

Alternativen zur Nutzung von Glyphosat: Methoden einer Ressourcen aufbauenden Landwirtschaft

von Stefan Schwarzer

Hintergrund

Glyphosat ist das am weitesten verbreitete Herbizid in der Landwirtschaft und wird oft in Verbindung mit gentechnisch veränderten Kulturen eingesetzt. Die Abhängigkeit der Landwirte von Glyphosat ist in den letzten Jahrzehnten stark gestiegen, da es einfach anzuwenden und relativ kostengünstig ist. Glyphosat ist jedoch auch zunehmend umstritten, wobei sich immer mehr Hinweise finden, dass es zu einer Vielzahl von Gesundheits- und Umweltschäden führen kann. Zwei Länder haben Glyphosat bereits verboten, und andere erwägen, das Gleiche zu tun. Dieser »Foresight Brief« zeigt, dass es alternative Methoden gibt, die helfen können den Einsatz von Glyphosat und anderen schädlichen Chemikalien zur Unkrautbekämpfung zu vermeiden. Diese alternativen Methoden bieten gleichzeitig die Vorteile der Wiederherstellung der Bodenfruchtbarkeit und der Erhöhung der Biodiversität in der Umwelt.

Einleitung

Seit den 1950er Jahren gelang es der so genannten »modernen« oder »industriellen« Landwirtschaft, basierend auf Methoden, die sich immer stärker auf eine vielfältige chemische Behandlung von Nutzpflanzen und Feldern stützen, die Erträge rasch zu steigern. Diese reichen vom Einsatz chemischer Düngemittel bis hin zu Substanzen, die unerwünschte Lebensformen abtöten, wie Herbizide zur Unkrautunterdrückung, Insektizide um Schädlinge zu bekämpfen und Fungizide um Pilze abzutöten. Andere Methoden beinhalten die Nutzung von Rodentizide gegen Nagetiere, Molluskizide zur Belämpfung von Schnecken, Nematizide um Nematoden zu eliminieren und einige mehr.

Das weltweit häufigste Molekül in Herbiziden ist Glyphosat, das 1974 unter Monsanto's Marke »Roundup« eingeführt wurde. 1996 begann das Unternehmen mit dem Vertrieb von gentechnisch veränderten Organismen (GVO) wie Mais und Sojabohnen, die auf Glyphosatresistenz entwickelt wurden. Seit dem Verlust des ursprünglichen Patents durch Monsanto Ende 2014 sind Produkte, die Glyphosat als Wirkstoff enthalten, unter mehreren Namen von vielen anderen Herstellern zu finden.

Der enorme weltweite Erfolg von Glyphosat ist darauf zurückzuführen, dass es die doppelte Eigenschaft aufweist, total zu sein (d.h. alle Pflanzen teilen den blockierten Mechanismus und sind daher zu verschiedenen Graden empfindlich) und systemisch (d.h. es wandert durch das Gewebe, um das Wurzelsystem zu erreichen) ¹. Es tötet jede krautige Vegetation durch den Kontakt über ihre Blätter. Die relativ einfache Anwendung hat die Unkrautbekämpfungssysteme vereinfacht und auch dadurch zu einem erheblichen Ertragswachstum geführt hat. Gleichzeitig haben jedoch die potenziellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit ^{2,3} und die Umwelt (Veränderungen in der Bodenlebensgemeinschaft und Verlust der Biodiversität) sowie die Entwicklung von fast 40 »Superunkräutern«, die gegen Glyphosat resistent wurden, zu anhaltenden und oft kontroversen Forschungen und Diskussionen geführt ⁴⁻⁶.

Infolgedessen erwägen mehrere Länder und viele Gemeinden, den Verkauf und die Verwendung von Glyphosat zu verbieten oder einzuschränken oder haben bereits entsprechende Gesetze erlassen ⁷. In der Europäischen Union (EU) wurde die Lizenz, nach intensiven Diskussionen und heftigem Widerstand der

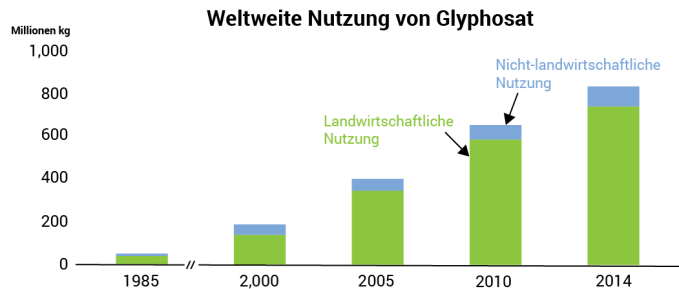
Öffentlichkeit, kürzlich erneuert, jedoch nur um weitere fünf Jahre.

Kann die Landwirtschaft ohne Glyphosat oder andere eventuell noch schädlichere Herbizide auskommen? Welche Methoden gibt es bereits, die die Abhängigkeit von Glyphosat (und anderen Herbiziden) reduzieren oder ganz aufheben könnten? Ist der Fokus auf die »Unkrautbekämpfung« der richtige und einzige Ansatz, um sich diesem Thema zu nähern? Während es scheint, dass die zentrale Frage (für Landwirte, aber im Allgemeinen in dieser Diskussion über die Verwendung von Glyphosat) ist: Wie können wir Unkraut bekämpfen?, sollte die eigentliche Frage lauten: Wie können wir ein Agrarsystem gestalten, dessen Maßnahmen zur Unkrautbekämpfung nicht nur die Ernährungssicherheit gewährleisten, sondern auch nahrhafte Lebensmittel produziert und gleichzeitig die Gesundheit von Mensch und Umwelt schützt?

Warum ist dies wichtig?

Zahlen zu Glyphosat

Glyphosat wurde 1964 erstmals als Metallchelator patentiert, d.h. als ein Molekül, das die ungewöhnliche Fähigkeit besitzt, bestimmte Arten von Metallionen anzuziehen und sicher zu halten. Es wurde zur Reinigung von Heizungsanlagen eingesetzt, da es ermöglicht, Metalle im Wasser aufzulösen. Seit 1974 wird es jedoch hauptsächlich als Totalherbizid eingesetzt. Zwischen 1974 und 2014 wurden weltweit 8,5 Milliarden Kilogramm Glyphosat-Wirkstoff eingesetzt, davon allein in den USA über 1,6 Milliarden Kilogramm (19%)⁸. Weltweit hat sich der Glyphosatverbrauch fast verfünffach (Abbildung 1), seit 1996 gentechnisch veränderte Glyphosat-tolerante Pflanzen eingeführt wurden ("Roundup Ready"). 72% der weltweit zwischen 1974 und 2014 eingesetzten Gesamtmenge an Glyphosat wurden allein in den letzten 10 Jahren versprüht. Innerhalb der Jahre 1996 bis 2017 nahm die globale Anbaufläche von Biotech/GVO-Kulturen um das 111-fache zu (Abbildung 2). Im Jahr 2014 verwendeten die Landwirte Glyphosat mit einer durchschnittlichen Menge von 1,5-2 kg/ha und wendeten es auf 22-30% der weltweit bewirtschafteten Anbaufläche an. [In Deutschland wird Glyphosat auf 30-40 % der gesamten ackerbaulich genutzten Fläche mit ähnlichen Mengen verwendet⁹.] Allein im Jahr 2016 wurden 800.000 Tonnen dieses Herbizids weltweit verkauft, was es damit zum mit Abstand wichtigsten Herbizid macht. Über 90% davon werden für landwirtschaftliche Zwecke verwendet,



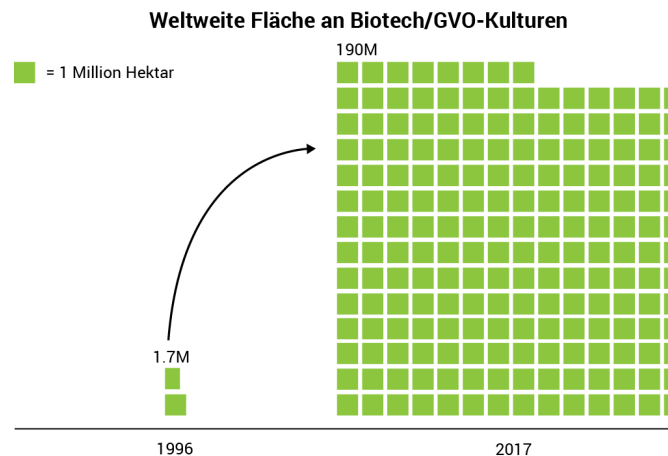
Quelle: Benbrook, C. (2016). Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally

Abb. 1: Weltweite Verwendung von Glyphosat - stetig ansteigend

der Rest hauptsächlich zur Unkrautbekämpfung auf Eisenbahnlinien sowie in wesentlich geringeren Mengen in öffentlichen Bereichen und privaten Gärten.

Nutzung von Glyphosat

Glyphosat wird hauptsächlich in der Landwirtschaft zur Bekämpfung und Vernichtung von Unkräutern eingesetzt. Ebenso wird es in der Voranbauphase der Kulturen genutzt, um Unkraut kurz vor dem Keimen der neuen Kultur zu beseitigen. Es wird auch als Voraufbauherbizid nach der Aussaat, aber vor dem Austrieb der Pflanzen verwendet. Es kann als Nachaufbauherbizid verwendet



Quelle: ISAAA (2017). Global Status of Commercialized Biotech/GM Crops in 2017

Abb. 2: Die Fläche der GVO-Kulturen hat sich in 11 Jahren um das 111-fache vergrößert

werden, wenn die Kultur (hauptsächlich Sojabohnen, Mais, Baumwolle und Raps) glyphosat-tolerant ist, was das Sprühen des Herbizids in die bestehende Kultur ermöglicht und dabei unerwünschte Vegetation abtötet, aber die Kultur selbst nicht beeinträchtigt. Jährlich werden weltweit 21 Millionen Hektar glyphosat-resistentes Soja angebaut, was 60% des gesamten Soja-Anbaus entspricht. Der mit Abstand höchste Anteil an kultiviertem Soja, Mais und Baumwolle in Nord- und Südamerika ist gentechnikbasiert und impliziert den regelmäßigen Einsatz von Glyphosat⁸.

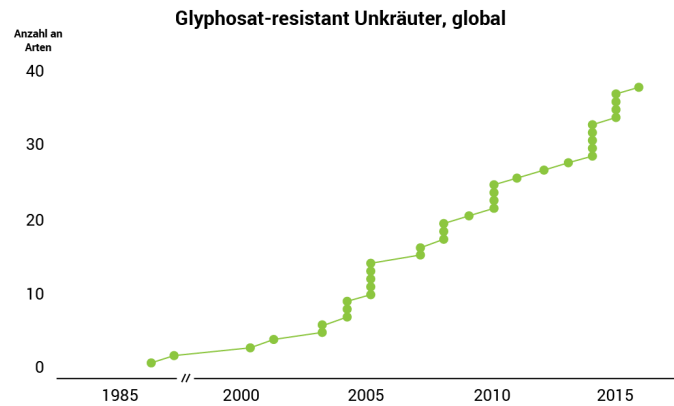
⁸ Selektive Herbizide töten nur bestimmte Pflanzen. Totalherbizide töten alle Pflanzen.

Die Landwirte nutzen es aber nicht nur zur Unkrautvernichtung, sondern auch zur Beseitigung von Zwischenfrüchten und Gründüngungen, vor allem wenn die Pflanzen im Winter nicht vollständig abgestorben sind, oder um ein Feld in der Hauptanbausaison schnell vorzubereiten. Es wird auch zur Trocknung verwendet, um das Saatgut von Nutzpflanzen (hauptsächlich Getreide) schneller auszutrocknen, da die Pflanze abstirbt und ihre oberen Stängel nicht mehr mit Wasser versorgt werden. Glyphosat wird auch in den Reihen zwischen Dauerkulturen wie Weinreben und dem Boden unter Obstplantagen eingesetzt und trägt zur Ausrottung invasiver Pflanzenarten bei.^{1,4,10}

Konservierende Bodenbearbeitung

Einer der Hauptgründe für die Bodenbearbeitung ist die Störung und Unterdrückung von Unkraut. Mit dem Einsatz von Glyphosat können Unkräuter abgetötet werden, ohne den Boden zu bewegen. Dadurch wird das Risiko der Bodenerosion verringert und der Einsatz von Traktordiesel reduziert¹¹. In einigen südamerikanischen Ländern werden inzwischen mehr als 70% der landwirtschaftlichen Fläche entsprechend als »Conservation Agriculture (CA)« bewirtschaftet¹². In den USA sowie in Australien und Europa nimmt die Zahl der Felder unter CA stetig zu, unterstützt durch Regierungen, die darauf abzielen, die Bodenerosion zu reduzieren. Jedoch ist durch den Wegfall des Pfluges die Unterdrückung von Unkraut schwieriger zu erreichen. So ist CA für eine erfolgreiche Umsetzung auf Glyphosat und andere selektive Herbizide angewiesen¹³⁻¹⁶.

Infolgedessen haben viele »moderne« Landwirte, vor allem in Amerika, ihr Anbausystem auf wenige Hauptkulturen reduziert, die oft nur aus einer Abfolge von Mais und Sojabohnen besteht, was für jede gepflanzte Kultur Erträge ermöglicht. Jedoch werden Fruchtfolgen und Zwischenfrüchte, Bodenfruchtbarkeit und integrierten Pflanzenschutz weitestgehend ignoriert. Das Wissen der Landwirte über die Wichtigkeit und Methoden der Boden- und Pflanzengesundheit hat sich durch die einfache Handhabung von Glyphosat und anderer Herbizide sowie



Quelle: Heab, I. (2018). Overview of alvohosate-resistant weeds worldwide

Abb. 3: Glyphosat-resistente Ackerunkräuter, kumulativ

Pestizide im Allgemeinen in den letzten Jahrzehnten zunehmend verringert.

Probleme aufgrund der Verwendung von Glyphosat

In den letzten Jahren ist eine umfangreiche wissenschaftliche Literatur entstanden, die mögliche Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit und die Umwelt durch den Einsatz von Glyphosat aufzeigt:

Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit

- Laut dem IARC-Bericht über Glyphosat³ wurden als Krebsarten, die am häufigsten mit einer Glyphosat-Exposition in Verbindung gebracht werden, das

Non-Hodgkin-Lymphom und andere hämatopoetische Krebsarten identifiziert, was durch andere Forschung unterstützt wird^{2,6,17-19}.

- Der IARC-Bericht kam ferner zu dem Schluss, dass die Glyphosat-Exposition DNA- und Chromosomenschäden in menschlichen Zellen sowie genotoxische, hormonelle und enzymatische Effekte bei Säugern verursacht.
- Obwohl einige Studien den Wirkstoff Glyphosat selbst als nicht schädlich für Mensch und Umwelt darstellen, geben die in »RoundUp« und anderen Formeln verwendeten Mischungen Anlass zur Sorge. Laborstudien zeigen, dass durch die Kombination von Glyphosat mit anderen in Roundup verwendeten (Träger)Substanzen diese toxischer sind als Glyphosat allein und Krebs oder andere Gesundheitsprobleme verursachen können²⁰⁻²². Glyphosat und andere Herbizide enthalten Hilfsstoffe oder Tenside (oft polyethoxyliertes Talgamin, POEA), die das Eindringen des Wirkstoffs durch die wachsartigen Oberflächen der behandelten Pflanzen erleichtern, welche deutlich toxischer sind als Glyphosat allein^{21,23}.

Auswirkungen auf die Umwelt

- Glyphosat-resistente Unkräuter stellen die größte Bedrohung für eine nachhaltige Unkrautbekämpfung in großen landwirtschaftlichen Kulturen dar²⁴. Achtunddreißig Unkrautarten haben mittlerweile eine Resistenz gegen Glyphosat entwickelt (Abbildung 3), die über 37 Länder und 34 verschiedene Anbausituationen verteilt sind²⁴.
- Nach der Anwendung von Glyphosat stiegen verfügbare Nitrat- und Phosphatwerte im Boden durch das Absterben der Pflanzen massiv an und »weisen auf mögliche Risiken für die Nährstoffauswaschung in Gewässer, Seen oder Grundwasserleiter hin«²⁵.
- Glyphosat verändert und stört die Population von Mikroorganismen im Boden^{26,27}. Es verringert die Population der arbuskulären Mykorrhizen²⁸⁻³⁰, die eine wichtige Rolle bei der Erleichterung der Wasser- und Nährstoffaufnahme der Pflanzenwurzeln spielen³¹⁻³³.

- Glyphosat ist toxisch für nützliche Bodenbakterien, wie die der Bacillus-Familie, die eine Schlüsselrolle bei der Unterdrückung spezifischer pathogener Pilze und der Bereitstellung von Bodenmineralien für Pflanzen spielen^{34,35}.
- Glyphosat reduziert die Aktivität und Vermehrung von Regenwürmern^{25,30} und stört die Darmmikrobiota von Honigbienen³⁶.
- Glyphosat soll sich an die Bodenmineralien (Mangan, Eisen, etc.) binden und ihre Bioverfügbarkeit für Pflanzen blockieren, was zu einer Schwächung der Pflanzenabwehr führt und die Population und Virulenz von Krankheitserregern erhöht³⁷.
- Eine Folge der Unkrautbekämpfung durch Glyphosat ist, dass Insektennahrung in Form von Nektar, Pollen, Blättern und Samen von den Feldern eliminiert wird. Dies führt zu einer verminderten Anzahl von Insekten³⁸⁻⁴¹ und als weitere Folge zu einem Mangel an Nahrung für Vögel, die sich von Insekten und Samen ernähren, was zu einem weiteren Rückgang der biologischen Vielfalt führt^{23,42-49}.
- Obwohl Glyphosat schnell abgebaut wird, wird sein Hauptmetabolit Aminomethylphosphonsäure (AMPA) langsamer zersetzt und ist in Böden der USA und der EU, in Oberflächenwasser, Grundwasser und Niederschlag häufig und weit verbreitet^{50,51}.

ⁱⁱ Mykorrhiza ist eine symbiotische Verbindung zwischen einem Pilz und den Wurzeln einer Pflanze, bei der die Pflanze Kohlenhydrate mit dem Pilz und der Pilz Wasser und Nährstoffe mit der Pflanze teilt.

- mit noch unbekanntem Folgen für Umwelt und menschliche Gesundheit. Studien haben ihre toxischen Auswirkungen auf Algen, Pflanzen, Fische, Wirbellose und Säugetiere nachgewiesen⁵²⁻⁵⁴.

- Einige Studien deuten wie oben beschrieben darauf hin, dass kommerzielle Glyphosat-Formeln aufgrund der Toxizität und/oder Wirkung der verwendeten Tenside und anderen Hilfsstoffen toxischer sein können als reines Glyphosat^{52,55-58}. So wurde über das weit verbreitete Vorkommen von entsprechenden Stoffen (POEA, siehe oben) und deren Persistenz auf landwirtschaftlichen Böden in den USA berichtet⁵⁹, ohne Kenntnis der Auswirkungen auf die Umwelt.

Was sind die Erkenntnisse?

Alternativen

Handelsübliche alternative chemische Produkte mit den gleichen Wirkungen wie Glyphosat existieren nicht. Das Ziel sollte auf jedem Fall nicht darin bestehen, eine Chemikalie durch eine andere, möglicherweise noch giftigere zu ersetzen. So wird beispielsweise Dicamba in den USA als chemische Alternative zu Glyphosat eingesetzt. Dicamba ist jedoch extrem flüchtig und hat insbesondere in Arkansas zu 1,5 Millionen Hektar beschädigter, nicht vor Dicamba geschützter Kulturen geführt, auf denen sogar Bäume getötet wurden⁶⁰. Eine vergleichende Studie über Herbizide zeigte, dass Dicamba und seine Derivate ein 75 bis 400 mal höheres Risiko für terrestrische Pflanzen darstellen als Glyphosat⁶¹.

Vor dem Aufstieg von Glyphosat gelang es den Landwirten dank einiger Methoden mit dem bestehenden Unkrautdruck umzugehen, so wie es heute Biobauern und viele andere auf der ganzen Welt (noch) tun. Diese Methoden werden nun auf allen Betriebsstufen wiederbelebt. Erfolgreiche, nachhaltige Unkrautmanagementsysteme sind solche, die Kombinationen von Techniken anwenden und sich nicht nur auf eine Methode verlassen⁶²⁻⁶⁴. Sie müssen die biologischen und ökologischen Eigenschaften

von Unkräutern berücksichtigen und verstehen, wie ihr Vorhandensein durch landwirtschaftliche Praktiken beeinflusst werden kann. Diese lassen sich in vier Kategorien einteilen: 1) präventive und kulturelle agronomische Praktiken, d.h. Maßnahmen zur Reduzierung der Unkrautkeimung; 2) Überwachung, d.h. Beobachtung und Identifizierung während der gesamten Entwicklung; 3) physische Kontrolle, d.h. mechanisch oder thermisch; und 4) biologische Kontrolle, d.h. durch ausgewählte Kulturen oder Tiere¹⁰. Während

die Unkrautbekämpfung die Essenz dieses »Foresight Brief's« ist, muss die Gesellschaft sich viel breiter mit der Art und Weise auseinandersetzen, wie Landwirtschaft betrieben wird, mit dem Wissen, dass nur eine erfolgreiche Umsetzung verschiedenster Maßnahmen über agrarökologische Ansätze die Bodenfruchtbarkeit, die Pflanzengesundheit, die Biodiversität und den Ertrag erhöht sowie andere Natur-Dienstleistungen fördert⁶⁵⁻⁶⁸. Die Anwendung und Integration der folgenden Methoden erfordert Fachwissen und Erfahrung. Während die Erntemengen, vor allem in den ersten Jahren des Übergangs, nicht so hoch sein mögen wie bei konventionellen Methoden, so sollte doch der Erfolg der Landwirtschaft nicht nur am »Ertrag pro Hektar« gemessen werden, wie es im derzeit etablierten System der Fall ist, sondern auch an zusätzlichen Parametern wie dem Wohlergehen der Menschen (Landwirte und Verbraucher), des Bodens, der Pflanzen, der Tiere und der zukünftigen Generationen. Die Last für einen solchen Übergang darf nicht nur den Landwirten aufgebürdet werden, sondern muss für unsere Gesellschaften eine Priorität bei der finanziellen und anderweitigen Unterstützung dieses Prozesses sein.

Erfolgsgeschichten

Gabe Brown ist ein prominenter amerikanischer konventioneller Landwirt, der seine Farm von einem Monokulturmodell in ein produktives und profitables Geschäft mit steigendem Humusgehalt (von <2% in den frühen 90er Jahren auf >6% im Jahr 2013), Bodenfruchtbarkeit, Nährstoffgehalt, Wasserspeicherkapazität und immer geringer werdenden Mengen an Herbizideinsatz verwandelte⁶², persönliche Kommunikation). Er arbeitet pfluglos, hat eine hohe Vielfalt an gewinnbringenden Kulturen an- und aufgebaut, berücksichtigt eine große Fruchtfolge mit vielfältigen Zwischenfrüchten, Untersaaten und Integration von Nutztieren auf den Feldern. Dabei erzielt er hohe Erträge (vor allem in Trockenjahren weit über dem Landesdurchschnitt) und senkt gleichzeitig die Inputkosten (Chemie, Zeit, Geld).

Michael Reber, ein konventioneller Landwirt in Deutschland, erklärt, dass, seit er begonnen hat sich auf die Verbesserung der Bodenbiologie, der Nutzung von vielfältigen Zwischenfrüchten, effektiven Mikroorganismen und Fermenten, Untersaaten und flacher Bodenbearbeitung zu konzentrieren, auf keiner seiner 250 Hektar mehr Glyphosat verwenden musste, da die Unkrautbelastung abnimmt und die Pflanzengesundheit steigt (persönliche Kommunikation).

»Wir wurden konditioniert zu denken, dass Krankheiten und Schädlinge und Unkräuter zufällige Ereignisse sind. Dass wir nur darauf reagieren können.«, sagt der Amerikaner **Klaas Martens**, der seinen 600 Hektar großen Betrieb auf Bio umgestellt hat. Er erkannte bald, dass durch einen ganzheitlichen Anbauansatz das Unkraut immer weniger zahlreich und schwächer wurde⁶⁷: »Das Unkraut, das uns am meisten störte, war Samtblatt. Es schien unaufhaltsam zu sein. Aber innerhalb von sechs Jahren, nachdem wir unseren Betrieb umgestellt, unsere Fruchtfolge vergrößert und unsere Inputs verändert hatten, begann das Samtblatt jedes Jahr kleiner und kleiner zu werden.«

Neues Verständnis von Unkräutern: Im ökologischen Landbau erfolgt die Unkrautbekämpfung ohne den Einsatz von chemischen Herbiziden. Ziel ist es, die Unkrautpopulationen auf einem überschaubaren Niveau zu halten, da Unkräuter durch die Bereitstellung der biologischen Vielfalt und der Unterstützung von Ökosystemdienstleistungen eine positive Rolle spielen können^{69,70}. So bieten sie beispielsweise Pollen, Nektar und Lebensraum für Nützlinge, die wiederum die Bestäubung der Pflanzen verbessern^{69,71}. Sie bedecken nackten Boden auch nach einer Ernte und halten durch ihre Wurzelexsudate aus Zucker und Proteinen die Gemeinschaften der nützlichen Bodenmikroorganismen am Leben. Es geht also nicht darum, Unkräuter ganz zu beseitigen, sondern sie, unter Berücksichtigung deren Nutzens für den Boden und die Umwelt, auf einem tolerierbaren Niveau zu halten, damit sie die Ernte des Landwirts kaum beeinflussen. Des Weiteren kann die »ökologische Nische«, welche das Unkraut ausfüllt, durch ausgewählte Pflanzen besetzt werden, die die gleichen Funktionen erfüllen (Bodenbedeckung, Steigerung der Bodenfruchtbarkeit, Fütterung des Bodenlebens), aber von den Landwirten leichter bewirtschaftet und in den Pflanzenbau integriert werden können.

Pilze und Bakterien: Je entwickelter ein Ökosystem/ Biom ist - mit einem alten Wald als Klimaxvegetation in den meisten Klimazonen - desto höher ist das Verhältnis von Pilzen zu Bakterien (PB) im Boden^{72,73}. In Anbetracht der Tatsache, dass Pflanzen bestimmte Funktionen in einem Ökosystem und dessen Entwicklung erfüllen, sind »Unkräuter« typischerweise Pionierarten, die in von Bakterien dominierten Umgebungen keimen und sich vermehren, von denen steppenartige landwirtschaftliche Felder ein typisches Beispiel sind. So kann die Erhöhung des PB-Verhältnisses durch die Förderung der Pilzentwicklung zu einer verminderten Keimungsrate von Unkräutern führen. Dies kann beispielsweise durch die Zugabe von Kompost, Komposttees, flacher Bodenbearbeitung, erhöhter organischer Substanz, die Verwendung von mehrjährigen Pflanzen (als Hecken oder Baumreihen) oder durch Saatgut, das mit Mykorrhiza beimpft wurde,

erreicht werden. Darüber hinaus erhöhen Pilze die Kohlenstoffverteilung in Pflanzenschösslingen und Fruchtständen und verringern die Kohlenstoffveratmung im Boden^{31,33,74-77}. Zu den vielen potenziellen Vorteilen, die Mykorrhizen ihren Pflanzenpartnern nachweislich verleihen, gehören Resistenzen gegen Schädlinge und Krankheitserreger^{66,78-80}. Die gesamte mikrobielle Biomasse ist, in Kombination mit dem Verhältnis von Pilzen zu Bakterien, ein wichtiges Maß für die Gesundheit des Bodens und ist auf konventionell bewirtschafteten Feldern im Vergleich zu ökologischen tendenziell reduziert⁸¹⁻⁸³. Biologische Wechselwirkungen zwischen Pflanzenwachstum fördernden Rhizobakterien und

Mykorrhizapilzen sollen einen kumulativen Effekt auf alle Rhizosphärenbestandteile haben⁷⁵, wesentlich zur Verbesserung der Bodenstruktur beitragen^{80,84} und das Pflanzenwachstum und die Gesundheit steigern^{34,65,85}. Die Erhöhung des PB-Verhältnisses bei gleichzeitiger Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit und des Nährstoffgehalts sowie der Verbesserung der Bodenstruktur und der Wasserspeicherkapazität führt auf natürliche Weise zu einer Umgebung, in der die Anzahl und Stärke von Unkräutern kontinuierlich abnimmt^{86,87}.

Mechanische Unkrautbekämpfung: Die reduzierte flache Bodenbearbeitung (3-5 cm) verringert nicht nur die Unkrautdichte, sondern ist im Gegensatz zur normalen Bodenbearbeitungstiefe (~30 cm) auch langfristig besser für den Boden, da sie weniger negative Auswirkungen

auf das Bodenleben wie Regenwürmer und Mykorrhizen hat. »Es ist daher eine gute Unkrautbekämpfungstechnik, die die Notwendigkeit des Einsatzes von Herbiziden überwindet«⁸⁸. Eggen und Hacken sind wichtige Techniken, um die Bodenstörung zu reduzieren und das Wenden des Bodens zu vermeiden. Wenn die reduzierte Bodenbearbeitung mit der Verwendung von Zwischenfrüchten kombiniert wird, kann dies den Stickstoffgehalt erhöhen und das Bodenleben und Bodenfruchtbarkeit fördern. Die Ernteerträge können vergleichbar sein, während die Bodenfruchtbarkeit und die Kohlenstoffspeicherkapazität auf einem hohen Niveau gehalten werden. Dies kann auch die gesamte Biomasse von Bakterien und Pilzen erhöhen, die von den Zwischenfrüchten gefüttert werden und sich von ihnen ernähren⁸⁹. »Allgemein werden die Ernteerträge bei reduzierter Bodenbearbeitung im Vergleich zu konventioneller Bodenbearbeitung um 7% reduziert, bei minimaler Zunahme der Unkrautkonkurrenz. Unkräuter sind in reduzierter Bodenbearbeitung häufiger vorhanden, schränken aber nicht unbedingt die Erträge ein«⁸⁸.

Thermische Unkrautbekämpfung: Die thermische Unkrautbekämpfung ist eine Methode zur Unkrautbekämpfung, bevor Pflanzen gepflanzt werden oder die Samen der angebauten Kultur keimen. Sie verwendet eine Brenner, um die Blattmembranen vom Unkraut zu beschädigen oder zu töten. Durch die Verbrennung der Blätter beseitigt die thermische Unkrautbekämpfung die Fähigkeit einer Pflanze zur Photosynthese und tötet sie praktisch ab. Die Pflanzen können mit heißem Dampf oder mit Heißluft behandelt werden. Die Wirksamkeit der Methode liegt, insbesondere bei einjährigen Unkräutern, bei nahezu 100%, ist aber relativ teuer und verursacht CO₂-Emissionen durch die Verbrennung fossiler Gase (hauptsächlich Propan- oder Butangas). Sein Haupteinsatzgebiet ist der Gemüseanbau, wo es bereits weit verbreitet ist, insbesondere in ökologischen Anbausystemen^{90,91}.

Fruchtfolge: Eine große Fruchtfolge über mehrere Jahre hinweg ist einer der effektivsten landwirtschaftlichen Kontrollmechanismen zur Regulierung des

Unkrautauflommens^{13,93,94} sowie zur biologischen Nährstoffanreicherung und Unterdrückung von Krankheitserregern⁹⁵. Sie führt zu einer Zunahme des Reichtums an Bodenlebewesen und damit zu einer höheren Bodenfruchtbarkeit, welches wiederum das Auftreten von Unkräutern reduziert⁹⁶⁻¹⁰². Während Biobauern oft fünf- bis siebenjährige Fruchtfolgen nutzen hat die industrielle Landwirtschaft (v.a. in den USA) die Fruchtfolge oft nur auf Soja und Mais reduziert hat.

Zwischenfrüchte: Zwischenfrüchte bzw. Gründüngungen können Unkräuter sowohl in den stehenden Kulturen als auch in der folgenden Hauptkultur durch schnelle Bodenbedeckung, ihre allelopathisch wirksamen Substanzen und Mulch (tote oder lebende organische Substanz auf der Bodenoberfläche) wirksam unterdrücken und gleichzeitig die Bodenfruchtbarkeit verbessern¹⁰³⁻¹⁰⁷. In Pennsylvania (USA) zeigten Mirsky et al., dass die Kombination von Bodenbearbeitung und Anbau von Zwischenfrüchten während einer Sommerbrache zu Reduzierungen von Fuchsschwanz, Weißem Gänsefuß und Samtpappel von 98%, 85% und 80% führen kann¹⁰⁵. Untersuchungen in Illinois (USA) zeigten, dass die Sprossdichte und Biomasse der Acker-Kratzdistel im Laufe von zwei Vegetationsperioden stark reduziert wurden, indem entweder Sorghum-Sudangras oder eine Mischung aus Sorghum-Sudangras und Augenbohne verwendet wurde¹⁰⁸. Brust berichtete von Unkrautunterdrückungsraten von über 90%¹⁰³. Darüber hinaus werden Zwischenfrüchte zur Reduzierung der Nährstoffauswaschung, zur Übertragung von Stickstoff auf die nächste Hauptkultur, zur Erhöhung der Biodiversität und zur Erhaltung oder Verbesserung der Bodenstruktur eingesetzt¹⁰⁹. Forschungsergebnisse deuten darauf hin, dass ein großer Teil der photosynthetischen Produkte der Pflanze über die Wurzeln in die Rhizosphäre übertragen wird, um Bakterien und Pilze zu ernähren - die wiederum die Pflanze mit lebenswichtigen Nährstoffen und Wasser versorgen¹¹⁰⁻¹¹³. Die ganzjährige Bedeckung des Bodens mit lebenden Pflanzen ist daher wichtig, um diese Beziehungen aufrechtzuerhalten und zur Verbesserung der Bodenqualität, der Nährstoffdichte und -verfügbarkeit, Wasserspeicherkapazität, Bodendichte und -stabilität zu führen, und somit günstige Bedingungen für ein gesundes

Wachstum der Hauptkultur zu schaffen, wodurch die Notwendigkeit der künstlichen Unkrautbekämpfung reduziert wird^{95,102,111,114-118}. Die Gründüngung kann von Tieren abgegrast werden und bietet dem Betrieb zusätzliche Vorteile, sowohl durch die als Futtermittel dienende Kultur als auch durch die Ausscheidungen der Tiere, die den Boden mit Nährstoffen und mikrobiellem Leben anreichern¹¹⁹⁻¹²¹.

Untersaat: Eine Untersaat bedeckt und schützt den Boden, unterdrückt Unkraut und ernährt Bakterien und Pilze^{103,122}. Es kann sich positiv auf die Hauptkultur auswirken, insbesondere wenn Hülsenfrüchte verwendet werden¹⁰². In der Schweiz wurde bei der Nutzung von einer Untersaat ohne Herbizideinsatz nur ein geringfügig geringerer Ertrag von Wintergerste erzielt als bei Wintergerste allein, die mit Herbizid behandelt wurde¹²³. Weißklee und Luzerne als Untersaat reduzieren das Unkraut um 35-49% und führen zu deutlich höheren Erträgen der Hauptkultur als die gleiche Kultur ohne Untersaat¹⁰¹. Sie bietet zudem Lebensraum und Nahrung für Nutzinsekten, die wiederum den Schädlingsdruck verringern können^{41,65,124,125}.

Mischkulturen: Mischkulturen ist eine Form der landwirtschaftlichen Praxis, bei der zwei oder mehr Pflanzenarten zusammen kultiviert werden und eine Zeit lang nebeneinander bestehen. Dies bietet einen frühzeitige Abdeckung des Bodens und Nutzung des Saatbeetes, was zu einem reduzierten Unkrautwachstum

durch den Wettbewerb um vorhandene Ressourcen und die Abschattung von Unkräutern führt^{13,126-128}. Weitere Vorteile sind die Förderung der Schädlingsbekämpfung, der Boden- und Wasserqualität, der Effizienz des Nährstoffkreislaufes und der Produktivität der Nutzpflanzen¹⁰². Mischkultur-Systeme haben das Potenzial, die langfristige Nachhaltigkeit der Nahrungsmittelproduktion zu erhöhen^{126,129,130} und eine höhere Ertragsstabilität zu erreichen¹³¹.

Kontrolle der biologischen Zyklen von Unkräutern:

Ziel sollte es sein, die Unkrautpopulationen auf einem überschaubaren Niveau zu halten und dabei den Wert von Unkraut bei der Bereitstellung von Nahrung und Habitat für eine Reihe von Nutzorganismen zu berücksichtigen. Dies erfordert ein Verständnis der Keimung, des Wachstums und der Verbreitung von Unkraut; den verschiedenen Bedingungen, die das Vorhandensein und das Wachstum von Unkräutern verstärken oder verringern; und der verschiedenen Maßnahmen, mit denen man sie kontrollieren kann^{63,132-135}.

Direktsaat: Direktsaat, wie sie in der Praxis der konservierenden Bodenbearbeitung angewendet wird, wird meist in Verbindung mit dem Einsatz von Herbiziden eingesetzt, da sich insbesondere mehrjährige Unkräuter ohne Bodenbearbeitung leichter vermehren können. Mit dem richtigen Wissen und Werkzeugen kann jedoch der Einsatz von Chemikalien reduziert und gleichzeitig dazu beigetragen werden, Unkräuter zu unterdrücken^{88,133,134,136,137}. Ashford and Reeves zeigen, dass die Abtötungsrate einer Gründüngung durch Verwendung einer Messerwalze mit der von Herbiziden gleichzusetzen ist¹³⁸. Davis kam zu ähnlichen Ergebnissen beim Sojaanbau¹³⁹.

Integration von Tieren in das Anbausystem: Eine zunehmende Anzahl an Landwirte nutzen Tiere, um die Gründüngung vor der Aussaat der Hauptkultur »abzutöten«, anstatt Glyphosat zu verwenden. Die Tiere, zum Beispiel Schafe und Kühe, können von der Zwischenfrucht leben und helfen, das Feld für die Frühjahrssaat vorzubereiten^{119,120,140}. Darüber hinaus verbessern die Einwirkungen durch die Hufen,

Was wird getan?

Während immer mehr Landkreise und Staaten weltweit ein Verbot von Glyphosat und ganz allgemein den Einsatz von Pestiziden planen oder bereits erlassen haben und der biologische Landbau stetig wächst, hängen die Veränderungen in der konventionellen Landwirtschaft nach wie vor hauptsächlich von einzelnen Akteuren ab (siehe Kasten »Erfolgsgeschichten«). Aufgrund der Diskussion um Glyphosat untersuchen Politik und Wissenschaft, allerdings oft noch recht oberflächlich, neue Methoden einer »nachhaltigen« Landwirtschaft. Das Thema wird von NGOs wie Regeneration International, dem Rodale Institute, Holistic Management International und anderen etablierten oder neu geschaffenen alternativen »Think Tanks« zur regenerativen Landwirtschaft aktiver und auch in einer stetig wachsenden Zahl von Artikeln und Büchern behandelt^{146–149}. Die oben genannten Ansätze, die eine ganzheitliche Sicht auf die Betriebsführung bieten, sind jedoch noch nicht in den Mainstream des Unterrichts an landwirtschaftlichen Schulen und Universitäten eingetreten und werden auch nicht oder kaum von Bauernverbänden oder politischen Gremien aufgegriffen.

Was sind die Auswirkungen auf die Politik?

Herbizide, die einst als die endgültige Lösung für Unkrautprobleme bei Hauptkulturen galten, haben eindeutig eine begrenzte Lebensdauer aufgrund der Entwicklung von Herbizidresistenzen und Sorgen um die menschliche Gesundheit und die natürliche Umwelt. Glyphosat-resistente Kulturen führten in kurzer Zeit dazu, dass die Landwirte auf komplexe Unkrautbekämpfungsstrategien zugunsten einer einfachen, kostengünstigen und effektiven Unkrautbekämpfung durch Glyphosat verzichteten^{23,24}. Da sich resistente Unkräuter weiter ausbreiten, werden die Landwirte zu komplexeren Unkrautbekämpfungsmaßnahmen gezwungen sein. Um die internationalen Vereinbarungen zum Schutz und zur Verbesserung der biologischen Vielfalt, zur

der Kot und das Eintrampeln von grünen Blättern die Lebensgemeinschaft des Bodens und können die Nährstoffversorgung in der Rhizosphäre für die Aufnahme und das Nachwachsen von Pflanzen verändern und die Bodenqualität verbessern^{114,121,141}.

Falsches Saatbett: Diese Technik ist eine präventive Unkrautentstehungsmethode: Einige Wochen vor der Aussaat wird das Saatbett vorbereitet, wodurch Unkräuter keimen können und die vorhandene Samenbank von Unkrautarten teilweise aufgebraucht wird. Die Sprosse werden dann mechanisch oder thermisch abgetötet, bevor die Hauptkultur ausgesät wird^{142,143}.

Mulchen: Durch die Bedeckung des Bodens mit organischen oder anorganischen Materialien kann das Sonnenlicht blockiert und das Keimen von Unkraut verhindert werden. Dies ist besonders nützlich für das Wachstum von Gemüse auf kleineren Flächen. Als Materialien können organische Substrate wie Stroh und Heu, biologisch abbaubare Kunststofffolien oder anorganische Materialien verwendet werden.

Essig und andere Bioprodukte: Einjährige Unkräuter können durch den Einsatz natürlicher Säuren teilweise kontrolliert oder in ihrem Wachstum behindert werden^{144,145}. Diese alternativen Herbizide können in Verbindung mit anderen kulturellen Praktiken zur Verbesserung der Boden- und Pflanzengesundheit eingesetzt werden.

Verringerung der Bodenerosion und zum Schutz der Gewässer einzuhalten, muss sich die Landwirtschaft auf umweltfreundlichere Praktiken konzentrieren, einschließlich einer allgemeinen Verringerung des Pestizideinsatzes²³. Anstatt nur ein Problem (z.B. Unkraut) zu betrachten - das in der komplexen Art und Weise, wie die Natur arbeitet, oft mit anderen Teilen des Systems verbunden ist - muss ein ganzheitlicher Ansatz gewählt werden, indem die Art und Weise, wie wir als agro-ökologisches System wirtschaften, betrachtet wird. Dies würde zur Entwicklung eines grundlegend anderen Agrarmodells führen, das auf der Diversifizierung von landwirtschaftlichen Betrieben und Agrarlandschaften zum Wohle aller basiert^{23,67,68,134,150} und der Erfüllung vieler der SDGs weitgehend entspricht. Eine nachhaltige Bewirtschaftung der Bodengesundheit und eine nachhaltige Landwirtschaft sind entscheidend für die

Ziel		Wirkung von Bodengesundheit und Regenerativer Agrikultur
	Armut beenden	Steigerung des landwirtschaftlichen Einkommens
	Ernährung sichern	Verbesserung der Quantität und Qualität von Lebensmitteln
	Gesundes Leben für alle	Produktion nahrhafter Lebensmittel
	Gleichstellung der Geschlechter	Verbesserung der landwirtschaftlichen Produktivität von Landwirtinnen
	Wasser und Sanitärversorgung für alle	Verbesserung der Wasserqualität
	Nachhaltiges Wirtschaftswachstum	Motor der wirtschaftlichen Entwicklung
	Ungleichheit verringern	Steigerung und Aufrechterhaltung der landwirtschaftlichen Produktivität
	Nachhaltige Konsum- und Produktionsweisen	Reduzierung des Wasser-, Nährstoff- und Energieeintrags durch Reduzierung der Verluste
	Klimawandel aufhalten	Sequestrierung von Kohlenstoff und Eindämmung des Klimawandels
	Landökosysteme schützen	Erhöhung der Bodenaktivität und -artenvielfalt

Tabelle 1: Förderung der nachhaltigen Entwicklungsziele durch Management der Bodengesundheit^{155,156}

Förderung mehrerer SDGs (Tabelle 1), insbesondere im Zusammenhang mit der Armutsbekämpfung (#1), der Beendigung des Hungers (#2), der Verbesserung der Gesundheit (#3), dem sauberen Wasser (#6), dem Wirtschaftswachstum (#8) und dem Klimaschutz (#13).

»Grundsätzlich kann die Landwirtschaft ohne Glyphosat auskommen«, sagt Hella Kehlenbeck vom Julius Kühn Institut in Deutschland. In ihrer Forschung schätzte sie die möglichen Kosten eines Glyphosatverbotes für die deutsche Landwirtschaft und stellte fest, dass der Anbau ohne Herbizide »nicht in allen Fällen teurer sein muss«¹⁵¹. Auch Böcker et al. stellen fest, dass »ein Glyphosatverbot nur geringe Einkommenseffekte hat«¹⁵². Die Ergebnisse zeigen, »dass selektive Herbizide nicht auf höheren Niveaus eingesetzt werden, sondern Glyphosat durch mechanische Verfahren ersetzt wird, was zu einem höheren Arbeitsaufwand führt. Eine leichte Ertragsreduzierung durch weniger intensive Vorsaatsstrategien erweist sich als profitabler als die Aufrechterhaltung des aktuellen Ertragsniveaus.« Wenn dagegen alle - auch die »externalisierten« - Kosten für den Einsatz von Herbiziden wie Glyphosat berücksichtigt werden sollen, wie z.B. der Verlust der Biodiversität, Rückstände im Grundwasser, Flüsse und Seen sowie regelmäßige Compliance-Kontrollen durch die Behörden, kann man sagen, »dass ein Verbot von Glyphosat und anderen Herbiziden insgesamt billiger sein könnte«, sagte Jörn Wogram vom Umweltbundesamt¹⁵³. Poux und Aubert zeigen, dass ein agroökologisches Europa in der Lage ist, die Europäer im Jahr 2050 zu ernähren, seine Treibhausgasemissionen um 40% zu senken und die Biodiversität zu erhalten - ohne den Einsatz von Chemikalien¹⁵⁴.

Hinzu kommen die Erkenntnisse über die Lebensbeziehungen zwischen Pflanzen und Böden und der Erfolg innovativer Landwirte mit dem kombinierten Ansatz von Zwischenfrüchten, der Integration von Tieren in das Anbausystem, Mulchen und anderen oben beschriebenen Methoden. Daraus ergibt sich eine Idee, wie eine Kultur, die der Funktionsweise der Natur nachempfunden ist, ohne chemische Substanzen wie

Glyphosat sehr gut auskommen kann.

Um dieses Wissen zu verbreiten ist jedoch ein Wandel auf vielen Ebenen und in verschiedenen Sektoren erforderlich, darunter Regierung, Forschung, Bildung und Öffentlichkeit.

Empfehlungen

- Es gibt keine Patentlösung für alles. Die Frage »Wie werde ich das Unkraut los?« ist zu kurz gegriffen um nur damit nach Lösungen zu suchen. Die Antwort liegt darin, die Landwirtschaft als ein agroökologisches System zu betrachten, die Natur nachzuahmen und ganzheitliche Ansätze anzuwenden, einschließlich des Unkrautmanagements als Teil eines breiteren Spektrums von Instrumenten zur Verbesserung der Bodenfruchtbarkeit und der Pflanzengesundheit.
- Der Übergang zum Ende der Nutzung von Glyphosat erfordert einen Zeitrahmen, der die Umsetzung der oben genannten alternativen Techniken berücksichtigt.
- Die Regierungen sollten mehr Geld für systemübergreifende Ansätze und den ökologischen Landbau ausgeben, einschließlich Forschung und Subventionen.
- Es sollten mehr Investitionen in die Erforschung »alternativer« landwirtschaftlicher Methoden investiert werden, um Wissen und Praktiken zu verbessern.
- Bildung, Ausbildung, Austausch, Beratung und Unterstützung der Landwirte sind von wesentlicher Bedeutung und sollten von den Regierungen unterstützt werden.
- Steuern auf Pestizide (einschließlich des Herbizids Glyphosat) können zu einem sinkenden Verbrauch führen, während diese Mittel zur Finanzierung alternativer Praktiken verwendet werden könnten.
- Landwirtschaftsschulen (einschließlich Universitäten) haben sich in den letzten Jahrzehnten sehr stark auf den Aufbau von Fachwissen über den Einsatz von Chemikalien konzentriert. Es sollte ein umfassenderer Überblick über das (Öko-)System »Landwirtschaft« entwickelt werden, einschließlich beispielsweise der Bedeutung des Bodenlebens für das Wachstum

gesunder Pflanzen und der vielen nützlichen Beziehungen zwischen Pflanzen und Boden.

- Da chemische Alternativen zu Glyphosat möglicherweise ein größeres Problem für die Umwelt und die menschliche Gesundheit darstellen, könnte die Verwendung von Glyphosat für Landwirte, die mit schweren Unkrautproblemen zu kämpfen haben, durch kontrollierten Verkauf und Verwendung als »letztes Mittel« beibehalten werden.
- Der Trend zu immer größeren Betrieben und immer weniger Landwirten treibt die landwirtschaftlichen Praktiken in eine Richtung (große Felder, Monokultur, schwere Maschinen, höchste Effizienz bei geringerer Flexibilität). Politiken, die die oben genannten Praktiken unterstützen, könnten dazu beitragen, mehr Vielfalt in den landwirtschaftlichen Betrieben, auf den Feldern und in den Kulturen zu schaffen und gleichzeitig ein gesünderes Agrarsystem aufzubauen.

Autor: **Stefan Schwarzer**, Umweltprogramm der Vereinten Nationen (UNEP), Symposium »Aufbauende Landwirtschaft«,

www.aufbauende-landwirtschaft.de

www.lebensraum-permakultur.de

info@aufbauende-landwirtschaft.de

Deutsche Fassung des UNEP Foresight Briefs #10 »Alternatives for the use of glyphosate«
http://uneplive.unep.org/media/docs/early_warning/foresight_brief_010.pdf

Bibliography

- Reboud, X. *et al.* Usages et alternatives au glyphosate dans l'agriculture française. (2017).
- Andreotti, G. *et al.* Glyphosate Use and Cancer Incidence in the Agricultural Health Study. *JNCI J. Natl. Cancer Inst.* (2017). doi:10.1093/jnci/djx233
- International Agency for Research on Cancer, W. H. O. WHO IARC Monographs Volume 112. Evaluation of five organophosphate insecticides and herbicides. 2 (2015).
- European Food Safety Authority, E. European Food Safety Authority. Peer Review Report on Glyphosate. (2015).
- Friends of the Earth. *Problems with glyphosate overuse and alternatives for farmers.* 16 (2013).
- Watts, M. *et al.* Glyphosate Monograph. (2016).
- Baum, M. L. & Hedlund, P. J. Where is Glyphosate Banned? *Baum Hedlund* (2019).
- Benbrook, C. M. Trends in glyphosate herbicide use in the United States and globally. *Environ. Sci. Eur.* **28**, (2016).
- Wiese, A., Schulte, M., Theuvsen, L. & Steinmann, H.-H. Anwendungen von Glyphosat im deutschen Ackerbau – Betriebliche Aspekte. *Julius-Kühn-Arch.* **452** (2016). doi:10.5073/jka.2016.452.035
- Pesticide Action Network Europe. Alternatives to herbicide use in weed management – The case of glyphosate.pdf. (2017).
- Crovetto Lamarca, C. *Conservation Agriculture. Impact on farmers' livelihoods, labour, mechanization and equipment.* (Eumedia, S.A., 1999).
- Kassam, A., Friedrich, T., Derpsch, R. & Kienzie, J. Overview of the Worldwide Spread of Conservation Agriculture. (2015).
- Chauhan, B. S., Singh, R. G. & Mahajan, G. Ecology and management of weeds under conservation agriculture: A review. *Crop Prot.* **38**, 57–65 (2012).
- Llewellyn, R. S., D'Emden, F. H. & Kuehne, G. Extensive use of no-tillage in grain growing regions of Australia. *Field Crops Res.* **132**, 204–212 (2012).
- Nalewaja, J. D. Weeds and Conservation Agriculture. in *Conservation Agriculture* 201–210 (Springer, Dordrecht, 2003). doi:10.1007/978-94-017-1143-2_25
- Nichols, V., Verhulst, N., Cox, R. & Govaerts, B. Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Res.* **183**, 56–68 (2015).
- Jayasumana, C., Gunatilake, S. & Siribaddana, S. Simultaneous exposure to multiple heavy metals and glyphosate may contribute to Sri Lankan agricultural nephropathy. *BMC Nephrol.* **16**, (2015).
- Jayasumana, C., Gunatilake, S. & Senanayake, P. Glyphosate, Hard Water and Nephrotoxic Metals: Are They the Culprits Behind the Epidemic of Chronic Kidney Disease of Unknown Etiology in Sri Lanka? *Int. J. Environ. Res. Public Health* **11**, 2125–2147 (2014).
- Jayatilake, N., Mendis, S., Maheepala, P. & Mehta, F. R. Chronic kidney disease of uncertain aetiology: prevalence and causative factors in a developing country. *BMC Nephrol.* **14**, (2013).
- Bai, S. H. & Ogbourne, S. M. Glyphosate: environmental contamination, toxicity and potential risks to human health via food contamination. *Environ. Sci. Pollut. Res.* **23**, 1898–19001 (2016).
- Cox, C. & Sorgan, M. Unidentified Inert Ingredients in Pesticides: Implications for Human and Environmental Health. *Environ. Health Perspect.* **114**, 1803–1806 (2006).
- Schäffer, A. *et al.* *Der stumme Frühling: zur Notwendigkeit eines umweltverträglichen Pflanzenschutzes.* (Deutsche Akademie der Naturforscher Leopoldina e.V. - Nationale Akademie der Wissenschaften, 2018).
- Schüttele, G. *et al.* Herbicide resistance and biodiversity: agronomic and environmental aspects of genetically modified herbicide-resistant plants. *Environ. Sci. Eur.* **29**, (2017).
- Heap, I. & Duke, S. O. Overview of glyphosate-resistant weeds worldwide: Overview of glyphosate-resistant weeds. *Pest Manag. Sci.* (2017). doi:10.1002/ps.4760
- Gaupp-Berghausen, M., Hofer, M., Rewald, B. & Zaller, J. G. Glyphosate-based herbicides reduce the activity and reproduction of earthworms and lead to increased soil nutrient concentrations. *Sci. Rep.* **5**, (2015).
- Kremer, R. J. & Means, N. E. Glyphosate and glyphosate-resistant crop interactions with rhizosphere microorganisms. *Eur. J. Agron.* **31**, 153–161 (2009).
- Shehata, A. A., Schrödl, W., Aldin, A. A., Hafez, H. M. & Krüger, M. The Effect of Glyphosate on Potential Pathogens and Beneficial Members of Poultry Microbiota In Vitro. *Curr. Microbiol.* **66**, 350–358 (2013).
- Druille, M., Omacini, M., Golluscio, R. A. & Cabello, M. N. Arbuscular mycorrhizal fungi are directly and indirectly affected by glyphosate application. *Appl. Soil Ecol.* **72**, 143–149 (2013).
- Druille, M., Cabello, M. N., Omacini, M. & Golluscio, R. A. Glyphosate reduces spore viability and root colonization of arbuscular mycorrhizal fungi. *Appl. Soil Ecol.* **64**, 99–103 (2013).
- Zaller, J. G., Heigl, F., Ruess, L. & Grabmaier, A. Glyphosate herbicide affects belowground interactions between earthworms and symbiotic mycorrhizal fungi in a model ecosystem. *Sci. Rep.* **4**, (2015).
- Leigh, J., Hodge, A. & Fitter, A. H. Arbuscular mycorrhizal fungi can transfer substantial amounts of nitrogen to their host plant from organic material. *New Phytol.* **181**, 199–207 (2009).
- van der Heijden, M. G. A. *et al.* Mycorrhizal fungal diversity determines plant biodiversity, ecosystem variability and productivity. *Nature* **396**, 69–72 (1998).
- Walder, F. *et al.* Mycorrhizal Networks: Common Goods of Plants Shared under Unequal Terms of Trade. *PLANT Physiol.* **159**, 789–797 (2012).
- Lehman, R. *et al.* Understanding and Enhancing Soil Biological Health: The Solution for Reversing Soil Degradation. *Sustainability* **7**, 988–1027 (2015).
- Yu, X. M. *et al.* Glyphosate biodegradation and potential soil bioremediation by *Bacillus subtilis* strain Bs-15. *Genet. Mol. Res.* **14**, 14717–14730 (2015).
- Motta, E. V. S., Raymann, K. & Moran, N. A. Glyphosate perturbs the gut microbiota of honey bees. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **115**, 10305–10310 (2018).
- Johal, G. S. & Huber, D. M. Glyphosate effects on diseases of plants. *Eur. J. Agron.* **31**, 144–152 (2009).
- Biesmeijer, J. C. *et al.* Parallel declines in pollinators and insect-pollinated plants in Britain and the Netherlands. *Science* **313**, 351–354 (2006).
- Hallmann, C. A. *et al.* More than 75 percent decline over 27 years in total flying insect biomass in protected areas. *PLOS ONE* **12**, e0185809 (2017).
- Lundgren, J. G., McDonald, T., Rand, T. A. & Fausti, S. W. Spatial and numerical relationships of arthropod communities associated with key pests of maize. *J. Appl. Entomol.* **139**, 446–456 (2015).
- Lundgren, J. G. & Fausti, S. W. Trading biodiversity for pest problems. *Sci. Adv.* **1**, e1500558–e1500558 (2015).
- Aktar, W., Sengupta, D. & Chowdhury, A. Impact of pesticides use in agriculture: their benefits and hazards. *Interdiscip. Toxicol.* **2**, 1–12 (2009).
- Chamberlain, D. E., Fuller, R. J., Bunce, R. G. H., Duckworth, J. C. & Shrubbs, M. Changes in the abundance of farmland birds in relation to the timing of agricultural intensification in England and Wales. **18** (2000).
- Cox, C. Pesticides and birds: from DDT to today's poisons. *Wildl Dis* **24**, 51–61 (1991).
- Donald, P. F., Green, R. E. & Heath, M. F. Agricultural intensification and the collapse of Europe's farmland bird populations. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **268**, 25–29 (2001).
- Gibbons, D. W. *et al.* Weed seed resources for birds in fields with contrasting conventional and genetically modified herbicide-tolerant crops. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* **273**, 1921–1928 (2006).
- Guerrero, I. *et al.* Response of ground-nesting farmland birds to agricultural intensification across Europe: Landscape and field level management factors. *Biol. Conserv.* **152**, 74–80 (2012).
- Mineau, P. & Whiteside, M. Pesticide Acute Toxicity Is a Better Correlate of U.S. Grassland Bird Declines than Agricultural Intensification. *PLoS ONE* **8**, e57457 (2013).
- The Royal Society for the Protection of Birds, (RSPB). State of Nature 2016. UK-Report. (2016).
- Battaglin, W. A., Meyer, M. T., Kuivila, K. M. & Dietze, J. E. Glyphosate and Its Degradation Product AMPA Occur Frequently and Widely in U.S. Soils, Surface Water, Groundwater, and Precipitation. *JAWRA J. Am. Water Resour. Assoc.* **50**, 275–290 (2014).
- Silva, V. *et al.* Distribution of glyphosate and aminomethylphosphonic acid (AMPA) in agricultural topsoils of the European Union. *Sci. Total Environ.* (2017). doi:10.1016/j.scitotenv.2017.10.093
- Giesy, J. P., Dobson, S. & Solomon, K. R. Ecotoxicological Risk Assessment for Roundup-Superscript®/Superscript® Herbicide. in *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 35–120 (Springer, New York, NY, 2000). doi:10.1007/978-1-4612-1156-3_2
- Mañas, F. *et al.* Genotoxicity of AMPA, the environmental metabolite of glyphosate, assessed by the Comet assay and cytogenetic tests. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **72**, 834–837 (2009).
- Wan, M. T., Rahe, J. E. & Watts, R. G. A new technique for determining the sublethal toxicity of pesticides to the vesicular-arbuscular mycorrhizal fungus *Glomus intraradicis*. *Environ. Toxicol. Chem.* **17**, 1421–1428 (2009).
- Bringolf, R. B., Cope, W. G., Mosher, S., Barnhart, M. C. & Shea, D. Acute and chronic toxicity of glyphosate compounds to glochidia and juveniles of *Lampsilis siliquoidea* (unionidae). *Environ. Toxicol. Chem.* **26**, 2094–2100 (2010).
- Edginton, A. N., Sheridan, P. M., Stephenson, G. R., Thompson, D. G. & Boermans, H. J. Comparative effects of pH and Vision® herbicide on two life stages of four anuran amphibian species. *Environ. Toxicol. Chem.* **23**, 815–822 (2009).
- Mesnager, R., Bernay, B. & Séralini, G.-E. Ethoxylated adjuvants of glyphosate-based herbicides are active principles of human cell toxicity. *Toxicology* **313**, 122–128 (2013).
- Moore, L. J. *et al.* Relative toxicity of the components of the original formulation of Roundup® to five North American anurans. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* **78**, 128–133 (2012).
- Tush, D. & Meyer, M. T. Polyoxyethylene Tallow Amine, a Glyphosate Formulation Adjuvant: Soil Adsorption Characteristics, Degradation Profile, and Occurrence on Selected Soils from Agricultural Fields in Iowa, Illinois, Indiana, Kansas, Mississippi, and Missouri. *Environ. Sci. Technol.* **50**, 5781–5789 (2016).
- Bradley, K. A. Final Report on Dicamba-injured Soybean Acres. (2017). Available at: https://ipm.missouri.edu/IPCM/2017/10/final_report_dicamba_injured_soybean/. (Accessed: 11th January 2019)
- Peterson, R. K. D. & Hulting, A. G. A comparative ecological risk assessment for herbicides used on spring wheat: the effect of glyphosate when used within a glyphosate-tolerant wheat system. *Weed Sci.* **52**, 834–844 (2004).
- Abouziena, H. F. & Haggag, W. M. Weed Control in Clean Agriculture: A Review1. *Planta Daninha* **34**, 377–392 (2016).
- Kremer, R. J. & Li, J. Developing weed-suppressive soils through improved soil quality management. *Soil Tillage Res.* **72**, 193–202 (2003).
- Ryan, M. R. *et al.* Weed-crop competition relationships differ between organic and conventional cropping systems: Weed-crop competition in organic and conventional systems. *Weed Res.* **49**, 572–580 (2009).
- Altieri, M. A. & Nicholls, C. I. Soil fertility management and insect pests: harmonizing soil and plant health in agroecosystems. *Soil Tillage Res.* **72**, 203–211 (2003).
- Gianinazzi, S. *et al.* Agroecology: the key role of arbuscular mycorrhizas in ecosystem services. *Mycorrhiza* **20**, 519–530 (2010).
- IPES-Food. From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. (2016).
- Padel, S. *et al.* Transitions to Agroecological Systems: Farmers' Experience. **81** (2018).
- Nicholls, C. I. & Altieri, M. A. Plant biodiversity enhances bees and other insect pollinators in agroecosystems. A review. *Agron. Sustain. Dev.* **33**, 257–274 (2013).
- Schüttele, G. Herbicide resistance: Promises and prospects of biodiversity for European agriculture. *Agric. Hum. Values* **20**, 217–230 (2003).
- Marshall, E. J. P. *et al.* The role of weeds in supporting biological diversity within crop fields*. *Weed Res.* **43**, 77–89 (2003).
- Cao, Z., Li, D. & Han, X. The fungal to bacterial ratio in soil food webs, and its measurement. *Shengtai Xuebao Acta Ecol. Sin.* **31**, 4741–4748 (2011).
- Zhang, Q. *et al.* Alterations in soil microbial community composition and biomass following agricultural land use change. *Sci. Rep.* **6**, (2016).
- Johnson, D., Ellington, J. & Eaton, W. Development of soil microbial communities for promoting sustainability in agriculture and a global carbon fix. *PeerJ Prepr.* (2015).
- Nadeem, S. M., Ahmad, M., Zahir, Z. A., Javaid, A. & Ashraf, M. The role of mycorrhizae and plant growth promoting rhizobacteria (PGPR) in improving crop productivity under stressful environments. *Biotechnol. Adv.* **32**, 429–448 (2014).
- Ryan, M. H. & Graham, J. H. Is there a role for arbuscular mycorrhizal fungi in production agriculture? in *Diversity and Integration in Mycorrhizas* 263–271 (Springer, Dordrecht, 2002). doi:10.1007/978-94-017-1284-2_26
- Six, J., Frey, S. D., Thiet, R. K. & Batten, K. M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.* **70**, 555 (2006).
- Garbeva, P., van Veen, J. A. & van Elsas, J. D. Microbial Diversity in Soil. Selection of Microbial Populations by Plant and Soil Type and Implications for Disease Suppressiveness. *Annu. Rev. Phytopathol.* **42**, 243–270 (2004).
- Rillig, M. C. Arbuscular mycorrhizae and terrestrial ecosystem processes. *Ecol. Lett.* **7**, 740–754 (2004).
- Rillig, M. C. & Mummey, D. L. Mycorrhizas and soil structure. *New Phytol.* **171**, 41–53 (2006).
- Lori, M., Symczak, S., Mäder, P., De Deyn, G. & Gättinger, A. Organic farming enhances soil microbial abundance and activity—A meta-analysis and meta-regression. *PLoS One* **12**, e0180442 (2017).
- Romaniuk, R., Giuffré, L., Costantini, A. & Nannipieri, P. Assessment of soil microbial diversity measurements as indicators of soil functioning in organic and conventional horticulture systems. *Ecol. Indic.* **11**, 1345–1353 (2011).

83. Seidel, R., Moyer, J., Nichols, K. & Bhosekar, V. Studies on long-term performance of organic and conventional cropping systems in Pennsylvania. *Org. Agric.* **7**, 53–61 (2017).
84. Roper, M. M. & Gupta, V. Management-practices and soil biota. *Soil Res.* **33**, 321–339 (1995).
85. Sherwood, S. & Uphoff, N. Soil health: research, practice and policy for a more regenerative agriculture. *Appl. Soil Ecol.* **15**, 85–97 (2000).
86. Brussaard, L., de Ruiter, P. C. & Brown, G. G. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.* **121**, 233–244 (2007).
87. Kelly, M. Meet This Third-Generation Farmer Who Converted His 1,400 Acres to Growing Organic Food.pdf. (2015).
88. TILMAN-ORG. TILMAN-ORG. Reduced Tillage and Green MANures for sustainable ORGANIC Cropping System. (2014).
89. van Groenigen, K.-J. *et al.* Abundance, production and stabilization of microbial biomass under conventional and reduced tillage. *Soil Biol. Biochem.* **42**, 48–55 (2010).
90. Kerpauskas, P., Sirvydas, A. P., Lazauskas, P., Vasiinauskienė, R. & Tamosiunas, A. Possibilities of weed control by water steam. *5* (2006).
91. Virbickaitė, R., Sirvydas, A. P., Kerpauskas, P. & Vasiinauskienė, R. The comparison of thermal and mechanical systems of weed control. *5* (2006).
92. Tallman, S. No-Till Case Study, Brown's Ranch: Improving Soil Health Improves the Bottom Line. *Butte MT Natl. Sustain. Agric. Inf. Serv. Natl. Cent. Approp. Technol.* (2012).
93. Liebmann, M., Mohler, C. L. & Staver, C. P. *Ecological management agricultural weeds*. (2001).
94. MacLaren, C., Storkey, J., Strauss, J., Swanepoel, P. & Dehnen-Schmutz, K. Livestock in diverse cropping systems improve weed management and sustain yields whilst reducing inputs. *J. Appl. Ecol.* (2018). doi:10.1111/1365-2664.13239
95. Bullock, D. G. Crop rotation. *Crit. Rev. Plant Sci.* **11**, 309–326 (1992).
96. Brussaard, L., de Ruiter, P. C. & Brown, G. G. Soil biodiversity for agricultural sustainability. *Agric. Ecosyst. Environ.* **121**, 233–244 (2007).
97. Davis, A. S., Hill, J. D., Chase, C. A., Johanns, A. M. & Liebman, M. Increasing Cropping System Diversity Balances Productivity, Profitability and Environmental Health. *PLoS ONE* **7**, e47149 (2012).
98. Kovačević, D., Dolijanović, Z., Milić, V., Gršić, N. & Kovačević, A. The effect of multi-year crop rotation on the weediness of maize. in *Book of Proceedings 2017*, 519–524 (2017).
99. Liebman, M. & Dyck, E. Crop Rotation and Intercropping Strategies for Weed Management. *Ecol. Appl.* **3**, 92–122 (1993).
100. Nikolić, L. Weed infestation and biodiversity of winter wheat under the effect of long-term crop rotation. *Appl. Ecol. Environ. Res.* **16**, 1413–1426 (2018).
101. Ramseier, H. & Crismaru, V. Resource-conserving agriculture. Under-sowing and mixed crops as stepping stones towards a solution. (2010).
102. Snapp, S. S. *et al.* Evaluating cover crops for benefits, costs and performance within cropping system niches. *Agron. J.* **97**, 322–332 (2005).
103. Brust, J. Weed suppression with cover crops and undersown crops in modern cropping systems. *Gesunde Pflanz.* **63**, 191–198 (2011).
104. Fisk, J. *et al.* Weed Suppression by Annual Legume Cover Crops in No-Tillage Corn. *Agron. J. - AGRON J* **93**, (2001).
105. Mirsky, S. B., Gallandt, E. R., Mortensen, D. A., Curran, W. S. & Shumway, D. L. Reducing the germinable weed seedbank with soil disturbance and cover crops. *Weed Res.* **50**, 341–352 (2010).
106. Mischler, R. A., Curran, W. S., Duiker, S. W. & Hyde, J. A. Use of a Rolled-rye Cover Crop for Weed Suppression in No-Till Soybeans. *Weed Technol.* **24**, 253–261 (2010).
107. Treadwell, D. D., Creamer, N. G., Schultheis, J. R. & Hoyt, G. D. Cover Crop Management Affects Weeds and Yield in Organically Managed Sweetpotato Systems. *Weed Technol.* **21**, 1039–1048 (2007).
108. Bicksler, A. J. & Masiunas, J. B. Canada Thistle (*Cirsium arvense*) Suppression with Buckwheat or Sudangrass Cover Crops and Mowing. *Weed Technol.* **23**, 556–563 (2009).
109. Peltonen-Sainio, P., Rajala, A., Känkänen, H. & Hakala, K. Chapter 4 - Improving farming systems in northern Europe. in *Crop Physiology (Second Edition)* (eds. Sadras, V. O. & Calderini, D. F.) 65–91 (Academic Press, 2015). doi:10.1016/B978-0-12-417104-6.00004-2
110. Eisenhauer, N. *et al.* Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Sci. Rep.* **7**, 44641 (2017).
111. Jones, C. Liquid carbon pathway unrecognised.pdf. (2008).
112. Jones, C. E. Building soil carbon with yearlong Green Farming. *Evergr. Farming Sept.* 4–5 (2007).
113. Steinauer, K., Chatzinotas, A. & Eisenhauer, N. Root exudate cocktails: the link between plant diversity and soil microorganisms? *Ecol. Evol.* **6**, 7387–7396 (2016).
114. Bardgett, R. D., Wardle, D. A. & Yeates, G. W. Linking above-ground and below-ground interactions: how plant responses to foliar herbivory influence soil organisms. *Soil Biol. Biochem.* **30**, 1867–1878 (1998).
115. Fageria, N. K., Baligar, V. C. & Bailey, B. A. Role of Cover Crops in Improving Soil and Row Crop Productivity. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* **36**, 2733–2757 (2005).
116. Lu, Y.-C., Watkins, K. B., Teasdale, J. R. & Abdul-Baki, A. A. Cover Crops in Sustainable Food Production. *Food Rev. Int.* **16**, 121–157 (2000).
117. Masilionyte, L. *et al.* Effect of cover crops in smothering weeds and volunteer plants in alternative farming systems. *Crop Prot.* **91**, 74–81 (2017).
118. Sarantonio, M. & Gallandt, E. The Role of Cover Crops in North American Cropping Systems. *J. Crop Prod.* **8**, 53–74 (2003).
119. Bonaudo, T. *et al.* Agroecological principles for the redesign of integrated crop–livestock systems. *Eur. J. Agron.* **57**, 43–51 (2014).
120. Russelle, M. P., Entz, M. H. & Franzluebbers, A. J. Reconsidering Integrated Crop–Livestock Systems in North America. *Agron. J.* **99**, 325 (2007).
121. Sulc, R. M. & Franzluebbers, A. J. Exploring integrated crop–livestock systems in different ecoregions of the United States. *Eur. J. Agron.* **57**, 21–30 (2014).
122. Urbatzka, P., Cais, K., Salzeder, G. & Wiesinger, K. Wirkung verschiedener Leguminosen als Untersaat im Vergleich zur Stoppelsaat auf Ertrag und Qualität der Deckfrucht Winterroggen und der Folgefrucht Hafer. in (International Conference > 2011: Scientific Conference on Organic Agriculture > Pflanze und Boden > Fruchtfolge, Leguminosen, N2-Fixierung, 2017).
123. Ramseier, H. & Crismaru, V. Resource-Conserving Agriculture: Undersowing and Mixed Crops as Stepping Stones Towards a Solution. in *Soil as World Heritage* (ed. Dent, D.) 353–363 (Springer Netherlands, 2014). doi:10.1007/978-94-007-6187-2_34
124. LaCanne, C. E. & Lundgren, J. G. Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ* **6**, e4428 (2018).
125. Lundgren, J. G., Hesler, L. S., Clay, S. A. & Fausti, S. F. Insect communities in soybeans of eastern South Dakota: The effects of vegetation management and pesticides on soybean aphids, bean leaf beetles, and their natural enemies. *Crop Prot.* **43**, 104–118 (2013).
126. Brooker, R. W. *et al.* Improving intercropping: a synthesis of research in agronomy, plant physiology and ecology. *New Phytol.* **206**, 107–117 (2015).
127. Hödtke, M., Lopes de Almeida, D. & Köpke, U. Intercropping of maize and pulses: an evaluation of organic cropping systems. *Org. Agric.* **6**, 1–17 (2016).
128. Martin-Guay, M.-O., Paquette, A., Dupras, J. & Rives, D. The new Green Revolution: Sustainable intensification of agriculture by intercropping. *Sci. Total Environ.* **615**, 767–772 (2018).
129. Cardinale, B. J. *et al.* Impacts of plant diversity on biomass production increase through time because of species complementarity. *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104**, 18123–18128 (2007).
130. Theunissen, J. Intercropping in field vegetable crops: Pest management by agrosystem diversification - an overview. (1994).
131. Raseduzzaman, M. & Jensen, E. S. Does intercropping enhance yield stability in arable crop production? A meta-analysis. *Eur. J. Agron.* **91**, 25–33 (2017).
132. Abouziena, H. F. & Haggag, W. M. Weed Control in Clean Agriculture: A Review. *Planta Daninha* **34**, 377–392 (2016).
133. Anderson, R. L. Integrating a complex rotation with no-till improves weed management in organic farming. *A review. Agron. Sustain. Dev.* **35**, 967–974 (2015).
134. Anderson, R. L. A Multi-Tactic Approach to Manage Weed Population Dynamics in Crop Rotations. *Agron. J.* **97**, 1579 (2005).
135. Andrew, I. K. S., Storkey, J. & Sparkes, D. L. A review of the potential for competitive cereal cultivars as a tool in integrated weed management. *Weed Res.* **55**, 239–248 (2015).
136. Cooper, J. *et al.* Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. *Agron. Sustain. Dev.* **36**, (2016).
137. Friedrich, T. & Kassam, A. No-till Farming and the Environment: Do No-Till Systems Require More Chemicals? *Outlooks Pest Manag.* **23**, 153–157 (2012).
138. Ashford, D. L. & Reeves, D. W. Use of a mechanical roller-crimper as an alternative kill method for cover crops. *Am. J. Altern. Agric.* **18**, 37–45 (2003).
139. Davis, A. S. Cover-Crop Roller–Crimper Contributes to Weed Management in No-Till Soybean. *Weed Sci.* **58**, 300–309 (2010).
140. Gliessman, S. R. Animals in agroecosystems. in *Agroecology: The Ecology of Sustainable Food systems* 269–285 (CRC Press, Boca Raton, Florida, 2006).
141. Lemaire, G., Franzluebbers, A., Carvalho, P. C. de F. & Dedieu, B. Integrated crop–livestock systems: Strategies to achieve synergy between agricultural production and environmental quality. *Agric. Ecosyst. Environ.* **190**, 4–8 (2014).
142. Hooks, C. R. R., Buchanan, A. L. & Chen, G. The Stale Seedbed Technique. A Relatively Underused Alternative Weed Management Tactic for Vegetable Production.pdf. (2014).
143. Rasmussen, I. A. The effect of sowing date, stale seedbed, row width and mechanical weed control on weeds and yields of organic winter wheat. *Weed Res.* **44**, 12–20 (2004).
144. Chinery, D. Using Acetic Acid (Vinegar) As A Broad-Spectrum Herbicide. *3* (2002).
145. Johnson, E. *Efficacy of Vinegar, Acetic Acid, as an Organic Herbicide: Final Report.* (Saskatchewan Agriculture, Food & Rural Revitalization, Agriculture Development Fund, 2005).
146. Ohlson, K. *The Soil Will Save Us: How Scientists, Farmers, and Foodies Are Healing the Soil to Save the Planet.* (Rodale Books, 2014).
147. Scheub, U. & Schwarzer, S. *Die Humusrevolution: Wie wir den Boden heilen, das Klima retten und die Ernährungswende schaffen.* (oekom, 2017).
148. Schwartz, J. D. & Ehrlich, G. *Cows Save the Planet: And Other Improbable Ways of Restoring Soil to Heal the Earth.* (Chelsea Green Publishing, 2013).
149. Shepard, M. *Restoration Agriculture.* (Acres U.S.A., 2013).
150. Frison, E. From uniformity to diversity: a paradigm shift from industrial agriculture to diversified agroecological systems. (2016).
151. Kehlenbeck, H., Saltzman, J., Schwarz, J., Zwerger, P. & Nordmeyer, H. Economic assessment of alternatives for glyphosate application in arable farming.pdf. (2016).
152. Böcker, T., Britz, W. & Finger, R. Modelling the Effects of a Glyphosate Ban on Weed Management in Silage Maize Production. (2017).
153. Wecker, K. & Rueter, G. Farming without glyphosate – how would that work? | DW | 25.10.2017. *DW.COM* (2017). Available at: <https://www.dw.com/en/farming-without-glyphosate-how-would-that-work/a-41104393>. (Accessed: 11th January 2019)
154. Poux, X. & Aubert, P.-M. Une Europe agroécologique en 2050: une agriculture multifonctionnelle pour une alimentation saine. *78* (2018).
155. Lal, R., 2016. Beyond COP 21: Potential and challenges of the “4 per Thousand” initiative. *J. Soil Water Conserv.* **71**, 20A–25A. <https://doi.org/10.2489/jswc.71.1.20A>
156. Soussana, J.-F., Lutfalla, S., Ehrhardt, F., Rosenstock, T., Lamanna, C., Havlík, P., Richards, M., Wollenberg, E. (Lini), Chotte, J.-L., Torquebiau, E., Ciais, P., Smith, P., Lal, R., 2017. Matching policy and science: Rationale for the ‘4 per 1000 - soils for food security and climate’ initiative. *Soil Tillage Res.* <https://doi.org/10.1016/j.still.2017.12.002>