

Print: ISSN 1867-0911
Internet: ISSN 1867-0938
Band 74 | Nr. 05-06
2022



Journal für Kulturpflanzen

Journal of Cultivated Plants



Online Version: <https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal/index>

Journal für Kulturpflanzen vereint mit Pflanzenbauwissenschaften

Print: ISSN 1867-0911, Internet: ISSN 1867-0938

Website: <https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal>

Charakteristik

Bei uns steht die Kulturpflanze mit all ihren Facetten im Mittelpunkt. Alle publizierten Beiträge haben einen starken Bezug zur angewandten Forschung und unterstreichen die Bedeutung und Chancen der gewonnenen Erkenntnisse für die land- und gartenbauliche Praxis. Im Bereich der Forschung an Kulturpflanzen nehmen wir Beiträge aus allen einschlägigen Fachgebieten entgegen, z. B. Bodenkunde, Pflanzenbau und Grünlandwirtschaft, Garten-, Obst- und Weinbau, Pflanzengenetik und Pflanzenzüchtung, Pflanzenschutz und Pflanzengesundheit sowie Agrartechnik.

Wir publizieren deutsch- und englischsprachige Original- und Übersichtsarbeiten sowie Kurzmitteilungen. Im redaktionellen Teil der Zeitschrift erscheinen außerdem Nachrichten, Personalien und Buchbesprechungen sowie Mitteilungen einschlägiger Fachgesellschaften.

Verantwortlicher Herausgeber / Editor-in-Chief

Prof. Dr. Frank Ordon, Präsident und Professor des Julius Kühn-Instituts – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg

Schriftleitung / Managing Editor

Dr. Anja Hühnlein, Julius Kühn-Institut – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg, Tel.: 03946/47-2206, E-Mail: journal-kulturpflanzen@julius-kuehn.de

Co-Schriftleitung

Dr. Heike Riegler (JKI Quedlinburg)

Co-Schriftleitung Pflanzenbauwissenschaften

Prof. Dr. Hans-Peter Kaul (Universität für Bodenkultur Wien)

Redaktionsbeirat / Editorial Board

Prof. Dr. Henryk Flachowsky (JKI Dresden)

Prof. Dr. Simone Graeff-Hönniger (Universität Hohenheim)

Prof. Dr. Jörg Michael Greef (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Johannes Hallmann (JKI Braunschweig)

Dr. Olaf Hering (JKI Berlin)

Prof. Dr. Johannes Jehle (JKI Darmstadt)

Prof. Dr. Wilhelm Jelkmann (JKI Dossenheim)

Dr. Hella Kehlenbeck (JKI Kleinmachnow)

Dr. Heinz-Josef Koch (Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen)

Dr. Andrea Krähmer (JKI Berlin)

Prof. Dr. Carola Pekrun (Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen)

Dr. Jens Pistorius (JKI Braunschweig)

Dr. Bernhard Carl Schäfer (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Frank Marthe (JKI Quedlinburg)

Prof. Dr. Hartmut Stützel (Leibniz Universität Hannover)

Prof. Dr. Friedhelm Taube (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel)

Prof. Dr. Reinhard Töpfer (JKI Siebeldingen)

Dr. Ute Katharina Vogler (JKI Braunschweig)

Prof. Dr. Jens Karl Wegener (JKI Braunschweig)

Dr. Peter Wehling (JKI Groß Lüsewitz)

Dr. Ralf Wilhelm (JKI Quedlinburg)

Prof. Dr. Peter Zwerger (JKI Braunschweig)

Wissenschaftlicher Beirat

Prof. Dr.-Ing. Frank Beneke (Georg-August-Universität Göttingen)

Prof. Dr. Klaus Dittert (Georg-August-Universität Göttingen)

Prof. Dr. Wolfgang Friedt (Justus-Liebig-Universität Gießen)

Prof. Dr. Bernward Märländer (Institut für Zuckerrübenforschung Göttingen)

Elmar Pfülb (Bundessortenamt Hannover)

Mag. Astrid Plenk (AGES - Österreichische Agentur für Gesundheit und Ernährungssicherheit GmbH)

Dr. Ellen Richter (Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen)

Prof. Dr. Joseph-Alexander Verreet (Christian-Albrechts-Universität zu Kiel)

Manuskripteinreichung

Bitte reichen Sie Original- und Übersichtsarbeiten sowie Kurzmitteilungen und Nachrichten über das elektronische Zeitschriftenverwaltungssystem ein:

<https://ojs.openagrar.de/index.php/Kulturpflanzenjournal>.

Um die Einreichung zu beginnen, registrieren Sie sich als Nutzer der Zeitschrift über einen Klick auf „Registrieren“ im oberen rechten Bildschirmrand. Nach erfolgreicher Manuskripteinreichung erhalten Sie eine Bestätigung per E-Mail. Indem Sie sich mit Ihrem Benutzernamen und Passwort im System anmelden, können Sie jederzeit den Status Ihrer Einreichung einsehen.

Bei Fragen zur Manuskripteinreichung kontaktieren Sie gern die Schriftleiterin Dr. Anja Hühnlein (Tel.: 03946 47-2206, E-Mail: journal-kulturpflanzen@julius-kuehn.de).

Verlag

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Erwin-Baur-Str. 27, 06484 Quedlinburg

Realisierung

Layout-Design: Anja Wolck (JKI Berlin)

Technische Implementierung und Produktion: mediaTEXT Jena GmbH, Richard-Sorge-Straße 6B, 07747 Jena.

Druck

ROCO Druck GmbH, Neuer Weg 48 A, 38302 Wolfenbüttel.

Copyright

Seit Januar 2019 werden alle Beiträge im Journal für Kulturpflanzen als Open-Access-Artikel unter den Bedingungen der Creative Commons Namensnennung 4.0 International Lizenz (CC BY 4.0) zur Verfügung gestellt (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).

Deniz Baltaci, Dagmar Borchmann

Anwendung von Phosphorwasserstoff gegen Arthropoden im Vorratsschutz unter besonderer Berücksichtigung der Resistenzproblematik weltweit und für Deutschland – Ein Übersichtsartikel

Phosphine against arthropods in stored product protection with special consideration of the resistance problem worldwide and in Germany: A review article

Affiliation

Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz, Berlin.

Kontaktanschrift

Dr. Deniz Baltaci, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz, Königin-Luise-Str. 19, 14195 Berlin, E-Mail: deniz@baltaci.de

Zusammenfassung

Die Begasung mit Phosphorwasserstoff (PH_3) ist eine der wirksamsten Methoden zur Bekämpfung von schädlichen Insekten und Milben im Vorratsschutz. Die übermäßige und fehlerhafte Anwendung dieses Wirkstoffes hat jedoch zur Resistenzentwicklung bei vorratsschädlichen Insekten in vielen Ländern geführt, was die Bekämpfung eines Befalls deutlich erschwert und im ungünstigsten Fall zum Totalverlust der Vorratsgüter pflanzlicher Herkunft führen kann. Falls die Begasungsmaßnahme nicht hinreichend wirkt, wird normalerweise weiter bekämpft, ehe die Ware aufgegeben wird. Die Strategien zur Vermeidung von Resistenzentwicklung gegen PH_3 und das Management vorhandener PH_3 -Resistenzen sind in vielen Ländern bereits ein Teil der guten Praxisanwendung bei Begasungstätigkeiten. In Deutschland sind derzeit keine resistenten vorratsschädlichen Insekten gegen PH_3 bekannt. Damit das Risiko der Resistenzentwicklung und Ausbreitung bei den vorratsschädlichen Insekten in Deutschland weiterhin gering bleibt, müssen die Anwendungsregeln und -vorschriften bei der Begasung und Lagerung pflanzlicher Vorratsgüter eingehalten werden. Im vorliegenden Übersichtsartikel werden die weltweite aktuelle Situation und die möglichen Faktoren für eine Resistenzentwicklung gegen PH_3 und deren Vermeidung in Deutschland diskutiert.

Stichwörter

Resistenz, Vorratsschutz, Phosphorwasserstoff, Resistenzvermeidung

Abstract

Fumigation with phosphine (PH_3) is one of the most effective ways of control insect and mite pests in stored agricultural products. However, the excessive and incorrect use of this ac-

tive ingredient has led to the development of resistant insects towards phosphine fumigation, which makes it much more difficult to control an infestation and, in the worst case, can lead to the total loss of the stored products. In case of an insufficiency of the fumigation, the treatment usually continues until the controlling of entire insect pests in the stored commodities. The strategies to avoid development of resistance to phosphine are already part of the good practice in fumigation activities in many countries. In Germany, no insects are currently known that are resistant to phosphine in stored products. To ensure that the risk of development and spread of resistance among insects remains low in Germany, the application rules and regulations for fumigation and storage of agricultural products must be fulfilled. In this review article, the current world-wide situation and the possible factors for a development of resistance to phosphine and its prevention in Germany are discussed.

Keywords

resistance, stored product protection, phosphine, resistance prevention

Einleitung und Zulassungssituation

Phosphorwasserstoff (auch Monophosphan bzw. veraltet Phosphin, PH_3) ist weltweit das primäre Begasungsmittel, das in Lager- und Vorratsräumen, Silozellen, Transportmitteln (z. B. Eisenbahnwaggons und Küstenmotorschiffe) und unter gasdichten Planen zur Bekämpfung von Vorratsschädlingen in Getreide, Expellern, Extraktionsschroten sowie auch anderen Produkten, wie Kakaobohnen, Kaffee, Gewürzen, Mandeln usw., eingesetzt wird (BVL, 2016). PH_3 ist ein farbloses Gas, das beim Abkühlen zu einer Flüssigkeit kondensiert (Siedepunkt $-87,4^\circ\text{C}$), mit einer relativen Gasdichte von 1,18 nur wenig schwerer als Luft ist und sich deshalb schnell und



(c) Der Autor/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: 1. Dezember 2021/10. Mai 2022

gleichmäßig im Begasungsraum verteilt. Es ist leicht entzündlich und kann mit Luft bei sehr hohen Gehalten von mehr als 17 Volumenprozent explosive Gemische bilden. Die Löslichkeit dieses Gases ist in Wasser sehr gering, in einigen organischen Lösungsmitteln wie Pyridin, ätherischen Ölen und Fetten jedoch erheblich größer. Der Wirkstoff entwickelt sich bei Einsatz zur Schädlingsbekämpfung aus Metallphosphiden wie Aluminium- (AlP), Magnesium- (Mg_3P_2) oder Zinkphosphid (Zn_3P_2) durch hydrolytische Zersetzung zu reinem PH_3 -Präparat. Metallphosphide werden in gepresster Form mit Zusatzstoffen als Pellets, Tabletten, Plates oder in pulverisierter Form mit Zusatzstoffen in Beuteln eingesetzt (Reichmuth, 1988; Detia-Degesch, 2015). Die PH_3 -Begasung für Getreide wird üblicherweise bei einem Kornwassergehalt zwischen 9 % und 14 % durchgeführt. Abgesehen von trockenen Klimagebieten, reicht die natürliche relative Luftfeuchtigkeit für die Entwicklung des Wirkstoffes PH_3 aus.

Obwohl PH_3 , besonders bei vielen Larven und Puppen, eher langsam (>5 Tage) wirkt (Ren et al., 2011), wird es wegen seinen geringen Kosten sowie guter Praxistauglichkeit und von den meisten Anwendern als nahezu rückstandsfreies Begasungsmittel bevorzugt, besonders seit dem Wegfall von Brommethan (Methylbromid). Seit 1934 (DELICIA-Kornkäferbegasung, Deutsches Reichspatent 698721 vom 07.11.1934) (Rohrlich & Meuser, 1969) wird PH_3 zur Bekämpfung von Schädlingen im Vorratsschutz eingesetzt (Reichmuth et al., 1981; Agrafioti & Athanassiou, 2018). Nach dem Inkrafttreten des ersten Deutschen Pflanzenschutzgesetzes und dem damit verbundenen obligatorischen Zulassungsverfahren am 10. Mai 1968 wurde PH_3 in Formen von Aluminium- bzw. Zinkphosphid seit 1971 und als Magnesiumphosphid seit 1975 als Begasungsmittel in Deutschland zugelassen (BVL, 2022). Zinkphosphid wird gegen Nagetiere auf dem Feld eingesetzt.

In Deutschland ist über die letzten zwei Dekaden die Anzahl zugelassener Pflanzenschutzmittel für den Vorratsschutz zurückgegangen. Aktuell sind 10 Wirkstoffe im Pflanzenschutzmittelverzeichnis als Insektizid registriert, darunter vier PH_3 -Analoge (Tab. 1). Eine zu geringe Anzahl unterschiedlicher Mittel und Wirkstoffe kann aber ein erhöhtes Resistenzrisiko bedeuten, da ein gebotener Wirkstoffwechsel und da-

mit meist auch ein Wechsel des Wirkungsmechanismus deutlich schwieriger ist und je nach Anwendungsgebiet schnell an seine Grenzen gerät. Darüber hinaus kann auch Stickstoff mit geringen Restmengen an Sauerstoff zur Schädlingsbekämpfung im Vorratsschutz eingesetzt werden (Sakka et al., 2020). Nach Pflanzenschutzgesetz bedarf es dafür keiner Zulassung.

Die Aufwandmenge von PH_3 kann je nach Anwendungsform und Produktart variieren. Da der Wirkstoff meistens als Feststoff, z. B. Aluminium- und Magnesiumphosphid vermarktet wird, orientiert sich der Aufwand an der Applikation der Darreichungsformen, die in gepresster Form mit Zusatzstoffen als Pellets, als Tabletten, als Plates oder in pulverisierter Form mit Zusatzstoffen in Beuteln oder als Gas (Phosphan) verwendet werden (Tab. 2).

Temperatur und Einwirkzeit sowie Gasdichtigkeit des Lagerobjekts spielen für die Wirksamkeit der Begasung mit PH_3 eine entscheidende Rolle. Die Wirksamkeit der PH_3 -Konzentration variiert je nach Dichtigkeit des begasteten Objektes und Geschwindigkeit der Luft- bzw. Windströmung am Begasungsort (Reichmuth, 1993). Die letale Wirkung von PH_3 ist bei Temperaturen über 20°C für vorratsschädliche Insekten höher als bei den kühleren Temperaturen. Bei Temperaturen unter 15°C soll eine längere Einwirkzeit sichergestellt werden, damit die vollständige Abtötung erreicht wird (Hole et al., 1976). Auch geringer Sauerstoffgehalt im begasteten Objekt und dadurch erhöhte Respiration der Insekten kann die Toxizität des PH_3 erhöhen (Bond et al., 1967; Bond et al., 1969; Mueller, 1994). Studien mit verschiedenen Insektenarten zeigen, dass PH_3 bei präimaginalen Entwicklungsstadien langsamer als bei den adulten Käfern wirkt (Vincent & Lindgren, 1972; Bell, 1977; Bell et al., 1984; Kaur et al., 2012; Gourgouta et al., 2021). Besonders bei den PH_3 -toleranten Insektenstämmen von *Sitophilus granarius* sind die Unterschiede der Mortalität zwischen den Entwicklungsstadien hoch (Howe, 1973). Bei einer Studie von Kashi (1981) überlebten einige Stämme von *Sitophilus oryzae* und *S. granarius* bei einer PH_3 -Konzentration von bis zu 80 mg/l über 24 Stunden, während die Toleranzgrenze bei Stämmen von *Tribolium castaneum*, *T. confusum* und *Rhyzopertha dominica* nicht mehr als 0,2 mg/l PH_3 über 12 Stunden betrug. Die Ergebnisse einiger Studien mit

Tab. 1: In Deutschland zugelassene Wirkstoffe für den Vorratsschutz (aus: BVL online Datenbank <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp>, Stand: März 2022)

Wirkstoff	Wirkungsbereich	Anzahl der zugelassenen Mittel	Zugelassen seit	Zulassung bis	MoA Gruppe
Aluminiumphosphid	Insektizid	11	1971	2027	24A
Magnesiumphosphid	Insektizid	4	1975	2025	
Zinkphosphid	Rodentizid	2	1971	2025	
Phosphorwasserstoff (PH_3)	Insektizid	1	1998	2026	
Pyrethrine	Insektizid	10	1971	2023	3A
Deltamethrin	Insektizid	8	1978	2023	
Cypermethrin	Insektizid	2	1978	2023	
Sulfurylfluorid	Insektizid	1	2004	2024	8C
Kieselgur	Insektizid, Akarizid	2	1997	2022	UNM
Kohlendioxid	Insektizid, Akarizid	2	1988	2023	n. k.

Tab. 2: Die zugelassenen Aufwandmengen für PH_3 in gasdichten Räumen und Silozellen (aus: BVL online Datenbank <https://apps2.bvl.bund.de/psm/jsp/index.jsp>, Stand: März 2022)

Anwendungstechnik	Freisetzung PH_3	Gelagertes Produkt	Temp. (°C)	Aufwandmenge	Einwirkzeit
Pellets je 0,6 g	0,2 g	Getreide	> 10	50 Stk./m ³	5 – 14 Tage
Tabletten je 3 g	1,0 g	Getreide	k. A.	15 Stk./t	4 Tage
		Getreideerzeugnisse (Mehle), Hülsenfrüchte	k. A.	5 Stk./m ³	10 Tage
		Trockenobst			
Beutel je 34 g	11,3 g	Getreide	> 10	34 g/t	120 Std.
		Getreideerzeugnisse (Mehle), Tee, Kakao, Hülsenfrüchte, Gewürze, Kaffee, Expeller, Trockengemüse	> 10	30 g/t	120 Std.
		Leere Räume bzw. Silozellen	k. A.	15 g/t	120 Std.
Plates je 117 g	33 g	Getreide	> 10	117 g/6 m ³	2,5 – 5 Tage
Phosphorwasserstoff als Gas	1,7 %	Getreide	> 25 – 15	3,7 g/m ³	7 – 10 Tage
		Fetthaltige Samen, Kaffee, Kakao, Trockenobst	> 20	3,7 g/m ³	48 – 96 Std.

verschiedenen Insektenarten zeigen, dass die Toleranz- oder Resistenzgrade je nach gewählten Begasungsmethode und Umweltfaktoren stark variieren können (Bell, 2014). Die Toleranz-/Resistenzmechanismen unterscheiden sich bei hohen und niedrigeren Konzentrationen und die Wirksamkeit kann sich bei Einsatz sehr hoher Konzentrationen gegenüber moderaten Konzentrationen vermindern (Winks & Hyne, 1994).

PH_3 -Resistenzen im Vorratsschutz

Definition

Die Bildung von resistenten Stämme gegen einen oder mehrere insektizide Wirkstoffe basiert auf der natürlich vorkommenden, vererbaren Fähigkeit von Insekten, eine Behandlung mit Pflanzenschutzmitteln (PSM) zu überleben, die normalerweise tödlich wirkt (EPPO, 2015). In Erweiterung dazu kann es durch wiederholte subletale Behandlung von Insekten über mehrere Generationen zur Selektion von vererbbarer Resistenz kommen, also zu einer nicht natürlich auftretenden Eigenschaft. Nach dieser Definition stellen Unterschiede in der Empfindlichkeit des Zielorganismus, die in Laboruntersuchungen erkennbar sind, möglicherweise nicht unbedingt auch eine Resistenz dar, wenn der Unterschied nicht zu einer geringeren Wirksamkeit des Insektizids führt (EPPO, 2015). Das Resistenzrisiko eines Pflanzenschutzmittels wird in der EU während der Wirksamkeitsbewertung im Rahmen der Zulassung nach der Verordnung 1107/2009 beurteilt (Anonym, 2009). Strategien zur Resistenzvermeidung werden bei gegebener Erfordernis (und wenn möglich) bereits in den zugelassenen Anwendungen berücksichtigt, so dass die Resistenzgefahr vor dem Inverkehrbringen des Wirkstoffes erkannt und mit geeigneten Maßnahmen reduziert werden kann (Anonym, 2009). Diesbezüglich sind den Antragsunter-

lagen jeweils Informationen über bekannte Resistenzen bzw. das Resistenzrisiko vorzulegen.

Gegenüber der Resistenz beinhaltet die Toleranz eine nicht vererbare, sondern vielmehr eine umweltabhängige Widerstandskraft der Insekten ohne Selektionsdruck gegenüber äußeren Einflüssen, wie eben der Wirkung von Pflanzenschutzmitteln. Die stadienabhängige Wirkung von PH_3 könnte der Toleranz zugeschrieben werden.

Der Wirkstoffwechsel stellt eine der wichtigsten Maßnahmen für die Resistenzvermeidung dar. Nicht immer stehen aufgrund der geringen Wirkstoffpalette die von der European and Mediterranean Plant Protection Organization (EPPO) und dem Nationalen Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (NAP) empfohlenen mindestens drei unterschiedlichen Wirkungsklassen zur Verfügung. Diese Wirkstoffklassen können wiederum in fünf unterschiedliche Gruppen nach deren Wirksamkeitsmechanismen der Klassifizierung des Insecticide Resistance Action Committee (IRAC) eingeteilt werden (Tab. 1). Eines der wichtigsten Instrumente des IRAC ist das MoA-Klassifizierungsschema (Mode of Action). Dieses Schema bietet Pflanzenschutzmittelanwendern Anhaltspunkte und Richtlinien für die Auswahl von Insektiziden, damit diese in einem Resistenzmanagementprogramm (IRM) erfolgreich eingesetzt werden können. Eine kompakte Auflistung der MoA-Gruppen für vorratsschutzrelevante Mittel ist in der Tab. 1 dargestellt. Eine umfassendere Auflistung der Resistenzklassen ist auf der Internetseite <https://irac-online.org/> verfügbar (IRAC, 2020).

Grundlagen der Resistenzentwicklung

Resistenzen entstehen durch einseitigen Selektionsdruck auf die Schadorganismen und die häufige Verwendung derselben Wirkungsklassen von Pflanzenschutzmitteln. Damit wird die Selektion von Individuen mit Resistenzgenen provoziert. Aber

auch der fehlerhafte Einsatz von Begasungstechniken kann dazu führen, dass sich Resistenzen bei Insekten entwickeln, weil man die erforderliche Aufwandmenge und Letaldosis unter den gegebenen Praxisanwendungen nicht erreicht oder nicht lang genug aufrechterhalten kann (Abb. 1). Bei den meisten Insekten sind die Ei- und Puppenstadien viel toleranter als die aktiven Larven- oder Erwachsenenstadien (Gautam et al., 2020) und können sich sogar während der Exposition weiterentwickeln. Daher werden für die Schädlingsbekämpfung mit PH_3 die empfohlenen Expositionen für die Behandlung so eingestellt, dass sie die Dauer der toleranten Stadien bei jeder Temperatur überschreiten. Wenn keine angemessene Expositionsdauer eingestellt wird, kann dies dazu führen, dass selbst sehr hohe Wirkstoffkonzentrationen nicht die vollständige Tilgung aller Stadien erreicht. Die häufige Nutzung von PH_3 zur Bekämpfung von Insekten im Vorratsschutz bei zu kurzer Exposition und/oder in schlecht abgedichteten Lagern hat in vielen Ländern zur Entwicklung resistenter Stämme geführt (Taylor & Halliday, 1986; Bell, 2000). Jagadeesan et al. (2021) berichten, dass auch die Anwesenheit bestimmter Genvarianten wie z. B. *rph1* und *rph2* bei *C. ferrugineus* die Resistenz gegen PH_3 begünstigen. Die Gene für kutikulares Protein und Mitochondrien sollen ebenfalls eine wichtige Rolle spielen (Chen et al., 2020).

Die Untersuchungen von Collins et al. (2001) und Nayak et al. (2015) zeigten in diesem Zusammenhang eine signifikante Korrelation zwischen einer schnellen Etablierung einer Resistenz und dem lokalen Selektionsdruck sowie der Ausbreitung der resistenten Insekten. Die Studien legen nahe, dass Resistenzen gegen PH_3 durch "aktive Exklusion" oder PH_3 -Sättigung in den trachealen Wänden anstelle niedrigerer Respirationsraten in den Schadorganismen hervorgerufen werden (Price, 1984; Chaudhry & Price, 1992). Die Entgiftung erfolgt also bei

den Insekten durch die Exklusion des Gases über die Atemwege. Resistente Insekten können offenbar hohe Konzentrationen über kurze Expositionszeiten überleben, werden jedoch bei längerer Einwirkzeit abgetötet (Chaudhry, 1997). Bei Experimenten im australischen Vorratsschutzinstitut CSIRO (Stored Grain Research Laboratory, Canberra, Australia) wurde die unterschiedlich große Aufnahme von PH_3 mit Hilfe von eigens aus radioaktiv markierter Phosphorsäure hergestelltem PH_3 durch diverse Imagines verschiedener resistenter Arten nachgewiesen (Reichmuth, 1990). Es konnte während dieser Untersuchungen auch gezeigt werden, dass durch Verlängerung der Einwirkzeit oder auch der Anfangsdosierung selbst hochgradig resistente Tiere abgetötet werden konnten.

In den 1980er und 1990er Jahren gab es in Australien ein massives Problem mit der Resistenz gegen PH_3 in den gelagerten Vorräten, die auf 'nicht korrekte' Anwendungsbedingungen wie z. B. undichte Silos, Teil- oder Open-Top-Begasungen zurückzuführen waren (Banks & Annis, 1984; Collins, 1998; Collins et al., 2001). In den 1990er Jahren sind verschiedene technische Lösungen wegen dieser Schwierigkeiten bei der PH_3 -Begasung entwickelt und in die Praxis eingeführt worden. Probleme bei der Gasverteilung in Silos oder Schiffsladeräumen wurden unter Verwendung der US-Amerikanischen J-Systems™ bzw. CLF-Systeme (Closed Loop Fumigation, dt. Kreislaufbegasung) gelöst. Die Verteilung von PH_3 in großen Lagern ist nicht immer gleichmäßig, so dass die elektronisch gemessenen Konzentrationen zeitlich und räumlich stark variieren, wie eine aktuelle Studie aus Griechenland bestätigte (Agrafioti et al., 2020). Eine relativ kostengünstige Methode zur Überwachung der Gaskonzentration mit den Messröhrchen, die in Deutschland besser als Dräger-Röhrchen bekannt sind, für die korrekte Messung der PH_3 -Konzentration wurde von Brabec et al. (2021) beschrieben.

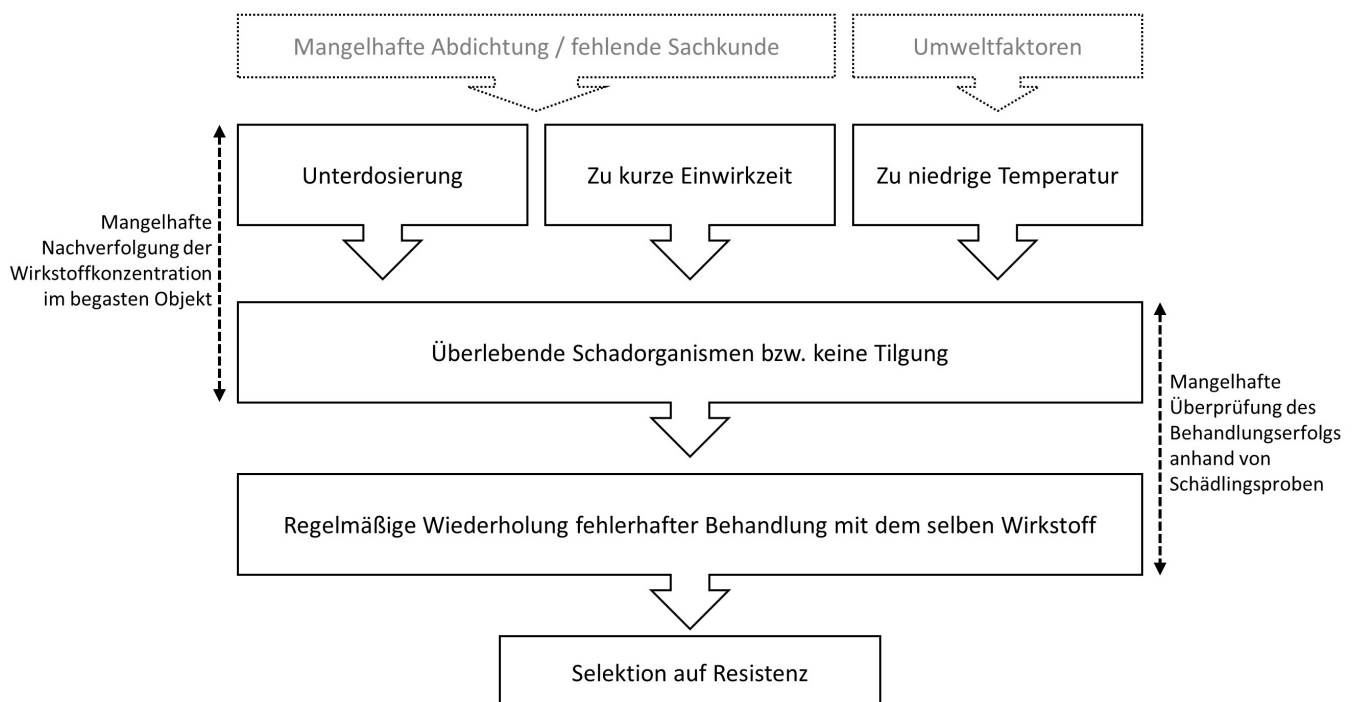


Abb. 1. Entstehung einer Resistenz im Vorratslager gegen Begasungsmittel und die Hauptfaktoren, die eine Resistenzentwicklung begünstigen.

Chronik der PH₃-Resistenzproblematik im Vorratsschutz

Von einer Resistenzproblematik im Vorratsschutz wurde zum ersten Mal von Monro (1961) für die Insektenstämme des Kornkäfers (*Sitophilus granarius*) aus Großbritannien und Kanada berichtet. Resistenzen gegen PH₃ zeigten sich beim Rotbraunen Reismehlkäfer (*Tribolium castaneum*) in Nigeria (Bond et al., 1969; Winks, 1969) und in Australien (Champ & Campbell-Brown, 1970; Dyte, 1974). Die Ernährungs- und Landwirtschaftsorganisation der Vereinten Nationen (FAO) hat im Jahr 1975 eine weltweite Umfrage über resistente Schadorganismen im Vorratsschutz durchgeführt und über Resistenzfälle gegenüber Malathion, Lindan, Methylbromid und PH₃ berichtet, wobei in 33 der 82 untersuchten Ländern Resistenzen festgestellt worden sind (Champ & Dyte, 1977).

Die Studie von Agrafioti et al. (2019) liefert einen umfangreichen Datensatz zur Bewertung der PH₃-Resistenz in Griechenland, indem sich 43 von 53 gesammelten Insektenstämme von *Rhyzopertha dominica*, *Sitophilus oryzae*, *S. granarius*, *Cryptolestes ferrugineus*, *Tribolium confusum*, *T. castaneum* und *Oryzaephilus surinamensis* als resistent erwiesen haben. Von den getesteten Arten wurden *R. dominica*-Stämme (Getreidekapuziner) im Vergleich zu anderen Arten häufiger als resistent diagnostiziert. Einen guten Überblick kann man in Boyer et al. (2012) finden, indem alle Veröffentlichungen über 139 resistente Insektenstämmen aus 26 Ländern von 1995 bis 2010 zusammengefasst worden sind. In ihrer Publikation haben Boyer et al. (2012) acht PH₃-resistente Insektenarten (*C. ferrugineus*, *O. surinamensis*, *Lasioderma serri-corne*, *R. dominica*, *S. oryzae*, *S. zeamais*, *T. castaneum* und *Trogoderma granarium*) beschrieben, wovon allerdings keine für Deutschland gelistet ist (Boyer et al., 2012). In Australien, wo im Siroflo-Verfahren (Winks) nur Spitzengehalte von 50–100 ppm in Luft eingesetzt wurden, traten massive Resistenzen bei Staubläusen und anderen Insekten auf. Eine aktuelle Studie berichtet von PH₃-resistenten Staub- bzw. Bücherläuse (*Liposcelis bostrychophila*) auf den Philippinen (Mangoba & de Guzman Alvindia, 2021).

Ausbreitung der PH₃-Resistenz durch Klimawandel und Globalisierung

Durch den Klimawandel und den globalen Handel mit landwirtschaftlichen Produkten werden Schädlinge weltweit verbreitet, inkl. derer aus Australien, China und Teilen der USA, wo bereits Resistenzen gegenüber PH₃ vorkommen (Boyer et al., 2012). Anders als in wärmeren Ländern erfordert das mitteleuropäische Klima meist nur eine einmalige Anwendung pro Partie und Jahr, was insgesamt günstige Rahmenbedingungen mit einem geringen Selektionsdruck für PH₃-Resistenzen schafft. Dennoch können der Klimawandel den Selektionsdruck, besonders für die Schadorganismen tropischer Herkunft, erhöhen, da diese Faktoren die Anzahl der Generationen und die Überwinterung und somit das Überleben der Schadinsekten begünstigt. Nach Holloway et al. (2016) kann die Erwärmung aufgrund der höheren Vermehrungsraten einen hohen Selektionsdruck auslösen, da sich eine Mutation für ein Resistenzgen schneller durchsetzen kann. Nach Jackson et al. (2011) sollen die Strategien zur Schädlingsbekämpfung

aufgrund der erhöhten Evolutionsrate genetisch unterschiedlicher Stämme und die damit einhergehende mögliche Entwicklung von Resistenzen gegenüber Pflanzenschutzmitteln unter warmen Bedingungen angepasst werden.

Ein signifikanter Unterschied zu den Resistenzgraden gegen PH₃ beim Bohnenkäfer wurde auch in verschiedenen Gebieten bzw. klimatischen Regionen eines Landes nachgewiesen (Arora & Srivastava, 2021; Arora et al., 2021).

Strategien zur Vermeidung und zum Management der PH₃-Resistenz in den „hot-spots“ Australien und den USA

In den USA und Australien gibt es die meisten Erfahrungen zur Resistenzvermeidung und zum Resistenzmanagement von PH₃ im Vorratsschutz. Durch systematisch zu niedrig gewählten Anfangs-Dosierungen von weniger als 1-2 g/m³ (oft auch mit viel zu kurzen Öffnungszeiten) wurden in den USA und Australien schwerwiegende Resistenz aufgebaut. Auch werden Probleme mit der notwendigen Luftfeuchtigkeit für die PH₃-Entwicklung aus Metallphosphiden häufig als Ursache für resistenzfördernde PH₃-Konzentrationen genannt. Daher wurden die automatisierten Dosiersysteme Siroflo® und CSL unter Verwendung von aus Zylindern dosiertem PH₃ (2 %) und CO₂ (98 %) verfeinert und bieten eine erhebliche Verbesserung gegenüber anderen Dosierungsmethoden (Winks & Ryan, 1991; Winks & Russell, 1997). Durch die gewählte Technik bei Einsatz relativ geringer Gehalte von PH₃ in Luft und dem kontinuierlichen Spülen eines oben offenen Getreidesilos (Open Top Silo, üblich in Australien und den USA) wurde insbesondere in der oberen Getreideschicht durch Rückvermischung mit der umgebenden Luft subletale Begasungsbedingungen bzw. -konzentrationen erzeugt. Die Selektion resistenter Schadinsekten war vorprogrammiert und kann dort bis heute beobachtet werden. Das führte zur Abdichtung dieser Silos im oberen Bereich und der Einführung der Kreislaufbegasung, in Australien SIROCIRC® genannt, mit etwas höheren Gehalten von PH₃ (Newman et al., 2000). Herkömmliche Dosiertechniken unter Verwendung von Metallphosphiden wie Aluminium- und Magnesiumphosphid, die nur einige Tage lang PH₃ freisetzen, können bei fehlerhaften Anwendungen (mangelhafte Abdichtung, zu niedrige Temperatur etc.) einige Insektenstadien überleben lassen und im ungünstigen Fall das Risiko für eine Resistenzentwicklung erhöhen (Bell, 2000; 2014). Die Kreislaufbegasung wurde bereits Anfang der 1990er Jahre in den USA verbreitet eingesetzt und besonders aufgrund des niedrigen Gaseinsatzes als wirtschaftlich und umweltfreundlich gesehen (Noyes & Kenkel, 1994; Noyes et al., 1999). Allerdings bietet der Einsatz von Kreislaufbegasung bei gasundichten Silos und Lagerräumen optimale Bedingungen für die Resistenzentwicklung der vorratsschädlichen Insekten, wenn die niedrige Dosierung von PH₃ für die vollständige Abtötung der Insekten nicht ausreicht.

In Australien wurden strenge Anwendungsregeln wie Drucktests für Begasungen durchgesetzt (Emery et al., 2011). Australien verfügt über ein wirksames Programm zur Überwachung der PH₃-Resistenz, mit dem die landwirtschaftlichen Betriebe und Getreideläger im ganzen Land regelmäßig überwacht werden. Seit seiner Einführung in den 1990er Jahren

hat dieses Programm maßgeblich dazu beigetragen, neue Resistenzfälle und deren landesweite Ausbreitung zu erkennen (Nayak et al., 2017). Dies hat es ermöglicht, sowohl entomologische als auch molekulardiagnostische Methoden zu etablieren, um Resistenzgrade („schwach“ bis „stark“) in allen wichtigen vorratsschädlichen Schadorganismen festzustellen (Emery et al., 2011) und neue Anwendungsprotokolle für die Begasung resistenter Insekten zu entwickeln (Nayak et al., 2017). In den 1980er Jahren hat die australische Getreidehandelsgenossenschaft (CBH Group) ein Programm zur Siloabdichtung gestartet. Um den Resistenzen aufgrund von undichten Silos vorzubeugen, haben die westaustralischen Silobauer beschlossen, nur gasdichte Silos zu bauen (Emery et al., 2011). Nach australischem Standard für die Getreidelagerung (AS 2628) müssen an allen neu erbauten als gasdicht geltenden Silos im Leerzustand eine Druckhalbwertzeit von mindestens fünf Minuten erreichen werden (Anonym, 2010).

Dieses Verfahren zur Siloabdichtung wurde erstmalig in Europa durch das vom JKI koordinierte Netzwerk Vorratsschutz (<https://www.netzwerk-vorratsschutz.de/>) mit Mitteln des BMEL in einem Lager erfolgreich getestet (Abb. 2).

Entwicklung und Anwendung von Resistenztests

Um das Auftreten PH_3 -resistenter und -toleranter Stämme erkennen zu können, ist von der FAO ein Resistenztest entwickelt worden (Anonym, 1975). Bei diesem Test können die resistenten Käfer durch Exposition mit PH_3 nach einigen Tagen bestimmt werden. Grundsätzlich handelt es sich bei

der FAO-Methode um einen Mortalitätstest, bei dem normalempfindliche und resistente Insekten unterschieden werden, indem die adulten Käfer 20 Stunden lang einer Konzentration von etwa 30 bis 50 ppm (je nach Art) PH_3 ausgesetzt sind. Aufgrund der niedrigen Dosierung ist eine mögliche Resistenz erst 14 Tage nach der Begasung feststellbar.

Der Resistenztest wurde im Jahr 1992 überarbeitet und als Schnelltest bzw. Knock-Down-Test (KDT) etabliert (Reichmuth, 1992). Hierbei können resistente Käfer bereits nach 20 Minuten erkannt werden (Reichmuth, 1992; Chaudhry, 2000). Damit kann man durch Beobachtung von Tieren aus dem Freiland (z. B. bei Tierproben aus befallener Importware im Hamburger Hafen), die man in einer großen durchsichtigen Plastikspritze von 100 ml einer Gaskonzentration von etwa 100 ppm PH_3 in Luft aussetzt und auf anteiligen Eintritt der Tiere in Narkose beobachtet, erstens feststellen, ob diese Tiere resistent sind (wenn sie sich nach 30 Minuten immer noch bewegen) und darüber hinaus zweitens aus der Länge der zeitlichen Verzögerung bis zur Narkose bzw. Immobilität ermitteln, wie hoch etwa der Resistenzgrad dieser Tiere im Verhältnis zu normalempfindlichen Labor-Tieren ist. Die eingeschränkte bzw. verlangsamte Mobilität der Insekten (*T. castaneum* und *R. dominica*), die einer PH_3 -Begasung von 3000 ppm ausgesetzt waren, konnten per automatisierte Video-Tracking-Software nachgewiesen werden (Agrafioti et al., 2021). Auf der Basis des Schnelltestes hat die Firma Detia-Degesch GmbH (Laudenbach, Deutschland) ein Testkit zur Feststellung der Phosphinresistenz entwickelt (Handelsname: Posphine Tolerance Test). Auf Grundlage von Bioassay



Abb. 2. Nach einem australischen Standard abgedichtete „weiße“ Silozelle (Foto: JKI/VSnet/2019)

kann eine Resistenz bei einer Insektenpopulation in weniger als 30 Minuten diagnostiziert werden. Das Prinzip des Tests beruht auf der Mortalitätsrate von 20 adulten Insekten bei einer PH_3 -Konzentration von 3.000 ppm. Die Parameter des Resistenztests sind zuletzt im Jahr 2018 überarbeitet und aktualisiert worden (Goetze et al., 2018; Athanassiou et al., 2018). In einer ähnlichen Studie konnte man bei 25°C und 50 % rF. nach 1,5 Stunden mit 5 mg/l PH_3 (3.600 ppm) einen 99,9 %igen Knockdown ($\text{KT}_{99,9}$) bei resistenten Stämmen von *S. oryzae* erzielen (Nayak et al., 2019). Ein Vergleich aller Testmethoden zeigt, dass sowohl die Schnelltests als auch der FAO-Test ähnliche Ergebnisse zeigen, was darauf hindeutet, dass die Verwendung eines Schnelltests für einen kurzen Zeitraum von weniger als einer Stunde zum Nachweis der PH_3 -Resistenz realistische Ergebnisse liefern kann (Agrafioti et al., 2019). In einer aktuelleren Studie konnten die resistenten Insekten sogar nach 18 Minuten mittels eines etablierten Knockdown-Schnelltestes (KT_{100}) festgestellt werden (Afful et al., 2021).

Resistenzsituation in Deutschland und Strategien zur Resistenzvermeidung

In Deutschland ist der erste Resistenzfall beim Amerikanischen Reismehlkäfer *T. confusum* gegen PH_3 bereits 1977 festgestellt worden (Champ und Dyte, 1977). Mit der weltweiten Ausbreitung der Resistenzproblematik in den 1960er und 1970er Jahren (Monro et al., 1972; Bell, 1976; Bell et al., 1977) wurden in der Bundesrepublik Deutschland am früheren Institut für Vorratsschutz der ehemaligen Biologischen Bundesanstalt für Land- und Forstwirtschaft (BBA, heutiges JKI) von 1975 bis 1984 insgesamt 41 Schädlingsstämme aus dem Inland und 21 Stämme ausländischer Herkunft auf Resistenz gegenüber Malathion, Lindan und Pirimiphos-methyl getestet (Rassmann, 1978). Ergebnisse haben gezeigt, dass nur bei *Sitophilus*-Arten Resistenzen gegen Lindan und Malathion auftraten (Rassmann, 1988). Im Jahr 2003 ist ein weiterer einzelner Resistenzfall in Deutschland bekannt geworden, bei dem der Kornkäfer *S. granarius* mit einer PH_3 -Resistenz im Zusammenhang stand. Die Insekten wurden aus einem niedersächsischen Lagerhaus entnommen und durch die BBA als PH_3 -resistent getestet.

Adler (1997) und Reichmuth (1992; 1997; 1999; 2004; 2013) haben mehrfach über die Strategien der Resistenzvermeidung, wie z. B. der Dichtigkeit der Lagerräume und fachgerechte Durchführung der Bekämpfungsmaßnahmen gegen vorratsschädliche Insekten in Deutschland, berichtet.

Die Leitlinie für den integrierten Pflanzenschutz im Sektor Vorratsschutz wurde 2019 in den Anhang 1 des Nationalen Aktionsplans zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln aufgenommen (BANz AT 23.05.2019 B3). Diese sektorspezifische Leitlinie berücksichtigt Strategien und Maßnahmen zur Vermeidung von Insektizidresistenzen im Vorratsschutz (Flingelli & Kroos, 2014). Im Vorratsschutz sollen zunächst vorbeugende Maßnahmen berücksichtigt werden (Grundsatz 1), wie die Verwendung geeigneter Läger, die Lagerhygiene, die Nutzung der Möglichkeiten für Reinigung, Kühlung und Trocknung. Kommt es dennoch zu notwendigen Bekämpfungsmaßnahmen, dann stehen die nichtchemischen

Maßnahmen (Grundsatz 4) ganz oben, wie die Umlagerung und Reinigung von befallenen Lagergut oder die Anwendung biologischer Verfahren. Erst wenn diese, einer Resistenz entgegenwirkenden Maßnahmen nicht greifen, ist die Anwendung der chemischen Vorratsschutzmittel gerechtfertigt (Grundsätze 5 und 6). Bei der Anwendung der chemischen Mittel sind verfügbare Resistenzvermeidungsstrategien anzuwenden (Grundsatz 7), um die Wirksamkeit der Produkte zu erhalten, sofern ein Risiko der Resistenz gegen Pflanzenschutzmaßnahmen bekannt ist und der Umfang des Befalls mit Schadorganismen wiederholte Pflanzenschutzmittelanwendungen erforderlich macht. Dafür zählt neben der fachgerechten und vorschriftsmäßigen Anwendung nach Möglichkeit die Verwendung verschiedener Pflanzenschutzmittel mit unterschiedlichen Wirkungsweisen als wichtigste Maßnahme. Dafür steht allerdings in Deutschland keine ausreichende Anzahl Wirkstoffe für den Vorratsschutz zur Verfügung.

Um die ausreichende Verfügbarkeit von PSM mit unterschiedlichen Wirkmechanismen (MoA) für effiziente Resistenzstrategien zu sichern, sollen Forschungen über alternative Wirkstoffgruppen verstärkt werden (BMEL, 2019).

Im Jahr 2016 wurde am Institut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz des JKI ein Workshop zum Thema "*Resistenzstrategien im Vorratsschutz*" durchgeführt. Als Ergebnis konnte festgehalten werden, dass derzeit kein akutes PH_3 -Resistenzproblem in der Bundesrepublik Deutschland bekannt ist. Der Workshop hat die Empfehlung ausgesprochen, dass die Akteure aus Wissenschaft, Zulassung und Praxis für resistenzvermeidende Maßnahmen sensibilisiert werden, um auch im Ernstfall auf Resistenzen schnell und zielführend reagieren zu können. Als resistenzmindernde Maßnahmen gelten:

- Vermeidung der Resistenz ist besser als Bekämpfung!
- Resistenzmanagement ist höchst effektiv, wenn es entwickelt wird, bevor ein Kontrollprogramm startet!
- Korrekte Anwendung des PSM (Konzentration, Zeit, Technik, Abdichtung) ist essenziell!
- Schulung und Begaserlehrgänge nach TRGS 512.
- Resistenz-Monitoring von Verdachtsfällen.
- Rotation von Verfahren zu unterschiedlichen Wirkstoffgruppen („mode of action“)!
- PSM-Anwendungen und Resistenzvermeidungsstrategien sollten Teil eines weit verbreiteten integrierten Pflanzenschutz-Programmes sein!
- Bei Auftreten von Resistenzen oder resistenzverdächtigen Stämmen sofortiges Handeln (Reduktion des Selektionsdruckes)!

Zur Meldung von Verdachtsfällen auf Resistenz ist auf der Internetseite des Wissensportals Vorratsschutz des Julius Kühn-Institutes ein Kontaktformular (<https://vorratsschutz.julius-kuehn.de/kontakt.php>) in Deutschland hinterlegt.

Schlussfolgerung

Das mitteleuropäische Klima, die konsequente Umsetzung der guten fachlichen Praxis im Vorratsschutz in Deutschland und die Einhaltung der Grundsätze des integrierten Pflanzenschutzes begünstigen die aktuell noch nachhaltige Wirksam-

keit von PH_3 und der weiteren verfügbaren chemischen Pflanzenschutzmittel im Vorratsschutz. Häufig sind nur einmalige Anwendungen pro Kultur und Jahr zugelassen oder notwendig: ein vorausschauendes Handeln, das den Selektionsdruck vermindert. Die kleine Wirkstoffpalette kann zudem bereits in einigen Anwendungen durch nicht-chemische Verfahren erweitert werden.

Für die Minderung des Resistenzrisikos ist ein effektives Resistenzmanagement erforderlich. Das Resistenzmanagement kann die Entstehung von Resistenzen nicht verhindern, aber es kann das Auftreten von Resistenzen in der Praxis erheblich senken und somit die Wirksamkeit von PSM-Behandlungen bewahren (FAO, 2012). Die Ursachen einer Resistenzentwicklung sind so früh wie möglich zu erkennen und zu berücksichtigen, damit der bestehende Selektionsdruck wieder gemindert werden kann. Allerdings sollten die Risikominderungsmaßnahmen nicht erst beginnen, wenn die Resistenz bereits vorhanden ist. Gemäß Artikel 56 (4) der VO (EG) Nr. 1107/2009 erstattet der Inhaber einer Zulassung für ein Pflanzenschutzmittel den zuständigen Behörden der Mitgliedsstaaten, die sein Pflanzenschutzmittel zugelassen haben, jährlich Bericht, wenn ihm Informationen über eine unerwartet schwache Wirksamkeit, die Bildung einer Resistenz oder unerwartete Auswirkungen auf Pflanzen, Pflanzenerzeugnisse oder die Umwelt vorliegen (Anonym, 2009). Vorgesehen ist eine kontinuierliche Beobachtung, um im Bedarfsfall die Akteure in Zulassung, Officialberatung, Wissenschaft und insbesondere Praxis für resistenzmindernde Maßnahmen zu sensibilisieren und im Ernstfall auf Resistenzen schnell und zielführend reagieren zu können. In Deutschland hat das Julius Kühn-Institut gem. § 57 des Pflanzenschutzgesetzes die Aufgabe, Verfahren des Pflanzenschutzes einschließlich des Resistenzmanagements für Pflanzenschutzmittel zu prüfen und zu entwickeln. Das JKI-Fachinstitut für ökologische Chemie, Pflanzenanalytik und Vorratsschutz verfügt über langjährige Erfahrung und technische Ausstattung, um eine solche Erhebung bundesweit durchzuführen.

Hieraus und aufgrund der bisher noch immer nicht vollständig aufgeklärten Mechanismen der Resistenzbildung gegenüber PH_3 ergeben sich die folgenden, mittelfristigen Forschungsfragen für das JKI:

- Wie groß ist die Stabilität der Resistenz bei fehlendem Selektionsdruck?
- Wie etablieren und breiten sich resistente Vorratsschädlinge in Deutschland aus, die eventuell durch den Import eingeschleppt wurden?
- Wie gelingt mittels Digitalisierung im Vorratsschutz und Real-Time-Monitoring bei der Begasung eine effektive Verteilung des Begasungsmittels im Vorratslager?

Die breite Anwendung und Weiterentwicklung der Leitlinie für den integrierten Pflanzenschutz im Sektor Vorratsschutz trägt dazu bei, dass die Resistenzproblematik im Vorratsschutz hinreichend Beachtung findet und die wenigen vorhanden PSM bei Bedarf effizient angewandt werden können. Hierzu ist der enge Kontakt und Austausch von Wissenschaft und Praxis unabdingbar und wird im Rahmen des Netzwerk Vorratsschutz (VSnet) ausgebaut <https://www.netzwerk-vorratsschutz.de/vsnet/de/home>.

Auch wenn derzeit in Deutschland kein akutes Resistenzproblem im Vorratsschutz besteht, ist das Beobachten von Sensitivitätsänderungen bei Vorratsschädlingen durch alle Beteiligten anzustreben. Nach deutschem Recht wird im Pflanzenschutz auf der Grundlage der vom Anmelder auch für die Behandlung möglicherweise resistenter Tiere vorgelegten Versuchsergebnisse eine Obergrenze für die Dosierung festgelegt, die gerade auch für den Fall des Auftretens resistenter Stämme, den Praktikern erlaubt, mit höherer Dosierung – aber im Rahmen der Zulassung – eine vollständige Bekämpfung aller vorratsschädlichen Insekten sicher zu stellen. Es obliegt dem für die Begasung zuständigen Sachkundeinhaber, je nach Lage die Dosierung festzulegen. Im Normalfall wird diese Dosierung – auch wegen des allgemein gültigen Minderungsgebots – dann unterhalb der Obergrenze liegen. Wegen der möglichen Selektion resistenter Stämme werden in Deutschland vergleichsweise hohen Dosierungen eingesetzt, gerade um die Resistenzentwicklung zu unterbinden.

Verdachtsfälle sollten unmittelbar dem Zulassungsinhaber, der Zulassungsbehörde BVL und dem JKI zwecks weiterer Untersuchungen gemeldet werden. Ein entsprechendes Formular steht im Wissensportal Vorratsschutz online unter <https://vorratsschutz.julius-kuehn.de/kontakt.php> zur Verfügung.

Danksagung

Wir danken Herrn Dr. Cornel Adler und den gesamten Fachbereich Vorratsschutz sowie Frau Dr. Andrea Krähmer und Herrn Dr. Bernd Hommel für ihre Anregungen und den wissenschaftlichen Austausch.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Der Autor und die Autorin erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Adler, C., 1997: Resistance – A threat to the use of controlled atmospheres for stored product protection. Proceedings of 4th International Conference Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 21-26 April 1996, 455-466, Printco Ltd., Nicosia, Cyprus.

Afful, E., A. Cato, M.K. Nayak und T.W. Phillips, 2021: A rapid assay for the detection of resistance to phosphine in the lesser grain borer, *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). Journal of Stored Products Research **91**, 101776, DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101776.

Agrafioti, P., C.G. Athanassiou, 2018: Insecticidal effect of contact insecticides against stored product beetle populations with different susceptibility to phosphine. Journal of Stored Products Research **79**, 9-15, DOI: 10.1016/j.jspr.2018.06.002.

Agrafioti, P., C.G. Athanassiou, M.K. Nayak, 2019: Detection of phosphine resistance in major stored-product insects in Greece and evaluation of a field resistance test kit. Journal of Stored Products Research **82**, 40-47, DOI: 10.1016/j.jspr.2019.02.004.

- Agrafioti, P., D.L. Brabec, W.R. Morrison III, J.F. Campbell, C.G. Athanassiou, 2021:** Scaling recovery of susceptible and resistant stored product insects after short exposures to phosphine by using automated video-tracking software. *Pest management science* **77** (3), 1245-1255, DOI: 10.1002/ps.6135.
- Agrafioti, P., V. Sotiroudas, E. Kaloudis, S. Bantas und C.G. Athanassiou, 2020:** Real time monitoring of phosphine and insect mortality in different storage facilities. *Journal of Stored Products Research* **89**, 101726, DOI: 10.1016/j.jspr.2020.101726.
- Anonym, 1975:** Recommended methods for the detection and measurement of resistance of agricultural pests to pesticides. Tentative method for adults of some major pest species of stored cereals, with methyl bromide and phosphine. FAO Method No. 16. *Plant Prot. Bull. FAO* **23**, 12-25.
- Anonym, 2009:** Verordnung (EG) Nr. 1107/2009 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 über das Inverkehrbringen von Pflanzenschutzmitteln und zur Aufhebung der Richtlinien 79/117/EWG und 91/414. EU, Amtsblatt der Europäischen Union.
- Anonym, 2010:** Sealed grain-storage silos—Sealing requirements for insect control. Australian Standard AS 2628—2010. Sydney, AU.
- Arora, S., C. Srivastava, 2021:** Locational dynamics of concentration and efficacy of phosphine against pulse beetle, *Callosobruchus maculatus* (Fab). *Crop Protection* **143**, 105475, DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105475.
- Arora, S., J. Stanley, C. Srivastava, 2021:** Temporal dynamics of phosphine fumigation against insect pests in wheat storage. *Crop Protection* **144**, 105602, DOI: 10.1016/j.cropro.2021.105602.
- Athanassiou, C.G., N.G. Kavallieratos, D.L. Brabec, B. Oppert, R.N.C. Guedes, J.F. Campbell, 2018:** From narcosis to recovery: development of a rapid diagnostic test for phosphine resistance. *Julius Kühn-Archiv* **463**, 1006-1008, DOI: 10.5073/jka.2018.463.219.
- Banks, H.J., P.C. Annis, 1984:** On Criteria for Success of Phosphine Fumigations Based on Observation of Gas Distribution Patterns. In: *Developments in Agricultural Engineering*. Ed. Ripp, B.E., Elsevier, Vol. 5, S. 327-341.
- Bell, C.H., 1976:** The tolerance of developmental stages of four stored product moths to phosphine. *Journal of Stored Products Research* **12** (2), 77-86, DOI: 10.1016/0022-474X(76)90027-8.
- Bell, C.H., 1977:** Toxicity of phosphine to the diapausing stages of *Ephestia elutella*, *Plodia interpunctella* and other Lepidoptera. *Journal of Stored Products Research* **13** (4), 149-158, DOI: 10.1016/0022-474X(77)90024-8.
- Bell, C.H., 2000:** Fumigation in the 21st century. *Crop Protection* **19** (8), 563-569, DOI: 10.1016/S0261-2194(00)00073-9.
- Bell, C.H., 2014:** A review of insect responses to variations encountered in the managed storage environment. *Journal of Stored Products Research* **59**, 260-274, DOI: 10.1016/j.jspr.2014.06.004.
- Bell, C.H., B.D. Hole, P.H. Evans, 1977:** The occurrence of resistance to phosphine in adult and egg stages of strains of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrichidae). *Journal of Stored Products Research* **13** (2), 91-94, DOI: 10.1016/0022-474X(77)90066-2.
- Bell, C.H., S.M. Wilson, H.J. Banks, 1984:** Studies on the toxicity of phosphine to tolerant stages of *Trogoderma granarium* EVERTS (Coleoptera, Dermestidae). *Journal of Stored Products Research* **20** (2), 111-117, DOI: 10.1016/0022-474X(84)90017-1.
- BMEL, 2019:** Aktionsplan zur Verbesserung der Situation im Vorratsschutz – Nationaler Aktionsplan zur nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft (BMEL), Referat 713, Bonn (https://www.nap-pflanzenschutz.de/uploads/tx_bleinhalts-elemente/nap_aktionsplan_vorratsschutz_01_2019_low.pdf).
- Bond, E.J., H.A.U. Monro, C.T. Buckland, 1967:** The influence of oxygen on the toxicity of fumigants to *Sitophilus granarius* (L). *Journal of Stored Products Research* **3** (4), 289-294, DOI: 10.1016/0022-474X(67)90032-X.
- Bond, E.J., J.R. Robinson, C.T. Buckland, 1969:** The toxic action of phosphine absorption and symptoms of poisoning in insects. *Journal of Stored Products Research* **5** (4), 289-298, DOI: 10.1016/0022-474X(69)90002-2.
- Boyer, S., H. Zhang, G. Lempérière, 2012:** A review of control methods and resistance mechanisms in stored-product insects. *Bulletin of Entomological Research* **102** (2), 213-229, DOI: 10.1017/S0007485311000654.
- Brabec, D., W. Morrison, J. Campbell, F. Arthur, A. Bruce, K. Yeater, 2021:** Evaluation of dosimeter tubes for monitoring phosphine fumigations. *Journal of Stored Products Research* **91**, 101762, DOI: 10.1016/j.jspr.2021.101762.
- BVL, 2016:** PSM-Zulassungsbericht Frisin. Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit, 38104 Braunschweig.
- BVL, 2022:** Liste der zugelassenen Pflanzenschutzmittel in Deutschland mit Informationen über beendete Zulassungen. Braunschweig, Bundesamt für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit.
- Champ, B.R., M.J. Campbell-Brown, 1970:** Insecticide resistance in Australian *Tribolium castaneum* (Herbst) (Coleoptera, Tenebrionidae)—II: Malathion resistance in eastern Australia. *Journal of Stored Products Research* **6** (2), 111-131, DOI: 10.1016/0022-474X(70)90001-9.
- Champ, B.R., C.E. Dyte, 1977:** FAO global survey of pesticide susceptibility of stored grain pests. *Fao Plant Protection Bulletin* **25** (2), 49-67.
- Chaudhry, M.Q., 1997:** Review A Review of the Mechanisms Involved in the Action of Phosphine as an Insecticide and Phosphine Resistance in Stored-Product Insects. *Pesticide Science* **49** (3), 213-228, DOI: 10.1002/(SICI)1096-9063(199703)49:3<213::AID-PS516>3.0.CO;2-%23.

- Chaudhry, M.Q., 2000:** Phosphine resistance. *Pesticide Outlook* **11** (3), 88-91, DOI: 10.1039/B006348G.
- Chaudhry, M.Q., N.R. Price, 1992:** Comparison of the oxidant damage induced by phosphine and the uptake and tracheal exchange of ³²P-radiolabelled phosphine in the susceptible and resistant strains of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae). *Pesticide Biochemistry and Physiology* **42** (2), 167-179, DOI: 10.1016/0048-3575(92)90063-6.
- Chen, E.-H., J.-Y. Duan, W. Song, D.-X. Wang, P.-A. Tang, 2020:** RNA-seq Analysis Reveals Mitochondrial and Cuticular Protein Genes Are Associated with Phosphine Resistance in the Rusty Grain Beetle (Coleoptera:Laemophloeidae). *Journal of Economic Entomology* **114** (1), 440-453, DOI: 10.1093/jeet/taaa273.
- Collins, P.J., 1998:** Resistance to grain protectants and fumigants in insect pests of stored products in Australia. Proceedings of the Australian Postharvest Technical Conference, CSIRO, Canberra, Australia.
- Collins, P.J., G.J. Daghli, M.K. Nayak, P.R. Ebert, D. Schlipalius, W. Chen, H. Pavic, T.M. Lambkin, R. Kopittke, B.W. Bridgeman, 2001:** Combating resistance to phosphine in Australia. In: Donahaye, E.J., S. Navarro, J.G. Leesch (Hrsg.) *International conference on controlled atmosphere and fumigation in stored products*, Fresno, CA. 29 Oct. – 3 Nov. 2000, Executive Printing Services, Clovis, CA, U.S.A. pp. 593-607.
- Detia-Degesch, 2015:** Phosphine fumigation standard. Detia Degesch Group, Laudenbach, Germany.
- Dyte, C.E., 1974:** Problems Arising from Insecticide Resistance in Storage Pests 1. *EPPO Bulletin* **4** (3), 275-286, DOI: 10.1111/j.1365-2338.1974.tb02361.x.
- Emery, R.N., M.K. Nayak, J.C. Holloway, 2011:** Lessons learned from phosphine resistance monitoring in Australia. *Stewart Postharvest Rev* **7** (3), DOI: 10.2212/spr.2011.3.8.
- EPPO, 2015:** Resistance risk analysis. Standards for efficacy evaluation of plant protection products (<http://pp1.eppo.org/getnorme.php?n=213>). *OEPP/EPPO Bulletin* **45** (3), 371-387.
- FAO, 2012:** Guidelines on prevention and management of pesticide resistance. International code of conduct on the distribution and use of pesticides. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), Rome, Italy. E-ISBN 978-92-5-107348-3.
- Flingelli, G., G.M. Kroos, 2014:** Ausgangslage im Vorratsschutz für die Erstellung der Leitlinien des integrierten Pflanzenschutzes und des Aktionsplanes zur Verbesserung der Situation im Vorratsschutz. *Journal für Kulturpflanzen* **66** (9), 300–306, DOI: 10.5073/JfK.2014.09.02.
- Gautam, S.G., G.P. Opit, C. Konemann, K. Shakya, E. Hosoda, 2020:** Phosphine resistance in saw-toothed grain beetle, *Oryzaephilus surinamensis* in the United States. *Journal of Stored Products Research* **89**, 101690, DOI: 10.1016/j.jspr.2020.101690.
- Goetze, M.C., R. Steuerwald, P. Agrafioti, M.K. Sakka, G. Jakob, C.G. Athanassiou, 2018:** Technical improvement of the Detia Degesch Phosphine Tolerance Test Kit. *Julius-Kühn-Archiv* (463), 1002-1006, DOI: 10.5073/jka.2018.463.218.
- Gourgouta, M., P. Agrafioti, C.G. Athanassiou, 2021:** Insecticidal effect of phosphine for the control of different life stages of the khapra beetle, *Trogoderma granarium* (Coleoptera: Dermestidae). *Crop Protection* **140**, 105409, DOI: 10.1016/j.cropro.2020.105409.
- Hole, B.D., C.H. Bell, K.A. Mills, G. Goodship, 1976:** The toxicity of phosphine to all developmental stages of thirteen species of stored product beetles. *Journal of Stored Products Research* **12** (4), 235-244, DOI: 10.1016/0022-474X(76)90039-4.
- Holloway, J.C., M.G. Falk, R.N. Emery, P.J. Collins, M.K. Nayak, 2016:** Resistance to phosphine in *Sitophilus oryzae* in Australia: A national analysis of trends and frequencies over time and geographical spread. *Journal of Stored Products Research* **69**, 129-137, DOI: 10.1016/j.jspr.2016.07.004.
- Howe, R.W., 1973:** The susceptibility of the immature and adult stages of *Sitophilus granarius* to phosphine. *Journal of Stored Products Research* **8** (4), 241-262, DOI: 10.1016/0022-474X(73)90041-6.
- IRAC, 2020:** IRAC Mode of Action Classification Scheme. February 2020.
- Jackson, L.E., S.M. Wheeler, A. Hollander, A. O'Geen, B. Orlove, J. Six, D.A. Sumner, F. Santos-Martin, J. Kramer, W.R. Horwath, 2011:** Case study on potential agricultural responses to climate change in a California landscape. *Climatic Change* **109** (1), 407-427, DOI: 10.1007/s10584-011-0306-3.
- Jagadeesan, R., D.I. Schlipalius, V.T. Singarayan, N.S. Nath, M.K. Nayak, P.R. Ebert, 2021:** Unique genetic variants in dihydrolipoamide dehydrogenase (dld) gene confer strong resistance to phosphine in the rusty grain beetle, *Cryptolestes ferrugineus* (Stephens). *Pesticide Biochemistry and Physiology* **171**, 104717, DOI: 10.1016/j.pestbp.2020.104717.
- Kashi, K.P., 1981:** Toxicity of phosphine to five species of stored-product insects in atmospheres of air and nitrogen. *Pesticide Science* **12** (2), 116-122, DOI: 10.1002/ps.2780120203.
- Kaur, R., D.I. Schlipalius, P.J. Collins, A.J. Swain, P.R. Ebert, 2012:** Inheritance and relative dominance, expressed as toxicity response and delayed development, of phosphine resistance in immature stages of *Rhyzopertha dominica* (F.) (Coleoptera: Bostrychidae). *Journal of Stored Products Research* **51**, 74-80, DOI: 10.1016/j.jspr.2012.08.002.
- Mangoba, M.A.A., D. de Guzman Alwindia, 2021:** Phosphine Resistance in Psocid, *Liposcelis bostrychophila* (Psocoptera) in the Philippines. *International Journal of Tropical Insect Science* **41** (1), 439-445, DOI: 10.1007/s42690-020-00223-7.
- Monro, H.A.U., 1961:** Manual of Fumigation for Insect Control. FAO. Manual of Fumigation for Insect Control. FAO.
- Monro, H.A.U., E. Uptis, E.J. Bond, 1972:** Resistance of a laboratory strain of *Sitophilus granarius* (L)(Coleoptera, Curculionidae) to phosphine. *Journal of Stored Products Research* **8** (3), 199-207, DOI: 10.1016/0022-474X(72)90040-9.

- Mueller, D.K., 1994:** A new method of using low levels of phosphine in combination with heat and carbon dioxide. Fumigants and pheromones **33**, 14.
- Nayak, M.K., G.J. Daghli, T.W. Phillips, 2015:** Managing resistance to chemical treatments in stored products pests. Stewart Postharvest Review **11** (1), 3-article 3, DOI: 10.2212/spr.2015.1.3.
- Nayak, M.K., M.G. Falk, R.N. Emery, P.J. Collins, J.C. Hollo-way, 2017:** An analysis of trends, frequencies and factors influencing the development of resistance to phosphine in the red flour beetle *Tribolium castaneum* (Herbst) in Australia. Journal of Stored Products Research **72**, 35-48, DOI: 10.1016/j.jspr.2017.03.004.
- Nayak, M.K., R. Kaur, R. Jagadeesan, H. Pavic, T.W. Phillips, G.J. Daghli, 2019:** Development of a Quick Knockdown Test for Diagnosing Resistance to Phosphine in *Sitophilus oryzae* (Coleoptera: Curculionidae), a Major Pest of Stored Products. Journal of Economic Entomology **112** (4), 1975-1982, DOI: 10.1093/jee/toz085.
- Newman, C., G. Russell, W. Shore, D. Gock, R. Ryan, 2000:** Australian sirocirc recirculatory phosphine fumigation systems at xizui grain terminal and inland depots in china. In: Donahaye, E.J., S. Navarro, J.G. Leesch (Hrsg.). *Proceeding of the International Conference on Controlled Atmospheres Fumigation in stored Products*, Fresno, CA. 29 Oct. – 3 Nov. 2000, Executive Printing Services, Clovis, CA, U.S.A., pp. 297-306.
- Noyes, R.T., P. Kenkel, 1994:** Closed loop fumigation systems in the south-western United States. In: Highley, E., E.J. Wright, H.J. Banks, B.R. Champ (Hrsg.). *Proceedings of the 6th International Working Conference on Stored-Product Protection*, 17-23 April 1994, Canberra, Australia, CAB International, pp. 335-341.
- Noyes, R.T., T. Phillips, G.W. Cuperus, E.L. Bonjour, Z. Jin, Q. Liang, Y. Liang, X. Tan, L. Guan, 1999:** Advances in recirculation fumigation technology USA. Proceedings of the 7th International Working Conference on Stored-product Protection, pp. 454-461.
- Price, N.R., 1984:** Active exclusion of phosphine as a mechanism of resistance in *Rhyzopertha dominica* (F.)(Coleoptera: Bostrychidae). Journal of Stored Products Research **20** (3), 163-168, DOI: 10.1016/0022-474X(84)90025-0.
- Rassmann, W., 1978:** Untersuchungen über Resistenz gegen Malathion und Lindan bei vorratsschädlichen Käferarten in der Bundesrepublik Deutschland. Anzeiger für Schädlingskunde, Pflanzenschutz, Umweltschutz **51** (2), 17-20.
- Rassmann, W., 1988:** Insektizidresistenz bei Vorratsschädlingen. Gesunde Pflanzen **40** (1), 39-42.
- Reichmuth, C., 1988:** Phosphine and selected metal phosphides. International programme on chemical safety environmental health criteria. Geneva, World Health Organization. International Programme on Chemical Safety. W. H. O. Task Group on Phosphine. Selected Metal Phosphides, 73.
- Reichmuth, C., 1990:** Toxic gas treatment responses of insect pests of stored products and impact on the environment. Fumigation and controlled atmosphere storage of grain. Cin-gapura: ACIAR, 56-69.
- Reichmuth, C., 1992:** Schnelltest zur Resistenzbestimmung gegenüber Phosphorwasserstoff bei vorratsschädlichen Insekten. Mitteilungen der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie **8**, 245-247.
- Reichmuth, C., 1993:** Drucktest zur Bestimmung der Begasungsfähigkeit von Gebäuden, Kammern oder abgeplanten Gütern bei der Schädlingsbekämpfung: mit Bemerkungen zur Begasungstechnik. Biologische Bundesanst. für Land-und Forstwirtschaft.
- Reichmuth, C., 1997:** There is no resistance of stored-product moths against treatment with carbon dioxide under high pressure. Proceedings of 4th International Conference Controlled Atmosphere and Fumigation in Stored Products, 21-26 April 1996, pp. 519-525, Printco Ltd., Nicosia, Cyprus.
- Reichmuth, C., 1999:** Gefahr von Resistenzen bei Käfern gegen Phosphorwasserstoff. Agrarzeitung Ernährungsdienst **58**, 9.
- Reichmuth, C., 2004:** Resistenz vorratsschädlicher Insekten in Deutschland – was sollte getan werden? Mitteilungen der Deutschen Phytomedizinischen Gesellschaft e. V. **34** (2), 30-31.
- Reichmuth, C., 2013:** Aussichten für Vorratsschädlinge. Journal für Kulturpflanzen **65** (3), 85-93, DOI: 10.5073/JfK.2013.03.02.
- Reichmuth, C., S. Noack, A. Wrede, 1981:** Zur Emission von Phosphorwasserstoff im Vorratsschutz. Nachrichtenblatt des Deutschen Pflanzenschutzdienstes **33** (9), 132-136.
- Ren, Y., B. Lee, B. Padovan, 2011:** Penetration of methyl bromide, sulfuryl fluoride, ethanedinitrile and phosphine into timber blocks and the sorption rate of the fumigants. Journal of Stored Products Research **47** (2), 63-68., DOI: 10.1016/j.jspr.2010.04.006.
- Rohrlich, M., F. Meuser, 1969:** Untersuchungen an mit Phosphorwasserstoff begastem. Sonderdruck aus Getreide und Mehl **19** (2), 9-14.
- Sakka, M.K., F. Gatzali, V.T. Karathanos, C.G. Athanassiou, 2020:** Effect of Nitrogen on Phosphine-Susceptible and -Resistant Populations of Stored Product Insects. Insects **11** (12), 885, DOI: 10.3390/insects11120885.
- Taylor, R., D. Halliday, 1986:** The geographical spread of resistance to phosphine by coleopterous pests of stored products. 1986 British Crop Protection Conference. Pests and diseases. Volume 2. Proceedings of a conference held at Brighton Metropole, England, November 17-20, 1986., British Crop Protection Council.
- Vincent, L.E., D.L. Lindgren, 1972:** Toxicity of Phosphine to the Life Stages of Four Species of Dermestids. Journal of Economic Entomology **65** (5), 1429-1431, DOI: 10.1093/jee/65.5.1429.
- Winks, R.G., 1969:** Resistance to the fumigant phosphine in a strain of *Tribolium castaneum* (Herbst). Insect Toxicology Information Service **12**, 178.

Winks, R.G., E.A. Hyne, 1994: Measurement of resistance to grain fumigants with particular reference to phosphine. In: Highley, E., E.J. Wright, H.J. Banks, B.R. Champ (Hrsg.). *Stored Products Protection—Proceedings of 6th International Working Conference on Stored-product Protection*, 17–23 April 1994, Canberra, Australia, pp. 244-250.

Winks, R.G., G.F. Russell, 1997: Active Fumigation Systems: Better ways to fumigate Grain, In: Donahaye, E.J., S. Navarro, A. Varnava (Hrsg.). *International Conference on Controlled*

Atmosphere and Fumigation in Stored Products; 1996, April 21-26; Nicosia, Cyprus. Nicosia, Cyprus: Printco Ltd; 1997, pp. 293-303.

Winks, R.G., R. Ryan, 1991: Recent developments in the fumigation of grain with phosphine, In: Fleurat Lessard, F., P. Ducom (Hrsg.). *Proceedings of the Fifth International Working Conference Stored-Products Protection*, Bordeaux, September 1990, Vol. 2. pp. 935-943.

Barbara Steinhoff

Das Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris* Gaertn.) und andere Greiskräuter auf Kulturland und Weideflächen: Vorkommen, Bedeutung und landschaftspflegerische Maßnahmen

Tansy ragwort (*Jacobaea vulgaris* Gaertn.) and other groundsels on cultivated land and pastures: occurrence, importance and landscape management measures

Kontaktanschrift

Dr. Barbara Steinhoff, Auf dem Forst 53, 53639 Königswinter, E-Mail: barbarasteinhoff@gmx.de

Zusammenfassung

Das Jakobskreuzkraut *Jacobaea vulgaris* Gaertn. (syn. *Senecio jacobaea* L.) kann wie andere Greiskräuter auch aufgrund seiner toxischen Inhaltsstoffe, der Pyrrolizidalkaloide, zu Kontaminationen von Kulturpflanzen mit diesen Stoffen führen. Werden diese Kulturpflanzen als Lebensmittel, Futtermittel oder Arzneimittel verwendet, sind entsprechende Vorsichtsmaßnahmen bei Anbau und Ernte sowie bei der Qualitätskontrolle von Ausgangsstoffen und Produkten notwendig. Zum Schutz der menschlichen Gesundheit hat der Gesetzgeber entsprechende Höchstmengen- bzw. Grenzwertregelungen geschaffen. Da Greiskräuter auch eine potenzielle Gefährdung für Weidetiere darstellen können, sind landschaftspflegerische Maßnahmen in Betracht zu ziehen, um diese Pflanzen von den Weideflächen zu entfernen. Neben der grundsätzlichen Bedeutung für die Gesunderhaltung von Mensch und Tier muss bei der Frage rigoroser Bekämpfungsmaßnahmen gegenüber Greiskräutern jedoch in jedem Einzelfall anhand einer Nutzen-Risiko-Abwägung entschieden werden, ob und welche Maßnahmen notwendig sind. Dabei müssen auch die ökologische Bedeutung der Pflanzen, die Erhaltung der Biodiversität und die Prioritäten des Naturschutzes berücksichtigt werden.

Stichwörter

Jakobskreuzkraut *Jacobaea vulgaris*, Gewöhnliches Greiskraut *Senecio vulgaris*, Pyrrolizidinalkaloide, Toxizität, Ökologische Bedeutung, Landschaftspflegerische, Maßnahmen, Jakobskrautbär *Tyria jacobaea*

Abstract

Tansy ragwort *Jacobaea vulgaris* Gaertn. (syn. *Senecio jacobaea* L.), like other groundsels, can lead to contamination of crops due to its toxic ingredients, the pyrrolizidine alkaloids. If the harvested plants are used as food, feed or medicines, appropriate precautions in the cultivation and harvesting as

well as in the quality control of the raw materials and the products are necessary. To protect human health the legislator has created respective maximum level or limit regulations. Since groundsels can also pose a potential threat to pasture livestock, landscape management measures should be considered in order to remove these plants from grazing land. In addition to the fundamental importance for the health of humans and animals, however, with regard to the question of rigorous control measures against groundsels, it must be decided case-by-case on the basis of a benefit-risk assessment whether and which measures are necessary. Thereby the ecological importance of the plants, the preservation of biodiversity and the priorities of nature conservation must also be taken into account.

Keywords

Tansy ragwort *Jacobaea vulgaris*, Common groundsel *Senecio vulgaris*, Pyrrolizidine alkaloids, Toxicity, Ecological importance, Landscape management measures, Cinnabar moth *Tyria jacobaea*

Einleitung

Das Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris* Gaertn. syn. *Senecio jacobaea* L.) ist in Mitteleuropa weit verbreitet. Man findet es auf Wiesen und an Wegrändern, aber auch als Unkraut auf landwirtschaftlich und gartenbaulich genutzten Flächen. Es enthält als toxische Substanzen Pyrrolizidinalkaloide (PA), deren Aufnahme für Mensch und Tier zu gesundheitlichen Schädigungen führen kann. Dies trifft auch auf andere weit verbreitete Arten der Gattung *Senecio* zu, wie beispielsweise das Gewöhnliche Greiskraut (*Senecio vulgaris* L.) oder das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens* DC). Daraus entstehen Fragen nach Konsequenzen für Kulturpflanzen, die als Lebensmittel oder Arzneimittel genutzt werden, wenn es bei unbeabsichtigter Miternte des Jakobskreuzkrautes oder verwandter Arten zu Kontaminationen mit den enthaltenen toxischen Alkaloiden kommen kann. Auch für Weidetiere



(c) 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: 13. Dezember 2021/8. April 2022

können Greiskräuter eine potenzielle Gefährdung darstellen, wenn diese entweder beim Weiden mit aufgenommen oder im Heu verfüttert werden. Diese Problemfelder sollen im Folgenden näher beleuchtet und Maßnahmen aufgezeigt werden, durch welche im Einzelnen eine gesundheitliche Gefährdung von Verbrauchern durch möglicherweise verunreinigte Produkte, aber auch eine Gefährdung von Weidetieren durch Bestände des Jakobskreuzkrautes vermieden werden können.

Dies geschieht auch unter dem Aspekt der ökologischen Bedeutung, denn Jakobskreuzkraut stellt beispielsweise für Bienen und andere Insekten eine Nahrungsquelle dar. Es soll aufgezeigt werden, dass Maßnahmen zur Vermeidung von Kontaminationen eine komplexere Bewertung erfordern, und schließlich wird ein besonderes Augenmerk auf Flächen im Rhein-Sieg-Kreis und die dortigen landschaftspflegerischen Maßnahmen gerichtet.

Ausgewählte Vertreter der Gattungen *Senecio* und *Jacobaea*

Greiskräuter gehören botanisch zu der weltweit über 1000 Arten umfassenden Gattung *Senecio* L., von der einige Autoren die Gattung *Jacobaea* Mill. abgespalten haben. Beide gehören zur Tribus Senecioneae Cass. in der Unterfamilie Asteroideae (Cass.) Lindl. und der Familie Asteraceae Bercht. & J. Presl (Korbblütler). Der Name *Senecio* geht auf lateinisch *Senex*, der Greis, zurück und weist auf den weißen Haarschopf der Früchte hin. Der Name Kreuzkraut ist anscheinend durch eine sekundäre Veränderung zustande gekommen. Greiskräuter breiten sich stark durch die schnellheranreifenden Früchtchen aus, die den für Arten der Familie Asteraceae typischen Haarkranz (Pappus) tragen, welcher zur schnellen Verbreitung durch den Wind beiträgt.

Das Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris* Gaertn. syn. *Senecio jacobaea* L.) (Abb. 1) beginnt seine Blütezeit um den 25. Juli (Jacobi) herum und blüht etwa bis September. Botanisch ist die weit verbreitete, 30 bis 100 cm hohe Pflanze gekennzeichnet durch einen braunrot bis violetten, gerillten, anfangs

spinnwebig wolligen und später verkahlenden Stängel mit fiederspaltigen und unregelmäßig kerbig eingeschnittenen, gelappten oder gezähnten Laubblättern. Die Grundblätter sind leierförmig bis fiederspaltig und zur Blütezeit meist verwelkt, die oberen Blätter öhrchenartig stängelumfassend. Der Stängel trägt goldgelbe, 15 bis 20 mm breite, in endständigen flachen Dolden angeordnete Blütenköpfe, von denen jeder 60 bis 80 Röhrenblüten und zumeist 13 abstehende Zungenblüten umfasst. Die Blüten sind außen von einem einreihigen, an der Spitze schwarzen zylindrischen Hüllkelch umgeben. Die Früchte sind undeutlich längsriefig, die der Röhrenblüten dicht kurzhaarig und die der Randblüten kahl. Der Pappus ist zur Blütezeit so lang wie die Kronröhre der Röhrenblüten und zur Fruchtzeit doppelt so lang wie die Frucht. Kreuzungen mit dem Raukenblättrigen Greiskraut (*Jacobaea erucifolia* (L.) G. GAERTN. & AL. syn. *Senecio erucifolius* L.) sind möglich (Gessner, 1953; LLUR, 2013; Zehm, 2017; Reichling et al., 2019).

Jakobskreuzkraut kommt auf ungepflegten Weiden und Trockenwiesen, auf grasigen Böschungen und an Wald- und Wegrändern vor. Mit einem verstärkten Auftreten ist überall dort zu rechnen, wo Vegetationslücken bestehen bzw. eine geringe Vegetationsbedeckung eine Keimung zulässt (Gessner, 1953; LLUR, 2013; Reichling et al., 2019). Neben der generativen Vermehrung kann die ursprünglich zweijährige Pflanze eine Staude bilden, wenn sich z. B. bei unvollständiger Bekämpfung aus Wurzelknospen Tochterpflanzen bilden. Ein Temperaturanstieg infolge des Klimawandels kann zudem ihre Ausbreitung fördern (LLUR, 2013).

Das Gewöhnliche Greiskraut (*Senecio vulgaris* L.) (Abb. 2) unterscheidet sich von anderen einheimischen Greiskrautarten durch die fehlenden Zungenblüten der kurz gestielten Blütenköpfchen. Diese Art wird 15 bis 30 cm hoch und blüht von März bis Oktober/November, wobei sie pro Jahr mehrere Generationen hervorbringen kann. Die Pflanze ist bei ästigem rötlichem Stängel unregelmäßig verzweigt, ihre hellgrünen Blätter sind stark gezähnt, buchtig gelappt bis fiederspaltig, wobei die oberen geöhrt sind. Die Hülle der Blüten ist walzenförmig, 8 bis 10 mm lang mit mehreren 1 bis 2 mm langen



Abb. 1. Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris* Gaertn., syn. *Senecio jacobaea* L.), Quelle: Dr. Barbara Steinhoff 2021



Abb. 2. Gewöhnliches Kreuzkraut (*Senecio vulgaris* L.), Quelle: Susanne Wahl, Pharmaplant Arznei- und Gewürzpflanzen Forschungs- und Saatzucht GmbH, Artern

meist schwärzlichen Außenhüllblättern. Die Früchte sind 1,5 bis 2 mm lang und dicht flaumhaarig, der Pappus ist fast so lang wie die Röhrenblüten zur Fruchtzeit, rein weiß und fast dreimal so lang wie die Frucht. Die Pflanze kommt auf Schuttplätzen, Äckern, Brachflächen, in Weinbergen, Gärten und an Wegen vor und gilt als nahezu unausrottbar (Gessner, 1953; Reichling et al., 2019).

Als weitere Art ist das Schmalblättrige Greiskraut (*Senecio inaequidens* DC.) (Abb. 3) erwähnenswert, das ursprünglich aus Südafrika stammt und möglicherweise durch den Verkauf von Schafswolle nach Mitteleuropa verbracht wurde, wo es heute als potenziell invasive Art eingestuft wird. Es wird 30 bis 60 cm hoch und hat linealisch bis schmal-lanzettliche, ca. 1 bis 5 mm breite und 6 cm lange Laubblätter, die fein und scharf gezähnt sind und am Grund geöhrt sind. Der Blütenstand ist stark verzweigt mit etwa 2 cm großen Blütenköpfchen, die meist 10 bis 13 gelbe Zungenblüten besitzen. Man findet es auf Ruderalflächen und an Wegrändern. Das Schmalblättrige Greiskraut hat zwei Blühphasen, von Mai bis Juli und von September bis Dezember (Starfinger & Kowarik, 2005; LLUR, 2013).

Aus Schleswig-Holstein wird berichtet, dass diese Art besonders im Herbst durch üppig blühende Massenbestände an Straßenrändern auffällt („Autobahngold“). Offensichtlich beruht die starke Verbreitung auf Mengen an Samen, die durch das Anhaften an Fahrzeugen und Zügen entlang von Autobahnen und Bahnschienen verbreitet werden (LLUR, 2013).

Bedeutung für Insekten

Bienen sind wie alle Insekten unersetzlich für unsere Ökosysteme. Durch ihre Leistung als Bestäuber zahlreicher Wild- und Kulturpflanzen tragen sie maßgeblich dazu bei, dass die Pflanzenwelt in ihrer Vielfalt erhalten bleibt. Neben anderen heimischen Pflanzen gehört auch das Jakobskreuzkraut als Teil der gewachsenen mitteleuropäischen Lebensgemeinschaften zu den für Insekten und damit auch für Bienen wichtigen Blütenpflanzen. Je weiter dieses verbreitet ist und je geringer im Vergleich dazu der Anteil an anderen Blütenpflanzen ist,

umso größer ist die Wahrscheinlichkeit, dass auch das Jakobskreuzkraut von Bienen besucht wird (DVL, 2021).

Neben seiner Bedeutung für eine Vielzahl an Blütenbesuchern stellen die Greiskräuter auch eine Nahrungsquelle für eine Reihe an Herbivoren dar. Hierzu gehört der Jakobskrautbär (*Tyria jacobaeae* L.) (Abb. 4), auch Karminbär oder Zinnobermotte genannt, ein Schmetterling (Nachtfalter) aus der Unterfamilie der Bärenspinner (Arctiinae). Dessen bis zu 3 cm lange Raupe, wegen ihrer schwarzgelben Färbung auch als Borussia-Raupe bezeichnet, frisst mit Vorliebe die Blätter des Jakobskreuzkrautes. Dabei nimmt sie die toxischen PA auf, lagert sie ein und wandelt sie zu N-Oxiden um (Zehm, 2017; Leiss, 2011). Der Jakobskrautbär zählt damit zu den spezialisierten Pflanzenfressern, die eine Anpassung an die PA ihrer Wirtspflanze entwickelt haben. Für sie sind die Alkaloide ein Signalstoff, durch den sie die Pflanze finden und zur Eiablage nutzen können. Dabei wurde gezeigt, dass nicht alle PA die Eiablage gleichermaßen stimulieren, sondern beispielsweise Senecionin und Seneciphyllin eine höhere Attraktivität bewirken. Anders als die „Spezialisten“ werden „Generalisten“ unter den Herbivoren durch PA abgeschreckt und meiden die Aufnahme alkaloidreicher junger Greiskrautblätter. Aufgrund unterschiedlicher Selektionen durch die „Spezialisten“ kann die genetische Vielfalt in Konzentration und Zusammensetzung der PA bei den Greiskraut-Arten aufrechterhalten werden (Macel, 2011).

Verschiedene Flohkäfer wie beispielsweise *Longitarsus jacobaeae* (Waterhouse) und *L. flavicornis* (Stephens) ernähren sich im Winter und Frühling von Wurzeln und Blattstielen des Jakobskreuzkrauts und können PA als N-Oxide speichern. Daneben dient die Pflanze auch anderen Insekten wie den zu den Motten zählenden Arten *Cochylys atricapitana* (Stephens) und *Platyptilia isodactyla* (Zeller) als Nahrung. Die Kreuzkraut-Saatfliege *Pegohylemia seneciella* (Meade) legt ihre Eier in die Blüten des Jakobskreuzkrauts, und die sich entwi-

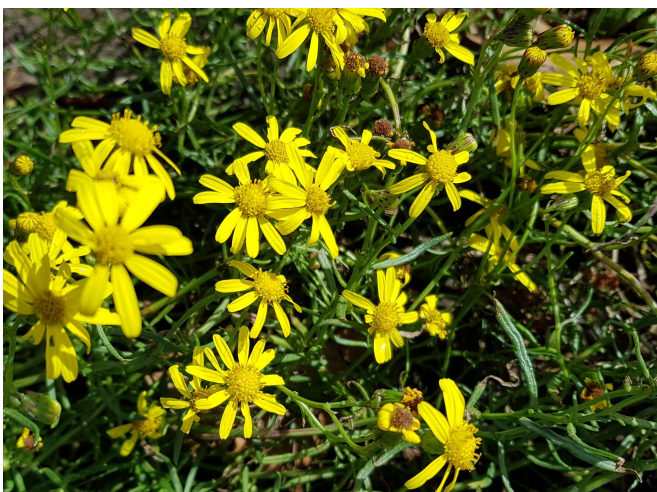


Abb. 3. Schmalblättriges Greiskraut (*Senecio inaequidens* DC.), Quelle: Dr. Barbara Steinhoff 2021



Abb. 4. Raupe des Jakobskrautbärs (*Tyria jacobaeae* L.), Quelle: Dr. Barbara Steinhoff 2021

ckelnden Larven fressen die noch unreifen Samen (McLaren et al., 2000; Leiss, 2011).

Inhaltsstoffe

Eine große Anzahl der Arten in den Gattungen *Senecio* und *Jacobaea* enthalten die für diese Gattungen typischen Pyrrolizidinalkaloide (PA). Diese sind seit längerem Gegenstand toxikologischer Forschungsarbeiten. Es handelt sich um vom Grundkörper des Necin abgeleitete Esteralkaloide, die als Monoester oder offene oder zyklische Diester vorkommen. Die Necine leiten sich von bizyklischen Aminoalkoholen ab und diese wiederum von den Polyaminen Putrescin (CAS Nr. 110-60-1) und Spermidin. Bekannte Vertreter der Greiskraut-Alkaloide sind Senecionin (CAS Nr. 130-01-8) und Seneciophyllin (CAS Nr. 480-81-9). Weitere Inhaltsstoffe der Greiskräuter sind u. a. verschiedene Terpene und Flavonoide (Schramm et al., 2019; HMPC, 2021; Reichling et al., 2019).

Entsprechend ihrem Alkaloidvorkommen sind beim Jakobskreuzkraut zwei Chemotypen zu unterscheiden, der Jacobin-Typ und der Erucifolin-Typ (Witte et al., 1992; Macel et al., 2004; Reichling et al., 2019). In den Sommermonaten von Mai bis Ende Juni wurden die höchsten PA-Gehalte gemessen (Reichling et al., 2019). Um die Jahreszeit-abhängige Verteilung der PA in Jakobskreuzkraut näher zu untersuchen, wurden in einer Studie in Dänemark von Dezember 2017 bis Dezember 2018 die PA-Konzentrationen in der Pflanze ermittelt. Während der Vegetationsperiode wurde ein Anstieg mit einer maximalen Konzentration zwischen 3,1 und 6,6 g/kg Trockenmasse von der Blütezeit bis zum Beginn des Pflanzensterbens beobachtet. Die höchsten Konzentrationen wurden für Jacobin-N-oxid mit 1330 mg/kg, Jacobin (CAS Nr. 6870-67-3) mit 906 mg/kg und Senecionin-N-oxid (CAS Nr. 13268-67-2) mit 364 mg/kg gemessen. Im Hochsommer wurden im Vergleich zum Winter 1000-mal höhere PA-Konzentrationen beobachtet, was mit einer Reaktion der Pflanze auf den Pflanzenfresserdruck in der Sommerweidezeit erklärt wurde (Hama & Strobel, 2021). Diese Konzentrationen liegen in der Größenordnung, die zuvor für die unterschiedlichen Chemotypen in Pflanzen u. a. aus Dänemark und den Niederlanden gemessen wurden (Macel et al., 2004).

In einer 2015 durchgeführten Studie an 367 Pflanzen aus 27 überwiegend aus Norddeutschland stammenden Jakobskreuzkraut- Populationen wurden insgesamt 98 verschiedene Alkaloide und erhebliche Unterschiede in der PA-Zusammensetzung zwischen den Populationen, aber kein signifikanter Unterschied in den PA-Gehalten nachgewiesen. Die Autoren schlussfolgerten aus ihren Untersuchungen, dass die Existenz dieser Vielfalt in der PA-Zusammensetzung in verschiedenen Chemotypen das Ergebnis einer breiten Wechselwirkung mit der Umwelt ist (Jung et al., 2020).

Das Gewöhnliche Greiskraut enthält Senecionin und Seneciophyllin als Hauptalkaloide, wobei es Senecionin-reiche und Seneciophyllin-reiche Populationen gibt, daneben weitere PA sowie Flavonoide und Terpene (Reichling et al., 2019). In Feldversuchen angebaute *Senecio-vulgaris*-Pflanzen hatten Gehalte der Alkaloide Retrorsin (CAS Nr. 480-54-6), Seneciophyllin, Senecivernin (CAS Nr. 72755-25-0), Senecionin, Senkirkin

(CAS Nr. 231818-5) und vier ihrer N-Oxide im jahreszeitlichen Verlauf in Größenordnungen von etwa 1600 mg/kg bis nahezu 5000 mg/kg Trockenmasse. Ein leichter Anstieg der PA-Konzentration war bis zur vollen Blüte zu verzeichnen, dem eine Abnahme zum Ende des Lebenszyklus folgte. Die erhöhte PA-Menge während der Entwicklung der Pflanzen korrelierte mit einem Anstieg der Biomasse bei nahezu konstanten PA-Konzentrationen, da sowohl die oberirdische Biomasse (Stängel, Blätter, Blüten) als auch die der Wurzeln zunimmt, in denen die Synthese der Alkaloide stattfindet. Auch veränderte sich während der Entwicklung die Konzentration verschiedener Alkaloide wie Retrorsin-N-Oxid (CAS Nr. 15503-86-3) und Senecionin deutlich (Flade et al., 2019).

In einer in China durchgeführten Studie wurden PA-Zusammensetzung und Konzentrationen in Trieb- und Wurzelproben von *Senecio vulgaris* aus einheimischen und invasiven Populationen bestimmt. Es wurden 20 Alkaloide identifiziert, von denen in den Wurzeln Senecionin, Senecionin-N-Oxid, Integerrimin-N-oxid und Seneciophyllin-N-Oxid (CAS Nr. 38710-26-8) dominierten, in den Trieben zusätzlich auch Retrorsin-N-Oxid und Spartioidin-N-Oxid sowie zwei nicht identifizierte PA. Die Wurzeln besaßen eine geringere PA-Diversität, aber eine höhere PA-Gesamtkonzentration als die Triebe (Cheng et al., 2017).

Toxikologie

Eine längerfristige Exposition gegenüber PA schädigt in erster Linie Leber und Lunge. Zeichen einer Vergiftung mit PA bestehen in Gefäßverschlüssen in diesen Organen, Leberzirrhose und weiteren Leberschädigungen; auch genotoxische und kanzerogene Effekte sind bekannt (Fu et al., 2004; He et al., 2019; Ebmeyer et al., 2020; HMPC, 2021). Als am meisten toxisch werden die zyklischen Diester der 1,2-ungesättigten PA angesehen, weniger die nicht-zyklischen Diester und am wenigsten die Monoester. Gesättigte PA sind offensichtlich nicht toxisch (Stegelmeier et al., 2016; Moreira et al., 2018; HMPC, 2021). Die metabolische Aktivierung von PA wird in der Leber durch Cytochrom P₄₅₀ katalysiert und erzeugt reaktive Dehydro-Metaboliten mit einem Pyrrol-Gerüst. Diese bilden durch Bindung an DNA, Proteine und Aminosäuren Addukte, die eine Hepatotoxizität induzieren (Stegelmeier et al., 1999; Ruan et al., 2014; Ma et al., 2018a; b). Es wird angenommen, dass auch eine chronische Exposition gegenüber niedrigen Mengen toxischer PA zur Akkumulation der Protein-Addukte und damit zu Leberschäden führen kann (HMPC, 2021). Da PA nach Aufnahme schnell metabolisiert und ausgeschieden werden, verbleibt innerhalb weniger Stunden nur ein relativ kleiner Teil der Menge im Körper, ein Großteil davon in Form von an Gewebebestandteile gebundenen Metaboliten. Demnach wurde es für unwahrscheinlich erachtet, dass sich nach einem Tag noch eine signifikante Menge an unverändertem Alkaloid im Körper befindet (HMPC, 2021).

Auf der Basis von *in vitro*- und *in vivo*-Studien wurden Aussagen zur relativen Potenz ausgewählter PA-Kongenere, die verschiedene Strukturklassen (Lasiocarpin (CAS Nr. 303-34-4), Riddelliin, Retrorsin, Senecionin, Seneciophyllin, Heliotropin, Echimidin (CAS Nr. 520-68-3), Lycopsamin (CAS Nr. 10285-07-1), Europine (CAS Nr. 570-19-4), Indicin) repräsentieren, hin-

sichtlich ihrer Toxizität abgeleitet (Merz & Schrenk, 2016). Die Ergebnisse stützen die Hypothese, dass verschiedene PA signifikant unterschiedliche toxikologische Potenzen besitzen, so dass jeweils "Relative Potency Factors" abgeleitet werden können (Schrenk et al., 2020; Schrenk et al., 2021).

Da auch bei geringen PA-Gehalten von Lebensmitteln eine Exposition gegenüber toxischen PA zu erwarten sei und infolgedessen die Gefahr des Auftretens langsam fortschreitender chronischer Erkrankungen wie Krebs, Leberzirrhose und pulmonaler Hypertonie bestehe, empfahlen die Behörden, die ernährungsbedingte Exposition gegenüber toxischen, ungesättigten PAs so gering wie praktisch erreichbar zu halten (ALARA-Prinzip, „as low as reasonably achievable“) (EFSA, 2007; HMPC, 2021).

Im Juni 2017 publizierte die europäische Behörde für Lebensmittelsicherheit (EFSA) eine aktuelle Bewertung des kanzerogenen Risikos von PA und legte eine neue Referenzdosis von 237 µg/kg Körpergewicht (KG) pro Tag für die chronische Exposition fest. Die Beurteilung erfolgte auf der Basis der Inzidenz von Hämangiosarkomen der Leber weiblicher Ratten nach Exposition mit Riddelliin, dem in dieser Studie als am meisten toxisch angesehenen Alkaloid (EFSA, 2017). Im Dezember 2020 wurden auf EU-Ebene produktbezogene Höchstmengen für den Lebensmittelbereich u. a. für Kräutertees, Kräuter und pflanzliche Nahrungsergänzungsmittel (bezogen auf das getrocknete Erzeugnis) innerhalb der europäischen Kontaminantenverordnung Nr. 1881/2006 festgesetzt (Verordnung, 2020):

- Kräutertees 200 µg/kg (Ausnahme Rotbusch, Anis, Zitronenmelisse, Kamille, Thymian, Pfefferminze und Zitronenverbene 400 µg/kg),
- Nahrungsergänzungsmittel mit pflanzlichen Inhaltsstoffen sowie getrocknete Kräuter 400 µg/kg (Ausnahme z. B. Borretsch und Oregano 1000 µg/kg).

Gefährdung für Weidetiere

Aufgrund des weit verbreiteten Vorkommens von Greiskräutern auf Wiesen und Weiden besteht für Weidetiere wie Pferde, Rinder und Schafe eine potenzielle Gefährdung durch die Aufnahme dieser Pflanzen mit ihrer natürlichen Nahrung. Pferde und Rinder reagieren hierbei besonders empfindlich gegenüber einer solchen Aufnahme; Schweine, Ziegen und Schafe scheinen dagegen widerstandsfähiger zu sein (Gessner, 1953; Wiedenfeld & Edgar, 2011; Reichling et al., 2019).

Vergiftungen sind bei allen Weidetieren gekennzeichnet durch Appetitlosigkeit, Durchfall, Gewichtsverlust und Leberschädigungen bis hin zu Lebernekrose und Leberversagen (Gessner, 1953; EFSA, 2007; Reichling et al., 2019). Bei Pferden wurden als Symptome nachlassende Kondition, Gewichtsverlust aufgrund von Futterverweigerung, Koliken, Verstopfung oder blutiger Durchfall, häufiges Gähnen, zielloses Wandern („walking disease“), unkoordinierte Bewegungen, Lecksucht, Photosensibilität, Gelbfärbung der Lidbindehäute, Blindheit sowie hepatisches Koma beobachtet; bei Rindern eine reduzierte Milchleistung, Futterverweigerung, rapider Gewichtsverlust, struppiges Fell, Photosensibilität, fehlende

Pansenmotorik, wässriger oder blutiger Durchfall, Lethargie und plötzliche Aufregungszustände (LLUR, 2013).

Da bei Pferden die Symptome einer chronischen Vergiftung z. T. erst Wochen bis Monate nach der Exposition auftreten (Mendel et al., 1988), werden diese häufig nicht mehr mit der Aufnahme von Jakobskreuzkraut in Verbindung gebracht (LLUR, 2013). Um die Symptomatik von PA-Vergiftungen zu untersuchen, wurde sechs Pferden täglich eine Suspension der ebenfalls PA-haltigen Hundszunge (*Cynoglossum officinale* L.) mit 5 oder 15 mg/kg Körpergewicht (KG) Gesamt-PA über 14 Tage mittels Schlundsonde verabreicht, zwei Pferde erhielten Luzerne als Kontrolle. Innerhalb von 7 Tagen entwickelten die mit 15 mg/kg PA behandelten Pferde eine schwere Lebererkrankung. Die mit 5 mg/kg PA behandelten Pferde waren mehrere Wochen nach der PA-Gabe depressiv und entwickelten eine periportale hepatozelluläre Nekrose mit Fibrose. Aus den fortdauernden histologischen Veränderungen wurde eine nicht zu unterschätzende Gefährdung der Tiere auch bei Aufnahme auch geringerer Mengen PA-haltiger Pflanzen geschlossen (Stegelmeier et al., 1996). Ähnliche Wirkungen waren in einer früheren Studie an neun Pferden beobachtet worden, die über mehrere Monate mit 10 % gewöhnlichem Greiskraut versetztes Luzernenheu als Futter erhielten, was einer gesamten Aufnahmemenge von 233 mg PA pro kg KG und damit etwa 140 g PA umgerechnet auf ein 600 kg schweres Pferd entsprach (Mendel et al., 1988).

Die kumulierte letale Dosis für ein Pferd liegt bei einem Frischgewicht von 40 – 80 g Greiskraut pro kg KG, d. h. ein Pferd mit 600 kg Gewicht müsste 24 – 48 kg frisches Jakobskreuzkraut fressen, um die tödliche Aufnahmemenge zu erreichen. Bei einem Rind beträgt die kumulierte letale Dosis 140 g Frischgewicht pro kg KG, d. h. bei einer 700 kg schweren Kuh wären dies 98 kg frisches Jakobskreuzkraut. Diese Menge wird bei 1 % im Heu in 3 Monaten erreicht, bei 10 % im Heu in 20 Tagen. Für Kälber wurde eine letale Dosis von 5,8 % ihres Gewichts an getrocknetem Jakobskreuzkraut ermittelt. Beim Schaf beträgt die kumulierte letale Dosis mehr als 2 kg frisches Greiskraut pro kg KG; bei 50 kg Gewicht müsste es demnach mehr als 100 kg Kraut aufnehmen, um eine tödliche Menge zu erreichen. Ähnlich verhält es sich bei der Ziege, die bei ebenfalls 50 kg Gewicht und einer letalen Dosis von 1,25 – 4 kg Frischgewicht pro kg KG 62,5 – 200 kg frisches Jakobskreuzkraut fressen müsste (Goeger et al., 1982; Craig et al., 1991; EFSA, 2007; LLUR, 2013).

Normalerweise meiden Weidetiere PA-haltige Pflanzen aufgrund ihres bitteren Geschmacks und unterscheiden im Regelfall giftige Unkräuter von Gräsern und Klee. Daher ist das Risiko einer PA-Aufnahme durch Beweidung eher gering, solange die Flächen nicht überweidet sind. Wenn Greiskräuter jedoch versehentlich geerntet und als Untermischung in Heu oder Silage oder auch in Form von Pellets als Futter gegeben werden, sind sie für die Tiere nicht mehr erkennbar und können so aufgenommen werden.

In einer niederländischen Studie an 147 Proben von Tierfutter im Zeitraum 2006–2008 wurden in 31 Proben Spuren von PA nachgewiesen; in neun Proben überstieg der PA-Gesamtgehalt 100 µg/kg, in drei Fällen 1 mg/kg. Von 31 analysierten Luzerneproben enthielten 23 (74 %) mindestens Spuren

eines oder mehrerer PA. In 16 Proben wurden Mengen zwischen 10 und 100 µg/kg gefunden, in vier Proben zwischen 100 und 1000 µg/kg und in drei Proben jeweils 3,5, 3,8 und 5,4 mg/kg. Die Konzentration in den Luzerneproben betrug durchschnittlich 455 µg/kg, was mindestens dem 30-fachen der durchschnittlichen Konzentration für Silage, getrocknetes Gras und Heu entspricht. Die Studie kam zu dem Schluss, dass insbesondere das Gewöhnliche Greiskraut, aber auch andere Greiskrautarten, ein großes Risiko für die Kontamination von Tierfutter, besonders von Luzerne darstellen (Mulder et al., 2009). Angesichts dieses Risikos wurde empfohlen, die Landwirte auf die Gefahr für Weidetiere hinzuweisen und zu verpflichten, ihre Weiden und Wiesen auf PA-Pflanzen wie Greiskräuter zu kontrollieren sowie Anbau und Verarbeitung von Futterpflanzen entsprechend zu überwachen (Mulder et al., 2009; Wiedenfeld & Edgar, 2011).

In einer weiteren Studie wurden 115 Proben von Grassilage aus verschiedenen Landkreisen in Bayern auf ihre Gehalte an PA und deren N-Oxiden analysiert. In 18 % der Proben wurden eine oder mehrere dieser analysierten Verbindungen gefunden. Der höchste Wert, berechnet als Summe von Seneciphyllin und Senecionin, betrug 30 µg/kg Trockenmasse, weitere Alkaloide kamen in geringeren Mengen vor. Obwohl die gemessenen Mengen als niedrig angesehen wurden, ergaben sich Positivbefunde für fast jede fünfte Probe. Bei Annahme eines durchschnittlichen Futterverbrauchs einer 600 kg schweren Kuh von 15 kg Trockenmasse pro Tag und einer maximalen PA-Menge von 30 µg/kg wurde eine tägliche Gesamtaufnahme von ca. 0,45 mg/Tier errechnet. Angesichts der bislang ungeklärten Frage, ob PA in nennenswertem Umfang abgebaut werden und dadurch eine Entgiftung von kontaminierter Grassilage eintritt, wurde die Verwendung von Silage aus Grünland, das PA-haltige Pflanzen enthält, als Sicherheitsrisiko im Hinblick auf die Tiergesundheit angesehen (Gottschalk et al., 2015).

Die europäische Richtlinie 2002/32/EG über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung, die sich speziell mit der Kontamination von Futtermitteln befasst, enthält keine speziellen Grenzwerte für PA bzw. Greiskräuter. Sie begrenzt jedoch den Höchstgehalt für PA-haltige *Crotalaria*-Arten der Familie Fabaceae in Futtermittel-Ausgangserzeugnissen und Mischfuttermitteln auf 100 mg/kg, bezogen auf ein Futtermittel mit einem Feuchtigkeitsgehalt von 12 % (Richtlinie, 2002).

Probleme für Kulturpflanzen und Honig

Durch Miternte

Im Juli 2013 publizierte das Bundesinstitut für Risikobewertung (BfR) Analyseergebnisse zum Vorkommen von PA in 221 Proben von Lebensmitteltees sowie einigen Arzneitees. Die Proben enthielten teilweise sehr große Mengen an PA (bis zu 3430 µg/kg Trockenmasse). Da es sich dabei um Produkte aus Pflanzen handelte, die genuin keine PA enthalten, entstand der Verdacht, dass PA durch eine Untermischung von Unkräutern wie z. B. Greiskraut-Arten eingetragen worden waren (BfR, 2013).

Aus weiteren Publikationen des BfR geht hervor, dass u. a. mit PA verunreinigte Kräutertees sowie pflanzenbasierte Nahrungsergänzungsmittel eine potenzielle Aufnahmequelle von PA sind (BfR, 2016; Dusemund et al., 2018; BfR, 2019). Neue Daten aus den Jahren 2015 bis 2019 über verschiedene relevante Lebensmittelgruppen wie z. B. Tees und Kräutertees einschließlich Pfefferminz- und Kamillentees zeigen, dass die PA-Gehalte über diesen Zeitraum deutlich verringert werden konnten. Für weitere Lebensmittelgruppen wie Kräuter, Gewürze und Nahrungsergänzungsmittel wurde die Datenlage als noch nicht ausreichend erachtet, um eine Bewertung vorzunehmen. Obwohl die Verzehrermengen von Kräutern/Gewürzen gering sind, deutet eine vorläufige Abschätzung aufgrund gefundener hoher PA-Gehalte darauf hin, dass diese erheblich zu einer Exposition beitragen. Deshalb wurde weiterhin empfohlen, die Aufnahme von PA so weit zu minimieren, wie dies nach dem ALARA-Prinzip vernünftigerweise erreichbar ist, und die Anbau-, Ernte- und Reinigungsmethoden weiter zu optimieren (BfR, 2020).

Eine im Jahr 2016 publizierte Studie der EFSA enthält ebenfalls Ergebnisse von Untersuchungen an Tee und Kräutertee wie beispielsweise aus Kamillenblüten, Pfefferminze oder Rotbusch, in denen relativ hohe Konzentrationen an PA gefunden wurden. Im Vergleich zu früheren Untersuchungen war hier eine Abnahme der Belastung zu verzeichnen (EFSA, 2016).

Eine Arbeitsgruppe aus mehreren europäischen Ländern untersuchte das Vorkommen von PA in tierischen Lebensmitteln, Kräutertees und pflanzlichen Nahrungsergänzungsmitteln aus sechs europäischen Ländern. Die Ergebnisse zeigten, dass in tierischen Produkten wie Milch, Eiern und Fleischerzeugnissen PA nur in wenigen Fällen auftraten, aber in 60 % der untersuchten pflanzlichen Nahrungsergänzungsmittel, darunter u. a. Johanniskraut, und in 92 % der Kräutertees messbare Mengen von PA enthalten waren. Vom Verteilungsmuster der PA konnte dabei auf die mitgeerntete Pflanze geschlossen werden. So schien z. B. Rotbusch-Tee durch Greiskräuter verunreinigt zu sein, während Nahrungsergänzungsmittel aus Johanniskraut eher eine Untermischung von Unkräutern aus der Familie der Boraginaceen aufwies (Mulder et al., 2018).

Da das Risiko der Mitbeerntung PA-haltiger Unkräuter und damit der Eintrag der PA in die Lebensmittelkette bei krautartigen landwirtschaftlichen Erzeugnissen sehr hoch ist, wurden im Projekt „Erfassung der standortabhängigen und kulturpflanzenspezifischen Beikrautflora in Arzneipflanzenbeständen unter besonderer Berücksichtigung Pyrrolizidinalkaloid-haltiger Unkräuter“ in den Jahren 2015-2017 Daten zum Vorkommen von Unkräutern auf ausgewählten, konventionell und ökologisch bewirtschafteten Anbauflächen in Deutschland gesammelt und daraus eine entsprechende Datenbank aufgebaut. Es konnte aufgezeigt werden, dass in den untersuchten Kamille-, Melisse-, Petersilie-, Thymian-Salbei- und Pfefferminzbeständen PA-haltige Unkräuter ca. 1,7 % der Gesamtverunkrautung ausmachen. Gefunden wurden 10 PA-haltige Unkrautarten, unter denen das Gewöhnliche Greiskraut am häufigsten auftrat, was auf seine weite Verbreitung aufgrund seiner Anspruchslosigkeit und kurzen Generationszeit zurückgeführt wurde (Nitzsche et al., 2018).

Durch horizontalen Transfer

Untersuchungen zum horizontalen Transfer von PA zwischen Pflanzen gaben Hinweise darauf, dass PA aus verrottetem Pflanzenmaterial von Jakobskreuzkraut über den Boden durch verschiedene Kulturpflanzen aufgenommen werden können. Die untersuchten Akzeptorpflanzen wiesen deutliche PA-Konzentrationen auf, wobei Ausmaß und Verteilungsmuster der übertragenen Alkaloide von den jeweiligen Akzeptorpflanzen abhängig waren (Nowak et al., 2016). Weiterhin konnte gezeigt werden, dass in der Nähe von Jakobskreuzkraut angebaute Kulturpflanzen nennenswerte Mengen derjenigen PA enthielten, die im Greiskraut vorkommen. Daraus wurde abgeleitet, dass typische sekundäre Metabolite wie PA auch zwischen lebenden Pflanzen übertragen werden können. In den Akzeptorpflanzen wurde fast ausschließlich Jacobin angereichert, was darauf hindeutet, dass dieses Alkaloid spezifisch von den Wurzeln des Jakobskreuzkrautes freigesetzt wird (Selmar et al., 2019).

Vorkommen in Honig

Da Bienen sich ihre Nahrung selbst suchen, kann je nach dem Angebot und der Attraktivität blühender Pflanzen, aber auch dem Ausmaß des Vorkommens von Greiskräutern im Umfeld von Bienenstöcken eine Aufnahme von PA durch die Bienen erfolgen (Lebensmittelverband, 2020). So konnte in Untersuchungen, die in Schleswig-Holstein im Jahr 2014 an Honig durchgeführt wurden, gezeigt werden, dass Sommerhonige aus einem Umfeld mit Jakobskreuzkraut deutlich höhere PA-Gehalte aufwiesen als solche aus Gebieten ohne Jakobskreuzkraut. In 53,5 % von insgesamt 86 Honigproben wurden PA nachgewiesen, wobei in einigen Fällen die behördlich empfohlenen allgemeinen Maximalwerte für die PA-Aufnahmemenge (BfR, 2011) überschritten wurden. Neben dem Jakobskreuzkraut können jedoch auch andere PA-haltige Pflanzen, die von Bienen besucht werden, für das PA-Vorkommen in Honig verantwortlich sein (Neumann & Huckauf, 2016).

Im Jahr 2011 veröffentlichte die EFSA ein Gutachten zum Auftreten von PA in Honig (EFSA, 2011). Wie auch andere Arbeiten (Edgar et al., 2011) kam dieses zu dem Schluss, dass bei täglichen Aufnahmemengen von 15–25 g Honig ein gesundheitliches Risiko besteht. Auch in Nahrungsergänzungsmitteln aus Bienenpollen (Propolis, Gelée royale) wurden z. T. nennenswerte Mengen an PA gefunden, was in einigen Fällen zum Rückruf von Produkten aus dem Markt führte (Kempf et al., 2010; EFSA, 2016; Mulder et al., 2018).

Auch das BfR als deutsche Behörde hielt Maßnahmen zur Senkung von PA-Gehalten in Honigen für notwendig, um mögliche Risiken für Vielverzehrer von Honig und insbesondere für Kinder zu minimieren. Deshalb wurde empfohlen, einerseits den Eintrag von PA und PA-haltigen Pflanzen/Pflanzenteilen in die Nahrungskette zu minimieren und andererseits die Aufnahme von PA durch Pollen und Pollen-haltige Produkte zu vermeiden (BfR, 2011). Die europäische Kontaminantenverordnung Nr. 1881/2006 setzte im Dezember 2020 für Nahrungsergänzungsmittel auf Pollenbasis, Pollen und Pollenprodukte einen PA-Höchstgehalt von 500 µg/kg fest (Verordnung, 2020).

Vorkommen in Böden und Oberflächenwasser

Um die Verteilung von PA aus Jakobskreuzkraut in der Umwelt zu untersuchen, wurde in einer Studie in Dänemark von Dezember 2017 bis Dezember 2018 an drei Stellen, an denen die Pflanze dominant war, das Vorkommen von PA in Böden und Oberflächenwasser bestimmt. Bei einer Pflanzendichte von im Durchschnitt 45 pro m² wurden die PA-Konzentrationen zwischen April und November bestimmt und in Relation zu den Regenfällen gesetzt. Es wurden 0,8-4,0 mg/kg Trockenmasse in Böden und 6,0-529 µg/L in Oberflächengewässern gefunden. Die maximalen PA-Konzentrationen wurden Mitte Mai kurz vor der Blüte mit einem Anstieg der Konzentrationen nach Regenfällen verzeichnet. Die Menge an PA, die bei hoher Pflanzendichte in Böden übertragen werden kann, wurde mit 0,4-2,0 kg/ha ermittelt. Da offensichtlich PA aus Pflanzen in von Greiskräutern dominierten Gebieten mit höheren Niederschlägen in umgebende Böden und Oberflächengewässer transportiert werden können, kann hier ein Risiko für die Gesundheit von Nutztieren und Menschen bestehen (Hama & Strobel, 2021).

Maßnahmen der Landwirtschaft und der verarbeitenden Industrie

Arzneipflanzen und Teekräuter

Nach der im Juli 2013 publizierten Bewertung des BfR zum Vorkommen von PA in Lebensmittel- und Arzneitees (BfR, 2013) ergriffen die Lieferanten der Ausgangsstoffe und die Hersteller von pflanzlichen Arzneimitteln Maßnahmen zur Überprüfung einer möglichen Belastung und zur Reduktion eines möglichen Kontaminationsrisikos. Vor dem Hintergrund, dass eine vollständige Vermeidung von PA-Kontaminationen nach dem gegenwärtigen Stand der Technik nicht möglich ist und deshalb Präventivmaßnahmen von essenzieller Bedeutung sind, wurde gemeinsam von verarbeitender Industrie und Anbauern ein Code of Practice erarbeitet. Dieses Dokument trägt der Notwendigkeit einer Einbeziehung aller Prozessbeteiligten aus den Bereichen Anbau, Nacherntebehandlung, Weiterverarbeitung sowie Herstellung von Extrakten bzw. Fertigarzneimitteln Rechnung und beschreibt mögliche Risiken einer PA-Kontamination und entsprechende Einflussmöglichkeiten entlang der gesamten Prozesskette. Für alle diese Schritte werden Vorschläge für Maßnahmen zusammen mit deren Bewertung aufgeführt. Für den Prozessschritt der Ernte des Pflanzenmaterials beispielsweise besteht das Risiko der Miternte PA-haltiger Unkräuter. Mögliche Maßnahmen können in einer Optimierung der Erntetechnologie, z. B. der Schnitthöhe, und des Erntezeitpunktes bestehen (Dittrich et al., 2016). Ähnliche Empfehlungen wurden für die Gewinnung von Lebensmitteln mit Berücksichtigung der Besonderheiten der einzelnen Branchen publiziert (Lebensmittelverband, 2020).

Um das Problem einer Kontamination von Arzneipflanzen mit PA von behördlicher Seite zu adressieren und für die Hersteller Maßnahmen zur Prüfung ihrer für die Arzneimittelherstellung verwendeten Chargen anzuordnen, erschien am 1. März 2016 eine Bekanntmachung des Bundesinstitutes für Arznei-

mittel und Medizinprodukte (BfArM) (BfArM, 2016). Diese verpflichtete die Hersteller, den Prüfumfang in Form von drei Kategorien zu definieren, wobei in Abhängigkeit von den vorliegenden Daten über den PA-Gehalt des Materials entweder eine Stichprobenprüfung oder eine Routineprüfung durchgeführt werden muss. Es ist dabei die Aufgabe des Arzneimittel-Herstellers, die Anforderungen an die einzusetzenden Ausgangsstoffe anhand der Tagesdosis des Endproduktes zu berechnen. Eine errechnete Überschreitung des Grenzwertes von 1,0 µg pro Tag im Fertigarzneimittel bedeutet in jedem Fall, dass die betreffende Charge nicht für die weitere Produktion eingesetzt werden darf. Auch auf europäischer Ebene wurde eine entsprechende Anordnung für den Arzneimittelbereich umgesetzt (HMPC, 2016).

Datenauswertungen von Herstellern bestätigen, dass über die letzten Jahre eine deutliche und kontinuierliche Verbesserung erfolgt und heute eine stabile Situation erreicht ist (Steinhoff, 2021). Die Datenauswertungen erlauben darüber hinaus für die Hersteller eine Identifizierung von kritischen Pflanzen und Zubereitungen im Hinblick auf eine mögliche PA-Belastung und dienen der Überprüfung der Effizienz der durchgeführten Maßnahmen nach dem oben beschriebenen Code of Practice (Dittrich et al., 2016).

Da bereits eine Miternte von weniger als 10 Greiskrautpflanzen pro Hektar zu einer Überschreitung der PA-Grenzwerte im Erntegut führen können, wurde in einem Forschungsprojekt ein Nahinfrarot(NIR)-spektroskopisches Detektionsverfahren entwickelt, mit dem solche Verunreinigungen in den geernteten Arznei- und Gewürzpflanzen erkannt werden können. Dabei erscheint eine Abtrennung unerwünschter und potenziell toxischer Unkräuter wie insbesondere des Gewöhnlichen Greiskrauts durchaus möglich (Tron et al., 2020).

Honig

Zur Vermeidung einer PA-Belastung von Honig sollten Imker PA-Pflanzen erkennen und korrekt identifizieren können, um bei Bedarf entsprechende Maßnahmen zu treffen. Da in vielen Fällen dem Imker die betreffenden Flächen jedoch nicht gehören, wird empfohlen, die Eigentümer der Flächen mit Standorten der PA-Pflanzen bzw. die verantwortlichen Behörden zu kontaktieren. Falls möglich, kann es angezeigt sein, den Standort der Bienenstöcke zu wechseln (Lebensmittelverband, 2020) oder den Honig vor der Greiskraut-Blüteperiode Mitte Juli zu gewinnen bzw. in Zweifelsfällen den geschleuderten Honig vorsorglich auf seinen PA-Gehalt untersuchen zu lassen (DVL, 2021).

Eine Untersuchung der Universität Kiel befasste sich mit der Auswirkung eines Wildblumenbewuchses auf die Besuche von Bestäubern beim Gewöhnlichen Greiskraut auf neun speziell dazu angelegten Flächen von jeweils 4 m × 4 m, die in drei Intervallen im Juni und Juli 2018 beobachtet wurden. Die Wildblumenbeete wurden mit einer Samenmischung aus einem regionalen Agrarumweltprogramm angesät, die anderen Parzellen stellten Gewöhnliches Greiskraut mit jeweils neun Pflanzen in artenreichem (mit zusätzlicher Samenmischung) und artenarmem Grünland dar. Insgesamt wurden fast 12.000 Bestäuberbesuche gezählt, darunter Hummeln (44,4 %), Honigbienen (31,8 %), Schwebfliegen (15,3 %) und

Solitärbienen (8,5 %). Auf Greiskraut entfielen dabei 4.131 Bestäuberbesuche von Honigbienen (36,4 %), Hummeln (25,7 %), Schwebfliegen (23,7 %) und Solitärbienen (14,1 %). Insgesamt betragen die relativen Besuchsraten beim Greiskraut durchschnittlich 24,9 % pro Block und Intervall, wobei sie bei Solitärbienen (35,7 %) deutlich am höchsten waren. Es konnte gezeigt werden, dass das Vorhandensein von Wildblumenfeldern und Wildblumenbedeckung die Anzahl der Bestäuberbesuche beim Greiskraut in artenarmen Wiesen reduzierten. Dieser Effekt war bei Schwebfliegen am stärksten ausgeprägt, gefolgt von Honigbienen, Solitärbienen und Hummeln. Somit können die auf die artspezifischen Anforderungen von Blütenbesuchern zugeschnittenen Wildblumenfelder, die an Massenvorkommen von Gewöhnlichem Greiskraut auf ausgedehnten Grasflächen angrenzen, eine alternative Maßnahme zur Verringerung der Besuchsraten von Honigbienen und anderen Bestäubern auf Greiskraut darstellen (Peter et al., 2021).

Grünfütter

Sorgfalt muss auch beim Anbau von Futtermitteln angewendet werden. Zwar werden PA-bildende Pflanzenarten von den Weidetieren im frischen Zustand zumeist gemieden, in getrockneter Form können PA-haltige Pflanzenteile jedoch nicht mehr erkannt werden, so dass zur Vermeidung von Vergiftungen durch Grünfütter entsprechende Maßnahmen zu ergreifen sind (Mulder et al., 2009). Diese können wie oben beschrieben darin bestehen, die für die Gewinnung von Grünfütter vorgesehenen Flächen zu kontrollieren, die PA-bildenden Pflanzen auszureißen und in Biogasanlagen zu vernichten. Bei mehr als zwei Pflanzen pro 10 m² sollte das Erntegut nicht mehr als Futtermittel eingesetzt und auf der Anbaufläche ggf. nach Herbizidbehandlung eine Nachsaat bzw. nach Umpflügen eine Neueisaat vorgenommen werden (LANUV, 2020; Lebensmittelverband, 2020).

Empfehlungen für die Bewirtschaftung von Wiesen und Weideland

Wie beschrieben kann das Vorkommen von Greiskräutern auf Weiden und Wiesen nicht nur durch die direkte Aufnahme durch Weidetiere, sondern auch durch die Verfütterung von PA-belastetem Heu eine Gefahr darstellen, weshalb die Kontrolle und die Reduzierung PA-bildender Pflanzen wichtig sind (Mulder et al., 2009; Leiss 2011; Wiedenfeld & Edgar, 2011). Detaillierte Maßnahmen für das Weidemanagement u. a. für extensives Weideland und intensives Grünland, enthalten u. a. die Empfehlungen der Landwirtschaftskammer und des Landesamtes für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz (LANUV) Nordrhein-Westfalen, des Landesamtes für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein (LLUR), des Deutschen Verbandes für Landschaftspflege e. V. (DVL) und des Lebensmittelverbandes Deutschland (LANUV, 2020; LLUR, 2013; Lebensmittelverband, 2020).

Die Maßnahmen zur Bekämpfung des Jakobskreuzkrautes zielen in erster Linie darauf ab, diesem die Wachstums- und Vermehrungsgrundlagen zu nehmen, also die Blüte und Samenreife zu verhindern. In Abhängigkeit vom Ausmaß des

Besatzes ist eine einmalige Bekämpfung häufig nicht ausreichend. Deshalb sollten im Rahmen einer konsequenten Weidpflege ab Blühbeginn die Flächen gemäht und bei reiner Schnittnutzung mindestens zwei Schnitte durchgeführt werden, um die Samenbildung zu verhindern. Da das Mähen insbesondere beim Jakobskreuzkraut auch ein erneutes Ausbreiten fördern kann, sollten erste auftretende Pflanzen frühzeitig mit der Wurzel ausgerissen oder ausgestochen werden. Eine weitere wichtige und nachhaltige Maßnahme ist die Vermeidung von Lücken und Narbenschäden, auf denen sich das Kraut ausbreiten kann. Dies gilt besonders für Pferdeweiden, deren Grünlandnarbe relativ stärkerer Beanspruchung ausgesetzt ist. Sinnvoll kann die Förderung des Wachstums schnellwachsender Grasarten ggf. mit entsprechender Düngung oder eine Nachsaat mit konkurrierenden Untergräsern z. B. mit deutschem Weidelgras (*Lolium perenne* L.), sein. Für eine intensive Grünlandnutzung empfehlen die Landwirtschaftskammern spezielle Grünland-Mischungen zu leistungsstarken Grasnarben, zur Anlage von extensiv genutztem, artenreichem Grünland haben sich u. a. Mahdgutübertragung und Heudrusch® bewährt. Wegen der Ausbreitung der Samen mit dem Wind sollten auch angrenzende Flächen entsprechend beobachtet und wenn möglich eine Verbreitung der Samen von PA-Pflanzen über die Hufe oder das Fell der Weidetiere vermieden werden (LANUV, 2020; Lebensmittelverband, 2020; LLUR, 2013).

Für eine Beweidung durch Schafe, die weniger empfindlich auf PA als Pferde oder Rinder reagieren, wird das zeitige Frühjahr empfohlen. Allerdings dürfen die Weideflächen keinen zu starken Greiskrautbesatz aufweisen und sollten zudem über ein attraktives und ausreichendes Angebot an anderen Futterpflanzen verfügen. Durch eine Schafbeweidung kann jedoch möglicherweise auch Offenbodenstellen mit Keimbedingungen für Greiskräuter entstehen (Lebensmittelverband, 2020; LLUR, 2013).

Die chemische Bekämpfung des Jakobskreuzkrautes mit Herbiziden ist möglich, sollte aber stets als letzte Maßnahme in Erwägung gezogen werden, da damit auch wertvolle Grünlandpflanzen beseitigt werden (LANUV, 2020). Deshalb seien auch einige Möglichkeiten der biologischen Bekämpfung erwähnt, da wie oben beschrieben, Greiskräuter auch eine Nahrungsquelle für eine Reihe an Herbivoren darstellen. Hierzu wurde eine umfangreiche Übersicht von Studien mit verschiedenen Insekten publiziert (Leiss, 2011).

In der Tagespresse wurde von einem Landwirt aus Schleswig-Holstein berichtet, der ein auch in anderen Bundesländern zum Einsatz gekommenes Konzept entwickelt hat. Er züchtete den Jakobskrautbär (*Tyria jacobaeae*), um über dessen Raupenfraß die Verbreitung des Jakobskreuzkrautes einzudämmen (Süddeutsche Zeitung, 2020). Jedoch wurde gezeigt, dass dessen Einsatz als Methode zur Vernichtung des Jakobskreuzkrauts z. B. in den USA, Australien und Neuseeland aus verschiedenen Gründen nicht etabliert werden konnte (Leiss, 2011). Dabei ist auch zu berücksichtigen, dass das Ausmaß des Verbisses durch den Jakobskrautbär nicht nur von der Menge der Nahrungspflanzen, sondern auch stark von Umweltfaktoren wie Witterung und die Raupen befallenden Parasitoiden (z. B. Schlupfwespen), die die Popu-

lationsentwicklung des Falters beeinflussen, abhängt (LLUR, 2013).

In einer australischen Studie wurde die Verbreitung verschiedener Flohkäfer und Mottenarten sowie des Jakobskrautbärs und deren Auswirkung auf den Besatz von Flächen mit Jakobskreuzkraut untersucht. So hat sich der Flohkäfer *Longitarsus flavicornis* über fast alle befallenen Gebiete Süd- und Nordtasmaniens ausgebreitet und teilweise die Dichte um bis zu 95 % reduziert, wo hingegen *Longitarsus jacobaeae* keine signifikanten Auswirkungen hatte. Auch mit der Mottenart *Cochylis atricapitana* gibt es positive Erfahrungen (McLaren et al., 2000).

Entsorgung

In den vergangenen Jahren wurde von verschiedenen Institutionen auf regionaler oder lokaler Ebene eine Vielzahl von Empfehlungen zur Entfernung und Entsorgung von Jakobskreuzkraut und anderen Greiskräutern veröffentlicht.

Zur Entsorgung der Pflanzen von größeren Flächen wurde die Verbringung in Kompostieranlagen, Verbrennungsanlagen oder Biogasanlagen empfohlen. In zugelassenen Anlagen mit Einwirkung definierter Temperaturen über einen bestimmten Zeitraum können Pflanzen zuverlässig abgetötet werden und Samen ihre Keimfähigkeit verlieren. Eine Ausbreitung der Pflanzen ist durch die spätere Gülleverteilung nicht zu befürchten, weshalb ein Einsatz der Gärreste als Dünger auf den Feldern und im Grünland für möglich gehalten wurde. Bei Anlagen mit offenen Aufnahmebereichen sollte das Material zügig in den Behandlungsprozess eingebracht werden, um die Samenverbreitung über die Luft zu verhindern (BGK, 2009; LANUV, 2020).

Für die Entsorgung aus Haushaltungen rät die Bundesgütemgemeinschaft Kompost e. V. (BGK, 2009) von einer Eigenkompostierung ab und empfiehlt, ausgerissenes Jakobskreuzkraut falls vorhanden in der Biotonne bzw. ansonsten über die Restmülltonne zu entsorgen. So hatte auch die Fraktion der Grünen in Windeck/Sieg im August 2020 die Bürger aufgerufen, Jakobskreuzkraut mit Handschuhen auszureißen, in der Restmülltonne zu entsorgen und keinesfalls zu kompostieren (Grüne Windeck, 2020).

Basierend auf den Erkenntnissen neuerer Untersuchungen, nach denen PA aus verrottetem Pflanzenmaterial von Jakobskreuzkraut über den Boden von Kulturpflanzen aufgenommen werden und auch zwischen lebenden Pflanzen übertragen werden können, dürfen ausgerissene Greiskräuter keinesfalls auf dem Acker oder auf der Wiese oder Weide verrotten, sondern sie müssen vollständig von den Flächen entfernt werden, um eine Aufnahme der Alkaloide durch andere Pflanzen zu verhindern (Nowak et al., 2016; Selmar et al., 2019). Ob eine Kompostierung von Greiskräutern in zugelassenen Anlagen mit definierter Hitzeeinwirkung einen Abbau der PA ermöglicht und damit nicht nur zum Abtöten von Pflanzen und Samen, sondern auch zur Zerstörung der toxischen Inhaltsstoffe geeignet ist, muss an dieser Stelle mangels ausreichender Datenlage offenbleiben. Berücksichtigt werden sollte jedoch auch, dass es beim Ausreißen oder Mähen blühender Jakobskreuzkraut-Pflanzen innerhalb we-

niger Stunden zu einer „Notreife“ der Samen kommen kann, die dann durch den Wind weiterverbreitet werden können.

In einer neueren Studie wurde das Ausmaß des biochemischen Abbaus von PA durch Kompostierung und Biomethanisierung PA-haltiger Pflanzen, u. a. des Jakobskreuzkrautes, untersucht. Zum einen wurde frisch geschnittenes Material in Thermokompostern kompostiert, nach 6 Wochen umgesetzt und nach weiteren 6 Wochen gesiebt und analysiert. Zum anderen wurde für die Biogasexperimente die grob gehackte Greiskraut-Biomasse teils dunkel gelagert, teils eingefroren und aufgetaut und dann in die Fermenter verbracht. In diesen wurde eine Nassfermentation bei 38°C über acht gestaffelte Zeiträume zwischen 6 und 30 Tagen durchgeführt. Die Versuche zeigten einen über 99 %igen Abbau der Alkaloide während des dreimonatigen Kompostierungsprozesses und eine schnelle Zersetzung von PA von 6350,2 µg/kg auf weniger als 539,6 µg/kg während der Biomethanisierung. Die Ergebnisse können Hinweise darauf geben, wie PA-haltiges Pflanzenmaterial im Rahmen einer Minimierung des Übertragungsrisikos von PA auf nachfolgende landwirtschaftliche Kulturen für die Lebens- und Futtermittelproduktion wiederverwendet werden kann (Chmit et al., 2021).

Ökologische Aspekte und Risikoabwägung

Jakobskreuzkraut hat für eine große Anzahl an Insekten eine lebenswichtige Bedeutung als Pollenspender, Futter- oder Eiablagepflanze. Insgesamt sind mehr als 170 Insektenarten bekannt, die am Jakobskreuzkraut leben. Diese große Zahl bedeutet auch ein entsprechend hohes Nahrungsangebot für andere Tierarten z. B. Vögel und Säugetiere (Macel, 2011; LLUR, 2013; Schramm et al., 2019). Kreuzkräuter sind damit wichtiger Teil der Lebensgemeinschaften und tragen zur Biodiversität bei.

Es stellt sich deshalb die Frage, ob rigorose Bekämpfungsmaßnahmen in allen Fällen angezeigt sind, insbesondere auf Flächen, die keine Quelle einer Verunkrautung landwirtschaftlich genutzter Flächen darstellen. Sicher müssen potenzielle Gefahren für Mensch und Tier vermieden bzw. deren Quellen beseitigt werden, aber gleichzeitig ökologische Belange angemessen berücksichtigt werden. So steht insbesondere auf Naturschutzflächen das Ziel der Erhaltung natürlicher Biotope der Umsetzung von Bekämpfungsmaßnahmen entgegen. Es sollte deshalb immer im Einzelfall unter Abwägung von Nutzen und Risiken des Vorkommens von Jakobskreuzkraut beurteilt werden, ob und welche Maßnahmen einer Entfernung bzw. auch weitere Maßnahmen angezeigt sind, dies unter Berücksichtigung sowohl der Gesundheit von Mensch und Tier als auch der Erhaltung der Biodiversität und der Prioritäten des Naturschutzes.

Eine detaillierte Entscheidungshilfe zur Wahl geeigneter Kontrollmaßnahmen für Flächen mit und ohne Naturschutzauflagen wurde vom Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein und dem Deutschen Verband für Landschaftspflege e. V. publiziert (LLUR, 2013). Nach diesem Entscheidungsbaum ist zunächst zu differenzieren, ob

es sich um Flächen mit oder ohne Naturschutzauflagen handelt. Bei Flächen mit Naturschutzauflagen sollte mit der Naturschutzbehörde oder anderen zuständigen Organisationen abgeklärt werden, ob Maßnahmen auf der Fläche zulässig bzw. notwendig sind. Falls ja, ist je nach Flächengröße und Dichte des Besatzes zu entscheiden, ob das Mähen der Fläche oder ein Ausziehen oder Ausgraben der Pflanzen sinnvoll ist, wobei in jedem Fall aber eine Abfuhr und Entsorgung des Materials erfolgen sollte. Bei Flächen ohne Naturschutzauflagen können sowohl nicht-chemische als auch chemische Maßnahmen zum Tragen kommen, ebenfalls in Abhängigkeit von der Flächengröße und der Dichte des Besatzes. Als nicht-chemische Maßnahmen können die Verbesserung der Bestandes- bzw. Narbenpflege, das Mähen oder die Entfernung einzelner Pflanzen erfolgen. Sollte eine Herbizid-Behandlung angezeigt sein, sind hier ebenfalls die Größe der Fläche und die Dichte des Jakobskreuzkraut-Besatzes zu berücksichtigen (LLUR, 2013).

Insgesamt lässt sich festhalten, dass mit der Bewertung des Vorkommens, des Gefahrenpotenzial und eventuell notwendiger Beseitigungsmaßnahmen sachlich und wissenschaftlich fundiert sowie unter Einbeziehung von Aspekten des Naturschutzes und der Biodiversität umgegangen werden sollte. Aufklärung und offene, emotionsfreie Diskussionen über das Thema sowie Weiterbildungsmaßnahmen für Landwirte und Tierhalter spielen dabei eine wichtige Rolle (Zehm, 2017).

Einen Sonderfall stellt das eingewanderte und zumeist auf Verkehrsbegleitflächen vorkommende Schmalblättrige Greiskraut dar, das sich auf bewirtschaftetem Grünland bislang noch nicht verbreitet hat. Es wurde vorgeschlagen, aus ökonomischen Gründen eine Bekämpfung in Betracht zu ziehen, um frühzeitig einer großflächigeren Ausbreitung verbunden mit höheren Beseitigungskosten vorzubeugen (Zehm, 2017).

Beispiel: Flächen im Rhein-Sieg-Kreis

Für die Biologische Station im Rhein-Sieg-Kreis hat das 30 ha große Gelände des Segelflugplatzes Eudenbach nicht weit von der Autobahnausfahrt „Bad Honnef – Linz“ der A 3 eine besondere Bedeutung. Es gehört mit seinem artenreichen Grünland, das durch extensive, düngefreie Nutzung und regelmäßige Heumahd durch Landwirte bewirtschaftet wird, zu den größten Wiesen im Kreisgebiet und stellt einen wertvollen Lebensraum für Pflanzen und Tiere dar (Biologische Station, 2019). Da das Heu an Rinder und Schafe verfüttert wird, entfernen Mitarbeitende der Biostation und ehrenamtlich Helfende das auf diesen Flächen vorkommende Jakobskreuzkraut zumeist in jedem Jahr ab Anfang Juli in Handarbeit. Hierbei werden die Pflanzen nach Möglichkeit mit der häufig nicht ohne Weiteres erkennbaren Blattrosette ausgerissen und entsorgt, bevor die Samen reifen und eine Weiterverbreitung der Pflanzen erfolgen kann, so beispielsweise in mehreren Aktionen im Juli 2021, wie Abb. 5 und 6 zeigen. Die Wiese wurde wenige Tage nach dem Einsatz gemäht.

Neben der Betreuung der Wiesen am Flugplatz Eudenbach werden auch in Zusammenarbeit mit der Biostation Rhein-Erft linksrheinische Flächen beispielsweise bei Ersdorf in der Nähe von Meckenheim von Jakobskreuzkraut befreit. Damit



Abb. 5. Entfernung des Jakobskreuzkrauts auf einer Fläche beim Flugplatz Eudenbach (Königswinter/Rhein-Sieg-Kreis), Quelle: Dr. Barbara Steinhoff 2021



Abb. 6. Ausgerissenes Jakobskreuzkraut bei einer Aktion der Biostation Rhein-Sieg, Quelle: Dr. Barbara Steinhoff 2021

wird ein wichtiger Beitrag zur Unterstützung der Landwirte und zur Erhaltung dieser besonderen Wiesen geleistet.

Zusammenfassung und Ausblick

Jakobskreuzkraut und andere Greiskräuter können bei unbeabsichtigter Miternte zur Kontamination pflanzlicher Lebensmittel und Futtermittel sowie Arzneimitteln mit PA führen. Deshalb sind bei Verwendung der geernteten Pflanzen in diesen Produkten entsprechende Vorsichtsmaßnahmen angezeigt. Diese

können sich auf Vermeidung bzw. Entfernung der Unkräuter beziehen, aber auch auf die Kontrolle der Ausgangsstoffe und der Produkte vor, während bzw. nach der Herstellung. Auch Honig kann in Abhängigkeit vom Ausmaß des Greiskraut-Vorkommens im Umfeld von Bienenstöcken eine PA-Belastung aufweisen. Im Sinne der Verfügbarkeit allgemein sicherer Produkte und der Erhaltung der Gesundheit von Menschen und Tieren wird demnach auf solchermaßen bewirtschafteten Flächen eine weitestgehende Reduktion der Greiskrautbestände für erforderlich gehalten. Da das Jakobskreuzkraut wie auch andere Greiskräuter eine potenzielle Gefährdung

für Weidetiere darstellen können, werden, wie am Beispiel von Flächen im Rhein-Sieg-Kreis geschildert, Maßnahmen zur Entfernung der Pflanzen von Weideflächen durchgeführt, die für die Erhaltung dieser Flächen extrem wichtig sind.

Unter dem Gesichtspunkt der Bedeutung des Jakobskreuzkrauts und anderer Greiskräuter als Teil der mitteleuropäischen Lebensgemeinschaften und als Nahrungsquelle für Bienen und andere Insekten sowie verschiedene Herbivoren muss jedoch kritisch hinterfragt werden, ob eine Ausrottung von Greiskräutern im Sinne rigoroser Bekämpfungsmaßnahmen generell geboten ist. Vielmehr muss in jedem Einzelfall anhand einer Nutzen-Risiko-Abwägung entschieden werden, ob und welche Beseitigungsmaßnahmen angesichts des Gefahrenpotenzials durch Greiskräuter notwendig sind. Hierbei sind die Aspekte der Gesundheit von Mensch und Tier, aber auch die ökologische Bedeutung insbesondere für Insekten, die Erhaltung der Biodiversität und die Prioritäten des Naturschutzes sorgfältig gegeneinander abzuwägen.

Danksagung

Diese Publikation entstand im Rahmen einer Projektarbeit „Ehrenamt im Naturschutz stärken“ der Biologischen Station im Rhein-Sieg-Kreis e. V., Eitorf.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autorin erklärt, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

BfArM (Bundesinstitut für Arzneimittel und Medizinprodukte), 2016: Bekanntmachung zur Prüfung des Gehalts an Pyrrolizidinalkaloiden zur Sicherstellung der Qualität und Unbedenklichkeit von Arzneimitteln, die pflanzliche Stoffe bzw. pflanzliche Zubereitungen oder homöopathische Zubereitungen aus pflanzlichen Ausgangsstoffen als Wirkstoffe enthalten. Bonn: BfArM, URL: <https://www.bfarm.de/SharedDocs/Bekanntmachungen/DE/Arzneimittel/besTherap/bm-besTherap-20160301-pa-pdf.html>.

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2011: Analytik und Toxizität von Pyrrolizidinalkaloiden sowie eine Einschätzung des gesundheitlichen Risikos durch deren Vorkommen in Honig. Stellungnahme Nr. 038/2011 des BfR vom 11. August 2011, ergänzt am 21. Januar 2013, URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/analytik-und-toxizitaet-von-pyrrolizidinalkaloiden.pdf>.

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2013: Pyrrolizidinalkaloide in Kräutertees und Tees. Stellungnahme 018/2013 des BfR vom 5. Juli 2013, URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/pyrrolizidinalkaloide-in-kraeutertees-und-tees.pdf>.

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2016: Pyrrolizidinalkaloide: Gehalte in Lebensmitteln sollen nach wie vor so weit wie möglich gesenkt werden. Stellungnahme Nr. 030/2016 des BfR vom 28. September 2016, URL: [https://www.bfr.bund.de/cm/343/pyrrolizidinalkaloide-gehalte-in-](https://www.bfr.bund.de/cm/343/pyrrolizidinalkaloide-gehalte-in-lebensmitteln-sollen-nach-wie-vor-so-weit-wie-moeglich-gesenkt-werden.pdf)

[lebensmitteln-sollen-nach-wie-vor-so-weit-wie-moeglich-gesenkt-werden.pdf](https://www.bfr.bund.de/cm/343/pyrrolizidinalkaloide-gehalte-in-lebensmitteln-sollen-nach-wie-vor-so-weit-wie-moeglich-gesenkt-werden.pdf).

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2019: Pyrrolizidinalkaloidgehalt in getrockneten und tiefgefrorenen Gewürzen und Kräutern zu hoch. Stellungnahme Nr. 017/2019 des BfR vom 13. Mai 2019, URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/pyrrolizidinalkaloidgehalt-in-getrockneten-und-tiefgefrorenen-gewuerzen-und-kraeutern-zu-hoch.pdf>.

BfR (Bundesinstitut für Risikobewertung), 2020: Aktualisierte Risikobewertung zu Gehalten an 1,2-ungesättigten Pyrrolizidinalkaloiden (PA) in Lebensmitteln. Stellungnahme 026/2020 des BfR vom 17. Juni 2020, URL: <https://www.bfr.bund.de/cm/343/aktualisierte-risikobewertung-zu-gehalten-an-1-2-ungesaettigten-pyrrolizidinalkaloiden-pa-in-lebensmitteln.pdf>.

BGK (Bundesgütegemeinschaft Kompost e. V.), 2009: Schadlose Entsorgung von Jakobskreuzkraut. BGK Information 30. Juli 2009, URL: https://www.kompost.de/fileadmin/docs/Archiv/Informationen/schadlose_Entsorgung_Jakobskreuzkraut.pdf.

Biologische Station im Rhein-Sieg-Kreis e. V., 2019: Artenreiches Grünland durch Heunutzung erhalten – Kreuzkrautbekämpfung am Segelflugplatz Eudenbach. Biologische Station im Rhein-Sieg-Kreis e. V., 26. Juni 2019, URL: <https://www.biostation-rhein-sieg.de/2019/06/26/artenreiches-gr%C3%BCnland-durch-heunutzung-erhalten-kreuzkrautbek%C3%A4mpfung-am-segelflugplatz-eudenbach/>

Cheng, D., V.-T. Nguyen, N. Ndiokubwayo, J. Ge, P.P.J. Mulder, 2017: Pyrrolizidine alkaloid variation in *Senecio vulgaris* populations from native and invasive ranges. *PeerJ* **5**, e3686, DOI: 10.7717/peerj.3686.

Chmit, M.S., J. Müller, D. Wiedow, G. Horn, T. Beuerle, 2021: Biodegradation and utilization of crop residues contaminated with poisonous pyrrolizidine alkaloids. *J Journal of Environmental Management* **290**, 112629, DOI: 10.1016/j.jenvman.2021.112629.

Craig, A.M., E.G. Pearson, C. Meyer, J.A. Schmitz, 1991: Serum liver enzyme and histopathologic changes in calves with chronic and chronic-delayed *Senecio jacobaea* toxicosis. *American Journal of Veterinary Research* **52**, 1969-1978.

DVL (Deutscher Verband für Landschaftspflege e. V., 2021: Pyrrolizidin-Alkaloide im Honig, URL: <http://www.kreuzkraut.de/fachinformationen/pyrrolizidin-alkaloide-im-honig.html>.

Dittrich, H., K. Hösel, H. Sievers, B. Klier, F. Waimer, H. Heuberger, A. Plescher, N. Armbrüster, B. Steinhoff, 2016: Code of Practice zur Vermeidung und Verringerung von Kontaminationen pflanzlicher Arzneimittel mit Pyrrolizidinalkaloiden. *Pharmazeutische Industrie* **78** (6), 836-845.

Dusemund, B., N. Nowak, C. Sommerfeld, O. Lindtner, B. Schäfer, A. Lampen, 2018: Risk assessment of pyrrolizidine alkaloids in food of plant and animal origin. *Food and Chemical Toxicology* **115**, 63-72, DOI: 10.1016/j.fct.2018.03.005.

Ebmeyer, J., J.D. Rasinger, J.G. Hengstler, D. Schaudien, O. Creutzenberg, A. Lampen, A. Braeuning, S. Hessel-Pras, 2020: Hepatotoxic pyrrolizidine alkaloids induce DNA damage

- response in rat liver in a 28-day feeding study. *Archives of Toxicology* **94**, 1739–1751, DOI: 10.1007/s00204-020-02779-2.
- Edgar, J.A., S.M. Colegate, M. Boppré, R.J. Molyneux, 2011:** Pyrrolizidine alkaloids in food: a spectrum of potential health consequences. *Food Additives and Contaminants Part A* **28** (3), 308–324, DOI: 10.1080/19440049.2010.547520.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2007:** Opinion of the Scientific Panel on contaminants in the food chain on a request from the European Commission related to pyrrolizidine alkaloids as undesirable substances in animal feed (Question N° EFSA-Q-2003-065). *EFSA Journal* **447**, 1–51, URL: <https://efsa.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.2903/j.efsa.2007.447>.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2011:** Scientific Opinion on pyrrolizidine alkaloids in food and feed. *EFSA Journal* **9** (11), 2406, DOI: 10.2903/j.efsa.2011.2406.
- EFSA (European Food Safety Authority), 2016:** Dietary exposure assessment to pyrrolizidine alkaloids in the European population. *EFSA Journal* **14** (8), 4572, DOI: 10.2903/j.efsa.2016.4572.
- EFSA (European Food Safety Authority) Panel on Contaminants in the Food Chain (CONTAM), 2017:** Risks for human health related to the presence of pyrrolizidine alkaloids in honey, tea, herbal infusions and food supplements. *EFSA Journal* **15** (7), 4908–4943, DOI: 10.2903/j.efsa.2017.4908.
- Flade, J., H. Beschow, M. Wensch-Dorendorf, A. Plescher, W. Wätjen, 2019:** Occurrence of nine pyrrolizidine alkaloids in *Senecio vulgaris* L. depending on developmental stage and season. *Plants* **8**, 54, DOI: 10.3390/plants8030054.
- Fu, P.P., Q. Xia, G. Lin, M.W. Chou, 2004:** Pyrrolizidine alkaloids – genotoxicity, metabolism enzymes, metabolic activation, and mechanisms. *Drug Metabolism Reviews* **36** (1), 1–55, DOI: 10.1081/DMR-120028426.
- Gessner, O., 1953:** Die Gift- und Arzneipflanzen von Mitteleuropa. 2. Aufl. Heidelberg, Carl Winter Universitätsverlag, 142–143.
- Goeger, D.E., P.R. Cheeke, J.A. Schmitz, D.R. Buhler, 1982:** Toxicity of tansy ragwort (*Senecio jacobaea*) to goats. *American Journal of Veterinary Research* **43** (2), 252–254.
- Gottschalk, C., S. Ronczka, A. Preiß-Weigert, J. Ostertag, H. Klaffke, H. Schafft, M. Lahrssen-Wiederholt, 2015:** Pyrrolizidine alkaloids in natural and experimental grass silages and implications for feed safety. *Animal Feed Science and Technology* **207**, 253–261, DOI: 10.1016/j.anifeeds.2015.06.014.
- Grüne Windeck, 2020:** Jakobskreuzkraut eine heimische Gefahr für Mensch und Tier. Bündnis 90 Die Grünen, 13. August 2020, URL: https://gruene-windeck.de/gruenaktiv/presse/aktuelles-volltext/article/jakobskreuzkraut_eine_heimische_gefahr_fuer_mensch_und_tier/.
- Hama, J.R., B.W. Strobel, 2021:** Occurrence of pyrrolizidine alkaloids in ragwort plants, soils and surface waters at the field scale in grassland. *Science of the Total Environment* **755**, 142822, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2020.142822.
- He, X., Q. Xia, Q. Wu, W.H. Tolleson, G. Lin, P.P. Fu, 2019:** Primary and secondary pyrrolic metabolites of pyrrolizidine alkaloids form DNA adducts in human A549 cells. *Toxicology in vitro* **54**, 286–294, DOI: 10.1016/j.tiv.2018.10.009.
- HMPC (Committee on Herbal Medicinal Products), 2016:** Public Statement on contamination of herbal medicinal products/traditional herbal medicinal products with pyrrolizidine alkaloids – Transitional recommendations for risk management and quality control (EMA/HMPC/328782/2016). 31 May 2016, URL: https://www.ema.europa.eu/en/documents/public-statement/public-statement-contamination-herbal-medicinal-products/traditional-herbal-medicinal-products-pyrrolizidine-alkaloids_en.pdf.
- HMPC (Committee on Herbal Medicinal Products), 2021:** Public statement on the use of herbal medicinal products containing toxic, unsaturated pyrrolizidine alkaloids (PAs) including recommendations regarding contamination of herbal medicinal products with pyrrolizidine alkaloids (EMA/HMPC/893108/2011 Rev. 1). 7 July 2021, URL: https://www.ema.europa.eu/en/documents/public-statement/public-statement-use-herbal-medicinal-products-containing-toxic-unsaturated-pyrrolizidine-alkaloids_en-0.pdf.
- Jung, S., J. Lauter, N.M. Hartung, A. These, G. Hamscher, V. Wissemann, 2020:** Genetic and chemical diversity of the toxic herb *Jacobaea vulgaris* Gaertn. (syn. *Senecio jacobaea* L.) in Northern Germany. *Phytochemistry* **172**, 112235, DOI: 10.1016/j.phytochem.2019.112235.
- Kempf, M., A. Reinhard, T. Beuerle, 2010:** Pyrrolizidine alkaloids (PAs) in honey and pollen – legal regulation of PA levels in food and animal feed required. *Molecular Nutrition & Food Research* **54**, 158–168, DOI: 10.1002/mnfr.200900529.
- LANUV (Landesamt für Natur, Umwelt und Verbraucherschutz Nordrhein-Westfalen), Landwirtschaftskammer Nordrhein-Westfalen, 2020:** Jakobskreuzkraut (*Senecio jacobaea*) – Eine Giftpflanze auf dem Vormarsch. 6. Aufl. August 2020, URL: <https://www.landwirtschaftskammer.de/riswick/pdf/jakobskreuzkraut.pdf>
- Lebensmittelverband Deutschland, 2020:** Code of Practice zur Vermeidung und Verringerung der Kontamination von Lebensmitteln mit Pyrrolizidinalkaloiden, URL: <https://www.lebensmittelverband.de/de/presse/pressemitteilungen/pm-20200504-cop-zur-minimierung-von-pyrrolizidinalkaloiden-in-lebensmitteln-veroeffentlicht>
- Leiss, K.A., 2011:** Management practices for control of ragwort species. *Phytochemistry Reviews* **10**, 153–163, DOI: 10.1007/s11101-010-9173-1.
- LLUR (Landesamt für Landwirtschaft, Umwelt und ländliche Räume Schleswig-Holstein), DVL (Deutscher Verband für Landschaftspflege e. V.), 2013:** Umgang mit dem Jakobs-Kreuzkraut. Meiden – Dulden – Bekämpfen. 3. Aufl. Deutscher Verband für Landschaftspflege e. V. (DVL) Schriftenr. LLUR SH – Natur 22. Mai 2013, URL: https://www.dvl.org/uploads/tx_ttproducts/datasheet/DVL-Publikation-Fachpublikation_Jakobs-Kreuzkraut_Meiden_Dulden_Bekaempfen.pdf.
- Ma, C., Y. Liu, L. Zhu, H. Ji, X. Song, H. Guo, T. Yi, 2018a:** Determination and regulation of hepatotoxic pyrrolizidine alkaloids

- in food: A critical review of recent research. *Food and Chemical Toxicology* **119**, 50-60, DOI: 10.1016/j.fct.2018.05.037.
- Ma, J., Q. Xia, P.P. Fu, G. Lin, 2018b:** Pyrrole-protein adducts-A biomarker of pyrrolizidine alkaloid induced hepatotoxicity. *Journal of Food and Drug Analysis* **26**, 965-972, DOI: 10.1016/j.jfda.2018.05.005.
- Macel, M., K. Vrieling, P.G.L. Klinkhamer, 2004:** Variation in pyrrolizidine alkaloid patterns of *Senecio jacobaea*. *Phytochemistry* **65**, 865-873, DOI: 10.1016/j.phytochem.2004.02.009.
- Macel, M., 2011:** Attract and deter: a dual role for pyrrolizidine alkaloids in plant – insect interactions. *Phytochemistry Reviews* **10**, 75-82, DOI: 10.1007/s11101-010-9181-1.
- McLaren, D.A., J.E. Ireson, R.M. Kwong, 2000:** Biological control of ragwort (*Senecio jacobaea* L.) in Australia. In: Spencer NR (ed) Proceedings of the X International Symposium on Biological Control of Weeds 1999, Montana, 67–79.
- Mendel, V.E., M.R. Witt, B.S. Gitchell, D.N. Gribble, Q.R. Rogers, H.J. Segall, H.D. Knight, 1988:** Pyrrolizidine alkaloid-Induced liver disease in horses: an early diagnosis. *American Journal of Veterinary Research* **49**(4), 572-578.
- Merz, K.-H., D. Schrenk, 2016:** Interim Relative Potency Factors for the Toxicological Risk Assessment of Pyrrolizidine Alkaloids in Food and Herbal Medicines. *Toxicology Letters* **263**, 44-57, DOI: 10.1016/j.toxlet.2016.05.002.
- Moreira, R., D.M. Pereira, P. Valentão, P.B. Andrade, 2018:** Pyrrolizidine Alkaloids: Chemistry, Pharmacology, Toxicology and Food Safety. *International Journal of Molecular Science* **19** (6), pii:E1668, DOI: 10.3390/ijms19061668.
- Mulder, P.P.J., B. Beumer, E. Oosterink, J. de Jong, 2009:** Dutch survey on pyrrolizidine alkaloids in animal forage. Report No. 2009.518. Wageningen (The Netherlands): RIKILT, URL: <https://edepot.wur.nl/135952>.
- Mulder, P.P.J., P. López, M. Castelari, D. Bodi, S. Ronczka, A. Preiss-Weigert, A. These, 2018:** Occurrence of pyrrolizidine alkaloids in animal- and plant- derived food results of a survey across Europe. *Food Additives & Contaminants Part A* **35** (1), 118-133, DOI: 10.1080/19440049.2017.1382726.
- Neumann, H., A. Huckauf, 2016:** Jakobs-Kreuzkraut (*Senecio jacobaea*): eine Ursache für Pyrrolizidin-Alkaloide im Sommerhonig? *Journal für Verbraucherschutz und Lebensmittelsicherheit* **11**, 105-115, DOI: 10.1007/s00003-015-0986-0.
- Nitzsche, J., A. Plescher, S. Wahl, 2018:** Pyrrolizidinalkaloid-haltige Beikräuter in Arznei- und Gewürzpflanzenkulturen – Verbreitung und Gefahr der Kontamination von Ernteprodukten in Deutschland. Tagungsband 28. Deutsche Arbeitsbesprechung über Fragen der Unkrautbiologie und -bekämpfung, 27.2. – 1.3.2018 in Braunschweig. *Julius-Kühn-Archiv* **458**, 408-418, DOI: 10.5073/jka.2018.458.060.
- Nowak, M., C. Wittke, I. Lederer, B. Klier, M. Kleinwächter, D. Selmar, 2016:** Interspecific transfer of pyrrolizidine alkaloids: An unconsidered source of contaminations of phytopharmaceuticals and plant derived commodities. *Food Chemistry* **213**, 163-168, DOI: 10.1016/j.foodchem.2016.06.069.
- Peter, F., U. Hoffmann, T.W. Donath, T. Diekötter, 2021:** Sown wildflower fields are an efficient measure to reduce visitation rates of honeybees and other pollinating insects on *Jacobaea vulgaris*. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **307**, 107231, DOI: 10.1016/j.agee.2020.107231.
- Reichling, J., K.-H. Horz, E. Röder, 2019:** Senecio. In: Hagers Enzyklopädie der Arzneistoffe und Drogen. Blaschek, W., S. Ebel, U. Hilgenfeldt, U. Holzgrabe, J. Reichling (Eds.). DrugBase online. Stuttgart: Wissenschaftliche Verlagsgesellschaft.
- Richtlinie, 2002:** Richtlinie 2002/32/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 7. Mai 2002 über unerwünschte Stoffe in der Tierernährung. Amtsblatt der Europäischen Union Nr. L 140 vom 30. Mai 2002, URL: https://eur-lex.europa.eu/resource.html?uri=cellar:aca28b8c-bf9d-444f-b470-268f71df28fb.0002.02/DOC_1&format=PDF.
- Ruan, J., M. Yang, P. Fu, Y. Ye, G. Lin, 2014:** Metabolic Activation of Pyrrolizidine Alkaloids: Insights into the Structural and Enzymatic Basis. *Chemical Research in Toxicology* **27**, 1030-1039, DOI: 10.1021/tx500071q.
- Schramm, S., N. Köhler, W. Rozhon, 2019:** Pyrrolizidine Alkaloids: Biosynthesis, Biological Activities and Occurrence in Crop Plants. *Molecules* **24** (3), 498, DOI: 10.3390/molecules24030498.
- Schrenk, D., L. Gao, G. Lin, C. Mahony, P.P.J. Mulder, A. Peijnenburg, S. Pfuhrer, I.M.C.M. Rietjens, L. Rutz, B. Steinhoff, A. These, 2020:** Pyrrolizidine alkaloids in food and phytomedicine: Occurrence, exposure, toxicity, mechanisms, and risk assessment – A review. *Food and Chemical Toxicology* **136**, 111107, DOI: 10.1016/j.fct.2019.111107.
- Schrenk, D., J. Fahrner, A. Allemang, P. Fu, G. Lin, C. Mahony, P.P.J. Mulder, A. Peijnenburg, S. Pfuhrer, I.M.C.M. Rietjens, B. Sachse, B. Steinhoff, A. These, J. Troutman, J. Wiesner, 2021:** Novel Insights in Pyrrolizidine Alkaloid Toxicity and Implications for Risk Assessment: Occurrence, Genotoxicity, Toxicokinetics, Risk Assessment – A Workshop Report. *Planta Medica*. Epub ahead of print 29 October 2021, DOI: 10.1055/a-1646-3618.
- Selmar, D., C. Wittke, I. Beck-von Wolfersdorff, B. Klier, L. Lewerenz, M. Kleinwächter, M. Nowak, 2019:** Transfer of pyrrolizidine alkaloids between living plants: A disregarded source of contaminations. *Environmental Pollution* **248**, 456-461, DOI: 10.1016/j.envpol.2019.02.026.
- Starfinger, U., I. Kowarik, 2005:** *Senecio inaequidens*. In *Neobiota.de*. Gebietsfremde und invasive Arten in Deutschland. Bundesamt für Naturschutz, URL: <https://neobiota.bfn.de/handbuch/gefaesspflanzen/senecio-inaequidens.html>.
- Stegelmeier, B.L., D.R. Gardner, L.F. James, R.J. Molyneux, 1996:** Pyrrole detection and the pathologic progression of *Cynoglossum officinale* (houndstongue) poisoning in horses. *Journal of Veterinary Diagnostic Investigation* **8**, 81-90, DOI: 10.1177/104063879600800113.
- Stegelmeier, B.L., J.A. Edgar, S.M. Colegate, D.R. Gardner, T.K. Schoch, R.A. Coulombe, R.J. Molyneux, 1999:** Pyrrolizidine alkaloid plants, metabolism and toxicity. *Journal of Natural Toxins* **8** (1), 95-116.

- Stegelmeier, B.L., S.M. Colegate, A.W. Brown, 2016:** Dehydropyrrolizidine Alkaloid Toxicity, Cytotoxicity, and Carcinogenicity. *Toxins* **8** (12), pi 356, DOI: 10.3390/toxins8120356.
- Steinhoff, B., 2021:** Pyrrolizidine Alkaloid Contamination in Medicinal Plants: Regulatory Requirements and Their Impact on Production and Quality Control of Herbal Medicinal Products. *Planta Medica* **88** (02), 125-129, 10.1055/a-1494-3623.
- Süddeutsche Zeitung, 2020:** „Raupe to go“ gegen Giftpflanzen. 3. Dezember 2020, URL: <https://www.sueddeutsche.de/muenchen/starnberg/krailling-unkraut-blutbaeren-raupe-1.5132689>.
- Tron, N., G. Maier, H. Schulte, A. Krähmer, 2020:** NIRS basierte Detektion und Entfernung Pyrrolizidinalkaloid-haltiger Unkräuter aus Kulturpflanzen nach der Ernte – PA-NIRSort. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (4), 88–98, DOI: 10.5073/JfK.2020.04.05.
- Verordnung, 2020:** Verordnung (EU) 2020/2040 der Kommission vom 11. Dezember 2020 zur Änderung der Verordnung (EG) Nr. 1881/2006 hinsichtlich der Höchstgehalte an Pyrrolizidinalkaloiden in bestimmten Lebensmitteln. Amtsblatt der EU Nr. L 420 vom 14. Dezember 2020, URL: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:32020R2040&from=DE>.
- Wiefenfeld, H., J. Edgar, 2011:** Toxicity of pyrrolizidine alkaloids to humans and ruminants. *Phytochemistry Reviews* **10**, 137-151, DOI: 10.1007/s11101-010-9174-0.
- Witte, L., L. Ernst, H. Adam, T. Hartmann, 1992:** Chemotypes of two pyrrolizidine alkaloid-containing Senecio species. *Phytochemistry* **31**, 559–565, DOI: 10.1016/0031-9422(92)90038-R.
- Zehm, A., 2017:** Auf welchen Flächen mit Relevanz für den Naturschutz sollen welche Kreuzkräuter reguliert werden? In: *Kreuzkräuter und Naturschutz*. Deutscher Verband für Landschaftspflege (DVL). Ansbach, 25-36, URL: http://www.kreuzkraut.de/fileadmin/user_upload/data_files/Publikationen/Broschueren/Kreuzkraut-Tagungsband-Web.pdf.

Anika Zacher¹, Peter Leinweber¹, Kerstin Panten²

Sulfur-enriched bone char enhances P uptake by maize in a perennial pot experiment

Schwefel-angereicherte Knochenkohle erhöht P-Aufnahme von Mais in einem mehrjährigen Gefäßversuch

Affiliations

¹University of Rostock, Faculty of Agriculture and Environmental Sciences, Rostock, Germany.²Julius Kühn Institute (JKI) – Federal Research Centre for Cultivated Plants, Institute for Crop and Soil Science, Braunschweig, Germany.

Correspondence

Prof. Dr. agr. habil. Peter Leinweber, University of Rostock, Faculty of Agriculture and Environmental Sciences, Justus-von-Liebig-Weg 6, 18059 Rostock, Germany, email: peter.leinweber@uni-rostock.de

Abstract

Recycling of phosphorus (P) from slaughterhouse waste, production of bone char (BC) and its use as fertilizer is a promising approach to close nutrient cycles but the fertilizer value of BC is not sufficiently clear. Therefore, two BCs (BC and sulfur-enriched BC (BC^{plus})) were tested in comparison with highly water-soluble triple superphosphate (TSP) in a perennial pot experiment with maize as test plant with high P-requirement. The fertilizers affected both the dry matter yields, and the P concentration of maize in the general order BC^{plus}, TSP > BC. The P uptake of maize in the TSP treatment accounted for 38% of the applied P in the first experimental year and decreased subsequently. By contrast, the P uptake in the BC^{plus} treatment remained quite stable over time. In conclusion, the sulfur-enriched BC^{plus} is able to maintain sufficient P availability to crops in the medium term and can be recommended as fertilizer.

Keywords

Bone char, phosphorus, phosphorus recycling, plant nutrition

Zusammenfassung

Phosphor (P)-Recycling aus Schlachtabfällen, Herstellung von Knochenkohle und deren Einsatz als Dünger ist ein vielversprechender Ansatz zum Schließen von Nährstoffkreisläufen, jedoch ist die Düngewirkung der Knochenkohle noch unklar. Deshalb wurden zwei Knochenkohlen (Knochenkohle (BC) und Knochenkohle^{plus} (BC^{plus}; schwefelangereicherte BC)) im Vergleich zu Triplesuperphosphat (TSP) in einem mehrjährigen Gefäßversuch mit Mais als stark P-abhängiger Fruchtart getestet. Die untersuchten Düngemittel beeinflussten sowohl die Trockenmasse als auch die P-Konzentration von Mais in der Reihenfolge BC^{plus}, TSP > BC. Die P-Aufnahme von Mais in

der TSP-Variante erreichte im ersten Versuchsjahr 38 % des applizierten P und nahm in den Folgejahren stetig ab. Die P-Aufnahme in der BC^{plus}-Variante blieb dagegen während der Versuchsdauer relativ konstant. Daraus folgt, dass der Recycling-P-Dünger BC^{plus} eine ausreichende P-Verfügbarkeit für Nutzpflanzen langfristig aufrechterhalten kann.

Stichwörter

Knochenkohle, Phosphor, Phosphorrecycling, Pflanzenernährung

Introduction

Phosphorus (P) is essential for all living organisms. To ensure adequate P supply to arable crops, P is mainly applied as mineral fertilizer. However, geological deposits of rock phosphate for the production of mineral P-fertilizer are limited (Cordell et al., 2009; Dawson & Hilton, 2011; Heckenmüller et al., 2014) and are often contaminated with toxic heavy metals (Attallah et al., 2019). Furthermore, closing nutrient cycles is increasingly of interest from the ecological and economical perspective and has been defined as one of the elements forming the European Green Deal transforming the EU's economy for a sustainable future (Montanarella & Panagos, 2021). Therefore, alternative P fertilizers are becoming increasingly important in agricultural production (Simpson et al., 2011; Roberts & Johnston, 2015). One opportunity to conserve natural P reserves is the wider use of P-recycling products, like e.g. bone char. This is a biochar produced by technical pyrolysis of animal bones derived from slaughterhouse waste (Leinweber et al., 2019). Bone char is not only rich in minerals such as P, calcium (Ca) and magnesium (Mg) but also free of heavy metals and pharmaceuticals (Siebers et al., 2013). The solubility of P and thereby the plant availability from bone char was found to be rather low in initial studies (Siebers et al., 2012;



(c) The authors 2022

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>).

Siebers et al., 2014). However, enriching bone char with reduced sulfur (S)-compounds increased the P-solubility in laboratory experiments (e.g., Morshedizad et al., 2016; Zimmer et al., 2018). Furthermore, the efficacy of bone char has been tested in field and mostly short-term pot experiments (Siebers et al., 2012; Siebers et al., 2014; Panten & Leinweber, 2020) but the experimental basis for bone char applications as P fertilizer is rather small. Since the P release from bone char is slower than from commonly used mineral fertilizer (Warren et al., 2009; Siebers et al., 2013; Morshedizad et al., 2016) we expected rather longer-term effects on the P supply and crop yields. To test this hypothesis and generally improve the experimental background for recommending bone char, a perennial pot experiment (six growing seasons) was set up. A soilless system with gravel and sand substrate was chosen to avoid overlying effects of soil P and to allow the manual separation of bone char particles in the experimental course for further studies. Because of this substrate, it was not expected that phosphorus needs to be taken into account to differentiate between phosphorus available from the substrate and from the fertilizer. Therefore, it was decided to use as positive control the highly water-soluble triple superphosphate instead of a negative zero P control for the experiment. Maize was chosen as a very P-requiring test crop (Zicker et al., 2018; Zicker et al., 2020) and two different bone chars were tested in comparison with the highly water-soluble mineral P fertilizer triple superphosphate (TSP). In detail, we aimed at answering these questions: (1) Do the tested bone chars affect the P supply to maize? (2) How do bone chars perform in comparison with TSP? (3) How does the P supply vary over time?

Materials and methods

Experimental setup

The pot experiment was designed as a six-year experiment (2016–2021) and it was conducted in the open part of an unheated greenhouse for the first two years. Because of heavy precipitation in 2017, the pots were moved into the covered part of the unheated greenhouse, and subsequently watered with deionized water on demand. The 300 l-plastic containers (0.68 m diameter at top) were filled from the bottom to the top as follows: 18 cm stones (16–32 mm diameter) as a drainage layer, a fleece to prevent substrate material from above to shift into the drainage layer, 11 cm coarse gravel, 4 cm fine gravel and 44 cm sand. This sand had the texture 1.8% (> 2 mm), 48.0% (2 – 1 mm), 7.9% (1 – 0.63 mm), 33.9% (0.63 – 0.2 mm), and 2.4% (< 0.2 mm). To keep a closed nutrient cycle surplus rain- and irrigation water was collected through a drainage outlet at the bottom of the containers and used for subsequent irrigation. Maize (varieties DS 0331 (year 1–3), KWS Keltikus (year 4), and Limagrain LG 31.227 (year 5–6)) seeds, treated with MaximXL (Syngenta), was used as test crop. Ten seeds were sown per pot and the number of plants was reduced to seven after germination.

Treatments were replicated four times, and P fertilizers were applied as a stock fertilization for six years to an equivalent of 600 kg P ha⁻¹ (21.6 g P pot⁻¹). We assumed an annual P uptake

of 20 kg P ha⁻¹ and an agronomic efficiency of 20%. Treatments were (1) bone char (BC) pyrolysed at about 800°C, (2) surface-modified bone char (BC^{plus}) with sulfur compounds from biogas streams (patent DE212012000046U1) adding 54.5 g S pot⁻¹, and (3) TSP. Fertilizers were used as provided with 95–100% of the particles bigger than 1 mm and mixed into the top 15 cm of the containers. Total concentration of the fertilizer elements was determined by extraction with *aqua regia* (VDLUFA, 2000). The concentrations of P (177.4 nm), Ca (318.1 nm), K (766.4 nm), Mg (279.0 nm), and Na (589.5 nm) were measured by Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectrometry (ICP-OES, icap 6000, Thermo Fisher, Cambridge, United Kingdom; wavelength given in parentheses). Trace element analyses showed that BC and BC^{plus} had much lower concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Ni, and U than TSP fertilizer (Panten & Leinweber, 2020). Further detailed information, such as P- and S-speciation in the applied BCs, was published by Zimmer et al. (2018). All other nutrients were applied equally and annually to all pots in amounts of 21 g N pot⁻¹ (divided in three doses), 6 g Ca pot⁻¹ (before seeding), 10 g of K pot⁻¹ (divided in two doses), 2 g S pot⁻¹ (divided in two doses), 2 g Mg pot⁻¹ (divided in two doses), and 8, 8, 1.6, 4, 0.8, 80 mg pot⁻¹ of Zn, Mn, Cu, B, Mo and Fe, respectively (divided in two doses). The first dose of these nutrient elements was applied at seeding (N, K, S, Mg, Zn, Mn, Cu, B, Mo, and Fe), the second dose directly after the cutting of the maize plants at BBCH 32 (N, K, S, Mg, Zn, Mn, Cu, B, Mo, and Fe), and finally a third dose of N was applied during flowering.

Sampling and analyses

Each year two samplings were performed in six vegetation periods (2016 – 2021): at BBCH stage 32, two plants were taken for intermediate harvest and the remaining five plants were taken for harvest at BBCH 85. To determine plant dry matter yield the samples were dried at 60°C until constant weight in a ventilated oven. Dried samples were ground ≤ 0.5 mm with an ultracentrifugal mill (Retsch ZM 100 or 200, 42781 Haan, Germany). About 0.5 g of plant material was digested with 6 ml nitric acid and 1.5 ml hydrogen peroxide in a microwave (CEM MARS, Mettews, USA). Total element concentrations were determined by ICP-OES (icap 6000, Thermo Fisher, Cambridge, United Kingdom): P (177.4 nm), K (766.4 nm), Ca (317.9 nm), Mg (280.2 nm), Mn (257.6 nm) and Zn (218.3 nm). Contents of total carbon, nitrogen and sulfur (C, N, S) were determined in a 10 mg subsample using the CNS-analyser (Vario EL cube, Elementar Analysensysteme GmbH, 63505 Langenselbold, Germany).

Data and statistical evaluation

Data were tested for normal distribution using the Shapiro-Wilk test. In case of normal distribution, significance of P fertilizers was tested using one-way analysis of variance (ANOVA, Tukey test). Non-normal distributed data were analysed with the Kruskal-Wallis-test. Differences were considered significant at $p \leq 0.05$. Statistical analyses were performed with R version 3.6.1 (R Core Team, 2019) and R package agricolae version 1.3-1 (De Mendiburu, 2016).

Results

There were significant differences in dry matter of maize, both in whole plants at BBCH 32 and in straw and grain yields at BBCH 85 in six experimental years (2016 – 2021) (Tables 1 and 2). The fertilizer type affected the dry matter yields and often followed the order BC^{plus}, TSP > BC. The yield component “thousand grain weight” of maize at BBCH 85 was lowest in the BC-treatments, while weights were similar in the BC^{plus} and TSP treatments (Tables 1 and 2).

The P concentrations showed the order BC^{plus}, TSP > BC at most of the sampling dates (Tables 1 and 2). The concentrations of other nutrient elements remained stable during the duration of the experiment (Table S1).

The total P uptake of maize, cumulated for each experimental year, ranged from 0.05 g per pot (2021, BC) to 8.67 g per pot (2016, TSP) (Fig. 1). The BC treatments had lowest P uptake in each experimental year. The TSP and the BC^{plus} treatments

showed opposite developments for the P uptake along the experimental years. While TSP application caused a higher P uptake than BC^{plus} in 2016 it was the other way around since 2019. The values were similar for both treatments in 2017 and 2018.

Discussion

The highest yields in the first experimental year 2016, following the order TSP > BC^{plus} > BC (Table 1), indicate that P supply was a yield-limiting factor, which is not surprising for the P-poor substrate. The general order, BC^{plus}, TSP > BC in the following samplings (Tables 1 and 2) confirms findings in a pot experiment conducted by Zimmer et al. (2019), in which TSP and BC^{plus} caused insignificantly higher ryegrass yields compared to BC or zero P. Different from this, Panten & Leinweber (2020) did not report P fertilizer effects on grain yield in a five-year field experiment. In that study, BC and BC^{plus} reached 97

Table 1. Mean yield components (dry matter (g) and thousand grain weight (g)) and phosphorus concentration of maize in a pot experiment at BBCH 32 and 85 in 2016 – 2018 as affected by type of P-fertilizer (TSP (triple superphosphate), BC (bone char), BC^{plus} (sulfur enriched bone char). Low letters indicate significant differences (standard deviation in brackets, $p < 0.05$, Kruskal-Wallis test or Tukey test in dependence of normal distribution of data).

year	BBCH maize	harvest	fertilizer type	dry matter (g)		thousand grain weight (g)		P (g kg ⁻¹)	
2016	32	whole plant	TSP	11.68 (1.23)	a	-	-	11.14 (0.71)	a
			BC	1.17 (0.61)	c	-	-	1.32 (0.29)	c
			BC ^{plus}	4.57 (1.52)	b	-	-	4.26 (1.44)	b
	85	straw	TSP	933.36 (175.57)	a	-	-	3.76 (0.30)	a
			BC	258.20 (153.45)	b	-	-	1.33 (0.32)	c
			BC ^{plus}	885.18 (42.40)	a	-	-	0.79 (0.22)	b
		grain	TSP	1090.29 (510.09)	a	221.87 (27.61)	a	3.09 (0.07)	a
			BC	227.79 (240.90)	b	162.04 (18.18)	b	2.96 (0.55)	a
			BC ^{plus}	999.85 (327.53)	a	233.91 (10.20)	a	2.81 (0.24)	a
2017	32	whole plant	TSP	18.76 (4.61)	a	-	-	4.59 (1.34)	a
			BC	6.73 (2.50)	b	-	-	1.80 (0.08)	b
			BC ^{plus}	14.09 (5.93)	ab	-	-	4.08 (0.31)	a
	85	straw	TSP	636.65 (52.57)	a	-	-	1.64 (0.88)	a
			BC	461.57 (39.19)	b	-	-	0.48 (0.07)	b
			BC ^{plus}	679.77 (35.18)	a	-	-	1.45 (0.23)	ab
		grain	TSP	673.04 (33.03)	a	233.68 (17.22)	a	2.75 (0.22)	a
			BC	276.27 (56.04)	b	186.53 (16.53)	b	1.88 (0.53)	a
			BC ^{plus}	679.77 (35.18)	a	222.96 (7.48)	a	2.57 (0.18)	a
2018	32	whole plant	TSP	21.10 (4.73)	ab	-	-	2.62 (0.21)	a
			BC	11.44 (5.37)	b	-	-	2.09 (0.38)	b
			BC ^{plus}	23.22 (6.79)	a	-	-	2.88 (0.05)	a
	85	straw	TSP	584.88 (59.62)	a	-	-	0.89 (0.13)	ab
			BC	370.43 (160.95)	a	-	-	0.65 (0.16)	b
			BC ^{plus}	623.47 (57.53)	a	-	-	1.03 (0.11)	a
		grain	TSP	804.93 (81.72)	a	320.47 (18.34)	a	2.45 (0.23)	a
			BC	468.25 (295.61)	a	277.44 (32.95)	a	1.89 (0.13)	b
			BC ^{plus}	884.39 (51.44)	a	315.33 (15.38)	a	2.81 (0.18)	a

Table 2. Mean yield components (dry matter (g) and thousand grain weight (g)) and phosphorus concentration of maize in a pot experiment at BBCH 32 and 85 in 2019 – 2021 as affected by type of P-fertilizer (TSP (triple superphosphate), BC (bone char), BC^{plus} (sulfur enriched bone char). Low letters indicate significant differences (standard deviation in brackets, $p < 0.05$, Kruskal-Wallis test or Tukey test in dependence of normal distribution of data).

year	BBCH maize	harvest	fertilizer type	dry matter (g)		thousand grain weight (g)		P (g kg ⁻¹)	
2019	32	whole plant	TSP	35.40 (9.30)	a	-	-	2.06 (0.25)	a
			BC	9.60 (9.61)	b	-	-	1.52 (0.16)	b
			BC ^{plus}	33.37 (5.25)	a	-	-	2.25 (0.15)	a
	85	straw	TSP	698.18 (84.78)	a	-	-	0.84 (0.25)	ab
			BC	257.97 (225.55)	b	-	-	0.56 (0.08)	b
			BC ^{plus}	782.35 (62.72)	a	-	-	1.15 (0.12)	a
		grain	TSP	366.63 (44.65)	a	285.59 (9.16)	a	2.30 (0.11)	b
			BC	131.15 (105.51)	b	164.43 (85.89)	b	2.21 (0.47)	b
			BC ^{plus}	278.98 (65.06)	ab	298.82 (54.20)	a	3.01 (0.24)	a
2020	32	whole plant	TSP	19.10 (5.55)	a	-	-	2.31 (0.13)	b
			BC	3.29 (0.86)	b	-	-	1.35 (0.40)	c
			BC ^{plus}	24.23 (7.63)	a	-	-	2.58 (0.07)	a
	85	straw	TSP	506.20 (47.72)	a	-	-	0.46 (0.13)	a
			BC	158.40 (102.70)	b	-	-	0.74 (0.21)	a
			BC ^{plus}	617.39 (46.98)	a	-	-	0.51 (0.17)	a
		grain	TSP	641.69 (35.60)	a	264.40 (10.55)	b	1.67 (0.24)	a
			BC	155.86 (139.64)	b	141.13 (64.58)	c	2.29 (0.78)	a
			BC ^{plus}	617.39 (46.98)	a	284.93 (8.04)	a	2.49 (0.28)	a
2021	32	whole plant	TSP	37.55 (5.33)	a	-	-	2.04 (0.13)	b
			BC	3.20 (0.89)	b	-	-	1.67 (0.18)	b
			BC ^{plus}	34.21 (9.16)	a	-	-	2.49 (0.26)	a
	85	straw	TSP	406.96 (65.27)	b	-	-	0.81 (0.07)	b
			BC	113.24 (143.59)	c	-	-	1.00 (0.05)	a
			BC ^{plus}	504.45 (36.33)	a	-	-	0.88 (0.04)	b
		grain	TSP	537.84 (48.77)	a	257.19 (18.40)	a	1.54 (0.10)	a
			BC	47.13 (76.51)	b	108.60 (44.88)	b	1.85 (0.24)	a
			BC ^{plus}	556.39 (115.96)	a	245.94 (31.97)	a	1.70 (0.21)	a

and 95% of the TSP induced yield, respectively. The similarity in yield responses in pot experiments (Table 1 and Zimmer et al. (2019)) but difference to the outcome of a field experiment (Panten & Leinweber, 2020) are explained by the different conditions, especially rooting zone, exposure to weather conditions and the crops grown.

The concentrations of major nutrient elements in maize (Tables 1 and 2, Supplemental Table 1) were in agreement with results by e.g. Ferreira et al. (2014) and Özpınar & Özpınar (2009). The P concentrations, generally similar in the BC^{plus} and the TSP but above the BC treatments (Tables 1 and 2), are explained by the interplay between P-solubility, P uptake and biomass formation. Similarly, the concentrations of other major nutrient elements reflect the intended non-shortage achieved by the annual fertilizer application. The general low P-solubility of BC as reported by, e.g., Warren et al. (2009), Robinson et al. (2018) and Zimmer et al. (2018) is the best explanation for the low P concentration (Tables 1 and 2), P

uptake (Fig. 1) and yield of maize (Tables 1 and 2) in the BC treatments of this experiment.

The temporal decrease in yearly P uptake in the TSP treatments and relative constancy in the BC^{plus} treatments (Fig. 1) agrees with Zimmer et al. (2019) who also recorded increased P uptake in the BC^{plus} and TSP treatments in comparison to BC. The proportions of total applied P, taken up by plants over the whole experimental duration, increased in the order BC (17.8%) < BC^{plus} (66.2%) < TSP (82.3%). This large exploitation of added P, especially in the TSP treatment, is explained by the fact that the substrate provided no P at all. In analogy as discussed above for the yields, the field experiments by Panten & Leinweber (2020) did not reveal BC^{plus} induced effects on P uptake in course of the crop rotation. This disagreement between pot and field experiment results can be explained by the different crops grown that have species-specific P mobilization strategies (e.g. Palomo et al., 2006; Mat Hassan et al., 2012; Maltais-Landry et al., 2014), nutrient uptake and

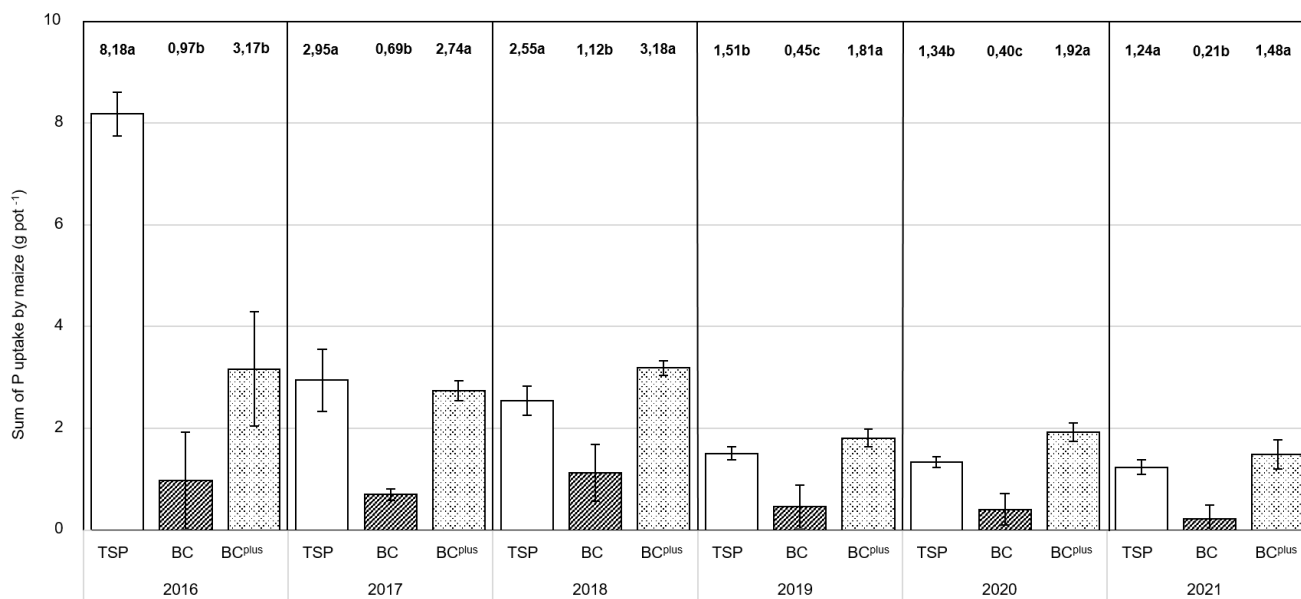


Figure 1. Mean cumulated P uptake (sum of harvests at BBCH 32 [whole plant] and 85 [straw + grain]) and standard deviations (g per pot) of maize in a pot experiment in 2016 – 2021 as affected by type of P-fertilizer (TSP: triple superphosphate), BC: bone char, BC^{plus}: sulfur enriched bone char). Low letters indicate significant differences ($p < 0.05$, Kruskal-Wallis test or Tukey test in dependence of normal distribution of data).

biomass formation in addition to the above discussed effects of growth conditions.

The higher P concentrations and P uptake in the TSP and BC^{plus} treatments compared to BC (Fig. 1), that agreed with higher yields (Tables 1 and 2), are first of all proving the P demand of the maize crops that was not met by the experimental substrate. The high P uptake in the TSP treatment plausibly is caused by the P solubility in substrate, as previously explained by Zimmer et al. (2019). The decreased P uptake in the TSP treatment from year to year probably originates from the very high P uptake of 38% of the applied P in the first experimental year that likely resulted in a comparably low level of internal P cycling. Because of the soilless substrate, no P except the applied P at the beginning of the experiment became plant available. Additionally, P was applied intentionally only at the beginning of the experiment, even though it is well known that in soils with a good P status yield gains also can be achieved by freshly applied P (Buczko et al., 2018). The increased P uptake in BC^{plus} with duration of the experiment probably is due to the so-called “*in situ* digestion effect” (Fan et al., 2012) from the oxidizing S-compounds of BC^{plus}. Biological oxidation of S even in the non-sterile gravel substrate by active S-oxidizing bacteria (Chaudhary et al., 2019), formation of H₂SO₄ and the resulting pH decrease in soil may have stimulated the destruction of bioapatite and release of P from the BC^{plus} particles. This effect became more important with longer duration of a P experiment in the laboratory (Morshedizad et al., 2016).

Conclusions

The perennial pot experiment conducted in the present study was useful to assess the effects of different P-fertilizers (triple superphosphate (TSP), bone char (BC) and sulfur-enriched

bone char (BC^{plus})) on yield parameters, P concentration and P uptake of maize.

- (1) Since sulfur-enriched BC^{plus} increased yield and P supply to maize in comparison to BC the “*in situ* digestion” by added S is necessary to make bone char a potential P sources in a closed loop cycling economy.
- (2) From the two BCs under study the BC^{plus} showed similar P supply to maize as TSP, except in the first experimental year. On the contrary, untreated BC supplied minor and fluctuating amounts of P to maize. Therefore, this material cannot be recommended as fertilizer to P demanding crops.
- (3) The decreased P-supply to maize in the TSP treatment and the constant P-supply in the BC^{plus} treatment conclusively demonstrates that BC^{plus} can be considered as a moderately slow-release P fertilizer. Therefore, a P recycling economy essentially must involve a low-cost, dissolution supporting S-enrichment to BCs to produce a long-term P fertilizer.
- (4) Forthcoming studies are directed to better understand the dissolution kinetics and microbial processes at the individual fertilizer particle scale, and the possible duration of stock fertilization for different crop rotations.

Acknowledgements

The authors would like to thank two anonymous reviewers for their valued comments on an earlier version of this manuscript. Thanks also to Gudrun Gebensleben, Marina Kotschnew, Frank Przebierala (Julius Kühn-Institute, Braunschweig), and Elena Heilmann and Britta Balz (Soil Science, University of Rostock) for technical support. This project was funded in the frame of the Bioeconomy 2030 initiative of the Federal Ministry for Education and Research (BMBF; call: BonaRes; project

InnoSoilPhos: Nos. 031B0509A, 031B1061A [University of Rostock], and 031B0509E, 031B1061E [Julius-Kühn-Institute Braunschweig]), research data will be made available on the BonaRes Data Portal.

Conflicts of interest

The authors declare that they do not have any conflicts of interest.

References

- Attallah, M.F., S.S. Metwally, S.I. Moussa, M.A. Soliman, 2019:** Environmental impact assessment of phosphate fertilizers and phosphogypsum waste: Elemental and radiological effects. *Microchemical Journal* **146**, 789–797, DOI: 10.1016/j.microc.2019.02.001.
- Buczko, U., M. van Laak, B. Eichler-Löbermann, W. Gans, I. Merbach, K. Panten, E. Peiter, T. Reitz, H. Spiegel, S. von Tucher, 2018:** Re-evaluation of the yield response by phosphorus fertilization based on meta-analyses of long-term field experiments. *Ambio* **47** (1), 50–61, DOI: 10.1007/s13280-017-0971-1.
- Chaudhary, S., Tanvi, R. Dhanker, S. Goyal, 2019:** Different Applications of Sulphur Oxidizing Bacteria: A Review, *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences* **8** (11), 770–778, DOI: 10.20546/ijcmas.2019.811.091.
- Cordell, D., J.-O. Drangert, S. White, 2009:** The story of phosphorus: Global food security and food for thought. *Global Environmental Change* **19** (2), 292–305, DOI: 10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009.
- Dawson, C.J., J. Hilton, 2011:** Fertiliser availability in a resource-limited world: production and recycling of nitrogen and phosphorus. *Food Policy* **36**, 14–22, DOI: 10.1016/j.foodpol.2010.11.012.
- De Mendiburu, F., 2016:** agricolae: Statistical Procedures for Agricultural Research. R package version 1.3-1.
- Fan, X., E. Schnug, S. Haneklaus, 2012:** In Situ digestion of rock phosphates to mobilize plant-available phosphate for organic farming. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* **43** (17), DOI: 10.1080/00103624.2012.708073.
- Ferreira, C.F., A.C.V. Motta, J.Z. Barbosa, N.Z. dos Santos, S. Prior, J. Gabardo, 2014:** Maize (*Zea mays* L) cultivars nutrients concentration in leaves and stalks, *Maydica* **59** (1), 65–71.
- Heckenmüller, M., D. Narita, G. Klepper, 2014:** Global availability of phosphorus and its implications for global food supply: An economic overview. *EconStor*, Kiel Working Papers **1897**, Kiel Institute for the World Economy, Germany, URL: <http://hdl.handle.net/10419/90630>.
- Leinweber, P., P. Hagemann, L. Kebelmann, K. Kebelmann, M. Morshedizad, 2019:** Bone char as a novel phosphorus fertilizer. In: Othake, H., S. Tsuneda (eds.). *Phosphorus Recovery and Recycling*. Springer Nature Singapore Pte Ltd., p. 419–432, DOI: 10.1007/978-981-10-8031-9_29.
- Maltais-Landry, G., K. Scow, E. Brennan, 2014:** Soil phosphorus mobilization in the rhizosphere of cover crops has little effect on phosphorus cycling in California agricultural soils, *Soil Biology and Biochemistry* **78**, 255–262, DOI: 10.1016/j.soilbio.2014.08.013.
- Mat Hassan, H., P. Marschner, A. Mc Neill, 2012:** Growth, P uptake in grain legumes and changes in rhizosphere soil P pools. *Biology and Fertility of Soils* **48**, 151–159.
- Montanarella, L., P. Panagos, 2021:** The relevance of sustainable soil management within the European Green Deal, *Land Use Policy* **100** (104950), DOI: 10.1016/j.landusepol.2020.104950.
- Morshedizad, M., D. Zimmer, P. Leinweber, 2016:** Effect of bonechars on phosphorus-cadmium-interactions as evaluated by three extraction procedures, *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **179**, 388–398, DOI: 10.1002/jpln.201500604, 2016.
- Özpinar, S., A. Özpinar, 2009:** Nutrient Concentration and Distribution in Maize as Affected by different Tillage Systems in the Canakkale Province, Turkey, *Journal of Agricultural Machinery Science* **5** (3), 365–368.
- Palomo, L., N. Claassen, D.L. Jones, 2006:** Differential mobilization of P in the maize rhizosphere by citric acid and potassium citrate, *Soil Biology and Biochemistry* **38**, 683–692, DOI: 10.1016/j.soilbio.2005.06.019.
- Panten, K., P. Leinweber, 2020:** Agronomic evaluation of bone char as phosphorus fertiliser after five years of consecutive application, *Journal für Kulturpflanzen* **72**, DOI: 10.5073/JfK.2020.12.02.
- R Core Team, 2019:** R: A language and environment for statistical computing, version 3.6.1, R-Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.
- Roberts, T.L., A.E. Johnston, 2015:** Phosphorus use efficiency and management in agriculture. *Resources, Conservation and Recycling* **105**, 275–281. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.09.013.
- Robinson, J.S., K. Baumann, Y. Hu, P. Hagemann, L. Kebelmann, P. Leinweber, 2018:** Phosphorus transformation in plant-based and bio-waste material induced by pyrolysis, *Ambio*, **47**, 73–82, DOI: 10.1007/s13280-017-0990-y.
- Siebers, N., F. Godlinski, P. Leinweber, 2012:** The phosphorus fertilizer value of bone char for potatoes, wheat and onions: first results. *Landbauforschung* **62**, 59–64.
- Siebers, N., J. Kruse, P. Leinweber, 2013:** Speciation of phosphorus and cadmium in a contaminated soil amended with bone char: sequential fractionations and XANES spectroscopy. *Water, Air & Soil Pollution* **224**, 1564–1576, DOI: 10.1007/s11270-013-1564-7.
- Siebers, N., F. Godlinski, P. Leinweber, 2014:** Bone char as phosphorus fertilizer involved in cadmium immobilization in lettuce, wheat, and potato cropping. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **177** (1), 75–83, DOI: 10.1002/jpln.201300113.

- Simpson, R.J., A. Oberson, R.A. Culvenor, M.H. Ryan, E.J. Veneklaas, H. Lambers, J.P. Lynch, P.R. Ryan, E. Delhaize, F.A. Smith, S.E. Smith, P.R. Harvey, A.E. Richardson, 2011:** Strategies and agronomic interventions to improve the phosphorus-use efficiency of farming systems. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **349**, 89-120, DOI: 10.1007/s11104-011-0880-1.
- VDLUFA, 2000:** Methodenbuch II.2 Die Untersuchung von Sekundärrohstoffdüngern, Kultursubstraten und Bodenhilfsstoffen: Bestimmung des Gesamthosphors: Aufschluss mit Königswasser, 3.2.1.3 (3.2.1.3).
- Warren, G. P., J. S. Robinson, E. Someus, 2009:** Dissolution of phosphorus from animal bone char in 12 soils, *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **84**, 167–178, DOI: 10.1007/s10705-008-9235-6.
- Zicker, T., S. v. Tucher, M. Kavka, B. Eichler-Löbermann, 2018:** Soil test phosphorus as affected by phosphorus budgets in two long-term field experiments in Germany, *Field Crops Research* **218**, 158-170, DOI: 10.1016/j.fcr.2018.01.008.
- Zicker, T., M. Kavka, S. Bachmann-Pfabe, B. Eichler-Löbermann, 2020:** Long-term phosphorus supply with undigested and digested slurries and their agronomic effects under field conditions, *Biomass and Bioenergy* **139**, 105665, DOI: 10.1016/j.biombioe.2020.105665.
- Zimmer, D., J. Kruse, N. Siebers, K. Panten, C. Oelschläger, M. Warkentin, Y. Hu, L. Zuin, P. Leinweber, 2018:** Bone char vs. S-enriched bone char: Multi-method characterization of bone chars and their transformation in soil. *Science of The Total Environment* **643**, 145–156, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2018.06.076.
- Zimmer, D., K. Panten, M. Frank, A. Springer, P. Leinweber, 2019:** Sulfur-enriched bone char as alternative P fertilizer: spectroscopic, wet chemical, and yield response evaluation. *Agriculture* **9** (1), 21, DOI: 10.3390/agriculture9010021.

Supplementary information

Table S1. Nutrient concentrations of maize in a pot experiment at BBCH 32 and 85 in 2016–2021 as affected by type of P-fertilizer (TSP (triple superphosphate), BC (bone char), BC^{plus} (sulfur enriched bone char)). Low letters indicate significant differences (standard deviation in brackets, $p < 0.05$, Kruskal-Wallis test or Tukey test in dependence of normal distribution of data).

year	BBCH maize	harvest	fertilizer type	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
2016	32	whole plant	TSP	45.40 (3.20)	7.32 (0.34)	3.24 (0.02)	41.67 (2.55)	402.63 (4.85)	3.33 (0.52)
			BC	45.65 (2.79)	8.62 (0.35)	2.54 (0.31)	27.52 (4.04)	410.30 (5.26)	2.52 (0.20)
			BC ^{plus}	50.16 (1.18)	8.79 (0.46)	2.72 (0.30)	42.91 (4.27)	403.45 (3.82)	3.18 (0.37)
	85	straw	TSP	15.87 (0.09)	3.56 (0.38)	1.10 (0.12)	3.74 (0.75)	426.00 (1.84)	1.26 (0.19)
			BC	20.48 (2.11)	3.04 (1.18)	1.51 (0.42)	13.14 (1.33)	419.35 (2.66)	1.60 (0.06)
			BC ^{plus}	17.11 (1.06)	3.32 (1.15)	0.88 (0.10)	4.55 (1.31)	430.75 (2.34)	1.31 (0.11)
2017	32	whole plant	TSP	45.58 (2.36)	5.70 (0.52)	3.85 (0.52)	28.64 (1.89)	420.55 (5.70)	2.35 (0.19)
			BC	57.92 (1.05)	5.35 (0.47)	2.86 (0.30)	29.21 (0.96)	414.40 (1.85)	2.06 (0.08)
			BC ^{plus}	46.20 (2.50)	5.68 (0.40)	3.48 (0.44)	29.56 (1.65)	421.63 (3.11)	2.62 (0.14)
	85	straw	TSP	13.73 (0.97)	4.36 (0.72)	1.81 (0.21)	5.84 (0.81)	440.15 (4.11)	1.71 (0.13)
			BC	13.95 (2.39)	2.79 (0.90)	1.74 (0.46)	7.97 (0.60)	436.33 (2.02)	1.50 (0.14)
			BC ^{plus}	13.16 (0.66)	3.98 (0.61)	1.42 (0.20)	5.42 (0.31)	442.15 (3.86)	1.71 (0.13)
85	grain	TSP	4.54 (0.35)	*	1.00 (0.04)	8.38 (0.24)	435.40 (1.25)	1.38 (0.09)	
		BC	4.54 (0.18)	*	1.00 (0.11)	13.65 (2.39)	435.33 (3.09)	1.50 (0.14)	
		BC ^{plus}	4.51 (0.39)	*	0.93 (0.06)	8.15 (0.30)	434.38 (1.89)	1.32 (0.11)	

* below the detection limit

year	BBCH maize	harvest	fertilizer type	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)
2018	32	whole plant	TSP	41.29 (7.29)	7.60 (0.56)	4.31 (0.67)	33.48 (1.36)	428.35 (21.84)	2.48 (0.05)
			BC	61.46 (0.82)	6.38 (1.60)	2.61 (0.37)	34.98 (1.78)	410.90 (4.51)	2.40 (0.14)
			BC ^{plus}	46.59 (5.22)	7.46 (0.65)	3.40 (0.04)	34.14 (1.15)	414.80 (2.28)	2.57 (0.04)
	85	straw	TSP	21.31 (1.60)	6.29 (0.70)	2.14 (0.26)	10.85 (0.97)	432.03 (2.22)	1.75 (0.42)
			BC	29.54 (6.14)	6.74 (1.72)	1.94 (0.28)	15.19 (4.19)	419.83 (12.53)	1.65 (0.36)
			BC ^{plus}	20.38 (1.59)	6.45 (0.54)	1.73 (0.06)	10.38 (1.64)	431.58 (2.77)	2.17 (0.13)
		grain	TSP	3.89 (0.31)	0.12 (0.01)	0.97 (0.04)	14.96 (0.37)	440.00 (1.37)	1.50 (0.15)
			BC	3.46 (0.16)	0.12 (0.02)	0.89 (0.08)	16.35 (2.33)	439.10 (2.27)	1.52 (0.18)
			BC ^{plus}	4.19 (0.06)	0.11 (0.01)	1.04 (0.03)	15.04 (0.42)	439.50 (1.09)	1.58 (0.21)
2019	32	whole plant	TSP	35.27 (3.16)	6.11 (0.49)	4.45 (0.45)	28.31 (1.58)	417.05 (2.27)	2.25 (0.64)
			BC	52.08 (3.70)	6.69 (1.96)	2.16 (0.21)	32.18 (3.65)	407.13 (4.04)	2.14 (0.18)
			BC ^{plus}	37.72 (3.92)	6.37 (0.45)	4.34 (0.34)	27.72 (1.43)	412.55 (3.01)	1.96 (0.14)
	85	straw	TSP	11.55 (0.68)	4.08 (0.21)	2.19 (0.17)	8.37 (1.65)	448.53 (2.44)	1.79 (0.60)
			BC	22.89 (5.02)	6.54 (2.12)	1.78 (0.32)	13.61 (3.90)	433.78 (10.55)	1.56 (0.39)
			BC ^{plus}	11.05 (1.01)	3.92 (0.16)	2.01 (0.07)	8.79 (1.00)	444.33 (1.66)	1.61 (0.13)
		grain	TSP	3.86 (0.14)	0.16 (0.01)	1.09 (0.09)	16.74 (1.38)	438.98 (1.38)	1.43 (0.04)
			BC	5.40 (1.19)	0.19 (0.02)	1.14 (0.20)	21.34 (2.41)	441.00 (0.76)	1.44 (0.01)
			BC ^{plus}	4.21 (0.18)	0.17 (0.01)	1.31 (0.13)	17.84 (2.80)	438.98 (0.77)	1.55 (0.09)

year	BBCH maize	harvest	fertilizer type	K (g kg ⁻¹)	Ca (g kg ⁻¹)	Mg (g kg ⁻¹)	N (g kg ⁻¹)	C (g kg ⁻¹)	S (g kg ⁻¹)	
2020	32	whole plant	TSP	45.91 (12.34)	6.21 (0.25)	5.06 (0.41)	30.86 (2.28)	407.10 (13.63)	2.27 (0.78)	a
			BC	44.56 (7.54)	8.66 (1.87)	3.25 (0.04)	31.61 (1.74)	404.75 (2.90)	1.64 (0.20)	b
			BC ^{plus}	41.77 (6.77)	5.89 (0.73)	4.72 (0.52)	30.02 (3.27)	410.63 (4.39)	1.85 (0.03)	ab
	85	straw	TSP	14.56 (3.04)	4.02 (1.07)	2.70 (0.57)	5.67 (1.71)	430.00 (4.34)	1.23 (0.62)	a
			BC	25.36 (2.51)	7.57 (1.91)	2.23 (0.09)	18.50 (5.71)	407.93 (8.60)	1.29 (0.56)	a
			BC ^{plus}	12.25 (1.20)	4.10 (0.14)	2.68 (0.21)	5.57 (1.38)	429.88 (3.90)	1.21 (0.51)	a
		grain	TSP	3.18 (0.26)	0.13(0)	0.96 (0.16)	15.59 (1.27)	438.20 (2.49)	1.26 (0.11)	a
			BC	5.54 (2.41)	0.17 (0.06)	1.16 (0.24)	20.61 (6.26)	430.33 (7.25)	1.37 (0.27)	a
			BC ^{plus}	3.79 (0.37)	0.13 (0.01)	1.21 (0.11)	16.06 (0.23)	439.00 (0.83)	1.41 (0.09)	a
2021	32	whole plant	TSP	22.33 (1.75)	5.49 (0.25)	4.22 (0.19)	15.46 (1.67)	417.15 (2.33)	1.44 (0.12)	a
			BC	40.04 (3.34)	9.03 (0.67)	2.76 (0.30)	32.10 (4.37)	405.30 (4.30)	1.68 (0.27)	a
			BC ^{plus}	27.72 (5.98)	5.26 (0.55)	4.02 (0.38)	17.13 (4.13)	414.15 (1.72)	1.59 (0.11)	a
	85	straw	TSP	13.21 (1.73)	5.41 (0.27)	3.85 (0.21)	7.22 (0.61)	434.98 (1.20)	1.85 (0.51)	b
			BC	25.70 (2.74)	8.52 (1.23)	2.94 (0.15)	26.09 (6.55)	403.40 (7.72)	1.82 (0.23)	b
			BC ^{plus}	11.90 (2.25)	5.28 (0.13)	3.58 (0.25)	7.33 (0.79)	435.88 (1.24)	2.64 (0.16)	a
		grain	TSP	2.90 (0.07)	0.10(0)	0.85 (0.04)	13.93 (0.97)	432.30 (1.35)	1.68 (0.18)	a
			BC	4.71 (0.73)	0.15 (0.03)	1.05 (0.07)	25.43 (4.22)	434.03 (5.21)	2.04 (0.44)	a
			BC ^{plus}	3.16 (0.13)	0.11 (0.01)	0.83 (0.06)	13.90 (1.21)	431.48 (1.02)	1.80 (0.24)	a

I Wayan Sudika¹, I Nyoman Soemeinaboedhy²

The improvement of corn yield and fresh stover weight through two mass selection techniques in dry land

Verbesserung des Maisertrags und des Frischstrohgewichts durch zwei Massenselektions-techniken in Trockengebieten

Affiliations

¹Department of Plant Production, Agriculture Faculty, Mataram University, Indonesia.

²Department of Soil Science, Agriculture Faculty, Mataram University, Indonesia.

Correspondence

Dr. I Wayan Sudika, Department of Plant Production, Agriculture Faculty, Mataram University, Majapahit St. No. 62, Mataram 83125, West Nusa Tenggara, Indonesia, Phone: +6281917160095, email: sudikawayanms@gmail.com

Abstract

This study aims to determine the response of the yield and fresh stover weight of corn under mass selection by pollination control and base index techniques and to determine the increase in yield and fresh stover after seven mass selection cycles. Subdivided blocks were used to reduce the environmental effects during the selection cycles. A randomized complete block design was used to test the selection results. Compared to the initial population, the results showed a 43.46% increase in yield and a 79.21% increase in fresh stover weight after seven cycles of mass selection by pollination control, while the base index technique produced a 59.81% increase in yield and a 103.47% increase in fresh stover weight. Mass selection using the two techniques needs to be continued in future cycles to obtain a higher yield and fresh stover weight.

Keywords

base index selection, fresh stover, mass selection, selection progress, selection by pollination control

Zusammenfassung

In dieser Studie wurde untersucht, welchen Einfluss die Massenselektion durch Bestäubungssteuerung und Basisindex-techniken auf den Ertrag und das Frischstrohgewicht von Mais haben und wie hoch der Anstieg des Ertrags und des Frischstrohgewichts nach sieben Massenselektionszyklen ist. Es wurden unterteilte Blöcke verwendet, um die Umwelteinflüsse während der Selektionszyklen zu reduzieren. Zur Prüfung der Selektionsergebnisse wurde ein randomisierter vollständiger Blockaufbau verwendet. Verglichen mit der Ausgangspopulation zeigten die Ergebnisse nach sieben Zyklen der Massenselektion durch Bestäubungskontrolle eine 43,46%ige Steigerung des Ertrags und eine 79,21%ige Steige-

rung des Frischstrohgewichts, während die Basisindextechnik eine 59,81%ige Steigerung des Ertrags und eine 103,47%ige Steigerung des Frischstrohgewichts ergab. Die Massenselektion unter Verwendung beider Techniken muss in künftigen Zyklen fortgesetzt werden, um einen höheren Ertrag und ein höheres Frischstrohgewicht zu erzielen.

Stichwörter

Basisindex-Selektion, Frischstroh, Massenselektion, Selektionsfortschritt, Selektion durch Bestäubungskontrolle

Introduction

Mass selection is based on the selection of phenotypes exhibited by individual plants and seeds that form a population in the next cycle. Despite being known as the oldest method, it is still used continuously. The effectiveness of mass selection is dependent on the selected properties, isolation, accuracy in reducing environmental effects, and the number of selected plants. Mass selection will be effective if it is performed on characters with high heritability (Hallauer et al., 2010). Shrestha et al. (2018) stated that mass selection is effective in improving the agronomic characteristics of maize, such as the increased yield of a population after five selection cycles. A study conducted by Govind & Mani (2016) reported a significant increase in the number of cobs per crop, cob diameter, number of rows per cob, seed weight per cob, and yield after mass selection. The highest expectation of genetic heritability and progress was obtained for seed weight per ear, followed by yield and the number of ears per crop. A 23.2% increase in yield was obtained by Khamkoh et al. (2019) after two simple iterative selection cycles.

The mass selection progress can be improved by conducting selection before pollination and by crossing only the selected plants. Such selection is called mass selection by pollination



control, and this indirect selection can be used to improve yield and fresh stover weight. The success of this technique is highly dependent on the relationship between the selected trait and the improved trait (Basuki, 2005). Under pollination control, Sutresna (2010) showed an increase in yield, measured as the weight of dry seeds per plot, of 2.07 kg (44.04%) for three cycles, which was higher than the increase without pollination control (1.67 kg or 33.99%). The average increase per selection cycle was 14.04% under pollination control and 11.33% without such control.

Mass selection can be performed to improve two or more characters simultaneously if the base selection index is also used. Kar & Warsi (2006) stated that each environment has certain factors that affect the index used to improve the characters of young cobs. According to Smith (1936), the use of the primary and base index for the selection of single and combined characters (yield, seed moisture content at harvest, the presence of roots, and the presence of stems) is more efficient than the Smith-Hazel index. A base index can be used by compiling a selection index based on economic weights, but it is rather difficult to assign economic weights to each trait (Ajala, 2010). According to Walsh (2010), the heritability and genotypic correlation values can be ignored in compiling a base index. The results of Asghar & Mehdi (2010) revealed that selection using the base index was more efficient for characters that are related to quality and their interactions. Tardin et al. (2007) used the Smith-Hazel index with full-sib selection and obtained a 4.68% increase in seed dry weight, while the response of other traits was lower.

Previously, mass selection with pollination control and base index techniques was carried out for seven cycles to improve the yield and fresh stover weight of maize. The pollination control technique used plant height and the number of leaves per plant as the selected properties. The base index was obtained from the economic value of two characters, namely, the weight of dried cobs per plant and the weight of fresh stover. The selection process was carried out for seven cycles. However, the selection response per cycle under each technique was not known for yield, fresh stover weight per plant, and other characters. How large was the selection response, and how much did the two assessed characters improve? This study aimed to determine the response of yield and fresh stover weight after seven cycles of mass selection by pollination control and base index techniques and to determine the increase in both characters compared to the initial population.

Materials and methods

The method, time, and location

All experiments were carried out in dry land with pump wells. The study was carried out from July to October 2018 or in the dry season in Amor-Amor Gumantar village, North Lombok district. The dry land was ± 60 m above sea level, with 20°C – 37°C air temperature and 63% to 100% relative humidity during the experiments. The soil texture was loam sand, with

a soil pH of 6.2, 1.22% C-organic, 0.27% N-total, 83.63 ppm available P, and 0.65 meq% exchangeable K.

Corn varieties

The material used as the initial population (P_0) that underwent seven cycles of selection was produced by local cultivar assemblies (PHRKL). P_0 is the result of the hybridization of 28 local cultivars of West Nusa Tenggara with the superior varieties Gumarang, Lamuru, and Sukmaraga. The superiority of the 28 local cultivars (landraces) was due to their higher root weight and yield compared to other tested cultivars and their ability to be harvested early. The P_0 population was selected for seven cycles with two techniques (14 resulting populations), i.e., P_1 DPP, P_2 DPP, P_3 DPP, P_4 DPP, P_5 DPP, P_6 DPP, P_7 DPP, P_1 IS, P_2 IS, P_3 IS, P_4 IS, P_5 IS, P_6 IS, P_7 IS, and were compared to the superior variety Gumarang. DPP represents the pollination control technique, and IS represents the selection (base) index technique.

Experimental design and mass selection

Two mass selection techniques were applied: pollination control (DPP) and base index (IS). Both mass selection techniques were carried out for seven cycles in dry land. The subdivided block method was used to reduce the environmental effect in the selection plot and was conducted by dividing the selection plot into 100 subplots with 40 plants in each subplot. A selection pressure of 5% was performed in each plot. Mass selection by pollination control was performed by selecting taller plants with more abundant leaves before pollination and crossing these selected plants. The weight of each trait in the base index technique was obtained from the ratio of the gross income for each trait to the total gross income for the two characters. The gross income for each trait was obtained by multiplying the average yield of three subplots in the selection plot by the market price at the time of harvest. A randomized complete block design was used to test the selection results with three blocks. Irrigation was performed once every 7 days from planting to 70 days after planting. The plant spacing was 20 cm \times 60 cm, with one plant per hole. The plants were planted in 2 rows, where each row contained 25 plants in a plot size of 1.2 m \times 5 m.

Plant observations

The observed variables in this study were plant height, the number of leaves per plant, dried cob weight per plant, cob length, cob diameter, the number of fresh leaves per plant at harvest, the weight of fresh stover per plant, yield based on the dry weight of seeds per plot, and 1,000 kernel weight.

Data analysis

The observation data were analyzed using analysis of variance (ANOVA) at a 5% significance level with the least significant difference test (LSD) at a 5% significance level for the post hoc test. The increase in yield or fresh stover weight was calculated from the difference between the population at the seventh cycle and the initial population (P_7 DPP- P_0 / P_7 IS- P_0).

The mass selection response per cycle of each technique was obtained from the linear regression coefficient between the observed properties and the selection cycle described in the following linear equation (Little & Hills, 1972):

$$\hat{Y}_L = \bar{Y} + (K_2P_1) X' \quad (1)$$

where

\hat{Y}_L : linear estimator value for a population at a certain cycle of each technique,

\bar{Y} : general average value of a trait,

K_2P_1 : linear regression coefficient, which is the average selection progress per cycle,

X' = number of selection cycles.

$$K_2P_1 = \{-7(Y_{0\cdot}) - 5(Y_{1\cdot}) - 3(Y_{2\cdot}) - 1(Y_{3\cdot}) + 1(Y_{4\cdot}) + 3(Y_{5\cdot}) + 5(Y_{6\cdot}) + 7(Y_{7\cdot})\} / (168 \times r) \quad (2)$$

where

K_2P_1 : linear polynomial regression coefficient, or the selection response per cycle of each technique,

R : number of blocks,

$Y_{0\cdot}, Y_{1\cdot}, Y_{2\cdot}, Y_{3\cdot}, Y_{4\cdot}, Y_{5\cdot}, Y_{6\cdot}$, and $Y_{7\cdot}$: sums of all initial population blocks in cycles 1, 2, 3, 4, 5, 6, and 7, respectively.

To test whether the regression coefficient is linear or not, the source of treatment variance (population) based on the ANOVA is divided into two values, namely, linear and residual. This is done for each selection technique. For example, we estimate the 7th cycle yield (\hat{Y}_L); then, \bar{Y} is the average yield of three blocks from the entire population (from P_0 to the 7th cycle). X' will be 7 for the multiplier of K_2P_1 . After obtaining K_2P_1 , the equation can be simplified by replacing this value with the average from the calculation results. The model was applied to each technique.

Broad sense heritability (H^2) was obtained through the following formula (Ujianto et al., 2020):

$$H^2 = (\sigma_g^2 / \sigma_p^2) \times 100\% \quad (3)$$

where

σ_g^2 : the centrality squared value of each treatment based on ANOVA – the centrality squared value of the error,

σ_p^2 : σ_g^2 + the centrality squared value of the error.

Furthermore, the grouping of the values was based on Stansfield (1991), where 50–100 represented high, 20–50 moderate, and <20 low.

The calculation of the coefficient of genetic variation (CGV) was carried out with the following formula:

$$CGV (\%) = (\sigma_g / \mu) * 100\% \quad (4)$$

where

CGV: coefficient of genetic variation,

σ_g : standard deviation of genetic variation,

μ : general mean of a trait.

The software used in this analysis was Minitab version 18 (Minitab LLC, USA).

Results

Selection response per cycle for both mass selection techniques

The selection techniques caused changes in the population averages, and the difference was called the selection response (Table 1).

Table 1 shows that the yield (grain dry weight per plot) had a significant linear selection response, which was 47.88 g/plot for DPP and 72.80 g/plot for IS. Dry cob weight per plant had a significant linear selection response under both techniques. The fresh stover weight per plant had a significant linear relationship under mass selection, with values of 7.82 g/plant for DPP and 11.50 g/plant for IS. The response to selection of plant height and the number of leaves per plant, as well as the number of fresh leaves per plant at harvest, was also significant and linear.

The linear regression model for yield is presented in Fig. 1, and the linear regression model for fresh stover weight is presented in Fig. 2. A greater R^2 value was obtained in IS than in DPP for both yield (Fig. 1) and fresh stover weight per plant (Fig. 2). This result showed that the prediction of yield and fresh stover weight per plant using a regression equation under IS was more accurate than that under DPP. With each addition of one mass selection cycle, the yield increased by 145.6 g per plot for IS, while it increased by only 95.75 g per plot for DPP (Fig. 1). Moreover, the fresh stover weight per plant increased by 25.51 g in IS and 15.63 g in DPP (Fig. 2).

Table 1. The average selection response per cycle for the DPP and IS techniques after seven cycles

Observed characters	Average selection response per cycle	
	DPP	IS
Plant height (cm)	1.67 *	1.17 *
Number of leaves (sheet) per plant	0.06 *	0.08 *
Cob dry weight per plant (g)	2.42 *	2.86 *
Cob length (cm)	0.06 *	0.12 *
Cob diameter (cm)	0.02 ns	0.02 ns
Seed dry weight per plot (g) (yield)	47.88 *	72.80 *
Weight of 1,000 seeds (g)	1.50 *	2.50 *
Number of fresh leaves at harvest (sheet)	0.12 *	0.12 *
Fresh stover per plant (g)	7.82 *	11.50 *

Note: * Significantly different at the 5% level; ns, not significant.

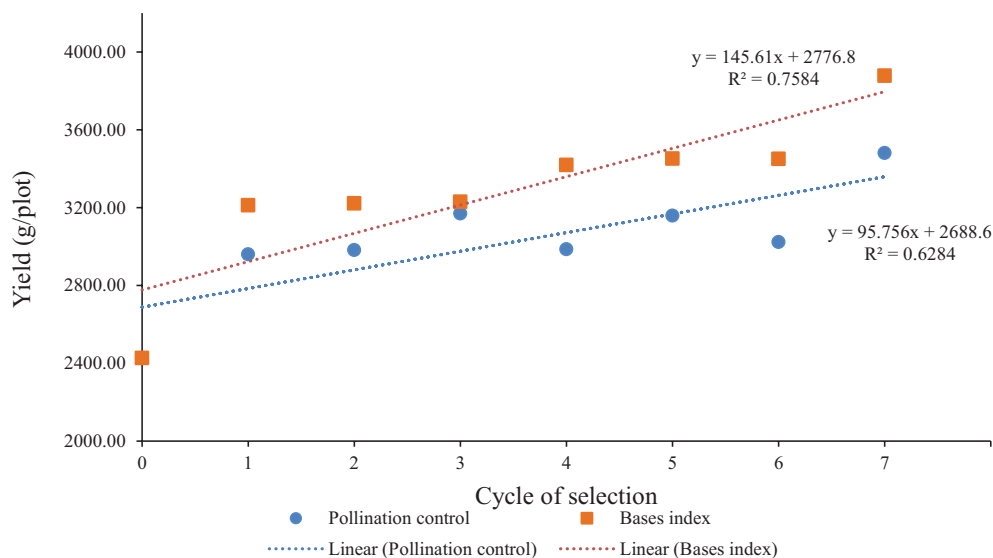


Fig. 1. Linear graph of yield results for both mass selection techniques.

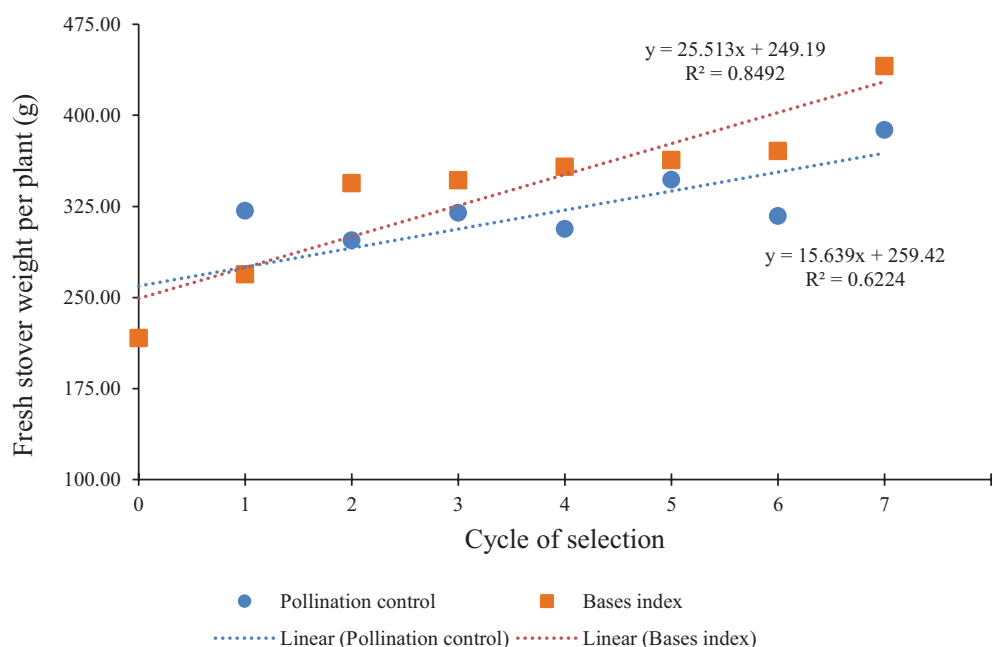


Fig. 2. Linear graph of fresh stover weight per plant for both mass selection techniques.

The magnitude of the response

The magnitude of the response in the observed characters is highly dependent on heritability and genetic variance. Genetic variance is expressed in the CGV. The magnitude of broad-sense heritability (H^2) and the values for the CGV are presented in Table 2.

Based on Table 2, the weight of 1,000 seeds and the number of fresh leaves at harvest had high heritability under DPP. Moreover, the plant height, number of leaves per plant, dry weight of harvested cobs per plant, diameter of cobs, and weight of fresh stover per plant were classified as having moderate heritability. Low heritability was found for the length of the cob. Under IS, the heritability was high for the number of leaves per plant, weight of dry ears harvested per plant, yield, weight of 1,000 seeds, number of fresh leaves at harvest, and weight of fresh stover.

Selection can cause changes in the population averages and magnitude for each population according to the selection cycle (Table 3). All selected populations (P_1 - P_7) under DPP and IS, as well as the Gumarang variety, were compared with the initial population (P_0) for each observed trait.

Table 3 shows that the average yield of the seventh cycle was greater than that of the initial population under DPP, similar to the previously studied population. IS mass selection caused a higher yield from the first cycle to the seventh cycle. The fresh stover weight of the population at the seventh cycle under DPP was higher than that of the initial population, and a similar result was observed for IS. The yield values for the initial population, the seventh cycle under DPP, and the seventh cycle under IS were 2426.67 g/plot (5,056 t/ha), 3481.33 g/plot (7,253 t/ha), and 3878.17 g/plot (8,080 t/ha), respectively.

Table 2. Heritability value (H^2) and the coefficient of genetic variation (CGV) for each trait under the DPP and IS techniques.

No.	Observed parameters	DPP Technique			Base Index Technique		
		H^2 (%)	Classification	CGV (%)	H^2 (%)	Classification	CGV (%)
1	Plant height	35.79	Moderate	2.54	10.46	Low	3.59
2	Number of leaves per plant	44.94	Moderate	2.43	57.56	High	3.59
3	Cob dry weight at harvest per plant	38.24	Moderate	7.18	59.47	High	7.66
4	Cob length (cm)	1.86	Low	0.63	13.07	Low	2.41
5	Cob diameter (cm)	49.39	Moderate	1.96	29.13	Moderate	1.54
6	Yield (dry weight of seeds per plot)	51.95	High	8.56	60.32	High	11.29
7	Weight of 1,000 seeds (g)	70.19	High	4.82	67.13	High	6.66
8	Number of fresh leaves per plant at harvest	55.76	High	8.16	57.71	High	8.08
9	Fresh stover weight per plant	40.08	Moderate	14.24	65.61	High	14.50

Table 3. The average of all observed properties for each treatment during mass selection.

Treatment	Average*)								
	1**)	2	3	4	5	6	7	8	9
P_0	219.33	11.75 a	138.03 a	13.27 a	4.43 a	2426.67 a	178.33 a	6.25 a	216.50 a
P_1 DPP	238.58	12.17 a	144.53 a	13.48 a	4.37 a	2960.33 b	205.60 b	6.67 a	321.50 b
P_2 DPP	240.25	12.50 b	161.48 b	13.77 a	4.53 a	2982.50 b	206.03 b	6.42 a	297.13 a
P_3 DPP	224.92	12.33 a	160.29 b	13.98 a	4.53 a	3170.17 b	205.63 b	7.17 b	319.81 b
P_4 DPP	249.83	12.58 b	163.94 b	14.02 a	4.56 a	2986.33 b	205.60 b	7.00 a	306.50 a
P_5 DPP	238.58	12.42 b	170.44 b	14.11 a	4.60 a	3159.33 b	205.00 b	7.17 b	346.91 b
P_6 DPP	239.58	12.50 b	172.09 b	14.15 a	4.66 b	3023.17 b	208.10 b	7.75 b	316.93 b
P_7 DPP	255.92	13.00 b	172.09 b	14.15 a	4.66 b	3481.33 b	213.07 b	8.17 b	387.99 b
						(43.46%***)			(79.21%***)
P_1 IS	231.67	11.92 a	161.33 b	14.05 a	4.54 a	3212.83 b	215.33 b	6.75 a	269.09 a
P_2 IS	249.83	12.17 a	172.15 b	14.11 a	4.63 b	3221.17 b	211.93 b	7.25 b	344.10 b
P_3 IS	247.75	12.42 b	172.35 b	14.15 a	4.63 b	3230.67 b	215.23 b	7.33 b	346.51 b
P_4 IS	230.83	12.08 a	172.51 b	14.27 a	4.65 b	3419.67 b	218.37 b	7.17 b	357.58 b
P_5 IS	239.58	12.58 b	179.67 b	14.49 b	4.67 b	3451.33 b	219.67 b	8.00 b	363.05 b
P_6 IS	237.67	12.50 b	173.36 b	15.17 b	4.72 b	3451.00 b	221.03 b	7.58 b	370.51 b
P_7 IS	249.83	13.17 b	194.93 b	15.15 b	4.72 b	3878.17 b	230.53 b	8.33 b	440.51 b
						(59.81%***)			(103.47%***)
Gumarang	240.75	14.25 b	165.10 b	14.23 a	4.40 a	3394.17 b	212.40 b	6.75 a	302.76 a
LSD _{0.05}	-	0.58	21.92	1.18	0.17	463.05	12.79	0.85	91.97

Note: *) The numbers followed by the same letter in the same column are not significantly different from the initial population with the BNT_{0.05} test. **) There is no BNT value because the ANOVA showed a non-significant difference. 1: Plant height (cm); 2: number of leaves per plant (strands); 3: weight of dried cobs harvested per plant (g); 4: length of the cobs (cm); 5: diameter of the cobs (cm); 6: yield (dry weight of seeds per plot) (g); 7: weight of 1,000 seeds (g); 8: number of fresh leaves per plant at harvest (strands); and 9: fresh stover weight per plant (g). ***) Percentage increase compared to the initial population (P_0).

The correlation between characters and yield or fresh stover

The improvements in yield and fresh stover were obtained through selection on plant height and the number of leaves under DPP and through selection on the weight of dried cobs harvested and fresh stover under IS. The magnitude of the change in the quality was corrected based on the closeness of the relationship with the selected trait. The correlation was calculated using the average data for each block. Each technique was examined separately, as shown in Table 4, with the number of correlated data points for each trait being 24 (treatment = 8 and block = 3).

There was a correlation between the observed parameters and the yield across all traits, except plant height under DPP. Moreover, plant height and the number of leaves per plant were not correlated under IS. The weight of fresh stover per plant was correlated with all traits, except plant height and the number of leaves per plant under DPP and plant height and cob diameter under IS. The highest correlation coefficient value related to yield was obtained for the weight of dried cobs harvested per plant under IS and the weight of 1,000 seeds under DPP. For fresh stover, there were five characters with a coefficient value higher than 0.50 under DPP, namely, the number of fresh leaves per plant, the weight of 1,000 seeds, yield, cob diameter, and the dry weight of harvested cobs per plant. On the other hand, there were four characters with coefficient values higher than 0.50 under IS: dry weight of harvested cobs per plant, cob length, yield, and the number of fresh leaves per plant.

Discussion

The potential yield showed linear progress under both mass selection techniques up to the seventh cycle. The average increase in fresh stover weight under selection also showed a significant linear relationship under both techniques. This means that until the seventh cycle, the two mass selection techniques are effective at increasing the yield and fresh stover weight. A similar result for yield was obtained by Bak-

tash (2016), who stated that their mass selection technique was effective for enhancing yield and corn yield components. Other studies also supported these findings. Shrestha et al. (2018) stated that mass selection was effective for improving the agronomic characters of maize plants after five cycles by producing higher yields and reducing plant height compared to the initial population. A study conducted by Govind & Mani (2016) revealed significant progress in mass selection for the number of cobs per plant, cob diameter, number of rows per cob, weight of seeds per cob, and yield. The difference in the selection responses per cycle for yield can also be seen in the linear regressions of the two selection techniques (Fig. 1).

The success of indirect selection is highly dependent on the level of genetic correlation between the selected trait and the improved trait (Soemartono et al., 1992; Basuki, 2005). The improved yield obtained using both techniques may also be due to indirect mass selection; the selection response is very dependent on the close relationship between the selected and corrected characters. Mass selection by pollination control used plant height and the number of leaves as the selected characters, while the dry weight of the harvested cobs was used in the base index technique. A significant positive correlation coefficient was obtained between the weight of the dried cobs and the yield (0.65 for DPP and 0.87 for IS), which may be why the base index selection response was greater than that of pollination control. The same is true for the correlation between yield and dry cob weight in a study by Abdalla et al. (2010), who revealed a positive correlation between these characters. Subaedah et al. (2016) showed that a longer cob or a higher number of seeds will increase yield. The correlation coefficient was higher for plant height (0.36) and the number of leaves (0.51) under DPP than under IS: 0.37 and 0.23, respectively (Table 4). It is possible that the selection response under the base index technique produced a higher yield compared to that under pollination control.

The heritability value of the selected characters also determines the magnitude of the selection response. Cob dry weight has high heritability under the base index technique, while plant height and the number of leaves were classified

Table 4. The correlation coefficient values between observed traits and yield or fresh stover weight per plant (BBS) under both techniques

No.	Observed parameters	DPP Technique		IS Technique	
		Yield	BBS	Yield	BBS
1	Plant height	0.36 ns	0.25 ns	0.37 ns	0.28 ns
2	Number of leaves per plant	0.51 s	0.17 ns	0.23 ns	0.44 s
3	Dry cob weight at harvest per plant	0.65 s	0.54 s	0.87 s	0.61 s
4	Cob length (cm)	0.52 s	0.46 s	0.69 s	0.53 s
5	Cob diameter (cm)	0.58 s	0.59 s	0.60 s	0.32 ns
6	Yield (dry weight of seeds per plot)	1.00	0.53 s	1.00	0.56 s
7	Weight of 1,000 seeds (g)	0.75 s	0.65 s	0.78 s	0.47 s
8	Number of fresh leaves per plant at harvest	0.53 s	0.52 s	0.48 s	0.68 s
9	Fresh stover weight per plant	0.53 s	1.00	0.56 s	1.00

Note: s = significantly different at the 5% significance level. ns = not significantly different.

as moderate. This trend can also be found for the selection response for the number of leaves; the base index technique showed a greater selection response per cycle than the pollination control technique despite the number of leaves per plant being a selection criterion for pollination control technique. This difference occurred because the number of leaves per plant under base index selection had a higher heritability than that under pollination control (Table 2). The heritability value for the number of leaves per plant under the pollination control technique was 44.94% (moderate), while that under the base index technique was 57.56% (high). The coefficient of genetic variation also influences the selection response. The number of leaves per plant has a coefficient of genetic variation of 3.59% and 2.54% under the two mass selection techniques. This difference can also affect the size of the selection response per cycle.

The linear increases in fresh stover weight under both techniques showed that the base index technique had a higher value in the third cycle than pollination control (Fig. 2). The difference is even greater with a higher number of selection cycles. This can occur because fresh stover weight is selected directly by the base index technique. The pollination control technique uses plant height and the number of leaves as selected traits to increase the weight of fresh stover, so the selection response depends on the close relationship between the two traits and fresh stover weight. Taller plants had low heritability, while the heritability of the leaf number was classified as high. However, both characters had a correlation coefficient that was not high (<0.50) and were not significant under the pollination control technique (Table 4). Therefore, the impact on the selection progress was smaller than that of the base index technique. Similarly, Basuki (2005) stated that the size of the indirect response greatly depends on the heritability value and the closeness of the relationship between the two characters.

Increased yield and fresh stover weight can occur due to an increase in gene frequency and genotype frequency. Soemartono et al. (1992) showed that selection causes an increase in the gene and genotype frequencies for the selected and improved characters. Increased gene and genotype frequencies can be seen from the increase in the averages of the selected population compared to the initial population. The increase in yield due to mass selection for seven cycles under pollination control and the base index was quite large, accounting for 43.46% and 59.81%, respectively. This increase in yield is higher than that obtained by Sutresna (2010), who observed a 44.04% increase after index selection. The weight of fresh stover per plant increased by 79.21% for selection under pollination control and 103.47% for the base index after seven cycles. This occurs because the selection response of yield and fresh stover weight under the base index technique is higher than that under pollination control. The response of fresh stover weight was 11.50 g/plant/cycle under the base index technique, while the response under pollination control was 7.82 g/plant/cycle (Table 1). Shrestha et al. (2018) said that the significant increase in grain yield of the selected population may be attributed to improvements in other physiological and yield-related traits. Furthermore, the existence of

a significant linear selection response for both mass selection techniques indicates that both should be continued into the next cycle. Based on the magnitude of the selection response, the base index technique is better for increasing the yield and fresh stover of corn in dry land.

Conclusions

1. The response of mass selection under pollination control was smaller than that under the base index technique for yield and fresh stover weight. Both responses followed a simple linear regression model.
2. The increases in yield and fresh stover weight were lower under pollination control than under the base index technique after seven cycles. Yield increases of 43.46% and 79.21% in fresh stover weight were obtained after seven cycles of pollination control, while compared to the initial population, the base index technique produced an increase in yield by 59.81% and 103.47% in fresh stover weight.
3. Mass selection based on the base index technique should be continued into the next cycle to obtain higher yield and fresh stover.

Author's contributions

Sudika carried out the experiments and drafted the manuscript. Soemeinaboedhy conceived the study and helped in manuscript drafting. All authors read and approved the final manuscript.

Conflicts of interest

The authors declare that they do not have any conflicts of interest.

References

- Abdalla, A., M.F. Mahmoud, A.M. EL. Naim, 2010:** Evaluation of some maize (*Zea mays* L.) varieties in different environments of the Nuba Mountain of Sudan. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences* **4** (12), 6605–6610.
- Ajala, S. O., 2010:** Expected responses to aggregate trait selection in maize (*Zea mays* L.). *Journal of Food, Agriculture & Environment* **8** (1), 185-189.
- Asghar, M.J., S.S. Mehdi, 2010:** Selection indices for yield and quality traits in sweet corn. *Pakistan Journal of Botany* **42** (2), 775-789.
- Baktash, F.Y., 2016:** Modified mass selection within corn synthetic variety. *The Iraqi Journal of Agricultural Sciences* **47** (1), 391-395.
- Basuki, N., 2005:** Genetika kuantitatif [Quantitative genetic]. Thesis, Malang, Brawijaya University.
- Govind, S.B., V.P. Mani, 2016:** A study of prolificacy through mass selection in maize for Northern-Western Himalayas. *Journal of Biotechnology and Crop Science* **5** (7), 92-95.

- Hallauer, A.R., M.J. Carena, J.B.M. Filho, 2010:** Quantitative in maize breeding. New York, Springer, 13 pp.
- Kar, C.S., M.Z.K. Warsi, 2006:** Selection index and selection criteria for green ear maize (*Zea mays* L.) over environment. *Indian Society of Genetics & Plant Breeding* **66** (3), 203-206.
- Khamkoh, W., D. Kethaisong, K. Lomthaisong, K. Lertrat, B. Suriharn, 2019:** Recurrent selection method for improvement of lutein and zeaxanthin in orange waxy corn populations. *Australian Journal of CropScience* **13** (4), 566-573, DOI: 10.21475/ajcs.19.13.04.p1507.
- Little, T.M., F.J. Hills, 1972:** Statistical methods in agricultural research. University of California. Davis, California, 242 p.
- Shrestha, J., C.B. Kunwar, B. Bhandari, 2018:** Response of mass selection in maize (*Zea mays* L.). *Our Nature* **16** (1), 35-42, DOI: 10.3126/on.v16i1.22119.
- Smith, H.F., 1936:** A discriminant function of plant selection. *Annals of Eugenics* **7** (3), 240-250, DOI: 10.1111/j.1469-1809.1936.tb02143.x.
- Soemartono, S., N. Nasrullah, H. Hartiko, 1992:** Genetika kuantitatif dan bioteknologi tanaman [Quantitative genetic and plant biotechnology]. Yogyakarta, PAU Bioteknologi UGM, 374 pp.
- Stansfield, W.D., 1991:** Theory and problems of genetics. New York, McGraw-Hill.
- Subaedah, S.T., A. Takdir, Netty, D. Hidrawati, 2016:** Evaluation of potential production of maize genotypes of early maturity in rainfed lowland. *International Journal of Agricultural and Biosystems Engineering (IJABE)* **10** (10), 638-641.
- Sutresna, I.W., 2010:** Pengaruh seleksi massa terhadap kemajuan genetik populasi tanaman jagung (*Zea mays* L.) [Effect of mass selection on genetic gain of corn (*Zea mays* L.) population]. *Jurnal Agroteknos* **20** (2-3), 112-118.
- Tardin, F.D., M.G. Pereira, A.P.C. Gabriel, A.T.A. Junior, G.A.S. Filho, 2007:** Selection index and molecular markers in reciprocal recurrent selection in maize. *Crop Breeding and Applied Biotechnology* **7**, 225-233.
- Ujjianto, L., I G.P. Muliarta, A., I W. Sudika, A. A. K. Sudarmawan, 2020:** Teknik Analisis dan Rancangan Persilangan [Technique of Analysis and Mating Design]. Mataram, Mataram University Press, 96 pp.
- Walsh, B., 2010:** Theory of index selection general theory of selection on a linear index. Wageningen: Wageningen University. Access: 25th September 2019, URL: http://nitro.biosci.arizona.edu/zbook/NewVolume_2/pdf/Chapter37.pdf.

Martin Penzel[✉], Monika Möhler[†]

Ertragsleistung von 14 Haselnussorten über 12 Jahre im Spindelsystem

Yield performance of 14 hazelnut cultivars grown for 12 years in a spindle system

Affiliation

Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), Zweigstelle Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau (LVG), Erfurt.

Kontaktanschrift

Dr. Martin Penzel, Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR), Zweigstelle Lehr- und Versuchszentrum Gartenbau (LVG) Erfurt, Leipziger Straße 75a, 99085 Erfurt, E-Mail: martin.penzel@tlllr.thueringen.de

Zusammenfassung

Die Ertragsleistung von 14 Haselnussorten verschiedener Herkunft wurde vom zweiten bis zwölften Standjahr miteinander verglichen. Die wurzelechten Bäume wurden als Spindel, mit einem Pflanzabstand von 4,5 m × 2,5 m, erzogen. Ab dem vierten Standjahr wurden Erträge >1 kg Baum⁻¹, ab dem sechsten Standjahr >3 kg Baum⁻¹ erzielt. Es wurden große Ertragsunterschiede zwischen Sorten und Jahren festgestellt. Im Mittel der Sorten wurden in den Vollertragsjahren Erträge von 2,2 t ha⁻¹ realisiert, bei den ertragsstärksten Sorten 'Eckige Barceloner', 'Webbs Preisnuss' und 'Emoa 1' 3,2 t ha⁻¹, 2,9 t ha⁻¹, bzw. 2,6 t ha⁻¹. Die Sorten unterscheiden sich deutlich in der Masse der Früchte und der Kerne. Die größte Nussmasse hatten die Sorten 'Wunder aus Bollweiler' (4,0 g) und 'Corabel' (3,8 g). Die Kerne der kleinfrüchtigen Sorten 'Pauetet' und 'Rotblättrige Lambertsnuss' hatten den höchsten Masseanteil an der Frucht mit 52 % bzw. 49 %. Dieser lag im Mittel der Sorten und Jahre bei 42 %. Der Anteil an leeren Nüssen lag im Mittel der Sorten und Jahre bei 2,6 %, jedoch wiesen einzelne Sorten in manchen Jahren bis zu 16 % leere Nüsse auf. 'Corabel' und 'Eckige Barceloner' hatten im Mittel der Jahre <1 % leere Nüsse. Im 4., 6. und 11. Standjahr wurden im Mittel der Sorten 16, 9, bzw. 16 Wurzelschösser je Baum festgestellt. Der Schnittaufwand im 6. und 7. Standjahr betrug im Durchschnitt aller Sorten 22 h ha⁻¹ und 62 h ha⁻¹. Die in dieser Arbeit gezeigten Versuchsergebnisse belegen, dass es in Mitteleuropa möglich ist, Haselnüsse im Spindelsystem anzubauen.

Stichwörter

Anbausystem, *Corylus avellana*, *Corylus maxima*, Fruchtmasse, Schnitt, Sortensichtung

Abstract

The yield performance of 14 hazelnut cultivars of different origin was compared from the second to the twelfth year after planting. The trees were trained as spindles with a planting

distance of 4.5 m × 2.5 m, leading to a tree density of 800 trees per hectare. Yields >1 kg tree⁻¹ were achieved from the fourth year after planting, and >3 kg tree⁻¹ from the sixth year after planting. Substantial yield fluctuations between cultivars and years were observed. After reaching maturity a mean yield of 2.2 t ha⁻¹ was achieved in the whole experimental plot, whereas the highest yielding cultivars, 'Barcelona', 'Webbs Price Cob' and 'Emoa 1' achieved average yields of 3.2 t ha⁻¹, 2.9 t ha⁻¹, and 2.6 t ha⁻¹, respectively. The cultivars differed significantly in fruit mass and kernel mass. The varieties 'Merveille de Bollwiller' (4.0 g) and 'Corabel' (3.8 g) had the highest fruit mass. The small-fruited cultivars 'Pauetet' and 'purple-leaved filbert' had the highest mass proportion of kernel to fruit of 52% and 49%, respectively. This relation was 42% when taking into consideration the average of all cultivars and years. The mean proportion of empty nuts was 2.6% in the whole experiment, but individual cultivars reached up to 16% empty nuts in some years. 'Corabel' and 'Barcelona' had <1% empty nuts. In the 4th, 6th and 11th year after planting, averages numbers of 16, 9, or 16 root suckers per tree were counted. The time required for winter pruning in the 6th and 7th year after planting was 22 h ha⁻¹ and 62 h ha⁻¹, respectively. The experimental data shown in this paper demonstrate that it is possible to grow hazelnuts in a spindle system in the Central German region.

Keywords

Corylus avellana, *Corylus maxima*, fruit mass, pruning, training system, cultivar evaluation

Einleitung

In Mitteleuropa dienten Haselnüsse bereits zur Zeit des Mesolithikums als Nahrungsmittel (Holst, 2010). Die Region ist neben der Schwarzmeerregion, England, Italien und Spanien eine Herkunftsregion von Haselnussorten (Gökirmak et al., 2009). In Deutschland galt der Anbau in der Vergangenheit aufgrund von niedrigen und alternierenden Erträgen als unwirtschaftlich (Friedrich, 1993). Daher ist der erwerbsmäßige



(c) Der Autor/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: 4. März 2022/10. Mai 2022

Anbau von Haselnuss in Deutschland im Vergleich zu anderen Regionen gering. Die Hauptproduzenten (im Jahr 2020; FAO, 2021) für Haselnüsse weltweit sind Türkei (734.500 ha), Italien (80.300 ha), Aserbaidschan (44.500 ha), Chile (24.400 ha), Iran (24.300 ha) und die USA (24.300 ha). Die Anbaufläche von Schalenobst in Deutschland lag 2020 bei 1.200 ha (Destatis, 2021), von denen 290 ha Walnüsse waren (2020; FAO, 2021). Die restlichen 910 ha können zum Großteil dem Haselnussanbau und, in einem geringeren Umfang, dem Anbau von weiterem Schalenobst, z. B. Esskastanien, zugerechnet werden.

Anbauversuche aus den Niederlanden zeigten, dass bei einem Pflanzabstand von 4,5 m × 2,0 m in einzelnen Jahren, Erträge von bis zu 2,7 t ha⁻¹, im Mittel aus den getesteten Sorten jedoch 1,0 – 1,5 t ha⁻¹ möglich sind (Wertheim, 1994). Bei einem Anbauversuch in Polen wurden mittlere Erträge von 1,2 t ha⁻¹ erzielt (Piskornik, 1994).

Weltweit gibt es verschiedene Anbausysteme u. a. Mehrstammssysteme (Taghavi et al., 2020; Bak & Karadeniz, 2021), Hohlkronensysteme, Einzelstammssysteme (Germain & Sarraquigne, 1997) und Fruchtwände (Beyhan, 2007), inklusive V-System (Germain & Sarraquigne, 1997; Sokol, 2018). Der Hektarertrag der Systeme korreliert positiv mit der Anzahl an Pflanzen pro Hektar, wobei Anbausysteme mit bis zu 6000 Pflanzen pro Hektar auf ihre Ertragsleistung getestet wurden (Beyhan, 2007). Bei den Anbausystemen werden sowohl wurzelechte als auch veredelte Bäume verwendet (Đurić et al., 2021). Die Bildung von Wurzelschossern ist bei Bäumen, die auf die Unterlage *Corylus colurna* L. veredelt wurden, im Vergleich zu wurzelechten Bäumen reduziert (Tous et al., 2009; Rovira, 2021), was zu einer Verringerung des Pflegeaufwands und somit zu einer Verbesserung der Wirtschaftlichkeit der Anlagen führen kann.

Bisher gibt es keine Erfahrung zur Ertragsleistung von Haselnussarten und -sorten in Mitteldeutschland. Zudem sind keine Versuche aus dieser Region mit Haselnussbäumen im

Spindelsystem bekannt. Ziel der Versuche war es, Haselnuss-sorten zu identifizieren, die sich für den erwerbsmäßigen Anbau in Mitteldeutschland im Spindelsystem eignen.

Material und Methoden

Ein Sortenversuch mit 14 Haselnuss-sorten (Tab. 1) wurde im Herbst 2005 auf dem Versuchsgelände des Lehr- und Versuchszentrums Gartenbau in Erfurt (50.99268, 11.05170) angelegt. Der Boden ist ein tiefgründiger schluffiger Lehm mit 76 Bodenpunkten. Fünf bewurzelte Steckhölzer je Sorte wurden im Abstand von 4,5 m × 2,5 m gepflanzt und in den folgenden Jahren als Spindel erzogen. Die Pflanzen im Versuch wurden über oberirdisch verlegte Tropfschläuche bewässert.

Nachdem die Bäume ab dem 6. Standjahr in die Vollertragsphase eintraten, wurde ein Stickstoffbedarf von 70 kg ha⁻¹ angenommen. Die jährliche Stickstoffdüngung erfolgte jeweils zur Hälfte als einmalige Gabe zum Vegetationsbeginn nach der N_{min}-Methode, bzw. über Fertigation in wöchentlichen Gaben eines eingespeisten N-/P-/K-/Mg- Düngers (15-5-30-3) in den Monaten April bis Juni.

In den Jahren 2007 bis 2017 wurden die Früchte der Bäume sortenweise in zwei bis drei Durchgängen aufgelesen. Die Nüsse wurden anschließend von den Hüllblättern befreit und getrocknet. Nach der Trocknung wurde der Ertrag sortenweise erfasst. Die Masse von 100 zufällig ausgewählten, geschlossenen Nüssen wurde mit einer elektronischen Waage gemessen. Diese wurden anschließend geknackt und der prozentuale Anteil leerer Nüsse erfasst. Abschließend wurde die Masse der Kerne gemessen und der mittlere Quotient aus Kern- und Nussmasse für jede Sorte berechnet. In den Jahren 2009 und 2011 wurde die Anzahl an Wurzelschossern je Baum, bzw. je Sorte im Juni gezählt, 2016 nach der Ernte. Im Jahr 2016 wurde baumweise die Zeit gestoppt, die erforderlich war, um alle Wasserschosser mit einer Schere zu entfernen. Im März 2011 und 2012 wurde der Zeitbedarf für den Schnitt von jeweils fünf Bäumen pro Sorte erfasst. Der

Tab. 1. Die im Versuch verwendeten Haselnuss-sorten, ihre Herkunft, Art und ihre S-Allele.

Sorte	Herkunft	Art	S-Allele	Referenz
Corabel	Frankreich	Zellernuss	1 3	Gökirmak et al., 2009
Cosford	England	Zellerhybride	3 11	Gökirmak et al., 2009
Eckige Barceloner	Spanien	Zellernuss	1 2	Gökirmak et al., 2009
Emoa-1	Niederlande	Zellernuss	-	Schepers & Kwanten, 2005
Englische Riesennuss	England	Zellernuss	-	AID, 1960
Gunslebener Zellernuss	Deutschland	Zellernuss	5 23	Gökirmak et al., 2009
Gustavs Zellernuss	Deutschland	Zellernuss	15 20	Gökirmak et al., 2009
Hallesche Riesennuss	Deutschland	Zellernuss	5 15	Büttner, 1798; Gökirmak et al., 2009
Nottinghams Fruchtbare	England	Lamberthybride	8 10	Gökirmak et al., 2009
Pauetet	Spanien	Zellernuss	18 22	Gökirmak et al., 2009
Rotblättrige Lamberts-nuss	Schwarzes Meer	Lamberts-nuss	5 10	Mehlenbacher, 2014
Tonda di Giffoni	Italien	Zellernuss	2 23	Gökirmak et al., 2009
Webbs Preisnuss	England	Lamberthybride	17 17	Mehlenbacher, 2014
Wunder aus Bollweiler	Frankreich	Zellernuss	-	AID, 1960

Zeitbedarf wurde, unter Annahme einer Pflanzdichte von 800 Bäumen pro Hektar, auf den Hektar hochgerechnet.

Mit dem Programm Dunn's Test (Dinno, 2017) der Software R Version 3.4.1 (R Core Team, 2018) wurden die Erträge aus den Jahren 2011 bis 2017, sowie die Anzahl an Wurzelschossern je Baum in den Jahren 2009 und 2016 (Konfidenzniveau $\geq 95\%$) sortenweise miteinander verglichen.

Ergebnisse

Ertrag, Frucht- und Kernmasse, prozentualer Anteil leerer Nüsse

Ab dem zweiten Standjahr (2007) waren bei den meisten Sorten Erträge feststellbar (Tab. 2). Jedoch wurden erst ab dem vierten Standjahr Erträge von über einem Kilogramm pro Baum erzielt, was bei der gegebenen Pflanzdichte Erträge von 800 kg ha^{-1} (Nettobaumfläche $\cong 90\%$ der Bruttofläche) entsprochen hätte. Ab dem sechsten Standjahr wurden im Mittel der Sorten Erträge von $2,7 \text{ kg Baum}^{-1}$ gemessen. Es traten deutliche Ertragsunterschiede zwischen Jahren und Sorten auf. In den Jahren 2015 und 2017 wurden im Mittel der Sorten deutlich niedrigere Erträge im Vergleich zu den anderen Vollertragsjahren ab 2011 festgestellt. Die niedrigsten Erträge im Versuch hatten die Sorten 'Cosford', 'Tonda di Giffoni' und 'Pauetet', während die Sorten 'Eckige Barceloner' und 'Webbs Preisnuss' die höchsten Erträge aufwiesen.

Die Sorten 'Wunder aus Bollweiler', 'Corabel' und 'Hallesche Riesennuss' wiesen die größten Fruchtmassen der getesteten Sorten auf, während bei den Sorten 'Nottinghams Fruchtba-

re', 'Pauetet' und 'Rotblättrige Lambertnuss' die geringsten Fruchtmassen festgestellt wurden (Tab. 3). Dafür hatten Letztere den höchsten Anteil von Kernmasse an der Fruchtmasse. Dieser war bei der Sorte 'Englische Riesennuss' am geringsten. Im Mittel der Sorten wurden 2011 die höchsten Fruchtmassen festgestellt, welche ab dem achten Versuchsjahr nur geringe jährliche Schwankungen zeigten.

Der mittlere Anteil an leeren Nüssen lag in den Vollertragsjahren 2011–2017 bei $2,6\%$. Jedoch zeigten sich in einzelnen Jahren bei einzelnen Sorten deutliche höhere Anteile an leeren Nüssen (Abb.). Die Standardabweichung des Anteils leerer Nüsse variiert zwischen den Sorten. Bei der Sorte 'Rotblättrige Lambertnuss' wurden in jedem Jahr leere Nüsse festgestellt, während bei allen weiteren Sorten in mindestens einem Versuchsjahr keine leere Nüsse auftraten.

Bildung von Wurzelschossern und Schnittaufwand

Die Anzahl an Wurzelschossern pro Baum unterschied sich zwischen den Sorten und den drei Jahren, in denen diese erfasst wurden (Tab. 4). Die Hälfte der untersuchten Sorten hatte in den drei Jahren jeweils weniger als 10 Wurzelschösser pro Baum, die Sorte 'Gunslebener Zellernuss' nur maximal 6 Wurzelschösser pro Baum. Im Gegensatz dazu hatte die Sorte 'Rotblättrige Lambertnuss' in allen Jahren die höchste Anzahl an Wurzelschossern pro Baum. Anhand der hohen Standardabweichung bei der Anzahl an Wurzelschossern pro Baum wird ersichtlich, dass Unterschiede zwischen den einzelnen Bäumen einer Sorte auftraten. Analog zu der Anzahl an Wurzelschossern traten auch beim Zeitbedarf für deren händisches Entfernen Sortenunterschiede auf.

Tab. 2: Ertrag pro Baum bei 14 Haselnussorten im Spindelsystem (Pflanzabstand $4,5 \text{ m} \times 2,5 \text{ m}$) vom 2.-11. Standjahr und mittlere Erträge der Vollertragsjahre. [Mittelwerte mit gleichen hochgestellten Buchstaben unterscheiden sich, gemäß dem Dunn's Test für paarweise Vergleiche (Konfidenzniveau $\geq 95\%$), nicht signifikant voneinander.]

Sorte	Ertrag [kg Baum^{-1}]											Mittlerer Ertrag 2011-2017 [kg Baum^{-1}]
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Corabel	0,00	0,01	0,65	0,96	3,00	2,59	4,38	2,95	0,75	2,63	1,20	2,5 ^{ABC}
Cosford	0,02	0,03	1,04	1,44	2,70	3,40	1,87	2,94	1,41	1,49	1,07	2,13 ^A
Eckige Barceloner	0,00	0,02	0,35	0,86	3,24	4,44	4,60	3,65	2,50	7,58	2,15	4,02 ^C
Emoa 1	0,04	0,09	0,62	0,81	2,74	2,49	4,75	4,39	1,71	4,10	2,60	3,25 ^{BC}
Englische Riesennuss	0,02	0,03	0,89	0,70	2,93	2,74	4,10	2,49	0,89	2,91	0,87	2,42 ^{AB}
Gunslebener Zellernuss	0,18	0,30	1,60	1,38	3,34	2,74	1,61	4,58	0,88	3,18	1,90	2,60 ^{ABC}
Gustavs Zellernuss	0,08	0,03	1,32	1,05	4,14	3,64	2,29	3,75	0,90	4,12	1,67	2,93 ^{ABC}
Hallesche Riesennuss	0,10	0,03	1,11	0,20	2,66	2,09	2,82	3,62	1,10	4,08	1,75	2,59 ^{ABC}
Nottinghams Fruchtbare	0,01	0,15	1,31	0,71	3,39	2,10	3,51	3,65	1,14	3,25	1,30	2,62 ^{ABC}
Pauetet	0,01	0,03	0,23	0,17	2,70	1,74	0,64	1,01	1,70	5,79	1,90	2,21 ^A
Rotblättrige Lambertsnuss	0,01	0,13	2,21	0,63	4,05	1,76	2,92	3,82	1,04	2,97	1,03	2,51 ^{ABC}
Tonda di Giffoni	0,02	0,05	0,58	0,98	1,79	0,31	1,72	3,13	2,34	3,56	2,15	2,14 ^{AB}
Webbs Preisnuss	0,03	0,03	1,27	1,31	2,81	4,67	4,84	4,07	1,62	4,57	2,38	3,57 ^C
Wunder aus Bollweiler	0,04	0,05	1,32	0,12	3,63	1,76	1,84	2,73	0,76	3,39	1,62	2,25 ^{AB}
Mittelwert	0,04	0,07	1,04	0,81	3,08	2,61	2,99	3,34	1,34	3,83	1,69	2,70

Tab. 3. Mittlere Frucht- und Kernmassen und relativer Massenanteil des Kerns an den Früchten von 14 Haselnussorten im Spindelsystem (Pflanzabstand 4,5 m × 2,5 m) vom 6.-12. Standjahr

Sorte	Mittlere Fruchtmasse [g]							Mittelwert
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Corabel	4,6	4,1	3,9	4,1	3,5	2,5	3,8	3,8
Cosford	2,9	2,4	2,2	2,6	2,6	2,0	2,6	2,5
Eckige Barceloner	3,1	2,6	2,2	2,7	2,5	2,2	2,8	2,6
Emao 1	3,3	4,4	3,9	3,1	3,2	2,9	2,9	3,4
Englische Riesennuss	4,0	3,4	2,8	3,1	2,6	2,1	2,6	2,9
Gunslebener Zellernuss	3,4	3,1	2,6	3,0	2,0	2,1	2,2	2,6
Gustavs Zellernuss	4,3	3,8	3,2	3,4	3,8	3,4	3,9	3,7
Hallesche Riesennuss	4,0	4,3	3,5	3,5	3,6	3,4	3,2	3,6
Nottinghams Fruchtbare	2,9	2,2	2,0	2,0	2,4	1,8	1,8	2,2
Pauetet	2,5	2,3	1,7	2,1	1,8	1,7	2,1	2,0
Rotblättrige Lambertsnuss	1,9	2,3	1,8	2,1	2,0	2,0	2,0	2,0
Tonda di Giffoni	3,3	4,1	3,1	3,0	1,9	2,8	2,3	2,9
Webbs Preisnuss	4,1	2,8	2,3	2,4	3,1	2,5	2,5	2,8
Wunder aus Bollweiler	4,4	4,0	4,0	4,0	4,0	3,8	3,9	4,0
Mittelwert	3,5	3,3	2,8	2,9	2,8	2,5	2,8	2,9

Sorte	Mittlere Kernmasse [g]							Mittelwert
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Corabel	1,86	1,76	1,80	1,83	1,57	0,99	1,83	1,7
Cosford	1,14	1,08	0,95	1,24	1,17	0,81	1,31	1,1
Eckige Barceloner	1,00	1,01	0,85	1,05	0,81	0,86	1,01	0,9
Emao 1	1,16	1,90	1,50	1,43	1,32	0,92	1,24	1,4
Englische Riesennuss	1,06	1,13	1,10	1,04	0,84	0,64	0,91	1,0
Gunslebener Zellernuss	1,16	1,29	1,10	1,39	0,52	0,84	1,21	1,1
Gustavs Zellernuss	1,02	1,60	1,30	1,35	1,56	1,30	1,53	1,4
Hallesche Riesennuss	1,52	1,74	1,40	1,44	1,50	1,38	1,30	1,5
Nottinghams Fruchtbare	1,04	1,14	1,00	1,00	1,02	0,89	0,95	1,0
Pauetet	1,08	1,07	1,10	0,98	0,87	0,80	1,06	1,0
Rotblättrige Lambertsnuss	1,02	1,20	1,10	1,03	1,00	1,02	0,98	1,0
Tonda di Giffoni	1,42	1,72	1,40	1,31	0,76	1,19	1,06	1,3
Webbs Preisnuss	1,08	1,22	1,00	1,07	1,36	0,88	1,20	1,1
Wunder aus Bollweiler	1,65	1,65	1,75	1,52	1,43	1,41	1,48	1,6
Mittelwert	1,2	1,4	1,2	1,3	1,1	1,0	1,2	1,2

Der Winterschnitt beschränkte sich bei den Bäumen auf die Entfernung oder das Einkürzen von Konkurrenztrieben zur Mittelachse. Es wurden keine einjährigen Triebe angeschnitten und Äste, die eingekürzt wurden, ausschließlich auf jüngere Triebe abgeleitet. Im sechsten Standjahr war der Zeitbedarf für den Schnitt deutlich niedriger als im siebten Standjahr (Tab. 5), wobei Sortenunterschiede auftraten, die mit dem unterschiedlichen Wuchsverhalten der einzelnen Sorten zusammenhängen.

Diskussion

Bei der Kultur der Haselnuss wurden Ertragsschwankungen zwischen einzelnen Jahren (Taghavi et al., 2020) sowie jährliche Unterschiede im Anteil an leeren Nüssen (Silva et al., 1996) bereits beschrieben. Es wurden im Versuch Sorten gewählt, die sich in ihren S-Allelen unterscheiden (Tab. 1), um eine gegenseitige Befruchtung sicherstellen zu können. Jedoch können zwischen einzelnen Jahren temperaturbedingt Unterschiede im Blühverhalten auftreten (Črepinšek et al., 2012; Ilić et al., 2018), die bei einzelnen Sorten zu einem

Tab. 3. Fortsetzung

Sorte	Relativer Anteil der Kernmasse an der Fruchtmasse [0-1]							Mittelwert
	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	
Corabel	0,40	0,43	0,46	0,45	0,45	0,39	0,48	0,44
Cosford	0,39	0,45	0,43	0,48	0,46	0,40	0,51	0,45
Eckige Barceloner	0,33	0,39	0,39	0,40	0,32	0,39	0,36	0,37
Emoa 1	0,36	0,44	0,38	0,46	0,42	0,32	0,42	0,40
Englische Riesennuss	0,27	0,33	0,39	0,33	0,32	0,31	0,35	0,33
Gunslebener Zellernuss	0,35	0,42	0,42	0,46	0,27	0,39	0,56	0,41
Gustavs Zellernuss	0,24	0,42	0,41	0,40	0,42	0,39	0,40	0,38
Hallesche Riesennuss	0,38	0,40	0,40	0,41	0,42	0,41	0,40	0,40
Nottinghams Fruchtbare	0,36	0,51	0,50	0,50	0,42	0,50	0,53	0,48
Pauetet	0,43	0,46	0,65	0,47	0,49	0,46	0,49	0,49
Rotblättrige Lambertsnuss	0,53	0,53	0,61	0,49	0,51	0,50	0,49	0,52
Tonda di Giffoni	0,43	0,42	0,45	0,43	0,40	0,43	0,47	0,43
Webbs Preisnuss	0,26	0,44	0,43	0,45	0,44	0,35	0,49	0,41
Wunder aus Bollweiler	0,38	0,41	0,44	0,38	0,36	0,37	0,38	0,39
Mittelwert	0,36	0,43	0,45	0,44	0,41	0,40	0,45	0,42

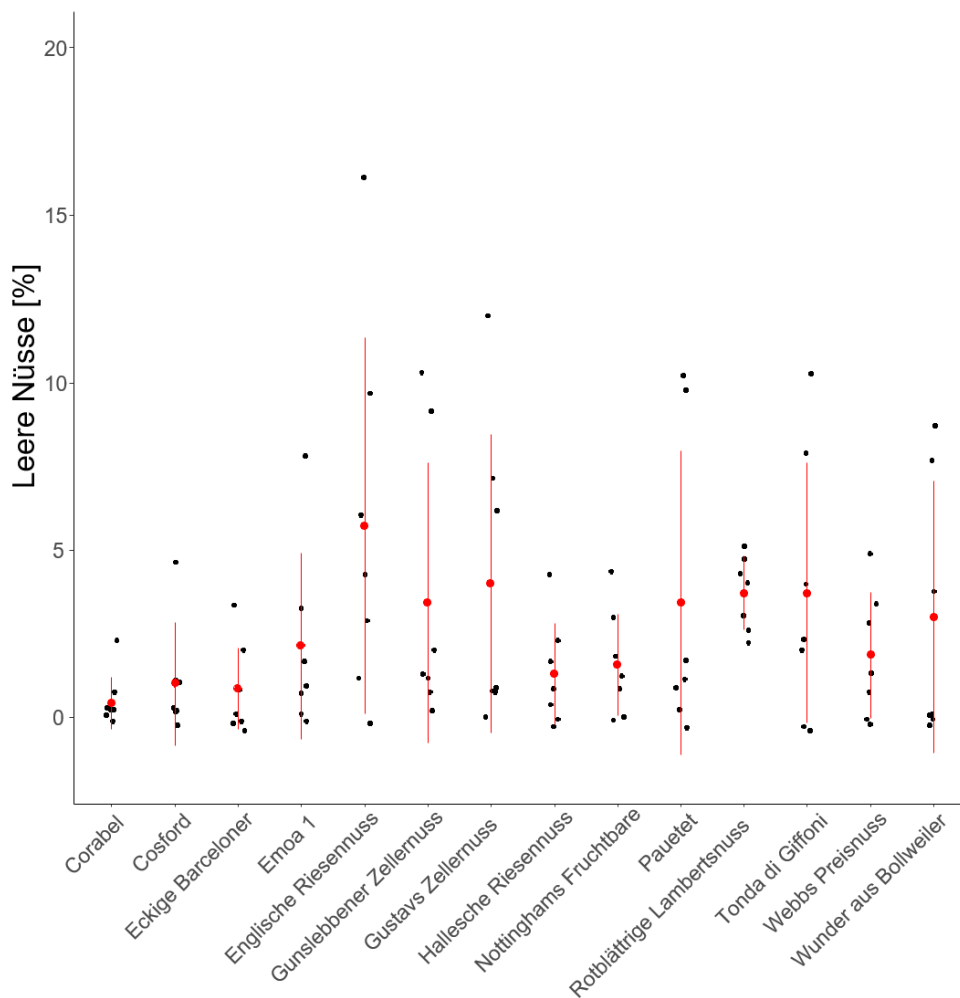


Abb. Prozentualer Anteil an leeren Nüssen (gemessene Werte, Mittelwerte und Standardabweichungen) von 14 Haselnussorten im Spindelsystem (Pflanzabstand 4,5 m × 2,5 m) vom 6.-12. Standjahr.

Tab. 4. Mittlere Anzahl an Wurzelschossern pro Baum im 4. (2009) und 6. (2011) und 11. Standjahr (2016) und Zeitbedarf zum Entfernen im 11. Standjahr (2016) bei wurzelechten Haselnussbäumen 14 verschiedener Sorten im Spindelsystem.

Sorte	Ausläufer Baum ⁻¹			Zeitbedarf für die Entfernung der Wurzelschosser 2016	
	2009	2011	2016	Sekunden Baum ⁻¹	Stunden ha ^{-1*}
Corabel	8,6 ± 4,5 ^{ab}	9	11,6 ± 8,7 ^{bc}	40	9
Cosford	15,6 ± 6,1 ^c	1	11,6 ± 8,3 ^{bc}	45	10
Eckige Barceloner	13,4 ± 4,5 ^{bc}	11	5,8 ± 6,1 ^{abc}	22	5
Emoa 1	6,2 ± 4,1 ^{ab}	5	2,6 ± 1,9 ^{ab}	11	2
Englische Riesennuss	28,2 ± 3,6 ^c	11	2,8 ± 2,0 ^{ab}	10	2
Gunslebener Zellernuss	2,2 ± 2,8 ^a	1	1,8 ± 2,3 ^a	5	1
Gustavs Zellernuss	6,6 ± 3,8 ^{ab}	7	4,6 ± 5,0 ^{ab}	22	5
Hallesche Riesennuss	6,0 ± 3,9 ^{ab}	7	9,4 ± 5,2 ^{bc}	44	10
Nottinghams Fruchtbare	26,4 ± 5,2 ^c	13	21,2 ± 14,9 ^c	81	18
Pauetet	6,2 ± 4,0 ^{ab}	4	11,2 ± 2,5 ^{bc}	42	9
Rotblättrige Lambertsnuss	46,4 ± 26,5 ^c	41	92,6 ± 44,9 ^d	330	73
Tonda di Giffoni	4,4 ± 4,9 ^{ab}	3	9,4 ± 8,2 ^{bc}	34	8
Webbs Preisnuss	21,4 ± 8,2 ^c	11	6,2 ± 3,7 ^{abc}	21	5
Wunder aus Bollweiler	29,6 ± 5,2 ^c	8	25,6 ± 40,0 ^c	154	34
Mittelwert	16,3	9,4	15,6	62	14

*) es wurde eine Baumanzahl von 800 Bäumen ha⁻¹ angenommen

Tab. 5. Zeitbedarf für den Schnitt im 6. (2011) und 7. (2012) Standjahr bei wurzelechten Haselnussbäumen 14 verschiedener Sorten im Spindelsystem (Pflanzabstand 4,5 m × 2,5 m)*.

Sorte	Zeitbedarf für den Schnitt			
	Sekunden Baum ⁻¹		Stunden ha ⁻¹	
	2011	2012	2011	2012
Corabel	62	281	14	62
Cosford	111	378	25	84
Eckige Barceloner	84	255	19	57
Emoa 1	36	170	8	38
Englische Riesennuss	104	311	23	69
Gunslebener Zellernuss	115	278	26	62
Gustavs Zellernuss	116	356	26	79
Hallesche Riesennuss	187	367	42	82
Nottinghams Fruchtbare	75	250	17	55
Pauetet	113	188	25	42
Rotblättrige Lambertsnuss	84	296	19	66
Tonda di Giffoni	42	219	9	49
Webbs Preisnuss	57	174	13	39
Wunder aus Bollweiler	173	384	38	85
Mittelwert	97	279	22	62

*) es wurde eine Baumanzahl von 800 Bäumen ha⁻¹ angenommen

schwankenden Befruchtungserfolg führen können. Zudem können Frostereignisse und die generelle Neigung von Haselnüssen zur Alternanz Ertragsschwankungen hervorrufen (Bregaglio et al., 2021). Trotz Ertragsschwankungen zeigten die Sorten 'Eckige Barceloner' und 'Emoa 1' im vorliegenden Versuch jährlich Erträge über $1,3 \text{ t ha}^{-1}$ und $1,7 \text{ t ha}^{-1}$. Zwar weist die Sorte 'Webbs Preisnuss' hohe Erträge auf, doch haben Lambertnüsse und Lamberthybriden häufig eine längliche Form (Ilić et al., 2017), was bei der mechanischen Sortierung zu einem höheren Aufwand im Vergleich zu rund geformten Nüssen führt. Zellernüsse haben eine rundlichere Form und eignen sich daher besser als Lambertnüsse und Lamberthybriden für eine mechanische Weiterverarbeitung. Bei der Sorte 'Tonda di Giffoni' sind Länge und Breite der Früchte fast identisch (Taghavi et al., 2020). Ein weiterer Nachteil von Lambertnüssen und Lamberthybriden ist der geschlossene Kelch, der, nachdem die Nüsse vom Baum gefallen sind, häufig mit der Frucht verbunden bleibt und somit aufwendig mechanisch zu entfernen ist. Bei Zellernüssen fallen die meisten Früchte aus dem Kelch und können anschließend mechanisch aufgelesen oder -gesaugt werden (Kirchmeier & Demmel, 2010). Qualitätseigenschaften und Inhaltsstoffe der Früchte bei den untersuchten Sorten sowie ihr Wuchsverhalten wurden in einer vorherigen Studie beschrieben (Müller et al., 2020).

Die jährlichen Schwankungen im Anteil an leeren Nüssen können auf die Faktoren Luftfeuchtigkeit, Einstrahlung, Niederschlag und Bewässerung zurückgeführt werden (Silva et al., 1996): Eine hohe Einstrahlung sowie eine ausreichende Bewässerung reduzieren den Anteil leerer Nüsse (Bignami et al., 2009), während Niederschläge und eine hohe Luftfeuchtigkeit den Anteil an leeren Nüssen fördern (Silva et al., 1996).

Das Spindelsystem hat im Vergleich zu Systemen mit mehreren Stämmen den Vorteil, dass die unteren und inneren Bereiche der Krone besser belichtet werden. Das soll zu einer gleichmäßigen Fruchtqualität führen, denn eine ausreichende Belichtung ist die Grundlage für die Blütenbildung und eine hohe Fruchtqualität (Hampson et al., 1996). Zudem sind die Kronen leicht zugänglich, was vorteilhaft beim Schnitt und bei der Benetzung aller Baumteile beim Pflanzenschutz ist. Um die Belichtung der inneren Bereiche der Baumkronen sicherzustellen, ist im Spindelsystem ein jährlicher Schnitt erforderlich. Roversi & Malvicini (2014) geben bei zehnjährigen Bäumen im Pflanzabstand $5 \text{ m} \times 6 \text{ m}$ einen Zeitbedarf für den Schnitt von maximal 177 Sekunden pro Pflanze an, was einem Zeitbedarf von 15 h ha^{-1} entspricht. Im hier beschriebenen Versuch lag 2011 der mittlere Zeitbedarf für den Schnitt leicht, im Jahr 2012 deutlich darüber. Die Unterschiede zwischen den beiden Jahren sind darauf zurückzuführen, dass 2012 einige starke Leittriebe eingekürzt wurden, was zu einem höheren Zeitbedarf für den Schnitt als in 2011 führte. Zusätzlich zum Kronenschnitt sind bei unveredelten Haselnusspflanzen jährlich Wasserschosser zu entfernen. Wegen einer hohen Anzahl an Wasserschossern in Kombination mit niedrigen Fruchtgewichten ist die Sorte 'Rotblättrige Lambertnuss' nicht für den erwerbsmäßigen Anbau geeignet. Die Anzahl an Wasserschossern pro Baum ist bei den restlichen Sorten ähnlich derjenigen aus vorherigen Anbauversuchen (Tous et al., 2009; Rovira et al., 2014). Der Zeitbedarf für das Entfernen der Wasserschosser zusammen mit dem Schnitt lag

etwas unter dem Schnittbedarf für Apfelproduktionsanlagen von ca. 80 h ha^{-1} (Verbiest et al., 2020).

Fazit

Die Ergebnisse dieses Sortenversuches zeigten, dass sich verschiedene Sorten für den Anbau im Spindelsystem in Mitteldeutschland eignen. Zellernüsse sind, aufgrund der runden Form und der hohen Lösbarkeit der Frucht aus dem Kelch, für den Anbau generell zu bevorzugen. Die Sorten 'Eckige Barceloner' und 'Emoa 1' hatten die höchsten Erträge, während die Sorten 'Corabel', 'Hallesche Riesennuss' und 'Wunder aus Bollweiler' die größten Fruchtmassen erzielten. Die Sorte 'Corabel' hatte zusätzlich den geringsten Anteil an leeren Nüssen. Die Sorten 'Emoa 1' und 'Gunslebener Zellernuss' zeigten die geringste Bildung von Wurzelschossern, und zusätzlich war bei 'Emoa 1' der Zeitbedarf für den Winterschnitt am geringsten. In einem intensiven Anbausystem hat die Sortenwahl einen entscheidenden Einfluss auf die Wirtschaftlichkeit von Haselnussanlagen.

Danksagung

Für die technische Unterstützung danken die Autoren Nadja Funke, Matthias Möhler und Michael Schmidt.

Beiträge der einzelnen Autoren

Martin Penzel: Statistische Auswertung, Verfassen vom Text sowie Überarbeitung der Revision

Monika Möhler: Planung und Durchführung des Versuches, Datenerfassung

Erklärung zu Interessenskonflikten

Der Autor und die Autorin erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Auswertungs- und Informationsdienst für Ernährung, Landwirtschaft und Forsten (AID), 1960: Deutscher Nußkatalog 1960 – Richtlinien für den Wal- und Haselnußanbau, Land- und Hauswirtschaftlicher Informationsdienst, Bonn/Bad Godesberg.

Bak, T., T. Karadeniz, 2021: Effects of branch number on quality traits and yield properties of European hazelnut (*Corylus avellana* L.). *Agriculture* **11**, 437, DOI: 10.3390/agriculture11050437.

Beyhan, N., 2007: Effects of planting density on yield and quality characteristics of hazelnut (cv. Palaz) in a hedgerow training system. *Canadian Journal of Plant Science* **87**, 595–597, DOI: 10.4141/P05-064.

Bignami, C., V. Cristofori, P. Ghini, E. Rugini, 2009: Effects of irrigation on growth and yield components of hazelnut (*Corylus avellana* L.) in Central Italy. *Acta Horticulturae* **845**, 309–314, DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.845.47.

- Bregaglio, S., K. Fischer, F. Ginaldi, T. Valeriano, L. Giustarini, 2021:** The HADES yield prediction system – A case study on the Turkish hazelnut sector. *Frontiers in Plant Science* **12**, 665471, DOI: 10.3389/fpls.2021.665471.
- Büttner, C.G., 1798:** Die hallische Riesen-Nuß. In: Sickler, J.V.: *Der Teutsche Obstgärtner*, Band 10, Weimar, Industrie-Comptoir, 346-351.
- Črepinšek, Z., F. Štampar, L. Kajfež-Bogataj, A. Solar, 2012:** The response of *Corylus avellana* L. phenology to rising temperature in north-eastern Slovenia. *International Journal of Biometeorology* **56** (4), 681-69, DOI: 10.1007/s00484-011-0469-7.
- Statistisches Bundesamt (DESTATIS), 2021:** Land- und Forstwirtschaft, Fischerei. Bodennutzung der Betriebe (Landwirtschaftlich genutzte Flächen). Fachserie 3, Reihe 3.1.2.
- Dinno, A., 2017:** Dunn's test of multiple comparisons using rank sums. R-Package 'dunn.test'. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/dunn.test/dunn.test.pdf>.
- Đurić, G., P. Ilić, G. Mičić, N. Mičić, 2021:** Hazel cultivation in Bosnia and Herzegovina. *Acta Horticulturae* **1308**, 133-140, DOI: 10.17660/ActaHortic.2021.1308.20.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), 2021:** Faostat Datenbank. URL: <https://www.fao.org>, Zugriff: 03.03.2022.
- Friedrich, G., 1993:** Haselnüsse. In: Friedrich, G. (Hrsg.): *Handbuch des Obstbaus*, Radebeul, Neumann Verlag GmbH, 286-288.
- Germain, E., J.P. Sarraquigne, 1997:** Hazelnut training systems: comparison between three systems used on three varieties. *Acta Horticulturae* **445**, 237-246, DOI: 10.17660/ActaHortic.1997.445.33.
- Gökirmak, T., S.A. Mehlenbacher, N.V. Bassil, 2009:** Characterization of European hazelnut (*Corylus avellana*) cultivars using SSR markers. *Genetic Resources and Crop Evolution* **56**, 147-172, DOI: 10.1007/s10722-008-9352-8.
- Hampson, C.R., A.N. Azarenko, J.R. Potter, 1996:** Photosynthetic rate, flowering, and yield component alteration in hazelnut in response to different light environments. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **121** (6), 1103-1111, DOI: 10.21273/JASHS.121.6.1103.
- Holst, D., 2010:** Hazelnut economy of early Holocene hunter-gatherers: a case study from Mesolithic Duvensee, Northern Germany. *Journal of Archaeological Science* **37** (11), 2871-2880, DOI: 10.1016/j.jas.2010.06.028.
- Ilić, P., N. Mičić, G. Đurić, S. Tojnko, A. Solar, B. Bosančić, 2017:** Pomological identification of hazel cultivars (*Corylus avellana* L.) in plantations in Bosnia and Herzegovina. *Agricolturae Conspectus Scientificus* **84**, 389-394, URL: <https://hrcak.srce.hr/193535>.
- Ilić, P., G. Đurić, N. Mičić, H. Flachowsky, 2018:** Dynamics of flowering of male and female inflorescence and pollen germination of hazel in the conditions of the Banja Luka region. *Acta Horticulturae* **1229**, 313-318, DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1229.47.
- Kirchmeier, H., M. Demmel, 2010:** Mechanisierung des Haselnussanbaus in Deutschland. *Landtechnik* **65** (4), 290-292, DOI: 10.15150/lt.2010.504.
- Mehlenbacher, S.A., 2014:** Geographic distribution of incompatibility alleles in cultivars and selections of European hazelnut. *Journal of the American Society for Horticultural Science* **139** (2), 191-212, DOI: 10.21273/JASHS.139.2.191.
- Müller, A.K., U. Helms, C. Rohrer, M. Möhler, F. Hellwig, M. Glei, T. Schwerdtle, S. Lorkowski, C. Dawczynski, 2020:** Nutrient composition of different hazelnut cultivars grown in Germany. *Foods* **9**, 1596, DOI: 10.3390/foods9111596.
- Piskornik, Z., 1994:** Hazelnut culture in Poland – the past, present and future in outline. *Acta Horticulturae* **351**, 49-54, DOI: 10.17660/ActaHortic.1994.351.3.
- R Core Team, 2018:** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, URL: <https://www.R-project.org/>.
- Roversi, A., G.L. Malvicini, 2014:** Effects of manual pruning on hazelnut yield and fruit quality. *Acta Horticulturae* **1052**, 175-178, DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1052.22.
- Rovira, M., 2021:** Advances in hazelnut (*Corylus avellana* L.) rootstocks worldwide. *Horticulturae* **7**, 267, DOI: 10.3390/horticulturae7090267.
- Rovira, M., J. Tous, J.F. Hermoso, A. Romero, 2014:** Performance of eleven hazelnut cultivars from different countries in Tarragona (Spain). *Acta Horticulturae* **1052**, 35-40, DOI: 10.17660/ActaHortic.2014.1052.3.
- Schepers, H.T.A.M., E.F.J. Kwanten, 2005:** Selection and breeding of hazelnut cultivars suitable for organic cultivation in the Netherlands. *Acta Horticulturae* **686**, 87-90, DOI: 10.17660/ActaHortic.2005.686.9.
- Silva, A.P., R.M. Ribeiro, A. Santos, E. Rosa, 1996:** Blank fruits in hazelnut (*Corylus avellana* L.) cv. 'Butler': characterization and influence of climate. *Journal of Horticultural Science* **71** (5), 709-720, DOI: 10.1080/14620316.1996.11515451.
- Sokol, M., 2018:** Cultivation of hazelnut tree trained with double vertical spindle shape. *Acta Horticulturae* **1226**, 251-254, DOI: 10.17660/ActaHortic.2018.1226.37.
- Taghavi, T., A. Dale, J.M. Kelly, D. Galic, A. Rahemi, 2020:** Performance of hazelnut cultivars and selections in southern Ontario. *Canadian Journal of Plant Science* **100**, 537-548, DOI: 10.1139/cjps-2019-0161.
- Tous, J., A. Romero, M. Rovira, J.F. Hermoso, 2009:** Performance of 'Negret' 149 hazelnut cultivar grafted on 4 rootstocks in Catalonia (Spain). *Acta Horticulturae* **845**, 89-94, DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.845.8.
- Verbiest, R., K. Ruysen, T. Vanwallegghem, E. Demeester, K. Kellens, 2020:** Automation and robotics in the cultivation of pome fruit: Where do we stand today? *Journal of Field Robotics* **38** (4), 513-531, DOI: 10.1002/rob.22000.
- Wertheim, S.J., 1994:** Hazelnut-cultivar evaluation in The Netherlands. *Acta Horticulturae* **351**, 71-78, DOI: 10.17660/ActaHortic.1994.351.7.

Bastian Heß¹, Jenny Jacobs, Gritta Schrader², Anne Wilstermann³

Forschungsprojekt ‚WATARA-MODE‘ (Waren- und Taxon basierte Risikoanalysen und Modellierung quantifizierter Pflanzenschäden zur dynamischen Kosten-Nutzen-Analyse pflanzengesundheitlicher Maßnahmen) im Februar 2022 offiziell gestartet

Affiliation

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

Kontaktanschrift

Bastian Heß, Julius Kühn-Institut (JKI) – Bundesforschungsinstitut für Kulturpflanzen, Institut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit, Messeweg 11/12, 38104 Braunschweig, E-Mail: bastian.hess@julius-kuehn.de

WATARA-MODE ist ein dreijähriges Projekt am Fachinstitut für nationale und internationale Angelegenheiten der Pflanzengesundheit des Julius Kühn-Instituts (JKI) in Braunschweig. Ziel des Projektes ist die Durchführung von Waren- und Taxon basierten Risikoanalysen sowie die Modellierung quantifizierter Schäden an Pflanzen, um die Notwendigkeit und den Umfang pflanzengesundheitlicher Maßnahmen mit Hilfe einer dynamischen Kosten-Nutzen-Analyse besser einschätzen zu können. Das Projekt gliedert sich in zwei Bereiche: Im **ersten Teil** werden Frühwarnlisten bisher unbekannter potenzieller Quarantäneschadorganismen (QSO; Horizon Scanning) anhand zweier Fallstudien erstellt: In der ersten Studie sollen, basierend auf einem in dem EU-Projekt DROPSA (Strategies to develop effective, innovative, and practical approaches to protect major European fruit crops from pests and pathogens) entwickelten Priorisierungsverfahren, potentielle QSO ermittelt werden, die mit der Einfuhr von Bambus nach Deutschland und in die EU verschleppt werden könnten. Bambus wird mehr und mehr auch als Verpackungsmaterial verwendet, da es, anders als Verpackungen aus Holz, keinen pflanzengesundheitlichen Regelungen unterliegt. In der zweiten Studie soll die weltweit verbreitete und mehr als 3000 Arten umfassende Prachtkäfergattung *Agrilus spp.* auf potenzielle QSO gescreent werden. Im Projekt findet eine erste Abschätzung des pflanzengesundheitlichen Risikos durch die identifizierten Schadorganismen statt und es werden kurze Datenblätter für die relevanten Organismen erstellt, die der Europäischen und Mediterranen Pflanzenschutzorganisation (EPPO) zur Verfügung gestellt werden sollen. Die Risiken werden national und international kommuniziert. Dieses Verfahren hilft, mögliche Risiken rechtzeitig zu erkennen und vorsorglich Maßnahmen zu entwickeln, um ihnen frühzeitig zu begegnen. Im **zweiten Teil** des Projektes wird ein Modell zur Ermittlung von Schadensschwellen nicht-heimischer Pflanzenschadorganismen zur wissenschaftlichen Bewertung der Verhältnismäßigkeit von Maßnahmen (Kosten-Nutzen-Analyse) erstellt. Etablierungs- und Ausbreitungsmodellierung stellen zusammen mit der Populationsentwicklung und Wirtspflanzenverbreitung die Grundlage für eine Modellierung des potentiellen Schadens dar. Das Modell wird auf dem im bereits abgeschlossenen BMEL-Projekt ProgRAMM entwickelten Modell MoPsi basieren (Heß et al., 2020). Durch die Verknüpfung von Ausbreitungs-, Populations- und Wirtspflanzenmodellen mit einem zu entwickelnden Schadensanalyse-

modell können die durch die Schadorganismen verursachten Schäden abgeschätzt und die Auswirkungen verschiedener Behandlungsmöglichkeiten dargestellt werden (Abb.). Auf dieser Basis können Schwellenwerte für konkrete Handlungsempfehlungen ermittelt werden, z. B. ob Maßnahmen überhaupt durchgeführt werden sollen, welche Maßnahme oder Maßnahmenkombination in Frage kommt usw. Kern des zu entwickelnden Schadensanalysemodells ist die dynamische Gegenüberstellung ökonomischer, sozialer und ökologischer Schäden mit den Kosten unterschiedlicher pflanzengesundheitlicher Maßnahmen zur Schadensminimierung. Letztendlich soll das Modell eine Unterstützung bei der Identifizierung effizienter, praxistauglicher Strategien zur Vermeidung der Einschleppung oder weiteren Verbreitung (einschließlich Verringerung von Schäden) und zur Bekämpfung von Schadorganismen liefern.

Der Fokus liegt dabei zunächst auf dem Asiatischen Laubholzböckkäfer (*Anoplophora glabripennis*), dem Japankäfer (*Popi-*

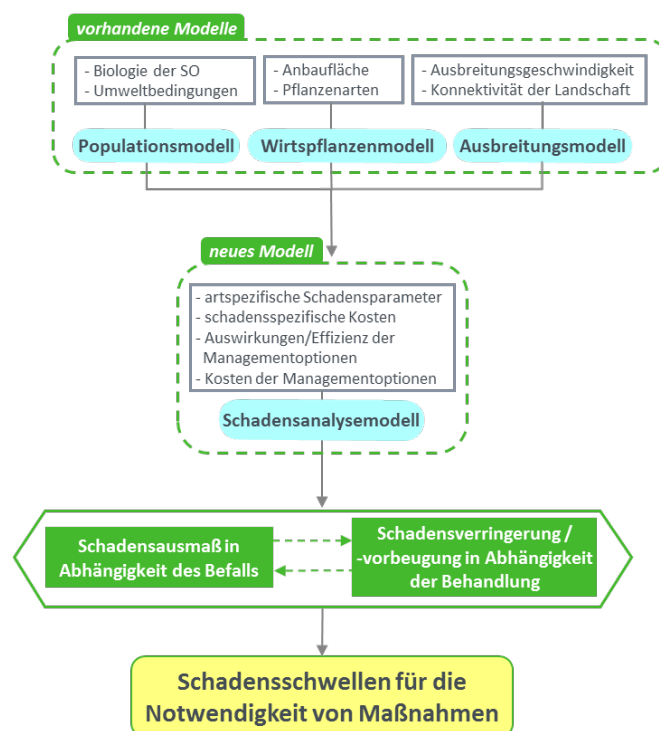


Abb. Modellkonzept des Projektes WATARA-MODE

lia japonica), der Marmorierten Baumwanze (*Halyomorpha halys*), der Mittelmeerfruchtfliege (*Ceratitis capitata*), dem Asiatischen Eschenprachtkäfer (*Agrilus planipennis*) und dem Bronzefarbenen Birkenbohrer (*Agrilus anxius*) sowie auf weiteren potentiell gefährlichen Arten, die durch das erste Teilprojekt identifiziert werden.

WATARA-MODE (Förderkennzeichen: 2818716X19) ist eines der Projekte aus den Themenfeldern Pflanzenschutz und Pflanzengesundheit, gefördert im Rahmen des Programms zur Innovationsförderung des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft. Projektträger ist die Bundesanstalt für Landwirtschaft und Ernährung (ptble).

Erklärung zu Interessenskonflikten

Der Autor/die Autorinnen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Heß, B., P. Baufeld, A. Raja Dominic, C. Menz, A. Reißig, J. Strassemeyer, T. Waldau, A. Wilstermann, O. Zimmermann, G. Schrader, 2020: Modellierung klimasensitiver Schadorganismen in der Pflanzengesundheit. *Journal für Kulturpflanzen* **72** (8), 435–439, DOI: 10.5073/JfK.2020.08.14.

152 | Termine und Veranstaltungen

Juni/June

02.06.2022 | Dahnsdorf

Feldversuchstag JKI-Versuchsfeldstandort Dahnsdorf<https://www.julius-kuehn.de/veranstaltungen/veranstaltung/news/feldversuchstag-jki-versuchsfeldstandort-dahnsdorf-2/>

Veranstalter: JKI

Kontakt im JKI: Schwarz, Jürgen

E-Mail: Juergen.Schwarz@julius-kuehn.de

14. – 16.06.2022 | Gut Brockhof Erwitte/Lippstadt

DLG Feldtage – Der Treffpunkt für Pflanzenbauprofis<https://www.dlg-feldtage.de/de/>

28.06.2022 | Dresden

Cherry Day – 2022<https://www.julius-kuehn.de/veranstaltungen/veranstaltung/news/cherry-day-2022/>

Veranstalter: JKI, VSUO,

Kontakt im JKI: mirko.schuster@julius-kuehn.de

Juli/July

09. – 13.07.2022 | Portland

The Annual Plant Biology Meeting<https://aspb.org/meetings-events/>

Kontakt: Jean Rosenberg

Veranstalter: ASPB

E-Mail: jean@aspb.org

10. – 17.07.2022 | Landau/ Pfalz

XIII. International Symposium on Grapevine Breeding and Genetics<https://gbg2022.julius-kuehn.de>

Kontakt: Werner Köglmeier

E-mail: zr@julius-kuehn.de

25. – 27.07.2022 | online

Unleashing Fertilizer Use in the Belt and Road Initiative<https://ciec.iae.ac.cn/>

Veranstalter: CIEC

Kontakt im JKI: Haneklaus, Silvia

E-Mail: silvia.haneklaus@julius-kuehn.de

September/September

06. – 09.09.2022 | Dresden-Pillnitz

Third International Symposium on Fire Blight of Rosaceous Plants<https://3rd-fireblightsymposium.julius-kuehn.de/>

Veranstalter: JKI

Kontakt: Andreas Peil

E-Mail: andreas.peil@julius-kuehn.de

13. – 15.09.2022 | Freising

9. Tagung für Arznei- und Gewürzpflanzenforschung<https://www.dfa-aga.de/tagung.html>

Veranstalter: LfL, HSWT,

E-Mail: 9TAUG2021@LfL.bayern.de

14. – 16.09.2022 | hybrid conference

Tropentag 2022**Kann agroökologische Landwirtschaft die Welt ernähren?****Ansichten der Landwirte und der Wissenschaft**<https://www.tropentag.de/>

25.09. – 01.10.2022 | Girona, Spain

Joint Meeting of the IOBC/WPRS Working Groups “Pheromones and other semiochemicals in IP” & “Integrated Protection of Fruit Crops”<https://www.pherofruits2022.com/>

Kontakt im JKI: Jürgen Gross

E-Mail: Juergen.Gross@julius-kuehn.de

2023**Januar/January**

30. – 31.01.2023 | Braunschweig

36. Tagung des DPG-Arbeitskreises<https://www.julius-kuehn.de/veranstaltungen/veranstaltung/news/36-tagung-des-dpg-arbeitskreises/>

36-tagung-des-dpg-arbeitskreises/

31.01.2023 | Braunschweig

17. Treffen des Fachausschuss Pflanzenschutzmittelresistenz – Fungizide<https://www.julius-kuehn.de/veranstaltungen/veranstaltung/news/17-treffen-des-fachausschuss-pflanzenschutzmittelresistenz-fungizide/>

17-treffen-des-fachausschuss-pflanzenschutzmittelresistenz-fungizide/

Veranstalter: JKI

Kontakt: Bernd Rodemann

E-Mail: bernd.rodemann@julius-kuehn.de

Februar/February

20. – 23.02.2023 | Bozen, Italien

22. Entomologentagung der Deutschen Gesellschaft für allgemeine und angewandte Entomologie e.V. (DGaE)<https://www.dgaee.de/de/>

Kontakt am JKI: Jürgen Gross

Mail: juergen.gross@julius-kuehn.de

OpenAgrar – Das Repositorium der BMEL-Ressortforschung

Sind Sie interessiert an weiterer Literatur aus den Ressortforschungseinrichtungen des Bundesministeriums für Ernährung und Landwirtschaft?

Dann besuchen Sie OpenAgrar – Das Repositorium des Deutschen Biomasseforschungszentrums (DBFZ), Julius Kühn-Instituts (JKI), Friedrich-Loeffler-Instituts (FLI), Max Rubner-Instituts (MRI), Thünen-Instituts (TI) und des Bundesinstituts für Risikobewertung (BfR).

OpenAgrar erreichen Sie unter folgender URL: <https://www.openagrar.de>.

The screenshot displays the OpenAgrar website interface. At the top left is the logo "OA OPEN AGRAR". To the right is a navigation bar with a grid of agricultural images and a "Anmelden DE" link. Below the grid are logos for the Federal Government of Germany, DBFZ, JKI, FLI, MRI, THÜNEN, and BfR. A search bar with a magnifying glass icon and the text "Schnellsuche" is followed by buttons for "Suche", "Blättern", "Merkliste 0", and "Registrieren". The main content area shows "Suchergebnis" and "142286 Dokumente gefunden". At the bottom, there is a filter dropdown set to "Alles" and a search button labeled "Suchen", along with a button to "Alle Treffer dieser Seite merken".

Journal für Kulturpflanzen

Journal of Cultivated Plants

Inhalt: Band 74 (05-06). S. 97-152, 2022, ISSN 1867-0911

Übersichtsarbeiten

Deniz Baltaci, Dagmar Borchmann

Anwendung von Phosphorwasserstoff gegen Arthropoden im Vorratsschutz unter besonderer Berücksichtigung der Resistenzproblematik weltweit und für Deutschland – Ein Übersichtsartikel

Phosphine against arthropods in stored product protection with special consideration of the resistance problem worldwide and in Germany: A review article

_____ 97

Barbara Steinhoff

Das Jakobskreuzkraut (*Jacobaea vulgaris* Gaertn.) und andere Greiskräuter auf Kulturland und Weideflächen: Vorkommen, Bedeutung und landschaftspflegerische Maßnahmen

Tansy ragwort (*Jacobaea vulgaris* Gaertn.) and other groundsels on cultivated land and pastures: occurrence, importance and landscape management measures

_____ 109

Originalarbeiten

Anika Zacher, Peter Leinweber, Kerstin Panten

Sulfur-enriched bone char enhances P uptake by maize in a perennial pot experiment

Schwefel-angereicherte Knochenkohle erhöht P-Aufnahme von Mais in einem mehrjährigen Gefäßversuch

_____ 124

I Wayan Sudika, I Nyoman Soemeinaboedhy

The improvement of corn yield and fresh stover weight through two mass selection techniques in dry land

Verbesserung des Maisertrags und des Frischstrohgewichts durch zwei Massenselektionstechniken in Trockengebieten

_____ 134

Martin Penzel, Monika Möhler

Ertragsleistung von 14 Haselnussorten über 12 Jahre im Spindelsystem

Yield performance of 14 hazelnut cultivars grown for 12 years in a spindle system

_____ 142

Nachrichten

Bastian Heß, Jenny Jacobs, Gritta Schrader, Anne Wilstermann

Forschungsprojekt ‚WATARA-MODE‘ (Waren- und Taxon basierte Risikoanalysen und Modellierung quantifizierter Pflanzenschäden zur dynamischen Kosten-Nutzen-Analyse pflanzengesundheitlicher Maßnahmen) im Februar 2022 offiziell gestartet

_____ 150

Termine und Veranstaltungen

_____ 152

Unser Titelbild:

Verkostung neuer und alter Haselnussorten am Stand vom Thüringer Landesamt für Landwirtschaft und Ländlichen Raum (TLLLR) auf der BUGA 2021 in Erfurt. Foto: Dr. Martin Penzel (TLLLR), Lizenziert unter CC-BY 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/deed.de>).