

Innovative Anbausysteme zur Reduktion von *Fusarium*-Mykotoxinen in Weizen

Dimitrios Drakopoulos, Alejandro Gimeno, Andreas Kägi, Eveline Jenny, Irene Bänziger, Tomke Musa, Hans-Rudolf Forrer und Susanne Vogelgsang

Agroscope, 8046 Zürich, Schweiz

Auskünfte: Susanne Vogelgsang, E-Mail: susanne.vogelgsang@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs12-16g> Publikationsdatum: 3. Februar 2021



Symptome der Ährenfusariose bei Weizen. (Foto: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope)

Zusammenfassung

Die Ährenfusariose ist eine verheerende Pilzkrankheit bei Weizen, die weltweit zu Ernteaufschlägen und Belastung der Körner mit Mykotoxinen wie Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEN) führt. Eine wirksame Reduktion des Mykotoxingehalts ist im Hinblick auf die Nahrungs- und Futtermittelsicherheit von grosser Bedeutung. Um *Fusarium*-Mykotoxine im Rahmen einer Mais-Weizen-Fruchtfolge und pfluglosem Anbau zu senken, haben wir drei innovative Anbausysteme (i-iii) untersucht: (i) «Cut-and-carry»-Biofumigation, (ii) Mais-Untersaat und (iii) Zwischenfrüchte. Durch die Verwendung von Weisssem oder Braunem Senf für die «Cut-and-carry»-Biofumigation, durch Untersaat bei Körnermais oder durch den Anbau von Zwischenfrüchten nach Silomais wurde die Mykotoxin-Belastung in der nachfolgenden Weizenkultur deutlich (um 32–76 %) reduziert. Die Verwendung von Alexandriner-Klee für die «Cut-and-carry»-Biofumigation sowie Winter-

futtererbsen als Zwischenfrucht senkten die Mykotoxingehalte im Weizen am stärksten (53–87 %). Ausserdem wurde durch den Einsatz der «Cut-and-carry»-Biofumigation und durch Zwischenfrüchte der Winterweizen-Ertrag um bis zu 15 % und der Sommerweizen-Ertrag um bis zu 25 % erhöht. Basierend auf diesen Ergebnissen schlagen wir eine Reihe alternativer Anbausysteme vor, mit welchen die Mykotoxin-Belastung in Weizen wirksam reduziert und die Nahrungs- und Futtermittelsicherheit verbessert wird. Da die vorgeschlagenen Anbausysteme jedoch die Produktionskosten erhöhen können, sollten die wirtschaftlichen Abstriche genau bewertet werden. Dies ermöglicht ein sorgfältiges Abwägen zwischen der Nahrungs- bzw. Futtermittelsicherheit und der Wirtschaftlichkeit.

Key words: *Fusarium*, mycotoxin, biofumigation, intercrop, cover crop.

Einleitung

Die Ährenfusariose ist eine verheerende Pilzkrankheit bei Weizen, die zu Ernteaussfällen und Belastung der Körner mit Mykotoxinen wie Deoxynivalenol (DON) und Zearalenon (ZEN) führt, welche die Gesundheit von Mensch und Tier gefährden (Parry *et al.* 1995). Um die negativen Auswirkungen auf die Gesundheit zu reduzieren, hat die Europäische Kommission Höchstgehalte für bestimmte Mykotoxine in Lebensmitteln festgelegt (z.B. 1250 bzw. 100 µg kg⁻¹ für DON bzw. ZEN in unverarbeitetem Getreide), die auch in der Schweiz gelten (European Commission, 2006). In den meisten Regionen der Welt, einschliesslich der Schweiz, ist der wichtigste Erreger der Ährenfusariose bei Weizen der Pilz *Fusarium graminearum* (Osborne und Stein 2007). Er gehört zur Gruppe der Askomyzeten (Schlauchpilze), die sich sowohl asexuell als auch sexuell (Hauptfruchtform *Gibberella zeae*) über Makrokonidien bzw. Askosporen vermehren. Insbesondere die Askosporen infizieren die Ähren während der Blüte im Frühling (Trail 2009). In Abbildung 1 ist der Lebenszyklus von *F. graminearum* in einer Mais-Weizen-Fruchtfolge dargestellt.

Eine geeignete Fruchtfolge mit Kulturpflanzen, die für den Pilz nicht als Wirtspflanzen dienen, sowie das gründliche Unterpflügen von gemulchten Ernterückständen sind wirksame Anbaupraktiken, um den Fusarienbefall zu verhindern (Gilbert und Haber 2013). Eine reduzierte Bodenbearbeitung hat hingegen verschiedene Vorteile, namentlich die Erhaltung der Bodenqualität (Six *et al.* 2000). In der Schweiz werden den Landwirtschaftsbetrieben für eine reduzierte Bodenbearbeitung Direktzahlungen zugesprochen, die 2018 für 28 % der Acker-

flächen in Anspruch genommen wurden (WBF, 2019). Sehr viele Betriebe bauen Weizen nach Mais an, weil die jeweiligen Aussaat- und Erntezeitpunkte gut in den Fruchtfolgeablauf passen. Neben der geeigneten Fruchtfolge und Bodenbearbeitung stehen weitere Massnahmen wie der Anbau weniger anfälliger Sorten und der Einsatz synthetischer Fungizide zur Reduktion von Fusarien zur Verfügung. Die meisten Weizensorten weisen jedoch eine mittlere bis hohe Anfälligkeit auf und die Wirksamkeit der Fungizide ist aufgrund des kurzen Anwendungszeitfensters und der Entwicklung resistenter Pilzstämme unzuverlässig (Wegulo *et al.* 2015; Beres *et al.* 2018). Zudem besteht ein immer stärkeres Bestreben, auf synthetische Pflanzenschutzmittel zu verzichten. Im Jahr 2017 verabschiedete der Schweizerische Bundesrat einen Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln (BLW, 2017). Daher muss nach neuen Strategien gesucht werden, um den Befall mit Fusarien und die Belastung der Ernteprodukte mit Mykotoxinen zu vermeiden. In der vorliegenden Studie haben wir das Potenzial folgender Anbausysteme zur Reduktion von *Fusarium*-Mykotoxinen in Weizen untersucht: (i) «Cut-and-carry»-Biofumigation (Drakopoulos *et al.*, 2020), (ii) Mais-Untersaat und (iii) Zwischenfrüchte (Abb. 2).

Material und Methoden

«Cut-and-carry»-Biofumigation

In der Feldsaison 2016/2017 und 2017/2018 wurden an Agroscope-Reckenholz in Zürich Feldversuche durchgeführt. Es wurde eine Mais-Weizen-Fruchtfolge mit hohem Befallsrisiko simuliert, indem Maisstängel mit

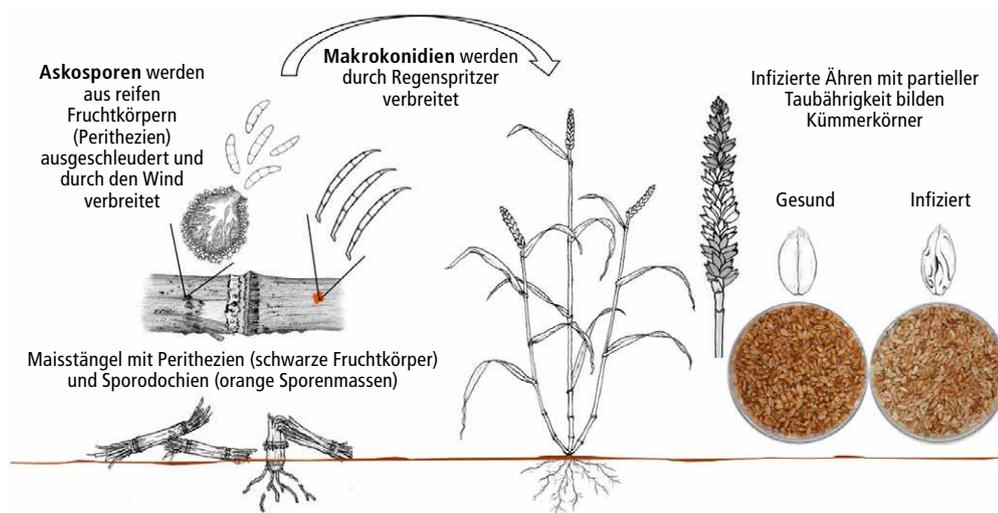


Abb. 1 | Lebenszyklus von *Fusarium graminearum* in einer Mais-Weizen-Fruchtfolge. (Zeichnungen: Jonas Lehner, Agroscope; Fotos: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope)

F. graminearum beimpft und anschliessend auf dem Feld verteilt wurden. Der Feldversuch wurde in einer randomisierten vollständigen Blockanlage mit vier Blöcken angelegt. Die Unterparzellen bestanden aus den beiden Winterweizensorten Levis und Forel. Für die «Cut-and-carry»-Biofumigation wurden nach der Weizen-Aussaat im Herbst Mulch-Schichten verschiedener Zwischenfrüchte auf die infizierten Maisstängel ausgebracht: Weissler Senf (*Sinapis alba*, Sorte Admiral),

Brauner Senf (*Brassica juncea*, Sorte Vittasso) und Alexandriner-Klee (*Trifolium alexandrinum*, Sorte Tabor). Es wurde jeweils frische oberirdische Biomasse von unterschiedlichen Feldern gesammelt, diese in 4–6 cm lange Stücke geschnitten und von Hand auf den Unterparzellen verteilt. Als Kontrolle dienten mit *F. graminearum* infizierte Maisstängel ohne Mulch-Schichten. In jeder Parzelle wurde während der Blüte eine Sporenfalle (Abb. 3) mit *Fusarium*-selektivem Nährmedium platziert,



Abb. 2 | Anbausysteme zur Bekämpfung der Ährenfusariose und zur Reduktion von Mykotoxinen in Weizen in einer Mais-Weizen-Fruchtfolge in pfluglosem Anbau: (i) «Cut-and-carry»-Biofumigation. Unbehandelte Maisstängel als Kontrollbehandlung (links); Mulch-Schicht aus Braunem Senf bedeckt die Maisstängel (rechts). (ii) Mais-Untersaat. Mais ohne Untersaat als Kontrollbehandlung (links); Untersaat-System Mais-Weisser Senf (rechts). (iii) Zwischenfrüchte nach Silomais. Herbizid ohne Zwischenfrucht als Kontrollbehandlung (links); Winterfuttererbsen als Zwischenfrucht (rechts). (Fotos: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope)

um Askosporen in der Luft nachzuweisen, welche von den Fruchtkörpern (Perithezien) von *F. graminearum* ausgeschleudert wurden. Für jedes Verfahren wurde die Gesamtzahl sich entwickelnder *Fusarium*-Kolonien (Kolonien bildende Einheiten, KBE) zu drei Zeitpunkten während der Weizenblüte ermittelt. Für die Einschätzung der Krankheitsinzidenz im Feld wurde pro Unterparzelle von zehn Ähren an zehn verschiedenen Stellen die Anzahl Ähren mit typischen Symptomen bestimmt. Zur Ermittlung des Ertrags wurde der Weizen mit einem Parzellen-Mähdrescher geerntet und auf 12 % Wassergehalt getrocknet. Die Mykotoxine DON und ZEN in den Weizenkörnern wurden mit Hilfe eines antikörperbasiereten Nachweisverfahrens (ELISA: *Enzyme-linked Immunosorbent Assay*) quantifiziert.

Mais-Untersaaten

Für die Mais-Untersaat-Versuche wurden 2016/2017 und 2018/2019 an Agroscope-Tänikon in Ettenhausen Feldversuche mit einem Split-Split-Plot-Design mit vier Blöcken angelegt. Das Design berücksichtigte zwei Bodenbearbeitungssysteme (keine bzw. eine reduzierte Bodenbearbeitung), fünf Mais-Untersaat-Systeme (Rotklee (*Trifolium pratense*, Sorte Pastor), Sudangras (*Sorghum × drummondii*, Sorte HayKing II Hi-Gest®), Phacelia (*Phacelia tanacetifolia*, Sorte Angelia), Weisser Senf (Sorte Admiral), Brauner Senf (Sorte Vittasso)) und ausschliesslich Mais (keine Untersaat) als Unterparzellen. Zwei Winterweizen-Sorten (Levis und Forel) dienten als Unter-Unterparzellen. Der Körnermais (Sorte Laurinio) wurde auf dem gesamten Feld ausgesät und das Saatgut der Untersaat wurde mit einem pneumatischen Sägerät (APV-Streuer) in den Mais-Entwicklungsstadien BBCH 13–15 ausgebracht. Nach der Ernte des Körnermais mit dem Parzellen-Mähdrescher wurden die Mais- und Untersaat-Rückstände entweder auf der Bodenoberfläche gemulcht (keine Bodenbearbeitung) oder nach dem Mulchen mit einem Rototiller in einem Durchgang in die oberste Bodenschicht (ca. 10 cm tief) eingearbeitet (reduzierte Bodenbearbeitung). Anschliessend wurde der Winterweizen im Direktsaatverfahren gesät. Die Krankheitsinzidenz im Feld und der Weizen-Körnerertrag wurde wie oben beschrieben ermittelt. Der Mykotoxingehalt in den Körnern wurden mittels Flüssigchromatographie mit Massenspektrometrie-Kopplung gemessen.

Zwischenfrüchte

2016/2017 und 2017/2018 wurden an Agroscope-Reckenholz und Agroscope-Tänikon Feldversuche mit einem Split-Plot-Design mit vier Blöcken angelegt. Das Design berücksichtigte fünf Anbausysteme: Herbizid ohne Zwi-



Abb. 3 | Sporenfalle mit selektivem Nährmedium für *Fusarium*-Arten, angebracht auf derselben Höhe wie die blühenden Weizenähren. (Design: Hans-Rudolf Forrer, Agroscope; Foto: Dimitrios Drakopoulos, Agroscope)

schenfrucht, Pflügen ohne Zwischenfrucht sowie Weisser Senf (Sorte Salsa), Brauner Senf (Sorte Vittasso) und Winterfuttererbse (*Pisum sativum*, Sorte Arkta) als Zwischenfrüchte in den ganzen Parzellen sowie zwei Sommerweizen-Sorten (Digana bzw. Fiorina) in den Unterparzellen. Bevor der Versuch mit den unterschiedlichen Anbausystemen angelegt wurde, stand Silomais (Sorte P8057) auf dem ganzen Feld. Um einen ausreichenden Fusarienbefall im Feld sicherzustellen, wurden im Stadium BBCH 71–73 20 Maispflanzen pro Parzelle anhand der Nadelmethode mit *F. graminearum* inokuliert. Nach der Ernte des Silomais wurden die Ernterückstände gemulcht. Bei der Behandlung «Herbizid ohne Zwischenfrucht» wurde Glyphosat angewandt. Bei der Behandlung «Pflügen ohne Zwischenfrucht» wurden die Maisrückstände mit einem Pflug in den Boden eingearbeitet (ca. 30 cm tief). Der Anbau der jeweiligen Zwischenfrucht erfolgte durch Direktsaat. Der Weisse Senf und der Braune Senf wurden vor dem ersten Frost gemulcht, die Winterfuttererbse als Winterzwischenfrucht hingegen erst zu Beginn des folgenden Frühlings. Anschliessend wurde der Sommerweizen im Direktsaat-Verfahren gesät. Die Krankheitsinzidenz, der Körnerertrag und der Mykotoxingehalt wurden wie oben beschrieben ermittelt.

Datenauswertung

Mittels einer Varianzanalyse innerhalb des jeweiligen Versuchsjahres wurde überprüft, ob zwischen den verschiedenen Behandlungen jedes Versuchs signifikante Unterschiede vorlagen. Die Post-hoc-Vergleiche wurden mit dem Test auf den kleinsten signifikanten Unterschied (LSD) nach Fisher ($\alpha=0,05$) durchgeführt. Der

Zusammenhang zwischen der Anzahl Kolonien bildenden Einheiten und dem DON-Gehalt der Körner wurde mittels Rangkorrelationskoeffizienten nach Spearman untersucht.

Resultate

«Cut-and-carry»-Biofumigation

Bei der Ernte 2017 wurde der DON-Gehalt in den Weizenkörnern durch die Mulch-Schichten von Weisssem Senf, Braunem Senf und Alexandriner-Klee im Vergleich zur Kontrollbehandlung um 37 bis 53 % reduziert. Zudem wurden durch die Verfahren der «Cut-and-carry»-Biofumigation der ZEN-Gehalt im Vergleich zur Kontrollbehandlung um 65 bis 75 % reduziert und der Körnerertrag um 3 bis 7 % erhöht (Tab. 1).

Bei der Ernte 2018 wurde der DON- und der ZEN-Gehalt durch die Behandlungen sogar um 50 bis 58 % bzw. um 67 bis 87 % reduziert. Im Vergleich zur Kontrolle erzielten die Mulch-Schichten aus Weisssem Senf, Braunem Senf und Alexandriner-Klee um 8 bis 15 % höhere Körnererträge (Tab. 1).

Bei beiden untersuchten Weizensorten waren die Wirkungen der «Cut-and-carry»-Biofumigation bezüglich Mykotoxin-Reduktion und Ertragssteigerung vergleichbar.

Bei beiden Weizensorten wurde zudem ein enger Zusammenhang zwischen der Anzahl gezählter Askosporen in den Sporenfallen und dem DON-Gehalt in den Körnern beobachtet (Levis: $r_s = 0,796$; Forel: $r_s = 0,840$; Abb. 4).

Mais-Untersaaten

Keines der untersuchten Untersaat-Systeme reduzierte den Mais-Körnerertrag signifikant im Vergleich zum Anbau von Mais alleine (12 t ha^{-1} im 2016 bzw. 10 t ha^{-1} im 2018).

Bei der Ernte 2017 wurde der höchste DON-Gehalt in den Weizenkörnern nach dem Anbau von Mais ohne Untersaat beobachtet, während in den Untersaat-Systemen Mais-Weisser Senf und Mais-Brauner Senf der DON-Gehalt um 58 % bzw. 32 % reduziert wurde. Analog wurde der höchste ZEN-Gehalt bei Mais ohne Untersaat festgestellt, während der ZEN-Gehalt in den Systemen Mais-Phacelia und Mais-Weisser Senf um 34 % bzw. 47 % tiefer lag (Tab. 2). Die Mais-Untersaat hatte keine signifikante Wirkung auf den Weizenertrag ($p=0,455$). Bei der Weizenernte 2019 wurden die tiefsten DON-Gehalte nach Mais-Brauner Senf und Mais-Rotklee gemessen. Bei allen Behandlungen lag der ZEN-Gehalt in den Körnern unter der Nachweisgrenze. Im Vergleich zu Mais alleine ergab die Untersaat mit Rotklee, Phacelia und Braunem Senf in der nachfolgenden Weizenernte einen um 7 bis 9 % tieferen Ertrag, während die Untersaat mit Weisssem Senf und Sudangras den Weizenertrag nicht signifikant verringerte (Tab. 2).

Bei beiden untersuchten Weizensorten und bei beiden Bodenbearbeitungspraktiken waren die Wirkungen bezüglich Mykotoxin-Gehalt und Körnerertrag vergleichbar.

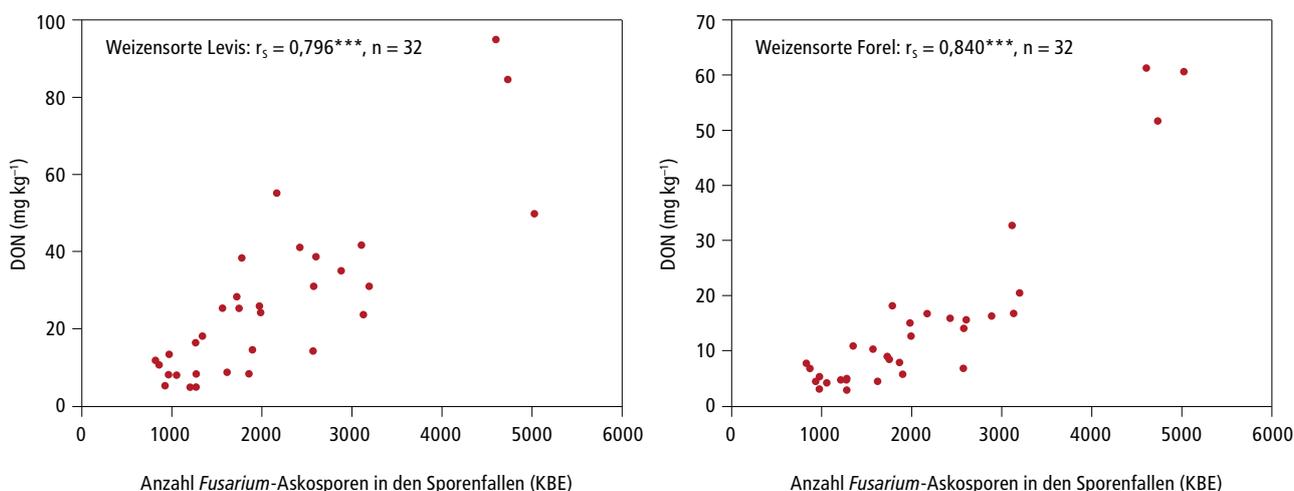


Abb. 4 | Zusammenhang zwischen dem Gehalt an Deoxynivalenol (DON) und der Anzahl von *Fusarium*-Askosporen (KBE: Kolonien bildende Einheiten) in den Sporenfallen während der Weizenblüte für die beiden Weizensorten Levis (links) und Forel (rechts) im Versuch zur «Cut-and-carry»-Biofumigation. Es wurde der Rangkorrelationskoeffizient (r_s) nach Spearman berechnet ($***p < 0,001$). Für die Analyse wurden die Daten aus zwei Versuchsjahren (2016/2017 und 2017/2018) und vier Behandlungen (drei Behandlungen mit «Cut-and-carry»-Biofumigation und eine Kontrollbehandlung; $n = 32$) verwendet.

Tab. 1 | Wirkung der «Cut-and-carry»-Biofumigation auf den Gehalt an Deoxynivalenol bzw. Zearalenon in Weizenkörnern sowie auf den Ertrag bei den Weizenernten 2017 und 2018. Bei jedem Verfahren ist die relative Zu- bzw. Abnahme in Prozent im Vergleich zur Kontrolle angegeben. Es sind die Mittelwerte der beiden Sorten (Levis, Forel) aufgeführt (n = 8). Unterschiedliche Buchstaben in Klammern weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Verfahren hin ($\alpha = 0,05$).

	Kontrolle	«Cut-and-carry»-Biofumigation		
		Weisser Senf	Brauner Senf	Alexandrin-Klee
2017				
Deoxynivalenol	12,9 mg kg ⁻¹ (a)	- 40 % (b)	- 37 % (b)	- 53 % (b)
Zearalenon	0,6 mg kg ⁻¹ (a)	- 75 % (b)	- 71 % (ab)	- 65 % (ab)
Körnerertrag	8,1 t ha ⁻¹ (a)	+ 7 % (b)	+ 3 % (ab)	+ 4 % (ab)
2018				
Deoxynivalenol	55,4 mg kg ⁻¹ (a)	- 50 % (b)	- 58 % (b)	- 56 % (b)
Zearalenon	0,2 mg kg ⁻¹ (a)	- 76 % (bc)	- 67 % (b)	- 87 % (c)
Körnerertrag	6,5 t ha ⁻¹ (a)	+ 8 % (b)	+ 15 % (b)	+ 14 % (b)

Zwischenfrüchte

Die Körner der Weizenernte 2017 wiesen generell einen tiefen Fusarien-Befall auf und sowohl der DON-Gehalt in den Körnern (0,05–0,10 mg kg⁻¹, $p = 0,727$) als auch der Ertrag (4,2–4,9 t ha⁻¹, $p = 0,395$) des Sommerweizens waren bei den untersuchten Anbausystemen vergleichbar. In der Weizenernte 2018 hingegen wurde der DON-Gehalt in den Körnern der nachfolgenden Sommerweizenkultur durch den Anbau von Weisssem Senf, Braunem Senf oder Winterfuttererbsen nach Silomais im Vergleich zur Behandlung mit Herbizid ohne Zwischenfrucht um 54 bis 74 % gesenkt. Zwischen den verschiedenen Behandlungen bezüglich Zwischenfrucht und Bodenbearbeitung wurden beim DON-Gehalt keine signifikanten Unterschiede beobachtet. Alle Zwischenfrüchte erhöhten den Körnerertrag von Sommerweizen um 13 bis 25 % (Tab. 3). In den Ernten 2017 und 2018 lag der ZEN-Gehalt

unabhängig von den Verfahren unterhalb der Nachweisgrenze.

Die Auswirkungen der Zwischenfrucht-Systeme auf den Mykotoxin-Gehalt und den Körnerertrag waren bei beiden untersuchten Sommerweizen-Sorten vergleichbar.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Eine wirksame Reduktion der *Fusarium*-Mykotoxine ist für eine verbesserte Lebens- und Futtermittelsicherheit von Getreideprodukten von grosser Bedeutung. Für eine umweltverträgliche Intensivierung von Agrarökosystemen braucht es zudem Pflanzenschutzmassnahmen, die für die menschliche Gesundheit und die Umwelt kein Risiko darstellen. Im Rahmen einer Mais-Weizen-Fruchtfolge mit pfluglosem Anbau haben wir drei verschiede-

Tab. 2 | Wirkung der Mais-Untersaat auf den Gehalt an Deoxynivalenol bzw. Zearalenon in Weizenkörnern sowie auf den Ertrag bei den Weizenernten 2017 und 2019. Bei jeder Untersaat ist die relative Zu- bzw. Abnahme in Prozent im Vergleich zum Anbau von Mais ohne Untersaat angegeben. Es sind die Mittelwerte von zwei Bodenbearbeitungspraktiken (keine bzw. reduzierte Bodenbearbeitung) und zwei Weizensorten (Levis, Forel) aufgeführt (n = 16). Unterschiedliche Buchstaben in Klammern weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Verfahren hin ($\alpha = 0,05$).

	Mais ohne Untersaat	Untersaat				
		Rotklee	Sudangras	Phacelia	Weisser Senf	Brauner Senf
2017¹						
Deoxynivalenol	0,59 mg kg ⁻¹ (a)	- 22 % (ab)	- 7 % (ab)	- 18 % (ab)	- 58 % (c)	- 32 % (b)
Zearalenon	0,24 mg kg ⁻¹ (a)	- 31 % (abc)	- 12 % (ab)	- 34 % (bc)	- 47 % (c)	- 15 % (abc)
2019²						
Deoxynivalenol	4,9 mg kg ⁻¹ (ab)	- 10 % (b)	+ 14 % (a)	+ 22 % (a)	+ 9 % (ab)	- 13 % (b)
Körnerertrag	6,7 t ha ⁻¹ (ab)	- 9 % (d)	+ 3 % (a)	- 7 % (cd)	- 3 % (bc)	- 7 % (cd)

¹Körnerertrag: $p > 0,05$ (nicht signifikant)

²Zearalenon: unter der Nachweisgrenze (= 0,1 µg kg⁻¹)

Tab. 3 | Wirkung von Zwischenfrucht-Systemen und von Pflügen ohne Zwischenfrucht auf den Gehalt an Deoxynivalenol in den Körnern sowie auf den Ertrag bei der Weizenernte 2018. Bei jedem Verfahren ist die relative Zu- bzw. Abnahme in Prozent im Vergleich zum Verfahren «Herbizidanwendung ohne Zwischenfrucht» angegeben. Es sind die Mittelwerte von zwei Sommerweizen-Sorten (Fiorina, Digana) aufgeführt (n=8). Unterschiedliche Buchstaben in Klammern weisen auf signifikante Unterschiede zwischen den Verfahren hin ($\alpha=0,05$).

	Ohne Zwischenfrucht – Herbizid	Ohne Zwischenfrucht – Pflügen	Zwischenfrucht		
			Weisser Senf	Brauner Senf	Winterfüttererbsen
Deoxynivalenol	5,4 mg kg ⁻¹ (a)	- 75 % (b)	- 57 % (b)	- 54 % (b)	- 74 % (b)
Körnerertrag	4,0 t ha ⁻¹ (a)	+ 5 % (ab)	+ 13 % (abc)	+ 18 % (bc)	+ 25 % (c)

Zearalenon: unter der Nachweisgrenze (= 0,1 µg kg⁻¹)

ne innovative Strategien zur Bekämpfung der Ährenfusariose und zur Reduktion von Mykotoxinen in Weizen untersucht.

Durch die «Cut-and-carry»-Biofumigation, bei der eine Mulch-Schicht auf infizierte Mais-Ernterückstände verteilt wird, wurde die Mykotoxin-Belastung der Körner erheblich reduziert und der Körnerertrag von Weizen erhöht. Die Mulch-Schichten aus Weisssem Senf, Braunem Senf und Alexandriner-Klee verminderten in beiden Jahren konsistent den Mykotoxin-Gehalt (DON und ZEN um bis zu 58 % bzw. 87 %) und erhöhten den Ertrag um bis zu 15 %. Der Anbau von Senfpflanzen als Zwischenfrucht ist verbreitet und kann zur Biofumigation, zur Unkrautbekämpfung und zur Erhaltung der Bodenfruchtbarkeit genutzt werden (Snapp *et al.* 2005). Beim Gewebeaufschluss werden Abbauprodukte der Senfölglycoside, d.h. Isothiocyanate, freigesetzt, die das Wachstum verschiedener Mikroorganismen hemmen, darunter auch den Pilz *F. graminearum* (Drakopoulos *et al.*, 2019). Isothiocyanate gehören zu den bioaktivsten, von Senfpflanzen produzierten Stoffen, die gegen bodenlebende Krankheitserreger, Schädlinge und Unkräuter wirken (Brown and Morra, 1997). Zum phytochemischen Profil von Klee, z.B. Alexandriner-Klee, gehören verschiedene bioaktive Stoffe wie Flavonoide, Phenolsäuren, Clovamide und Saponine (Oleszek *et al.* 2007; Kolodziejczyk-Czepas 2012). Neben der Wirkung gegen Pilze ist die «Cut-and-carry»-Gründüngung zusätzlich eine ausgezeichnete Stickstoffquelle, welche die Bodenfruchtbarkeit verbessert und die Reserven an organischem Kohlenstoff erhöht. Sorensen and Grevsen (2016) wiesen darauf hin, dass die oberirdische Biomasse von einjährigen Leguminosen und mehrjährigen Gründüngungskulturen pro Vegetationsperiode insgesamt 200 bzw. 400–500 kg N pro Hektare erzielen. Landwirtschaftsbetriebe können durch den «Cut-and-carry»-Ansatz mit Alexandriner-Klee also gleichzeitig ihre eigentliche Kultur düngen und die durch Ernterückstände übertragenen Krankheitserreger bekämpfen. Um die Mais-Ernterückstände auf einer Hektare ausreichend bedecken zu können, wird die auf

einer Hektare produzierte Biomasse von Weisssem Senf oder Braunem Senf benötigt, bei Alexandriner-Klee genügt eine halbe Hektare. Obwohl der «Cut-and-carry»-Ansatz die Produktionskosten kurzfristig erhöhen könnte, ist zu erwarten, dass der langfristige landwirtschaftliche Nutzen, wie die geringere Mykotoxin-Belastung und die erhöhte Bodenfruchtbarkeit, die anfänglichen wirtschaftlichen Einbußen kompensieren. Durch den klaren positiven Zusammenhang zwischen der Anzahl von Askosporen in den Sporenfallen und dem DON-Gehalt in den Körnern können Sporenfallen während der Weizenblüte als zuverlässiges Werkzeug zur Einschätzung des DON-Risikos genutzt werden.

Weiterhin konnten wir zeigen, dass durch die Mais-Untersaat die Mykotoxine im nachfolgend angebauten Winterweizen reduziert werden, allerdings nur bei moderatem Krankheitsdruck (wie im Jahr 2017) und nicht unter hohem Krankheitsdruck (wie im Jahr 2019). Im Vergleich zum Mais-Anbau ohne Untersaaten ergab sich mit Weisssem Senf und Braunem Senf als Untersaaten im 2017 eine Reduktion des DON-Gehalts im Weizen von bis zu 58 %. Zu den Mechanismen, mit denen eine Untersaat die Dynamik der Krankheit beeinflussen kann, gehören die Veränderung des Mikroklimas, Wirkungen auf die Verbreitung durch Wind, Regen und/oder Vektoren, Veränderungen der Morphologie und Physiologie des Wirts sowie die direkte Hemmung des Pathogens (Boudreau 2013). Der wichtigste Mechanismus zur direkten Hemmung des Krankheitserregers bei Senfpflanzen ist die pilzhemmende Wirkung der oben erwähnten Derivate von Senfölglycosiden (Manici *et al.* 1997). Ein weiteres positives Ergebnis war die Feststellung, dass keine der untersuchten Untersaat-Systeme den Ertrag von Körnermais signifikant verringerte, wenn die Untersaat im Entwicklungsstadium BBCH 13–15 der Maiskultur ausgesät wurde.

Eine angepasste Fruchtfolge gehört zu den wirkungsvollsten Anbaumassnahmen zur Prävention der Ährenfusariose (Champeil *et al.* 2004; Shah *et al.* 2018). In der Tat stellten wir fest, dass durch den Anbau einer

Zwischenfrucht (d.h. Weisser Senf, Brauner Senf oder Winterfuttererbsen) zwischen den Kulturen einer Silomais-Sommerweizen-Fruchtfolge der DON-Gehalt in Weizen um bis zu 74 % reduziert wurde. Besonders hervorzuheben ist, dass die durch den Anbau der Zwischenfrucht erreichte Mykotoxin-Reduktion vergleichbar war mit der Wirkung durch Pflügen, bei welchem die mit *Fusarium* infizierten Maisrückstände in tiefe Bodenschichten eingearbeitet werden. Wegen des allgemein geringeren Ertrags wird Sommerweizen in der Schweiz allerdings deutlich seltener angebaut als Winterweizen. Der Anbau von Sommerweizen könnte daher durch eine entsprechend angepasste Agrarpolitik gefördert werden. Zusammenfassend konnten wir Handlungswissen zu alternativen Pflanzenschutzstrategien gewinnen, die das Risiko von *Fusarium*-Mykotoxinen in Weizen durch innovative Anbausysteme im pfluglosen Anbau senken. Der Anbau von Weisssem Senf und Braunem Senf für die «Cut-and-carry»-Biofumigation, als Zwischenfrucht und als Mais-Untersaat zur Reduktion von Mykotoxinen in Weizen ist vielversprechend, wobei insbesondere die ersten beiden Systeme am wirksamsten waren und konsistente Ergebnisse lieferten. Durch den Einsatz von Alexandriner-Klee für die «Cut-and-carry»-Biofumigation

oder als Gründüngung werden nicht nur Mykotoxine reduziert, sondern gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit verbessert und die Reserven an organischem Kohlenstoff im Boden erhöht. Im Sinne eines nachhaltigen Pflanzenschutzes können GetreideproduzentInnen und KonsumentInnen von den empfohlenen Strategien profitieren, mit denen die Mykotoxin-Belastung in den Ernteprodukten reduziert und Erträge und Qualität der Ernte verbessert werden. Da durch innovative Anbausysteme, wie die «Cut-and-carry»-Biofumigation, die Produktionskosten steigen könnten, müssten wirtschaftliche Einbußen durch agrarpolitische Massnahmen ausgeglichen werden, um mögliche Konflikte zwischen Zielen der Lebensmittelsicherheit und der Wirtschaftlichkeit der Landwirtschaftsbetriebe zu vermeiden. ■

Dank

Diese Arbeit wurde durch das MycoKey-Projekt «Integrated and innovative key actions for mycotoxin management in the food and feed chain» im Rahmen des EU-Förderprogramms für Forschung und Innovation Horizon 2020 (Fördervertrag Nr. 678781) und durch das schweizerische Staatssekretariat für Bildung, Forschung und Innovation unterstützt. Wir möchten Felix E. Wettstein und Thomas D. Bucheli für ihre Unterstützung bei der Mykotoxin-Analyse mittels LC-MS/MS und den Feldequipen von Agroscope-Reckenholz und Agroscope-Tänikon für ihre Hilfe bei den Feldarbeiten danken.

Literatur

- Beres, B.L., Brülé-Babel, A.L., Ye, Z., Graf, R.J., Turkington, T.K., Harding, M.W., Kutcher, H.R., Hooker, D.C., 2018. Exploring Genotype × Environment × Management synergies to manage fusarium head blight in wheat. *Can. J. Plant Pathol* **40**, 179–188.
- BLW, 2017. Bundesamt für Landwirtschaft; Bericht des Bundesrates; Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. URL: <https://www.blw.admin.ch/blw/de/home/nachhaltige-produktion/pflanzenschutz/aktionsplan.html>
- Boudreau, M.A., 2013. Diseases in intercropping systems. *Annu. Rev. Phytopathol.* **51**, 499–519.
- Brown, P.D., Morra, M.J., 1997. Control of soil-borne plant pests using glucosinolate-containing plants. *Adv. Agron.* **61**, 167–231.
- Champeil, A., Dore, T., Fourbet, J.F., 2004. *Fusarium* head blight: epidemiological origin of the effects of cultural practices on head blight attacks and the production of mycotoxins by *Fusarium* in wheat grains. *Plant Sci.* **166**, 1389–1415.
- Drakopoulos, D., Kägi, A., Gimeno, A., Six, J., Jenny, E., Forrer, H.-R., Musa, T., Meca, G., Vogelgsang, S., 2020. Prevention of *Fusarium* head blight infection and mycotoxins in wheat with cut-and-carry biofumigation and botanicals. *Field Crops Res.* **246**, 107681.
- Drakopoulos, D., Luz, C., Torrijos, R., Meca, G., Weber, P., Bänziger, I., Voegelé, R.T., Six, J., Vogelgsang, S., 2019. Use of botanicals to suppress different stages of the life cycle of *Fusarium graminearum*. *Phytopathol.* **109**, 2116–2123.
- European Commission, 2006. Commission Regulation (EC) setting maximum levels for certain contaminants in foodstuffs. The Commission of the European Communities, Brussels, Belgium No 1881/2006, 20.
- Gilbert, J., Haber, S., 2013. Overview of some recent research developments in *Fusarium* head blight of wheat. *Can. J. Plant Pathol.* **35**, 149–174.
- Kolodziejczyk-Czepas, J., 2012. *Trifolium* species-derived substances and extracts-biological activity and prospects for medicinal applications. *J. Ethnopharmacol.* **143**, 14–23.
- Manici, L.M., Lazzeri, L., Palmieri, S., 1997. *In vitro* fungitoxic activity of some glucosinolates and their enzyme-derived products toward plant pathogenic fungi. *J. Agric. Food Chem.* **45**, 2768–2773.
- Oleszek, W., Stochmal, A., Janda, B., 2007. Concentration of isoflavones and other phenolics in the aerial parts of *Trifolium* species. *J. Agric. Food Chem.* **55**, 8095–8100.
- Osborne, L.E., Stein, J.M., 2007. Epidemiology of *Fusarium* head blight on small-grain cereals. *Int. J. Food Microbiol.* **119**, 103–108.
- Parry, D.W., Jenkinson, P., Mcleod, L., 1995. *Fusarium* ear blight (scab) in small-grain cereals – a review. *Plant Pathol.* **44**, 207–238.
- Shah, L., Ali, A., Yahya, M., Zhu, Y., Wang, S., Si, H., Rahman, H., Ma, C., 2018. Integrated control of *Fusarium* head blight and deoxynivalenol mycotoxin in wheat. *Plant Pathol.* **67**, 532–548.
- Six, J., Elliott, E.T., Paustian, K., 2000. Soil macroaggregate turnover and microaggregate formation: a mechanism for C sequestration under no-tillage agriculture. *Soil Biol. Biochem.* **32**, 2099–2103.
- Snapp, S.S., Swinton, S.M., Labarta, R., Mutch, D., Black, J.R., Leep, R., Nyiraneza, J., O’Neil, K., 2005. Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron. J.* **97**, 322–332.
- Sorensen, J.N., Grevsen, K., 2016. Strategies for cut-and-carry green manure production. *Acta Hort.* **1137**, 39–46.
- Trail, F., 2009. For blighted waves of grain: *Fusarium graminearum* in the postgenomics era. *Plant Physiol.* **149**, 103–110.
- WBF, 2019. Agrarbericht. Bundesamt für Landwirtschaft, Bern, Schweiz.
- Wegulo, S.N., Baenziger, P.S., Hernandez Nopsa, J., Bockus, W.W., Hallen-Adams, H., 2015. Management of *Fusarium* head blight of wheat and barley. *Crop Protect.* **73**, 100–107.