolia nitidula* (Scopoli, 1786) (Orthoptera: Tettigoniidae) in Rheinland-Pfalz. *Mainzer naturwiss. Archiv* **56**, 243–248.
- Renner, K., U. Fritsch, M. Zebisch, M. Wolf, A. Schmuck, C. Ölmez, K. Schönthaler, L. Porst, M. Voß, A. Wolff, M. Jay, 2021:** Klimawirkungs- und Risikoanalyse für Deutschland 2021: Klimarisiken im Cluster Land, 339.
- Rohr, C., 2010:** Zur Wahrnehmung, Deutung und Bewältigung von Heuschreckenplagen in Mitteleuropa im Spätmittelalter und in der Frühen Neuzeit: auf der Grundlage des Vortrags vom 15.06.2010. *Umweltgeschichte in globaler Perspektive*, Universität Erfurt, 36.
- Rutschmann, F., 2021a:** Orthoptera.ch – *Calliptamus italicus*. Zugriff: 27. Juni 2021, URL: https://www.orthoptera.ch/arten/item/calliptamus-italicus?category_id=128.
- Rutschmann, F., 2021b:** Orthoptera.ch – *Locusta migratoria*. Zugriff: 27. Juni 2021, URL: https://www.orthoptera.ch/arten/item/locusta-migratoria?category_id=35.
- Salih, A.A.M., M. Baraibar, K. Kemucie Mwangi, G. Artan, 2020:** Climate change and locust outbreak in East Africa. *Nature Climate Change* **10** (7), 584–585, DOI: 10.1038/s41558-020-0835-8.
- Santiago-Alvarez, C., E. Quesada-Moraga, P. Hernandez-Crespo, 2003:** Diapause termination and post-diapause development in the Mediterranean locust *Dociostaurus maroccanus* (Orth., Acrididae) under field conditions. *Journal of Applied Entomology* **127** (6), 369–373, DOI: 10.1046/j.1439-0418.2003.00768.x.
- Simpson, S.J., G.A. Sword, 2008:** Locusts. *Current biology: CB* **18** (9), R364-6, DOI: 10.1016/j.cub.2008.02.029.
- Solter, L.F., J.J. Becnel, D. H. Oi, 2012:** Microsporidian Entomopathogens. In: *Insect pathology*. Vega, F.E., H.K. Kaya, Y. Tanada (Hrsg.), Amsterdam, Boston, Elsevier/Academic Press, S. 221–263.
- Steedman, A. (Hrsg.), 1990:** Locust handbook, Chatham.
- Stolyarov, M.V., 2000:** Massenvermehrungen von *Calliptamus italicus* L. in Südrußland im zwanzigsten Jahrhundert. *Articulata* **15** (1).
- zur Strassen, O. (Hrsg.), 1926:** Brehms Tierleben: Allgemeine Runde des Tierreichs.
- TANAKA, H., 1994:** Embryonic Diapause and Life Cycle in the Migratory Locust, *Locusta migratoria* L. (Orthoptera: Acrididae), in Kyoto. *Applied Entomology and Zoology* **29** (2), 179–191, DOI: 10.1303/aez.29.179.
- Tarai, N., S. Doumandji, 2009:** Feeding preferences of gregarious nymphs and adults of the Desert locust, *Schistocerca gregaria* Forskal (Orthoptera, Cyrtacanthacridinae) in different habitats at Biskra oasis, Algeria. *Advances in Environmental Biology* **3** (3), 308–313.
- Thüringer Ministerium für Landwirtschaft, Forsten, Umwelt und Naturschutz (Hrsg.), 2013:** Steppenlebensräume Europas: Gefährdung, Erhaltungsmaßnahmen und Schutz.
- Treiber, R., 2011:** Beobachtungen zur Ausbreitung der Vierpunktigen Sichelschrecke (*Phaneroptera nana* Fiber, 1853) am südlichen Oberrhein. *Naturschutz südl. Oberrhein* **6**, 151–152.

Tscharntke, T., 2021: Bedeutung einer vielfältigen und kleinteiligen Agrarstruktur 2 für die Biodiversität und ihre Förderung im Rahmen der 3 Gemeinsamen Europäischen Agrarpolitik (GAP): Studie im Auftrag der Fraktion B90/Grüne im Deutschen Bundestag.

Tu, X., Z. Li, Z. Zhang, Z. Wu, W. Ni, L. Fu, Y. Shali, 2013: The Potential Geographical Distribution of *Locusta migratoria tibetensis* Chen (Orthoptera: Acrididae) in Qinghai-Tibet Plateau. In: *Computer and Computing Technologies in Agriculture VI Pt. II: 6th IFIP TC WG 5. 14 International Conference, CCTA 2012, Zhangjiajie, China, October 19-21, 2012*. Li, D. und Y. Chen (Hrsg.), Berlin/Heidelberg, Springer Berlin Heidelberg, S. 343–351, DOI: 10.1007/978-3-642-36137-1.

Umweltbundesamt, 2015: Vulnerabilität Deutschlands gegenüber dem Klimawandel. Dessau-Roßlau, 689.

Umweltbundesamt, 2017: Leitfaden für Klimawirkungs- und Vulnerabilitätsanalysen: Empfehlungen der Interministeriel-

len Arbeitsgruppe Anpassung an den Klimawandel der Bundesregierung, 48.

van der Voo, L., 2021: ‘A scourge of the Earth’: grasshopper swarms overwhelm US west. The Guardian.

Warren, R., J. Price, A. Fischlin, S. de La Nava Santos, G. Midgley, 2011: Increasing impacts of climate change upon ecosystems with increasing global mean temperature rise. *Climatic Change* **106** (2), 141–177, DOI: 10.1007/s10584-010-9923-5.

Yang, Y.T., M. Sarfaty, 2016: Zika virus: A call to action for physicians in the era of climate change. *Preventive medicine reports* **4**, 444–446, DOI: 10.1016/j.pmedr.2016.07.011.

Yu, G., H. Shen, J. Liu, 2009: Impacts of climate change on historical locust outbreaks in China. *Journal of Geophysical Research* **114** (D18), DOI: 10.1029/2009JD011833.