

Kurt Möller^{1,2}, Timo Blecher³, Gernot Bodner⁴, Jörg Böhmer⁵, Bettina Eichler-Löbermann⁶, Maendy Fritz⁷, Antje Herrmann⁸, Dorothee Klöcker⁹, Heinz-Josef Koch¹⁰, Janna Macholdt¹¹, David Menskes³, Marcel Moll¹², Jens Poetsch¹³, Charlotte Rapp¹⁴, Tanja Schäfer¹⁵, Knut Schmidtke¹⁶, Carola Pekrun¹⁷

Regenerative Landwirtschaft – Annäherung an eine wissenschaftsbasierte Definition

Regenerative agriculture – an approach for a knowledge-based definition

Erarbeitet von der Arbeitsgruppe „regenerative Landwirtschaft“ der Gesellschaft für Pflanzenbauwissenschaften

Affiliationen

¹ Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt, Stuttgart.

² LTZ Augustenberg, Außenstelle Forchheim, Rheinstetten.

³ Feldsaaten Freudenberger, Krefeld.

⁴ Universität für Bodenkultur, Institut für Pflanzenbau, Tulln an der Donau, Österreich.

⁵ Hochschule Trier, Institut für angewandtes Stoffstrommanagement, Birkenfeld.

⁶ Universität Rostock, Professur Pflanzenbau, Rostock.

⁷ Technologie- und Förderzentrum (TFZ), Abteilung Rohstoffpflanzen und Stoffflüsse, Straubing.

⁸ Bad Hersfeld.

⁹ CONVIS s.c., Zone Artisanale et Commerciale, Ettelbruck, Luxemburg.

¹⁰ Institut für Zuckerrübenforschung, Göttingen.

¹¹ Universität Halle, Professur für Pflanzenbau und Ökologischen Landbau, Halle (Saale).

¹² Universität Bonn, Institut für Nutzpflanzenwissenschaften und Ressourcenschutz - Nachwachsende Rohstoffe, Rheinbach.

¹³ Hochschule für Forstwirtschaft Rottenburg, Fachgebiet Agrarwirtschaft, Rottenburg a.N.

¹⁴ Landwirtschaftliches Zentrum Baden-Württemberg (LAZBW), Aulendorf.

¹⁵ Fachhochschule Südwestfalen, Fachbereich Agrarwirtschaft, Professur für Pflanzenbau und Nachhaltige Anbausysteme, Soest.

¹⁶ Hochschule für Technik und Wirtschaft Dresden, Fachgebiet Ökologischer Landbau, Dresden.

¹⁷ Hochschule für Wirtschaft und Umwelt Nürtingen-Geislingen (HfWU), Fachgebiet Pflanzenbau und Qualitätsmanagement, Nürtingen.

Kontaktanschrift

Prof. Dr. Kurt Möller, Universität Hohenheim, Institut für Kulturpflanzenwissenschaften, Fachgebiet Düngung und Bodenstoffhaushalt, Fruwirthstr. 20, 70599 Stuttgart, E-Mail: kurt.moeller@alumni.tum.de

Zusammenfassung

Regenerative Landwirtschaft ist ein derzeit häufig verwendeter Begriff und wird auch als ein Ansatz gesehen, politische Vorgaben wie die Farm-to-Fork oder die Ackerbaustrategie des Bundes umzusetzen. Bei der Sichtung der praktischen Empfehlungen und internationalen Literatur sowie im Kontext der Ideen der ersten Befürworter kann regenerative Landwirtschaft auf u.a. folgende Grundsätze zurückgeführt werden: a) hoher Bodenschutzstandard, b) Humusaufbau, c) Förderung und Nutzung von funktionaler Biodiversität, d) Reduzierung des Einsatzes von chemisch-synthetisch hergestellten Betriebsmitteln und e) Klimaschutz. Hierzu dienen zahlreiche Maßnahmen, wie eine Verringerung der Bodenbearbeitungsintensität, vielfältige Fruchtfolgen mit consequentem Anbau von Zwischenfruchtmischungen und Untersaaten, consequente Integration von Leguminosen in Fruchtfolgen, ggf. Mischanbau wo immer möglich und vertretbar, die consequente Befolgung der Empfehlungen der Beratungseinrichtungen der Länder im Bereich Düngung und Pflanzenschutz mit weitestgehendem Verzicht auf Wachstumsregler und Insektizide, und die consequente Implementierung von biodiversitätsfördernden Maßnahmen im Ackerland (u. a. Dau-

erkulturen, Agroforst, Blühflächen, blühende Untersaaten). Allerdings fehlt eine allgemein anerkannte Definition der damit gemeinten landwirtschaftlichen Anbausysteme und ihrer spezifischen Managementelemente. Häufig wird regenerative Landwirtschaft weniger an konkreten Zielen, sondern vielmehr entlang von Anbaumaßnahmen definiert. Aber auch in der öffentlichen Kommunikation wären statt konkreter Managementvorgaben Zielvorgaben wie eine Halbierung des Erosionsrisikos, der produktbezogenen Klimagasemissionen, der Stickstoffverluste oder des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln bei einer Steigerung der Biodiversität entlang entsprechender Indices um z. B. 50 % eher geeignet ein Anbausystem zu beschreiben, das eine wesentliche Verbesserung bei wichtigen Kriterien der Nachhaltigkeit ermöglicht, und zugleich in der öffentlichen Kommunikation besteht, auch im Hinblick auf Zertifizierung und Vermarktung. Denn wollen die Sektorbeteiligten auf dem Markt höhere Erlöse erzielen, gilt es einfach zu kommunizierende Vorgaben zu definieren, die im Rahmen einer Zertifizierung eine eindeutige Abgrenzung zur konventionellen Landwirtschaft nach guter fachlicher Praxis oder dem ökologischen Landbau ermöglichen. In diesem Sinne sind die Autoren überzeugt, dass die Definition einer regenerativen Landwirtschaft entlang von konkreten Zielen,

wie sie im Text beschrieben worden sind, einen Weg darstellen kann, eine solche Anbauform zu konkretisieren.

Stichwörter

Ackerbaustrategie, Farm to Fork, Bodenschutz, Ressourcenschutz, Düngung, Pflanzenschutz, Biodiversität

Abstract

Regenerative agriculture is currently a frequently used term and is also seen as an approach to implementing political guidelines such as the European Farm-to-Fork Strategy or the German Arable Farming Strategy. When reviewing the practical recommendations and literature, as well as the ideas of the first proponents, regenerative agriculture can be traced back to the following principles, among others: a) high soil protection standards, b) soil organic matter build-up, c) promotion and use of functional biodiversity, d) reduction of the use of chemically-synthesized products and e) climate protection. Numerous measures serve these purposes, such as a reduction in tillage intensity, diverse crop rotations with regular cultivation of catch crop mixtures and undersown crops, integration of legumes in crop rotations, mixed cultivation wherever possible and justifiable. Furthermore, application of the recommendations of the official bodies of the federal states for fertilization and plant protection, minimizing the application of growth regulators and insecticides. At the same time, implementation of biodiversity-promoting measures (e.g. permanent crops, agroforestry, flower strips and fields, flowering undersown crops). However, there is no generally recognized definition of management elements for regenerative agriculture nor defined targets. We suggest that a definition along targets would be more useful, e.g. reducing the risk of erosion by 50% compared to good agricultural practice, additionally reducing product-related greenhouse gas emissions, nitrogen losses or the use of pesticides by 50% and targeting an increase of biodiversity indices by 50% at the same time. With this in mind, the authors are convinced that the definition of regenerative agriculture along defined objectives could be a way to define regenerative agriculture and to use this as a basis for certification and placement within the agricultural value chain.

Keywords

German arable farming strategy, farm to fork, soil conservation, resource conservation, fertilization, plant protection, biodiversity

Einleitung

Seit den 2010er Jahren wird der Begriff „regenerative Landwirtschaft“ von vielen Personen und Organisationen aus der landwirtschaftlichen Praxis aufgegriffen. Daneben beschäftigen sich jedoch auch NGOs, Konzerne und Stiftungen mit regenerativer Landwirtschaft. Der Begriff „regenerative Landwirtschaft“ wurde von Robert Rodale (1983) geprägt; für ihn bedeutete regenerative Landwirtschaft eine Form des Land-

baus, die darauf abzielt, die natürlichen Prozesse im Boden zu fördern, um eine Wiederherstellung und eine Verbesserung der Bodengesundheit zu erreichen (<https://rodaleinstitute.org/>). Rodale sah regenerative Landwirtschaft als eine Möglichkeit, die negativen Auswirkungen der intensiven Landwirtschaft zu überwinden, wie etwa Bodenerosion und den Verlust der Bodenfruchtbarkeit. Sein Konzept integrierte Elemente aus ökologischer Landwirtschaft und anderen nachhaltigen Ansätzen, um langfristig ökologisch, wirtschaftlich und sozial tragfähige landwirtschaftliche Praktiken zu entwickeln. Unter diesem Begriff wird heute aber kein klar definiertes Ackerbausystem verstanden (Giller et al., 2021). Vorschläge für Grundsätze einer regenerativen Landwirtschaft wurden von verschiedenen Autoren erarbeitet (Rhodes, 2017; LaCanne und Lundgren, 2018; Lal, 2020; Schreefel et al., 2020; Fenster et al., 2021; Näser, 2020; Kurth et al., 2023). Sie variieren sehr stark und reichen von einer Zusammenstellung von Maßnahmen, deren Wirkung unter Produktionsbedingungen (z. B. im Freiland) für den mitteleuropäischen Raum wissenschaftlich nicht belegt sind (z. B. Düngung nach der Kationenaustauschmethode wie z. B. nach Kinsey oder Unterfrauner, Einsatz von Komposttees oder sog. effektiver Mikroorganismen (Näser, 2020; Kurth et al., 2023), bis hin zu einer Zusammenstellung von Maßnahmen, deren Wirksamkeit wissenschaftlich belegt ist im Hinblick auf die Ziele wie Bodenschutz, Ressourceneffizienz und Umwelt (z. B. Minimierung der Bodenbearbeitungsintensität, konsequente Gründüngung, stärkerer Fruchtwechsel unter Einbeziehung von mehrschnittigem Ackerfutterbau) (Giller et al., 2021; Möller et al., 2023). Letztere haben zahlreiche Überschneidungen mit den drei Säulen der konservierenden Landwirtschaft („Conservation Agriculture“): Bodenruhe, ständige Bodenbedeckung und Kulturpflanzendiversität (European Conservation Agriculture Federation, 2024). Auch gibt es zahlreiche Überschneidungen mit der „guten fachlichen Praxis“ (Giller et al., 2021). Außerdem spielen Elemente des ökologischen Landbaus hinein, ergänzt durch Beweidung von Ackerflächen sowie Maßnahmen zur Erzielung einer besonders hohen biologischen Vielfalt (McGuire, 2018). Aber es gibt an der Stelle auch Unterschiede zum ökologischen Landbau, so sind chemisch-synthetisch hergestellte Betriebsmittel (Düngung, Pflanzenschutz) nicht per se verboten.

Da der Begriff „regenerative Landwirtschaft“ auch im politisch-gesellschaftlichen Raum Platz eingenommen hat, z. B. im Hinblick auf die Umsetzung der Ackerbaustrategie der Bundesregierung oder der Farm-to-Fork-Strategie der EU-Kommission (EASAC, 2022) erscheint es daher aus wissenschaftlicher Sicht notwendig zu sein, einen Rahmen für ein wissenschaftsbasiertes regeneratives Anbausystem zu setzen. Dies insbesondere auch im Kontext der häufig zu beobachtenden Propagierung von Maßnahmen, deren Wirksamkeit in kühl-gemäßigten Klimaräumen wie in Mitteleuropa wissenschaftlich nicht nachgewiesen (Verwendung von Komposttees, effektiven Mikroorganismen) oder widerlegt ist (z. B. Bodenuntersuchungen nach den Kationenaustauschkapazitätsmethoden zur Bemessung der Düngung) (Olsen et al., 1982; Möller et al., 2023). Eine zentrale Herausforderung für Praxis, Beratung, Forschung, Industrie und Politik besteht darin, zu definieren, was einen regenerativ wirtschaftenden Betrieb kennzeichnet und wie er sich vom ökologischen Landbau, der konservierenden Landwirtschaft und einem konventionellen

Landbau unterscheidet (Newton et al., 2020; Schreefel et al., 2020; Zimmer et al., 2025). Der hier vorliegende Beitrag soll aufzeigen, wie eine regenerative Landwirtschaft in die Praxis umgesetzt werden kann auf Basis von Methoden, deren Wirkungsweise wissenschaftlich nachgewiesen sind.

Es soll ein grober Rahmen für ein Anbausystem einer wissenschaftsbasierten regenerativen Landwirtschaft skizziert werden. Dieser soll der Praxis, Beratung, Forschung, Industrie und Politik eine Orientierung geben, wie die Ziele einer regenerativen Landwirtschaft auf Basis von Methoden erreicht werden können, deren Wirksamkeit wissenschaftlich nachgewiesen ist. Im Geflecht der zu berücksichtigenden Zielkonflikte im Acker- und Pflanzenbau (Feike et al., 2022) wird hierbei den Aspekten Bodenschutz, Ressourceneffizienz, Biodiversität und Klimaschutz eine deutlich stärkere Gewichtung verliehen als es nach „guter fachlicher Praxis“ üblich bzw. vorgeschrieben ist. Der Begriff „regenerativ“ beinhaltet dabei das Ziel, bei Böden, die einen hohen Bodenfruchtbarkeitszustand (Bodenchemie, -physik, -biologie) aufweisen, diesen durch die Bewirtschaftung zielgerichtet zu erhalten, bzw. Böden mit einem ungünstigen Zustand zu verbessern. Vor allem steht das Ziel, sowohl konsequenten Bodenschutz, somit Bodenverluste durch Wind- und Wassererosion zu vermeiden, als auch konsequenten Klimaschutz zu betreiben. Zugleich gilt es, den Einsatz externer Betriebsmittel zu verringern und die Biodiversität in Agrarlandschaften zu erhöhen (La Canne et al., 2018; Näser, 2020; Newton et al., 2020; Fenster et al., 2021; Giller et al., 2021; EASAC, 2022; Gordon et al., 2022; Levin, 2022; Schreefel et al., 2022; Wilson et al., 2022; Khangura et al., 2023; Kurth et al. 2023; Manshanden et al., 2023).

In einem ersten Schritt wurden zunächst aus dem vorliegenden Schrifttum die wichtigsten potenziellen Ziele und Grundsätze der regenerativen Landwirtschaft identifiziert.

Und in einem zweiten Schritt wurden Handlungsfelder identifiziert, die für eine Beschreibung von Ackerbausystemen notwendig sind. Heißenhuber (1994) nannte als Kriterien für eine ordnungsgemäße Landbewirtschaftung die Punkte 1) Nutzung landwirtschaftlicher Flächen, 2) Bodenbearbeitung, 3) Fruchtfolgen, 4) Düngung und 5) Pflanzenschutz. Die Ackerbaustrategie 2025 der Bundesregierung umfasst die Handlungsfelder Boden, Kulturpflanzenvielfalt und Fruchtfolge, Düngung, Pflanzenschutz, Pflanzenzüchtung, Digitalisierung, Biodiversität, Klimaanpassung und Klimaschutz, sowie einige gesellschaftliche Aspekte (Beer & Kottmann, 2020). Aus dieser Zusammenstellung wurden in einem nächsten Schritt für Handlungsfelder, die die landwirtschaftliche Bewirtschaftung direkt betreffen (Boden, Fruchtfolge, Düngung, Pflanzenschutz und Biodiversität) Maßnahmen zusammengestellt, welche die Bewirtschaftung einer regenerativen Landwirtschaft kennzeichnen könnten, und zugleich über die Richtlinien der sog. „guten fachlichen Praxis“ hinausgehen. Für jedes Handlungsfeld wurden Ziele definiert, Zielkonflikte benannt, und aus der Literatur Maßnahmen zusammengetragen, die nachgewiesenermaßen zur Zielerreichung beitragen können. Bei Zielvorgaben (wie z. B. eine Halbierung des N-Verlustrisikos) wurde als Referenz die heutige „gute fachliche Praxis“ als Referenz herangezogen. In dieser Schrift werden solche Maßnahmen hervorgehoben, die den o. g. Zielen auf Basis von wissenschaftlich belegten Ergebnissen zuträglich

sind. Dabei wurden vorwiegend Ergebnisse aus Metastudien mit Bezug zu kühl-gemäßigten Klimaräumen herangezogen. In der Praxis angewandte Maßnahmen ohne wissenschaftlichen Nachweis einer Wirkung werden hier nicht berücksichtigt.

Ziele, Zielkonflikte der regenerativen Landwirtschaft und daraus abgeleitete Handlungsfelder

Regenerative Landwirtschaft strebt als Ziel einen hohen Bodenschutzstandard an, verbunden mit einer Verbesserung der Bodengesundheit und der Förderung der Artenvielfalt, außerdem einen Beitrag zum Klimaschutz bei hoher Klimaresilienz und Kohlenstoffspeicherung im Boden, sowie Reduktion des Einsatzes von externen Betriebsmitteln (Wilson et al., 2022). Entsprechend werden durch regenerative Landwirtschaft folgende Kernziele verfolgt (La Canne et al., 2018; Näser, 2020; Newton et al., 2020; Fenster et al., 2021; Giller et al., 2021; EASAC, 2022; Gordon et al., 2022; Levin, 2022; Schreefel et al., 2022; Wilson et al., 2022; Khangura et al., 2023; Kurth et al. 2023; Manshanden et al., 2023):

1. Hohes Produktivitätsniveau von mindestens 90 bis 95 %, um einerseits ein ausreichendes Einkommen für landwirtschaftliche Betriebe zu generieren, bei gleichzeitig hoher gesellschaftlicher Akzeptanz, und andererseits, um negative Auswirkungen eines höheren Flächenbedarfes (Land-use change) für die Lebensmittelerzeugung zu verhindern bzw. zu begrenzen (Crippa et al., 2021).
2. Konsequenter Bodenschutz (z. B. Verringerung des Erosionsrisikos um mindestens 50 % im Vergleich zur "guten fachlichen Praxis"), Verbesserung der Bodenstruktur und Erreichung von standorttypisch hohen Humusgehalten.
3. Erhöhung der Ressourceneffizienz und Verringerung der Umweltbelastungen um mindestens 50 %. Entsprechend wird eine Verringerung des Einsatzes von chemisch-synthetisch hergestellten Pflanzenschutzmitteln um 50 % erzielt, sowie eine Anpassung der N-Düngung vorgenommen, sodass die N-Verlustgefahr ebenfalls um 50 % sinkt. Ferner wird eine Verringerung der Klimagasemissionen des Betriebes sowie der NH₃-Emissionen im Wirtschaftsdüngermanagement um mind. 50 % erreicht, jeweils gemessen an der "guten fachlichen Praxis".
4. Verringerung der Nitratkonzentrationen im Sickerwasser auf Werte unter dem Grenzwert von 50 mg/l, besser noch auf Werte unter dem Richtwert von 25 mg/l (evtl. abhängig vom GV-Besatz).
5. Erhöhung der symbiotischen N₂-Fixierung und Herstellung von Nährstoffkreisläufen (innerbetrieblich und mit urbanen Regionen).
6. Erhöhung der Wasserverfügbarkeit durch Minderung der Evaporation, Erhöhung der Infiltration und Erweiterung des effektiven Wurzelraums.
7. Erhöhung der Biodiversität um ca. 50 % (z. B. gemessen am Simpson diversity-Index oder dem Shannon-Wiener Index). Es wird angestrebt, eine hohe Bodenbiodiversität und ein vielfältiges Bodennahrungsnetz mit hoher Ertragsstabilität zu kombinieren.
8. Integration von Viehhaltung und Ackerbau, ggf. Beweidung von Ackerflächen.

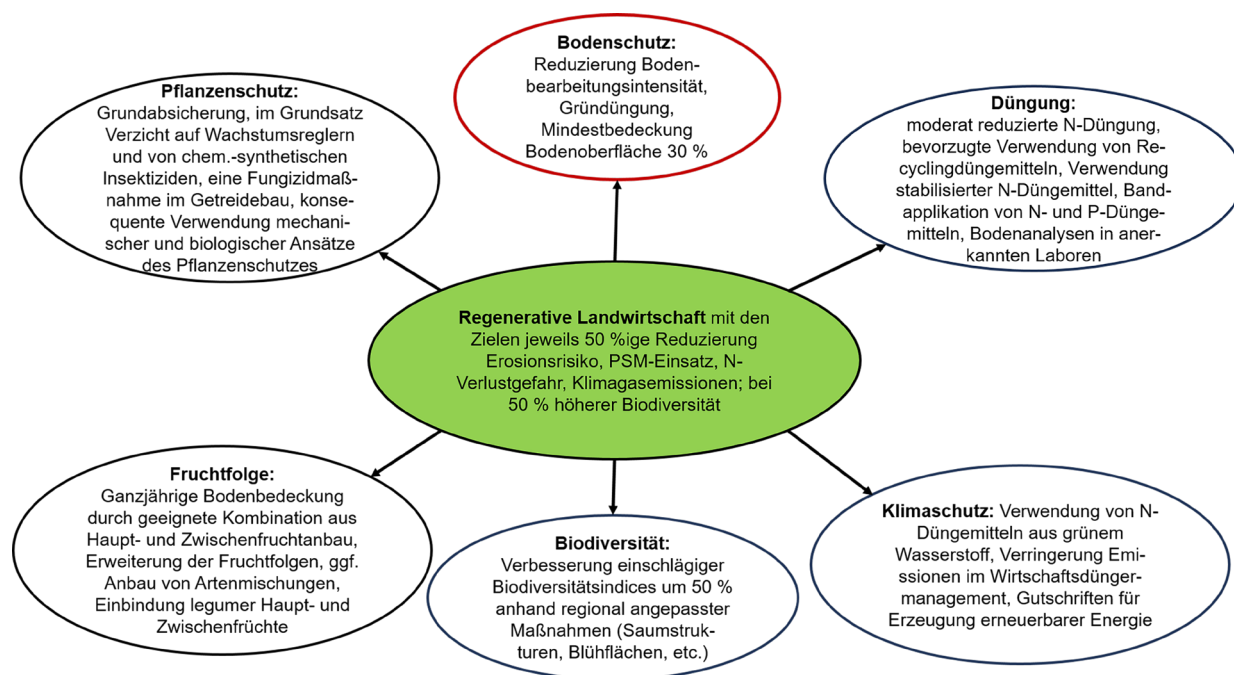


Abb. 1: Übersicht der Ziele und Handlungsfelder einer regenerativen Landwirtschaft auf Basis wissenschaftlicher Methoden.

Die Bewirtschaftung nach den oben beschriebenen Grundsätzen betrifft folgende Handlungsfelder, die im Weiteren genauer betrachtet werden sollen (siehe auch Abb. 1):

1. **Bodenbearbeitung:** die Erosionsneigung von Flächen (Clement et al., 2024) wie auch das Auftreten von Krankheiten und Unkräutern sind wesentlich von der Bodenbearbeitung abhängig (z. B. van den Putte et al., 2010; Gruber et al., 2012). Damit werden u.a. die Ziele 2 und 7 adressiert. Darüber hinaus kann sich die Bodenbearbeitung auf die Infiltrationskapazität der Böden (Blanco-Canqui et al., 2017) und zugleich die Bedeckung auswirken, was wiederum die Evaporation beeinflusst (Schwartz et al., 2010), damit wird Ziel Nr. 6 berücksichtigt.
2. **Fruchtfolge:** die Fruchtfolge adressiert alle neun Kernziele (z. B. Könecke, 1967; Shah et al., 2021).
3. **Düngung und Nutzung von Bodenhilfsstoffen:** dies berührt die Kernziele 1 bis 4.
4. **Pflanzenschutz:** eine Reduzierung des Einsatzes von Pflanzenschutzmitteln und der damit einhergehenden Kosten und Aufwendungen berührt die Kernziele 1 und 3.
5. **Erhalt und Förderung der Biodiversität:** hierdurch werden die Kernziele 3 und 7 berücksichtigt bzw. adressiert.
6. **Konsequenter Klimaschutz:** dies adressiert die Kernziele 2 und 3.

Dabei sind zahlreiche Hemmnisse und Zielkonflikte bei der praktischen Umsetzung zu beachten, auf die bei den einzelnen Handlungsfeldern näher eingegangen wird.

Handlungsfelder

Handlungsfeld Bodenschutz und Bodenbearbeitung

Ziele und Zielkonflikte

Bodenschutz und eine Verminderung der Erosionsgefahr um mindestens 50 % ist ein vorrangiges Ziel der regenerativen

Landwirtschaft, um die Bodenfruchtbarkeit langfristig zu erhalten bzw. zu erhöhen. Ziel der Bodenbearbeitung ist es, günstige Bedingungen für das Wachstum der Kulturpflanzen zu schaffen und zugleich einen Beitrag zur Unkrautregulierung und Einarbeitung organischer Düngemittel zu leisten. Verfahren der Grundbodenbearbeitung können grob in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. **Wendend:** 20–30 cm tiefe Bearbeitung mit Pflug;
2. **Nicht wendend:** 10–20 cm tief mischend mit Grubber/Egge oder streifenweise als Strip-Till; oder
3. **Direktsaat:** Verzicht auf Bodenbearbeitung.

In der öffentlichen Diskussion wird Verfahren der konservierenden Bodenbearbeitung (Verfahren 2 und 3) häufig eine höhere Bodenqualität z. B. in Form von höheren Humusgehalten zugesprochen, wenngleich unter Berücksichtigung der Lagerungsdichte und der Tiefenverteilung der Humusgehalte im Boden die Bodenbearbeitungsintensität keinen eindeutigen Effekt auf die insgesamt gespeicherte C_{org} -Menge im Boden aufweist (Jacobs et al., 2015; Büchi et al., 2017; Haddaway et al., 2017; Rosinger et al., 2023; Zimmer et al., 2025). Allerdings vermindert konservierende Bodenbearbeitung die Anfälligkeit für Wind- und Wassererosion, insbesondere bei Direktsaat, weil die hinterlassene Mulchdecke aus Vorfrucht-Ernteresten oder einer zuvor angebauten Gründüngung die Energie der auftreffenden Regentropfen reduziert und den Abfluss von Niederschlagswasser mindert (Seitz et al., 2019; Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Die Schutzwirkung des Mulches bei konservierender Bodenbearbeitung wird durch die Ausbildung von Bioporen bis an die Oberfläche und eine erhöhte Lebendverbauung der Bodenpartikel verstärkt (Laufer et al., 2016). Zudem sinkt der Energiebedarf bei der Bodenbearbeitung infolge des geringeren Zugkraftbedarfs und seltenerer Überfahrten. Die Flächenleistung der Bodenbearbeitung steigt, somit sinken insgesamt die Kosten für die Etablierung der Kulturen (Giller et al., 2015). Weitere

Vorteile sind, dass die oberflächennah bzw. oberflächlich verbleibenden Erntereste Substrat für Bodenflora und -fauna bieten und atmosphärische Einflüsse abpuffern. Daraus resultieren ausgeglichene Temperatur- und Feuchteverhältnisse (Blanco-Canqui & Ruis, 2020). Diversität und Biomasse von Mikroorganismen, Regenwürmern und anderen Bodentieren sind bei konservierender Bodenbearbeitung erhöht, vor allem nahe der Bodenoberfläche (Murugan et al., 2013; Betancur-Corredor et al., 2022). Zugleich ist die Lagerungsdichte im vormals bearbeiteten Teil der Krume höher (Ehlers et al., 2000; Krauss et al., 2022). Dies bewirkt eine höhere Tragfähigkeit und länger anhaltende Befahrbarkeit (Horn, 2004), kann aber auch eine Barriere für das Wurzelwachstum darstellen (Braim et al. 1992; Deubel et al., 2011; Guan et al., 2015). Eine erhöhte Porenkontinuität und Bioporen können diese Limitierungen mindern (Ehlers et al., 1986; Koch, 2009; Blanchy et al., 2023). Die Lachgasemissionen sind im Mittel durch konservierende Bodenbearbeitung unverändert oder geringfügig reduziert (Guenet et al., 2021).

Allerdings sind im Kontext der Grundbodenbearbeitung zahlreiche Zielkonflikte zu adressieren. Neben den i.d.R. etwas niedrigeren Erträgen in Systemen konservierender Bodenbearbeitung im gemäßigten Klima (Van den Putte et al., 2010; Nunes et al., 2020; Young et al., 2021; Pekrun et al., 2023), insbesondere bei Direktsaat, bei der mit Ertragsverlusten von durchschnittlich 10 % gerechnet werden muss (Koch et al. 2009; Arvidsson et al., 2014; Hansen et al., 2015; Huynh et al., 2019; Pekrun et al., 2023), sind noch andere mögliche Nachteile konservierender Bodenbearbeitungsverfahren zu nennen. Dazu gehören:

- Ein verstärktes Auftreten von Unkräutern und Ungräsern (Gruber et al., 2012; Cooper et al., 2016), insbesondere von Arten wie Ackerfuchsschwanz, Trespel und Windhalm sowie von perennierenden Wurzelunkräutern (Nichols et al., 2015).
- Eine Zunahme von bodenbürtigen Schaderregern wie Fußkrankheiten des Getreides, Fusarium bei Getreide und Mais (Steinkellner & Langer, 2004) sowie Maiszünsler.
- Ein erhöhtes Aufkommen von Schnecken und Mäusen (Rowen et al., 2020; Ruscoe et al., 2023).
- Stratifikation bzw. Schichtung von Bodeneigenschaften: Eine abnehmende Tiefe der Bearbeitung bewirkt eine tiefenabhängig differenzierte Ausbildung von Bodeneigenschaften wie Lagerungsdichte, Gesamtporenvolumen (Tebrügge & Düring, 1999; Koch et al., 2009; Munkholm et al., 2013), Bodenkohlenstoff- und Pflanzennährstoffgehalten mit einer oberflächennahen Anreicherung von Nährstoffen wie Phosphor und Kalium (Tomanova et al., 2006; Dieckmann & Koch, 2008; Sanginés de Cárcer et al., 2019; Krauss et al., 2020), teilweise verbunden mit einer geringeren Nährstoffverfügbarkeit bei ausgeprägter Trockenheit (Deubel et al., 2011). Die P-Anreicherung an der Bodenoberfläche kann zu höheren P-Verlusten in Form gelöster P-Verbindungen führen als die durch Bodenerosion ausgelösten Verluste (Gaynor & Findlay, 1995; Dodd & Sharpley, 2016; Daryanto et al., 2017).
- Die dichtere Bodenlagerung und auf der Oberfläche verbleibende Pflanzenreste können im Frühjahr die Abtrocknung und Erwärmung des Bodens verzögern (Blan-

co-Canqui & Ruis, 2020). Dazu erfordern sie den Einsatz angepasster Sämaschinen (Direktsaat- oder Mulchsaat-taugliche Maschinen). Trotzdem kommt es im gemäßigten Klima häufig zu verminderten Feldaufgängen (Morris et al., 2010).

Maßnahmen im Bereich Bodenbearbeitung

Im Geflecht der Zielkonflikte um die Grundbodenbearbeitung wird in der regenerativen Landwirtschaft ein risikoabhängiger, standortangepasster Mittelweg in der Bodenbearbeitung angestrebt, bei dem die Bodenbearbeitungsintensität grundsätzlich reduziert wird, aber zumindest eine sporadische Durchmischung der Oberkrume gewährleistet wird. Dabei müssen die spezifischen Standortbedingungen, die geplante Kulturart und das damit einhergehende Erosionsrisiko berücksichtigt werden (Blanco-Canqui & Wortmann, 2020). Die Bearbeitung soll eine Durchmischung der Nährstoffe in der Oberkrume bewirken und zugleich dem vorbeugenden Pflanzenschutz dienen. Für einen ausreichend hohen Erosionsschutz werden nach der ASAE-Definition für Conservation Tillage ein Mindestmaß an Bodenbedeckung durch Pflanzenreste oder sonstigen Mulch von 30 % angestrebt. Ergänzend ist eine sporadische Tiefenlockerung möglich, die Verdichtungshorizonte im Unterboden aufbricht (Ehlers et al., 1986; Håkansson, 2005; Schneider et al., 2017; Vanderhasselt et al., 2024), das Wasserinfiltrationsvermögen des Bodens erhöht (Ehlers et al., 1986; Schneider et al., 2017; Sun et al., 2018) und zur schnelleren Erschließung des Unterbodens durch die Wurzeln der angebauten Kulturarten beiträgt (Ehlers, 1996). Die Wirkung der Tiefenlockerung ist in trockenen Anbauregionen stärker, sie ist zudem abhängig von der Bodentextur; auf Standorten mit über 70 % Schluff steigt das Risiko negativer Wirkungen auf den Ertrag (Schneider et al., 2017). Nach einer Tiefenlockerung sollte die erreichte Lockerung durch eine nachfolgend angebaute tiefwurzelnde Haupt- oder Zwischenfrucht biologisch stabilisiert werden (Håkansson, 2005; Vanderhasselt et al., 2024).

Der Tendenz zu verstärkten Problemen mit Ungräsern, Wurzelunkräutern und bodenbürtigen Krankheiten und Schädlingen bei reduzierter Bodenbearbeitungsintensität kann teilweise durch eine Erweiterung der Fruchtfolge entgegengewirkt werden, insbesondere durch Integration von schnittgenutztem Ackergras, Klee- oder Luzernegrass (Melandar et al., 2020). Bei einer Reduzierung der Bodenbearbeitungsintensität sind die Betriebe besonders abhängig von der Verfügbarkeit entsprechender Herbizide (Danne et al., 2019) und verbesserten Möglichkeiten für eine gezielte mechanische Unkrautkontrolle im Kontext der jeweiligen Fruchtfolge (Cooper et al., 2016). Letztere erhöht auch die Wassereffizienz, ohne das Erosionsrisiko nennenswert zu beeinflussen (Manning et al., 1966). Somit ist der technische Fortschritt in diesem Bereich in den kommenden Jahren besonders wichtig.

Weitere Maßnahmen in der regenerativen Landwirtschaft sind die flache Einarbeitung von Ernteresten und Gründungsbiomasse zur „Flächenrotte“, bei dem zumindest ein Teil der Biomasse weiterhin zu einer gewissen Bedeckung der Bodenoberfläche beiträgt. Auch die Nutzung von Aussaatverfahren, bei denen nur Teilflächen bearbeitet werden (z. B.

Streifensaatterfahren – Strip-Till), sind im Sinne des Bodenschutzes relevant.

Handlungsfeld Fruchtfolge

Ziele und Zielkonflikte

Ziel des Pflanzenbaus in einer regenerativen Landwirtschaft ist es, den Boden möglichst ganzjährig mit lebenden Pflanzen bewachsen zu halten, um so überjährig das Bodenleben zu fördern und zu stärken und durch Kulturpflanzenartenvielfalt Stabilität zu erzeugen (Liu et al., 2023). Ferner gilt es, durch entsprechende Anbaupausen der Ausbreitung von Unkräutern, Krankheiten und Schädlingen entgegenzuwirken. Vielfältige Fruchtfolgen, artenreicher Mischanbau (alle Formen des Anbaus von Gemengen verschiedener Pflanzenarten, Untersaaten sowie Anbau von Sortenmischungen einer Pflanzenart bis hin zu Agroforstsystemen) sowie der Anbau von Zwischenfruchtmischungen sind zentrale Elemente des regenerativen Pflanzenbaus. Dabei sind die Fruchtfolge mit Haupt- und Zwischenfrüchten, der Mischanbau und die Bodenbearbeitung so zu kombinieren, dass die Bearbeitungsintensität so weit wie möglich reduziert und gleichzeitig der Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln minimiert werden können. Sie soll ferner die Klimaresilienz des Anbaus und die C-Speicherung im Boden erhöhen und durch Nährstoffmobilisierung eine gegenseitige Förderung der Pflanzenarten bewirken. Nach einer Meta-Analyse von Weisberger et al. (2019) ist die Unkrautunterdrückung effektiver, wenn durch die Fruchtfolgediversifizierung eine hohe Varianz der Saatzeitpunkte entsteht, statt durch eine hohe Kulturartenanzahl allein. Die Tierhaltung bzw. Biogasanlagen ermöglichen einen effizienten Anbau von Ackerfutter (Jordan, 2022; Musto et al., 2023) und damit die Erweiterung der Fruchtfolge. Daher strebt die regenerative Landwirtschaft auch die Integration von Ackerbau und Tierhaltung an (Khangura et al., 2023). Nach Liu et al. (2023) bzw. Tiemann et al. (2015) können die Erhöhung von Quantität, Qualität und die verschiedenen Reststoff-Zusammensetzungen diversifizierter Fruchtfolgen das Bodenleben unterstützen und dadurch positive Effekte auf die organische Bodensubstanz und die Bodenfruchtbarkeit ausüben. Ebenso können Biodiversität und Wertschöpfung profitieren (Schut et al., 2021; Khangura et al., 2023; Musto et al., 2023). Folgende Zielkonflikte sind u. a. zu beachten:

- Die Erweiterung der Fruchtfolge impliziert häufig den Anbau von Kulturen mit geringerem Deckungsbeitrag.
- Notwendige Anbaupausen zur Verminderung der Krankheitsübertragung sind bei vielfältigen Gemengen schwerer einzuhalten.
- Kosten für Zwischenfruchtsaatgut sowie an diversere Kulturen angepasste Maschinen führen zu ökonomischen Nachteilen (Shah et al., 2021).
- Fehlende Verarbeitungskapazitäten sowie Märkte erschweren den Anbau von Kulturen mit geringer Bedeutung (Shah et al., 2021).
- Feldfutterbau incl. Silomais ist nur in Betrieben möglich, die den Aufwuchs im Stall oder in der Biogasanlage nutzen

können. In reinen Ackerbauregionen ist damit die Anzahl an Kulturen begrenzt.

- Die Einbindung von legumen Zwischenfrüchten in die Fruchtfolgen kann Lachgasemissionen erhöhen (Muhammad et al., 2019), aber den N-Düngebedarf erheblich verringern (Marcillo & Miguez, 2017).

Maßnahmen im Bereich Fruchtfolge

Durch Anbau divers zusammengesetzter, weit gestellter Fruchtfolgen mit Einhaltung von phytosanitär erforderlichen Anbaupausen, Wechsel von Sommerung und Winterung, Wechsel von Halm- und Blattfrüchten kann die Schadenswahrscheinlichkeit von Krankheiten und Schädlingen sowie der Entwicklung einseitiger Unkraut- oder Ungraspopulationen entgegengewirkt werden, wie aus zahlreichen Versuchen und Anbauerfahrung bekannt und in Lehrbüchern und wissenschaftlichen Veröffentlichungen vielfach beschrieben (Könnecke, 1967; Shah et al., 2021). Hierdurch erhöht sich auch die Diversität von mikrobiellen Gemeinschaften im Boden und es verbessern sich Bodenfunktionen, wie von Tiemann et al. (2015) in Fruchtfolgen zwischen einer und fünf Kulturen festgestellt.

Der Anbau von Arten- und Sortenmischungen sowie Deckfruchtbeständen mit Untersaaten oder Begleitpflanzen statt Reinsaaten kann das Anbausystem stabilisieren und den Befall mit Schaderregern verringern (Finckh et al., 2000; Brust et al., 2011; Valkama et al., 2015; Barot et al., 2017). Derartige Systeme sind jedoch mit einem erhöhten Anbaurisiko verbunden und erfordern spezielles Knowhow.

Über- und mehrjährige Kulturen wie Futterleguminosen-Grasgemenge oder Dauerkulturen stabilisieren die Ackerbausysteme, fördern aufgrund von Bodenruhe und intensiver Durchwurzelung die Bodenstruktur sowie das Bodenleben und vermindern die Erosionsgefahr (Asbjørnsen et al., 2014; Schorpp et al., 2016; Häfner et al., 2022; Boetzel et al., 2023). Durch die Integration von Leguminosen als Haupt- und Zwischenfrüchte zur symbiontischen N_2 -Fixierung lässt sich Mineraldünger-N einsparen bzw. die N-Versorgung erhöhen (Unkovich & Pate, 2000; Anglade et al., 2015; Marcillo & Miguez, 2017).

Konsequenter Zwischenfruchtbau trägt zum Boden- und Grundwasserschutz bei (Thorup-Kristensen et al., 2003), erhöht die Infiltrationskapazität des Bodens für Niederschlagswasser (Basche & DeLonge, 2019) und leistet einen Beitrag zum Erhalt und zur Erhöhung der Bodenhumusgehalte (Poelplau & Don, 2015). Dabei ist v.a. eine hohe Biomassebildung bedeutsam. In der Wissenschaft ist umstritten, ob artenreiche Mischungen aufgrund von günstigeren Wirkungen zu bevorzugen sind (Florence & McGuire, 2020; Gentsch et al., 2020; Heuermann et al., 2022). Im Kontext eines Anbausystems mit verringerter N-Versorgung sind legume Zwischenfruchtarten weniger abhängig von der N-Versorgung aus dem Boden (und damit von Rest- $N_{\min}$ -Gehalten nach der Ernte), und können einen erheblichen Beitrag zur N-Versorgung der Nachfrucht leisten (Möller & Reents, 2009; Bedoussac et al., 2015; Marcillo & Miguez, 2017).

Handlungsfeld Düngung und Nutzung von Bodenhilfsstoffen

Ziele und Zielkonflikte

Der Erhalt bzw. die Steigerung der Bodenfruchtbarkeit sind zentrales Ziel der regenerativen Landwirtschaft. Hierzu werden für die jeweiligen örtlichen Standortbedingungen hohe Humusgehalte und ein an die Bodenart und Nutzung angepasster pH-Wert durch regelmäßige Kalkung angestrebt. Die Versorgung mit den Grundnährstoffen Phosphor, Kalium, Magnesium und Schwefel werden an den allgemeingültigen Empfehlungen aus VDLUFA-Standpunkten übernommen. Sie ermöglichen hohe Erträge bei einer möglichst geringen Umweltbelastung. Zudem werden Qualitätsziele wie z. B. die Erzeugung von Backweizen nur dann angestrebt, wenn eine realistische Vermarktungsoption vorliegt. Alternativ wird auf Sorten gesetzt, die züchterisch eine Veranlagung zu höheren Proteingehalten bzw. günstige Backeigenschaften auch bei niedrigen Rohproteingehalten aufweisen. In Einklang mit den Berechnungen von *Agora Agriculture* (2024) wird eine Verminderung der Treibhausgasemissionen in der Bewirtschaftung um 50 % erzielt, dafür wird ein effizienter Einsatz von Wirtschaftsdüngemitteln und von aufbereiteten Recyclingdüngemitteln aus dem Siedlungsbereich als Basis jeden Düngungssystems gewährleistet. Dies sollte mit einer moderaten Verminderung der mineralischen N-Düngung verbunden werden, die dazu dienen soll, entsprechend der Ziele der Ackerbaustrategie bzw. der Farm-to-Fork-Initiative der EU die N-Überschüsse aus der Landwirtschaft zu halbieren und zusammen mit einem konsequenten Zwischenfruchtanbau die Nitratkonzentration im Sickerwasser entsprechend der Grenzwerte der Trinkwasserrichtlinie auf Werte deutlich unter 50 mg je l, am besten auf Werte unter den Richtwerten der Trinkwasser-richtlinie in Höhe von 25 mg je l zu begrenzen bzw. zu reduzieren. Der Wert könnte auch in Abhängigkeit des Tierbesatzes definiert werden. Die Düngewirkung organischer Düngemittel einschließlich Zwischenfrüchte wird realistisch bei der Berechnung der Gesamt-N-Düngung angerechnet. Um das Ertragspotenzial des Standorts in ökonomisch und ökologisch vertretbarer Weise auszuschöpfen, ist die jährliche Berechnung der N-Düngerhöhe auf der Basis langjähriger Durchschnittserträge sowie, wenn möglich, unter Einbindung von flächenscharfen Nmin-Untersuchungen im Frühjahr durchzuführen. Dies bedeutet, dass eine möglichst hohe N-Effizienz bei gleichzeitig geringstmöglichen Verlusten durch Nitratauswaschung und gasförmige Emissionen (Lachgas, Ammoniak) angestrebt werden. Ein angepasstes, moderat reduziertes N-Düngungsniveau vermindert zudem teilweise das Risiko eines Befalls mit Krankheiten oder Schädlingen (Diercks & Heitefuß, 1990; Olesen et al., 2003) sowie die Ausbreitung von Unkräutern (Harbur & Owen, 2004; Sweeney et al., 2008; Little et al., 2021).

Es bestehen Zielkonflikte zwischen einem effizienten Einsatz organischer Düngemittel und den Kosten für eine optimale Lagerung (Lageraum, Emissionsschutz bei der Lagerung) und Ausbringungstechnik. Dies gilt auch zwischen einem angepassten, eher niedrigen N-Düngungsniveau und den vom Markt geforderten Qualitätskriterien (z. B. Rohproteingehalt

bei Backweizen). Eine hohe Backqualität kann zwar durch entsprechende Sortenwahl adressiert werden (z. B. Anbau einer Weizensorte mit höherer Backneigung (z. B. A- oder E-Weizen) anstatt eines B-Weizens, oder von Sorten mit einer hohen Proteineffizienz, d. h. Volumenausbeute bezogen auf den Proteingehalt). Aufgrund der Anforderungen der abnehmenden Hand sind diese Maßnahmen allerdings bisher noch nicht in der Praxis flächendeckend umsetzbar. Ein etwas niedrigeres Düngungsniveau kann zu leichten Ertragsrückgängen führen, die entsprechend den Flächenbedarf für die Lebensmittelerzeugung erhöhen und damit weniger Raum für alternative Nutzungen (Bioenergieproduktion, PV-Anlagen, Biodiversitätsflächen, etc.) lässt. Beim Einsatz von Recyclingdüngemitteln kann es zu einer etwas höheren Belastung der Böden mit Schadstoffen kommen (Weissengruber et al., 2018; Bünemann et al., 2023).

Maßnahmen im Bereich Bodenuntersuchung

Regelmäßige Bodenuntersuchungen auf Hauptnährstoffe sind bei Laboren durchzuführen, deren Analysen und Beratungsempfehlungen auf mit langjährigen Feldversuchen kalibrierten Methoden basieren, z. B. EUF, VDLUFA (Lorenz et al., 2017). Die Eignung von Kationenaustauschmethoden auf Grundlage der Albrecht-Philosophie als Basis für die Düngungsempfehlung ist im Feldversuch nicht belegt. Langjährige Dauerversuche zeugen von deutlich höheren Labor- und Düngemittelkosten bei geringeren oder gleichen Erträgen und einer höheren Schwefelauswaschungsgefahr (Olsen et al., 1982; Möller et al., 2023). Die Grunddüngung (P, K, Mg, Kalk) erfolgt entsprechend der aktuellen VDLUFA-Empfehlungen (Baumgärtel et al., 1999; Kerschberger et al., 2000; Wiesler et al., 2018) bzw. den länderspezifischen Empfehlungen. Diese werden für die verschiedenen Bodenklimaräume regelmäßig anhand der aktuellen Forschung in Feldversuchen überprüft und berücksichtigen nicht nur produktionstechnische Aspekte, sondern auch Umweltbelange. Eine ausgewogene Düngung zum Erhalt der Bodenfruchtbarkeit – je nach angebauten Kulturen und deren spezifischen Anforderungen an die Nährstoffversorgung – zielt auf die Gehaltsklasse C ab bei allen relevanten Parametern.

Wichtig ist, auf eine ausreichende Schwefelversorgung zu achten, insbesondere bei Schwefel-bedürftigen Kulturen (z. B. Raps, Klee gras). Um zu gewährleisten, dass die Versorgung mit Mikronährstoffen in ausreichendem Maße erfolgt, werden regelmäßige, stichprobenartige Untersuchungen von Spurenelementgehalten durchgeführt, insbesondere in Form von Blattanalysen, die in vielen Fällen zielführender sind als Spurennährstoffuntersuchungen anhand von Bodenproben (Breuer et al., 2006).

Maßnahmen im Bereich Düngung

Böden mit günstiger Krümelstruktur werden durch eine hohe Zufuhr an organischer Substanz erreicht und durch eine möglichst ständige Bedeckung des Bodens (u. a. Tisdall & Oades, 1982; Blair et al., 2006; Bodner et al., 2023). Dazu gehört der regelmäßige Anbau von Blattfrüchten und von Zwischenfrüchten (Lal, 2015), eine regelmäßige Strohdüngung (Zimmer et al., 2005; Brock et al., 2016; Ghafoor et al., 2017) oder

die Verwendung von wirtschaftseigenen oder zugekauften organischen Düngemitteln (Körschens et al., 2004). Auch die mineralische N-Düngung fördert indirekt die Bodenumusgehalte (Steigerung der Menge an Ernterückständen und Förderung des Wurzelwachstums), eine moderate Verringerung der N-Düngung wirkt sich allerdings nicht signifikant auf die Humusgehalte im Boden aus (Havlin et al., 1990; Halvorson et al., 2002; Neff et al., 2002; Alvarez, 2005; Ladha et al., 2011; Poulton et al., 2024). Der Anbau von überjährigem oder mehrjährigem Klee gras oder Luzerne stellt eine besonders effiziente Maßnahme zur Erhöhung der Bodenfruchtbarkeit dar (Ball et al., 2007).

Zur Erreichung einer N-Emissionsminderung von 50 % im Wirtschaftsdüngermanagement im Vergleich zur „guten fachlichen Praxis“ werden soweit wie möglich Klimagas- und Stickstoffemissionen vermieden, z. B. durch eine N-reduzierte Fütterung (Epper et al., 2025), durch Abdeckung der Wirtschaftsdüngerlagerstätten (ggf. Implementierung von Biogasanlagen), Zugabe von Nitrifikationshemmstoffen zu Flüssigmisten (Federolf et al., 2016), durch unmittelbare Einarbeitung der Wirtschaftsdünger nach Ausbringung oder durch Verwendung emissionsmindernder Ausbringungstechnik wie Gülle-Schleppschuh- oder Gülleinjektionsverfahren (Pahl et al., 2001; Schoenau & Davies, 2006; Schröder et al., 2007; Epper et al., 2025).

Der Zukauf externer Betriebsmittel wie z. B. Düngemittel wird auf ein notwendiges Minimum reduziert und angepasst an das realistisch zu erwartende Ertragsniveau, an die Nährstoffgehalte im Boden, sowie die Standortverhältnisse und an die verfügbare Wassermenge (Sadras & Rodriguez, 2010; Gonzalez-Dugo et al., 2011; Sadras et al., 2016). Falls möglich, wird mineralischer N-Dünger verwendet, der unter Einsatz von grünem Wasserstoff bzw. erneuerbaren Energien erzeugt wurde. Bei der Bemessung der N-Düngergaben werden die Ergebnisse aus der Auswertung von Produktionsfunktionen aus zahlreichen langjährigen, ortsfesten N-Steigerungsversuchen berücksichtigt, wonach die Erträge bei einer Reduzierung des N-Düngungsniveaus um ca. 20 % gegenüber dem Standortoptimum das Ertragsniveau langfristig im Durchschnitt um etwa 3–5 % niedriger ist, bei stark verringerten Nährstoffsalden (Heyn & Olf, 2018). Das Standortoptimum entspricht dabei etwa den Landesempfehlungen für die N-Düngung der Bundesländer. In der Regel reagieren anspruchsvolle Kulturen mit einer frühen Ernte (z. B. Winterweizen, Raps) stärker auf eine reduzierte N-Düngung als z. B. spät geerntete Kulturen wie Zuckerrüben, Mais oder Kartoffeln (Heyn & Olf, 2018). Evtl. nachteilige Wirkungen eines reduzierten Einsatzes von Düngemitteln sollen durch Anwendung von Methoden kompensiert werden, die eine höhere Düngewirkung ermöglichen. Dazu gehören insbesondere:

- Platzierte Ablage von organischen und mineralischen Stickstoff- und Phosphatdüngemitteln als Depot im Boden. Dies erhöht die N- und P-Düngewirkung im Boden und steigert die Düngeneffizienz sowie die Trockenheitsresilienz im Klimawandel (Schröder et al., 2015; Mehdi et al., 2016; Nkebiwe et al., 2016; Federolf et al., 2017; Westerschulte et al., 2017).

- Verwendung von stabilisierten N-Düngemitteln, z. B. Ammoniumdünger mit Nitrifikationshemmern oder Harnstoff mit Ureasehemmern zur Erhöhung der N-Effizienz und Verringerung der Ammoniak- und Klimagasemissionen (Hu et al., 2014; Rose et al., 2018; Chen et al., 2023). Dies ermöglicht eine leichte Reduzierung der Verwendung von N-Düngemitteln bzw. ermöglicht es, mehrere Düngegaben in eine zusammenzufassen (Hu et al., 2014; Rose et al., 2018).
- Sofortige Einarbeitung von organischen N-Düngemitteln (siehe oben).

Um die Nährstoffnachlieferung aus dem Boden nachverfolgen zu können, werden Düngefenster, nicht nur für Stickstoff, sondern auch für Schwefel angelegt, im Idealfall kombiniert mit einer einfachen Ertragserhebung zur Ernte (Schmidhalter, 2016).

Die Düngung wird so ausgerichtet, dass bei einer Hoftorbilanzierung bzw. bei der Berechnung der Stoffstrombilanzen die Nährstoffbilanzen deutlich unterhalb der rechtlichen Vorgaben liegen. Taube et al. (2020) schlagen vor, dass Betriebe in Abhängigkeit von der Höhe ihres Wirtschaftsdüngereinsatzes bei der N-Bilanz Werte von 35 bis 90 kg N ha⁻¹ nicht übersteigen.

Maßnahmen im Bereich Bodenhilfsstoffe

Die Applikation von bestimmten mafischen und ultramafischen Gesteinsmehlen mit hohen Ca- und Mg-Gehalten und vergleichsweise niedrigen Silizium-Gehalten (z. B. Diabas, Basalt, Olivin, Pyroxen, Peridotit, Gabbro, Wollastonit) dienen der Kalkung und binden bei ihrer Verwitterung dauerhaft CO₂ aus der Atmosphäre (Swoboda et al., 2022).

Biostimulanzien und andere Hilfsstoffe werden eingesetzt, sofern die Wirksamkeit und mögliche Wechselwirkungen mit anderen Produktionsfaktoren (z. B. Pflanzengesundheit) unter Freilandbedingungen im jeweiligen Klimagebiet wissenschaftlich nachgewiesen wurden und der Mehrwert im Verhältnis zu den Aufwendungen steht. Bisher liegen in vielen Fällen keine Ergebnisse vor, die eine Wirksamkeit unter Feldbedingungen experimentell nachweisen konnten (Mayer et al., 2010; Hu & Qi, 2013; Möller et al., 2023). In wissenschaftlichen Arbeiten berichtete Ertragssteigerungen sind zumeist unter Bodenbedingungen erzielt worden, die auf mitteleuropäischen Produktionsbedingungen kaum zutreffen, wie z. B. sehr niedrigen P- und C_{org}-Gehalten (z. B. Schütz et al., 2018).

Die Ausbringung von Pflanzenkohle als ein Mittel zur Anhebung der Gehalte an organischem Kohlenstoff über das bewirtschaftungs- und standortabhängige Niveau hinaus wird in Betracht gezogen (Wiesler et al., 2024). Gleichzeitig werden hierbei pflanzenbauliche Forschungsergebnisse beachtet. Metastudien zeigen bisher für kühl-gemäßigte Regionen wie in Mitteleuropa keine pflanzenbaulichen Vorteile wie z. B. Ertragssteigerungen (Haider et al., 2017; Jeffery et al., 2017; Wiesler et al., 2024). Die sachgerechte Verwendung setzt voraus, dass sie unter rechtlichen Erwägungen zulässig ist und der Mehrwert in einem sinnvollen Verhältnis zu den Kosten steht.

Handlungsfeld Pflanzenschutz

Ziele und Zielkonflikte

Wesentliches Ziel der regenerativen Landwirtschaft ist es, Pflanzenschutz so zu betreiben, dass die Kulturpflanzenbestände geschützt werden und negative Wirkungen auf die Biodiversität minimiert werden (FOLU, 2019; Kurth et al., 2023). Der Pflanzenschutz wird in einem noch viel stärkeren Maße als in der integrierten Pflanzenproduktion als integraler Bestandteil eines ackerbaulichen Bodennutzungssystems aus dem Zusammenspiel von Pflanzenbau (z. B. Bodenbearbeitung, Fruchtfolge, Sortenwahl, Aussaattermin) und Pflanzenernährung (N-Düngungsniveau, platzierte Ausbringung von Düngemitteln) verstanden. Der Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln wird nicht zur Gewinnmaximierung, sondern zur sog. Grundabsicherung der Erträge eingesetzt. Dies dient dazu, beeinträchtigende Auswirkungen der Landnutzung auf die Biodiversität zu verringern, der Resistenzproblematik durch eine Diversifizierung der Gegenmaßnahmen entgegenzuwirken und gleichzeitig ein adäquates Ertragsniveau von mindestens 90 – 95 % des nach üblicher „guter fachlicher Praxis“ erzielbaren Ertragsniveaus abzusichern. Und es bedeutet, dass die Betriebe in einem sehr viel stärkeren Maße als bisher eine Kombination von zahlreichen vorbeugenden und direkten Maßnahmen einsetzen. Dabei sind zahlreiche Zielkonflikte zu benennen:

- Ein niedrigeres Pflanzenschutzniveau geht mit einem höheren Ertragsrisiko einher, v. a. in Jahren mit hohem Infektionsdruck, oder beim Anbau krankheitsanfälliger Sorten.
- Nicht-chemische Maßnahmen der Unkraut- und Schädlingsregulierung sind häufig mit einem höheren Aufwand im Hinblick auf Investitionen für Technik und Arbeitszeit verbunden (Fishkis et al., 2023), und führen ggf. zu erhöhtem Kraftstoffverbrauch.
- Die Wirkung der mechanischen Unkrautregulierung auf das Erosionsrisiko ist umstritten, auf verkrusteten Böden kann eine mechanische Unkrautregulierung das Erosionsrisiko erheblich verringern (Mannering et al., 1966; Van der Werf et al., 1991; Fishkis & Koch, 2023; Beiküfner et al., 2024) und die Infiltrabilität des Bodens erhöhen (Mannering et al., 1966).
- Je stärker ein Betrieb die Bodenbearbeitung einschränkt, desto stärker ist dieser von Herbiziden abhängig, ggf. auch von nicht selektiven Herbiziden (Gruber et al., 2012; Nichols et al., 2015).

Maßnahmen im Bereich Pflanzenschutz

Als Orientierung zum anzustrebenden Pflanzenschutzniveau kann die Farm-to-Fork-Initiative der EU-Kommission herangezogen werden. Sie zeigt einen gangbaren Weg auf, wonach der Einsatz von chemisch-synthetischen Pflanzenschutzmitteln in der Menge und vom Risiko gegenüber dem derzeitigen Stand halbiert werden soll (Beckman et al., 2022; EASAC, 2022; Manshanden et al., 2023). Dies erfordert eine strategische Herangehensweise und eine kulturartenabhängige, nach Wirkungsbereichen (z. B. Herbizide, Insektizide) aufgeteilte Risikobewertung des reduzierten Pflanzenschutzmittelein-

satzes. Zum Beispiel zeigen für Winterweizen und Wintergerste vierjährige Erhebungen von Holst (2023) auf mehreren Standorten, dass sich der generelle Verzicht auf Wachstumsregler und auf Insektizide kaum auf den Ertrag auswirkt. Die höchsten Einbußen resultieren bei einem generellen Verzicht auf Herbizide und Fungizide.

In der regenerativen Landwirtschaft haben mechanische und biologische Pflanzenschutzmaßnahmen (z. B. Hacke, Striegel, biologische Schädlingsbekämpfung) Vorrang vor Maßnahmen, die den Einsatz chemisch-synthetischer Pflanzenschutzmittel erfordern. Dort, wo zu letzteren keine Alternativen bestehen, wird deren Einsatzmenge wo immer möglich bzw. vertretbar durch Maßnahmen wie Bandspritzung, Teilflächenbehandlungen oder/und Spot-Spraying verringert. Beispielhaft gilt:

Regenerative Landwirtschaft verzichtet weitgehend auf chemisch-synthetische Insektizide, da diese besonders negativ auf das Ökosystem einwirken. Schädlinge werden bevorzugt durch vorbeugende pflanzenbauliche Maßnahmen (z. B. weite Fruchtfolgen) oder biologische Gegenmaßnahmen (z. B. beim Maiszünsler, Kartoffelkäfer, Wickler) reguliert (Mason, 2021). Stehen keine Alternativen für eine biologische Schädlingsbekämpfung zur Verfügung (z. B. beim Anbau von Raps), könnte eine betriebsübergreifende Koordination des Einsatzes von Insektiziden in einer Gemarkung ergriffen werden, um nach einer Behandlung die Neueinwanderung von Schädlingen aus noch nicht behandelten Feldern zu vermeiden.

Grundlage der Unkrautregulierung ist neben einem konsequenten Fruchtwechsel mit Sommerungen und Winterungen und dem Anbau von Zwischenfrüchten die Anpassung der Saatzeiten (z. B. keine Fröhsaaten von Winterungen), kombiniert mit einer moderaten Verringerung der N-Düngung (Sweeney et al., 2008; Little et al., 2021). Ferner kann eine Bandapplikation von Düngemitteln eine gezieltere Düngung der Kulturpflanze zu Lasten der Unkräuter bewirken (Rasmussen, 2002; Melander et al., 2005; Petersen, 2005). Sie wird durch einfach zu implementierende Maßnahmen wie eine günstige Standraumverteilung, Auswahl von Sorten mit hohem Unkrautunterdrückungsvermögen oder ein falsches Saatbett (Melander et al., 2005; 2017; Nichols et al., 2015) ergänzt. Durch den Einsatz von Striegeln und anderen mechanischen Verfahren kann der Einsatz von Herbiziden weiter reduziert werden. Zugleich setzen regenerativ wirtschaftende Betriebe auf den technischen Fortschritt im Bereich der Robotik und Digitalisierung. Die Verwendung von Herbiziden wird möglichst auf eine Behandlung mit eher selektiven Mitteln bzw. Wirkstoffen beschränkt, und dabei werden Arten mit geringem Schadpotenzial (z. B. im Getreidebau Taubnessel, Veilchen, Ehrenpreis) verschont.

Regenerativ geführte Getreidebestände werden durch Sortenwahl, Terminierung des Aussaatzeitpunktes, Düngung und ggf. dem Einsatz von Striegel und falschem Saatbett so geführt, dass maximal nur eine Herbizidmaßnahme und eine späte Fungizidmaßnahme (BBCH 39 bis 59) zum Schutz des Fahnenblattes und der Ähre angewendet werden, sodass der Behandlungsindex bei Getreide bei etwa 2 liegt. Zahlreiche Feldversuche zeigen, dass eine einmalige Fungizidapplikation i.d.R. eine sehr hohe Wirksamkeit aufweist, die Verluste auf

kleiner 2–5 % des Ertragspotenzials begrenzen kann, und i. d. R. am wirtschaftlichsten ist (Hedke & Verreest, 1999; EL Jarroudi et al., 2015). Der Mehrwert einer zweiten Fungizidbehandlung liegt bei allenfalls 20 % der Wirkung der ersten Behandlung (Wiik, 2009).

Auf einen Einsatz von Insektiziden und Wachstumsreglern wird im Getreidebau aufgrund des geringen Ertragsrisikos bei konsequenter Anwendung von Vorsorgemaßnahmen (siehe oben) und der moderaten Verringerung mineralischer N-Düngemittel weitestgehend verzichtet.

Handlungsfeld Erhalt und Förderung der Biodiversität

Ziele und Zielkonflikte

Viele Maßnahmen der regenerativen Landwirtschaft sollen Bodengesundheit und Biodiversität zugleich fördern (Giller et al., 2021; Wilson et al., 2022). Die Maßnahmen im Bereich Biodiversität sollen Habitate für die in der jeweiligen Agrarlandschaft ansässigen Pflanzen- und Tierarten bieten, so dass geeignete Biodiversitätsindices (z. B. Simpson Diversity-Index oder der Shannon-Wiener-Index) mittelfristig eine Erhöhung der Biodiversität um z. B. 50 % gegenüber dem Status quo erwarten lassen. Zugleich sollen sie der Resilienz des Produktionssystems dienen, damit stabile Erträge erzielt werden (Isbell et al., 2015; Sirami et al., 2019; Li et al., 2020; Sanchez et al., 2022; Rasmussen et al., 2024). Die Kulturartenvielfalt innerhalb des Anbausystems (weite Fruchtfolgen, Gemengeanbau, Untersaaten oder Zwischenfrüchte) soll einen Beitrag zur Habitat-Diversifizierung und somit zur oberirdischen Artenvielfalt leisten, z. B. in Bezug auf Insekten (Hüber et al., 2022). Die Kulturartenvielfalt soll gleichzeitig einen Beitrag zur Diversität und Stabilität des Bodenmikrobioms leisten, und damit dem gesamten funktionellen Bodennahrungsnetz dienen (Wagg et al., 2016). Dabei ist das Prinzip der ganzjährigen Bodenbedeckung durch die Belassung von Ernteresten auf dem Feld sowie den Anbau von Zwischenfrüchten von zentraler Bedeutung und für die ober- und unterirdische Biodiversität innerhalb der Ackerflächen sogar noch wichtiger als die Diversität der Fruchtfolge (Garland et al., 2021). Zugleich soll sie den Bedarf an externen Betriebsmitteln reduzieren (Isbell et al., 2015).

Zielkonflikte bestehen insbesondere dadurch, dass Biodiversitätsmaßnahmen häufig zu einer Verminderung der Produktivität aufgrund von Flächenverbrauch für die jeweiligen Biodiversitätsmaßnahmen sowie aufgrund von Ressourcenkonkurrenz, vor allem um Licht und Wasser führen (Pardon et al., 2018). Strukturelemente und natürliche Habitate können nicht nur ein Lebensraum für Nützlinge, sondern auch ein Reservoir bzw. Rückzugs- oder Überwinterungsraum für Schädlinge (Blattläuse, Fliegen, Nagetiere, etc.) sein (Marshall & Moonen, 2002; Tscharncke et al., 2016). Sie erfordern eine gezielte und geeignete Anlage bzw. Pflege und sind damit mit zusätzlichen Aufwendungen verbunden. Aus Habitatstrukturen können zudem Pflanzen ins Feld einwandern und dort als Unkräuter wirken (Marshall & Moonen, 2002).

Maßnahmen im Bereich Biodiversität

Auf Landschaftsebene sollten regenerativ wirtschaftende Betriebe jeweils im Kontext der bestehenden Landschaft multifunktionale Landschaftsstrukturelemente erhalten oder neu einrichten. Diese können ausgleichend auf Temperatur, Wind und Luftfeuchtigkeit wirken, den Landschaftswasserhaushalt durch Verlangsamung von Abflüssen und höhere Wasserretention positiv beeinflussen, dem Erosionsschutz dienen und Habitate für Selbstregulation bieten (Levin, 2022). Eine solche Landschaft entsteht durch Mischkulturen, winterharte Zwischenfrüchte, mehrjährige Blühflächen oder -randstreifen oder auch Gehölzstrukturen einschließlich Agroforstelementen, die ein Mosaik unterschiedlicher Nutzungsarten und -intensitäten bilden, was die ganzjährige Verfügbarkeit vielfältiger, störungsarmer Lebensräume erhöht und somit auch die Diversität und Abundanz funktioneller Agrobiodiversität fördert (Bengtsson et al., 2005; De Souza et al., 2015; Sirami et al., 2019).

Als produktionsintegrierte Maßnahme kann die räumliche (Mischanbau und Untersaaten) und zeitliche Diversifizierung (Fruchtfolgen) betrachtet werden, welche die Biodiversität auf Acker- und Landschaftsebene fördert (Gordon et al., 2022). Je mehr kleinräumige Wechsel von Kulturen in einer Landschaft vorhanden sind und damit je kleinstrukturierter das Nutzungsmuster einer Landschaft ist, desto höher ist der Beitrag zur Biodiversität (Fahrig et al., 2011; Hass et al., 2018; Clough et al., 2020; Sanchez et al., 2022; Priyadarshana et al., 2024). Hierbei ist nicht nur die Artenvielfalt, sondern insbesondere eine hohe funktionelle Vielfalt bei der Fruchtfolge-diversifizierung von Bedeutung (Smith et al., 2023).

Überjährig stehender Bewuchs mit lebenden Pflanzen bietet Nahrungs-, Rückzugs- und Propagationshabitate für potenzielle natürliche Antagonisten, aber auch Schädlinge (Holland et al., 2016). Eine Erhöhung der Menge, Vielfalt und Verfügbarkeit des Pollenangebots und der diversen Bestäuberarten steigern die Ertragsfähigkeit und Qualität des Ernteguts bestäuberabhängiger Kulturpflanzen wie Raps und Obst (Garibaldi et al., 2013; Klatt et al., 2014). Mischkulturanbau (z. B. Hafer-Ackerbohne oder Mais-Stangenbohne) sowie der Anbau mit blühenden Untersaaten (Boetzel et al., 2023) und Dauerkulturen wie Durchwachsene Silphie (Schorpp et al., 2016) schaffen auf Ackerebene Strukturvielfalt (Etagen, Blattstellungen und -formen). Auch erhöhen sie durch Diversifizierung von Wurzelsystemen und deren Exsudaten sowie die Vergrößerung des durchwurzelter Bodenraumes die Habitatvielfalt und symbiontische Beziehungen im Boden (Steinauer et al., 2016; Eisenhauer et al., 2017; Guzman et al., 2021). Pflanzenbaulich relevant sind mitunter Zersetzergemeinschaften oder Symbiose-Partner (Gentsch et al., 2020; Wagg et al., 2014). Als Nahrungsquelle und Habitat über Winter sollten insbesondere winterharte Zwischenfruchtmischungen bzw. überjährige Blühmischungen mit einem hohen, ausgedehnten Blühaspekt gewählt werden, die über Winter durch die Bildung von Samen ein Nahrungsangebot bzw. Stängel als Überwinterungsplatz bereitstellen, um die positiven Effekte auf die Biodiversität zu maximieren sowie Dauerkulturen, die über Winter die Fläche im Stand oder mit Stoppeln bedecken wie beispielsweise Miscanthus, Durchwachsene Silphie

oder Riesenweizengras (Burmeister et al., 2023; Häfner et al., 2022).

Die Förderung von Gegenspielern der Schadorganismen in Agrarökosystemen stärkt Selbstregulation, erhöht Ertragssicherheit und spart Aufwand für aktiven Pflanzenschutz (Lan-dis et al., 2000; Redlich et al., 2020). Voraussetzung ist ein gezieltes Habitat-Management. Die Nützlinge benötigen Ressourcen wie Zwischenwirte oder -beute, Nahrung für adulte Nützlinge, Rückzugsräume für Eiablage und Überwinterung sowie Vermeidung von Schädigungen durch Pflanzenschutzmittel. Beispiele sind die Förderung von aphidophagen Syrphiden (Schwebfliegen) durch Blühstreifen (Haenke et al., 2009) oder die verbesserte Überwinterung räuberischer Käfer durch Hecken (Pywell et al., 2005).

Die Integration von Dauerkulturen (z. B. Durchwachsene Silphie, mehrjährige Blüh-brachen und Blühstreifen, Hecken, Agroforstsysteme) als langfristig biodiversitätsförderndes Element kann maßgeblich zum Habitat-Management beitragen, da Dauerkulturen wichtige, überwiegend störungsfreie Lebensräume für viele Arten darstellen (Asbjørnsen et al., 2014; Häfner et al., 2022). Positive Zusatzeffekte umfassen Wind- und Verdunstungsschutz, Verlangsamung von Wasserflüssen, erhöhte Infiltrationskapazität, Erschließung tieferer Wurzelräume oder Beitrag zur C-Anreicherung (Cardinael et al., 2017). Allerdings ist der Anbau in der Regel nur dann vertretbar, wenn eine direkte oder indirekte Vermarktungsoption für den Biomasseaufwuchs besteht.

Zur Habitatvernetzung können auch Grünlandflächen beitragen (Korányi et al., 2023), die mobilen Organismen die Wanderung zwischen überjährigen Habitaten und artenreichen, extensiv bewirtschafteten Kulturen ermöglichen und so ihre Funktionen aufrechterhalten, wie Bestäubung, die Bereitstellung natürlicher Antagonismen oder von Zersetzergemeinschaften. Auch können diese als Nahrungsquelle für stark vom Rückgang betroffene Arten dienen, z. B. Vogelarten der Offenlandschaft (Kerneck et al., 2022; Liccari et al., 2022).

Die Ausdehnung des Anbaus von lignozellulosehaltigen Pflanzen (Agroforst, Kurzumtriebsplantagen, Miscanthus) auf landwirtschaftlichen Flächen auch als Rohstoff für die Industrie wird als ein Klimaschutzbeitrag der Landwirtschaft gesehen (Agora Agriculture, 2024). Denn hierüber ist eine weitere Möglichkeit zur C-Sequestrierung in Wurzeln und Aufwuchs gegeben (Mayer et al., 2022). Auch wirken sich Agroforstsysteme positiv auf das Mikroklima und die Biodiversität aus (Torrealba et al., 2016; Nair et al., 2021). Durch Wasserretention (Basche & DeLonge, 2019) und Hanglängen-verkürzung können sie auch einen Beitrag zum Erosionsschutz leisten. Die Wirkungen von Agroforstanlagen auf die landwirtschaftlichen Anbausysteme wie auch auf die Umwelt wurden in zahlreichen übergreifenden Studien beschrieben und zusammengefasst (z. B. Torrealba et al., 2016; Kay et al., 2019; Ivezić et al., 2021). Die praktische Umsetzbarkeit und die ökonomischen Auswirkungen müssen allerdings vor Einsatz im landwirtschaftlichen Betrieb geprüft werden.

Handlungsfeld Klimaschutz und weitere Handlungsfelder jenseits des Ackerbaus

Insgesamt streben regenerativ wirtschaftende Betriebe eine Verringerung ihres produktbezogenen CO₂-Fußabdrucks um mindestens 50 % an (Agora Agriculture, 2024) durch Maßnahmen zur Emissionsminderung (Lachgas, Ammoniak und Methan) im Ackerbau und in der Tierhaltung, durch Verwendung von mineralischen N-Düngemitteln aus grünem Wasserstoff, durch Verwendung von erneuerbaren Antrieben und/oder durch Gutschriften durch die Erzeugung erneuerbarer Energien (z. B. Agri-PV, Biogasanlage, Holzbiomasse aus Hecken/Kurzumtriebsplantagen) und durch Emissionsvermeidung in der Wirtschaftsdünger-kette an.

Hier sind jedoch zahlreiche Zielkonflikte auch wirtschaftlicher Natur zu berücksichtigen. So ist die Ergreifung von wirksamen Maßnahmen zur Emissionsminderung im Bereich Lachgas und ggf. Ammoniak in der Regel teurer als die Alternative, diese N-Verluste durch Zukauf von N-Mineraldüngemitteln zu kompensieren. Die Verfügbarkeit und Preise für N-Düngemittel aus grünem Wasserstoff werden sich erst in den kommenden Jahren herausstellen, könnten aber auch zu einer wirtschaftlichen Belastung der Betriebe führen. Die Erzeugung von Energie auf Ackerflächen kann zu Konkurrenzen mit der Lebensmittelproduktion führen.

Regenerativ bewirtschaftete Betriebe streben eine Integration von Ackerbau und einer artgerechten Viehhaltung an, dies ermöglicht eine Diversifizierung der Fruchtfolgen. Die Einbindung der Tierhaltung ist in Ackerbaubetrieben vielfach unter den gegebenen Rahmenbedingungen und ökonomischen Erwägungen nicht möglich oder nur schwer umsetzbar. Alternativ kann der Betrieb einer Biogasanlage einen ähnlichen Beitrag zur Fruchtartendiversifizierung leisten. Aber auch hier sind Zielkonflikte zu beachten, insbesondere wenn die ökonomischen Rahmenbedingungen den Weiterbetrieb von Biogasanlagen erschweren.

Diskussion und Schlussfolgerungen

Der Begriff regenerative Landwirtschaft als potenziell alternatives Anbausystem zum konventionellen Landbau nach „guter fachlicher Praxis“ wird häufig als Möglichkeit gesehen, die Ackerbaustrategie der Bundesregierung bzw. die Farm-to-Fork-Strategie der EU in die Praxis umzusetzen. In der Praxis wird der Begriff entlang von Maßnahmen definiert, häufig auch solchen Maßnahmen, die in Feldversuchen keine relevante Wirkung auf mögliche Ziele wie Ertrag, Humusbildung oder Emissionen zeigen. Dabei stellt sich die grundlegende Frage, ob ein Anbausystem „regenerative Landwirtschaft“ entlang von konkreten Maßnahmen definiert werden sollte, oder vielmehr mit Zielen unterlegt werden sollte. Dabei ist zu beachten, dass in bestimmten Handlungsfeldern wie z. B. Düngung und Pflanzenschutz eine detailliertere Aufzählung von Maßnahmen eher möglich erscheint, weil sich dort Maßnahmen teilweise verallgemeinern lassen. In anderen Bereichen, wie z. B. bei der Bodenbearbeitung bzw. dem Bodenschutz oder dem Biodiversitätsschutz, besteht dagegen bei der Implementierung von Maßnahmen ein großer Standort- bzw. Landschaftsbezug, eine Verallgemeinerung konkreter

Tab. 1: Gegenüberstellung von möglichen Kriterien zur Unterscheidung der Anbausysteme konventionell nach guter fachlicher Praxis und regenerativ.

	Konventionell nach guter fachlicher Praxis	regenerativ
Ertragsniveau	100 % innerhalb des Rahmens der „guten fachlichen Praxis“	90–95 % dessen, was konventionell erreichbar ist
Bodenbearbeitung	keine Vorgaben	insgesamt reduzierte Intensität, aber standort- und situationsbezogen flexibel, sodass das Erosionsrisiko um mind. 50 % sinkt.
Fruchtfolge	keine Vorgaben, bzw. gesetzliche Vorgaben	Erweiterung der Fruchtfolgen um 1–2 Kulturarten, max. 25 %-Anteil einer Kulturart in der Fruchtfolge konsequente Begrünung aller brachliegenden Flächen
Düngung	nach gesetzlichen Vorgaben	Verringerung des N-Düngungsniveaus um 10–20 % gegenüber konventionell, sodass die N-Überschüsse halbiert werden
Pflanzenschutz	nach den gesetzlichen Vorgaben bzw. nach „guter fachlicher Praxis“	Reduzierung um mind. 50 % dessen, was nach „guter fachlicher Praxis“ erlaubt ist. Übernahme des technischen Fortschritts zur Verringerung des Pflanzenschutzmitteleinsatzes (Robotik, Spot spraying, Bandapplikation, Applikationskarten zur Teilflächenbehandlung).
Biodiversität	Keine Vorgaben	standort- und landschaftsangepasste Maßnahmen zur Erhöhung der Biodiversität von Pflanzen und Tieren, sodass geeignete Indices eine Erhöhung um z. B. 50 % erwarten lassen
Emissionen bzw. CO ₂ -Fußabdruck	gesetzliche Vorgaben	Halbierung der produktbezogenen Emissionen im Vergleich zu den gesetzlichen Vorgaben in den Bereichen Klimagase und Stickstoff (Ammoniak-, Lachgas- und Nitratemissionen)

Maßnahmen ist schwierig, so dass nur grobe Handlungsziele genannt werden können, die als Anleitung für eine Verbesserung der Situation verwendet werden können.

Entlang von Kriterien zur Charakterisierung von landwirtschaftlichen Anbausystemen wird in der vorliegenden Publikation der Versuch unternommen, ein „Anbausystem regenerative Landwirtschaft“ zu definieren auf Basis von Zielen, die im Einklang mit gesellschaftlichen Zielen stehen (z. B. Farm to Fork-Strategie der EU, oder der Ackerbaustrategie des Bundes oder zahlreicher Initiativen der Bundesländer) und zugleich von Maßnahmen, die der Zielerreichung dienen und einer wissenschaftlichen Überprüfung standhalten. Dabei soll ein dauerhaft hohes Ertragsniveau (> 90–95 % des standorttypischen bei guter fachlicher Praxis) ermöglicht werden, und zugleich hohe Standards bei den übrigen Kriterien bzw. Handlungsfeldern verfolgt bzw. gesetzt werden, um positive Umwelteffekte, insbesondere Boden- und Umweltschutz, weit über den Standards der guten fachlichen Praxis zu gewährleisten (Tabelle 1).

Die Maßnahmen, die in den Handlungsfeldern genannt wurden, können in der Praxis nur eingesetzt werden, wenn die Betriebe damit ökonomisch nachhaltig wirtschaften können. In dem Kontext wird ein hohes Ertragsniveau für wichtig gehalten, um die wirtschaftliche Überlebensfähigkeit der Betriebe zu erhalten. Einbußen durch ein etwas niedrigeres Ertragsniveau werden idealerweise durch Einsparungen beim Betriebsmitteleinsatz (z. B. Düngung, Pflanzenschutz) ausgeglichen. Ein Beispiel hierfür sind z. B. konservierende Ackerbausysteme bzw. Direktsaatsysteme die sich trotz etwas geringerer Erträge kaum in der Wirtschaftlichkeit von wendenden Bodenbearbeitungsverfahren unterscheiden (Pearsons et al., 2023). Dies dürfte in ähnlicher Weise auch

für die aufeinander abgestimmte Verringerung der Höhe des Einsatzes von N-Düngemitteln und von Pflanzenschutzmitteln gelten. Erste Ergebnisse deuten darauf hin, dass eine Befolgung der Vorgaben der Ackerbaustrategie des Bundes durch eine Kombination aus einer Düngung nach Landesempfehlung (etwa 20 % reduzierte N-Düngung im Vergleich zu den Vorgaben der Düngeverordnung) und einer Halbierung des Behandlungsindex im Pflanzenschutz die Erträge um etwa 4–5 % verringert im Vergleich zu einem intensiven Anbau mit voller N-Düngung und dem in Deutschland durchschnittlichen Behandlungsindex, wobei gleichzeitig die Kosten für die eingesparten Betriebsmittel etwa den geringeren Erlösen aufgrund der niedrigeren Erträge entsprechen (Möller, unveröffentlichte Ergebnisse von Dauerversuchen auf fünf Standorten in Baden-Württemberg).

Schwieriger dürfte eine innerbetriebliche Kompensation für Aufwände im Bereich Biodiversität sein, das wird am ehesten über Förderung (durch Kompensationszahlungen für Agrarumweltmaßnahmen wie Agroforst-Flächen, Blühflächen, blühende Untersaaten) oder einer Koppelnutzung möglich sein, z. B. durch Kombination mit PV-Anlagen in Blühflächen. Der indirekte Effekt einer Fruchtartendiversifizierung auf die Biodiversität könnte über die Implementierung von Biogasanlagen in vieharmen Gebieten erreicht werden oder ebenfalls durch eine entsprechende Agrarförderung.

Aus wirtschaftlicher Sicht könnte rein theoretisch eine Kennzeichnung der Produktion mit einem eigenen Label „aus regenerativer Landwirtschaft“ einen Beitrag zur Erzielung höherer Marktpreise sein, um auf diese Weise eine höhere Wirtschaftlichkeit zu ermöglichen, so ähnlich wie bei der ökologischen Landwirtschaft. Dies würde Regeln erfordern, die für eine Zertifizierung geeignet sind und eine eindeutige Abgrenzung zur

konventionellen Landwirtschaft ermöglichen. Dabei ist zu beachten, dass eine Abgrenzung zwischen der konventionellen Landwirtschaft und einer regenerativen Landwirtschaft mit einem reduzierten Einsatz chemisch-synthetischer Betriebsmittel schwieriger darzustellen ist, als z. B. die Abgrenzung zwischen konventioneller und ökologischer Landwirtschaft. Denn ein kompletter Verzicht auf den Einsatz von chemisch-synthetischen Dünge- und Pflanzenschutzmitteln, wie es der ökologische Landbau betreibt, ist leichter öffentlich an die Marktteilnehmer zu kommunizieren, als nur eine partielle Reduzierung ihrer Einsatzmengen und -häufigkeiten. Ansätze zur Abgrenzung einer regenerativen Landwirtschaft zum konventionellen Landbau nach „guter fachlicher Praxis“ könnte entlang von Kennzeichen bzw. Zielen möglich sein wie:

- Verringerung der Erosionsgefahr um 50 % durch Vorgaben zur Mindestbodenbedeckung über Winter und zu Vegetationsbeginn
- Ein Mindestanteil an Leguminosen in der Fruchtfolge (z. B. 15 %) kombiniert mit max. Anteilen einer bestimmten Fruchtart (z. B. max. 25 %)
- ein niedrigerer Behandlungsindex (oder einem anderen Kennfaktor für den Pflanzenschutzmitteleinsatz) im Pflanzenschutz, z. B. max. 50 % des nach „guter fachlicher Praxis“ erlaubten Pflanzenschutzmitteleinsatzes, bei vollständigem Verzicht auf den Einsatz von Wachstumsreglern
- strenge Vorgaben für die zulässigen Bilanzüberschüsse für die Nährstoffe Stickstoff und Phosphor
- die ausschließliche Verwendung von mineralischen N-Düngemitteln auf Basis von grünem Wasserstoff
- vollständiger Verzicht des Einsatzes von chemisch-synthetischen Insektiziden, wo effektive Möglichkeiten einer biologischen Bekämpfung bestehen (Kartoffelkäfer, Maiszünsler, Wicklerarten).
- Verringerung des produktbezogenen CO₂-Fußabdrucks der pflanzlichen und tierischen Produktion in Anlehnung an *Agora Agriculture* (2024) um mindestens 50 % gegenüber dem landwirtschaftlichen Durchschnitt bzw. im Vergleich zu den gesetzlichen Vorgaben.
- Verringerung der Ammoniakemissionen um mindestens 50 % aus dem Wirtschaftsdüngermanagement.
- Senkung der Nitratkonzentration im Sickerwasser entsprechend der Grenzwerte der Trinkwasserrichtlinie auf Werte unter 50 mg je l, am besten auf Werte unter den Richtwerten der Trinkwasserrichtlinie in Höhe von 25 ml je l.

Solche Ziele könnten ggf. über geeignete Modellberechnungen und die automatisierte Erfassung von Maßnahmen über Digitalisierung (digitale Schlagkarteien, Sensoren, etc.) nachgewiesen werden. Entscheidend für die Erreichung des Zieles einer hohen Wirtschaftlichkeit ist es auch, dass auf Maßnahmen verzichtet wird, die aufgrund der vorliegenden Ergebnisse aus Versuchen von unabhängigen Einrichtungen (z. B. Kammern, Landesanstalten oder Hochschulen) keine Wirkung auf Ertrag und/oder Qualität erwarten lassen, weil diese nicht nur die Kosten erhöhen, sondern auch den Management-Aufwand. Inwiefern sich die Erwartungen der in dieser Publikation zusammengestellten Maßnahmen auf Ertragsniveau, Ressourceneinsatz, N-Überschüsse, Wirtschaftlichkeit und Biodiversität unter den gegebenen sozioökonomischen Bedingungen (Kosten und Erzeugerpreise, Förderprogram-

me) im Einzelfall erfüllen, sollte sowohl in Feldversuchen als auch in On-Farmversuchen ermittelt werden.

Erklärung zu Interessenskonflikten

Die Autoren/die Autorinnen erklären, dass keine Interessenskonflikte vorliegen.

Literatur

Agora Agriculture, 2024: Agriculture, forestry and food in a climate neutral EU. The land use sectors as part of a sustainable food system and bioeconomy. www.agora-agriculture.org.

Alvarez, R., 2005: A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. *Soil Use and Management* **21**, 38–52, DOI: 10.1111/j.1475-2743.2005.tb00105.x.

Anglade, J., G. Billen, J. Garnier, 2015: Relationships for estimating N₂ fixation in legumes: incidence for N balance of legume-based cropping systems in Europe. *Ecosphere* **6**, 37, DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00088-X.

Asbjørnsen, H., V. Hernandez-Santana, M. Liebman, J. Bayala, J. Chen, M. Helmers, C.K. Ong, L.A. Schulte, 2014: Targeting perennial vegetation in agricultural landscapes for enhancing ecosystem services. *Renewable Agriculture and Food Systems* **29**, 101–125, DOI: 10.1017/S1742170512000385.

Ball, B.C., C.A. Watson, J.A. Baddeley, 2007: Soil physical fertility, soil structure and rooting conditions after ploughing organically managed grass/clover swards. *Soil Use and Management* **23**, 20–27, DOI: 10.1111/j.1475-2743.2006.00059.x.

Barot, S., V. Allard, A. Cantarel, J. Enjalbert, A. Gauffreteau, I. Goldringer, J.-C. Lata, X. Le Roux, A. Niboyet, E. Porcher, 2017: Designing mixtures of varieties for multifunctional agriculture with the help of ecology. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **37**, 13, DOI: 10.1007/s13593-017-0418-x.

Basche, A.D., M.S. DeLonge, 2019: Comparing infiltration rates in soils managed with conventional and alternative farming methods: A meta-analysis. *PloS one* **14**, e0215702, DOI: 10.1371/journal.pone.0215702.

Baumgärtel, G., K. Fruchtenicht, U. Hege, J. Heyn, K. Orlovius, 1999: Kalium-Düngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Richtwerte für die Gehaltsklasse C. Standpunkt. VDLUFA, Darmstadt.

Beckman, J., M. Ivancic, J. Jelliffe, 2022: Market impacts of Farm to Fork: Reducing agricultural input usage. *Applied Economic Perspectives and Policy* **44**, 1995–2013, DOI: 10.1002/aep.13176.

Bedoussac, L., E.-P. Journet, H. Hauggaard-Nielsen, C. Naudin, G. Corre-Hellou, E.S. Jensen, L. Prieur, E. Justes, 2015: Ecological principles underlying the increase of productivity achieved by cereal-grain legume intercrops in organic farming. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **35**, 911–935, DOI: 10.1007/s13593-014-0277-7.

- Beer, H., L. Kottmann, 2020:** Ackerbaustrategie 2035 des BMEL. Journal für Kulturpflanzen **72** (7), DOI: 10.5073/JfK.2020.07.03.
- Beiküfner, M., I. Kühling, M.E. Vergara-Hernandez, G. Broll, D. Trautz, 2024:** Impact of mechanical weed control on soil N dynamics, soil moisture, and crop yield in an organic cropping sequence. Nutrient Cycling in Agroecosystems **129**, 223–238, DOI: 10.1007/s10705-024-10370-9.
- Bengtsson, J., J. Ahnström, A.C. Weibull, 2005:** The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis. Journal of Applied Ecology **42**, 261–269, DOI: 10.1111/j.1365-2664.2005.01005.x.
- Betancur-Corredor, B., B. Lang, D.J. Russell, 2022:** Reducing tillage intensity benefits the soil micro- and mesofauna in a global meta-analysis. European Journal of Soil Science **73**, DOI: 10.1111/ejss.13321.
- Blair, N., R.D. Faulkner, A.R. Till, P.R. Poulton, 2006:** Long-term management impacts on soil C, N and physical fertility part I: Broadbalk experiment. Soil Tillage Research **91**, 30–38, DOI: 10.1016/j.still.2005.11.002.
- Blanchy, G., G. Bragato, C. Di Bene, N. Jarvis, M. Larsbo, K. Meurer, S. Garré, 2023:** Soil and crop management practices and the water regulation functions of soils: a qualitative synthesis of meta-analyses relevant to European agriculture. SOIL **9**, 1–20, DOI: 10.5194/soil-9-1-2023.
- Blanco-Canqui, H., B.J. Wienhold, V.L. Jin, M.R. Schmer, L.C. Kibet, 2017:** Long-term tillage impact on soil hydraulic properties. Soil and Tillage Research **170**, 38–42, DOI: 10.1016/j.still.2017.03.001.
- Blanco-Canqui, H., S.J. Ruis, 2020:** Cover crop impacts on soil physical properties: A review. Soil Science Society of America Journal **84**, 1527–1576, DOI: 10.1002/saj2.20129.
- Blanco-Canqui, H., C.S. Wortmann, 2020:** Does occasional tillage undo the ecosystem services gained with no-till? A review. Soil and Tillage Research **198**, 104534, DOI: 10.1016/j.still.2019.104534.
- Bodner, G., A. Zeiser, K. Keiblinger, C. Rosinger, S.K. Winkler, C. Stumpp, T. Weninger, 2023:** Managing the pore system: Regenerating the functional pore spaces of natural soils by soil-health oriented farming systems. Soil and Tillage Research **234**, 105862, DOI: 10.1016/j.still.2023.105862.
- Boetzel, F.A., A. Douhan Sundahl, H. Friberg, M. Viketoft, G. Bergkvist, O. Lundin, 2023:** Under-sowing oats with clovers supports pollinators and suppresses arable weeds without reducing yields. Journal of Applied Ecology **60**, 614–623, DOI: 10.1111/1365-2664.14361.
- Braim, M.A., K. Chaney, D.R. Hodgson, 1992:** Effects of simplified cultivation on the growth and yield of spring barley on a sandy loam soil. 2. Soil physical properties and root growth; root: shoot relationships, inflow rates of nitrogen; water use. Soil Tillage Research **22**, 173–187, DOI: 10.1016/0167-1987(92)90030-f.
- Breuer, J., V. König, D. Merkel, H.-W. Olf, B. Steingrobe, E. Stimpfl, A.H. Wissemeier, W. Zorn, 2006:** Pflanzenanalyse zur Diagnose des Ernährungszustandes von Kulturpflanzen in Land-wirtschaft, Gemüse- und Obstbau. VDLUFA-Verlag, Speyer.
- Brock, C., D. Möller, T. Dannehl, B. Blumenstein, 2016:** Sicherung der Humusversorgung mit Grün- und Strohdüngung. Endbericht. URL: www.orgprints.org/30763/.
- Brust, J., R. Gerhards, T. Karanisa, L. Ruff, A. Kipp, 2011:** Warum Untersaaten und Zwischenfrüchte wieder Bedeutung zur Unkrautregulierung in Europäischen Ackerbausystemen bekommen. Gesunde Pflanzen **63**, 191–198, DOI: 10.1007/s10343-011-0263-9.
- Büchi, L., M. Wendling, C. Amossé, B. Jeangros, S. Sinaj, R. Charles, 2017:** Long and short term changes in crop yield and soil properties induced by the reduction of soil tillage in a long term experiment in Switzerland. Soil and Tillage Research **174**, 120–129, DOI: 10.1016/j.still.2017.07.002.
- Bünemann, E.K., M. Reimer, E. Smolders, S.R. Smith, M. Bigalke, A. Palmqvist, K.K. Brandt, K. Möller, R. Harder, L. Hermann, B. Speiser, F. Oudshoorn, A.K. Løes, J. Magid, 2023:** Do contaminants compromise the use of recycled nutrients in organic agriculture? A review and synthesis of current knowledge on contaminant concentrations, fate in the environment and risk assessment. Science of the Total Environment **912**, 168901, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.168901.
- Burmeister, J., B. Panassiti, F. Heine, S. Wolfrum, J. Moriniere, 2023:** Perennial alternative crops for biogas production increase arthropod abundance and diversity after harvest – results of suction sampling and metabarcoding. European Journal of Entomology **120**, 59–69, DOI: 10.14411/eje.2023.009.
- Chen, M., A. Schievano, S. Bosco, A. Montero-Castaño, G. Tamburini, M. Pérez-Soba, D. Makowski, 2023:** Evidence map of the benefits of enhanced-efficiency fertilisers for the environment, nutrient use efficiency, soil fertility and crop production. Environmental Research Letters **18**, 043005, DOI: 10.1088/1748-9326/acb833.
- Clement, T., C.L. Bielders, A. Degré, 2024:** How much do conservation cropping practices mitigate runoff and soil erosion under Western European conditions: A focus on conservation tillage, tied ridging and winter cover crops. Soil Use and Management **40** (2), e13047, DOI: 10.1111/sum.13047.
- Clough, Y., S. Kirchweber, J. Kantelhardt, 2020:** Field sizes and the future of farmland biodiversity in European landscapes. Conservation Letters **13** (6), e12752, DOI: 10.1111/conl.12752.
- Cooper, J., M. Baranski, G. Stewart, M. Nobel-de Lange, P. Bàrberi, A. Fließbach, J. Peigné, A. Berner, C. Brock, M. Casagrande, O. Crowley, C. David, A. De Vliegheer, T.F. Döring, A. Dupont, M. Entz, M. Grosse, T. Haase, C. Halde, V. Hammerl et al., 2016:** Shallow non-inversion tillage in organic farming maintains crop yields and increases soil C stocks: a meta-analysis. Agronomy for Sustainable Development **36**, 1–20, DOI: 10.1007/s13593-016-0354-1.
- Crippa, M., E. Solazzo, D. Guizzardi, F. Monforti, F.N. Tubiello, A. Leip, 2021:** Food systems are responsible for a third of global anthropogenic GHG emissions. Nature Food **2**, 1–12, DOI: 10.1038/s43016-021-00225-9.

- Danne, M., O. Mußhoff, M. Schulte, 2019:** Analysing the importance of glyphosate as part of agricultural strategies: A discrete choice experiment. *Land Use Policy* **86**, 189–207, DOI: 10.1016/j.landusepol.2019.04.023.
- Daryanto, S., I. Wang, P.A. Jacinthe, 2017:** Meta-analysis of phosphorous loss from no-till soils. *Journal of Environmental Quality* **46**, 1028–1037, DOI: 10.2134/jeq2017.03.0121.
- Deubel, A., B. Hofmann, D. Orzessek, 2011:** Long-term effects of tillage on stratification and plant availability of phosphate and potassium in a loess chernozem. *Soil and Tillage Research* **117**, 85–92, DOI: 10.1016/j.still.2011.09.001.
- De Souza, D.M., D.F. Flynn, F. De Clerck, R.K. Rosenbaum, H. de Melo Lisboa, T. Koellner, 2013:** Land use impacts on biodiversity in LCA: proposal of characterization factors based on functional diversity. *The International Journal of Life Cycle Assessment* **18**, 1231–1242, DOI: 10.1007/s11367-013-0578-0.
- Dieckmann, J., H.-J. Koch, 2008:** Einfluss langjährig differenzierter Bodenbearbeitung auf chemische Bodeneigenschaften und Zuckerrübenenertrag. *Pflanzenbauwissenschaften* **12**, 22–31.
- Diercks, R., R. Heitefuss, 1990:** Integrierter Landbau. Systeme umweltbewusster Pflanzenproduktion. Grundlagen-Praxiserfahrungen-Entwicklungen. BLV Verlagsgesellschaft München – Wien – Zürich.
- Dodd, R.J., A.N. Sharpley, 2017:** Conservation practice effectiveness and adoption: unintended consequences and implications for sustainable phosphorus management. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **104**, 373–392, DOI: 10.1007/s10705-015-9748-8.
- EASAC (European Academies – Science Advisory Board), 2022:** Regenerative agriculture in Europe - A critical analysis of contributions to European Union Farm to Fork and Biodiversity Strategies. EASAC policy report 44, URL: www.easac.eu.
- El Jarroudi, M., L. Kouadio, M. Beyer, J. Junk, L. Hoffmann, B. Tychon, H. Maraite, C.H. Bock, P. Delfosse, 2015:** Economics of a decision-support system for managing the main fungal diseases of winter wheat in the Grand-Duchy of Luxembourg. *Field Crops Research* **172**, 32–41, DOI: 10.1016/j.fcr.2014.11.012.
- ECAF (European Conservation Agriculture Federation), 2024:** What is Conservation Agriculture? URL: <https://ecaf.org/what-is-conservation-agriculture/>.
- Ehlers, W., J.W. Goss, F.R. Boone, 1986:** Einfluss der Bodenbearbeitung auf Bodenwasserhaushalt, Durchwurzelung und Wasserentzug. *Kali-Briefe* **18**, 107–125.
- Ehlers, W., 1996:** Wasser in Boden und Pflanze. Ulmer-Verlag, Stuttgart.
- Ehlers, W., D. Werner, T. Mähner, 2000:** Wirkung mechanischer Belastung auf Gefüge und Ertragsleistung einer Löss-Parabraunerde mit zwei Bearbeitungssystemen. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **163**, 321–333, DOI: 10.1002/1522-2624(200006)163:3<321::AID-JPLN321>3.0.CO;2-Y.
- Eisenhauer, N., A. Lanoue, T. Strecker, S. Scheu, K. Steinauer, M.P. Thakur, L. Mommer, 2017:** Root biomass and exudates link plant diversity with soil bacterial and fungal biomass. *Scientific reports* **7**, 1–8, DOI: 10.1038/srep44641.
- Epper, C.A., L. Zavattaro, G.L. Velthof, L. Thuriès, T. Steinsberger, P. Sørensen, K. Richards, A. Oberson, K. Möller, L. Merbold, H. Menzi, F. Liebisch, F. Levvasseur, F. Leiber, T. Kupper, D. Krol, D. Janke, M. Hofmeier, N.J. Hoekstra, T. Guillaume et al., 2025:** Optimizing nitrogen use efficiency in European livestock systems: From feed to plant growth. *Advances in Agronomy* **191**, 277–362, DOI: 10.1016/bs.agron.2025.01.003.
- Fahrig, L., J. Baudry, L. Brotons, F.G. Burel, T.O. Crist, R.J. Fuller, C. Sirami, G.M. Siriwardena, J.-L. Martin, 2011:** Functional landscape heterogeneity and animal biodiversity in agricultural landscapes. *Ecology Letters* **14**, 101–112, DOI: 10.1111/j.1461-0248.2010.01559.x.
- Federolf, C.P., M. Westerschulte, H.W. Olfs, G. Broll, D. Trautz, 2016:** Enhanced nutrient use efficiencies from liquid manure by positioned injection in maize cropping in northwest Germany. *European Journal of Agronomy* **75**, 130–138, DOI: 10.1016/j.eja.2016.01.016.
- Federolf, C.P., M. Westerschulte, H.W. Olfs, G. Broll, D. Trautz, 2017:** Nitrogen dynamics following slurry injection in maize: Crop development. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **107**, 19–31, DOI: 10.1007/s10705-016-9813-y.
- Feike, T., M. Frei, C. Germeier, A. Herrmann, K.J. Hülsbergen, H.-P. Kaul, M. Komanda, L. Kottmann, K. Möller, C. Nendel, G. Pasda, C. Pekrun, S. Seidel, H. Stützel, N. Wrage-Mönnig, 2022:** Wissenschaftliche Grundlagen zum Strategiediskurs für einen nachhaltigen Pflanzenbau. *Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment* **73**, 153–192, DOI: 10.2478/boku-2022-0011.
- Fenster, T.L.D., C.E. LaCanne, J.R. Pecinka, R.B. Schmid, M.M. Bredeson, K.M. Busenitz, A.M. Michels, K.D. Welch, J.G. Lundgren 2021:** Defining and validating regenerative farm systems using a composite of ranked agricultural practices. *F1000Research* **10**, 115, DOI: 10.12688/f1000research.28450.1.
- Finckh, M., E. Gacek, H. Goyeau, C. Lannou, U. Merz, C. Mundt, L. Munk, J. Nadziak, A. Newton, C. de Vallaville-Pope, M. Wolfe, 2000:** Cereal variety and species mixtures in practice, with emphasis on disease resistance. *Agronomie* **20**, 813–837, DOI: 10.1051/agro:2000177.
- Fishkis, O., J. Weller, J. Lehmhus, J. Strassemer, H.-J. Koch, 2024:** Ecological and economic evaluation of conventional and new weed control techniques in row crops. *Agriculture Ecosystems & Environment* **360**, 108786, DOI: 10.1016/j.agee.2023.108786.
- Fishkis, O., H.-J. Koch, 2023:** Effect of mechanical weeding on soil erosion and earthworm abundance in sugar beet (*Beta vulgaris* L.). *Soil and Tillage Research* **225**, 105548, DOI: 10.1016/j.still.2022.105548.
- Florence, A.M., A.M. McGuire, 2020:** Do diverse cover crop mixtures perform better than monocultures? A systematic review. *Agronomy Journal* **112**, 3513–3534, DOI: 10.1002/agj2.20340.

- FOLU, 2019:** The Food and Land Use Coalition. Growing Better: Ten Critical Transitions to Transform Food and Land Use. The Global Consultation Report of the Food and Land Use Coalition. FOLU. Available at URL: <https://www.foodandland-usecoalition.org/wpcontent/uploads/2019/09/FOLU-GrowingBetter-GlobalReport.pdf>.
- Garland, G., A. Edlinger, S. Banerjee, F. Degruene, P. García-Palacios, D.S. Pescador, C. Herzog, S. Romdhane, A. Saghai, A. Spor, C. Wagg, S. Hallin, F.T. Maestre, L. Philippot, M.C. Rillig, M.G.A. van der Heijden, 2021:** Crop cover is more important than rotational diversity for soil multifunctionality and cereal yields in European cropping systems. *Nature Food* **2**, 28–37, DOI: 10.1038/s43016-020-00210-8.
- Garibaldi, L.A., I. Bartomeus, R. Bommarco, A.M. Klein, S.A. Cunningham, M.A. Aizen, V. Boreux, M.P.D. Garratt, L.G. Carvalheiro, C. Kremen, C.L. Morales, C. Schüepp, N.P. Chacoff, B.M. Freitas, V. Gagic, A. Holzschuh, B.K. Klatt, K.M. Krewenka, S. Krishnan, M.M. Mayfield et al., 2015:** EDITOR'S CHOICE: REVIEW: Trait matching of flower visitors and crops predicts fruit set better than trait diversity. *Journal of Applied Ecology* **52**, 1436–1444, DOI: 10.1111/1365-2664.12530.
- Gaynor, J.D., W.I. Findlay, 1995:** Soil and phosphorus loss from conservation and conventional tillage in corn production. *Journal of Environmental Quality* **24**, 734–741, DOI: 10.2134/jeq1995.00472425002400040026x.
- Gentsch, N., F.L. Riechers, J. Boy, D. Schweneker, U. Feuerstein, D. Heuermann, G. Guggenberger, 2024:** Cover crops improve soil structure and change organic carbon distribution in macroaggregate fractions. *SOIL* **10**, 139–150, DOI: 10.5194/soil-10-139-2024.
- Gentsch, N., J. Boy, J.D.K. Batalla, D. Heuermann, N. von Wirén, D. Schweneker, U. Feuerstein, J. Groß, B. Bauer, B. Reinhold-Hurek, T. Hurek, F.C. Céspedes, G. Guggenberger, 2020:** Catch crop diversity increases rhizosphere carbon input and soil microbial biomass. *Biology and Fertility of Soils* **56**, 943–957, DOI: 10.1007/s00374-020-01475-8.
- Ghafoor, A., C. Poeplau, T. Kätterer, 2017:** Fate of straw- and root-derived carbon in a Swedish agricultural soil. *Biology and Fertility of Soils* **53**, 257–267, DOI: 10.1007/s00374-016-1168-7.
- Giller, K.E., J.A. Andersson, M. Corbeels, J. Kirkegaard, D. Mortensen, O. Erenstein, B. Vanlauwe, 2015:** Beyond conservation agriculture. *Frontiers in Plant Science* **6**, 870, DOI: 10.3389/fpls.2015.00870.
- Giller, K.E., R. Hijbeek, J.A. Andersson, J. Sumberg, 2021:** Regenerative Agriculture: An agronomic perspective. *Outlook on Agriculture* **50**, 13–25, DOI: 10.1177/0030727021998.
- Gonzalez-Dugo, V., J.L. Durand, F. Gastal, 2010:** Water deficit and nitrogen nutrition of crops. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **30**, 529–544, DOI: 10.1051/agro/2009059.
- Gordon, E., F. Davila, C. Riedy, 2022:** Transforming landscapes and mindscapes through regenerative agriculture. *Agriculture and Human Values* **39**, 809–826, DOI: 10.1007/s10460-021-10276-0.
- Gruber, S., C. Pekrun, J. Möhring, W. Claupein, 2012:** Long-term yield and weed response to conservation and stubble tillage in SW Germany. *Soil and Tillage Research* **121**, 49–56, DOI: 10.1016/j.still.2012.01.015.
- Guan, D., Y. Zhang, M.M. Al-Kaisi, Q. Wang, M. Zhang, Z. Li, 2015:** Tillage practices effect on root distribution and water use efficiency of winter wheat under rain-fed condition in the North China Plain. *Soil and Tillage Research* **146**, 286–295, DOI: 10.1016/j.still.2014.09.016.
- Guenet, B., B. Gabrielle, C. Chenu, D. Arrouays, J. Balesdent, M. Bernoux, E. Bruni, J.-P. Caliman, R. Cardinael, S. Chen, P. Ciais, D. Desbois, J. Fouche, S. Frank, C. Henault, E. Lugato, V. Naipal, T. Nesme, M. Obersteiner, S. Pellerin et al., 2021:** Can N₂O emissions offset the benefits from soil organic carbon storage? *Global Change Biology* **27**, 237–256, DOI: 10.1111/gcb.15342.
- Guzman, A., M. Montes, L. Hutchins, G. DeLaCerde, P. Yang, A. Kakouridis, R.M. Dahlquist-Willard, M.K. Firestone, T. Bowles, C. Kremen, 2021:** Crop diversity enriches arbuscular mycorrhizal fungal communities in an intensive agricultural landscape. *New Phytologist* **231**, 447–459, DOI: 10.1111/nph.17306.
- Häfner, B., J. Dauber, S. Schittenhelm, L.M. Böning, M. Darnauer, L.L. Wenkebach, F. Nürnberger, 2022:** The perennial biogas crops cup plant (*Silphium perfoliatum* L.) and field grass pose better autumn and overwintering habitats for arthropods than silage maize (*Zea mays* L.): *Global Change Biology Bioenergy* **15**, 346–364, DOI: 10.1111/gebb.13027.
- Haddaway, N.R., K. Hedlund, L.E. Jackson, T. Kätterer, E. Lugato, I.K. Thomsen, H.B. Jørgensen, P.-E. Isberg, 2017:** How does tillage intensity affect soil organic carbon? A systematic review. *Environmental Evidence* **6**, 1–48, DOI: 10.1186/s13750-017-0108-9.
- Haenke, S., B. Scheid, M. Schaefer, T. Tschardtke, C. Thies, 2009:** Increasing syrphid fly diversity and density in sown flower strips within simple vs. complex landscapes. *Journal of Applied Ecology* **46**, 1106–1114, DOI: 10.1111/j.1365-2664.2009.01685.x.
- Haider, G., D. Steffens, G. Moser, C. Müller, C.I. Kammann, 2017:** Biochar reduced nitrate leaching and improved soil moisture content without yield improvements in a four-year field study. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **237**, 80–94, DOI: 10.1016/j.agee.2016.12.019.
- Håkansson, I., 2005:** Machinery-Induced Compaction of Arable Soils. Incidence - Consequences - Counter-Measures. Uppsala, Sweden: Division of Soil Management.
- Halvorson, A.D., B.J. Wienhold, A.L. Black, 2002:** Tillage, nitrogen, and cropping system effects on soil carbon sequestration. *Soil Science Society of America Journal* **66**, 906–912, DOI: 10.2136/sssaj2002.9060.
- Harbur, M.M., M.D. Owen, 2004:** Light and growth rate effects on crop and weed responses to nitrogen. *Weed Science* **52**, 578–583, DOI: 10.1614/WS-03-115R1.
- Hartmann, M., J. Six, 2023:** Soil structure and microbiome functions in agroecosystems. *Nature Reviews Earth & Environment* **4**, 4–18, DOI: 10.1038/s43017-022-00366-w.

- Hass, A.L., U.G. Kormann, T. Tschardtke, Y. Clough, A.B. Baillod, C. Sirami, L. Fahrig, J.-L. Martin, J. Baudry, C. Bertrand, J. Bosch, L. Brotons, F. Burel, R. Georges, D. Giralt, M.Á. Marcos-García, A. Ricarte, G. Siriwardena, P. Batáry, 2018: Landscape configurational heterogeneity by small-scale agriculture, not crop diversity, maintains pollinators and plant reproduction in Western Europe. *Proceedings. Biological Sciences* **285**, DOI: 10.1098/rspb.2017.2242.
- Hauggaard-Nielsen, H., E.S. Jensen, 2005: Facilitative root interactions in intercrops. *Plant and Soil* **274**, 237–250, DOI: 10.1007/s11104-004-1305-1.
- Havlin, J.L., D.E. Kissel, L.D. Maddux, M.M. Claassen, J.H. Long, 1990: Crop rotation and tillage effects on soil organic carbon and nitrogen. *Soil Science Society of America Journal* **54**, 448–452, DOI: 10.2136/sssaj1990.03615995005400020026x.
- Hedke, K., J.A. Verreet, 1999: Efficacy of single fungicide treatments in winter wheat using recommended and reduced dosages. *Journal of Plant Diseases and Protection* **106**, 98–108, URL: <https://www.jstor.org/stable/43215279>.
- Heißenhuber, A., 1994: Kriterien einer ordnungsgemäßen Landbewirtschaftung. In: "Schriften der Gesellschaft für Wirtschafts- und Sozialwissenschaften des Landbaues eV", Band 30, Seite 321–330.
- Heuermann, D., N. Gentsch, G. Guggenberger, B. Reinhold-Hurek, D. Schweneker, U. Feuerstein, M.C. Heuermann, J. Groß, R. Kümmerer, B. Bauer, N. von Wirén, 2022: Catch crop mixtures have higher potential for nutrient carry-over than pure stands under changing environments. *European Journal of Agronomy* **136**, 126504, DOI: 10.1016/j.eja.2022.126504.
- Heyn, J., H.W. Olf, 2018: Wirkungen reduzierter N-Düngung auf Produktivität, Bodenfruchtbarkeit und N-Austragsgefährdung-Beurteilung anhand mehrjähriger Feldversuche. *VDLUFA-Schriftenreihe* **72/2018**. VDLUFA-Verlag Darmstadt.
- Holland, J.M., F.J. Bianchi, M.H. Entling, A.C. Moonen, B.M. Smith, P. Jeanneret, 2016: Structure, function and management of semi-natural habitats for conservation biological control: a review of European studies. *Pest Management Science* **72**, 1638–1651, DOI: 10.1002/ps.4318.
- Holst, F., 2023: Ertragssicherung durch Pflanzenschutz im Wintergetreide. In: *Landesamt für Landwirtschaft, Lebensmittelsicherheit und Fischerei Mecklenburg-Vorpommern - Pflanzenschutz-dienst* – (Hrsg.). Ergebnisse und Empfehlungen 2023 zum Integrierten Pflanzenschutz im Ackerbau.
- Horn, R., 2004: Time dependence of soil mechanical properties and pore functions for arable soils. *Soil Science Society of America Journal* **68**, 1131–1137, DOI: 10.2136/sssaj2004.1131.
- Hüber, C., F. Zettl, J. Hartung, M. Müller-Lindenlauf, 2022: The impact of maize-bean intercropping on insect biodiversity. *Basic and Applied Ecology* **61**, 1–9, DOI: 10.1016/j.baae.2022.03.005.
- Hu, C., Y. Qi, 2013: Long-term effective microorganisms' application promote growth and increase yields and nutrition of wheat in China. *European Journal of Agronomy* **46**, 63–67, DOI: 10.1016/j.eja.2012.12.003.
- Hu, Y., M. Schraml, S. Von Tucher, F. Li, U. Schmidhalter, 2014: Influence of nitrification inhibitors on yields of arable crops: A meta-analysis of recent studies in Germany. *International Journal of Plant Production* **8** (1), 33–50.
- Huynh, H.T., J. Hufnagel, A. Wurbs, S.D. Bellingrath-Kimura, 2019: Influences of soil tillage, irrigation and crop rotation on maize biomass yield in a 9-year field study in Müncheberg, Germany. *Field Crops Research* **241**, 107565, DOI: 10.1016/j.fcr.2019.107565.
- Isbell, F., D. Craven, J. Connolly, M. Loreau, B. Schmid, C. Beierkuhnlein, T.M. Bezemer, C. Bonin, H. Bruehlheide, E. De Luca, A. Ebeling, J.N. Griffin, Q. Guo, Y. Hautier, A. Hector, A. Jentsch, J. Kreyling, V. Lanta, P. Manning, S.T. Meyer et al., 2015: Biodiversity increases the resistance of ecosystem productivity to climate extremes. *Nature* **526**, 574–577, DOI: 10.1038/nature15374.
- Ivezić, V., Y. Yu, W.V.D. Werf, 2021: Crop yields in European agroforestry systems: a meta-analysis. *Frontiers in sustainable food systems* **5**, 606631, DOI: 10.3389/fsufs.2021.606631.
- Jacobs, A., S. Jungert, H.-J. Koch, 2015: Soil organic carbon as affected by direct drilling and mulching in sugar beet – wheat rotations. *Archives of Agronomy and Soil Science* **61**, 1079–1087, DOI: 10.1080/03650340.2014.981669.
- Jeffery, S., D. Abalos, M. Prodana, A.C. Bastos, J.W. van Groenigen, B.A. Hungate, F. Verheijen, 2017: Biochar boosts tropical but not temperate crop yields. *Environmental Research Letters* **12**, 053001, DOI: 10.1088/1748-9326/aa67bd.
- Jordon, M.W., K.J. Willis, P.-C. Bürkner, N.R. Haddaway, P. Smith, G. Petrokofsky, 2022: Temperate Regenerative Agriculture practices increase soil carbon but not crop yield - a meta-analysis. *Environmental Research Letters* **17**, 093001, DOI: 10.1088/1748-9326/ac8609.
- Kay, S., A. Graves, J.H. Palma, G. Moreno, J.V. Rocas-Díaz, S. Aviron, D. Chouvardas, J. Crous-Duran, N. Ferreira-Domínguez, S. García de Jalón, V. Măcicăşan, M.R. Mosquera-Losada, A. Pantera, J.J. Santiago-Freijanes, E. Szerencsits, M. Torralba, P.J. Burgess, F. Herzog, 2019: Agroforestry is paying off – Economic evaluation of ecosystem services in European landscapes with and without agroforestry systems. *Ecosystem services* **36**, 100896, DOI: 10.1016/j.ecoser.2019.100896.
- Kernecker, M., M. Fienitz, C. Nendel, M. Pätzig, K. Pirhofer-Walzl, L. Raatz, M. Schmidt, M. Wulf, J. Zscheischler, 2022: Transition zones across agricultural field boundaries for integrated landscape research and management of biodiversity and yields. *Ecological Solutions and Evidence* **3**, e12122, DOI: 10.1002/2688-8319.12122.
- Kerschberger, M., B. Deller, U. Hege, J. Heyn, H.E. Kape, O. Krause et al., 2000: Bestimmung des Kalkbedarfs von Acker- und Grünlandböden. VDLUFA-Verlag: Darmstadt.
- Khangura, R., D. Ferris, C. Wagg, J. Bowyer, 2023: Regenerative Agriculture - A Literature Review on the Practices and Mechanisms Used to Improve Soil Health. *Sustainability* **15**, 2338, DOI: 10.3390/su15032338.
- Klatt, B.K., A. Holzschuh, C. Westphal, Y. Clough, I. Smit, E. Pawelzik, T. Tschardtke, 2014: Bee pollination improves crop

- quality, shelf life and commercial value. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences* **281**, 20132440, DOI: 10.1098/rspb.2013.2440.
- Koch, H.-J., 2009:** Relations between soil structural properties and sugar beet yield on a Luvisol. *Pflanzenbauwissenschaften* **13**, 49–59.
- Koch, H.-J., J. Dieckmann, A. Büchse, B. Märkländer, 2009:** Yield decrease in sugar beet caused by reduced tillage and direct drilling. *European Journal of Agronomy* **30**, 101–109, DOI: 10.1016/j.eja.2008.08.001.
- Könnecke, G., 1967:** Fruchtfolgen. VEB Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin.
- Körschens, M., J. Rogasik, E. Schulz, 2004:** Humusbilanzierung: Methode zur Beurteilung und Bemessung der Humusversorgung von Ackerland. Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten, URL: <http://www.vdlufa.de>.
- Korányi, D., R. Gallé, A. Torma, N. Gallé-Szpisjak, P. Batáry, 2023:** Small grassland fragments and connectivity support high arthropod functional diversity in highly modified landscapes. *Insect Conservation and Diversity* **16**, 701–711, DOI: 10.1111/icad.12668.
- Krauss, M., M. Wiesmeier, A. Don, F. Cuperus, A. Gättinger, S. Gruber, W.K. Haagsma, J. Peigné, M.C. Palazzoli, F. Schulz, M. van der Heijden, L. Vincent-Caboud, R.A. Wittwer, S. Zikeli, M. Steffens, 2022:** Reduced tillage in organic farming affects soil organic carbon stocks in temperate Europe. *Soil and Tillage Research* **216**, 105262, DOI: 10.1016/j.still.2021.105262.
- Kunz, C., D. Sturm, G. Peteinatos, R. Gerhards, 2016:** Weed suppression of living mulch in sugar beets. *Gesunde Pflanzen* **68**, 145–154, DOI: 10.1007/s10343-016-0370-8.
- Kurth, T., B. Subei, P. Plötner, F. Bünger, M. Havermeier, S. Krämer, 2023:** The Case for regenerative Agriculture in Germany - and Beyond. Boston Consulting Group.
- LaCanne, C.E., J.G. Lundgren, 2018:** Regenerative agriculture: merging farming and natural resource conservation profitably. *PeerJ*, **6**, e4428, DOI: 10.7717/peerj.4428.
- Ladha, J.K., C.K. Reddy, A.T. Padre, C. van Kessel, 2011:** Role of nitrogen fertilization in sustaining organic matter in cultivated soils. *Journal of Environmental Quality* **40**, 1756–1766, DOI: 10.2134/jeq2011.0064.
- Lal, R., 2015:** Soil carbon sequestration and aggregation by cover cropping. *Journal of Soil and Water Conservation* **70**, 329–339, DOI: 10.2489/jswc.70.6.329.
- Landis, D.A., S.D. Wratten, G.M. Gurr, 2000:** Habitat management to conserve natural enemies of arthropod pests in agriculture. *Annual Review of Entomology* **45**, 175–201, DOI: 10.1146/annurev.ento.45.1.175.
- Laufer, D., B. Loibl, B. Märkländer, H.-J. Koch, 2016:** Soil erosion and surface runoff under strip tillage for sugar beet (*Beta vulgaris* L.) in Central Europe. *Soil and Tillage Research* **162**, 1–7, DOI: 10.1016/j.still.2016.04.007.
- Levin, B., 2022:** Regenerative Agriculture as Biodiversity Islands. In: Montagnini, F. (Hrsg.) *Biodiversity Islands: Strategies for Conservation in Human-Dominated Environments*. Topics in Biodiversity and Conservation, vol 20. Springer, Cham, DOI: 10.1007/978-3-030-92234-4_3.
- Li, C., E. Hoffland, T.W. Kuyper, Y. Yu, C. Zhang, H. Li, F. Zhang, W. van der Werf, 2020:** Syndromes of production in intercropping impact yield gains. *Nature Plants* **6**, 653–660, DOI: 10.1038/s41477-020-0680-9.
- Licari, F., F. Boscutti, G. Bacaro, M. Sigura, 2022:** Connectivity, landscape structure, and plant diversity across agricultural landscapes: novel insight into effective ecological network planning. *Journal of Environmental Management* **317**, 115358, DOI: 10.1016/j.jenvman.2022.115358.
- Little, N.G., A. DiTommaso, A.S. Westbrook, Q.M. Ketterings, C.L. Mohler, 2021:** Effects of fertility amendments on weed growth and weed-crop competition: a review. *Weed Science* **69**, 132–146, DOI: 10.1017/wsc.2021.1.
- Liu, Q., Y. Zhao, T. Li, L. Chen, Y. Chen, P. Sui, 2023:** Changes in soil microbial biomass, diversity, and activity with crop rotation in cropping systems: A global synthesis. *Applied Soil Ecology* **186**, 104815, DOI: 10.1016/j.apsoil.2023.104815.
- Lorenz, F., H.W. Olf, K. Schweitzer, W. Zorn, 2017:** Anforderungen an Bodenuntersuchungsmethoden zur Düngedarfsermittlung. Standpunkt des Verband Deutscher Landwirtschaftlicher Untersuchungs- und Forschungsanstalten eV (VDLUFa), Speyer.
- Mannering, J.V., L.D. Meyer, C.B. Johnson, 1966:** Infiltration and erosion as affected by minimum tillage for corn (*Zea mays* L.). *Soil Science Society of America Journal* **30**, 101–105, DOI: 10.2136/sssaj1966.03615995003000010034x.
- Manshanden, M., A. Jellema, W. Sukkel, R. Jongeneel, C.B.V. Alho, A. de Miguel García, L. de Vos, F. Geerling-Eiff, 2023:** Regenerative agriculture in Europe: An overview paper on the state of knowledge and innovation in Europe (No. 2023-058). Wageningen Economic Research, DOI: 10.18174/629483.
- Marcillo, G.S., F.E. Miguez, 2017:** Corn yield response to winter cover crops: An updated meta-analysis. *Journal of Soil and Water Conservation* **72**, 226–239, DOI: 10.2489/jswc.72.3.226.
- Marshall, E.J., A.C. Moonen, 2002:** Field margins in northern Europe: their functions and interactions with agriculture. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **89**, 5–21, DOI: 10.1016/S0167-8809(01)00315-2.
- Mason, P.G., 2021:** Biological control: global impacts, challenges and future directions of pest management. Csiro Publishing.
- Mayer, J., F. Widmer, S. Scheid, A. Fliessbach, 2010:** How effective are 'Effective microorganisms® (EM)'? Results from a field study in temperate climate. *Applied Soil Ecology* **46**, 230–239, DOI: 10.1016/j.apsoil.2010.08.007.
- Mayer, S., M. Wiesmeier, E. Sakamoto, R. Hübner, R. Cardinael, A. Kühnel, I. Kögel-Knabner, 2022:** Soil organic carbon sequestration in temperate agroforestry systems - A

- meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **323**, 107689, DOI: 10.1016/j.agee.2021.107689.
- McGuire, A., 2018:** Regenerative Agriculture: Solid Principle, extraordinary claims. URL: <https://csanr.wsu.edu/regen-ag-solid-principles-extraordinary-claims/>.
- Melander, B., M. Liebman, A.S. Davis, E.R. Gallandt, P. Bàrberi, A.C. Moonen, J. Rasmussen, R. van der Weide, F. Vidotto, 2017:** Non-chemical weed management. *Weed research: Expanding horizons*, 245–270, DOI: 10.1002/9781119380702.ch9.
- Melander, B., I.A. Rasmussen, J.E. Olesen, 2020:** Legacy effects of leguminous green manure crops on the weed seed bank in organic crop rotations. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **302**, 107078, DOI: 10.1016/j.agee.2020.107078.
- Möller, K., S. Höcker, A. Völz, G.J. Sauter, H. Flaig, J. Breuer, 2023:** Untersuchungs- und Demonstrationsvorhaben „regenerative Landwirtschaft“ – Abschlussbericht, DOI: 10.13140/RG.2.2.11116.13444.
- Möller, K., H.J. Reents, 2009:** Effects of various cover crops after peas on nitrate leaching and nitrogen supply to succeeding winter wheat or potato crops. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science* **172**, 277–287, DOI: 10.1002/jpln.200700336.
- Morris, N.L., P.C.H. Miller, J.H. Orson, R.J. Froud-Williams, 2010:** The adoption of non-inversion tillage systems in the United Kingdom and the agronomic impact on soil, crops and the environment—A review. *Soil and Tillage Research* **108**, 1–15, DOI: 10.1016/j.still.2010.03.004.
- Muhammad, I., U.M. Sainja, F. Zhao, A. Khan, R. Ghimire, X. Fu, J. Wang, 2019:** Regulation of soil CO₂ and N₂O emissions by cover crops: A meta-analysis. *Soil and Tillage Research* **192**, 103–112, <https://doi.org/10.1016/j.still.2019.04.020>.
- Munkholm, L.J., R.J. Heck, B. Deen, 2013:** Long-term rotation and tillage effects on soil structure and crop yield. *Soil and Tillage Research* **127**, 85–91, DOI: 10.1016/j.still.2012.02.007.
- Murugan, R., H.-J. Koch, R.G. Joergensen, 2014:** Long-term influence of different tillage intensities on soil microbial biomass, residues and community structure at different depths. *Biology and Fertility of Soils* **50**, 487–498, DOI: 10.1007/s00374-013-0871-x.
- Musto, G.A., P.A. Swanepoel, J.A. Strauss, 2023:** Regenerative agriculture v. conservation agriculture: potential effects on soil quality, crop productivity and whole-farm economics in Mediterranean-climate regions. *The Journal of Agricultural Science* **161**, 328–338, DOI: 10.1017/S0021859623000242.
- Näser, D., 2020:** Regenerative Landwirtschaft. Bodenleben und Pflanzenstoffwechsel verstehen. Ulmer, Stuttgart, ISBN: 978-3818606954.
- Nair, P.K.R., B.T. Kang, D.C.L. Kass, 1995:** Nutrient cycling and soil-erosion control in agroforestry systems. *Agriculture and the environment: bridging food production and environmental protection in developing countries* **60**, 117–138, DOI: 10.2134/asaspecpub60.c7.
- Nair, R.P.K., B.M. Kumar, V.D. Nair, 2021:** Agroforestry Systems in the Temperate Zone. In: Nair, R.P.K., B.M. Kumar, V.D. Nair (eds.) *An Introduction to Agroforestry: Four Decades of Scientific Developments*. 195–232, DOI: 10.1007/978-3-030-75358-0_10.
- Neff, J.C., A.R. Townsend, G. Gleixner, S.J. Lehman, J. Turnbull, W.D. Bowman, 2002:** Variable effects of nitrogen additions on the stability and turnover of soil carbon. *Nature* **419**, 915–917, DOI: 10.1038/nature01136.
- Newton, P., N. Civita, L. Frankel-Goldwater, K. Bartel, C. Johns, 2020:** What is regenerative agriculture? A review of scholar and practitioner definitions based on processes and outcomes. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **4**, 577723, DOI: 10.3389/fsufs.2020.577723.
- Nichols, V., N. Verhulst, R. Cox, B. Govaerts, 2015:** Weed dynamics and conservation agriculture principles: A review. *Field Crops Research* **183**, 56–68, DOI: 10.1016/j.fcr.2015.07.012.
- Nkebiwe, P.M., M. Weinmann, A. Bar-Tal, T. Müller, 2016:** Fertilizer placement to improve crop nutrient acquisition and yield: A review and meta-analysis. *Field Crops Research* **196**, 389–401, DOI: 10.1016/j.fcr.2016.07.018.
- Nunes, M.R., D.L. Karlen, K.S. Veum, T.B. Moorman, C.A. Cambardella, 2020:** Biological soil health indicators respond to tillage intensity: A US meta-analysis. *Geoderma* **369**, 114335, DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114335.
- Olesen, J.E., L.N. Jørgensen, J. Petersen, J.V. Mortensen, 2003:** Effects of rate and timing of nitrogen fertilizer on disease control by fungicides in winter wheat. 1. Grain yield and foliar disease control. *The Journal of Agricultural Science* **140**, 1–13, DOI: 10.1017/S0021859602002885.
- Pahl, O., R.J. Godwin, M.J. Hann, T.W. Waite, 2001:** Cost-effective pollution control by shallow injection of pig slurry into growing crops. *Journal of Agricultural Engineering Research* **80**, 381–390, DOI: 10.1006/jaer.2001.0763.
- Pardon, P., B. Reubens, J. Mertens, K. Verheyen, P. De Frenne, G. De Smet, C. Van Waes, D. Reheul, 2018:** Effects of temperate agroforestry on yield and quality of different arable intercrops. *Agricultural Systems* **166**, 135–151, DOI: 10.1016/j.agry.2018.08.008.
- Pearsons, K.A., C. Chase, E.C. Omondi, G. Zinati, A. Smith, Y. Rui, 2023:** Reducing tillage does not affect the long-term profitability of organic or conventional field crop systems. *Frontiers in Sustainable Food Systems* **6**, 1004256, DOI: 10.3389/fsufs.2022.1004256.
- Pekrun, C., M.H. Messelhäuser, M. Finck, K. Hartung, K. Möller, R. Gerhards, 2023:** Yield, soil Nitrogen content and weed control in six years of conservation agriculture on-farm field trials in Southwest Germany. *Soil and Tillage Research* **227**, 105615, DOI: 10.1016/j.still.2022.105615.
- Petersen, J., 2005:** Competition between weeds and spring wheat for 15N-labelled nitrogen applied in pig slurry. *Weed Research* **45**, 103–113, DOI: 10.1111/j.1365-3180.2004.00429.x.
- Poeplau, C., A. Don, 2015:** Carbon sequestration in agricultural soils via cultivation of cover crops – A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **200**, 33–41, DOI: 10.1016/j.agee.2014.10.024.
- Poulton, P.R., A.E. Johnston, M.J. Glendining, R.P. White, A.S. Gregory, S.J. Clark, W.S. Wilmer, A.J. Macdonald, D.S.**

- Powlson, 2024:** The Broadbalk Wheat Experiment, Rothamsted, UK Crop yields and soil changes during the last 50 years. *Advances in Agronomy* **184**, 173–298, DOI: 10.1016/bs.agron.2023.11.003.
- Priyadarshana, T.S., E.A. Martin, C. Sirami, B.A. Woodcock, E. Goodale, C. Martínez-Núñez, M.-B. Lee, E. Pagani-Núñez, C.A. Raderschall, L. Brotons, A. Rege, A. Ouin, T. Tschardtke, E.M. Slade, 2024:** Crop and landscape heterogeneity increase biodiversity in agricultural landscapes: A global review and meta-analysis. *Ecology Letters* **27**, e14412, DOI: 10.1111/ele.14412.
- Pywell, R.F., K.L. James, I. Herbert, W.R. Meek, C. Carvell, D. Bell, T.H. Sparks, 2005:** Determinants of overwintering habitat quality for beetles and spiders on arable farmland. *Biological Conservation* **123**, 79–90, DOI: 10.1016/j.biocon.2004.10.010.
- Rasmussen, K., 2002:** Influence of liquid manure application method on weed control in spring cereals. *Weed Research* **42**, 287–298, DOI: 10.1046/j.1365-3180.2002.00286.x.
- Rasmussen, L.V., I. Grass, Z. Mehrabi, O.M. Smith, R. Bezner-Kerr, J. Blesh, L.A. Garibaldi, M.E. Isaac, C.M. Kennedy, H. Wittman, P. Batáry, Di Buchori, R. Cerda, J. Chará, D.W. Crowder, K. Darras, K. DeMaster, K. Garcia, M. Gómez, D. Gonthier et al., 2024:** Joint environmental and social benefits from diversified agriculture. *Science* **384**, 87–93, DOI: 10.1126/science.adj1914.
- Redlich, S., E.A. Martin, I. Steffan-Dewenter, 2020:** Sustainable landscape, soil and crop management practices enhance biodiversity and yield in conventional cereal systems. *Journal of Applied Ecology* **58**, 507–517, DOI: 10.1111/1365-2664.13821.
- Rhodes, C.J., 2017:** The imperative for regenerative agriculture. *Science Progress* **100**, 80–129, DOI: 10.3184/003685017X14876775256165.
- Rodale, R., 1983:** Breaking new ground: The search for a sustainable agriculture. *Futurist* **17**, 15–20.
- Rose, T.J., R.H. Wood, M.T. Rose, L. Van Zwieten, 2018:** A re-evaluation of the agronomic effectiveness of the nitrification inhibitors DCD and DMPP and the urease inhibitor NBPT. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **252**, 69–73, DOI: 10.1016/j.agee.2017.10.008.
- Rosinger, C., G. Bodner, L.G. Bernardini, S. Huber, A. Mentler, O. Sae-Tun, B. Scharf, P. Steiner, J. Tintner-Olifiers, K. Keiblinger, 2022:** Benchmarking carbon sequestration potentials in arable soils by on-farm research on innovative pioneer farms. *Plant and Soil* **488**, 137–156, DOI: 10.1007/s11104-022-05626-8.
- Rosinger, C., K. Keiblinger, M. Bieber, L.G. Bernardini, S. Huber, A. Mentler, O. Sae-Tun, B. Scharf, G. Bodner, 2023:** On-farm soil organic carbon sequestration potentials are dominated by site effects, not by management practices. *Geoderma* **433**, 116466, DOI: 10.1016/j.geoderma.2023.116466.
- Rowen, E.K., K.H. Regan, M.E. Barbercheck, J.F. Tooker, 2020:** Is tillage beneficial or detrimental for insect and slug management? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **294**, 106849, DOI: 10.1016/j.agee.2020.106849.
- Ruscoe, W.A., P.R. Brown, S. Henry, N. Van de Weyer, F. Robinson, L.A. Hinds, R.P. Duncan, 2023:** Effects of harvesting and stubble management on abundance of pest rodents (*Mus musculus*) in a conservation agriculture system. *Pest Management Science* **79**, 4757–4764, DOI: 10.1002/ps.7670.
- Sadras, V.O., D. Rodriguez, 2010:** Modelling the nitrogen-driven trade-off between nitrogen utilisation efficiency and water use efficiency of wheat in eastern Australia. *Field Crops Research* **118**, 297–305, DOI: 10.1016/j.fcr.2010.06.010.
- Sadras, V.O., P.T. Hayman, D. Rodriguez, M. Monjardino, M. Bielich, M. Unkovich, B. Mudge, E. Wang, 2016:** Interactions between water and nitrogen in Australian cropping systems: physiological, agronomic, economic, breeding and modelling perspectives. *Crop and Pasture Science* **67**, 1019–1053, DOI: 10.1071/CP16027.
- Sánchez, A.C., S.K. Jones, A. Purvis, N. Estrada-Carmona, A. De Palma, 2022:** Landscape complexity and functional groups moderate the effect of diversified farming on biodiversity: A global meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **332**, 107933, DOI: 10.1016/j.agee.2022.107933.
- Sanginés de Cárcer, P., S. Sinaj, M. Santonja, D. Fossati, B. Jeangros, 2019:** Long-term effects of crop succession, soil tillage and climate on wheat yield and soil properties. *Soil and Tillage Research* **190**, 209–219, DOI: 10.1016/j.still.2019.01.012.
- Schieder, A., 2003:** Erosionsmindernde Kartoffelproduktion unter besonderer Berücksichtigung phytopathologischer Aspekte. Diss. TU München.
- Schmidhalter, U., 2016:** Stickstoff gezielt und effizient düngen. *Landfreund - Das Schweizer Agrarmagazin* **01/2016**, 22–25.
- Schneider, F., A. Don, I. Hennings, O. Schmittmann, S.J. Seidel, 2017:** The effect of deep tillage on crop yield—What do we really know?. *Soil and tillage Research* **174**, 193–204, DOI: 10.1016/j.still.2017.07.005.
- Schoenau, J.J., J.G. Davis, 2006:** Optimizing soil and plant responses to land-applied manure nutrients in the Great Plains of North America. *Canadian Journal of Soil Science* **86**, 587–595, DOI: 10.4141/S05-115.
- Schorpp, Q., A.L. Müller, S. Schrader, J. Dauber, 2016:** Agrarökologisches Potential der Durchwachsenen Silphie (*Silphium perfoliatum* L.) aus Sicht biologischer Vielfalt. *Journal für Kulturpflanzen* **68**, 412–422, DOI: 10.1399/JfK.2016.12.12.
- Schreefel, L., I.J.M. de Boer, C.J. Timler, J.C.J. Groot, M.J. Zwetsloot, R.E. Creamer, A.Pas Schrijver b, H.H.E. van Zanten, R.P.O. Schulte, 2022:** How to make regenerative practices work on the farm: A modelling framework. *Agricultural Systems* **198**, 103371, DOI: 10.1016/j.agsy.2022.103371.
- Schröder, J.J., D. Uenk, G.J. Hilhorst, 2007:** Long-term nitrogen fertilizer replacement value of cattle manures applied to cut grassland. *Plant and Soil* **299**, 83–99, DOI: 10.1007/s11104-007-9365-7.
- Schröder, J.J., G.D. Vermeulen, J.R. Van der Schoot, W. Van Dijk, J.F.M. Huijsmans, G.J.H.M. Meuffels, D.A. Van der Schans, 2015:** Maize yields benefit from injected manure po-

sitioned in bands. *European Journal of Agronomy* **64**, 29–36, DOI: 10.1016/j.eja.2014.12.011.

Schütz, L., A. Gattinger, M. Meier, A. Müller, T. Boller, P. Mäder, N. Mathimaran, 2018: Improving crop yield and nutrient use efficiency via biofertilization—A global meta-analysis. *Frontiers in Plant Science* **8**, 2204, DOI: 10.3389/fpls.2017.02204.

Schut, A.G., E.C. Cooledge, M. Moraine, G.W. Van De Ven, D.L. Jones, D.R. Chadwick, 2021: Reintegration of crop-livestock systems in Europe: An overview. *Frontiers of Agricultural Science and Engineering* **8**, 111–129, DOI: 10.15302/J-FASE-2020373.

Schwartz, R.C., R.L. Baumhardt, S.R. Evett, 2010: Tillage effects on soil water redistribution and bare soil evaporation throughout a season. *Soil and Tillage Research* **110**, 221–229, DOI: 10.1016/j.still.2010.07.015.

Seitz, S., P. Goebes, V.L. Puerta, E.I.P. Pereira, R. Wittwer, J. Six, M.G.A. van der Heijden, T. Scholten, 2019: Conservation tillage and organic farming reduce soil erosion. *Agronomy for Sustainable Development* **39**, 339, DOI: 10.1007/s13593-018-0545-z.

Shah, K.K., B. Modi, H.P. Pandey, A. Subedi, G. Aryal, M. Pandey, J. Shrestha, 2021: Diversified crop rotation: An approach for sustainable agriculture production. *Advances in Agriculture*, ID 8924087, DOI: 10.1155/2021/8924087.

Sirami, C., N. Gross, A.B. Baillod, C. Bertrand, R. Carrié, A. Hass, L. Henckel, P. Miguet, C. Vuillot, A. Alignier, J. Girard, P. Batáry, Y. Clough, C. Violle, D. Giralt, G. Bota, I. Badenhauer, G. Lefebvre, B. Gauffre, A. Vialatte et al., 2019: Increasing crop heterogeneity enhances multitrophic diversity across agricultural regions. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **116**, 16442–16447, DOI: 10.1073/pnas.1906419116.

Smith, M.E., G. Vico, A. Costa, T. Bowles, A.C.M. Gaudin, S. Hallin, C.A. Watson, R. Alarcón, A. Berti, A. Blecharczyk, F.J. Calderon, S. Culman, W. Deen, C.F. Drury, A. García y. García, A. García-Díaz, E. Hernández Plaza, K. Jonczyk, O. Jäck, R.M. Lehman et al., 2023: Increasing crop rotational diversity can enhance cereal yields. *Communications Earth & Environment* **4**, 89, DOI: 10.1038/s43247-023-00746-0.

Steinauer, K., A. Chatzinotas, N. Eisenhauer, 2016: Root exudate cocktails: the link between plant diversity and soil microorganisms? *Ecology and Evolution* **6**, 7387–7396, DOI: 10.1002/ece3.2454.

Steinkellner, S., I. Langer, 2004: Impact of tillage on the incidence of *Fusarium* spp. in soil. *Plant and Soil* **267**, 13–22, DOI: 10.1007/s11104-005-2574-z.

Sun, M., A.X. Ren, Z.Q. Gao, P.R. Wang, F. Mo, L.Z. Xue, M.M. Lei, 2018: Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau. *Field Crops Research* **218**, 24–32, DOI: 10.1016/j.fcr.2017.12.021.

Sweeney, A.E., K.A. Renner, C. Laboski, A. Davis, 2008: Effect of fertilizer nitrogen on weed emergence and growth. *Weed Science* **56**, 714–721, DOI: 10.1614/WS-07-096.1.

Swoboda, P., T.F. Döring, M. Hamer, 2022: Remineralizing soils? The agricultural usage of silicate rock powders: A review. *Science of The Total Environment* **807**, 150976, DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.150976.

Taube, F., M. Bach, L. Breuer, F. Ewert, N. Fohrer, P. Leinweber, T. Müller, H. Wiggering, 2020: Novellierung der Stoffstrombilanzverordnung: Stickstoff- und Phosphor-Überschüsse nachhaltig begrenzen. Fachliche Stellungnahme zur Novellierung der Stoffstrombilanzverordnung. Hrsg. UBA, Texte 200/2020. Verfügbar unter URL: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/novellierung-der-stoffstrombilanzverordnung>.

Tebrügge, F., R.-A. Düring, 1999: Reducing tillage intensity — a review of results from a long-term study in Germany. *Soil and Tillage Research* **53**, 15–28, DOI: 10.1016/S0167-1987(99)00073-2.

Thorup-Kristensen, K., J. Magid, L.S. Jensen, 2003: Catch crops and green manures as biological tools in nitrogen management in temperate zones. *Advances in Agronomy* **79**, 227–302, DOI: 10.1016/S0065-2113(02)79005-6.

Tiemann, L.K., A.S. Grandy, E.E. Atkinson, E. Marin-Spiotta, M.D. McDaniel, 2015: Crop rotational diversity enhances belowground communities and functions in an agroecosystem. *Ecology Letters*, **18**, 761–771, DOI: 10.1111/ele.12453.

Tisdall, J.M., J.M. Oades, 1982: Organic matter and water-stable aggregates in soils. *Journal of Soil Science* **33**, 141–163, DOI: 10.1111/j.1365-2389.1982.tb01755.x.

Tomanová, O., N. Stockfisch, H.-J. Koch, 2006: Einfluss lang-jährig pflugloser Bodenbearbeitung auf Wachstum und Nährstoffversorgung von Zuckerrüben während der Vegetationsperiode. *Pflanzenbauwissenschaften* **10**, 16–25.

Torralba, M., N. Fagerholm, P.J. Burgess, G. Moreno, T. Plieninger, 2016: Do European agroforestry systems enhance biodiversity and ecosystem services? A meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **230**, 150–161, DOI: 10.1016/j.agee.2016.06.002.

Tscharntke, T., D.S. Karp, R. Chaplin-Kramer, P. Batáry, F. DeClerck, C. Gratton, L. Hunt, A. Ives, M. Jonsson, A. Larsen, E.A. Martin, A. Martínez-Salinas, T.D. Meehan, M. O'Rourke, K. Poveda, J.A. Rosenheim, A. Rusch, N. Schellhorn, T.C. Wanger, S. Wratten et al., 2016: When natural habitat fails to enhance biological pest control—Five hypotheses. *Biological Conservation* **204**, 449–458, DOI: 10.1016/j.biocon.2016.10.001.

Unkovich, M.J., J.S. Pate, 2000: An appraisal of recent field measurements of symbiotic N₂ fixation by annual legumes. *Field Crops Research* **65**, 211–228, DOI: 10.1016/S0378-4290(99)00088-X.

Valkama, E., R. Lemola, H. Känkänen, E. Turtola, 2015: Meta-analysis of the effects of under-sown catch crops on nitrogen leaching loss and grain yields in the Nordic countries. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **203**, 93–101, DOI: 10.1016/j.agee.2015.01.023.

Van den Putte, A., G. Govers, J. Diels, K. Gillijns, M. Demuzere, 2010: Assessing the effect of soil tillage on crop growth: A meta-regression analysis on European crop yields

under conservation agriculture. *European Journal of Agronomy* **33**, 231–241, DOI: 10.1016/j.eja.2010.05.008.

Vanderhasselt, A., L. Steinwidder, T. D'Hose, W. Cornelis, 2024: Opening up the subsoil: Subsoiling and bio-subsoilers to remediate subsoil compaction in three fodder crop rotations on a sandy loam soil. *Soil and Tillage Research* **237**, 105956, DOI: 10.1016/j.still.2023.105956.

van der Werf, H.M., J.J. Klooster, D.A. van der Schans, F.R. Boone, B.W. Veen, 1991: The effect of inter-row cultivation on yield of weed-free maize. *Journal of Agronomy and Crop Science* **166**, 249–258, DOI: 10.1111/j.1439-037X.1991.tb00911.x.

Vincent-Caboud, L., M. Casagrande, C. David, M.R. Ryan, E.M. Silva, J. Peigne, 2019: Using mulch from cover crops to facilitate organic no-till soybean and maize production. A review. *Agronomy for Sustainable Development* **39**, 1–15, DOI: 10.1007/s13593-019-0590-2.

Wagg, C., S.F. Bender, F. Widmer, M.G.A. van der Heijden, 2014: Soil biodiversity and soil community composition determine ecosystem multifunctionality. *Proceedings of the National Academy of Sciences* **111**, 5266–5270, DOI: 10.1073/pnas.1320054111.

Weisberger, D., V. Nichols, M. Liebman, 2019: Does diversifying crop rotations suppress weeds? A meta-analysis. *PLoS ONE* **14**, e0219847, DOI: 10.1371/journal.pone.0219847.

Weissengruber, L., K. Möller, M. Puschenreiter, J.-K. Friedel, 2018: Long-term soil accumulation of potentially toxic elements and selected organic pollutants through application of recycled phosphorus fertilizers for organic farming conditions. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **110**, 427–449, DOI: 10.1007/s10705-018-9907-9.

Westerschulte, M., C.P. Federolf, D. Trautz, G. Broll, H.W. Olfs, 2017: Nitrogen dynamics following slurry injection in maize: soil mineral nitrogen. *Nutrient Cycling in Agroecosystems* **107**, 1–17, DOI: 10.1007/s10705-016-9799-5.

Wiesler, F., T. Appel, K. Dittert, T. Ebertseder, T. Müller, L. Nätscher, . . . W. Zorn, 2018: Phosphordüngung nach Bodenuntersuchung und Pflanzenbedarf. Standpunkte des VDLUFA. Speyer.

Wiesler, F., J. Breuer, E. George, J.M. Greef, N. Herwig, F. Holz, . . . K. Näschen, 2024: Standpunkt Wissenschaftlicher Beirat für Düngungsfragen (WBD) zum Einsatz von Biokohlen. *Berichte über Landwirtschaft-Zeitschrift für Agrarpolitik und Landwirtschaft*.

Wiik, L., 2009: Control of fungal diseases in winter wheat. Evaluation of long-term field research in southern Sweden. *Acta Universitatis Agriculturae Sueciae* **97**, 3–45.

Wilson, K.R., R.L. Myers, M.K. Hendrickson, E.A. Heaton, 2022: Different stakeholders' conceptualizations and perspectives of regenerative agriculture reveals more consensus than discord. *Sustainability* **14**, 15261, DOI: 10.3390/su142215261.

Young, M.D., G.H. Ros, W. de Vries, 2021: Impacts of agronomic measures on crop, soil, and environmental indicators: A review and synthesis of meta-analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* **319**, 107551, DOI: 10.1016/j.agee.2021.107551.

Zimmer, J., M. Roschke, D. Schulze, 2005: Influence of different treatments of organic and mineral fertilization on yield, soil organic matter and N-balance of a diluvial sandy soil – results after 45 years long-term field experiment P60 (Groß Kreutz, 1959–2003). *Archives of Agronomy and Soil Science* **51**, 135–149, DOI: 10.1080/03650340400026636.