

Neue Entscheidungshilfen für eine nachhaltige Unkrautbekämpfung

Sandie Masson¹, Bruno Chauvel², Christophe Carlen¹ und Judith Wirth¹

¹Agroscope, Produktionssysteme Pflanzen, Herbolgie Ackerbau, 1260 Nyon, Schweiz

²INRAE, UMR Agroécologie, Pôle Gestion durable des adventices Agroécologie, F-21000 Dijon, Frankreich

Auskünfte: Sandie Masson, E-Mail: sandie.masson@agroscope.admin.ch

<https://doi.org/10.34776/afs12-78g> Publikationsdatum: 31. Mai 2021



Mechanische Unkrautbekämpfung einer Rapskultur auf einer Versuchspartelle des Projekts PestiRed im September 2020. In Kombination mit anderen Unkrautbekämpfungsmassnahmen kann damit der Einsatz von Herbiziden reduziert werden (Foto: Carole Parodi, Agroscope).

Zusammenfassung

2017 verabschiedete der Schweizer Bundesrat den Aktionsplan zur Risikoreduktion und nachhaltigen Anwendung von Pflanzenschutzmitteln. Eine der Massnahmen dieses Plans ist der «Verzicht oder Teilverzicht auf Herbizide». Diese Massnahme lässt sich jedoch nur im Rahmen einer ganzheitlichen, auf die jeweilige Kultur und Fruchtfolge abgestimmten Strategie zur Unkrautbekämpfung umsetzen. Unkräuter schädigen nicht nur die jeweils vorhandenen Kulturpflanzen innerhalb eines Jahres, sondern können sich aufgrund des Samenvorrats im Boden über mehrere Jahre als problematisch erweisen. Die Umsetzung präventiver und kurativer Massnahmen auf der Grundlage des integrierten Pflanzenschutzes erfordert die Entwicklung neuer Entscheidungshilfe-Tools. Zusätzlich zur Unkrautdichte, wurden weitere Indikatoren zur Schäd-

lichkeit der Unkräuter entwickelt. Aktuell wird eine einfache Methode, die auf der visuellen Schätzung des Volumenanteils der Unkräuter beruht, auf ihre Anwendbarkeit in der Praxis getestet. Ausserdem werden Tools entwickelt, die auf der Modellierung der Auswirkungen unterschiedlicher Anbausysteme auf Unkrautflora und Ertrag unter verschiedenen klimatischen Szenarien basieren. Dieser Artikel fasst wichtige Aspekte der Forschung im Bereich des Unkrautmanagements zusammen und stellt Entscheidungshilfe-Tools vor, die zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft beitragen könnten.

Key words: weed thresholds, integrated weed management, harmfulness of weeds, preventive and curative weed control.

Einleitung

Ein reduzierter Einsatz von Pflanzenschutzmitteln ist einer der wichtigsten Meilensteine auf dem Weg zu einer nachhaltigen landwirtschaftlichen Produktion. Eine der Massnahmen des Aktionsplans Pflanzenschutzmittel ist deshalb der «Verzicht oder Teilverzicht auf Herbizide». Eine Reduzierung des Herbizid-Einsatzes ist besonders schwierig, weil Herbizide sehr wirksam sind und die schnellste, einfachste und kostengünstigste Methode zur Unkrautbekämpfung darstellen. Um die Anforderungen des Ökologischen Leistungsnachweises (ÖLN) zu erfüllen, ist ihre Anwendung gegenwärtig an wirtschaftliche Bekämpfungsschwellen gebunden, d.h. eine bestimmte Unkrautdichte, ab der davon ausgegangen wird, dass die Kosten für die Herbizidanwendung geringer sind als die zu erwartenden Einbussen durch Ertragsausfälle. Die Reduzierung des Herbizid-Einsatzes ist allerdings nur im Rahmen einer angepassten Anbaustrategie möglich. Es müssen alle direkten und indirekten Massnahmen umgesetzt werden, mit denen sich die Etablierung, die Ausbreitung und die Entwicklung einer Unkrautpopulation verhindern lassen. Ergänzend zu den Bekämpfungsschwellen, erfordert dies den Einsatz neuer Tools, mit denen sich das Auftreten und die Schädlichkeit von Unkräutern in einer Parzelle besser vorhersagen lassen.

Was ist eine nachhaltige Unkrautbekämpfung? Was sind die Besonderheiten der Unkrautflora? Wie schädlich sind Unkräuter für die landwirtschaftliche Produktion? Welche Relevanz haben die aktuell verwendeten Methoden für die Einschätzung dieser Schädlichkeit? Welche neuen Methoden für eine nachhaltige und optimale Unkrautbekämpfung werden entwickelt? Diese Fragen versucht der vorliegende Artikel zu beantworten und stützt sich dabei auf das Wissen aus 40 Jahren Unkrautforschung.

Nachhaltige Unkrautbekämpfung

Grundsatz der integrierten Unkrautbekämpfung

Ziel der integrierten Unkrautbekämpfung (Abb. 1) ist es, den Ertrag und die Qualität der Kulturen zu verbessern und gleichzeitig die negativen Auswirkungen der Unkrautbekämpfung auf Umwelt und Gesundheit zu beschränken. Dazu gehört auch, die positiven Leistungen zu bewahren, die Unkräuter für die Bestäubung, den Schutz des Bodens und die Bereitstellung von Nahrung für Nützlinge erbringen. Die integrierte Unkrautbekämpfung stützt sich auf vier Komponenten: physikalische (mechanische), biologische, ökologische und – an letzter Stelle – chemische Massnahmen (Mer-

field 2019). Die physikalische Bekämpfung beruht auf mechanischen und thermischen Verfahren. Die biologische Bekämpfung macht sich natürliche Feinde zunutze (Pilze, Laufkäfer usw.). Die ökologische Bekämpfung basiert auf Interaktionen zwischen Unkräutern und Kulturpflanzen (Konkurrenz, Wachstumsunterdrückung, usw.). Dabei werden die Anbaupraktiken so optimiert, dass sich die Kulturpflanzen rasch und optimal entwickeln und möglichst tolerant gegenüber Unkräutern sind. Die chemische Bekämpfung kann durch natürliche und synthetische Herbizide erfolgen. Aus diesen vier Bereiche werden vor allem präventive und kurative Massnahmen angewandt.

Präventive Massnahmen

Präventiv werden hauptsächlich ökologische und physikalische Unkrautbekämpfungsmassnahmen eingesetzt. Der erste Schritt einer präventiven Unkrautbekämpfung besteht darin, die Vielfalt der Pflanzen in den landwirtschaftlichen Systemen zu erhöhen (Gaba *et al.* 2017). Im Rahmen einer Fruchtfolge ist es wichtig Anbauzeitpunkte (Frühling/Herbst) und Pflanzenfamilien zu variieren, sowie Zwischenfrüchte anzubauen. Um eine natürliche Unkrautregulation durch Nützlinge zu ermöglichen, muss diese Vielfalt auch auf Landschaftsebene, mittels Fruchtfolgen und verschiedenen Landschaftselementen, erhöht werden (Petit *et al.*, 2008). Diese räumliche und zeitliche Diversifizierung verhindert auch eine Spezialisierung der Unkrautflora, indem sehr konkurrenzfähige Arten weniger begünstigt werden, was zu geringeren Ertragsverlusten führt (Storkey and Neve 2018, Adeux *et al.* 2019).

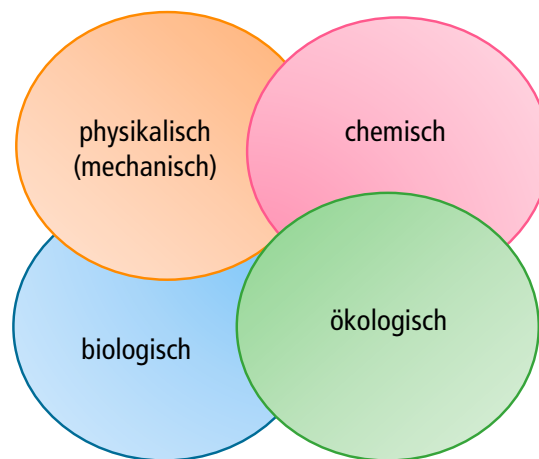


Abb. 1 | Die vier Komponenten der integrierten Unkrautbekämpfung (aus Merfield 2019).

Der zweite Schritt betrifft die Anbautechniken der jeweiligen Kulturpflanzen. Durch die Veränderung des Saatzeitpunkts kann das Zeitfenster vermieden werden, während dessen das Unkraut bevorzugt aufläuft. Ein «falsches» Saatbeet dient dazu, einen Teil der Unkräuter vor der Aussaat der Hauptkultur auflaufen zu lassen. Das anschließende Blindstriegeln im Voraufbau verschafft der Kultur einen Entwicklungsvorsprung gegenüber dem Unkraut. Durch den Anbau von Sorten die rasch den Boden bedecken, die Beschleunigung der vegetativen Entwicklung durch Düngung oder die Wahl einer frühreifen Sorte haben die Unkräuter weniger Licht zur Verfügung. Durch Bodenbearbeitung können Samen so tief vergraben werden, dass ihre Keimfähigkeit stark eingeschränkt ist. Bei der Direktsaat hingegen wird die Umwälzung des Bodens, welche die Keimung begünstigt, soweit es geht vermieden. Untersaaten oder Mischkulturen konkurrieren mit den Unkräutern direkt um Ressourcen. Zusätzliche Massnahmen um den Aufbau einer Unkrautsamenbank im Boden zu verhindern, sind das Auffangen der Spreu mit den Unkrautsamen bei der Ernte oder das Köpfen der Unkräuter vor der Samenreife.

Die Kombination dieser Massnahmen ist wichtig, da jede Massnahme isoliert nicht ausreichend wirksam ist. Jede Massnahme kann sich für eine Gruppe von Unkrautarten (mit ähnlichen biologischen Merkmalen) eignen, für eine andere Gruppe aber unwirksam sein. Beispielsweise ist Pflügen wirksam bei Flachkeimern, wie Ackerfuchsschwanz (*Alopecurus myosuroides*), aber weniger erfolgreich bei Flug-Hafer (*Avena fatua*), der aus tieferen Schichten keimen kann. Die Massnahmen müssen ausserdem in einem ganzheitlichen Ansatz umgesetzt werden, wobei auch die Risiken durch andere Schädlinge zu berücksichtigen sind (Bertrand and Doré 2008).

Kurative Massnahmen

Durch die Kombination präventiver Massnahmen lässt sich die Entwicklung von Unkraut in den Kulturen nicht immer verhindern. Es ist deshalb wichtig, die vorhandenen Unkräuter zu identifizieren und ihre Schädlichkeit abzuschätzen. Wenn die vorhandenen Arten aufgrund verschiedener Kriterien als schädlich für die betreffende Kultur bzw. für das System eingestuft werden, kann eine kurative Massnahme eingesetzt werden. Die häufigste kurative Massnahme zur Unkrautbekämpfung ist noch immer eine Behandlung mit Herbiziden. Wegen der negativen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt und weil die Zahl der verfügbaren Wirkstoffe zurückgeht (Birch *et al.* 2011) besteht jedoch ein zunehmender Bedarf an nachhaltigeren kurativen Bekämpfungsmitteln.

Die mechanische/physikalische Unkrautentfernung erlebt deshalb gerade einen neuen Aufschwung, was vor allem auf den Einsatz von Robotern und die höhere Präzision bei der mechanischen Unkrautbekämpfung zurückzuführen ist. Der Einsatz dieser Methoden ist allerdings stark von den Wetterbedingungen abhängig. Es ist oft schwierig den richtigen Zeitpunkt zu finden, an dem sowohl die Wetterbedingungen als auch die Entwicklungsstadien der Unkräuter und der Kulturpflanzen für eine Unkrautbekämpfung geeignet sind. Diese Bekämpfungsmethoden müssen also im richtigen Moment und in Kombination mit anderen Bekämpfungsmassnahmen erfolgen.

Die biologische Unkrautbekämpfung beruht auf dem Einsatz natürlicher Feinde zur Regulation einer Unkrautpopulation. Zum Beispiel wurde eine Ambrosia (*Ambrosia artemisiifolia* L.) Population, nach der versehentlichen Einschleppung des aus China stammenden Käfers *Ophraella communa* nach Italien, um 80 % verringert (Schaffner *et al.* 2020). Aktuell wird in Frankreich die Prädation von Unkrautsamen durch samenfressende Käfer untersucht, mit dem Ziel den Samenvorrat im Boden zu reduzieren (Petit *et al.* 2014).

Spezifität und Schädlichkeit der Unkrautflora

Die Unkrautflora, spezifisch für den Standort und das Anbausystem

Die Unkrautflora ist eine Pflanzengemeinschaft, die an ein landwirtschaftliches Umfeld angepasst ist. In Frankreich und der Schweiz wurden mehr als 1000 Unkrautarten erfasst, was einem Fünftel der Gesamtzahl der vorkommenden Blütenpflanzenarten entspricht. Davon werden rund 200 Arten als schädlich für den Ackerbau eingestuft (Jauzein 1995, Lauber *et al.* 2012). Die Eigenschaften vieler Unkrautarten sind noch weitgehend unbekannt: Dormanz der Samen, Überlebensdauer der Samen im Boden, Tiefe der Durchwurzelung, Nährstoffbedarf usw.

Die landschaftliche Umgebung einer Parzelle bestimmt ihre Unkrautgesellschaft (Alignier and Petit 2012). Das mehrjährige Überleben der Unkräuter wird durch ihre Reproduktionsart bestimmt: Samenunkräuter und Wurzelunkräuter (vegetative Vermehrung durch Wurzeln, Knollen oder Rhizome). Das Anbausystem wirkt über die angewendeten Anbautechniken wie ein Filter und begünstigt ausgehend vom Samenvorrat im Boden die Keimung und das Auflaufen bestimmter Arten gegenüber anderen Arten (Abb. 2).

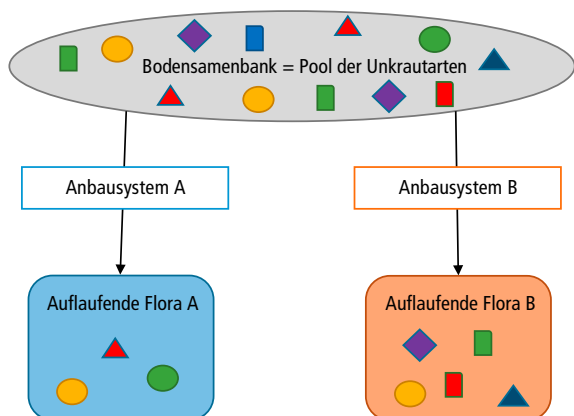


Abb. 2 | Das Anbausystem wirkt über die angewendeten Anbautechniken wie ein Filter und begünstigt ausgehend vom Samenvorrat im Boden die Keimung und das Auflaufen bestimmter Unkrautarten gegenüber anderen Arten.

2003 wurden dazu am Versuchsstandort von Agroscope in Changins (VD) verschiedene Anbausysteme miteinander verglichen. Die Samenvorräte in den obersten 25 Zentimetern des Bodens waren sehr gross und umfassten zwischen 6000 bis 22000 keimfähige Samen/m² je nach Bodenbearbeitung. Es wurden 22 verschiedene Unkrautarten identifiziert (Vulliou et al. 2006). Diese Samenbanken stellen die Grundlage der Artenzusammensetzung der Ackervegetation dar aus denen sich in der Zukunft Unkräuter entwickeln können, die sich negativ auf die Kulturen der Fruchtfolge auswirken können. Jedes Jahr keimen je nach Unkrautart und den klimatischen Bedingungen 6 % bis 28 % dieser Samen. Die anderen Samen verbleiben im Zustand der Dormanz im Boden (Dessaint et al. 1997, Chauvel et al. 2018). Die aufgelaufenen Unkräuter, die auf der Bodenoberfläche sichtbar sind, stellen also nur die Spitze des Eisbergs dar (Abb. 3).

Verschiedene Abstufungen der Schädlichkeit

Unkräuter schaden den Kulturpflanzen im jeweiligen Anbaujahr direkt oder indirekt indem sie unterschiedliche Schäden zu verschiedenen Zeitpunkten im Anbauzyklus verursachen (Abb. 4):

- eine mechanische oder chemische (Allelopathie) Hemmung der Keimung oder des Auflaufens der Kultur
- eine Wachstumsverzögerung der Kultur durch die Konkurrenz um Ressourcen (Licht, Wasser, Nährstoffe)
- die Übertragung von Krankheiten (z.B. der Mutterkornpilz *Claviceps purpurea*)
- die Beeinträchtigung der Ernte (z.B. Kletten-Labkraut – *Galium aparine*)

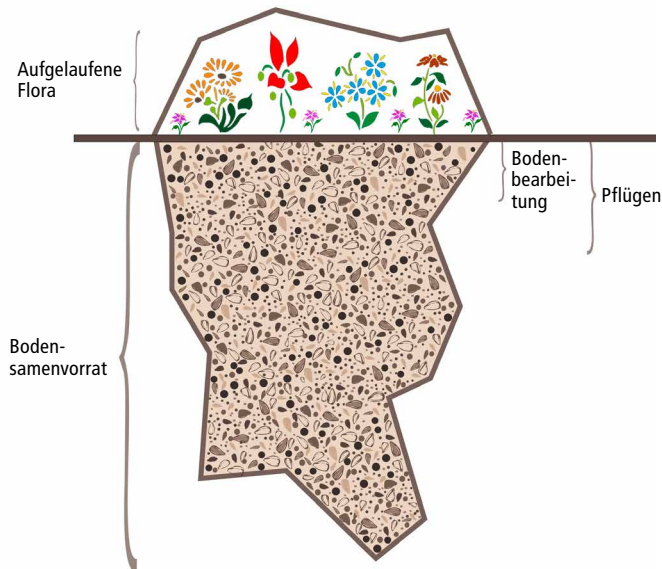


Abb. 3 | Die im Feld beobachtete aufgelaufene Flora ist nur die Spitze des Eisbergs. Der Bodensamenvorrat umfasst die gesamte Unkrautflora, die bei günstigen Bedingungen auflaufen kann.

- die Verminderung der Qualität des Ernteguts durch die Verunreinigung mit Unkrautsamen (z.B. Weidelgras (*Lolium sp.*) in Weizen), die mehr oder weniger hohe Kosten für die Reinigung verursachen

Darüber hinaus schädigen Unkräuter längerfristig alle Kulturen einer Fruchtfolge. Es handelt sich um eine indirekte potentielle Schädlichkeit, ausgehend vom Bodensamenvorrat der Parzelle in Kombination mit dem jeweiligen Anbausystem. Das Anbausystem kann die Zu- bzw. Abnahme bestimmter Unkrautarten im Bodensamenvorrat beeinflussen.

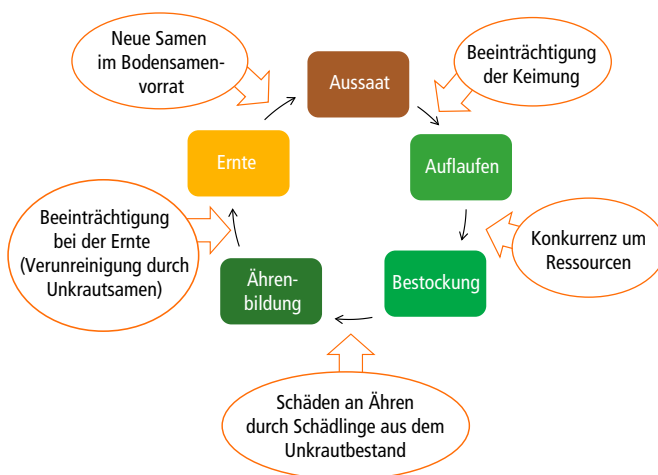


Abb. 4 | Die verschiedenen Formen der Schädlichkeit durch Unkräuter im Anbauzyklus einer Getreidekultur.

Mehrere Schädlichkeitsfaktoren

Die Schädlichkeit hängt von der Unkrautart ab. Einjährige, nur wenige Zentimeter hochwachsende Arten (z.B. Einjähriges Rispengras – *Poa annua*, Acker-Gauchheil – *Anagallis arvensis*) sind nicht so konkurrenzstark wie mehrjährige hochwachsende Arten (Acker-Kratzdistel – *Cirsium arvense*, Acker-Winde – *Convolvulus arvensis*). Die Schädlichkeit hängt auch eng mit dem Zeitpunkt des Auftretens des Unkrauts während der Entwicklung der Kultur zusammen (Abb. 5 und 6). In mehreren in den 1990er-Jahren veröffentlichten Studien wurde gezeigt, dass je nach Zeitpunkt des Auftretens von Unkräutern ein sehr unterschiedlicher Einfluss auf den Ertrag bestehen kann (Oliver 1988, Dieleman *et al.* 1996, Knezevic *et al.* 1997, Zwinger and Arlt 2002). So reduziert zum Beispiel eine Verzögerung des Auflaufens der Unkräuter von drei bis fünf Wochen gegenüber dem Auflaufen der Kultur die negativen Auswirkungen um einen Faktor von 2 bis 10 oder reicht sogar aus, um negative Auswirkungen auf Soja- und Maiserträge zu verhindern (Swanton *et al.* 1999). Ebenso hat das Auftreten von fünf Weisser Gänsefuß (*Chenopodium album*) Pflanzen pro m² im 2- bis 5-Blatt-Stadium der Zuckerrübe Ertragseinbußen von 40% zur Folge, während die gleiche Anzahl Gänsefuß-Pflanzen im 10- bis 13-Blatt-Stadium keine Ertragsausfälle verursacht (Abb. 6a). Wenn die Unkräuter sechs Wochen nach dem Pflanzen von Zwiebeln auflaufen, besteht ein direkter Zusammenhang zwischen der Bo-



Abb. 5 | Dichter Bestand von spät aufgelaufenem Storchnabel (*Geranium* sp.) in einer Weizenkultur. Diese hohe Unkrautdichte verursacht nicht zwingend einen direkten Schaden für die Kultur. Der Bodensamenvorrat wird sich aber erhöhen, wenn die Storchnabel Pflanzen zur Samenreife kommen. (Foto: INRAE)

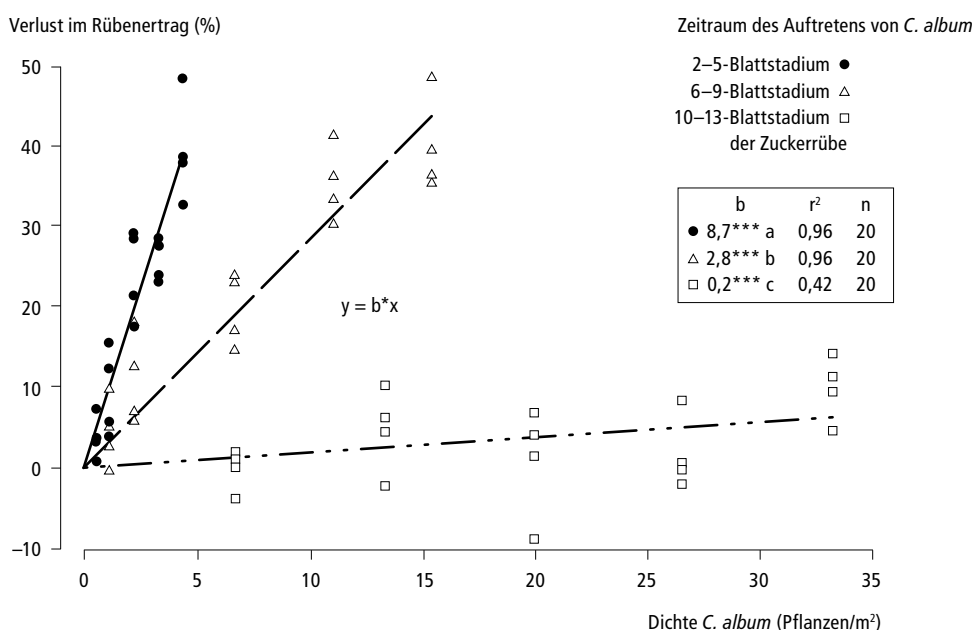


Abb. 6a | Einfluss der Dichte und des Zeitraums des Auftretens des Weissen Gänsefußes (*Chenopodium album*) auf den Rübenenertrag, aus Zwinger und Arlt (2002).

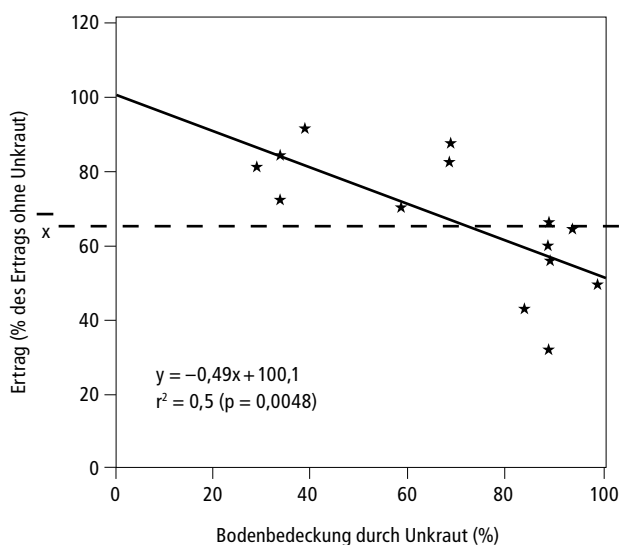


Abb. 6b | Auswirkungen einer Verunkrautung in einem frühen Stadium der Kultur auf den Ertrag von Zwiebeln (sechs Wochen nach der Aussaat), aus Zwerger und Arlt (2002).

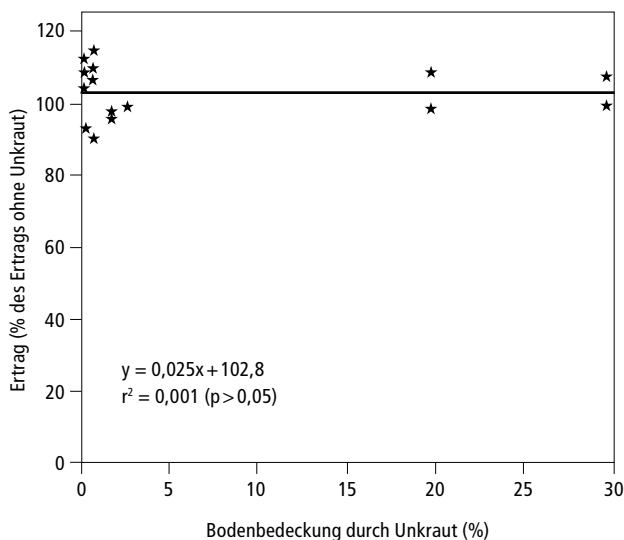


Abb. 6c | Auswirkungen einer Verunkrautung in einem späten Stadium der Kultur auf den Ertrag von Zwiebeln (drei Wochen vor der Ernte), aus Zwerger und Arlt (2002).

denbedeckung mit Unkräutern und dem Zwiebelertrag: Je mehr Unkraut, desto geringer der Ertrag (Abb. 6b). Wenn dagegen die Verunkrautung drei Wochen vor der Ernte auftritt, korreliert der prozentuale Bodenbedeckungsgrad durch Unkraut nicht mit dem Ertrag: Der Ertrag bleibt gleich, unabhängig davon wie dicht das Unkraut wächst (Abb. 6c).

Schliesslich ist die Schädlichkeit umso grösser, je stärker die Ressourcen (Licht, Wasser, Nährstoffe) beschränkt sind. Das in Abbildung 7 erwähnte Jahr 1983 war besonders trocken. Unter diesen Bedingungen verursachte eine Unkrautdichte von 200 Hühnerhirse-Pflanzen (*Echinochloa crus-galli*) pro m² praktisch einen vollständigen Ertragsausfall der Mais-Kultur. Dagegen war im Jahr 1982 die Verfügbarkeit von Wasser nicht beschränkend und dieselbe Unkrautdichte hatte nur geringe Auswirkungen auf den Ertrag (Abb. 7).

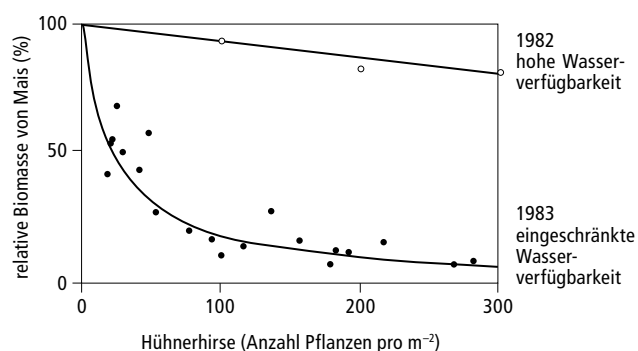


Abb. 7 | Relative Biomasse von Mais je nach Dichte der Hühnerhirse in den Jahren 1982 und 1983 (Kropff and Lotz 1992).

In der Praxis wird davon ausgegangen, dass Unkraut, unabhängig von der Unkrautbekämpfung, Ertragsausfälle von 7 bis 13 % verursacht (Oerke 1994, Oerke 2006). In einer aktuellen Zusammenfassung von Versuchen zur Unkrautbekämpfung, die in Frankreich zwischen 1993 und 2015 durchgeführt wurden, wurden Parzellen mit chemischer Unkrautbekämpfung mit Kontrollparzellen ohne Unkrautbekämpfung verglichen. In diesen Versuchen wurden bei 92 % der Weizenkontrollparzellen ohne Unkrautbekämpfung signifikante Ernteaufälle (im Mittel über alle Versuche –26 dt/ha) festgestellt, aber nur in 51 % der Rapskulturen (im Mittel über alle Versuche –3,5 dt/ha) und in 61 % der Sonnenblumenkulturen (im Mittel über alle Versuche –4,1 dt/ha) (Cordeau et al. 2016).

Entscheidungshilfen bei der Unkrautbekämpfung

Aktuelle Bekämpfungsschwellen

Die wirtschaftlichen Schwellen für den Einsatz von Herbiziden sind gegenwärtig das wichtigste Werkzeug zur Entscheidungshilfe in der Unkrautbekämpfung. Die ersten Arbeiten zur Festlegung dieser Schwellenwerte wurden Ende der 1970er-Jahre durchgeführt und in den 80er-Jahren publiziert (Koch and Hurlé 1978, Caussanel 1989). Die Auswirkungen der Unkrautdichte auf den Ertrag wurden ausgehend von Versuchsdaten modelliert. In Tabelle 1 sind die verschiedenen bestehenden Schwellenwerte für dieselben Unkräuter von Getreidekulturen gemäss verschiedenen europäischen wissenschaftlichen

Tab. 1 | In der wissenschaftlichen Literatur publizierte Schadschwellen für Getreide (durchschnittliche Unkrautdichte, die einen Ertragsverlust von 5% verursacht)

Unkrautarten		Anzahl Pflanzen/m ²									
		Neururer (1975)	Neururer (1976)	Wahmhoff (1986)	Aarts (1985)	Cousens, Wilson et al. (1985)	Auld et Tisdell (1987)	Zani, Berti et al. (1993)	Gherekloo, Noroozi et al. (2010)	Gerowitt et Heitefuss (1990)	Swanton, Weaver et al. (1999)
Einkeimblättrige											10–40
<i>Alopecurus myosuroides</i> Huds.	Ackerfuchsschwanz			30	25	30–50		25–35		20–30	
<i>Apera spica-venti</i> L.	Windhalm	19,2		20	15						
<i>Avena fatua</i> L.	Flughafer	10,8				8–12	3–7				
<i>Avena sterilis</i>	Tauber Hafer							7–12	5		
<i>Bromus sterilis</i>	Taube Trespel							40			
<i>Lolium multiflorum</i>	Italienisches Raigras							25–35			
Zweikeimblättrige										40–50	
<i>Cirsium arvense</i> L.	Ackerkratzdistel	1,6	4,3								
<i>Convolvulus</i> spp	Winden								12		
<i>Vicia sativa</i>	Futterwicke							5–10			
<i>Fallopia convolvulus</i>	Windenknoäterich	2,8	0,7	2	5					2	
<i>Galeopsis tetrahit</i> L.	Ackerhohlzahn	3,4	9,4								
<i>Galium aparine</i> L.	Klebern	4,3	0,7	0,5	0,5			2		0,1–0,5	
<i>Matricaria recutita</i> L.	Echte Kamille	4,2			5						
<i>Sinapis arvensis</i> L.	Ackersenf	2,7	6,1								
<i>Papaver rhoeas</i>	Klatschmohn	22									
<i>Stellaria media</i> L.	Vogelmiere	7,2	10,3		50						
<i>Veronica</i> sp.	Ehrenpreis	4,6	9,0		50						
<i>Viola arvensis</i>	Acker-Stiefmütterchen										
<i>Alchemilla vulgaris</i>	Gemeiner Frauenmantel										
<i>Lamium</i> sp	Taubnesseln										
<i>Vicia villosa</i> Roth	Zottelwicke	2,1	0,8	2							
<i>Chenopodium album</i>	Weisser Gänsefuss								19		
<i>Salsola kali</i>	Kali-Salzkraut								13		
<i>Rapistrum rugosum</i>	Runzeliger Rapsdotter								27		

Publikationen zusammengestellt. In der Schweiz wurden von Agroscope in Reckenholz Schwellenwerte ausgearbeitet und analog zu den deutschen Arbeiten von Koch und Hurler (1978) sowie Gerowitt and Heitefuss (1990) veröffentlicht (Ammon and Irla 1996, Zwerger and Artl 2002). Diese Publikationen sind nicht mehr verfügbar, sind aber die Grundlage für das Agridea Merkblatt über Bekämpfungsschwellen (Tab. 2).

Die Anwendung dieser Schwellenwerte als einzige Entscheidungshilfe für die Unkrautbekämpfung wird heute

aus verschiedenen Gründen in Frage gestellt. Erstens unterscheiden sich die Werte für dasselbe Unkraut je nach Publikation (Tab. 1). Die Ergebnisse von Feldversuchen und von Simulationen über 60 Jahre zeigen ausserdem, dass die Anzahl der Herbizid Behandlungen in einem Anbauzyklus gleich war, unabhängig davon, ob die Bekämpfungsschwelle bei 1 oder 10 Unkrautpflanzen/m² festgelegt war (Munier-Jolain et al. 2002). Zweitens beruhen die Schwellenwerte auf Modellen, die eine Konkurrenz zwischen jeweils nur zwei Arten (eine Unkrautart

Tab. 2 | Bekämpfungsschwellen für Unkräuter in der Schweiz gemäss Merkblatt im Ordner «Ackerbau» von Agridea.

Unkräuter	Kultur	Kontrollperiode (Stad. BBCH)	Bekämpfungsschwelle
Klebern	alle Getreidearten	13–39	0,1 Pflanze pro m ² bzw. 1 Pflanze pro 10m ²
Windenknöterich	alle Getreidearten	13–29	2 Pflanzen pro m ²
Wicken	alle Getreidearten	13–29	2 Pflanzen pro m ²
Vogelmiere	alle Getreidearten	13–29	25 Pflanzen pro m ²
Ackerhohlzahn	alle Getreidearten	13–29	3 bis 5 Pflanzen pro m ²
Diverse breitblättrige Unkräuter	alle Getreidearten	13–29	Total 5% Bodenbedeckung oder 50 Pflanzen pro m ²
Ungräser			
Windhalm	Winterweizen (Frühsaat)	13–29	10 Pflanzen/m ²
	Wintergerste, Winterweizen (Spätsaat), Sommergetreide	13–29	20 Pflanzen/m ²
	Winterroggen	13–29	30 Pflanzen/m ²
Ackerfuchsschwanz	Winterweizen (Frühsaat)	13–29	15 Pflanzen/m ²
	Wintergerste, Winterweizen (Spätsaat)	13–29	20 Pflanzen/m ²
	Winterroggen, Sommergetreide	13–29	30 Pflanzen/m ²
Ital. Raigras	Wintergetreide	13–29	8 Pflanzen/m ²
Einjähriges Rispengras	Wintergetreide	13–29	50 Pflanzen/m ²
Flughafer	Wintergetreide	13–29	10 Pflanzen/m ²
	Sommergetreide	13–29	5 Pflanzen/m ²
	Saatgetreide	–	0 Pflanzen/m ²
Diverse Ungräser	alle Getreidearten	13–29	Total 10 bis 50 Pflanzen pro m ²

und eine Kulturpflanze) berücksichtigen (Carlson and Hill 1985). In der Praxis beherbergt eine Parzelle jedoch nicht nur eine Unkrautart, sondern eine Pflanzengesellschaft mit unterschiedlichen Unkräutern. In einigen Modellen wurde versucht, die Schädlichkeit mehrerer gleichzeitig auftretender Unkräuter abzuschätzen, indem die von den einzelnen Unkräutern verursachten Ernteverluste berücksichtigt wurden (Swanton *et al.* 1999). Allerdings ist die schädliche Wirkung beim gleichzeitigen Auftreten verschiedener Unkrautarten nicht additiv. Die Konkurrenz zwischen den verschiedenen Unkrautarten reduziert den Konkurrenz Effekt der einzelnen Unkrautarten. So überschätzte eines der ersten Modelle mit mehreren Arten zur Prognose von Ertragseinbussen bei Soja den Schaden für die Kultur um etwa 7,5% (Berti and Zanin 1994). Drittens wurden die Schwellenwerte seit den 1990er-Jahren nicht mehr neu berechnet, obwohl sich die Verkaufspreise und die Produktionskosten, die beide in die Berechnung einfließen, seither erheblich verändert haben (Gerhards *et al.* 2012). Viertens ist die Verteilung der Unkräuter in einer Parzelle oft sehr heterogen (Abb. 8). Der Schwellenwert kann in einzelnen Bereichen der Parzelle überschritten werden, in anderen jedoch nicht. Das erschwert die Entscheidung, ob eine Bekämpfung vorgenommen werden soll.

Schliesslich berücksichtigen die Schwellenwerte nicht, dass ein grosser Unkrautbestand viele Samen produziert, welche in den Folgekulturen keimen können. Beispielsweise wird eine Behandlung gegen den Ackerfuchsschwanz erst bei 20–30 Pflanzen pro m² empfohlen (Durchschnittswert der Publikationen in Tab. 1). Bei einer niedrigeren Dichte (z.B. 15 Ackerfuchsschwanz-Pflanzen pro m²) ist die Kultur des betreffenden Jahres kaum beeinträchtigt, aber der Befall kann längerfristig wegen der Samenproduktion ausser Kontrolle geraten. In der Praxis werden die Bekämpfungsschwellen bei Unkräutern daher nur sehr bedingt angewendet (Ramseier *et al.* 2016).

Zusammenfassend lässt sich feststellen, dass die Bekämpfungsschwellen eine Einschätzung der Unkrautarten nach ihrer individuellen Schädlichkeit ermöglichen, aber alleine angewendet keine nachhaltige Unkrautbekämpfung sicherstellen.

Neue Indikatoren für die Schädlichkeit

Die Unkrautdichte ist der Indikator der aktuell verwendet wird, um die Schädlichkeit von Unkräutern zu bestimmen und Bekämpfungsschwellen zu berechnen (Swanton *et al.* 1999). Nach vielen Jahren Unkrautforschung stellt die wissenschaftliche Gemeinschaft fest,



Abb. 8 | Befall mit der Tauben Trespe (*Anisantha sterilis*) in einem bestimmten Bereich. (Foto: INRAE)

dass die Unkrautdichte im Feld nur einen Teil der verursachten Ertragsschwankungen erklärt. Es wurden deshalb weitere Indikatoren entwickelt, die in der Forschung verwendet werden:

- Der Bodenbedeckungsgrad aller Unkräuter oder pro Unkrautart im Verhältnis zum Bodenbedeckungsgrad der Kulturpflanze.

Dieser Indikator erfasst die Kapazität einer Pflanzengemeinschaft oder einzelner Pflanzen, Licht zu absorbieren und den Boden zu bedecken (Kropff and Lotz 1992, Florez *et al.* 1999). Im Falle der Zuckerrübe erklärt diese Variable den Ertrag am besten, obwohl die Wirkung bestimmter Unkräuter mit aufrechtem Wuchs wie Hühnerhirse (*Echinochloa crus-galli*) oder Weisser Gänsefuss (*Chenopodium album*) dabei unterschätzt werden (Gerhards *et al.* 2017).

- Die Biomasse aller Unkräuter oder pro Unkrautart im Verhältnis zur Biomasse der Kulturpflanzen.

Das Verhältnis zwischen der Biomasse der Unkräuter und der Biomasse der Kulturpflanzen allein erklärt 31 % der Schwankungen der Ertragsausfälle bei Getreide (Milberg and Hallgren 2004). Die Biomasse pro Unkrautart korreliert eng mit dem Kornertrag.

- Der für die jeweilige Kulturpflanze kritische Zeitraum, in dem sie gegenüber Unkräutern empfindlich ist.

Für jede Kulturpflanze gibt es eine kritische Periode, in der das Auftreten von Unkräutern eine besonders ungünstige Wirkung auf den Ertrag hat (Tab. 3). Nach diesem Zeitraum können Unkräuter geduldet werden, unter der Bedingung, dass die Samenproduktion in bestimmten Grenzen bleibt.

Diese Indikatoren müssen noch in ein Entscheidungshilfe-Tool für Landwirte integriert werden, mit dessen Hilfe, basierend auf den Beobachtungen im Feld, entschieden werden kann, ob kurative Massnahmen eingesetzt werden. Diese Massnahmen sollten falls möglich mechanisch oder biologisch sein, und nicht nur chemisch. Aufgrund der Schwierigkeit, die Biomasse der Unkräuter und der Kulturpflanzen im Feld getrennt zu ernten und zu bestimmen, testet die Forschungsgruppe Herbologie Ackerbau von Agroscope gegenwärtig zusammen mit engagierten Landwirtschaftsbetrieben im Rahmen des Projekts Pestired (Wirth *et al.* 2020) und des Langzeitversuchs Herbiscopes eine neue Methode zur visuellen Schätzung des oberirdischen Volumens von Unkräutern und Kulturpflanzen (Abb. 9).

Kamerasysteme mit Bildsensoren könnten diese Messungen vereinfachen. Diese Systeme wurden z.B. getestet um die Verteilung von Unkräutern in Versuchspartikeln abzuschätzen und so zuverlässigere Bekämpfungsschwellen für Winterweizen festzulegen (Keller *et al.* 2014). Bei der Berechnung neuer Schadschwellen ist es besonders wichtig, die langfristige Schädlichkeit der Unkräuter zu berücksichtigen. In einer kanadischen Studie (Simard, Panneton *et al.* 2009) wurde gezeigt, dass die Ertragseinbussen bei einer geringen Bodenbedeckung durch Unkräuter (< 0,4 %) vernachlässigbar waren, auch wenn die Herbizidanwendungen um 85 % reduziert wurden. Dies traf allerdings nur im ersten Versuchsjahr zu. Nach drei Jahren Fruchtfolge mit Mais und Soja konnten nur noch 10 % Herbizide eingespart werden,

Tab. 3 | Allgemein geltende kritische Zeiträume für die Unkrautbekämpfung, nach Scavo and Mauromicale (2020) und Martin *et al.* (2001).

Kultur	Kritischer Zeitraum mit hoher Empfindlichkeit gegenüber Unkraut GT: $\frac{\text{Gradtagssumme (Tmax + Tmin)}}{2} - \text{TBasis}$
Winterweizen	von 506 bis 1023 GT, d.h. vom Stadium Bestockung bis zu Ähren 1 cm
Raps	17 bis 38 Tage nach dem Auflaufen, d.h. bis zum 4–6 Blatt-Stadium
Mais	vom 3 bis zum 10-Blatt-Stadium
Kartoffeln	19–24 und 43–51 Tage nach dem Auflaufen
Sonnenblume	14–26 Tage nach dem Auflaufen
Soja	bis 30 Tage nach dem Auflaufen

weil die Unkräuter früher und in grösserer Zahl auftraten. Als Ergebnis dieser Studie wurde der Schwellenwert für die relative Bodenbedeckung durch Unkräuter auf 0,077 % korrigiert um sie langfristig kontrollieren zu können. Da die Bildanalyse in diesem Bereich nicht mehr ausreichend präzise für die Messung der Bodenbedeckung durch Unkraut war, besteht hier noch Bedarf für die Verbesserung der Technologie.

Modelle zur Prüfung präventiver Massnahmen

Die Modellierung ist der am besten geeignete Ansatz für die richtige Anwendung präventiver Massnahmen. Das vom INRAE entwickelte Modell FLORSYS ermöglicht es Wissenschaftlern schon heute, den Effekt verschiedener Anbausysteme auf die Unkrautdynamik und den Ertrag in einer virtuellen Parzelle über mehrere Jahre zu evaluieren (Colbach *et al.* 2008). Es wurden funktio-

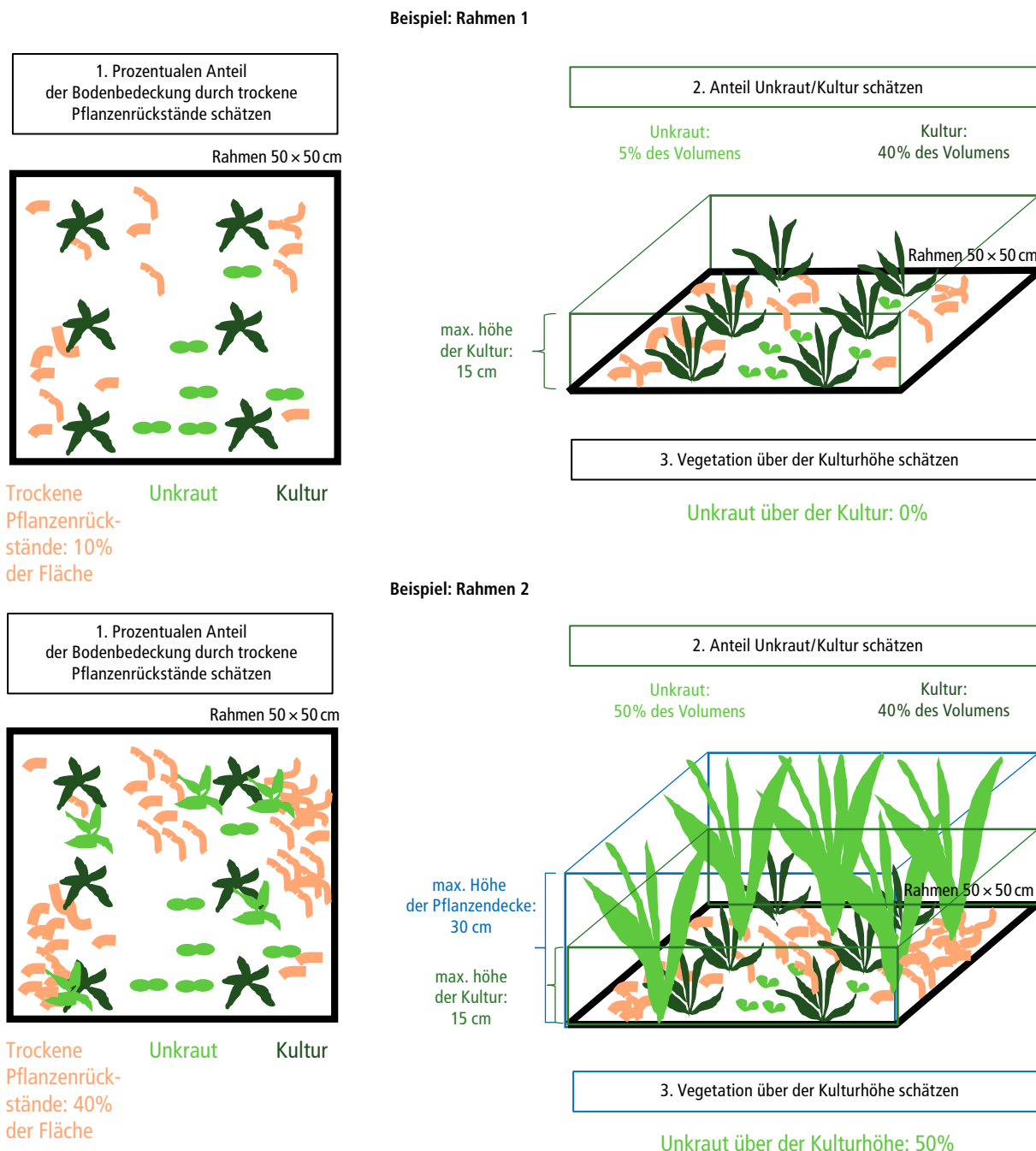


Abb. 9 | Beispiel für die visuelle Schätzung des oberirdischen Volumens von Unkräutern und Kulturpflanzen. Diese Methode wird im Rahmen des Projekts PestiRed und des Langzeitversuchs Herbiscopes am Versuchsstandort von Agroscope in Changins entwickelt und getestet.

nelle Merkmale von 26 häufig auftretenden Unkrautarten (die für die wichtigsten Gruppen von Unkräutern repräsentativ sind) und von 33 Kulturpflanzen und Zwischenfrüchten parametrisiert. Die Eingabedaten sind die Kulturmassnahmen des getesteten Systems, die Bodeneigenschaften der Parzelle und die meteorologischen Daten für einen bestimmten Ort. Auf der Basis dieser Daten sowie der detaillierten Parametrisierung der funktionalen Merkmale der Unkräuter repräsentiert das Modell den Lebenszyklus der Unkräuter und Kulturpflanzen. Drei Schlüsselregeln steuern das Modell: 1. Die Pflanze, die zuerst aufläuft, hat die grösste Chance, die Oberhand zu gewinnen; 2. die Pflanze, die die verfügbaren Ressourcen am besten nutzen kann, wird sich am besten entwickeln; und 3. die Pflanze, die die widerstandsfähigsten Samen bildet, wird am längsten überleben (Colbach *et al.* 2021). Die Ausgangsdaten für jede Unkrautart sind: Dichte, Biomasse, Entwicklungsstadium und lebensfähige Samen im Bodenvorrat. Damit die Ergebnisse der Simulationen von FLORSYS für Berater und Landwirte nützlich und brauchbar sind, werden die Daten in Wirkungsindikatoren konvertiert, die positiv (z.B. erhöhte Biodiversität) oder negativ (z.B. Ernteverlust) sein können (Mézière *et al.* 2015). Mit Hilfe von Entscheidungsregeln kann ausserdem der Effekt verschiedener Kombinationen von Anbautechniken auf die Wirkungsindikatoren getestet werden (Colas *et al.* 2016). Dies sind die ersten Schritte zur Entwicklung eines Entscheidungshilfe-Tools für Landwirte basierend auf dem Model FLORSYS.

Samenvorrat noch schwierig zu quantifizieren

Um die langfristige Wirksamkeit präventiver und kurativer Massnahmen beurteilen zu können, wäre es nützlich, die Entwicklung des Samenvorrats im Boden zu kennen. Dieser Vorrat ist der beste Indikator für die potentielle Zusammensetzung von Unkrautgesellschaften. Der Bodensamenvorrat lässt sich aber nur schwer bestimmen, weil die verwendeten Methoden sehr aufwendig und wenig verlässlich sind: Es müssen sehr viele Bodenproben pro Parzelle entnommen werden, die Samen müssen aufwändig aus der Bodenprobe isoliert und unter dem Binokular gezählt oder unter kontrollierten Bedingungen (die nicht genau den Bedingungen im Feld entsprechen) zur Keimung gebracht werden. Auch fehlt bisher noch ein automatisierter Ansatz zur Identifikation und Auszählung der Samen, trotz der sich neu entwickelnden Bild- und Robotertechnologien (Brenchley und Warington 1930, Mahé *et al.* 2020). Die DNA-Analyse der Samen mit Hilfe der Real time PCR (Polymerase-Ket-

tenreaktion) könnte in Zukunft eine Methode sein, mit der sich der Samenvorrat schneller quantifizieren lässt (Riley *et al.* 2010). Allerdings müsste für jede zu erwartende Unkrautart ein separater PCR-Ansatz erfolgen. Deshalb könnte sich diese Methode zwar dazu eignen, eine spezifische Unkrautart im Samenvorrat zu untersuchen, aber gegenwärtig noch nicht, um alle im Vorrat vorhandenen Unkräuter zu quantifizieren.

Schlussfolgerungen und Perspektiven

- Die Unkrautforschung der vergangenen 40 Jahre hat gezeigt, wie schwierig es ist, effiziente und praktisch anwendbare Indikatoren für die Unkrautbekämpfung zu finden.
- In allen landwirtschaftlichen Parzellen kommen natürlicherweise Unkrautgesellschaften vor. Die Interaktionen der Unkräuter innerhalb landwirtschaftlicher Systeme sind vielschichtig. Die Unkrautbekämpfung muss immer auf die jeweilige Kultur und Fruchtfolge abgestimmt sein, mehrere Bekämpfungsmassnahmen kombinieren und verschiedene Entscheidungshilfe Tools zum jeweils richtigen Zeitpunkt einsetzen.
- Ein Entscheidungshilfe-Tool, das neben der visuell oder mit Kameras geschätzten Unkrautdichte neue Indikatoren zur Schädlichkeit (Bodenbedeckung, Biomasse usw.) berücksichtigt, könnte abschätzen, wie bedrohlich die Unkrautsituation ist und ob kurative Massnahmen mechanischer oder biologischer oder – als letztes Mittel – chemischer Art erforderlich sind.
- Zusätzlich ermöglicht ein Tool, basierend auf dem Modell FLORSYS, mit dem sich die Unkrautentwicklung in einer gegebenen Situation prognostizieren lässt, das bestehende Anbausystem gegebenenfalls anzupassen und präventive Massnahmen je nach Risikoabschätzung rechtzeitig zu planen.
- Für eine nachhaltigere Unkrautbekämpfung mit einem Verzicht oder Teilverzicht auf Herbizide muss einerseits das Wissen über die einzelnen Unkrautarten und ihre Interaktionen untereinander und mit den Kulturpflanzen vertieft und die Forschung zu präventiven und kurativen Bekämpfungsstrategien intensiviert werden. Andererseits sollten Modelle und Bilderkennungsverfahren weiterentwickelt werden, mit denen die Identifizierung von Unkräutern und die Einschätzung ihrer Schädlichkeit verbessert werden. An diesen Themen arbeiten aktuell die Arbeitsgruppen im Bereich der Unkrautforschung in der Schweiz und in Europa. ■

Literatur

- Aarts D. V., 1985. A management information system for weed control in winter wheat. *Proc British Crop Protect. Conf. Weeds* 2, 679–686.
- Adeux G. *et al.*, 2019. Mitigating crop yield losses through weed diversity. *Nature Sustainability* 2(11), 1018–1026.
- Alignier A. & Petit S., 2012. Factors shaping the spatial variation of weed communities across a landscape mosaic. *Weed Research* 52 (5), 402–410.
- Ammon H.-U. & Irla E., 1996. Unkrautbekämpfung im Acker- und Futterbau, Landwirtschaftliche Lehrmittelzentrale.
- Auld B. A. & Tisdell C. A., 1987. Economic thresholds and response to uncertainty in weed control. *Agricultural Systems* 25 (3), 219–227.
- Berti A. & Zanin G., 1994. Density equivalent: a method for forecasting yield loss caused by mixed weed populations. *Weed Research* 34 (5), 327–332.
- Bertrand M. & Doré T., 2008. Comment intégrer la maîtrise de la flore adventice dans le cadre général d'un système de production intégrée? *Innovations Agronomiques* 3, 1–13.
- Birch A. N. E. *et al.*, 2011. How agro-ecological research helps to address food security issues under new IPM and pesticide reduction policies for global crop production systems. *Journal of Experimental Botany* 62 (10), 3251–3261.
- Brechley W. E. & Warington K., 1930. The weed seed population of arable soil: I. Numerical estimation of viable seeds and observations on their natural dormancy. *The Journal of Ecology*, 235–272.
- Carlson H. L. & Hill J. E., 1985. Wild oat (*Avena fatua*) competition with spring wheat: plant density effects. *Weed Science*, 176–181.
- Caussanel J., 1989. Nuisibilité et seuils de nuisibilité des mauvaises herbes dans une culture annuelle: situation de concurrence bispécifique. *Agronomie*, EDP Sciences, 1989, 9 (3), 219–240.
- Chauvel B. *et al.*, 2018. Gestion durable de la flore adventice des cultures, Editions Quae.
- Colas F. *et al.*, 2016. Développement d'un outil d'aide à la décision pour la gestion intégrée des adventices.
- Colbach N. *et al.*, 2021. The FLORSYS crop-weed canopy model, a tool to investigate and promote agroecological weed management. *Field Crops Research* 261, 108006.
- Colbach N., *et al.*, 2008. La modélisation au service de l'évaluation et de la conception des systèmes de cultures intégrés. *Innovations Agronomiques* 3, 61–73.
- Cordeau S. *et al.*, 2016. La nuisibilité directe des adventices en grandes cultures: quelles réponses nous apportent les essais désherbages?. 23^e conférence du COLUMA – Journées internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes.
- Cousens R. *et al.*, 1985. To spray or not to spray: the theory behind the practice. *Proc. Br. Crop Prot. Conf. Weeds*.
- Dessaint F. *et al.*, 1997. Nine years' soil seed bank and weed vegetation relationships in an arable field without weed control. *Journal of Applied Ecology*, 123–130.
- Dieleman A. *et al.*, 1996. Decision rules for postemergence control of pigweed (*Amaranthus* spp.) in soybean (*Glycine max*). *Weed Science*, 126–132.
- Florez J. A. *et al.*, 1999. Predicting rice yield losses caused by multispecies weed competition. *Agronomy Journal* 91 (1), 87–92.
- Gaba S. *et al.*, 2017. Livret «Gérer les espèces adventices et la flore des linéaires non cultivés une approche fonctionnelle».
- Gerhards R. *et al.*, 2017. Sugar beet yield loss predicted by relative weed cover, weed biomass and weed density. *Plant Protection Science* 53 (2), 118–125.
- Gerhards R. *et al.*, 2012. Using precision farming technology to quantify yield effects attributed to weed competition and herbicide application. *Weed Research* 52 (1), 6–15.
- Gerowitt B. & Heitefuss R., 1990. Weed economic thresholds in cereals in the Federal Republic of Germany. *Crop Protection* 9 (5), 323–331.
- Gherekhloo J. *et al.*, 2010. Multispecies weed competition and their economic threshold on the wheat crop. *Planta Daninha* 28 (2), 239–246.
- Jauzein P., 1995. Flore des champs cultivés, Sopra.
- Keller M. *et al.*, 2014. Estimating economic thresholds for site-specific weed control using manual weed counts and sensor technology: An example based on three winter wheat trials. *Pest Management Science* 70 (2), 200–211.
- Knezevic S. Z. *et al.*, 1997. Relative time of redroot pigweed (*Amaranthus retroflexus* L.) emergence is critical in pigweed-sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] competition. *Weed Science*, 502–508.
- Koch W. & Hurler K., 1978. Grundlagen der Unkrautbekämpfung, E. Ulmer.
- Kropff M. & Lotz L., 1992. Systems approaches to quantify crop-weed interactions and their application in weed management. *Agricultural Systems* 40 (1–3), 265–282.
- Lauber K. *et al.*, 2012. Flora Helvetica. Bern. Switzerland: Haupt.
- Mahé I. *et al.*, 2020. Soil seedbank: Old methods for new challenges in agroecology? *Annals of Applied Biology*.
- Martin S. G. *et al.*, 2001. Critical period of weed control in spring canola. *Weed Science* 49 (3), 326–333.
- Merfield C. N., 2019. Chapter 5 – Integrated Weed Management in Organic Farming. *Organic Farming*. S. Chandran, M. R. Unni and S. Thomas, Woodhead Publishing: 117–180.
- Mézière, D., *et al.*, 2015. Developing a set of simulation-based indicators to assess harmfulness and contribution to biodiversity of weed communities in cropping systems. *Ecological Indicators* 48, 157–170.
- Milberg P. & E. Hallgren, 2004. Yield loss due to weeds in cereals and its large-scale variability in Sweden. *Field Crops Research* 86 (2–3), 199–209.
- Munier-Jolain N. *et al.*, 2002. Long-term modelling of weed control strategies: analysis of threshold-based options for weed species with contrasted competitive abilities. *Weed Research* 42 (2), 107–122.
- Neururer H., 1975. Weitere Erfahrungen in der Beurteilung der tolerierbaren Verunkrautungsstärke. *Zeitschrift für Pflanzenkrankheiten und Pflanzenschutz*, Sonderheft 7, 63–69.
- Neururer H., 1976. Ökonomische Schadensschwelle und tolerierbare Verunkrautungsstärke in der Unkrautbekämpfung. *Land- und forstwirtschaftliche Forschung in Österreich*.
- Oerke E., 1994. Estimated crop losses due to pathogens, animal pests and weeds. En «Crop production and crop protection» (EC Oerke, HW Dehne, F. Schonbeck, A. Weber, Eds.), Elsevier: Amsterdam.
- Oerke E., 2006. Crop losses to pests. *The Journal of Agricultural Science* 144, 31.
- Oliver L. R., 1988. Principles of weed threshold research. *Weed Technology*, 398–403.
- Petit S. *et al.*, 2014. Weed seed choice by carabid beetles (Coleoptera: Carabidae): Linking field measurements with laboratory diet assessments. *European Journal of Entomology* 111 (5), 615–620.
- Petit S. *et al.*, 2008. Les apports de l'écologie du paysage pour comprendre la dynamique de la flore adventice. *Innovations Agronomiques* 3, 49–60.
- Ramseier *et al.*, 2016. Utilisation des seuils d'intervention et des services de prévision et d'avertissement en Suisse. *Recherche Agronomique Suisse* 7 (2), 98–103.
- Riley I. T. *et al.*, 2010. Quantification of roots and seeds in soil with real-time PCR. *Plant and Soil* 331 (1), 151–163.
- Scavo A. & Mauromicale G., 2020. Integrated Weed Management in Herbaceous Field Crops. *Agronomy* 10 (4), 466.
- Schaffner U. *et al.*, 2020. Biological weed control to relieve millions from Ambrosia allergies in Europe. *Nature Communications* 11 (1), 1–7.
- Simard J.-M. *et al.*, 2009. Validation of a Management Program Based on a Weed Cover Threshold Model: Effects on Herbicide Use and Weed Populations. *Weed Science* 57 (2), 187–193.
- Storkey J. & P. Neve, 2018. What good is weed diversity? *Weed Research* 58 (4), 239–243.
- Swanton C. J. *et al.*, 1999. Weed Thresholds. *Journal of Crop Production* 2 (1), 9–29.
- Vuilloud P. *et al.*, 2006. Résultats de 35 ans de culture sans labour à Changins III. Mauvaises herbes, maladies fongiques et ravageurs. *Revue suisse d'Agriculture* 38 (2), 81–87.
- Wahnhoff W., 1986. Erfahrungen mit der praktischen Anwendung von Schadensschwellen bei der Unkrautbekämpfung im Getreide. *Proceedings, EWRS symposium on economic weed control*.
- Wirth J. *et al.*, 2020. «PestiRed: a Swiss on-farm approach to reduce pesticide use in arable crops.» *Julius-Kühn-Archiv* (464), 290–294.
- Zanin G. *et al.*, 1993. Estimation of economic thresholds for weed control in winter wheat. *Weed Research* 33 (6), 459–467.
- Zwerger P. & K. Arlt, 2002. Unkraut: Ökologie und Bekämpfung, Eugen Ulmer.