

Sandra Krengel-Horney¹, Cornel Adler², Beatrice Berger³, Til Feike¹, Kerstin Flath³, Johannes Hausmann³, Daniel Herrmann⁴, Johannes Jehle⁵, Christoph Joachim³, Isabella Karpinski¹, Michael Maixner⁶, Markus Möller⁷, Madeleine Paap¹, Siegfried Schittenhelm⁷, Gritta Schrader⁸, Petra Seidel¹, Andreas Stahl⁹, Jörn Strassemeyer¹, Lena Ulber³, Dieter von Hörsten⁴, Christoph von Redwitz³, Jens Karl Wegener⁴, Nazanin Zamani-Noor³, Hella Kehlenbeck¹

Klimawandel und mögliche Herausforderungen für den Pflanzenschutz – Gestern, heute, morgen

Climate change and possible challenges for crop protection
– Yesterday, today, tomorrow

292

Zusammenfassung

Das Klima und die Witterung sind prägende Faktoren für den Pflanzenschutz. Bereits vor 100 Jahren haben sich Wissenschaftler im *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutzdienst* dieser Thematik gewidmet. Die Auswirkungen des Klimawandels sind ambivalent und es wird insgesamt zu einer Veränderung des Schaderregerspektrums kommen. Tendenziell werden Schäden durch Insekten, Krankheitserreger und wärmetolerante Unkräuter begünstigt. Das Risiko der Etablierung invasiver Arten nimmt zu. Ebenso kann die Wirksamkeit des biologischen Pflanzenschutzes beeinträchtigt und neue Verfahren erforderlich werden. Beim chemischen Pflanzenschutz wird sich das Wirkungsspektrum verschieben und

die Anforderungen an Applikationstechnik und -termin steigen. Starkregen kann das Risiko des Austrags von Pflanzenschutzmitteln in die Umwelt steigern. Auch in Mitteleuropa kann es verstärkt zu Befall mit Vorratschädlingen bereits im Feld kommen und die Qualität und Lagerstabilität der Ernteprodukte abnehmen. Insgesamt wird die Bedeutung präventiver Pflanzenschutzmaßnahmen zunehmen. Die Folgen des Klimawandels erhöhen die betriebs- und volkswirtschaftlichen Risiken und stellen alle Akteursebenen vor erhebliche Herausforderungen.

Stichwörter: Klimawandel, Pflanzenschutz, Pflanzengesundheit, Schadorganismen, Anpassung, Folgenabschätzung

Affiliationen

- ¹ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Kleinmachnow
- ² Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz, Berlin
- ³ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Ackerbau und Grünland, Braunschweig
- ⁴ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Anwendungstechnik im Pflanzenschutz, Braunschweig
- ⁵ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Biologischen Pflanzenschutz, Darmstadt
- ⁶ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenschutz in Obst- und Weinbau, Dossenheim
- ⁷ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Pflanzenbau und Bodenkunde, Braunschweig
- ⁸ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Braunschweig
- ⁹ Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Resistenzforschung und Stresstoleranz, Quedlinburg

Kontaktanschrift

Dr. Sandra Krengel-Horney, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für Strategien und Folgenabschätzung, Stahnsdorfer Damm 81, 14532 Kleinmachnow, E-Mail: sandra.krengel-horney@julius-kuehn.de

Zur Veröffentlichung eingereicht/angenommen

4. März 2021/18. Juni 2021

Abstract

Climate and weather are decisive factors for plant protection. Already 100 years ago, scientists dedicated themselves to this topic in the newsletter of the German Plant Protection Service. The effects of climate change are ambivalent and there will be an overall change in the pest spectrum. Damage caused by insects, pathogens and heat-tolerant weeds will tend to be favoured. The risk of invasive species becoming established increases. Similarly, the effectiveness of biological crop protection may be compromised and new methods may be required. In the case of chemical pesticides, the spectrum of active substances will shift and the demands on application technology and timing will increase. Heavy rains can increase the risk of pesticide run-off into the environment. There may be increased infestation with storage pests already in the field in Central Europe too, and the quality and storage stability of harvested products may decline. Overall, the importance of preventive plant protection measures will increase. The consequences of climate change increase operational and economic risks and pose considerable challenges for all levels of stakeholders.

Key words: Climate change, plant protection, plant health, harmful organisms, adaptation, impact assessment

Einführung

Das Klima und die jahresspezifische Witterung sind bestimmende Faktoren für den Pflanzenschutz. Bereits seit Beginn des Erscheinens des *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutzdienst*, dem Vorläufer des heutigen *Journal für Kulturpflanzen*, beschäftigten sich Beiträge mit klima- und witterungsbedingten Fragestellungen, unter anderem zum Auftreten von Pflanzenschädlingen (WILKE, 1921; 1924; GODAN, 1947). Bereits in diesen Beiträgen zeigte sich, dass Änderungen des Klimas oder besondere Witterungsbedingungen die Produktion von Kulturpflanzen und auch den Pflanzenschutz vor besondere Herausforderungen stellen. Eine erfolgreiche Anpassung an sich ändernde Bedingungen erfordert ein möglichst fundiertes und umfangreiches Wissen zu den beobachteten oder zu erwartenden Auswirkungen auf die Pflanze und ihre Schadorganismen sowie eine Bewertung möglicher Folgen angepasster Pflanzenschutzmaßnahmen, bei neuen Schadorganismen auch im Rahmen von Risikoanalysen. Ziel des vorliegenden Beitrags ist es daher eine Übersicht zu diesen Herausforderungen zu geben, die den Blick dabei in die Historie, Gegenwart und Zukunft richtet.

Auswirkungen auf den Pflanzenschutz

Einheimische Schadorganismen

Der Mensch beeinflusst durch die Ausweitung des Kulturpflanzenanbaus und intensive Reisetätigkeiten sowie

Gütertransporte in einer globalisierten Welt unmittelbar die geografische Verbreitung von Schadorganismen (BEBBER, 2015). Durch den Klimawandel kann es nachfolgend zur Etablierung der verschleppten Organismen in bislang klimatisch unpassenden Regionen und zu entsprechenden Veränderungen in dem Auftreten verschiedener Schaderreger kommen (BEBBER et al., 2013). Der Klimawandel beeinflusst aber auch unmittelbar die Populationsdynamiken von Schaderregern. So wurde bei Insekten als Folge wärmerer Temperaturen veränderte Wintermortalitäten, ein zeitigeres Auftreten im Frühjahr, eine Änderung der Reproduktionsperiode sowie schnellere Generationsfolgen mit mehr Generation je Jahr beobachtet, wobei solche Reaktionen auf Temperaturveränderungen artspezifisch sind (KIRITANI, 2013). Zum Beispiel besiedeln Blattläuse nach milden Wintern die Kulturpflanzen früher und tragen mehr Pflanzenviren in sich (ZIESCHE et al., 2020). Polyzyklische Schaderreger, wie der Traubenwickler (*Lobesia* sp.), können früher auftreten und durch eine schnellere Entwicklung eine größere Anzahl an Generationen ausbilden (HOFFMANN et al., 2008). Aber auch interspezifische Interaktionen können sich verändern, wie der Einfluss von Nützlingen auf die Populationsdynamik von Schädlingen (KIRITANI, 2013; AYRES & LOMBARDERO, 2000).

Zudem können wärmeliebende Insekten, wie Glasflügelzikaden (*Pentastiridius leporinus*, *Hyalesthes obsoletus*), Maiszünsler (*Ostrinia nubilalis*) oder Schwarzer Kohltriebbrüssler (*Ceutorynchus picitarsis*), ihre Lebensräume oder Wirtsspektren ausweiten und etablieren sich regional als „neue“ Schädlinge (Abb. 1). Das Klima beeinflusst ebenso die Phänologie der Kulturpflanzen (MAIXNER, 2014) und die Pflanzenabwehr gegenüber Schadorganismen. Schäden und Ertragsausfälle durch Insekten werden durch ein wärmeres Klima generell begünstigt (DEUTSCH et al., 2018).

Auch das Unkrautartenspektrum sowie die Abundanzen und Konkurrenzwirkungen einzelner Unkrautarten ändern sich klimabedingt (PETERS & GEROWITT, 2012). So treten wärmeliebende Unkrautarten, wie diverse Hirse-Arten (*Setaria/Digitaria* spp.), zunehmend auch im Maisanbau in Mittel- und Nordeuropa auf (WALTHER et al., 2002) und bisher seltene Arten, wie Samtpappel (*Abutilon theophrasti*) und Gemeiner Stechapfel (*Datura stramonium*), können sich ausbreiten (EDLER et al., 2015).

Eine klimabedingte Entwicklung ist auch bei pilzlichen Schaderregern festzustellen. Insbesondere das Management wärmeliebender Pilze, wie Kohlhernie (*Plasmodiophora brassicae*) und Weißstängeligkeit (*Sclerotinia sclerotiorum*) in Raps und Blattfleckenkrankheiten (*Cercospora beticola*) in Zuckerrüben, gewinnt an Bedeutung. Neue aggressive Rassen des Gelbrostes (*Puccinia striiformis*) mit verkürzter Generationsfolge (HOVMØLLER et al., 2016) und gefährliche Roggen- und Weizenschwarzrost (*P. recondita* und *P. graminis*) mit veränderter Rassenstruktur (OLIVERA FIRPO et al., 2017; FLATH et al., 2018) treten ebenso hervor. Klimatische Veränderungen werden auch mit der starken Zunahme der Esca-Krankheit



Abb. 1. Die Entwicklung einer genetischen Brennnessel-Wirtsrasse der Glasflügelzikade *Hyalothrips obsoletus*, eines Phytoplasmenvektors, wird auf die klimabedingte Verlängerung der Vegetationszeiten zurückgeführt. Foto: Maixner/JKI.



Abb. 2. Die Esca-Krankheit hat sich zu einem gravierenden Problem im Weinbau entwickelt. Foto: Maixner/JKI.

(Abb. 2) in Verbindung gebracht (FISCHER & PEIGHAMI ASHMAEL, 2019; KRAUS et al., 2019). Bei höheren Temperaturen werden früher reifende Trauben anfälliger gegen Fäulnis und assoziierten Essigfliegenbefall (KAST & RUPP, 2009; ENTLING & HOFFMANN, 2019). Einflüsse des Klimawandels auf multitrophische Interaktionen, wie zwischen Kulturpflanzen, Schaderregern und ihren Antago-

nisten oder Mikroorganismen, ihren Vektoren und Wirtspflanzen, bedürfen, besonders in den Dauerkulturen, eingehender Analyse (JOHANNESSEN et al., 2012; HOFFMANN et al., 2017; KRAUS et al., 2018).

Extremwetterereignisse können bei Schaderregern und von diesen verursachten Schadwirkungen weitere Effekte hervorrufen als die bisher für durchschnittliche

Veränderungen der Klimaänderungsfaktoren bekannten. Im komplexen Wirkungsgefüge der Komponenten „Pflanze-Schadereger-Umwelt-Anbau und Management“ beeinflussen sie einzelne Komponenten und deren Wechselbeziehungen. Das kann u. a. dazu führen, dass sich Lebewesen rascher verändern, um sich anzupassen (phänotypische Plastizität). Veränderte Verhaltensweisen und andere Reaktionen auf Maßnahmen sind die Folge. Aktuelle Beispiele sind z. B. ein veränderter, extrema-robusterer Morphotyp des Erregers der Septoria-Blattdürre an Weizen (*Zymoseptoria tritici*) (FRANCISCO et al., 2019) und veränderte Resistenzen verschiedener Kulturpflanzen unter Hitzestress (DESAINT et al., 2021). Weitere Beispiele sind in (SEIDEL, 2016; 2019; 2020) aufgeführt.

Etablierung pflanzengesundheitlich relevanter invasiver Arten

Mit der Verbesserung von Überwinterungsbedingungen durch verkürzte Frostperioden können sich neue Schadorganismen in Deutschland ansiedeln oder stärker ausbreiten und es kann zu einer Verschiebung der Schadensschwelle kommen. Bereits im ersten Erscheinungsjahr des *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutzdienst* stellt WILKE (1921) einen Zusammenhang zwischen den massiven Schäden der Runkelrübenmotte (*Phthorimaea ocellatella*, jetzt *Scrobipalpa ocellatella*) und der ausdauernden Trockenheit im Sommer 1921 fest, dieses wird einige Jahre später von SATTLER (1935) erneut beobachtet. Kurz nach dem zweiten Weltkrieg berichtet GODAN (1947) über die Abhängigkeit des Rapsdflahs (*Psylliodes chrysocephala*) von den klimatischen Bedingungen und führt den massiven Rückgang der Abundanz des Käfers auf den Einfluss des Winters 1946/47 und des Sommers 1947 zurück. Ein aktuelles Beispiel für die negativen Folgen eines klimawandelbedingten Temperaturanstiegs ist der Kiefernholznekrotode (*Bursaphelenchus xylophilus*), der im Zuge seiner Einschleppung in weiten Teilen Deutschlands durch den zu erwartenden Trockenstress der Kiefern zur Ausprägung der Kiefernwelke führen könnte (GRUFFUDD et al., 2019), selbst wenn die Erhöhung der mittleren Temperatur unter 2°C bleibt. Andererseits können die veränderten Klimabedingungen einen Rückgang bereits etablierter invasiver Arten bewirken, durch geringere Niederschläge im Sommer (z. B. Rückgang von Blattpilzen an Raps), zu hohe Temperaturen im Winter oder durch die Entkoppelung der Synchronisation von Schadorganismen und Wirtspflanzen (VON TIEDEMANN, 1996; SCHRADER & KEHLENBECK, 2011). Um Vorhersagen und damit verbundene Szenarioanalysen zur Etablierungswahrscheinlichkeit, zum Schadpotential und zur Ausbreitung sogenannter klimasensitiver Schadorganismen unter Berücksichtigung des Wirtspflanzenvorkommens besser treffen zu können, wird in dem seit 2019 am JKI laufenden BLE-Forschungsprojekt ProgRAMM ein prozessorientiertes Simulationsmodell entwickelt und ein Webdienst zur Unterstützung der Entscheidungsfindung in Anbau, Politik und Züchtung eingerichtet (HEß et al., 2020). Als Modellorganismen für das Projekt dienen zunächst nur

Insekten – die Mittelmeerfruchtfliege (*Ceratitis capitata*), die Marmorierete Baumwanze (*Halyomorpha halys*), die Tomatenwolllaus (*Pseudococcus viburni*), die Reiswanze (*Nezara viridula*), die Rote Austernschildlaus (*Epidiaspis leperii*) und der Baumwollkapselwurm (*Helicoverpa armigera*). Zukünftig soll das Modell auch auf andere Taxa übertragbar sein. So lassen beispielsweise Simulationen von Klimawandelszenarien für *H. halys* die Annahme zu, dass es zu einer Ausdehnung des Verbreitungsgebiets, zu einer Zunahme der Generationen pro Jahr, zu einem früheren Beginn der Aktivität von *H. halys* im Frühjahr und einer längeren Zeitspanne im Herbst für die Entwicklung der Nymphen kommen kann (STOECKLI et al., 2020).

Vorratsschutz

Die durch den Klimawandel verursachten Probleme der Land- und Forstwirtschaft kondensieren im Vorratsschutz, da das Ziel des Kulturpflanzenanbaus die Bereitstellung von Lebens-, Futter-, Arznei- und Genussmitteln ist (Tab. 1). Erträge werden unsicher durch Spätfröste, Frühjahrstrockenheit, Orkane, Überschwemmungen, Brände oder Hagel (COOK et al., 2004; MOSES et al., 2015). Dies kann für lokal und international höhere Preise durch Verknappung sorgen. Im extrem heißen und trockenen Sommer 2018 wurde erstmals in Deutschland ein Befall mit Kornkäfern (*Sitophilus granarius*) schon der Ähren auf dem Feld beobachtet, was auf eine direkte Auswirkung des Klimawandels hinweist. In tropischen und subtropischen Klimata ist es normal, dass Vorratsschädlinge bereits im Feld auftreten. In Deutschland waren aber bisher bei Getreide üblicherweise die Zeiten der Abreife und Trocknung im Feld so kurz, dass vorratsschädliche Insekten keine Chance für einen Befall erhielten. Außerdem gibt es Evidenz für den Zuflug tropischer und subtropischer Vorratsschädlinge aus Südeuropa, z. B. Maiskäfer (*Sitophilus zeamais*) und Getreidekapuziner (*Rhizopertha dominica*). Wenn Anfangsbefall vom Feld ins Lager eingebracht wird, sind eine andere Vorbehandlung und Lagerungstechnik zur Abtötung nötig. Dazu gehören z. B. intensive Reinigung, Prallung, hermetische Lagerung und Vakuumlagerung. Die durch den Insektenstoffwechsel erhöhte Feuchte fördert Fäulnis und Mykotoxine (STATHERS et al., 2013). Investitionen wären erforderlich, verbesserte Technik könnte als Exportartikel die deutsche Wirtschaft stärken. Eine Erhöhung der strategischen Lebensmittelreserve erscheint international angezeigt.

Veränderte Phänologie der Kulturpflanzen am Beispiel Winterweizen

Phänologische Phasen repräsentieren jährliche und periodisch wiederkehrende pflanzenphysiologische Ereignisse bzw. Pflanzenentwicklungsstadien (SCHMIDT et al., 2014). Da die Phänologie der Wirtspflanzen eine genotypische Komponente aufweist, die mit dem Klima interagieren kann, kann sich der Befallsgrad zwischen den Genotypen entsprechend ändern (EKHOLM et al., 2020; LEHMANN et al., 2020). Eine mögliche Erklärung für

Tab. 1. Anzeichen und mögliche Folgen des Klimawandels sowie Gegenstrategien im Vorratsschutz.

Zeichen des Klimawandels	Folgen (für den Vorratsschutz)	Gegenstrategien & Forschungsoptionen
Höhere Jahresmitteltemperatur	Stärkere Vermehrung wärmeliebender Arten (z. B. Getreidekapuziner, Maiskäfer), erhöhtes Vorkommen in Freiland und Vorratslager, da Temperaturverschiebung ins Optimum	Kühlung und Trocknung des Erntegutes; mehr Forschung und Entwicklung zu schädlingsfeindlicher Lagerung und Verpackung, zur Schädlingsausbreitung
Hitze und Trockenheit	Frühere Abreife bei Körnerfrüchten → Befall mit Vorratsschädlingen im Feld; Eintrag von Feldbefall ins Lager; höhere Schäden	Mehr Forschung z. B. zur Nutzung gezielter Infrarotwärme in Trocknern, zur Prallung, zur Lasertechnik (ADLER et al., 2019), zur hermetischen Baugestaltung, zu Vakuumlagerung (ADLER et al., 2016)
Temperatur- und Feuchte-schwankungen	Geringere Lagerfähigkeit, höhere Befallsanfälligkeit → höheres Risiko der Mykotoxinbildung	Besseres Monitoring; Nutzung physikalischer Methoden
Extremwetter allgemein	Dürreschäden und Brände, Überflutungen, Verwüstung etc. → geringere Ernten → höhere Preise; Hungerrevolten; unbewohnbare Landstriche; mehr Migration	Bessere Pufferung von Schwankungen durch mehr Lagerung (auch staatlich); international abgestimmte Sicherheitsarchitektur zur Krisenvorsorge (z. B. Forschung für das UN-WFP)

die Zunahme der Auswirkungen von Schadorganismen auf die jährlichen Ernten ist die Verringerung der phänologischen Einschränkungen, die mit der Klimaerwärmung verbunden sind. Dazu gehört beispielsweise die Verlängerung der Wachstumsaison einer Wirtspflanze durch kürzere und mildere Winter (BALE & HAYWARD, 2010). Dadurch können sich die Wechselwirkungen zwischen Schädlingen und Wirtspflanzen in landwirtschaftlichen Lebensräumen und den umgebenden Ökosystemen verstärken (SINGER & PARMESAN, 2010; COHEN et al., 2018).

Das Monitoring von phänologischen Ereignissen hat eine lange Tradition und wird weltweit in verschiedenen Regionen durchgeführt (SCHWARTZ et al., 2003; KOCH, 2010). Der Deutsche Wetterdienst (DWD) unterhält seit Jahrzehnten ein deutschlandweites Monitoringprogramm, in dem etwa 1.200 freiwillige Beobachter die Eintrittstermine von etwa 160 phänologischen Phasen in standardisierter Form melden (KASPAR et al., 2015). Die Anwendung von geostatistischen Methoden erlaubt die Überführung der punkthaften Informationen in phänologische Flächendatensätze (JEANNERET & RUTISHAUSER, 2010). Ein Beispiel ist das am JKI angewendete Modell PHASE (GERSTMANN et al., 2016). Das Modell koppelt einen Temperatursummenansatz mit einem geostatistischen Interpolationsverfahren. Als Ergebnis werden für Deutschland historische und aktuelle Starttermine phänologischer Phasen generiert, die für die Definition räumlich und zeitlich dynamischer Analysezeiträume verwendet werden können (MÖLLER et al., 2017; 2019; 2020). Abbildung 3 veranschaulicht die zeitliche Dynamik phänologischer Phasen am Beispiel der Eintrittstermine der Winterweizenphasen „Schossen“ und „Ährenschieben“ in der Uckermark zwischen 1993 und 2020. Die Abbildung zeigt auch, dass die Phasen in dem Betrachtungszeitraum insgesamt früher einsetzten, wobei hier der Einfluss der Weizensorten berücksichtigt werden muss (REZAEI et al., 2018).

Anpassung der Pflanzenschutzmaßnahmen

Vorbeugende Maßnahmen (Fruchtfolgen und Anbautechnik)

Pflanzenschutz ist weit mehr als der Einsatz chemischer Pflanzenschutzmittel. Die mit zunehmend extremeren Wetterbedingungen verbundenen größeren Anbau Risiken können durch eine höhere Agrobiodiversität verringert werden (GÖMANN et al., 2017). So lassen sich mit stärker diversifizierten Fruchtfolgen die Lebenszyklen von fruchtartspezifischen Schaderregern durchbrechen (KRUPINSKY et al., 2002; RUSCH et al., 2013) und die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln verringern. So sind weite Fruchtfolgen die wirksamste Bekämpfungsmaßnahme gegen *Diabrotica virgifera* (BAŽOK et al., 2021). Eines der vordringlichsten Ziele im Bereich der konventionellen landwirtschaftlichen Pflanzenproduktion zur Verringerung der Verwundbarkeit gegenüber dem Klimawandel besteht deshalb in der deutlichen Erweiterung der heute stark verengten Fruchtfolgen. Im ökologischen Landbau spielen vielfältige Fruchtfolgen traditionell eine wichtige Rolle. Wegen der unvorhersehbaren Anpassung von Schädlingen an eine sich verändernde Umwelt bestehen allerdings noch erhebliche Wissenslücken wie klimaresiliente Anbausysteme aussehen sollten, um beispielsweise die von einheimischen oder invasiven Schädlingen ausgehenden Risiken zu reduzieren, wenn sich diese unter dem Einfluss des Klimawandels schneller entwickeln können (LAMICHHANE et al., 2015). Für die Erweiterung des Kulturartenspektrums stehen im Bereich der Nahrungs- und Futterpflanzen, neben den in Vergessenheit geratenen Getreiden Emmer und Dinkel, insbesondere Leguminosen, wie Sojabohne, Lupine, Erbse, Bohne und Klee, zur Verfügung. Aufgrund ihrer Fähigkeit zur Anreicherung von Luftstickstoff im Boden besitzen Leguminosen einen hohen Vorfruchtwert. Die Vorteile aber auch Hemmnisse eines stärkeren Leguminosenanbaus wurden in einer kürzlich im *Journal für Kulturpflanzen*

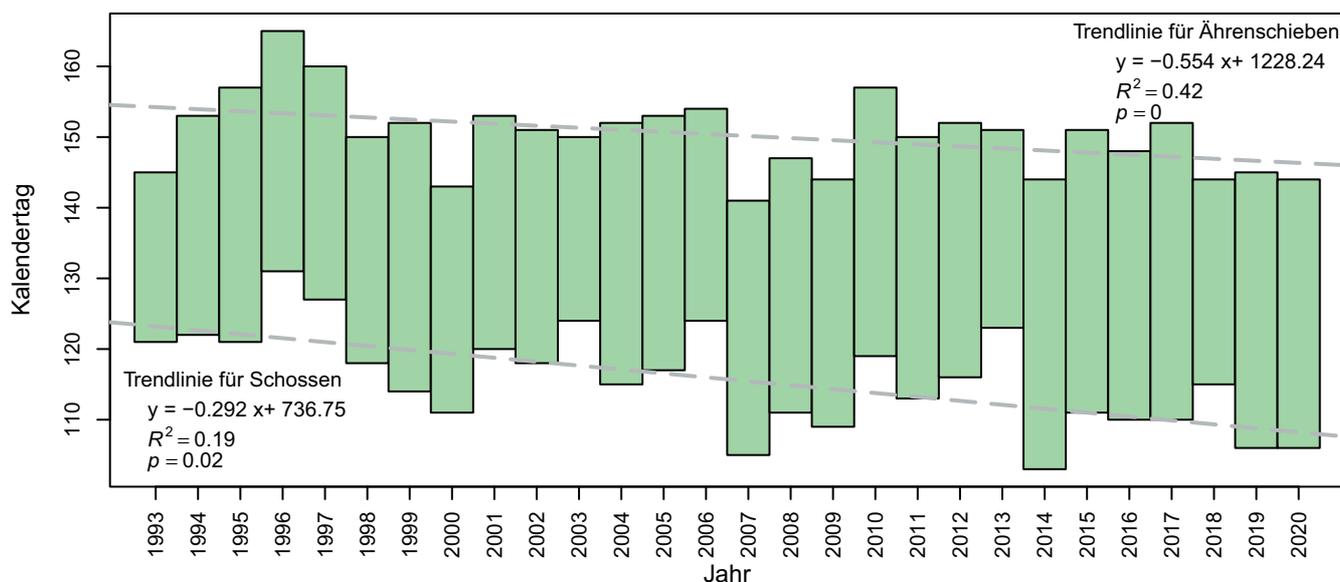


Abb. 3. Phänologische Fenster des Kreises Uckermark für die Phase Schossen (Winterweizen) zwischen 1993 und 2020. Die gestrichelten grauen Linien veranschaulichen den zeitlichen Trend der Start- und Endtermine der Phasen „Schossen“ und „Ährenschieben“.

veröffentlichten Meta-Studie aufgezeigt (BÖHM et al., 2020). Alternative Kulturen im Bereich der Energiepflanzen sind neben einjährigen Sorghumhirsen insbesondere auch Dauerkulturen, wie Durchwachsene Silphie, Miscanthus oder Riesenweizengras, sowie Agroforstsysteme, bei denen Ackerkulturen mit Gehölzen auf einer Fläche kombiniert werden. Dauerkulturen bewirken durch große Mengen an Ernte- und Wurzelrückständen sowie der fehlenden Bodenbearbeitung eine Erhöhung der Humusgehalte, eine schnellere Wasserinfiltration und mithin einen vorbeugenden Hochwasserschutz durch den besseren Wasserrückhalt in der Fläche. Der aussichtsreichen neuen Energiepflanze Durchwachsene Silphie hat das *Journal für Kulturpflanzen* 2016 ein ganzes Themenheft gewidmet (<https://doi.org/10.5073/JfK.2016.12>; SCHITTENHELM et al., 2016).

Neben der Fruchtfolgegestaltung hat auch die Anbautechnik einen Einfluss auf die Pflanzengesundheit. Bereits bei der Aussaat wird ein Grundstein gelegt, der auch einen maßgeblichen Einfluss auf den folgenden Pflanzenschutz hat. Nicht nur durch Sortenwahl oder Beizung, auch die Aussaattechnik hat eine große Bedeutung.

Vor diesem Hintergrund wird am JKI mit der Gleichstandsfaat (Abb. 4) eine Sätechnik entwickelt, die es ermöglichen soll, Getreide in besonders hoher Präzision auszusäen. Dabei haben die Einzelpflanzen den gleichen Abstand untereinander (Abb. 5). Dies wird durch eine Anordnung im Dreiecksverband sichergestellt (WEGENER et al., 2019). Diese Anordnung der Einzelpflanzen lässt beispielsweise eine höhere Nährstoff- und Wassernutzungseffizienz vermuten. So bietet die Sätechnik auch eine Möglichkeit, den Herausforderungen des Klimawandels zu begegnen.

Die Gleichstandsfaat bietet weitere Vorteile: Durch eine insgesamt geringere Bestandsdichte verändert sich das

Mikroklima, sodass möglicherweise pilzliche Infektionen gehemmt werden. Gleichmäßigeres Wachstum und fehlende Reihenstrukturen sorgen für einen früheren Bestandesschluss und somit eine bessere Unkrautunterdrückung. Auch ermöglichen die optimal entwickelten Einzelpflanzen durch stärkeres Wurzelwachstum bei der Gleichstandsfaat eine intensivere mechanische Unkrautbekämpfung und somit eine Herbizideinsparung (KOTTMANN et al., 2019). Dies sind bisher jedoch Arbeitshypothesen – wenn auch vielversprechende. Um die Thematik Gleichstandsfaat zu erforschen, wurde die JKI-interne Arbeitsgruppe „Neue Pflanzenbausysteme“ gegründet, mit dem Ziel, die vielfältigen Forschungsfelder des JKIs zu vereinen und die verschiedenen Aspekte der innovativen Sätechnik umfassend in Feldversuchen zu testen.

Resistenzzüchtung

Durch klimatische Veränderungen kann sich nicht nur das Spektrum von Pathogenen und Schädlingen wandeln, sondern auch der Zustand, in dem sich die Kulturpflanzen zum Zeitpunkt des Befalls befinden. Dies kann die Pathogenausbreitung, die Schadwirkung und die pflanzliche Prädisposition für eine Infektion sowohl begünstigen (z. B. durch höhere Temperaturen) als auch benachteiligen (z. B. fehlende Blattflechte). Obwohl der Nettoeffekt klimatischer Veränderungen auf das Infektionsgeschehen im Pathosystem nur mit Unsicherheiten zu prognostizieren ist (PRANK et al., 2019; BEBBER, 2015), zeigt beispielsweise eine Simulation für Schwarzrost, der aktuell in Deutschland nicht weitverbreitet ist, dass im globalen Mittel höhere Temperaturen und eine geringere Luftfeuchtigkeit sowie verstärkte Turbulenzen zu einer 40 %igen Erhöhung der Uredosporen-Emission führen können. Ferner wird durch geringeren Frost eine Aus-



Abb. 4. Prototyp einer Sämaschine zur Gleichstandsaat. Zwei-balkiger Aufbau für einen engen Reihenabstand von 7,6 cm und präziser Tiefenführung für optimale Aussaatbedingungen. Foto: Herrmann/JKI.

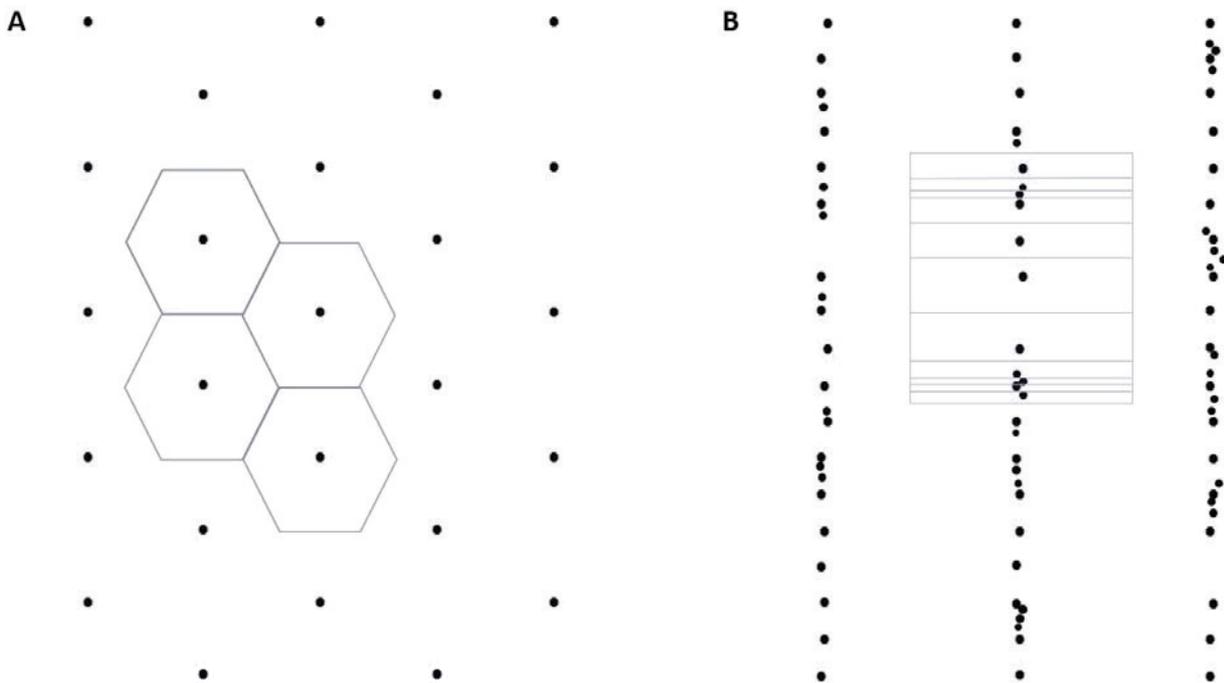


Abb. 5. Schematischer Vergleich unterschiedlicher Sätechniken. A) Gleichstandsaat: Anordnung der Pflanzen in einem hexagonalen Muster mit homogenen Abständen in und zwischen den Reihen, B) Konventionelle Drillsaat: Höhere Bestandesdichte und Aussaat in Reihen. Dadurch heterogene Pflanzenabstände in der Säreihe. Abbildung: Herrmann/JKI.

dehnung des Überwinterungsangebots für Pilze angenommen (PRANK et al., 2019). Stochastisch betrachtet ist mit zunehmender Vermehrung der Pathogene die Wahr-

scheinlichkeit für das Auftreten von pathogeneitigen Mutationen und damit für das Überwinden von Resistenzen erhöht.

Aufgrund solcher evolutiver Anpassungsprozesses der Pathogene und Schädlinge, besteht für die Züchtung die Herausforderung, durch Allelkombination Resistenzniveaus gegen die jeweiligen Pathogene in mindestens der gleichen Geschwindigkeit in der jeweiligen Kulturpflanze aufzubauen, wie diese durch pathogeneitige Anpassungsmechanismen überwunden werden. Unter der Annahme, dass der Einsatz von Pflanzenschutzmitteln aus verschiedenen Gründen rückläufig ist, wird das Resistenzprofil zukünftiger Sorten an Bedeutung gewinnen. Die Züchtung von Sorten mit einem gesteigerten Resistenzlevel vereint die Ziele eines wirksamen Pflanzen- und Umweltschutzes – vor allem im Anbau einjähriger Kulturen – zu vergleichsweise geringen betriebswirtschaftlichen Kosten für den Landwirt. Die Empirie zeigt, dass die züchterische Anpassung an die veränderten Bedingungen (z. B. veränderte Vegetationszeiten und andere Pilzrassen), erfolgreich sein können und sie somit einen Beitrag zum Pflanzenschutz hervorbringen. Beispielsweise konnte in einem großen Weizensortiment, welches rund 50 Sortenzulassungsjahre umfasste, gezeigt werden, dass nicht nur eine kontinuierliche Resistenzsteigerung gegen wichtige Pilzkrankheiten festgestellt werden konnte, sondern auch, dass die Bedeutung der Resistenzzüchtung unter extensiven Produktionsintensitäten eine größere Bedeutung aufweist (VOSS-FELS et al., 2019; ZETSCHE et al., 2020). Jedoch können Erreger wie der Schwarzrost (*Puccinia graminis*, Abb. 6), die bisher nur selten auftraten, bei einer längeren Vegetationsperiode neue Herausforderungen an die Züchtung stellen.

Um die Resistenzeigenschaften von Sorten trotz stetiger Veränderung der Pathogene nicht zu gefährden, ist es erstrebenswert, möglichst viele wirksame Resistenzgene

zu pyramidisieren und einen möglichst langanhaltenden Schutz durch quantitative Resistenzen zu etablieren (VAN ESSE et al., 2020). Auf der Suche nach Resistenzquellen kommt zunächst der präzisen phänotypischen und genotypischen Charakterisierung von genetischen Ressourcen eine Schlüsselfunktion zu (BEUKERT et al., 2018; MASCHER et al., 2019; MAYER et al., 2020). Für die Züchtung besteht schließlich die Herausforderung, die Vielzahl der Resistenzmerkmale zusammen mit allen übrigen Ansprüchen an eine Sorte, z. B. auch eine gesteigerte Toleranz gegen Trockenheit und Extremtemperaturen, in einem Genotyp zu kombinieren. Die Nutzung von „Gene Editing“ wird dabei als aussichtsreiches Hilfsmittel verstanden, um bestimmte gut verstandene Gene schneller und gezielter zu modifizieren (SCHEBEN et al., 2017; AHMAD et al., 2020) und – mit den dadurch innerhalb eines Zuchtprogrammes freigesetzten Kapazitäten – den Selektionserfolg für andere (Resistenz-) Merkmale mit komplexerem Erbgang zu erhöhen.

Prognose und Anwendung von Pflanzenschutzmitteln

Die Anwendung von Pflanzenschutzmitteln ist für den integrierten Anbau ein wichtiger Baustein des Pflanzenschutzes. Seit jeher ist sie von Klima und Witterung in besonderer Weise geprägt. So beschäftigte sich bereits KNOCH (1929) mit der Thematik „Schädling, Klima und Bekämpfung“ am Beispiel der Biologie der Eulenart „Nonne“ und ihrer Bekämpfung im Forst.

Der Klimawandel und die aufgezeigten Veränderungen im Schaderregerauftreten werden die Intensität der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln beeinflussen (DELCOUR et al., 2015) und zu Veränderungen im Mittel- bzw. Wirkungsspektrum sowie der Wirksamkeit führen,



Abb. 6. Schwarzrost an Weizen. Schwarzrost (*Puccinia graminis*) tritt besonders in wärmeren Gebieten auf. Obwohl er bisher in Deutschland primär für Roggen von Relevanz ist, kann auch Weizen befallen werden. Foto: Serfling/JKI.

da diese unter anderem wesentlich von den Temperaturen abhängen kann. Das frühere Eintreten phänologischer Phasen verursacht sehr wahrscheinlich eine Verschiebung der Anwendungszeitpunkte von Pflanzenschutzmitteln (HENRIKSEN et al., 2013; VLK, 2019). Zusätzlich kann eine stärkere Verlegung der Applikationstermine auf adäquate Tageszeiten erforderlich werden, um beispielsweise besonders heiße oder strahlungsreiche Phasen zu umgehen. Die Anwendung geeigneter Zusatzstoffe sowie Pflanzenschutzmittelformulierungen und neue Applikationstechniken werden im Zuge des Klimawandels an Bedeutung gewinnen, um auch unter extremen Bedingungen die Wirksamkeit der Mittel zu sichern (MATZRAFI, 2019; TLEUOVA et al., 2020). Entscheidungshilfen, wie witterungsabhängige Prognosemodelle (VON TIEDEMANN & ULBER, 2008), Diagnoseverfahren, Bekämpfungsrichtwerte und agrarmeteorologische Beratungsangebote, müssen angepasst und erweitert werden.

Biologischer Pflanzenschutz

Die Auswirkungen des Klimawandels auf den biologischen Pflanzenschutz können in mehreren Szenarien zusammengefasst werden: (1) Zunehmende Extremwetterereignisse (Niederschläge, Hitze und Dürren) stören bestehende natürliche Systeme, in denen sich Schaderreger und natürliche Gegenspieler im biologischen Gleichgewicht befinden. Hieraus werden sich neue Schaderregerprofile ergeben, an die bestehende biologische Pflanzenschutzmaßnahmen angepasst werden müssen (STIREMAN et al., 2005). (2) Durch die zunehmende Erwärmung kann eine Veränderung des Schaderregerspektrums hin zu mehr Schäden durch Fraßinsekten erwartet werden, ähnlich wie es bereits heute in wärmeren Gebieten der Fall ist. Dabei können natürliche Abwehrmechanismen der Kulturpflanzen unter Hitzestress oder bei anhaltender Dürre so herabgesetzt werden, dass sich Schaderreger massiv vermehren und jeglicher Kontrollmöglichkeit durch ihre Gegenspieler entziehen (Beispiel: Buchdrucker und andere Forstschädlinge) (JACTEL et al., 2019). (3) Die Verlängerung der Vegetationsperiode wird wie bereits dargestellt zu weiteren Veränderungen der Generationszahlen bei einigen Schadinsekten führen. Da sich natürliche Regelmechanismen generell nicht so schnell anpassen, werden zusätzliche bzw. neue biologische Bekämpfungsmaßnahmen notwendig werden. (4) Erhöhte Temperaturen können die Performance natürlich vorkommender und ausgebrachter Makro- und Mikro-Organismen erheblich beeinflussen – meist im negativen, womöglich auch im positiven Sinn (COMPANT et al., 2010). In beiden Fällen werden Anpassungen der bestehenden Anwendungsparameter augmentativ ausgebrachter Organismen notwendig werden. (5) Durch die veränderten klimatischen Bedingungen etablieren sich wie zuvor aufgezeigt neue, invasive Schädlinge, die hier überwintern können und permanente Populationen aufbauen. Wenn invasive Arten in den neuen Habitaten auf keine natürlichen Pathogene, Parasiten und Räuber stoßen (enemy release hypothesis, ERH), können sie sich zunächst besonders schnell und stark etablieren (MELJER

et al., 2016). Erst im Laufe der Zeit werden evtl. einheimische Generalisten oder nachziehende Spezialisten als Gegenspieler rekrutiert. Für den biologischen Pflanzenschutz stellen invasive Schaderreger eine besondere Herausforderung dar, insbesondere, wenn entsprechend natürlich vorkommende Gegenspieler fehlen und etablierte Verfahren bzw. zugelassene biologische Mittel zu selektiv sind, um gegen die invasive Schaderregerart zu wirken. Zusammenfassend muss davon ausgegangen werden, dass der Klimawandel einen erheblichen negativen Einfluss auf etablierte biologische Pflanzenschutzverfahren hat und neue, große Herausforderungen an Forschung und Entwicklung, Beratung und Praxis stellt.

Folgenabschätzung

Erträge, Ressourceneffizienz und THG-Emissionen

Die vorangegangenen Ausführungen zeigen, dass eine erfolgreiche Anpassung im Sinne eines ganzheitlichen Pflanzenschutzes unterschiedlichste Handlungsebenen umfasst. Dabei besitzen die einzelnen Maßnahmen unterschiedlich starke Auswirkungen auf Ertragsentwicklung, Emission von Treibhausgasen (THG) und Ressourceneffizienz. Eine Bewertung ist dementsprechend komplex.

Im Zusammenhang von Pflanzenschutz und Klimaschutz zeigt sich, dass der Anteil der Anwendung von Pflanzenschutzmitteln an der gesamten THG-Emission der Landwirtschaft in Deutschland mit etwa 1 % vergleichsweise gering ist (VON WITZKE & NOLEPPA, 2012). Auch die Auswertung von Langzeitversuchen des JKI hat ergeben, dass der Anteil der Emissionen durch den Pflanzenschutz an den gesamten Treibhausgasemissionen der Weizenproduktion weniger als 1,5 % beträgt (FEIKE et al., 2020).

Ein wichtiges Instrument zur Bewertung sind Langzeituntersuchungen. So bestätigten BÖNECKE et al. (2020), dass sich der Ackerbau kontinuierlich an die klimatischen Veränderungen anpasst, sowohl hinsichtlich Sortenentwicklung als auch mit der Anpassung von Aussaat- und Wachstumsphasen. Weiterhin zeigten HADASCH et al. (2020), dass die Ertragsstabilität im Zuge des fortschreitenden Klimawandels zwischen 1983 und 2019 im Winterweizen und noch stärker im Roggen abnahm. Eine verringerte Ertragsstabilität führt tendenziell zu einer verringerten Ressourceneffizienz (RICCETTO et al., 2020). Um die Ertragsstabilität unter Klimawandel und reduzierter Pflanzenschutzintensität möglichst hoch zu halten, kommt der Resistenzzüchtung gegen biotischen und abiotischen Stress eine besondere Bedeutung zu (FRIEDT & ZETZSCHE, 2019; LAIDIG et al., 2021).

Ein weiterer wichtiger methodischer Baustein für die Bewertung von Klimafolgen und Anpassungsverfahren sind modellbasierte Analysen. Um zukünftige Änderungen hinsichtlich Ertragsverlusten durch biotischen Stress abzubilden, sollten Schaderregerprognosemodelle (z. B. RACCA & TSCHÖPE, 2011) in prozessbasierte Pflanzenwachstumsmodelle (z. B. LIU et al., 2016) integriert und die

spezifische Schadwirkung relevanter Schaderreger abgebildet werden. Um Unsicherheiten abzufedern, ist die Nutzung von Multi-Model-Ensembles zu empfehlen (MARTRE et al., 2015).

Umweltwirkungen

Der Klimawandel beeinflusst, wie bereits aufgezeigt, die Umweltwirkungen von Pflanzenschutzmitteln durch klimabedingte Veränderungen bei deren Anwendung (z. B. angepasste Wirkstoffspektren oder Intensitäten). Andererseits wird die Umweltwirkung von Pflanzenschutzmitteln auf Nichtzielorganismen durch den Klimawandel unter anderem auch durch Auswirkungen von veränderten Klimaparametern auf die verschiedenen Pflanzenschutzmittel-Eintragspfade in angrenzenden Kleinstrukturen oder Oberflächengewässern bestimmt (DELCOUR et al., 2015). Oberflächenabfluss und Abdrift sind dabei die Haupteintragspfade (JOHNSON et al., 1995; BACH et al., 2001; RÖPKE et al., 2004; OTIENO et al., 2013). Neben den flächenspezifischen Eigenschaften, wie Hangneigung, Bodenart, Bodenbeschaffenheit und Bodenstruktur in Kombination mit Pflanzdichte, Bodenbearbeitungsmaßnahmen und der Ausrichtung der Reihen (CARSEL et al., 1995; STRASSEMAYER et al., 2017), ist der Niederschlag der treibende Klimaparameter für den Oberflächenabfluss (FICKLIN et al., 2010; OTIENO et al., 2013). Weitere Eintragspfade sind Erosion, Drainage und Zwischenabfluss (DUBUS et al., 2009). Intensität, Häufigkeit, Menge und zeitliche Relation der Niederschläge zu den Pflanzenschutzmittel-Anwendungen haben dabei wesentliche Auswirkungen auf ihren Austrag (CARERE et al., 2011). Eine zu erwartende Zunahme der Starkregenereignisse unter zukünftigen Klimabedingungen würde somit auch den Austrag von Pflanzenschutzmitteln und damit das Umweltrisiko durch diese Eintragspfade erhöhen (LABAT et al., 2004; CARERE et al., 2011).

Die Abdrift von Pflanzenschutzmitteln wird neben den gerätespezifischen Eigenschaften im Wesentlichen durch die Windgeschwindigkeit beeinflusst. Eine klimabedingte Veränderung der Pflanzenschutzmittel-Austräge durch Abdrift ist nicht zu erwarten, da Landwirte diese bei günstigen Windgeschwindigkeiten ausbringen müssen.

Neben dem Transport hat auch der Abbau der Wirkstoffe direkte Auswirkungen auf das Umweltrisiko durch Pflanzenschutzmittel. Durch einen Anstieg der Temperatur wird ein schnellerer Abbau der einzelnen Wirkstoffe und damit eine reduzierte Auswirkung auf Nicht-Zielorganismen erwartet (BEULKE et al., 2004; STENRØD et al., 2008). Dagegen hat eine Temperaturerhöhung verstärkende Auswirkungen auf die Verflüchtigung (NATIONS & HALLBERG, 1992), und damit auf den Eintrag von Pflanzenschutzmitteln in die Atmosphäre (HOLLAND & SINCLAIR, 2004).

Wie sich das Zusammenspiel der oben beschriebenen Prozesse unter gleichzeitiger Berücksichtigung einer klimabedingten Veränderung der Pflanzenschutzmaßnahmen auf das Umweltrisiko auswirkt, kann mit Modellrechnungen basierend auf Klimaprojektionsdaten erfasst werden. Im Rahmen des Projektes OptAKlim

(KRENGEL-HORNEY et al., 2020) ist geplant, anhand von drei Modellregionen Simulationsrechnungen mit dem Umweltrisikoindikator SYNOPS (STRASSEMAYER et al., 2017) durchzuführen.

Ökonomie

Wirtschaftliche Folgen von Anpassungsstrategien an den Klimawandel (im Bereich Pflanzenschutz) betreffen sowohl die betriebliche als auch die gesellschaftliche Ebene und führen dort zu Kosten (negativen monetären Wirkungen) und zu Nutzen (positiven Wirkungen). Im besten Fall sind die Anpassungsmaßnahmen erfolgreich und generieren entsprechenden Nutzen.

Auf Betriebsebene unterscheiden GÖMANN et al. (2015) Anpassungsmöglichkeiten in innerbetriebliche und außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente. Ökonomische Wirkungen entstehen infolge von Anpassungsmaßnahmen der landwirtschaftlichen Produktion an den Klimawandel. Dabei spielen auch innerbetriebliche Risikomanagementinstrumente, wie z. B. Ertragsversicherungen gegen Wetterschäden (OFFERMANN et al., 2017) eine Rolle. Durch klimawandelbedingte Anpassungsmaßnahmen verändern sich somit die Kosten des Inputs und des Outputs. Betriebsmittel wie Saatgut, Pflanzenschutzmittel, Wasser, Arbeit und Maschinen müssen u. a. an ein verändertes Schaderregeraufkommen oder verstärkte Trockenheit angepasst werden. Aber auch der Output verändert sich durch geringere, bzw. höhere Erträge und Erlöse, auch infolge veränderter Erzeugerpreise. Eine besondere Rolle mit Auswirkungen auf betriebliche Kosten kann das klimawandelbedingte veränderte betriebliche Monitoring von Schaderregern, Pflanzenkrankheiten und Unkräutern (OLESEN et al., 2011) spielen. Zu berücksichtigen sind zudem Transaktionskosten aufgrund notwendiger Beschaffung von Informationen einschließlich Beratung über zu erwartende Risiken und geeignete Anpassungsmaßnahmen (vor allem im Bereich Pflanzenschutz) an den Klimawandel. Je nach Anpassungsstrategie können die wirtschaftlichen Folgen weitreichend sein. Werden beispielsweise gesamte Anbauverfahren angepasst, können (sehr) hohe Investitionskosten anfallen, wie bei der Umstellung von Bodenbearbeitung, Pflanzenschutztechnik, Anpassung der Fruchtfolge einschließlich neuer Pflanzenarten mit unsicheren Vermarktungsbedingungen, und in besonderem Maße bei der Bewässerung. Ökonomische Abschätzungen zu spezifischen Maßnahmen (nicht in jedem Fall mit explizitem Klimawandelbezug) wurden in aktuellen Forschungsprojekten u. a. für die Einnetzung gegen die invasive Kirschessigfliege *Drosophila suzukii* (EBERHARDT & SALTZMANN, 2018), neue Pflanzenschutztechniken (RAJMIS et al., 2021), Sortenwahl (KEHLENBECK & RAJMIS, 2018) oder Fruchtfolgen (SALTZMANN & KEHLENBECK, 2018; KARPINSKI et al., 2020) erarbeitet und geben Anhaltspunkte für betriebswirtschaftliche Folgen. Sozioökonomische Aspekte der Anwendung neuer Züchtungsmethoden wurden von MAAß & KEHLENBECK (2020) beschrieben.

Außerbetriebliche Risikomanagementinstrumente betreffen Versicherungen, die je nach Ausgestaltung ursa-

chenbezogen oder aber unabhängig von der Ursache entstandene Mehrkosten abdecken. Extremwetterversicherungen sind ursachenabhängige Versicherungen, wie z. B. Hagelversicherungen. Ernte-Ertragsversicherungen decken den Schaden im Falle von Ertragsausfall unabhängig von der Ursache ab, bringen aber sehr hohe Prämienzahlungen mit sich (siehe GÖMANN et al., 2015).

Gesellschaftliche Kosten als Folge von Anpassungsmaßnahmen der Landwirtschaft/des Pflanzenschutzes an den Klimawandel können beispielsweise durch die Gewährung staatlicher *ad-hoc*-Hilfen zum Risikomanagement, wie im Fall der „Dürrehilfen“ in 2018, entstehen (ODENING et al., 2018). Auch unerwünschte negative Effekte von Anpassungsmaßnahmen können z. B. bei veränderten Anwendungen von Pflanzenschutzmitteln zu höheren externen Kosten führen (KOLEVA & SCHNEIDER, 2009). Forschung und Entwicklung für die Anpassung an den Klimawandel verursachen in der Regel gesellschaftliche Kosten.

Ökonomische Folgen entstehen aber auch infolge der Ausbreitung und Etablierung neuer oder invasiver Arten von Schadorganismen, die, wie oben beschrieben, durch den Klimawandel beeinflusst werden können. Bei geregelten Schadorganismen können gesetzliche Vorgaben die einzelbetriebliche Entscheidung beeinflussen und gesellschaftliche Kosten z. B. durch Kompensationszahlungen hervorrufen. Zudem können hier übergeordnete pflanzengesundheitliche Maßnahmen, z. B. der amtlichen Pflanzenschutzdienste einschließlich Diagnose, Monitoring und Bereitstellung von Informationen zu gesellschaftlichen Kosten führen. Kosten und Nutzen im Bereich Pflanzengesundheit für Deutschland wurden u. a. für *Diabrotica virgifera* (KEHLENBECK & KRÜGENER, 2012) und für die Pflanzengesundheit insgesamt bereits 1998 im *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* (KEHLENBECK, 1998a; 1998b) beschrieben.

Fazit

Der vorliegende Beitrag zeigt, dass das Klima und sein Wandel erhebliche Effekte auf den Pflanzenschutz und seine ökologischen und ökonomischen Auswirkungen haben kann. Bewährtes Wissen und Handeln im Pflanzenschutz müssen stets neu hinterfragt und erweitert werden, um eine erfolgreiche Anpassung zu ermöglichen. Die Auswirkungen und Umsetzbarkeit dieser Anpassungsverfahren hängen maßgeblich von der Produktionssituation, das heißt u. a. vom Standort, den angebauten Kulturen, der Produktionsform und natürlich den betrieblichen Gegebenheiten ab. Zusätzlich beeinflussen überbetriebliche Rahmenbedingungen, wie Gesetze, Verordnungen, die Förderpolitik, das Marktgeschehen oder politische Strategien, die Eignung und Umsetzung der beispielhaft aufgezeigten Anpassungsoptionen. Deshalb kommt der Entwicklung regionaler Lösungsstrategien und der Einbindung aller relevanten Akteursebenen eine hohe Bedeutung zu. Um negativen Auswirkungen effektiv entgegen zu wirken, müssen

national und international abgestimmte Strategien und Programme den Rahmen bilden. Vorhersagen aufgrund pflanzengesundheitlicher Risikoanalysen können helfen, die Einschleppung und Ausbreitung klimasensitiver Schadorganismen zu verhindern oder zu verringern. Die Erarbeitung wissenschaftlicher Grundlagen bildet dabei eine tragende Säule, da die Anpassung des Pflanzenschutzes an den Klimawandel ein dynamischer Prozess ist, bei dem es fortwährend viele offene Fragen zu beantworten gilt. Hierbei leistet das JKI mit seinen Arbeiten in den verschiedenen Disziplinen der Kulturpflanzenforschung einen wichtigen Beitrag.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

- ADLER, C.S., P. KERN, G. BÖTTGER, D. HÖPFNER, 2019: Vorratsschädlinge durch Bilderkennung und Laser früh erkennen und bekämpfen. *Getreide Magazin* **6**, 60-61.
- ADLER, C.S., A.F. NDOMO-MOULEU, J. BEGEMANN, K. MÜNZING, 2016: Effect of vacuum storage of wheat (*Triticum aestivum*) grain on the granary weevil, *Sitophilus granarius* and wheat quality. The 10th International Conference on Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products (CAF2016), Winnipeg, Canada., CAF Permanent Committee Secretariat.
- AHMAD, S., X. WEI, Z. SHENG, P. HU, S. TANG, 2020: CRISPR/Cas9 for development of disease resistance in plants: recent progress, limitations and future prospects. *Briefings in Functional Genomics* **19** (1), 26-39, DOI: 10.1093/bfpg/elz041.
- AYRES, M.P., M.J. LOMBARDERO, 2000: Assessing the consequences of global change for forest disturbance from herbivores and pathogens. *Science of the Total Environment* **262**, 263-286, DOI: 10.1016/S0048-9697(00)00528-3.
- BACH, M., A. HUBER, H.-G. FREDE, 2001: Input pathways and river load of pesticides in Germany – a national scale modeling assessment. *Water Science and Technology* **43**, 5, DOI: 10.2166/wst.2001.0301.
- BALE, J.S., S.A.L. HAYWARD, 2010: Insect overwintering in a changing climate. *The Journal of Experimental Biology* **213** (6), 980-994, DOI: 10.1242/jeb.037911.
- BAŽOK, R., D. LEMIĆ, F. CHIARINI, L. FURLAN, 2021: Western corn rootworm (*Diabrotica virgifera virgifera* LeConte) in Europe: current status and sustainable pest management. *Insects* **12** (3), 195, DOI: 10.3390/insects12030195.
- BEBBER, D.P., M.A.T. RAMOTOWSKI, S.J. GURR, 2013: Crop pests and pathogens move polewards in a warming world. *Nature Clim Change* **3**, 985-988, DOI: 10.1038/nclimate1990.
- BEBBER, D.P., 2015: Range-expanding pests and pathogens in a warming world. *Annual Review of Phytopathology* **53**, 335-356, DOI: 10.1146/annurev-phyto-080614-120207.
- BEUKERT, U., A. SERFLING, F. ORDON, 2018: Identifikation hochwirksamer bisher nicht genutzter Braun- und Gelbrostresistenzen in genetischen Ressourcen des Weizens. 61. Deutsche Pflanzenschutztagung: Herausforderung Pflanzenschutz – Wege in die Zukunft. JULIUS KÜHN-INSTITUT (HRSG.) UND UNIVERSITÄT HOHENHEIM. Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv **461**, 503.
- BEULKE, S., C.D. BROWN, C.J. FRYER, W. VAN BEINUM, 2004: Influence of kinetic sorption and diffusion on pesticide movement through aggregated soils. *Chemosphere* **57** (6), 481-490, DOI: 10.1016/j.chemosphere.2004.06.026.
- BÖHM, H., J. DAUBER, M. DEHLER, D.A. AMTHAUER GALLARDO, T. DE WITTE, R. FUß, ... S. SCHITTENHELM, 2020: Fruchtfolgen mit und ohne Leguminosen: Ein Review. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (10-11), 489-509, DOI: 10.5073/JfK.2020.10-11.01.
- BÖNECKE, E., L. BREITSAMETER, N. BRÜGGEMANN, T.-W. CHEN, T. FEIKE, H. KAGE, ..., H. STÜTZEL, 2020: Decoupling of impact factors reveals the response of German winter wheat yields to climatic changes. *Global Change Biology* **26** (6), 3601-3626, DOI: 10.1111/gcb.15073.

- CARERE, M., R. MINIERO, M.R. CICERO, 2011: Potential effects of climate change on the chemical quality of aquatic biota. *Trends in Analytical Chemistry* **30** (8), 1214-1221, DOI: 10.1016/j.trac.2011.06.006.
- CARSEL, R.F., J.C. IMHOFF, P.R. HUMMEL, M. CHEPLICK, A.S.J. DONIGIAN, 1995: PRZM-3. A Model for Predicting Pesticide and Nitrogen Fate in the Crop Root and Unsaturated Soil Zones. Users Manual for Release 3.0. Athens, GA, USA: National Exposure Research Laboratory, U.S. Environmental Protection Agency.
- COHEN, J.M., M.J. LAJEUNESSE, J.R. ROHR, 2018: A global synthesis of animal phenological responses to climate change. *Nature Climate Change* **8**, 224–228, DOI: 10.1038/s41558-018-0067-3.
- COOK, D.A., D.M. ARMITAGE, K.B. WILDEY, 2004: What are the implications of climate change for integrated pest management of stored grain in the UK? *Integrated Protection in Stored Products*, Kusadasi, IOBC Bulletin **27** (9), 1-11.
- COMPANT, S., M.G.A. VAN DER HEIJDEN, A. SESSITSCH, 2010: Climate change effects on beneficial plant-microorganism interactions. *FEMS Microbiology Ecology* **73** (2), 197-214.
- DELCOUR, I., P. SPANOGHE, M. UYTENDAELE, 2015: Literature review: Impact of climate change on pesticide use. *Food Research International* **68**, 7-15, DOI: 10.1016/j.foodres.2014.09.030.
- DESAINT, H., N. AOUN, L. DESLANDES, F. VAILLEAU, F. ROUX, R. BERTHOME, 2021: Fight hard or die trying: when plants face pathogens under heat stress. *New Phytologist* **229** (2), 712-734, DOI: 10.1111/nph.16965.
- DEUTSCH, C.A., J.J. TEWKSBURY, M. TIGCHELAAR, D.S. BATTISTI, S.C. MERRILL, R.B. HUEY, R.L. NAYLOR, 2018: Increase in crop losses to insect pests in a warming climate. *Science* **361** (6405), 916-919, DOI: 10.1126/science.aat3466.
- DUBUS, I.G., S. REICHENBERGER, D. ALLIER, G. AZIMONTI, M. BACH, E. BARRIUSO, ..., M. WURM, 2009: FOOTPRINT – Functional tools for pesticide risk assessment and management. Final report of the EU project FOOTPRINT (SSPI-CT-2005-022704), 221 p.
- EBERHARDT, G., J. SALTZMANN, 2018: Ökonomische Auswirkungen von Insektenschutznetzen zur Bekämpfung der Kirschessigfliege im Erwerbsobstbau. 61. Deutsche Pflanzenschutztagung. Universität Hohenheim, Julius-Kühn-Archiv **461**, 289-290.
- EDLER, B., J. BÜRGER, L. BREITSAMETER, H.-H. STEINMANN, J. ISSELSTEIN, 2015: Growth responses to elevated temperature and reduced soil moisture during early establishment of three annual weeds in four soil types. *Journal of Plant Diseases and Protection* **122** (1), 39-48, DOI: 10.1007/BF03356529.
- EKHOLM, A., A.J.M. TACK, P. PULKKINEN, T. ROSLIN, 2020: Host plant phenology, insect outbreaks and herbivore communities - The importance of timing. *Journal of Animal Ecology* **89** (3), 829-841, DOI: 10.1111/1365-2656.13151.
- ENTLING, W., C. HOFFMANN, 2019: Single and combined effects of *Drosophila suzukii* and *Drosophila melanogaster* on sour rot development in viticulture. *Journal of Applied Entomology* **144** (3), 153-160, DOI: 10.1111/jen.12721.
- FEIKE, T., L. RIEDESEL FREIHERR ZU EISENBACH, R. LIEB, D. GABRIEL, D. SABBOURA, A.R. SHAWON, ..., J. SCHWARZ, 2020: Einfluss von Pflanzenschutzstrategie und Bodenbearbeitung auf den CO₂-Fußabdruck von Weizen. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (7), 311-326, DOI: 10.5073/jfk.2020.07.08.
- FICKLIN, D.L., Y. LUO, E. LUEDELING, S.E. GATZKE, M. ZHANG, 2010: Sensitivity of agricultural runoff loads to rising levels of CO₂ and climate change in the San Joaquin Valley watershed of California. *Environmental Pollution* **158** (1), 223-234, DOI: 10.1016/j.envpol.2009.07.016.
- FISCHER, M., S. PEIGHAMI ASHMAEI, 2019: Grapevine, esca complex, and environment: The disease triangle. *Phytopathologia Mediterranea* **58** (1), 17-37, DOI: 10.14601/Phytopathol_Mediterr-25086.
- FLATH, K., T. MIEDANER, P.D. OLIVERA, M.N. ROUSE, Y. JIN, H. BÜRSTMAYR, 2018: Genes for wheat stem rust resistance postulated in German cultivars and their efficacy in seedling and adult-plant field tests. *Plant Breeding* **137** (3), 301-312, DOI: 10.1111/pbr.12591.
- FRANCISCO, C.S., X. MA, M.M. ZWYSSIG, B.A. McDONALD, J. PALMA-GUERRERO, 2019: Morphological changes in response to environmental stresses in the fungal plant pathogen *Zymoseptoria tritici*. *Scientific Reports* **9**, DOI: 10.1038/s41598-019-45994-3.
- FRIEDT, W., H. ZETZSCHE, 2019: Breeding progress in wheat: Simultaneous improvement of disease resistance, yield and product quality. *Journal für Kulturpflanzen* **71** (11), 277-285, DOI: 10.5073/jfk.2019.11.01.
- GERSTMANN, H., D. DOKTOR, C. GLÄSER, M. MÖLLER, 2016: PHASE: A geostatistical model for the Kriging-based spatial prediction of crop phenology using public phenological and climatological observations. *Computers and Electronics in Agriculture* **127**, 726-738, DOI: 10.1016/j.compag.2016.07.032.
- GODAN, D., 1947: Der Einfluß der Witterung auf den Massenwechsel des Rapsdelflohs (*Psylliodes chrysocephala* L.). *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutz* **1** (7/8), 101-104.
- GÖMANN, H., A. BENDER, A. BOLTE, W. DIRKSMEYER, H. ENGLERT, J.-H. FEIL, ..., Y. ZIMMER, 2015: Agrarrelevante Extremwetterlagen und Möglichkeiten von Risikomanagementsystemen. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL). Thünen Report. Braunschweig, Johann Heinrich von Thünen-Institut **30**, 312, DOI: 10.3220/REP1434012425000.
- GÖMANN, H., C. FRÜHAUF, A. LÜTTGER, H.-J. WEIGEL, 2017: Landwirtschaft. In: *Klimawandel in Deutschland: Entwicklung, Folgen, Risiken und Perspektiven*. Eds.: BRASSEUR, G., D. JACOB, S. SCHUCK-ZÖLLER, Berlin Springer Spektrum, S. 183-191.
- GRUFFUDD, H.R., T. SCHRÖDER, T.A.R. JENKINS, H.F. EVANS, 2019: Modelling pine wilt disease (PWD) for current and future climate scenarios as part of a pest risk analysis for pine wood nematode *Bursaphelenchus xylophilus* (Steiner and Bührer) Nickle in Germany. *Journal of Plant Diseases and Protection* **126** (2), 129-144, DOI: 10.1007/s41348-018-0197-x.
- HADASCH, S., F. LAIDIG, J. MACHOLDT, E. BÖNECKE, H.-P. PIEPHO, 2020: Trends in mean performance and stability of winter wheat and winter rye yields in a long-term series of variety trials. *Field Crops Research* **252**, 107792, DOI: 10.1016/j.fcr.2020.107792.
- HENRIKSEN, H.J., A. ROSENBOM, P.V.d. KEUR, J.E. OLESEN, L.J. JØRGENSEN, J. KJÆR, ..., O.B. CHRISTENSEN, 2013: Prediction of climatic impacts on pesticide leaching to the aquatic environments. Evaluation of direct and indirect (crop rotations, crop management, and pesticide use) climate change effects of pesticide leaching in a regulatory perspective for two Danish cases. *Pesticide Research* **143**, 1-167.
- HEß, B., P. BAUFELD, A.R. DOMINIC, C. MENZ, A. REIßIG, J. STRASSEMEYER, ..., G. SCHRADER, 2020: Modellierung klimasensitiver Schadorganismen in der Pflanzengesundheit. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (8), 435-439, DOI: 10.5073/jfk.2020.08.14.
- HOFFMANN, C., J. KOCKERLING, S. BIANCU, T. GRAMM, G. MICHL, M.H. ENT-LING, 2017: Can flowering greencover crops promote biological control in German vineyards? *Insects* **8** (4), 121-136, DOI: 10.3390/insects8040121.
- HOFFMANN, C., P. SEIDEL, W. SILVANUS, W. ZIPSE, 2008: Traubenwickler vor dem Hintergrund von Klimawandel und verändertem Pflanzenschutz. *Deutsches Weinbau-Jahrbuch* **59**, 78-91.
- HOLLAND, J., P. SINCLAIR, 2004: Environmental Fate of Pesticides and the Consequences for Residues in Food and Drinking Water. In: *Pesticide Residues in Food and Drinking Water. Human Exposure and Risks*. Eds.: HAMILTON, D., S. CROSSLEY, West Sussex, John Wiley & Sons, S. 27-63.
- HOVMÖLLER, M.S., S. WALTER, R.A. BAYLES, A. HUBBARD, K. FLATH, N. SOMMERFELDT, ..., C. DE VALLAVIEILLE-POPE, 2016: Replacement of the European wheat yellow rust population by new races from the centre of diversity in the near-Himalayan region. *Plant Pathology* **65** (3), 402-411, DOI: 10.1111/ppa.12433.
- JACTEL, H., J. KORICHEVA, B. CASTAGNEYROL, 2019: Responses of forest insect pests to climate change: not so simple. *Current Opinion in Insect Science* **35**, 103-108.
- JEANNERET, F., T. TUTISHAUSER, 2010: Phenology for Topoclimatological Surveys and Large-Scale Mapping. In: *Phenological Research*. Eds.: HUDSON, I., M. KEATLEY, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, S. 159-175, DOI: 10.1007/978-90-481-3335-2_8.
- JOHANNESSEN, J., X. FOISSAC, P. KEHRLI, M. MAIXNER, 2012: Impact of vector dispersal and host-plant fidelity on the dissemination of an emerging plant pathogen. *PLoS One* **7** (12), e51809, DOI: 10.1371/journal.pone.0051809.
- JOHNSON, A.W., R.D. WAUCHOPE, B. BURGOA, 1995: Effect of Simulated Rainfall on Leaching and Efficacy of Fenamiphos Supplement to the Journal of Nematology **27** (4), 555-562.
- KARPINSKI, I., R. RIDDER, S. RAJMIS, J. SCHWARZ, B. KLOCKE, H. KEHLENBECK, 2020: Fruchtfolge versus Monokultur: Betriebswirtschaftliche Betrachtung eines Dauerfeldversuches im Roggenanbau über 18 Jahre. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (7), 298-310, DOI: 10.5073/jfk.2020.07.07.
- KASPAR, F., K. ZIMMERMANN, C. POLTE-RUDOLF, 2015: An overview of the phenological observation network and the phenological database of Germany's national meteorological service (Deutscher Wetterdienst). *Advances in Science and Research* **11** (1), 93-99, DOI: 10.5194/asr-11-93-2014.
- KAST, W.K., D. RUPP, 2009: Auswirkungen klimatischer Veränderungen auf die Phänologie der Rebe und die Bedingungen während der Traubenreife. *Mitteilungen Klosterneuburg* **59** (1), 3-7.
- KEHLENBECK, H., 1998a: Kosten und Nutzen der Auswirkungen neuer EG-Binnenmarktregelungen zur Pflanzengesundheit Teil 1: Einführung und Kosten der Pflanzenbeschau. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **50** (8), 200-204.

- KEHLENBECK, H., 1998b: Kosten und Nutzen der Auswirkungen von EG-Binnenmarktregelungen zur Pflanzengesundheit Teil 2: Nutzen der Pflanzenbeschau und zusammenfassende Wertung. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes **50** (9), 217-224.
- KEHLENBECK, H., S. KRÜGENER, 2012: Costs and benefits of plant health measures against *Diabrotica*: experiences and estimations for Germany. Journal of Applied Entomology **138** (3), 222-233, DOI: 10.1111/jen.12011.
- KEHLENBECK, H., S. RAJMIS, 2018: Was bleibt unterm Strich? DLG Mitteilungen (2), 56-57.
- KIRITANI, K., 2013: Different effects of climate change on the population dynamics of insects. Applied Entomology and Zoology **48**, 97-104, DOI: 10.1007/s13355-012-0158-y.
- KNOCH, E., 1929: Schädling, Klima und Bekämpfung. Arbeiten aus der biologischen Reichsanstalt für Land- u. Forstwirtschaft **16**, 705-775.
- KOCH, E., 2010: Global Framework for Data Collection – Data Bases, Data Availability, Future Networks, Online Databases. In: *Phenological Research*. Eds.: HUDSON, I., M. KEATLEY, Dordrecht, Heidelberg, London, New York, Springer, S. 23-61 DOI: 10.1007/978-90-481-3335-2_2.
- KOLEVA, N.G., U. A. SCHNEIDER, 2009: The impact of climate change on the external cost of pesticide applications in US agriculture. International Journal of Agricultural Sustainability **7** (3), 203-216, DOI: 10.3763/ijas.2009.0459.
- KOTTMANN, L., H. HEGEWALD, T. FEIKE, H. LEHNERT, J. KEILWAGEN, D. VON HÖRSTEN, ... J.K. WEGENER, 2019: Standraumoptimierung im Getreideanbau durch Gleichstandsamt. Journal für Kulturpflanzen **71** (4), 90-94, DOI: 10.5073/JfK.2019.04.03.
- KRAUS, C., T. PENNINGTON, K. HERZOG, A. HECHT, M. FISCHER, R.T. VOEGELE, ..., A. KICHERER, 2018: Effects of canopy architecture and microclimate on grapevine health in two training systems. Vitis **57**, 53-60, DOI: 10.5073/vitis.2018.57.53-60.
- KRAUS, C., R.T. VOEGELE, M. FISCHER, 2019: The Esca complex in German vineyards: does the training system influence occurrence of GLSD symptoms? European Journal of Plant Pathology **155** (1), 265-279, DOI: 10.1007/s10658-019-01769-0.
- KRENGEL-HORNEY, S., M. PAAP, J. STRASSEMAYER, M. GLENNITZ, C. BETHWELL, K. KIRFEL, ..., C. VON BUTTLAR, 2020: Optimierung von Anbaustrategien und -verfahren zur Klimaanpassung – Analyse und Bewertung auf Landschaftsebene unter besonderer Berücksichtigung von Interaktionen mit dem Pflanzenschutz, der Produktivität, der Fruchtartenverteilungen und den THG-Emissionen (OptAKlim). In: *Innovationstage 2020 Für eine starke Landwirtschaft und sichere Ernährung*. Bonn, Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung, S. 244-246.
- KRUPINSKY, J.M., K.L. BAILEY, M.P. McMULLEN, B.D. GOSSEN, T.K. TURKINGTON, 2002: Managing Plant Disease Risk in Diversified Cropping Systems. Agronomy Journal **94**, 198-209 DOI: 10.2134/agronj2002.1980.
- LABAT, D., Y. GODDÉRI, J.L. PROBST, J.L. GUYOT, 2004: Evidence for global runoff increase related to climate warming. Advances in Water Resources **27** (6), 631-642 DOI: 10.1016/j.advwatres.2004.02.020.
- LÄIDIG, F., T. FEIKE, S. HADASCH, D. RENTEL, B. KLOCKE, T. MIEDANER, H.-P. PIEPHO, 2021: Breeding progress of disease resistance and impact of disease severity under natural infections in winter wheat variety trials. Theoretical and Applied Genetics ((in Press)).
- LAMICHHANE, J.R., M. BARZMAN, K. BOOLJ, P. BOONEKAMP, N. DESNEUX, L. HUBER, ..., A. MESSEAN, 2015: Robust cropping systems to tackle pests under climate change. A review. Agronomy for Sustainable Development **35** (2), 443-459, DOI: 10.1007/s13593-014-0275-9.
- LEHMANN, P., T. AMMUNÉ, M. BARTON, A. BATTISTI, S.D. EIGENBRODE, J.U. JEPSEN, ..., C. BJÖRKMAN, 2020: Complex responses of global insect pests to climate warming. Frontiers in Ecology and the Environment **18** (3), 141-150, DOI: 10.1002/fee.2160.
- LIU, X., H. SUN, T. FEIKE, X. ZHANG, L. SHAO, S. CHEN, 2016: Assessing the Impact of Air Pollution on Grain Yield of Winter Wheat - A Case Study in the North China Plain. PLoS One **11** (9), e0162655, DOI: 10.1371/journal.pone.0162655.
- MAAß, O., H. KEHLENBECK, 2020: Sozioökonomische Aspekte von Genome Editing in Nutzpflanzen am Beispiel der Wertschöpfungsketten von Weizen. Journal für Kulturpflanzen **72** (6), 203-220, DOI: 10.5073/JfK.2020.06.02.
- MAIXNER, M., 2014: Klimabedingte neue Risiken durch Schadorganismen im Weinbau. In: *Warnsignal Klima: Gefahren für Pflanzen, Tiere und Menschen*. Eds.: LOZÁN, J.L., H. GRASSL, L. KARBE, G. JENDRITZKY, Elektron. Veröffentlichung, www.warnsignale.uni-hamburg.de., S. 7.
- MARTRE, P., D. WALLACH, S. ASSENG, F. EWERT, J.W. JONES, R.P. ROTTER, ..., J. WOLF, 2015: Multimodel ensembles of wheat growth: many models are better than one. Global Change Biology **21** (2), 911-925, DOI: 10.1111/gcb.12768.
- MASCHER, M., M. SCHREIBER, U. SCHOLZ, A. GRANER, J.C. REIF, N. STEIN, 2019: Genebank genomics bridges the gap between the conservation of crop diversity and plant breeding. Nature Genetics **51**, 1076-1081.
- MATZRAFI, M., 2019: Climate change exacerbates pest damage through reduced pesticide efficacy. Pest Management Science **75** (1), 9-13, DOI: 10.1002/ps.5121.
- MAYER, M., A.C. HOLKER, E. GONZALEZ-SEGOVIA, E. BAUER, T. PRESTERL, M. OUZUNOVA, ..., C.-C. SCHON, 2020: Discovery of beneficial haplotypes for complex traits in maize landraces. Nature Communications **11** (1), 4954, DOI: 10.1038/s41467-020-18683-3.
- MEIJER, K., M. SCHILTHUIZEN, L. BEUKEBOOM, C. SMIT, 2016: A review and meta-analysis of the enemy release hypothesis in plant-herbivorous insect systems. PeerJ **4**, e2778, DOI: 10.7717/peerj.2778.
- MÖLLER, M., L. BOUTARFA, J. STRASSEMAYER, 2020: PhenoWin – An R Shiny application for visualization and extraction of phenological windows in Germany. Computers and Electronics in Agriculture **175**, 105534, DOI: 10.1016/j.compag.2020.105534.
- MÖLLER, M., J. DOMS, H. GERSTMANN, T. FEIKE, 2019: A framework for standardized calculation of weather indices in Germany. Theoretical and Applied Climatology **136** (1-2), 377-390, DOI: 10.1007/s00704-018-2473-x.
- MÖLLER, M., H. GERSTMANN, F. GAO, T.C. DAHMS, M. FÖRSTER, 2017: Coupling of phenological information and simulated vegetation index time series: Limitations and potentials for the assessment and monitoring of soil erosion risk. CATENA **150**, 192-205, DOI: 10.1016/j.catena.2016.11.016.
- MOSES, J.A., D.S. JAYAS, K. ALAGUSUNDARAM, 2015: Climate Change and its Implications on Stored Food Grains. Agricultural Research **4** (1), 21-30, DOI: 10.1007/s40003-015-0152-z.
- NATIONS, B.K., G.R. HALLBERG, 1992: Pesticides in Iowa Precipitation. Journal of Environmental Quality **21** (3), 486-492, DOI: 10.2134/jeq1992.00472425002100030029x.
- ODENING, M., C. CROONENBROECK, R. KÜHL, J. MÜLLER, N. HIRSCHAUER, O. MUßHOFF, F. OFFERMANN, 2018: Extremwetterlage und Dürreschäden: Sind staatliche Hilfen für die Landwirtschaft erforderlich? ifo Schnelldienst **71** (20), 3-15.
- OFFERMANN, F., J. EFKEN, R. ELLSEL, H. HANSEN, R. KLEPPER, S. WEBER, 2017: Ausgewählte Instrumente zum Risikomanagement in der Landwirtschaft: Systematische Zusammenstellung und Bewertung, Thünen Working Paper, No. 72, Johann Heinrich von Thünen-Institut, Braunschweig, DOI: 10.3220/WP1492604951000.
- OLESEN, J.E., M. TRNKA, K.C. KERSEBAUM, A.O. SKJELVÅG, B. SEGUIN, P. PELTONEN-SAINIO, ..., F. MICALE, 2011: Impacts and adaptation of European crop production systems to climate change. European Journal of Agronomy **34** (2), 96-112, DOI: 10.1016/j.eja.2010.11.003.
- OLIVERA FIRPO, P.D., M. NEWCOMB, K. FLATH, N. SOMMERFELDT-IMPE, L.J. SZABO, M. CARTER, ..., Y. JIN, 2017: Characterization of *Puccinia graminis* f. sp. *tritici* isolates derived from an unusual wheat stem rust outbreak in Germany in 2013. Plant Pathology **66** (8), 1258-1266, DOI: 10.1111/ppa.12674.
- OTIENO, P.O., P.O. OWUOR, J.O. LALAH, G. PFISTER, K.-W. SCHRAMM, 2013: Impacts of climate-induced changes on the distribution of pesticides residues in water and sediment of Lake Naivasha, Kenya. Environmental Monitoring and Assessment **185** (3), 2723-2733, DOI: 10.1007/s10661-012-2743-5.
- PETERS, K., B. GEROWITT, 2012: Wie könnte der Klimawandel das Zusammenspiel von Unkräutern und Feldfrüchten verändern? 25. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkräutologie und -bekämpfung. Braunschweig, Julius-Kühn-Archiv **434**, 35-42, DOI: 10.5073/jka.2012.434.003.
- PRANK, M., S.C. KENALEY, G.C. BERGSTROM, M. ACEVEDO, N.M. MAHOWALD, 2019: Climate change impacts the spread potential of wheat stem rust, a significant crop disease. Environmental Research Letters **14** (12), DOI: 10.1088/1748-9326/ab57de.
- RACCA, P., B. TSCHÖPE, 2011: SIMCOL – a decision support system for integrated control of anthracnose on blue lupin. Journal für Kulturpflanzen **63** (12), 411-422, DOI: 10.5073/JfK.2011.12.02.
- RAJMIS, S., I. KARPINSKI, H. KAEHLENBECK, 2021: Ökonomische Kennzahlen und betriebswirtschaftliche Bewertung von teilflächenspezifischen Pflanzenschutzmittelapplikationen mit Direkteinspeisung und Assistenzsystem. Journal für Kulturpflanzen **73** (5/6), 159-170, DOI: 10.5073/JfK.2021.05-06.08.
- REZAEI, E.E., S. SIEBERT, H. HÜGING, F. EWERT, 2018: Climate change effect on wheat phenology depends on cultivar change. Scientific Report **8**: 4891.
- RICCIOTTO, S., A.S. DAVIS, K. GUAN, C.M. PITTELKOW, 2020: Integrated assessment of crop production and resource use efficiency indicators for the U.S. Corn Belt. Global Food Security **24** DOI: 10.1016/j.gfs.2019.100339.

- RÖPKE, B., M. BACH, H.-G. FREDE, 2004: DRIPS—a DSS for estimating the input quantity of pesticides for German river basins. *Environmental Modelling & Software* **19** (11), 1021-1028, DOI: 10.1016/j.envsoft.2003.11.005.
- RUSCH, A., R. BOMMARCO, M. JONSSON, H.G. SMITH, B. EKBOM, D. LANDIS, 2013: Flow and stability of natural pest control services depend on complexity and crop rotation at the landscape scale. *Journal of Applied Ecology* **50** (2), 345-354, DOI: 10.1111/1365-2664.12055.
- SALTZMANN, J., H. KEHLENBECK, 2018: Wirtschaftlichkeitsbewertung von Pflanzenschutzstrategien in E- und A-Weizen anhand eines Feldversuches in Brandenburg mit sechsgliedriger Fruchtfolge in den Jahren 2004 bis 2016. *Gesunde Pflanzen* **70** (3), 129-138, DOI: 10.1007/s10343-018-0425-0.
- SATTLER, 1935: Erneutes Massenaufreten der Runkelrübenmotte *Phthorimaea (Lita) ocellatella* Boyd in Hessen. *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **15** (11), 98-100.
- SCHEBEN, A., F. WOLTER, J. BATLEY, H. PUCHTA, D. EDWARDS, 2017: Towards CRISPR/Cas crops – bringing together genomics and genome editing. *New Phytologist* **216** (3), 682-698, DOI: 10.1111/nph.14702.
- SCHITTENHELM, S., J. DAUBER, S. SCHRADER, 2016: Bericht über die Fachtagung „Die Durchwachsene Silphie, eine Energiepflanze der Zukunft? Perspektiven von der Pflanze bis zur Landschaft“. *Journal für Kulturpflanzen* **68** (11), 349-350.
- SCHMIDT, G., S. SCHÖNROCK, W. SCHROEDER, 2014: Plant Phenology as a Biomonitor for Climate Change in Germany. A Modelling and Mapping Approach. Springer International Publishing, DOI: 10.1007/978-3-319-09090-0.
- SCHRADER, G., H. KEHLENBECK, 2011: Begünstigt der Klimawandel das Vordringen neuer Schadorganismen. *ForschungsReport Ernährung · Landwirtschaft · Verbraucherschutz* **44** (2), 14-17.
- SCHWARTZ, M.D., A. KRATOCHWIL, H. LIETH, 2003: Phenology: An Integrative Environmental Science. Volume 39 of Tasks for Vegetation Science. Dordrecht, Springer.
- SEIDEL, P., 2016: Auswirkungen von Extremwetterereignissen auf Schaderreger, ihre Schadwirkung und Pflanzenschutzmaßnahmen - Erste Hinweise. *Journal für Kulturpflanzen* **68** (9), 253-269, DOI: 10.5073/JfK.2016.09.02.
- SEIDEL, P., 2019: Impacts of extreme weather events on plant pests and plant protection - does it matter? 2nd International Conference "Our Climate Our Future - Regional Perspectives on a Global Challenge" (REKLIM Conference), 2019.09.23-25; Berlin, DOI: 10.5073/20190731-160159.
- SEIDEL, P., 2020: Wie sich der Pflanzenschutz verändern wird. *Landwirt: Die Fachzeitschrift für die bäuerliche Familie* **13**, 45-47.
- SINGER, M.C., C. PARMESAN, 2010: Phenological asynchrony between herbivorous insects and their hosts: signal of climate change or pre-existing adaptive strategy? *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences* **365** (1555), 3161-3176, DOI: 10.1098/rstb.2010.0144.
- STATHERS, T., R. LAMBOLL, B.M. MVUMI, 2013: Postharvest agriculture in changing climates: its importance to African smallholder farmers. *Food Security* **5** (3), 361-392, DOI: 10.1007/s12571-013-0262-z.
- STENRÖD, M., H.E. HEGGEN, R.I. BOLLI, O.M. EKLO, 2008: Testing and comparison of three pesticide risk indicator models under Norwegian conditions—A case study in the Skuterud and Heiabekken catchments. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **123** (1-3), 15-29, DOI: 10.1016/j.agee.2007.03.003.
- STIREMAN, J.O., L.A. DYER, D. H. JANZEN, M.S. SINGER, J.T. LILL, R.J. MARQUIS, ..., I.R. DINIZ, 2005: Climatic unpredictability and parasitism of caterpillars: Implications of global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **102** (48), 17384-17387, DOI: 10.1073/pnas.0508839102.
- STOECKLI, S., R. FELBER, T. HAYE, 2020: Current distribution and voltinism of the brown marmorated stink bug, *Halyomorpha halys*, in Switzerland and its response to climate change using a high-resolution CLIMEX model. *International Journal of Biometeorology* **64**, 2019–2032, DOI: 10.1007/s00484-020-01992-z.
- STRASSEMEYER, J., D. DAEHMLow, A.R. DOMINIC, S. LORENZ, B. GOLLA, 2017: SYNOPSIS-WEB, an online tool for environmental risk assessment to evaluate pesticide strategies on field level. *Crop Protection* **97**, 28-44, DOI: 10.1016/j.cropro.2016.11.036.
- TLEUOVA, A.B., E. WIELOGORSKA, P.V.S.S.L. TALLURI, F. ŠTĚPÁNEK, C.T. ELLIOTT, D.O. GRIGORIEV, 2020: Recent advances and remaining barriers to producing novel formulations of fungicides for safe and sustainable agriculture. *Journal of Controlled Release* **326**, 468-481, DOI: 10.1016/j.jconrel.2020.07.035.
- VAN ESSE, H.P., T.L. REUBER, D. VAN DER DOES, 2020: Genetic modification to improve disease resistance in crops. *New Phytologist* **225** (1), 70-86, DOI: 10.1111/nph.15967.
- VLK, 2019: Klimawandel und Landwirtschaft. Anpassungsstrategien im Ackerbau. Berlin, Verband der Landwirtschaftskammern (VLK): 16.
- VON TIEDEMANN, A., 1996: Globaler Wandel von Atmosphäre und Klima – Welche Folgen ergeben sich für den Pflanzenschutz? *Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes* **48** (4), 73-79.
- VON TIEDEMANN, A., B. ULBER, 2008: Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Verändertes Auftreten von Krankheiten und Schädlingen durch Klimaschwankungen In: *Pflanzenproduktion im Wandel – Wandel im Pflanzenschutz*. Eds.: VON TIEDEMANN, A., R. HEITFUSS, F. FELDMANN, Braunschweig, Deutsche Phytomedizinische Gesellschaft, S. 79-89, DOI: 978-3-941261-00-6.
- VON WITZKE, H., S. NOLEPPA, 2012: Klimaeffekte des Pflanzenschutzes in Deutschland - Darstellung von vorläufigen Ergebnissen zum Modul "Klimaeffekte" des Projektes zum gesamtgesellschaftlichen Nutzen des Pflanzenschutzes in Deutschland. Berlin, agripol GbR: 49.
- VOSS-FELS, K.P., A. STAHL, B. WITTKOP, C. LICHTHARDT, S. NAGLER, T. ROSE, ..., R.J. SNOWDON, 2019: Breeding improves wheat productivity under contrasting agrochemical input levels. *Nature Plants* **5**, 706-714, DOI: 10.1038/s41477-019-0445-5.
- WALTHER, G.-R., E. POST, P. CONVEY, A. MENZEL, C. PARMESAN, T.J.C. BEEBEE, ..., F. BAIRLEIN, 2002: Ecological responses to recent climate change. *Nature* **416**, 389-395, DOI: 10.1038/416389a.
- WEGENER, J.K., L.-M. URSO, D. VON HÖRSTEN, H. HEGEWALD, T.F. MINßEN, J. SCHATTEBERG, ..., G.F. BACKHAUS, 2019: Spot farming - an alternative for future plant production Spot Farming – eine Alternative für die zukünftige Pflanzenproduktion. *Journal für Kulturpflanzen* **71** (4), 70-89, DOI: 10.5073/JfK.2019.04.01.
- WILKE, S., 1921: Ein für Deutschland neuer Rübenschädling: Die Runkelrübenmotte (*Phthorimaea [Lita] ocellata* Boyd., [Microlepid]). *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutz* **1** (5), 33-34.
- WILKE, S., 1924: Der Insektenommer 1924. *Nachrichtenblatt für den Deutschen Pflanzenschutz*, 64-64.
- ZETZSCHE, H., W. FRIEDT, F. ORDON, 2020: Breeding progress for pathogen resistance is a second major driver for yield increase in German winter wheat at contrasting N levels. *Scientific Reports* **10** (1), 20374, DOI: 10.1038/s41598-020-77200-0.
- ZIESCHE, T., J. BELL, F. ORDON, E. SCHLIEPHAKE, T. WILL, 2020: Long-term monitoring of insects in agricultural landscapes. *Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für Allgemeine und Angewandte Entomologie* **22**, 101-106.

© Der Autor/Die Autorin 2021.

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

© The Author(s) 2021.

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